


Hafif Nadir Toprak Elementi ^{144}Sm İzotopunun Foto-Nötron Tesir Kesiti Hesabı

Deniz Canbula

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Programı, Manisa, Türkiye
deniz.canbula@cbu.edu.tr 

Makale gönderme tarihi: 12.02.2021, Makale kabul tarihi: 24.06.2021

Öz

Periyodik tabloda on yedi adet nadir toprak elementi bulunur ve bunlardan on beş tanesi lantanitler grubunda yer alır. Diğer iki tanesi ise skandinyum ve itriyumdur. Bu çalışmada, hafif ve ağır olarak iki gruba ayrılan nadir toprak elementlerinden hafif grubuna dahil olan samaryum izotopunun fotonükleer reaksiyonuna ait tesir kesiti değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar, farklı nükleer seviye yoğunluğu modelleri (Geri-kaydırılmış Fermi gaz modeli-BSFGM, Sabit sıcaklık modeli- CTM, Genelleştirilmiş süperakışkan modelGSM, Kollektif yarı-klasik Fermi gaz modeli-CSCFGM) kullanılarak TALYS 1.95 bilgisayar programı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar EXFOR (Uluslararası Nükleer Veri Merkezi) deneysel veri tabanından alınan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, kollektif yarı-klasik Fermi gaz modelinin (CSCFGM) deneysel verileri tahmin etmede ve açıklamada daha başarılı olduğu ve nadir toprak elementlerinin fotonükleer reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamalarında güvenle kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Fotonükleer reaksiyon, nükleer seviye yoğunluğu, nadir toprak elementi, tesir kesiti, TALYS 1.95

Calculation of Photonuclear Cross Section of Light Rare Earth Element ^{144}Sm

Abstract

There are seventeen rare earth elements in the periodic table and fifteen of them are in the group of lanthanides. The other two are scandium and yttrium. In this work, cross section of photonuclear reaction of samarium isotope, which is in the light group of rare earth elements divided into two groups as light and heavy, are calculated. The calculations are performed by using different nuclear level density models (BSFGM, CTM, GSM, CSCFGM) with TALYS 1.95 computer program. The obtained results are compared with experimental data taken from EXFOR experimental data base. When the results are examined, it has been shown that collective semi-classical Fermi gas model (CSCFGM) is more successful in predicting and explaining the experimental data and can be safely used in cross section calculations of photonuclear reactions of rare earth elements.

Keywords: Fotonuclear reaction, nuclear level density, rare earth element, cross section, TALYS 1.95

GİRİŞ

Fotonükleer reaksiyon çalışmaları uzun yıllardır ilgi çekici konulardan bir tanesi olmuştur. Fotonların çekirdek ile olan etkileşimlerinin incelenmesi, temel nükleer yapı çalışmalarından bir nükleer reaktörün iç işleyişine, bir yıldızdaki iç süreçleri incelemeye kadar oldukça geniş bir alana yayılmaktadır. Nükleer reaktörler ile ilgili olarak fotonükleer reaksiyonlar reaktörün genel performansına katkı sağlarlar.

Nükleer astrofizik konuları ise fotonlar ile ilgili birçok reaksiyonu içerir. Aslında, fotonükleer reaksiyonlar gözlenen çok sayıda element üretimi yapan nükleosentez işlemlerinin çoğunda önemli yere sahiptir (Mathews ve ark.,1992;Rauscher ve ark.,2002). Ek olarak, fotonükleer reaksiyonlar foto-aktivasyon çalışmalarında da sıkça kullanılmıştır (Chen, ve ark.,1999). Temel ve uygulamalı fizik

alanlarında kendisine oldukça geniş bir çalışma alanı bulan fotonükleer reaksiyonlar aktif çalışma alanlarını kolaylaştırarak çalışmalarını ilginç hale getirmektedir.

