

## $^{27}\text{Al}$ , $^{54}\text{Fe}$ , $^{58}\text{Ni}$ ve $^{90}\text{Zr}$ Hedef Çekirdekleri İçin 10–30 MeV Enerji Aralığında ( $\gamma, p$ ) Reaksiyon Tesir Kesiti Hesaplamaları

Veli Çapalı<sup>1,\*</sup>, Hasan Özdoğan<sup>1,2</sup>, S. Sedat Doğan<sup>1</sup>, Abdullah Kaplan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Akdeniz Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Biyofizik A.D., 07070, Antalya, Türkiye

\*Yazışılan yazar e-posta: velicapali@sdu.edu.tr

Alınış: 05 Mayıs 2014, Kabul: 26 Haziran 2014

**Özet:** Bu çalışmada;  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  gibi füzyon reaktörü yapı malzemeleri için 10–30 MeV enerji aralığında oluşturulan ( $\gamma, p$ ) reaksiyonlarının denge ve denge-öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak, proton üretim tesir kesitleri incelenmiştir. Hesaplamalarda, Denge-öncesi hesaplamalar için; TALYS 1.6 İki Bileşenli Exciton Model ve EMPIRE 3.1 Exciton Model, denge hesaplamaları için ise; PCROSS Weisskopf–Ewing Model kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Deneysel Nükleer Reaksiyon Data (EXFOR) Kütüphanesi’nden alınan deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Nükleer reaksiyon modelleri, füzyon reaktörleri, reaksiyon tesir-kesiti, EXFOR, denge ve denge-öncesi reaksiyonlar

## ( $\gamma, p$ ) Reaction Cross Section Calculations for $^{27}\text{Al}$ , $^{54}\text{Fe}$ , $^{58}\text{Ni}$ and $^{90}\text{Zr}$ Target Nuclei in the Energy Range of 10–30 MeV

**Abstract:** In this study, proton production cross-sections of ( $\gamma, p$ ) reactions for several fusion reactor structural materials such as  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  and  $^{90}\text{Zr}$  have been investigated in the incident photon energy range of 10–30 MeV using pre-equilibrium and equilibrium nuclear reaction models. TALYS 1.6 Two Component Exciton Model and EMPIRE 3.1 Exciton Model for the pre-equilibrium reactions and PCROSS Weisskopf–Ewing Model for the equilibrium reactions have been used. The calculated results have been compared with experimental data taken from the Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) library.

**Key words:** Nuclear reaction models, fusion reactors, reaction cross-section, EXFOR, equilibrium and pre-equilibrium reactions

### 1. Giriş

Reaktördeki nükleer reaksiyonlar sırasında materyallerin yapısal dayanıklılığını etkileyecek değişimler oluşabilmektedir. Bu problemlerin önemini anlaşılabilmesi ve sorunların giderilebilmesi için tesir kesitlerinin ve parçacık yayınlanma spektrumlarının deneysel olarak ölçümü ve önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için de teorik hesaplamaların yapılması gerekir. Araştırma geliştirme çalışmalarının odak noktası; bu etkiyi anlamak, özel bileşenleri ve mikro yapıları geliştirme aşamasında kullanmak ve uygun malzemeyi üretmektir.

Füzyon güç reaktörleri hakkındaki güncel çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların reaktör yapısal malzemeleri üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Füzyon reaktörü yapı malzemelerinin seçimi, füzyon reaktör teknolojisi için vazgeçilmez bir bileşendir. Füzyon reaktörlerinde yapı malzemesi olarak kullanılan çekirdeklerin farklı parçacıklarla bombardımanı sonucunda oluşan nükleer reaksiyon etkilerinin incelenmesi; özellikle bu çekirdeklerin yapılarının tam anlaşılması, reaksiyon sonucu

üretilen parçacıkların kullanımının geliştirilmesi ve ayrıca parçacık hızlandırıcılarının ve füzyon reaktörlerinin zırhlanması bakımından önemlidir.

Deneysel ölçümler uzun süreli, masraflı ve de her izotop için her enerjide mümkün olmasa da, reaksiyon mekanizmaların anlaşılabilmesi ve teorik modellerin hazırlanıp geliştirilebilmesi için deneysel tesir kesitlerine ihtiyaç vardır. Aynı zamanda; teorik modellerin doğrulanması ve ampirik formül çalışmalarının oluşturulabilmesi için, deneysel verilere başvurulmaktadır. Diğer taraftan; bilimsel olarak doğrulanmış ve başarılı bir öngörüye sahip teorik nükleer model ile elde edilen tesir kesiti verisi, deneysel yolla elde edilemeyen bir eksikliği giderebilir. Bu durumda, hem deneysel hem de teorik tesir kesiti çalışmaları bu alanda önemli bir ihtiyaçtır. Ayrıca; elde edilen nükleer veriler, nükleer yapının araştırılması için teorik çalışmalarda ve nükleer modellerin geliştirilmesinde de önemli yer tutmaktadır.

