

## <sup>52</sup>Cr'un Nükleer Yapı Özelliklerinin Fenomonolojik İncelenmesi

Yusuf KAVUN<sup>1\*</sup>

**ÖZET:** Krom (Cr) içeren alaşımlar, yüksek korozyon ve sıcaklık hassasiyeti nedeni ile nükleer santrallerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, <sup>52</sup>Cr atomu için yoğunluk bağımlı üretim reaksiyonu tesir kesiti hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar için çeşitli yarı-ampirik <sup>52</sup>Cr(n, p)<sup>52</sup>V ve ampirik <sup>52</sup>Cr(n, d)<sup>51</sup>V tesir kesit formülleri kullanılmıştır. Formüllerdeki asimetri ifadelerinde bazı Skyrme Hartree-Fock parametreleri (SI, SKM, SIII ve SKM\*) ile hesaplanan yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Yoğunluk hesaplamalarında HAFOMN programı kullanılmış ve <sup>52</sup>Cr atomunun yoğunluk ve yarıçap bağımlılığı incelenmiştir. Hesaplanan sonuçlar için ortalama bir  $\sigma_{\max}/2$  değeri alınmış ve literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. <sup>52</sup>Cr için geliştirilmiş yarı-ampirik (n,p) ve ampirik (n,d) formüllerinden hesaplanan üretim reaksiyon tesir kesitleri değerler deneysel değerlere uyumludur. Ayrıca, bazı (SI, SKM, SIII ve SKM\*) Skyrme parametreleri vasıtası ile HAFOMN kodu kullanılarak Cr atomunun yarıçapı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SKM parametresi kullanılarak hesaplanan yarıçap değerinin literatürdeki deneysel değerlere en yakın olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** (n, p), (n, d) reaksiyonu, tesir kesiti, Skyrme Hartree-Fock parametreleri

### The phenomenological investigation of the nuclear structure properties of <sup>52</sup>Cr

**ABSTRACT:** Chromium (Cr) alloys are widely used in nuclear plants due to high corrosion and temperature sensitivity. In this study, the density dependent production reaction for the <sup>52</sup>Cr atom was calculated. Various semi-empirical <sup>52</sup>Cr (n, p) <sup>52</sup>V and empirical <sup>52</sup>Cr (n, d) <sup>51</sup>V cross sectional formulas were used for these calculations. In the asymmetry expressions in the formulas, some Skyrme Hartree-Fock parameters (SI, SKM, SIII and SKM\*) were used to calculate the density values. HAFOMN code was used and density and radius dependence of <sup>52</sup>Cr atom were investigated in the density calculations. An average  $\sigma_{\max}/2$  value was obtained and then the calculated values were compared with the experimental data in the literature. The production reaction cross-sections calculated from semi-empirical (n, p) and empirical (n, d) formulations developed for <sup>52</sup>Cr are consistent with experimental values. In addition, the radius of the <sup>52</sup>Cr atom was calculated using the HAFOMN code through some (SI, SKM, SIII and SKM\*) Skyrme parameters. According to the results, the radii value calculated using the SKM parameter was the closest to the experimental values in the literature.

**Keywords:** (n, p) and (n, d) reaction, cross-section, Skyrme Hartree-Fock parameters

<sup>1</sup> Yusuf KAVUN (Orcid ID: 0000-0001-9635-4388), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yusuf KAVUN, e-mail: yusufkavun@gmail.com

## GİRİŞ

Nükleer teknoloji, atom çekirdeğinden elde edilen enerjinin tıp, endüstri, tarım, hayvancılık, arkeometri ve uzay teknolojisi gibi alanlarda giderek artan bir şekilde kullanılması ile her geçen gün gelişmektedir. Bu amaçla nükleer reaktörlerde meydana gelen fisyon reaksiyonları ile atom çekirdeğinden enerji elde edilmektedir. Bu işlemler sırasında açığa çıkan enerjinin reaktör türüne göre farklı olması sebebi ile kullanılan reaktör malzemesinin farklı ısı ve sıcaklığa dayanıklı olması gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli Krom (Cr) alaşımları içeren malzemeler nükleer reaktörlerde kullanılmaktadır (Victoria ve ark.2001). Özellikle gaz soğutmalı reaktör kalbinde yakıt demetleri, Cr alaşımları içeren çubuklar ile birbirlerine tutturulmaktadır. Bu kompleks alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda iyi korozyon ve oksidasyon direncine, üstün sürtünme ve kopma dayanımına sahiptirler (Ubeyli, 2007). Yine nükleer reaktörlerde radyasyon sızıntısının önlenmesi amacı ile Cr izotopları radyasyon zırh malzemesi olarak ta kullanılmaktadır (Stamm, 2000). Reaktör materyali nükleer reaksiyonlar sırasında yüksek enerjili nötron bombardımanına maruz kalmaktadır. Bu nedenle reaktör malzemesinin bu etkileşimlere dayanıklı olması gerekmektedir (Yiğit, 2008).

