

Kollektif Etkilerin Nötron Yakalama Reaksiyon Tesir Kesiti Üzerindeki Rolü

Deniz CANBULA

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Programı, 45140, Manisa, Türkiye

e-posta: deniz.canbula@cbu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0283-2698>

Geliş Tarihi: 01.04.2022

Kabul Tarihi: 23.08.2022

Öz

Nötron yakalama reaksiyonu, çekirdeğin yapısal özelliklerinin belirlenmesini ve yakalama reaksiyon mekanizmaları hakkında detaylı bilgi sahibi olunmasını sağlayan önemli reaksiyonlardan bir tanesidir. Bu çalışmada, nötron yakalama reaksiyonu olan $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ reaksiyonuna ait tesir kesiti değerleri farklı seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak 10 MeV gelen parçacık enerjisine kadar TALYS bilgisayar kodu ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, geri kaydırılmış Fermi gaz modeli (Back-Shifted Fermi Gas Model-BSFGM), sabit sıcaklık modeli (Constant Temperature Model-CTM), genelleştirilmiş süperakışkan model (Generalized Superfluid Model-GSM) ve kollektif yarı-klasik Fermi gaz modeli (Collective Semi Classical Fermi Gas Model-CSCFGM) tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel veri tabanından alınan veriler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, modellere ait kalite faktörleri tablo halinde sunulmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda kollektif etkileri en temelde hesaba dahil eden CSCFGM modelin deneysel verileri tekrar sağlamada daha başarılı olduğu ve kollektif etkilerin nötron yakalama reaksiyon tesir kesitleri üzerinde baskın rol oynadığı sunulmuştur. Dolayısıyla, ileride yapılacak olan nötron yakalama reaksiyon analizlerinde CSCFGM'nin kullanılabilecek bir model olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler

Kollektif etkiler;
Nötron yakalama reaksiyonu; Nükleer seviye yoğunluğu modelleri; TALYS

Role of the Collective Effects on Neutron Capture Reaction Cross Section

Abstract

The neutron capture reaction is one of the important reactions that provides the determination of the structural properties of the nucleus and detailed information about the capture reaction mechanisms. In this study, cross section values of $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ reaction, which is a neutron capture reaction, were calculated with TALYS computer code up to 10 MeV incident particle energy using different level density models. In the calculations, back-shifted Fermi gas model (BSFGM), constant temperature model (CTM), generalized superfluid model (GSM), and collective semi-classical Fermi gas model (CSCFGM) were preferred. The obtained results were compared with the data taken from the experimental database. In addition, the quality factors of the models were presented in the table. As a result of the calculations, it has been presented that the CSCFGM, which takes the collective effects into account basically, is more successful model to reproduce the experimental data and that the collective effects play a dominant role on the neutron capture reaction cross sections. Therefore, it has been demonstrated that CSCFGM is a model, which can be used for neutron capture reaction analyses in the future.

Keywords

Collective effects;
Neutron capture reaction; Nuclear level density models; TALYS

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Nötron yakalama reaksiyonları, yıldız nükleosentezinden nükleer reaktörlere kadar çok çeşitli nükleer uygulamalar için önem arz etmektedir (Tagliente vd. 2010, Quesada Molina vd. 2013, Santoro 2013, Ronen 2001). Radyoaktif çekirdeklerin büyük çoğunluğunun nötron yakalama

reaksiyon tesir kesitlerinin hem temel hem de uygulamalı nükleer bilimdeki önemine rağmen bu reaksiyonlar hakkında bilgi eksikliği vardır. Radyoaktif çekirdeklerin kökenini anlamak nükleer bilimdeki en önemli zorluklardan biridir ve bu durumun detaylı analiz yollarından birisi, nükleosentez boyunca üretilen radyoaktif çekirdekler için nötron yakalama tesir kesitlerinin bilinmesidir. Geçtiğimiz yüzyılda, nükleer

reaktörlerde yüksek miktarda enerjiden yararlanabilmek için nötron kaynaklı reaksiyonlardan yararlanılmıştır. Kullanılma amaçlarından birisi, büyük nötron yakalama tesir kesitine sahip çekirdekler yakıtta zehir görevi görerek performansı düşürebilir veya yakıt reaktivitesini kontrol etmek için kasıtlı olarak eklenebilir.

Nötron yakalama reaksiyonları ile ilgili literatürde çok sayıda teorik (Aydın vd. 2008, Tel vd. 2008, Kaplan vd. 2011, Canbula 2017b, Özdoğan vd. 2021, Watanabe vd. 2010) ve deneysel (Gandhi vd. 2021, Makwana vd. 2017, Gandhi vd. 2020, Mulik vd. 2013) çalışma mevcuttur. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar ile nötron bombardımanına tutulan hedef çekirdeklerin oluşturdukları reaksiyonların analizleri yapılmaya çalışılarak literatüre katkı sağlanmaya çalışılmış ve çalışılmaya devam edilmektedir.