Bu çalışmada; denge ve denge-öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanarak, 10–30 MeV enerji aralığında ( $\gamma, p$ ) reaksiyon tesir kesitleri  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  hedef çekirdekleri için hesaplanmıştır. Hesaplanan teorik ve deneysel tesir kesiti değerleri her bir reaksiyon için Şekil 1–4’te verilmiştir. Deneysel değerler EXFOR/CSISRS kütüphanesinden [1] elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Füzyon reaktörü yapı malzemesi olarak kullanılan materyallerden  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  ve  $^{90}\text{Zr}$  izotoplarının hedef çekirdekleri ile oluşturulan 10–30 MeV enerji aralığında ( $\gamma, p$ ) reaksiyonlarına ait tesir kesitleri denge ve denge-öncesi reaksiyon modelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Denge hesaplamaları için; PCROSS [2] (Weisskopf-Ewing Model) [3], denge-öncesi hesaplamaları için ise; EMPIRE 3.1 (Exciton Model) [4,5] ve TALYS 1.6 (İki Bileşenli Exciton Modeli ve Pre-Equilibrium Model) [6] bilgisayar işlem tabanlı hesaplama programları kullanılmıştır.

Denge reaksiyonları; mermi parçacığının hedef çekirdekle etkileşmesi sonrasında mermi+hedef sistemini oluşturduktan sonra, direk reaksiyonlara göre uzun sayılabilecek bir süre ( $10^{-16} - 10^{-18}$ ) sonra parçacık yayınlanmanın mümkün olduğu bir süreçtir. 10–20 MeV gibi düşük enerjilerde geçerli olan bu süreç, Weisskopf-Ewing Modeli ile açıklanmıştır. Denge reaksiyonu hesaplamaları için temel parametreler; ters reaksiyon kesiti, bağlama enerjileri, çift oluşum enerjisi ve seviye yoğunluk parametreleridir.

Nükleer reaksiyonda, giriş kanalı  $a$  ve çıkış kanalı  $b$  olmak üzere reaksiyon tesir kesiti;

$$\sigma_{ab}^{WE} = \sigma_{ab}(E_{inc}) \frac{\Gamma_b}{\sum_{b'} \Gamma_{b'}} \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Denklem 1’de;  $\Gamma_b$ ,

$$\Gamma_b = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^2} \mu_b \int d\varepsilon \sigma_b^{inv}(\varepsilon) \varepsilon \frac{\omega_1(U)}{\omega_1(E)} \quad (2)$$

dir. Denklem 2’de;  $U$  çekirdek uyarım enerjisi,  $\mu_b$  indirgenmiş kütle,  $S_b$  spindir. Toplam tek parçacık yoğunluk seviyesi;

$$\omega_1(E) = \frac{1}{\sqrt{48}} \frac{\exp\left[2\sqrt{\alpha(E-D)}\right]}{E-D} \quad \alpha = \frac{6}{\pi^2} g \quad (3)$$

ile hesaplanır. Burada;  $\sigma_b^{inv}$  ters tepkime tesir kesiti,  $E$  bileşik çekirdek uyarım enerjisi,  $D$  çift oluşum enerjisi ve  $g$  tek parçacık için yoğunluk seviyesidir [7].

EMPIRE; çeşitli nükleer modeller içeren, nükleer reaksiyon hesaplama kodlarında oluşan bir bilgisayar programı olup, enerjileri ve olay parçacıkları geniş bir enerji aralığı üzerinde hesaplamalar için tasarlanmıştır [5]. EMPIRE denge-öncesi nükleer reaksiyon hesaplamaları için Exciton model kullanılmaktadır. Exciton model [4], gelen parçacık ile hedef çekirdek arasındaki ilk etkileşmeden sonra uyarılmış sistemin giderek artan karmaşıklıkta bir dizi basamaktan geçtikten sonra dengeye ulaşabildiğini varsayar. Exciton model hesaplamaları için; Cline [8] ve Ribansky [9] tarafından önerilen,

$$\begin{aligned} -q_{t=0}(n) &= \lambda_+(E, n+2)\tau(n+2) + \lambda_-(E, n-2)\tau(n-2) \\ &\quad -[\lambda_+(E, n)\lambda_+(E, n) + L(E, n)]\tau(n) \end{aligned} \quad (4)$$