Nükleer reaktörlerde sıcaklığa ve korozyona dayanıklılık özelliklerinden dolayı kullanılan yapısal malzemelerin tesir kesitlerinin de bilinmesi önemlidir. Çünkü tesir kesiti kavramı, gelen parçacığın hedef çekirdek ile etkileşebilme ihtimalini ifade etmekte olup tepkimenin türüne ve gelen parçacığın enerjisine bağlıdır (Yiğit, 2008; Şekerci ve ark., 2016). Böylece üretilecek olan malzemenin özellikleri bilindikçe üretilecek malzemenin daha dayanıklı ve uzun ömürlü olması sağlanabilecektir (Yildiz, E., 2017).

Tesir kesiti deneylerinde nötronlar, Coluomb engelini aşmaları ve elektronlarla neredeyse hiç etkileşmemeleri gibi sebeplerden

dolayı tercih edilmektedir. Ancak nötronların enerjisi ve hedef çekirdeğin kütle numarası, nötron reaksiyonlarının başlayabilmesinde büyük ölçüde önemlidir. Nötron enerjisinin 0,1–10 MeV olduğu aralıkta esnek saçılma, 10 MeV'den büyük olma durumunda ise esnek olmayan çarpışmalar hâkimdir. Benzer olarak soğurma reaksiyonlarında da tesir kesiti hedef çekirdeğin kütle numarasına ve büyük ölçüde nötron enerjisine bağlıdır. Düşük nötron enerjilerinde çekirdeğin uyarılma enerjisi parçacık çıkması için yeterli olmadığı için çekirdek gama yayımlayarak eski haline döner. Nötron enerjisi arttıkça çekirdekte nötron, proton, alfa gibi çekirdeklerin yayımlanma olasılığı artar. Meydana gelebilecek tüm bu reaksiyonların tanımlanması, teorik tesir kesiti hesaplamalarını deneysel tesir kesiti sonuçları ile daha uyumlu hale getirecektir (Yiğit, 2008).

Ayrıca deneysel verilerden türetilen ampirik ve yarı-ampirik formüller kullanılarak hesaplanan teorik tesir kesiti verileri sayesinde nükleer yapının anlaşılabilmesi daha mümkün hale gelmiştir (Tel ve ark., 2003, 2008; Aydın ve ark., 2008).

Hartree-Fock hesaplamaları Skyrme kuvvetlerinin tanımlanmasıyla başlamıştır ve deformasyon özellikleri, süper ağır çekirdekler, titreşimler ve ağır iyon çarpışmaları gibi çeşitli olayların hesaplanmalarına uygulanmıştır (Tel ve ark, 2008). Ayrıca bu hesaplamalar küresel çekirdeğin taban durumunun tanımlanmasında kullanılmıştır. Böylece, nükleer yapı fiziğinde çok daha fazla uygulamanın temeline hizmet etmiştir (Skyrme, 1958; Aytekin ve ark., 2010).