Fotonükleer reaksiyonlarda, özellikle 30 MeV altındaki enerjilerde çekirdeklerin temel özelliklerine duyarlılık gösteren dev dipol rezonansın (GDR) baskındır. GDR ağır çekirdekler için 10-15 MeV, hafif çekirdeklere için 20-25 MeV enerji bölgesindedir. GDR enerjisinde maksimum fotoabsorpsiyon ve diğer fotonükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin meydana geldiği bilinmektedir (Kawano, ve ark.,2020). Dolayısıyla, GDR'nin baskın olduğu enerjilerde gerçekleşen fotonükleer reaksiyonlar ayrıca önemlidir. Samaryum doğada yedi izotopun birleşiminden oluşur. Bunlar ^{144}Sm (%3.1), ^{147}Sm (%15), ^{148}Sm (%11.2), ^{149}Sm (%13.8), ^{150}Sm (%7.4), ^{152}Sm (%26.7) ve ^{154}Sm (%22.8) dir ve bunların içinde 144, 149, 150, 152, 154 kütle numaralı Samaryum izotopları kararlıdır. Samaryum izotoplarının en yaygın kullanım alanı kalıcı mıknatıslar ve lazerlerdir. Samaryum izotopları içerisinde en kararlı ve yarı-sihirli olan ^{144}Sm izotopu, radyasyon kalkanı uygulamalarında (Florez ve ark.,2018) kullanılmaktadır. Ağır bir izotop olan ^{144}Sm izotopunun GDR'nin baskın olduğu enerji aralığında (10-13 MeV) bir reaksiyonunun tercih edilmesi ve incelenmesi literatür açısından önem arz etmektedir.

Nükleer reaksiyonların tesir kesiti hesaplamalarında özellikle hafif parçacıklar (proton, nötron, triton, gama gibi) ile indüklenerek oluşan reaksiyonlarda yapılmış birçok deneysel (Vagena ve Stoulos,2017) ve teorik (Kaplan ve ark.,2014; Aydın ve ark.,2015; Kaplan ve ark.,2015; Canbula, 2017; Özdoğan ve ark.,2018 ; Yiğit,2018; Artun,2018; Artun,2019; Sarpün ve ark.,2019; Şekerci ve ark.,2019; Canbula, 2020a; Canbula, 2020b; Özdoğan ve ark.,2020) çalışma literatürde mevcuttur. Yapılan teorik çalışmalarda farklı bilgisayar programları kullanılarak tesir kesir kesiti değerleri elde edilmiş ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, hafif nadir toprak elementlerinden birisi olan ^{144}Sm izotopunun fotonükleer reaksiyonuna ait tesir kesiti değerleri farklı nükleer seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda TALYS1.95 (Koning ve ark.,2008) bilgisayar kodunun en güncel versiyonu tercih edilmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar EXFOR (Uluslararası Deneysel Veri

Merkezi) deneysel veri tabanından alınan reaksiyona ait deneysel veriler (Filipescu ve ark.,2014) ile karşılaştırılmıştır. Tercih edilen dört adet nükleer seviye yoğunluğu modelleri ile aynı anda hesap yapılabilen ve karşılaştırılabilen nadir toprak elementi ^{144}Sm olduğu için bu çalışmada sadece bu izotop tercih edilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan modellerin detayları Materyal ve Metot, elde edilen sonuçlar Bulgular ve sonuçların yorumlanması Sonuçlar ve Tartışma bölümlerinde sunulmuştur.

MATERYAL VE METOT

Nükleer seviye yoğunluğu, belirli bir enerji aralığında bulunan uyarılmış seviyelerin sayısı olarak tanımlanır ve yaklaşık 80 yıldır üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Hesaplamalarda, literatürde güncel olarak kullanılan dört adet nükleer seviye yoğunluğu modeli kullanılmıştır.

Geri-Kaydırılmış Fermi Gaz Modeli (BSFGM)

BSFGM, seviye yoğunluğunu tanımlamak için Fermi gaz modelini kullanarak modifiye edilmiş bir modeldir (Dilg ve ark.,1973).

Uyarılma enerjisi (E), spin (J) ve pariteye (Π) bağlı seviye yoğunluğu fonksiyonu,

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

ile verilir. Burada, σ^2 spin eşik parametresi, $U = E - \Delta$ etkin uyarılma enerjisi ve $\Delta = \delta + n \frac{12}{\sqrt{A}}$ enerji kaymasıdır. Tek- tek çekirdekler için $n = -1$, çift-çift çekirdekler için $n = 1$ ve tek çekirdekler için $n = 0$ alınır ve δ ayarlanabilir bir parametredir. a , seviye yoğunluğu fonksiyonunun en temel bileşeni olan seviye yoğunluğu parametresidir ve düşük enerjilerde kabuk etkilerinin varlığını ve bunların yüksek enerjilerde ortadan kaybolmasını fenomenolojik bir şekilde hesaba katar.