Çekirdeklerin nötron-proton sayılarına bağlı dağılımları incelendiğinde, kütle numarası 80 civarında olan çekirdeklerin kararlılıktan uzak olması, süper deforme olmuş şekilleri, titreşim ve dönme serbestlik derecelerinin önemi gibi çeşitli motivasyonlarından dolayı büyük ilgi alanlarından birisi haline gelmiştir. Bu bölge civarında yer alan çekirdekler kollektif ve tek parçacık serbestlik derecelerinin etkileşimini gözlemlemek için idealdir. Son yıllarda, itriyum (Y) izotopları ilginç özelliklerinden (prolate-oblate karışımı, şekil geçişi gibi) dolayı araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. İtريyum izotoplarının teorik modeller için test edilebilme imkanı sunması ve yapılarının teorik olarak izotopik zincirler boyunca daha fazla araştırılabilir olması da önemini artırmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, bir nötron yakalama reaksiyon tesir kesiti üzerinde kollektif etkilerin önemini araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, bir nötron yakalama reaksiyonu olan $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ analiz edilmiştir. Bu reaksiyon ile ilgili çalışmalar 1951 yılında başlamış olup günümüze kadar birçok deneysel grup tarafından farklı farklı teknikler kullanılarak çalışılmıştır (Benoist vd. 1951, Perkin vd. 1958, Booth vd. 1958, Diven vd. 1960, Gibbons vd. 1961, Macklin vd. 1963, Csikai vd. 1967, Macklin ve Gibbons 1967, Stuepegia vd. 1968, Rigaud vd. 1970, Ryves 1971, Voignier vd. 1992). Bu çalışmada yapılan hesaplamalarda, dört farklı nükleer seviye yoğunluğu modeli opsiyonel birer girdi olarak kullanılmış ve tesir kesiti değerleri her model için hesaplanarak modeller hem birbirleri hem de deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Kollektif etkilerin (titreşim ve dönme) doğrudan veya dolaylı

olarak hesaplara dahil edildiği modeller analiz edilerek deneysel verileri sağlayan en başarılı model belirlenmiştir.

Çalışmanın devamında, 2. Bölümde hesaplamalarda kullanılan teorik detaylar, 3. Bölümde elde edilen bulgular ve tartışma, ve 4. Bölümde hesaplamalardan çıkarılan sonuçlar sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1 Nükleer Seviye Yoğunluğu Modelleri

Nükleer seviye yoğunluğu, belirli uyarılma enerjisi civarındaki uyarılmış seviyelerin sayısıdır. Bu uyarılma enerjileri düşük enerjilerde gözle ayırt edilip sayılabilirken artan enerjilerde seviyeler sıklaşır ve sürekli bir dağılım sergilerler. Dolayısıyla, bu sıklaşan dağılım nükleer seviye yoğunluğu olarak adlandırılan bir fonksiyon yardımıyla tanımlanır. İstatistiksel yöntemlerde, özellikle nükleer reaksiyonları tanımlamak için Hauser-Feshbach teorisi (Hauser ve Feshbach 1952) ve nükleer seviye yoğunluğu bilgisi çok önemlidir (Rauscher vd. 1997, Rauscher ve Thielemann 2000, Möller vd. 2009). Nükleer seviye yoğunluğu fonksiyonu ile ilgili ilk çalışma 1937 yılında Bethe (Bethe 1937) tarafından yapılmıştır. En basit ve en temel model olan bu çalışma, Fermi gaz modeli olarak da adlandırılır ve bu modele göre, parçacıklar arası etkileşimin olmadığı, tek parçacık seviyelerinin eşit aralıklarla yerleştirildiği ve kollektif (titreşim ve dönme) etkilerin olmadığı kabul edilir. Uyarılma enerjisi U , spin J ve parite Π 'ye bağlı nükleer seviye yoğunluğu fonksiyonu,

$$\rho(U, J, \Pi) = \frac{1}{2} \frac{2J+1}{2\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp \left[-\frac{(J+\frac{1}{2})^2}{2\sigma^2} \right] \frac{\sqrt{\pi}}{12} \frac{\exp [2\sqrt{aU}]}{a^{1/4} U^{5/4}},$$