Bu çalışmada, 14-15 MeV enerjili nötronlarla etkileşen <sup>52</sup>Cr atomu için Tel ve arkadaşları (2003) tarafından türetilen yarı ampirik (n,p) ve ampirik (n,d) (Tel ve ark. 2008) formüllerinde dört farklı Skyrme Hartree-Fock parametresi (SI, SKM, SIII ve SKM\*) kullanılarak yoğunluk bağımlı üretim reaksiyonu tesir kesiti hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil1-4'te yarıçapın fonksiyonu olarak verilmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Skyrme kuvvetleri çekirdeğin taban durumlarını açıklamak için kullanılan en iyi fenomenolojik kuvvettir (Reinhard, 1995). İki cisim etkileşmesiyle üç cisim etkileşimini de içeren Skyrme etkileşmeleri:

$$\bar{V}_{\text{Skyrme}} = \sum_{i<j} \bar{V}(i, j) + \sum_{i<j<k} \bar{V}(i, j, k) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Buradaki ilk terim iki cisim, ikinci terim ise üç cisim etkileşimini tanımlamaktadır (Skyrme, 1958). Kısa menzilli iki cisim etkileşmesi:

$$\begin{aligned} \bar{V}(i, j) = & t_0(1 + x_0 P_x) \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) + \frac{1}{2} t_1(1 + x_1 P_x) \{ \bar{p}_{12}^2 \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) + \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \bar{p}_{12}^2 \} \\ & + t_2(1 + x_2 P_x) \bar{p}_{12}^1 \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \bar{p}_{12} + i t_4 \bar{p}_{12}^1 \cdot \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) (\vec{\sigma}_i + \vec{\sigma}_j) \times \bar{p}_{12} \end{aligned} \quad (2)$$

olarak verilir (Skyrme, 1958). Bu denklemde  $\delta$ , delta fonksiyonu,  $\bar{p}_{12} = \pm \frac{1}{2} i(\vec{\nabla}_1 - \vec{\nabla}_2)$  sağa/sola doğru hareket eden dalga fonksiyonlarına etki eden görel momentum operatörü,  $P_x$  spin değiş tokuş operatörü ve  $\sigma$ , Pauli spin matrisleridir. İki cisim etkileşmesi yedi parametreye bağlıdır ( $t_0, t_1, t_2, x_0, x_1, x_2$  ve  $t_4$ ). Üç cisim etkileşmesi ise:

$$\bar{V}(i, j, k) = \frac{1}{6} t_3(1 + x_3 P_x) \rho \left( \frac{\vec{r}_i + \vec{r}_j}{2} \right) \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) \quad (3)$$

şeklinindedir.  $\rho$ , toplam bir cisim yoğunluk operatörünün koordinat uzayında ki diagonal kısmı ve  $t_3$ , etkileşmenin yoğunluk bağımlılığını karakterize eden bir parametreyi ifade etmektedir (Baldik, 2010).

Çok cisimli bir kuantum sisteminin taban durum enerjisi ve taban durum dalga fonksiyonunun belirlenmesi için Hartree-Fock metodu iyi bir yaklaşım (öz uyumlu) metodudur (Vautherin, 1972). Bu metotta dalga fonksiyonu  $\Phi$ , N elektronun her biri için tek elektron fonksiyonlarının çarpımı olarak tanımlanmaktadır.

$$\Phi(r_1, r_2, \dots) = \varphi_1(r_1) \cdot \varphi_2(r_2) \dots \varphi_N(r_N) \quad (4)$$

Dalga fonksiyonları seti yardımıyla  $\rho_a(\vec{r}) = \sum_i \psi_i(\vec{r})^+ \psi_i(\vec{r})$  kurulur ve buradan yoğunluğa bağlı bir potansiyel oluşturulur. Schrödinger denkleminin özdeğer ve öz fonksiyonların bir seti oluşturularak, Schrödinger denklemi çözüldüğünde daha gerçekçi dalga fonksiyonları bulunur.

Her Skyrme parametre seti,  $^{52}\text{Cr}$  atomunun yoğunluk değerleri HAFOMN kodu (Aytekin ve ark., 2010) ile hesaplanmıştır. Elde edilen proton ve nötron yoğunluk değerleri Tel ve arkadaşları (2003) yarı-ampirik (n, p) formülü ve yine Tel ve arkadaşları (2008) ampirik (n, d) tesir-kesiti formüllerinde asimetri parametreleri (s) yerine yoğunluk değerlerini kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu formüller:

$$\sigma_{\text{Tel}}(n, p) = 14.56 (A^{1/3} + 1)^2 \exp[-26.58s] \quad 17 \leq A \leq 239 \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{Tel}}(n, d) = 0.76 (A^{1/3} + 1)^2 \exp[-10.025s] \quad 3 \leq A \leq 181 \quad (6)$$

şeklinindedir. Burada s yerine:  $S = (\rho_n - \rho_p) / (\rho_n + \rho_p)$  yazılabilir ve  $\rho_n$  nötron yoğunluğu,  $\rho_p$  proton yoğunluğudur.