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

Etkin uyarılma enerjisinin sifıra gittiği durumda ortaya çıkan diverjans problemi giderildikten sonra (Grossjean ve ark.,1985) toplam seviye yoğunluğu fonksiyonu

Research article/Araştırma makalesi
 DOI: 10.29132/ijpas.879068

$$\rho^{top}(U) = \frac{1}{12\sqrt{2}\sigma} \frac{\exp[2\sqrt{aU}]}{a^{1/4}U^{5/4}} \quad (3)$$

şeklinde elde edilir.

Sabit Sıcaklık Modeli (CTM)

Gilbert ve Cameron tarafından 1965 yılında önerilen (Gilbert ve Cameron,1965) bu modelde, uyarılma enerjisi iki bölümde ele alınır. 0 MeV'den bir E_M eşleşme enerjisine kadar sabit sıcaklık parametresini eşleştirerek ve E_M enerjisinden yüksek uyarılma enerjilerin de Fermi gaz modelini kullanarak sorunun çözülmesi amaçlanmıştır. Fermi gaz modeli, tek parçacık durumlarının uyarılmış çekirdek seviyelerine eşit aralıklarla yerleştiğini ve kollektif seviyelerin olmadığını kabul eder. Böylece, toplam seviye yoğunluğu

$$\rho_{CTM}^{top}(E) = \begin{cases} \rho_T^{top}, & E \leq E_M \\ \rho_F^{top}, & E > E_M \end{cases} \quad (4)$$

şeklinde bulunur. Düşük uyarılma enerjisi için, CTM, $N(E)$ ilk ayrık seviyelerinin eksponansiyel bir ifade ile yeniden üretilebileceğine dair deneysel kanıtlar mevcuttur. Bu yasa sabit sıcaklık yasasıdır ve

$$N(E) = \exp\left(\frac{E-E_0}{T}\right) \quad (5)$$

ile tanımlanır. T nükleer sıcaklık ve E_0 ifadeleri formülü ayrık seviyelere ayarlamaya yarayan parametrelerdir. Buna göre, toplam seviye yoğunluğunun sabit sıcaklık kısmı

$$\rho_T^{top}(E) = \frac{dN(E)}{dE} = \frac{1}{T} \exp\left(\frac{E-E_0}{T}\right) \quad (6)$$

olur.

Genelleştirilmiş Süperakışkan Model (GSM)

Genelleştirilmiş süperakışkan model, BCS teorisini (Ignatyuk,1979;Ignatyuk,1993) temel alan çiftlenme korelasyonlarını hesaba katar. Bu çiftlenme korelasyonları, düşük enerjilerde süperakışkan davranıştan Fermi gaz modeli ile açıklanan yüksek enerjili bölgeye bir faz geçişi ile karakterize edilirler. Bu modelde, parametrelendirmede çözülmemiş sorun yoktur. Çiftlenme korelasyonları ve kollektif (vibrasyonel ve rotasyonel) etkileri BCS teorisine göre hesaba katan toplam seviye yoğunluğu

$$\rho^{top}(E) = \rho_{qp}(E)K_{vib}(E)K_{rot}(E) \quad (7)$$

ile verilir. Burada ρ_{qp} , quasi-parçacık (sanki-parçacık) seviye yoğunluğu, K_{vib} vibrasyonel, K_{rot} rotasyonel etkilerdir.

Kollektif Yarı-Klasik Fermi Gaz Modeli (CSCFGM)

Fermi gaz modeline dayalı yakın zamanda önerilen nükleer seviye yoğunluğu modeli CSCFGM (Canbula,2014), kollektif etkileri en temelde seviye yoğunluğu fonksiyonuna dahil eder. Bu modele göre seviye yoğunluğu parametresi bir Laplace dağılıma karşılık gelir ve U etkin uyarılma enerjisine bağlı olarak

$$a(U) = \tilde{a} \left(1 + A_c \frac{S_n \exp(-|U-E_0|/\sigma_c'^3)}{\sigma_c'^3}\right) \quad (8)$$

ifadesi ile verilir. Burada, S_n nötron ayrılma enerjisi, E_0 çift-çift çekirdeklerin 2^+ seviyelerine karşılık gelen uyarılma enerjisi değeridir. A_c kollektif şiddettir ve T_c kritik sıcaklığındaki şekil bağımlısı kabuk düzeltme enerjisi olarak tanımlanır.