(1)

ile verilir (Demetriou ve Goriely 2001, Hilaire ve Goriely 2006, Nerlo-Pomorska vd. 2002, Nerlo-Pomorska vd. 2006, Newton 1956, Dilg vd. 1973, Krusche ve Lieb 1986, von Egidy vd. 1988). Burada σ spin-limit parametresidir. Spinler ve pariteler üzerinden toplam seviye yoğunluğu fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

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

Nükleer seviye yoğunluğunun temel değişkeni olan seviye yoğunluğu parametresi a (Ignatyuk vd. 1975)

$$a(U) = \tilde{a} \left(1 + \delta W \frac{1 - \exp[-\gamma U]}{U} \right) \quad (3)$$

ile elde edilir. \tilde{a} asimptotik seviye yoğunluğu parametresidir ve yüksek enerjilerde gidilecek limit değeri belirler, δW kabuk düzeltme parametresini ve γ sönüm parametresini temsil etmektedir.

Nükleer seviye yoğunluğu modelleri içinde geri-kaydırılmış Fermi gaz modeli (Back-Shifted Fermi Gas Model-BSFGM) (Bethe 1937), Fermi gaz modeli temel alır, ancak farklı olarak nükleon çiftlerini ayrı ayrı uyarılmadan önce ayırmak için gereken enerjiye karşılık gelen bir enerji kayma parametresi içerir. Literatürde en yaygın kullanılan modellerden bir tanesidir. İlerleyen yıllarda, çekirdeğin uyarılma enerjisi bölgesini iki bölümde ele alan sabit sıcaklık model (Constant Temperature Model-CTM) (Gilbert ve Cameron 1965) ortaya konmuştur. Bu modele göre, düşük uyarılma enerjisinden bir eşleşme enerjisine kadar sabit sıcaklık parametresinin geçerli olduğu, eşleşme enerjisinden yüksek enerjilerde Fermi gaz modeli geçerli olduğu kabul edilmektedir. Bu modelde, eşleşme enerjisinin yerinin belirlenmesi ile ilgili bir problem oluşmasına rağmen, nükleer reaksiyon hesaplamalarında düşük enerjilerdeki başarısından dolayı literatürde yaygın olarak kullanılan modellerden bir diğeridir. Benzer başka bir model olan genelleştirilmiş süperakışkan model (Generalized Superfluid Model-GSM) uyarılma enerjisi bölgesini iki bölümde ele alır. Yüksek enerjilerde diğer modeller gibi Fermi gaz modelini temel alırken, düşük uyarılma enerjilerinde süper iletken çiftlenme korelasyonlarını hesaba dahil eder. Böylece, eşleşme enerjisi süperakışkan davranıştan bir faz geçişi ile karakterize edilir. Bu üç modelde de, Ignatyuk'un (Ignatyuk 1975) iyi bilinen seviye yoğunluğu formülasyonu kullanılır. Bu modellerde çekirdeğin dönme ve titreşim etkileri anlamına gelen kollektif etkiler formülasyona birer çarpan olarak

$$\rho(U, a) = K_{rot} K_{vib} \rho_{iç} \quad (4)$$

ile ilave edilerek hesaplamalar yapılmaktadır. Burada, $\rho_{iç}$ yalnızca saf tek parçacık uyarılmalarını tanımlayan nükleer seviye yoğunluğu, K_{rot} ve K_{vib} sırasıyla kollektif etkileri oluşturan dönme ve titreşim etkilerine karşılık gelmektedir.

Yakın zamanda çalışma grubumuz tarafından ortaya konan nükleer seviye yoğunluğu formülasyonunda (Collective Semi Classical Fermi Gas Model-CSCFGM), kollektif etkiler en temelde seviye yoğunluğu parametresinin içerisine dahil edilmiştir (Canbula vd. 2014). Ayrıca, önerdiğimiz bu yeni formülasyon ayarlanabilir tüm parametrelerden arındırılarak kullanılan parametreler fiziksel olarak anlamlandırılmıştır. Modele göre, nükleer seviye yoğunluğu parametresi a ,

$$a(U) = \tilde{a} \left(1 + A_c \frac{S_n}{U} \frac{\exp(-|U-E_0|/\sigma_c'^3)}{\sigma_c'^3} \right) \quad (5)$$

ile elde edilir. Burada, A_c kollektif şiddet, S_n nötron ayrılma enerjisi ve E_0 çift-çift çekirdeklerin ilk 2^+ durumlarının uyarılma enerjisine karşılık gelmektedir. Modelimizin kullanıldığı daha önceki çalışmalarda farklı reaksiyonlardaki etkisi sunulmuştur (Canbula 2017a, Canbula 2020a, Canbula 2020b, Canbula 2021).