## BULGULAR ve TARTIŞMA

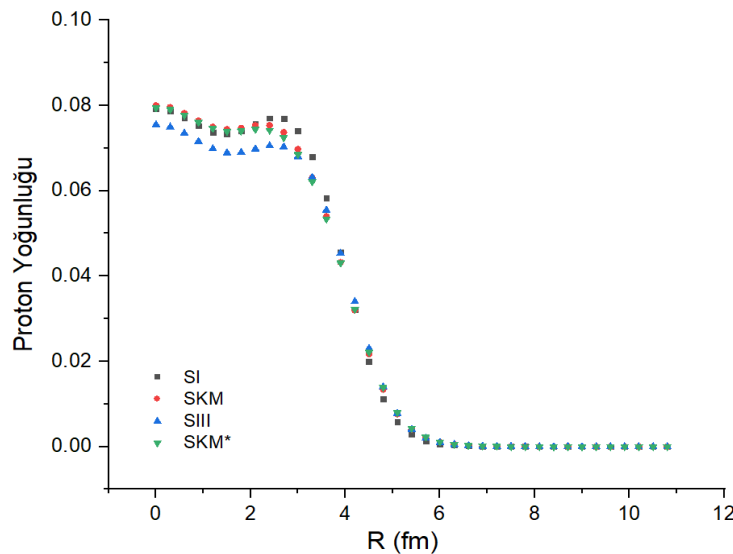
Cr katkılı alaşımlar yüksek sıcaklıklardaki korozyon hassasiyeti ve oksidasyona karşı dirençli olması gibi özelliklerinden dolayı süper alaşımlar olarak sınıflandırılabilir (Aytekin ve ark., 2008). Bu alaşımlar bu gibi özelliklerinden dolayı nükleer santrallerde kullanılmaktadır.  $^{52}\text{Cr}$  izotopunun bazı Skyrme parametreleri kullanılarak yoğunluk bağımlı tesir kesiti hesaplamaları ve literatürdeki deneysel tesir kesiti (Osman, 1996; Grimes, 1979) sonuçları Tablo 1'de verilmektedir. Nötron ve proton yoğunluk hesaplamalarında HAFOMN kodu (Aytekin ve ark., 2010) kullanılmıştır. Ayrıca Skyrme parametreleri kullanılarak hesaplanan nötron, proton ve çekirdek yarıçapları Tablo 2'de verilmiştir. Bu hesaplamalarda çeşitli Skyrme Hartree Fock (SI, SKM, SIII ve SKM\*) parametrelerinden yararlanılmıştır. Buradan elde edilen nötron-proton yoğunlukları eşitlik (5) ve (6)'da  $s$  parametrelerinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların yarıçap bağımlı fonksiyonları Şekil 1-4'te görülmektedir. Şekil 1'de  $^{52}\text{Cr}$  için Skyrme parametreleri (SI, SKM, SIII, SKM\*) ile HAFOMN kodu kullanılarak hesaplanan proton yoğunlukları görülmektedir. Bu grafikte proton yoğunluğunun yaklaşık  $R=3$  fm değerinden sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Şekil 2'de ise

$^{52}\text{Cr}$  için nötron yoğunluklarının  $R=3$  fm değerinden 5 fm değerine kadar gittikçe azalmaktadır.