$$T_c = \frac{S_n}{\tilde{a}} \quad (9)$$

$$A_c = [M_{den} - M_{LDM}] \frac{\tau_c}{\sinh\tau_c} \quad (10)$$

Burada $\tau_c = 2\pi^2 T_c / \hbar\omega$ ($\hbar\omega = 41A^{1/3} \text{MeV}$), M_{den} deneysel kütle ve M_{LDM} sıvı damlası modeline karşılık gelen küttedir.

TALYS Bilgisayar Programı

TALYS, nükleer reaksiyonların tesir kesiti hesaplamaları için yaygın olarak kullanılan bilgisayar programlarından bir tanesidir. Protonlar, nötronlar, döteronlar, tritonlar, alfa parçacıkları ve gama ışınlarını içeren nükleer reaksiyonları 1 keV ile 1 GeV enerji aralığında simüle edebilen bir programdır. TALYS hem temel hem de uygulamalı bilimlerde tercih edilmektedir. Fortran 77 programlama dili ile yazılan TALYS, son 10 yıllık süreçte 5 binden fazla bilimsel çalışmada kullanılmıştır. Zaman içerisinde sürekli olarak güncellemeler yapılarak TALYS üzerinde görülen eksiklikler giderilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada da TALYS'in en son versiyonu kullanılarak farklı nükleer seviye yoğunluğu

Research article/Araştırma makalesi
 DOI: 10.29132/ijpas.879068

modelleri program içerisine birer opsiyonel girdi olarak dahil edilmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar yapılırken CSCFGM'nin diğer modellerden en büyük farkı ayarlanabilir parametre içermemesi olduğu için (yani global bir parametrisasyona sahip olması) diğer modeller TALYS içinde tanımlanıp hesaplamalar yapılırken onlar içinde global parametrisasyon seçimi yapılmıştır. Böylece modellerin birbirleri ve deneysel veriler ile adil bir karşılaştırılması sunulmuştur.

BULGULAR

Bu çalışmada hafif nadir toprak elementlerinden bir tanesi olan ^{144}Sm izotopunun fotonükleer tesir

kesiti değerleri literatürde güncel olarak kullanılan dört farklı nükleer seviye yoğunluğu modeli kullanılarak TALYS 1.95 bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Modellere ait elde edilen tüm teorik sonuçlar hem birbirleriyle hem de reaksiyona ait deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve şekil üzerinde sunulmuştur. Sonuçlar ayrıca, tablo halinde tüm modeller ve deneysel çalışma şeklinde sunulmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde, literatürdeki en eski modeller olan BSFGM, CTM ve GSM'nin deneysel verilere uzak sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. Bu modeller içerisinde, sadece CTM'nin artan

Tablo $^{144}\text{Sm}(\gamma, n)^{143}\text{Sm}$ reaksiyonunun 10-13 MeV enerji aralığında tesir kesiti değerleri için teorik modellerin ve deneysel çalışmanın sonuçları (mb cinsinden)

Geri kaydırılmış Fermi gaz modeli (BSFGM)	Sabit sıcaklık modeli (CTM)	Genelleştirilmiş süperakışkan model (GSM)	Kollektif yarı-klasik Fermi gaz modeli (CSCFGM)	Deneysel veriler
5,21885	7,22498	5,07393	10,4777	21,42±1,42
13,1748	17,1644	12,7643	23,1747	37,75±2,08
19,7187	24,4609	19,0613	31,4102	42,73±2,45
24,0182	28,9254	23,1511	36,2922	55,92±2,72
27,0279	31,9349	25,9572	39,6998	69,43±3,76
29,2811	34,1317	27,9968	42,3716	95,72±4,41
31,0524	35,8227	29,5398	44,6244	
32,5341	37,2631	30,8038	46,6646	
33,7601	38,4035	31,7928	48,4845	
34,7717	39,2867	32,5402	50,1329	
35,6430	40,0487	33,1443	51,7036	
36,8035	41,2106	34,0887	53,5821	
38,0808	42,4099	35,1224	55,5528	
39,1994	43,3610	35,9469	57,3868	
40,3640	44,3294	36,7867	59,2980	
42,3314	46,5804	38,5997	62,2160	
50,9414	55,1477	46,6531	71,4437	
61,6005	62,2191	57,0003	82,6317	
81,4833	69,3968	77,0778	89,6552	
97,0962	70,0177	92,7269	96,0194	
109,978	84,9402	105,633	102,625	
121,430	92,8113	117,077	109,480	
132,140	100,508	127,727	116,587	
142,579	108,427	138,100	124,172	
153,053	117,321	148,561	132,788	