Nükleer seviye yoğunluğunun güvenilir bir tanımı, hem düşük hem de yüksek uyarılma enerjisi bölgesindeki bir çekirdeğin uyarılmış seviyelerini tanımlayabilmelidir. Bu nedenle, bu güvenilirliği ve doğruluğu test edebilmek için deneysel olarak bilinen ayrı seviyeler kullanılır. Nükleer seviye yoğunluğunu test etmek için deneysel olarak bilinen ayrı seviyelerden yararlanılır. Deneysel ve teorik değerler arasındaki uyum testini yapabilmek için

$$f_{lev} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=N_L^i}^{N_U^i} \frac{[N_{küm}^i(E_k - k)]^2}{k} \quad (6)$$

formülü kullanılır. Burada, E_L uyarılma enerjisi ile N_L en düşük seviyeyi, E_U uyarılma enerjisi ile N_U en yüksek seviyeyi göstermek üzere, uyarılmış seviyelerin kümülatif sayısı,

$$N_{küm}(E) = N_L + \int_{E_L}^E \rho^{top}(E) dE, \quad (7)$$

formülü ile hesaplanır. Ayrıca, teorik nötron rezonans boşlukları D_0^{teo} , nötron ayrılma enerjisi S_n , spin ve pariyete bağlı nükleer seviye yoğunluğu kullanılarak,

$$\frac{1}{D_0^{teo}} = \sum_{J=|I-\frac{1}{2}|}^{J=I+\frac{1}{2}} \rho(S_n, J, \Pi) \quad (8)$$

formülü yardımıyla hesaplanır. Burada I hedef çekirdeğin toplam açısal momentumudur. Hesaplanan nötron rezonans boşluklarının deneysel veriler ile karşılaştırılması için kullanılacak olan kalite faktörü N çekirdek sayısı olmak üzere,

$$f_{rms} = \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\ln \frac{D_{0,i}^{teo}}{D_{0,i}^{den}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

ile hesaplanır (Capote vd. 2009). En düşük f_{lev} ve f_{rms} değerleri en iyi model sonuçlarına karşılık gelir. En iyi uyum $f_{lev} = 0$ ve $f_{rms} = 1$ olduğu değerlerdir. Nükleer seviye yoğunluğu modellerine ait f_{lev} ve f_{rms} değerleri Çizelge 1 de sunulmuştur. Efektif sonuçların anlamı, kollektif etkileri dahil etmek için herhangi bir belirgin artırma faktörü içermedikleridir.

2.2 TALYS Bilgisayar Kodu

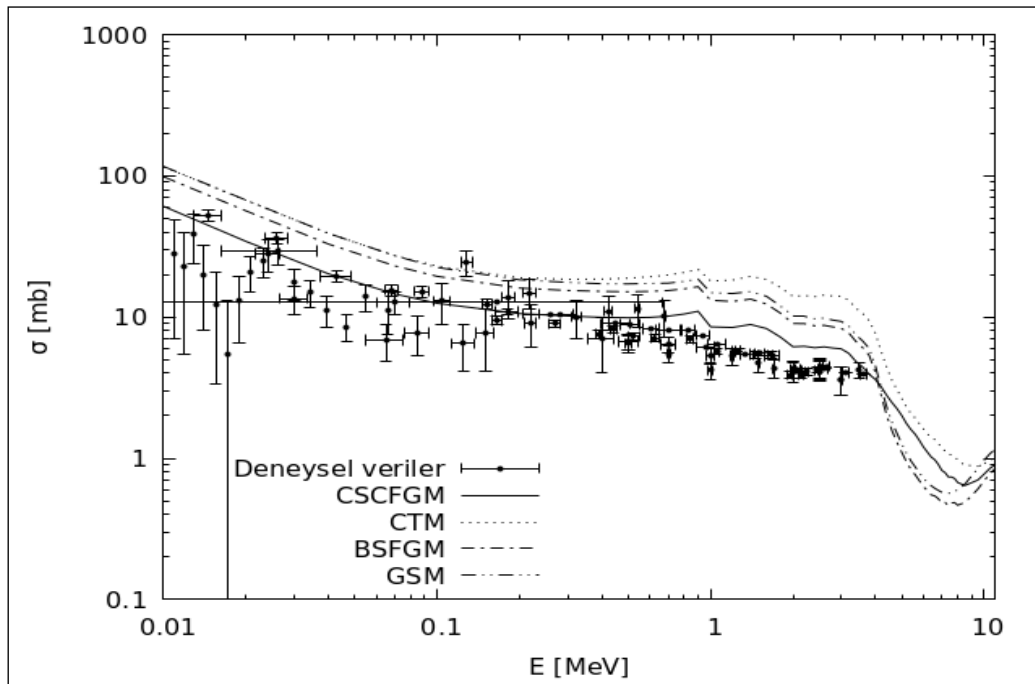
TALYS (Koning 2019) bilgisayar kodu, hafif parçacıklar (proton, nötron, döteron, triton, alfa gibi) ile indüklenen nükleer reaksiyonların simülasyonunu yapmaya imkan tanıyan bir programdır. 1 keV enerjiden 1 GeV enerjiye kadar nükleer reaksiyonların analizine imkan tanır. Ayrıca, programa, nükleer seviye yoğunluğu, gama ışınım şiddet fonksiyonu gibi ifadeler birer opsiyonel girdi