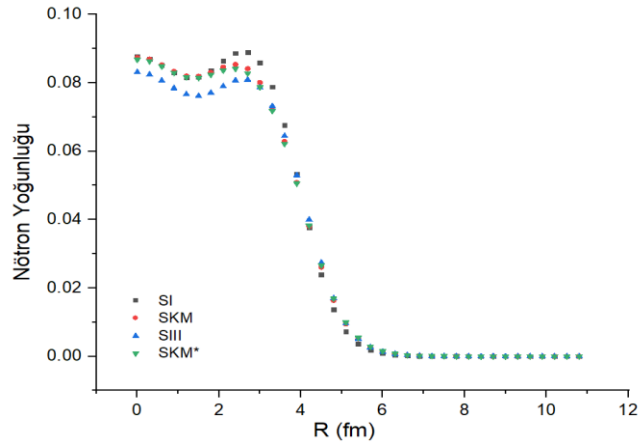
Şekil 3'te  $^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$  reaksiyonu için mb biriminde yoğunluk bağımlı tesir kesiti hesaplarının yarıçap bağımlı fonksiyonu görülmektedir. Burada SIII Skyrme parametresi kullanılarak yoğunluğa bağlı olarak gerçekleştirilen tesir kesiti hesaplamasının ortalama yarı yükseklik değerinin ( $\sigma_{\max} / 2$ ) yaklaşık 3.6 fm yarıçapında olduğu görülmektedir. Şekil 4'de ise  $^{52}\text{Cr}(n, d)^{51}\text{V}$  reaksiyonu için  $\sigma_{\max} / 2$  yaklaşık 5 fm'dedir.

Tablo 1'de,  $^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$  ve  $^{52}\text{Cr}(n, d)^{51}\text{V}$  reaksiyonları için Skyrme-Hartree Fock (SI, SKM, SIII ve SKM\*) parametreleri ile hesaplanan yoğunluk bağımlı tesir kesiti değerleri görülmektedir. Ayrıca,  $^{52}\text{Cr}$  için literatürde yer alan deneysel tesir kesitleri de Tablo 1'de görülmektedir.

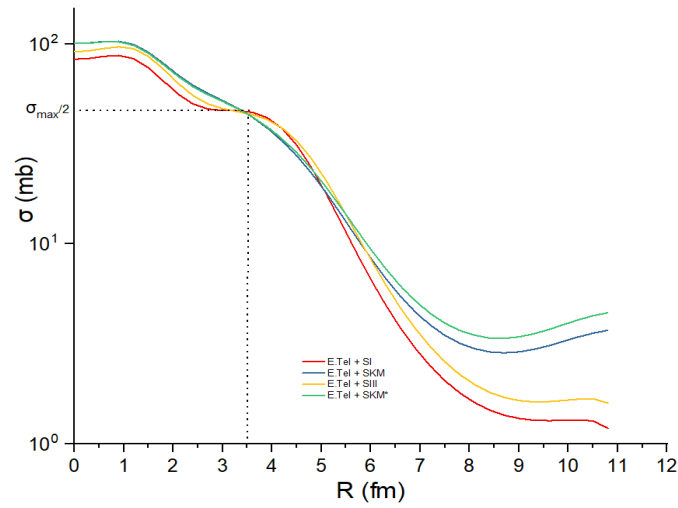
Tablo 2'de SI, SKM, SIII ve SKM\* parametrelerine göre hesaplanan nötron, proton ve çekirdek yarıçapları görülmektedir. Elde edilen sonuçların, literatürde yer alan deneysel (Angeli, 2013)  $^{52}\text{Cr}$  hesaplamaları ile karşılaştırıldığında, SKM parametresi ile hesaplanan çekirdek yarıçapının deneysel veriyle en uyumlu sonuç olduğu görülmektedir.



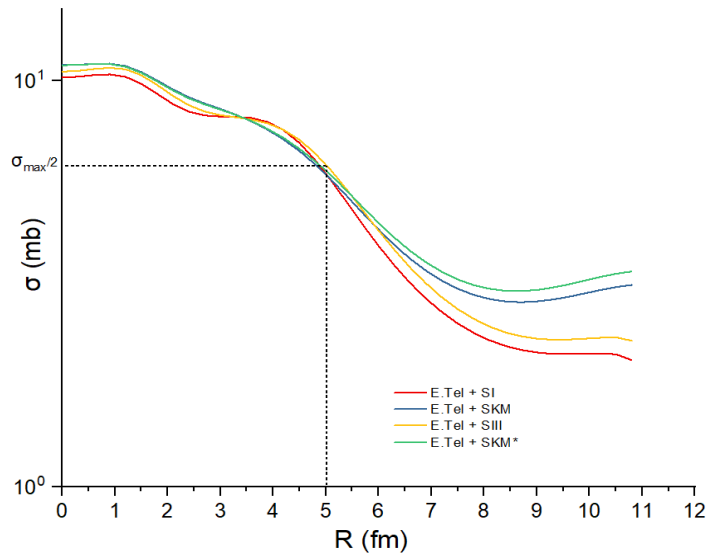
Şekil 1  $^{52}\text{Cr}$  için Skyrme parametreleri (SI, SKM, SIII, SKM\*) ile HAFOMN kodu kullanılarak hesaplanan Proton yoğunlukları