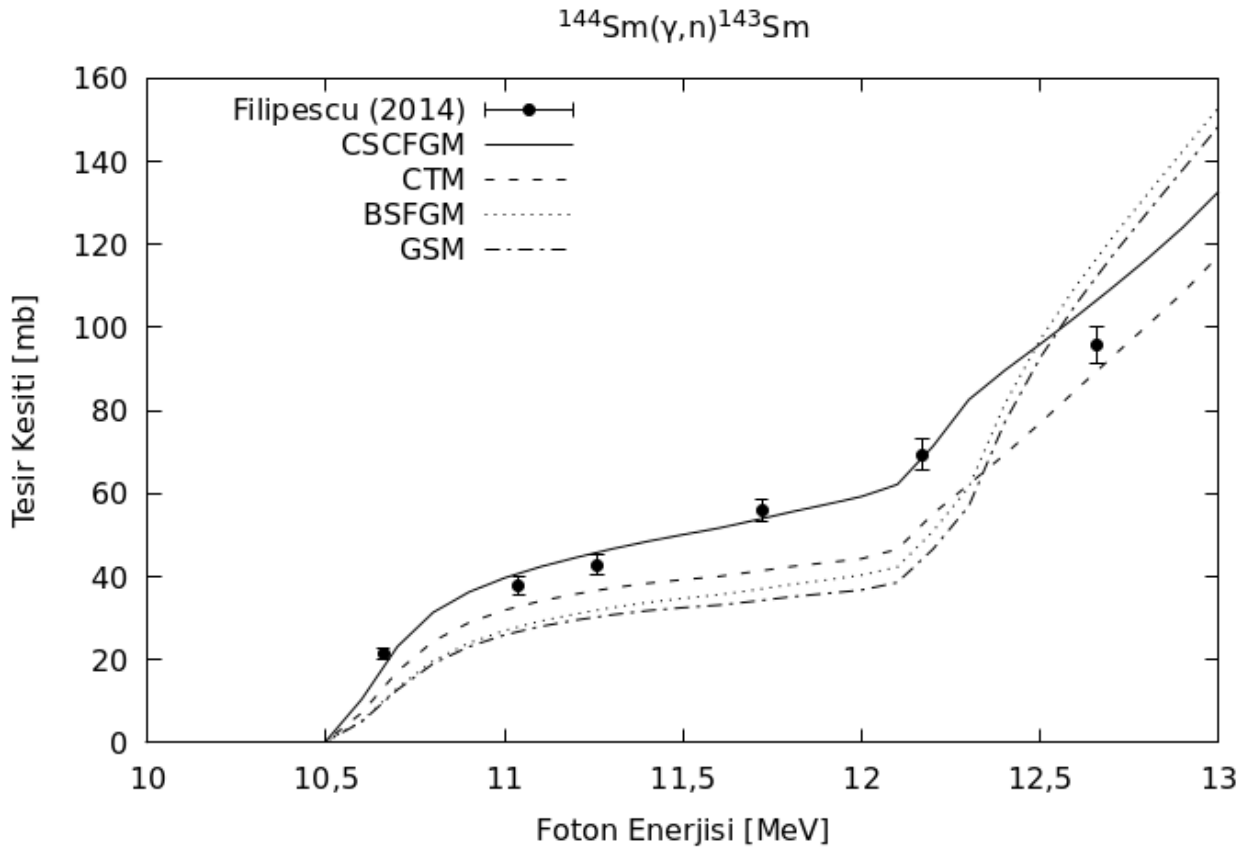
enerjilerde biraz daha deneysel verilerin eğilimine doğru olduğu söylenebilir. Şekil üzerinde düz kırmızı