olarak dahil edilerek hesaplamaların daha detaylı analiz edilmesine imkan verir. TALYS bilgisayar kodunun kullanılarak analiz edilmiş nükleer reaksiyonlar literatürde mevcuttur (Özdoğan vd. 2018, Kaplan vd. 2018, Özdoğan vd. 2020, Şekerci vd. 2019, Özdoğan vd. 2021, Şekerci vd. 2020, Sarpün vd. 2019).

3. Bulgular

Bu çalışmada, $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ reaksiyonunun tesir kesiti değerleri literatürde yer alan farklı nükleer seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak TALYS bilgisayar kodu yardımıyla hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Uluslararası deneysel veri tabanı Exfor'dan (Otuka vd. 2014) alınan deneysel veriler (Benoist vd. 1951, Perkin vd. 1958, Booth vd. 1958, Diven vd. 1960, Gibbons vd. 1961, Macklin vd. 1963, Csikai vd. 1967, Macklin ve Gibbons 1967, Stupegia vd. 1968, Rigaud vd. 1970, Ryves 1971, Voignier vd. 1992) ile karşılaştırılarak Şekil 1 ile sunulmuştur.

Şekil 1 incelendiğinde, 10 MeV gelen parçacık enerjisine kadar hesaplama sonuçları görülmektedir. Kollektif etkileri birer çarpan olarak sonradan hesaba dahil eden CTM, BSFGM ve GSM modellerinin deneysel verilerden uzak tahminler verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 1. $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ reaksiyonu için nükleer seviye yoğunluğu modelleri ile hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırması.

Çizelge 1. Nükleer seviye yoğunluğu modellerinin kalite faktörlerinin karşılaştırılması.

Model	Tür	f_{rms}	f_{lev}
CSCFGM	Kollektif	1,53	1,32
BSFGM	Efektif	1,68	28,5
BSFGM	Kollektif	1,71	35,3
CTM	Efektif	1,76	24,2
CTM	Kollektif	1,77	47,8
GSM	Efektif	1,78	28,0
GSM	Kollektif	1,94	47,4

Çizelge 1'e bakıldığında kullanılan tüm modellerin kalite faktörleri görülmektedir. Hem efektif hem de kollektif sonuçlar değerlendirildiğinde CSCFGM modelinin en iyi kalite faktörü değerlerini sağladığı ortaya konmuştur. Bu sonuçları test etmenin en önemli yollarından bir tanesi de reaksiyon hesaplamaları ile sonuçları karşılaştırarak sunmaktır. Bu çalışmada, amaçlardan bir tanesi de, nötron yakalama reaksiyonu olan $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ reaksiyonunun tesir kesiti hesaplamalarında kollektif etkilerin hesaba dahil edilmesinin ne derece önemli olduğunu gösterebilmektir. Şekil 1'deki sonuçlar incelendiğinde görülüyor ki bu reaksiyonun deneysel tesir kesiti değerlerine, hesaplamaların yapıldığı tüm enerji bölgesinde en yakın tahmini yapan nükleer seviye yoğunluğu modeli CSCFGM olmuştur. Reaksiyon çalışmalarında, teorik çalışmalar var olan deneysel verilerin en iyi şekilde açıklanması için oldukça önemlidir. Çünkü, mevcut deneysel verilerin altında ve üstündeki enerji aralıklarında deneysel çalışmaların yapılmasının zor olduğu durumlarda sonuçları iyi açıklayan bir teorik modelin var olmayan bölgelerde de güvenle kullanılarak ön tahmin yapılmasına olanak sağlanmış olur.