Şekil 2  $^{52}\text{Cr}$  için Skyrme parametreleri (SI, SKM, SIII, SKM\*) ile HAFOMN kodu kullanılarak hesaplanan Nötron yoğunlukları



Şekil 3. Tel ve ark. (2003) formülü ile bazı Skyrme Hartree-Fock parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen  $^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$  reaksiyon Tesir Kesiti hesaplamaları



Şekil 4 Tel ve ark. (2008) formülü ile bazı Skyrme Hartree-Fock parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen teorik  $^{52}\text{Cr}(n, d)^{51}\text{V}$  reaksiyon Tesir Kesiti hesaplamaları

**Tablo 1.**  $^{52}\text{Cr}$  atomunun yoğunluk bağımlı tesir kesiti hesaplamaları ve 14-15 MeV (mb biriminde) aralığında  $\sigma_{\text{exp}}$  değerleri

Reaction	$^{52}\text{Cr} (n,p)^{52}\text{V}$	$^{52}\text{Cr} (n,d)^{51}\text{V}$
$\sigma_{\text{Deney}}$	78±2 (Osman, 1996)	8±3 (Grimes, 1979)
$\sigma_{\text{Tel}}$	42.2 (Tel, 2003)	7.87 (Aydın, 2008)
$\sigma_{\text{max}/2}$	45.6	5.68
$\sigma_{\text{Tel+SI}}$	42.9	5.01
$\sigma_{\text{Tel+SKM}}$	52.2	5.71
$\sigma_{\text{Tel+SIII}}$	47.5	5.39
$\sigma_{\text{Tel+SKM}^*}$	51.6	5.35

**Tablo 2.**  $^{52}\text{Cr}$  atomunun bazı Skyrme parametreleri kullanılarak HAFOMN kodu (Aytekin ve ark., 2010) ile hesaplanan nötron, proton ve çekirdek yarıçapları

Parametre	Rn (fm)	Rp (fm)	Rc (fm)	Exp. (fm)	$\Delta\text{totR}(\text{fm})$
SI	3.5151	3.4892	3.5787	3.6452(Angeli,2013)	0.0665
SIII	3.6312	3.6018	3.6886		0.0434
SKM	3.5913	3.5551	3.6430		0.0022
SKM*	3.6122	3.5775	3.6649		0.0197

## SONUÇ

Bu çalışmada bazı Skyrme parametreleri (SI, SKM, SIII ve SKM\*) kullanılarak yoğunluk bağımlı tesir kesiti hesaplamaları yeni bir yöntemle yapılmıştır. Bu hesaplamalar için E. Tel ve ark. (2003) tarafından türetilen yarı-ampirik (n, p) ile E. Tel ve ark. (2008) ampirik (n, d) tesir kesiti formülleri kullanılmış olup bu formüllerde HAFOMN kodu ile hesaplanan proton ve nötron yoğunluk değerleri asimetri parametresine (s) yerleştirilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ve deneysel değerler Tablo 1'de görülmektedir. Deneysel verilerin teorik hesaplanan tesir kesiti değerlerinden biraz yüksek olduğu Tablo 1'de görülmektedir. Ayrıca Tablo 2'de  $^{52}\text{Cr}$  atomunun bazı Skyrme parametreleri kullanılarak nötron, proton ve çekirdek yarıçapları hesaplanmış olup, SKM parametresi ile hesaplanan çekirdek yarıçapının deneysel veri ile en uyumlu olduğu görülmektedir.

Teorik hesaplamalarda 14-15 MeV enerjili nötron girişli nükleer reaksiyonlar,  $^{52}\text{Cr}$  için incelenmiş olup nötronca zengin daha ağır çekirdekler incelendiğinde daha anlamlı sonuçlar elde edilebilecektir. Böylece bu yeni metot ile

hedef çekirdekler için temel nükleon-nükleon potansiyellerinin tipini araştırmak mümkündür.