çizgi ile gösterilen diğer modellere göre çok daha yakın zamanda ortaya konmuş olan CSCFGM'nin

Research article/Araştırma makalesi
 DOI: 10.29132/ijpas.879068

deneysel verileri tekrar sağlamada oldukça başarılı olduğu görülmektedir. CSCFGM'nin diğer modellerden en büyük farkı, çekirdeğin kollektif etkilerinin nükleer seviye yoğunluğu fonksiyonuna sonradan bir çarpan olarak eklemek yerine en temelde fonksiyonun içerisine dahil edilmiş olması ve ayarlanabilir parametre içermemesidir. Bu durumda, literatürde 1930'lu yıllardan beri kabul görmüş ve

güncel olarak kullanılan nükleer seviye yoğunluğu modellerinin (BSFGM,CTM,GSM) belirgin bir eksikliğinin bu son model (CSCFGM) ile giderilmiş olmasının bir uygulaması olarak yapılan bu çalışmada sonuçlar gösteriyor ki, CSCFGM ^{144}Sm izotopunun fotonötron reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamalarında güvenle kullanılabilir.



Şekil (renkli) $^{144}\text{Sm}(g,n)^{143}\text{Sm}$ fotonükleer reaksiyonuna ait tesir kesiti değerlerinin farklı nükleer seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak elde edilen sonuçların birbirleri ve deneysel veriler ile karşılaştırılması.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışma sonuçlarımızı özetlersek,

- $^{144}\text{Sm}(g,n)^{143}\text{Sm}$ reaksiyonu için elde edilen teorik sonuçlar içerisinde deneysel verilere en yakın sonucu veren modelin CSCFGM olduğu görülmüştür.
- Değerlendirme sonucunda deneysel verilere en uzak tahmin veren model GSM olmuştur. Bu modelin düşük enerjilerde göz önüne aldığı süperakışkan davranışın ^{144}Sm izotopunun fotonötron

tesir kesiti hesabı için iyi sonuç vermediği bu çalışma ile ortaya konmuştur.

Nükleer reaksiyonlar için yapılan teorik çalışmaların en önemli amaçlarından birisi de deneysel verilerin bulunmadığı enerji aralıklarına reaksiyonların genişletilebileceğini gösteren hesaplamalar ortaya koyabilmektir. Bu sayede ileride nükleer reaksiyonlar ile ilgili yapılacak deneysel ve teorik çalışmalara ön bilgi sağlanmaktadır. Bu çalışmada, literatürde en son kabul gören nükleer seviye yoğunluğu modeli

Research article/Araştırma makalesi
 DOI: 10.29132/ijpas.879068

olan CSCFGM'nin de ^{144}Sm izotopunun fotonötron reaksiyonu tesir kesiti hesabı için güvenle kullanılabilir bir araç olduğu sunulmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazar bu çalışmada herhangi bir şekilde çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yazar yapılan çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyduğunu beyan eder.