4. Tartışma ve Sonuç

Özetlersek, bu çalışmada nötron yakalama reaksiyonlarının tesir kesitleri üzerinde kollektif etkilerin varlığının ne derece önemli olduğu araştırılmıştır. Bunun için, $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ reaksiyonu seçilerek bu reaksiyonun tesir kesiti değerleri dört farklı nükleer seviye yoğunluğu modeli ile ayrı ayrı hesaplanmış ve tahminler deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar iyi bilinen ve literatürde yaygın olarak kullanılan TALYS bilgisayar kodu ile yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde,

Denklem (2.4) ile verilen formülasyona göre kollektif etkilerin birer çarpan şeklinde iyileştirme faktörü olarak en son adımda hesaplamalara dahil edilmesi ile elde edilen sonuçların kalite faktörlerinin oldukça kötü değerlere sahip oldukları Çizelge 1. de açıkça görülmektedir. Dolayısıyla, bu çalışma ile, Denklem (2.5)'in $^{89}\text{Y}(n,g)^{90}\text{Y}$ nötron yakalama reaksiyonunun tesir kesiti hesabında kullanılması ile elde edilen sonuçların hem kalite faktörleri çizelgesinde hem de Şekil 1 de görüldüğü üzere modeller içerisinde en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Böylece, bu çalışma ile incelemiş olduğumuz nötron yakalama reaksiyonunun tesir kesiti hesaplamalarında, kollektif etkilerin hesaplamalara sonradan birer çarpan olarak değil en temelde dahil edilmesi gerekliliği sunulmuştur.

5. Kaynaklar

- Aydin, A., Tel, E., Kaplan, A., 2008. Calculation of 14–15 MeV (n, d) reaction cross sections using newly evaluated empirical and semi-empirical systematics. *Journal of Fusion Energy*, **27**(4), 308-313.
- Benoist, P., Kowarski, L., Netter, F., 1951. Mesures d'absorption des neutrons thermiques par la modulation d'une pile. *Journal of Physics Radium*, **12**(5), 584-589.
- Bethe, H. A., 1937. Nuclear physics B. Nuclear dynamics, theoretical. *Reviews of Modern Physics*, **9**(2), 69.
- Booth, R., Ball, W. P., MacGregor, M., H. 1958. Neutron activation cross sections at 25 keV. *Physical Review*, **112**(1), 226.
- 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.
- Canbula, B., 2017a. Collective effects in deuteron induced reactions of aluminum. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **391**, 73-77.
- Canbula, B., 2017b. Bazı tellür izotoplarının nötron yakalama tesir kesiti analizi. *Celal Bayar University Journal of Science*, **13**(2), 445-455.
- Canbula, B., 2020a. 55Mn İzotopunun fotonükleer tesir kesitleri üzerinde kollektif nükleer seviye yoğunluğunun etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **24**(1), 138-142.
- Canbula, D., 2020b. Cross section analysis of proton-