Ayrıca nükleer reaktörlerde kullanılacak malzeme türünün yoğun nötron etkileşimine dayanıklı olması gerekliliği göz önüne alındığında 14-15 MeV enerjili nötronlarla gerçekleştirilen nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin anlaşılmasının önemli olduğu ortadadır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar ve Projeler Birimi tarafından (BAP) 2018/3-28M kodlu proje ile desteklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Angeli I, 2004. A consistent set of nuclear rms charge radii: properties of the radius surface  $R(N,Z)$  Atomic Data and Nuclei Data Tables, 87:185-206.
- Angeli I, Krassimira P.M., 2013. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update, Atomic Data and Nuclear Data Tables 99: 69–95.

- 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. *J Fusion Energ*, 27:308–313.
- Aytekin H, Baldık R, Tel E, Aydın A, 2010. New Calculation For Some Ground State Features Of  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{32}\text{S}$  and  $^{39}\text{K}$  Nuclei. *International Journal of Modern Physics E*, 19(2):291–298.
- Aytekin H, Tel E, Baldık R, 2008. Investigation of the Ground State Features of Some Exotic Nuclei by Using Effective Skyrme Interaction. *Turk J Phys*, 32:181–191.
- Baldık R, 2010. Skyrme Etkileşmesi Kullanılarak Bazı Egzotik Çekirdeklerin Taban Durum Özelliklerinin İncelenmesi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora Tezi (Basılmış).
- Grimes SM, Haight RC, Alvar KR, Barschall HH, Borchers RR, 1979. Charged particle emission in reactions of 15-MeV neutrons with isotopes of chromium, iron, nickel, and copper. *Physical Review, Part C, Nuclear Physics*, (19):2127.
- Reinhard PG. and Flocard H, 1995. Nuclear effective forces and isotope shifts, *Nuclear Physics A*, 584:467-488.
- Raole PM. et al., 2009. Structural materials for fusion reactors, *Transactions of The Indian Institute of Metals Vol. 62, Issue 2*:105-111.
- Skyrme THR, 1958. The effective nuclear potential. *Nuclear Physics*, 9:615-634.
- Stamm H. et al., 2000. Thermomechanical characteristics of the low activation materials chromium and Cr-5Fe-1Y2O3 alloy, *Journal of Nuclear Materials* 283±287, 597±601.
- Osman KT and Habbani FI, 1996. Measurement and study of (n,p) reaction cross sections for Cr, Ti, Ni, Co, Zr and Mo isotopes using 14.7 MeV neutrons, *R, INDC(SUD)-001*, 10.
- Şekerci M, Çapalı V, Özdoğan H, Kaplan A, 2016. Production Cross-Section Calculations of Medical  $^{177}\text{Lu}$  Using Neutron and Proton Induced Reactions. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 37:117-121.
- Tel E, Şahin MH, Kaplan A, Aydın A and Altınok T, 2008. Investigation of the properties of the nuclei used on the new generation reactor technology systems, *Ann. Nucl. Energy* 35(2): 220-227.
- Tel E, Okuducu Ş, Tanır G, Aktı NN, and Bölükdemir MH, 2008. Calculation of radii and density of 7–19B isotopes using effective Skyrme force. *Commun. Theor. Phys.* 49(3): 696.
- Tel E, Sarer B, Okuducu S, Aydın A, and Tanır G, 2003. A new empirical formula for 14–15 MeV neutron-induced (n, p) reaction cross sections. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 29:2169–2177.
- Vautherin D and Brink DM, 1972. Hartree-Fock Calculations with Skyrme's Interaction. I. Spherical Nuclei. *Physics Review C*, 5, 626.
- Ubeyli M., 2007. Radiation damage on low activation materials used in a hybrid reactor, *Materials and Design*, 28,(5):1453–1460.
- Victoria M. et al., 2001. Structural materials for fusion reactors *Nuclear Fusion*, 41(8):1047-1053.
- Yıldız, E., Aydın, A., Sarpun, I. H., Tel, E., 2017. Calculations of Cross-Sections and Astrophysical S-factors for the ( $\alpha$ ,n) Reactions of Some Structural Fusion Materials. *Journal of Fusion Energy*, 36(4-5):149–151.
- Yiğit M, 2008. Bazı Ağır Çekirdeklerin (N,F) Tesir Kesitlerinin Hesaplanması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).