KAYNAKLAR

- Mathews, G.J., Howard, W.M. vd., (1992). R-process nucleosynthesis in the high-entropy supernova bubble. *The Astrophysical Journal*, 399, 656-664.
- Rauscher, T., Heger, A., Hoffman, R.D., Woosley, S.E. (2002). Nucleosynthesis in massive stars with improved nuclear and stellar physics. *The Astrophysical Journal*, 576, 323-348.
- Chen, W., Xu, B., Li, Y., (1999). Production of several neutron deficient nuclides through photonuclear reactions. *Journal of University of Science and Technology of China*, 02.
- Kawano, T. vd., (2020). IAEA photonuclear data library 2019. *Nuclear Data Sheets*, 163,109-162.
- Koning, A.J., Hilaire, S., Duijvestijn, M.C., (2019). Talys 1.95 A nuclear reaction program. <http://www.talys.eu/>
- Exfor, Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center, EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data File). (<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/>)
- Filipescu, D.M. vd., (2014). Photoneutron cross sections for samarium isotopes: Toward a unified understanding of (γ, n) and (n, γ) reactions in the rare earth region. *Physical Review C*, 90, 064616.
- Florez, R., Colorado, H.A., Giraldo, C.H., Alajo, A., (2018). Preparation of characterization of Portland cement pastes with Sm203 microparticle additions for neutron shielding applications. *Construction and Building Materials*, 191, 498-506.
- Kaplan, A., Özdoğan, H., Aydın, A., ve Tel, E. (2014). Photo-neutron cross-section calculations of 142,143,144,145,146,150 Nd rare-earth isotopes for (γ, n) reaction. *Physics of Atomic Nuclei*, 77(11), 1371-1377.
- Aydın, A., Pekdoğan, H., Kaplan, A., Sarpün, İ. H., Tel, E., ve Demir, B. (2015). Comparison of level density models for the 60, 61, 62, 64 Ni (p, n) reactions of structural fusion material nickel from threshold to 30 MeV. *Journal of Fusion Energy*, 34(5), 1105-1108.
- Kaplan, A., Sarpün, İ. H., Aydın, A., Tel, E., Çapalı, V., & Özdoğan, H. (2015). $(\gamma, 2n)$ -Reaction cross-section calculations of several even-even lanthanide nuclei using different level density models. *Physics of Atomic Nuclei*, 78(1), 53-64.
- Vagena, E., ve Stoulos, S. (2017). Average cross section measurement for $^{162}\text{Er}(\gamma, n)$ reaction compared with theoretical calculations using TALYS. *Nuclear Physics A*, 957, 259-273.
- Özdoğan, H., Şekerci, M., Sarpün, İ. H., ve 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.
- Yiğit, M. (2018). A review of (n, p) and (n, α) nuclear cross sections on palladium nuclei using different level density models and empirical formulas. *Applied Radiation and Isotopes*, 140, 355-362.
- Artun, O. (2018). Calculation of productions of PET radioisotopes via phenomenological level density models. *Radiation Physics and Chemistry*, 149, 73-83.
- Artun, O. (2019). Calculation of productions of medical ^{201}Pb , ^{198}Au , ^{186}Re , ^{111}Ag , ^{103}Pd , ^{90}Y , ^{89}Sr , ^{77}Kr , ^{77}As , ^{67}Cu , ^{64}Cu , ^{47}Sc and ^{32}P nuclei used in cancer therapy via phenomenological and microscopic level density models. *Applied Radiation and Isotopes*, 144, 64-79.
- Sarpün, İ. H., Özdoğan, H., Taşdöven, K., Yalim, H. A., ve Kaplan, A. (2019). Theoretical photoneutron cross-section calculations on Osmium isotopes by Talys and Empire codes. *Modern Physics Letters A*, 34(26), 1950210.
- Şekerci, M., Özdoğan, H., ve 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.
- Özdoğan, H., Şekerci, M., ve Kaplan, A. (2020). Photoneutron cross-section calculations of ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{93}Nb and ^{107}Ag Isotopes with newly obtained Giant Dipole Resonance parameters. *Applied Radiation and Isotopes*, 165, 109356.
- Dilg, W. vd., (1973). Level density parameters for the back-shifted fermi gas model in the mass range $40 < A < 250$. *Nuclear Physics Section A*, 217, 269,298.
- Grossjean, M.K., ve Feldmeier, H., (1985). Level density of a Fermi gas with pairing interactions. *Nuclear Physics A*, 444, 113.
- Gilbert, A., ve Cameron, A.G.W., (1965). A composite nuclear level density formula with shell corrections. *Canadian Journal of Physics*, 43, 1446-1496.
- Ignatyuk, A.V. vd., (1993). Density of discrete levels in ^{116}Sn . *Physical Review C*, 47, 1504.
- Ignatyuk, A.V., Istekov, K.K., ve Smirenkin, G.N. (1979). Yadernaja Fizika English translation: *Soviet Journal Nuclear Physics*, 29(4), 875.

Research article/Araştırma makalesi
DOI: 10.29132/ijpas.879068

- Canbula, B., vd., (2014). A Laplace like formula for the energy dependence of the nuclear level density parameter. *Nuclear Physics A*, 929, 54-70.
- Canbula, B., (2017). Collective effects in deuteron induced reactions of aluminum. *Nuclear Instruments and Methods Section B*, 391, 73-77.
- Canbula, B., (2020). 55Mn izotopunun fotonükleer tesir kesitleri üzerinde kolektif nükleer seviye yoğunluğunun etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24, 138-142.
- Canbula, D., (2020). Cross section analysis of proton-induced nuclear reactions of thorium. *Nuclear Instruments and Methods Section B*, 478, 229-232.