- induced nuclear reactions of thorium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **478**, 229-232.
- Canbula, D., 2021. Hafif Nadir Toprak Elementi 144Sm İzotopunun Fotonükleer Tesir Kesiti Hesabı. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, **7**(2), 314-320.
- Capote, R., Herman, M., Obložinský, P., Young, P. G., Goriely, S., Belgia, T., ... Reffo, G., 2009. RIPL—reference input parameter library for calculation of nuclear reactions and nuclear data evaluations. *Nuclear Data Sheets*, **110**(12), 3107-3214.
- Csikaj, J., Petö, G., Buczko, M., Miligy, Z., Eissa, N. A., 1967. Radiative capture cross sections for 14.7 MeV neutrons. *Nuclear Physics A*, **95**(1), 229-234.
- Demetriou, P., Goriely, S., 2001. Microscopic nuclear level densities for practical applications. *Nuclear Physics A*, **695**(1-4), 95-108.
- Dilg, W., Schantl, W., Vonach, H., Uhl, M., 1973. Level density parameters for the back-shifted fermi gas model in the mass range $40 < A < 250$. *Nuclear Physics A*, **217**(2), 269-298.
- Diven, B. C., Terrell, J., Hemmendinger, A., 1960. Radiative capture cross sections for fast neutrons. *Physical Review*, **120**(2), 556.
- Gandhi, A., Sharma, A., Kumar, A., Pachuau, R., Lalremruata, B., Suryanarayana, S. V., ... Nayak, B. K., 2020. Measurement of (n, γ), (n, p), and (n, 2 n) reaction cross sections for sodium, potassium, copper, and iodine at neutron energy 14.92 ± 0.02 MeV with covariance analysis. *Physical Review C*, **102**(1), 014603.
- Gandhi, A., Sharma, A., Pachuau, R., Singh, N., Patil, P. N., Mehta, M., ... Kumar, A., 2021. Neutron capture reaction cross section measurement for iodine nucleus with detailed uncertainty quantification. *The European Physical Journal Plus*, **136**(8), 1-17.
- Gibbons, J. H., Macklin, R. L., Miller, P. D., Neiler, J. H., 1961. Average radiative capture cross sections for 7- to 170-keV neutrons. *Physical Review*, **122**(1), 182.
- Gilbert, A., ve Cameron, A. G. W., 1965. A composite nuclear-level density formula with shell corrections. *Canadian Journal of Physics*, **43**(8), 1446-1496.
- Hauser, W., Feshbach, H., 1952. The inelastic scattering of neutrons. *Physical review*, **87**(2), 366.
- Hilaire, S., Goriely, S., 2006. Global microscopic nuclear level densities within the HFB plus combinatorial method for practical applications. *Nuclear Physics A*, **779**, 63-81.
- Ignatyuk, A. V., 1975. Contribution of collective motions to density of excited-states of a nucleus. *Soviet Journal of Nuclear Physics-Ussr*, **21**(1), 10-14.
- Ignatyuk, A. V., Smirenkin, G. N., Tishin, A. S., 1975. Phenomenological description of energy dependence of the level density parameter. *Yadernaya Fizika*, **21**(3), 485-490.
- Kaplan, A., Büyükuşlu, H., Tel, E., Aydın, A., Bölükdemir, M. H., 2011. Investigation of the neutron emission spectra of some deformed nuclei for (n, xn) reactions up to 26 MeV energy. *Indian Journal of Physics*, **85**(11), 1615-1629.
- Kaplan, A., Şekerci, M., Demir, B., 2018, August. Neutron production cross-section calculations for some gamma and proton induced reactions on ⁸⁹Y. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 1994, No. 1, p. 020009). AIP Publishing LLC.
- Koning, A.J., Hilaire, S., Duijvestijn, M.C., 2019. TALYS 1.95 A nuclear reaction program. <http://www.talys.eu/>
- Krusche, B., Lieb, K. P., 1986. Dipole transition strengths and level densities in $A \leq 80$ odd-odd nuclei obtained from thermal neutron capture. *Physical Review C*, **34**(6), 2103.
- Macklin, R. L., Gibbons, J. H., Inada, T., 1963. Neutron capture cross sections near 30 keV using a Moxon-Rae detector. *Nuclear Physics*, **43**, 353-362.
- Macklin, R. L., ve Gibbons, J. H., 1967. Capture-cross-section studies for 30—220-keV neutrons using a new technique. *Physical Review*, **159**(4), 1007.
- Makwana, R., Mukherjee, S., Mishra, P., Naik, H., Singh, N. L., Mehta, M., ... , Khirwadkar, S., 2017. Measurements of the cross sections of the W 186 (n, γ) W 187, W 182 (n, p) Ta 182, Gd 154 (n, 2 n) Gd 153, and Gd 160 (n, 2 n) Gd 159 reactions at neutron energies of 5 to 17 MeV. *Physical Review C*, **96**(2), 024608.
- Möller, P., Sierk, A. J., Ichikawa, T., Iwamoto, A., Bengtsson, R., Uhrenholt, H., Åberg, S., 2009. Heavy-element fission barriers. *Physical Review C*, **79**(6), 064304.
- Mulik, V. K., Naik, H., Suryanarayana, S. V., Dhole, S. D., Prajapati, P. M., Shivashankar, B. S., ... Goswami, A., 2013. Measurement of ⁵⁶Fe (n, p) ⁵⁶Mn reaction

- cross-section at $E_n = 5.9, 9.85, 14.8$ and 15.5 MeV. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **296**(3), 1321-1329.
- Nerlo-Pomorska, B., Pomorski, K., Bartel, J., Dietrich, K., 2002. Nuclear level densities within the relativistic mean-field theory. *Physical Review C*, **66**(5), 051302.
- Nerlo-Pomorska, B., Pomorski, K., Bartel, J., 2006. Shell energy and the level-density parameter of hot nuclei. *Physical Review C*, **74**(3), 034327.
- Newton, T. D., 1956. Shell effects on the spacing of nuclear levels. *Canadian Journal of Physics*, **34**(8), 804-829.
- Otuka, N., Dupont, E., Semkova, V., Pritychenko, B., Blokhin, A. I., Aikawa, M., ... Lalremruata, B., 2014. Towards a more complete and accurate experimental nuclear reaction data library (EXFOR): international collaboration between nuclear reaction data centres (NRDC). *Nuclear Data Sheets*, **120**, 272-276.
- Özdoğan, H., Şekerci, M., Sarpün, İ. H., Kaplan, A., 2018. Investigation of level density parameter effects on (p, n) and $(p, 2n)$ reaction cross-sections for the fusion structural materials ^{48}Ti , ^{63}Cu and ^{90}Zr . *Applied Radiation and Isotopes*, **140**, 29-34.
- Özdoğan, H., Şekerci, M., Kaplan, A., 2020. An Investigation on the Effects of Some Theoretical Models in the Cross-Section Calculations of $^{50, 52, 53, 54}\text{Cr}$ (α, x) Reactions. *Physics of Atomic Nuclei*, **83**(6), 820-827.
- Özdoğan, H., Şekerci, M., Kaplan, A., 2021. Production cross-section and reaction yield calculations for $^{123-126}\text{I}$ isotopes on ^{123}Sb (α, xn) reactions. *Kuwait Journal of Science*, **48**(2).
- Özdoğan, H., Üncü, Y. A., Şekerci, M., Kaplan, A., 2021. A study on the estimations of (n, t) reaction cross-sections at 14.5 MeV by using artificial neural network. *Modern Physics Letters A*, **36**(23), 2150168.
- Perkin, J. L., O'connor, L. P., Coleman, R. F., 1958. Radiative capture cross sections for 14.5 MeV neutrons. *Proceedings of the Physical Society (1958-1967)*, **72**(4), 505.
- Quesada Molina, J. M., Lederer, C., Massimi, C., Altstadt, S. G., Andrzejewski, J., Audouin, L., ... , Bécares, V., 2013. Neutron capture cross section of unstable ^{63}Ni : implications for stellar nucleosynthesis. *Physical Review Letters*, **110** (2), 022501-1-022501-5.
- 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.
- Rauscher, T., Thielemann, F. K., 2000. Astrophysical reaction rates from statistical model calculations. arXiv preprint astro-ph/0004059.
- Rigaud, F., Roturier, J., Irigaray, J. L., Petit, G. Y., Longo, G., Saporetti, F., 1970. Radiative neutron capture on Si, Rb, Sr and Y in the dipole giant resonance region. *Nuclear Physics A*, **154**(2), 243-260.
- Ronen, Y., Aboudy, M., Regev, D., 2001. Homogeneous 242mAm -Fueled Reactor for Neutron Capture Therapy. *Nuclear science and engineering*, **138**(3), 295-304.
- Ryves, T. B., 1971. Further activation thermal neutron capture cross sections and resonance integrals. *National Physical Lab.*, Teddington, Eng.
- Santoro, A., Iljadica, F., Cohen, I. M., 2013. The production of ^{172}Tm by triple neutron capture in nuclear reactors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **298**(3), 1973-1976.
- Sarpün, İ. H., Özdoğan, H., Taşdöven, K., Yalim, H. A., Kaplan, A., 2019. Theoretical photoneutron cross-section calculations on Osmium isotopes by Talys and Empire codes. *Modern Physics Letters A*, **34**(26), 1950210.
- Stupegia, D. C., Schmidt, M., Keedy, C. R., Madson, A. A., 1968. Neutron capture between 5 keV and 3 MeV. *Journal of Nuclear Energy*, **22**(5), 267-281.
- Şekerci, M., Özdoğan, H., Kaplan, A., 2019. Investigation on the different production routes of ^{67}Ga radioisotope by using different level density models. *Moscow University Physics Bulletin*, **74**(3), 277-281.
- Şekerci, M., Özdoğan, H., Kaplan, A., 2020. Level density model effects on the production cross-section calculations of some medical isotopes via (α, xn) reactions where $x = 1-3$. *Modern Physics Letters A*, **35**(24), 2050202.
- Tagliente, G., Milazzo, P. M., Fujii, K., Abbondanno, U., Aerts, G., Alvarez, H., ..., n_TOF Collaboration, 2010. The ^{92}Zr (n, γ) reaction and its implications for stellar nucleosynthesis. *Physical Review C*, **81**(5), 055801.
- Tel, E., Aydın, A., Kaplan, A., Şarer, B., 2008. Investigation of $14-15$ MeV (n, t) Reaction Cross-sections by Using New Evaluated Empirical and Semi-empirical Systematic Formulas. *Journal of Fusion Energy*, **27**(3), 188-194.
- Watanabe, T., Kawano, T., Chadwick, M. B., Nelson, R. O., Hilaire, S., Bauge, E., Dossantos-Uzarralde, P., 2010.

Calculation of prompt fission product average cross sections for neutron-induced fission of ^{235}U and ^{239}Pu . *Journal of Nuclear Science and Technology*, **47**(5), 478-481.

Voignier, J., Joly, S., Grenier, G., 1992. Capture cross sections and gamma-ray spectra from the interaction of 0.5-to 3.0-MeV neutrons with nuclei in the mass range $A= 45$ to 238 . *Nuclear Science and Engineering*, **112**(1), 87-94.

Von Egidy, T., Schmidt, H. H., Behkami, A. N., 1988. Nuclear level densities and level spacing distributions: Part II. *Nuclear Physics A*, **481**(2), 189-206.