Denklem 4 kullanılmaktadır. Burada;  $q_t(n)$  “ $n$ ” eksiton sayısı olmak üzere kompozit çekirdeğin ilk oluşum ihtimali,  $\lambda_+(E, n)$  ve  $\lambda_-(E, n)$  komşu izotoplar için bozunum geçiş oranı ve  $L(E, n)$  parçacıklar ve  $\gamma$ -ışını için yayınlanma enerjisi üzerinden hesaplanan toplam yayınlanma oranıdır. Denge-öncesi spektrum hesaplamaları için,

$$\frac{d\sigma_{a,b}}{d\varepsilon_b}(\varepsilon_b) = \sigma_{a,b}^r(E_{inc})D_{a,b}(E_{inc}) \times \sum_n W_b(E, n, \varepsilon_b)\tau(n) \quad (5)$$

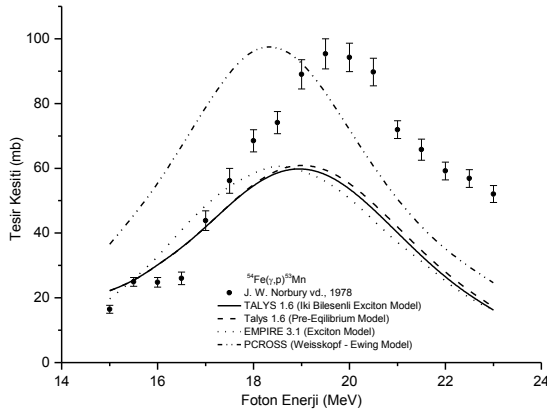
Denklem 5 kullanılmaktadır. Burada;  $\sigma_{a,b}^r(E_{inc})$ ,  $(a, b)$  reaksiyonu için tesir kesiti,  $W_b(E, n, \varepsilon_b)$  “ $n$ ” eksiton’undaki  $\varepsilon_b$  enerjili parçacığın yayınlanma olasılığı ve  $E$  birleşik çekirdek eksiton enerjisidir.  $D_{a,b}(E_{inc})$  azaltma faktörüdür [10].

TALYS; proton, nötron, triton, döteron,  $^3\text{He}$  ve alfa parçacıklarını içeren, 1keV – 1GeV enerji aralığında nükleer reaksiyon hesaplama ve analiz işlemlerini gerçekleştiren bir simülasyon programıdır. Bu hesaplama ve analiz işlemleri için TALYS içerisine; optik modeller, denge öncesi model, fisyon modelleri, nükleer seviye yoğunluk modelleri, nükleer model parametreleri, gama fonksiyonları ve istatistiksel nükleer reaksiyon modelleri entegre edilmiştir. Böylece, tüm nükleer reaksiyon kanalları için bir analiz sonucu vermektedir [6]. TALYS programında denge-öncesi reaksiyonlar hesaplamaları için Kalbach [11] sistematikleri kullanılmıştır. Kalbach sistematikleri tekli ve çift bileşenli eksiton yaklaşımlarına sahiptir. Bu çalışmada, çift bileşenli eksiton modeli kullanılmıştır.

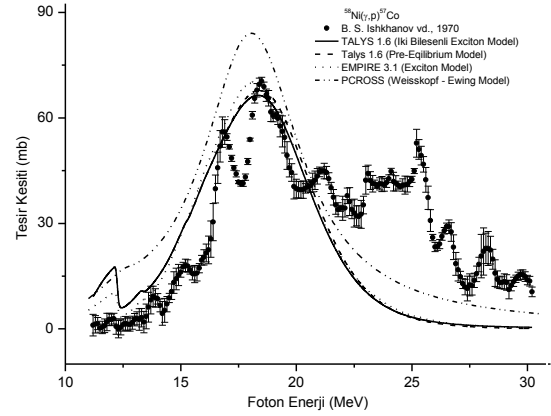
### 3. Bulgular

Bu çalışmada;  $^{54}\text{Fe}(\gamma,p)^{53}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Ni}(\gamma,p)^{57}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Zr}(\gamma,p)^{89}\text{Y}$  ve  $^{27}\text{Al}(\gamma,p)^{26}\text{Mg}$  reaksiyonları için 10–30 MeV foton gelme enerjisi aralığında denge ve denge–öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak tesir kesiti hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

$^{54}\text{Fe}(\gamma,p)^{53}\text{Mn}$  reaksiyonuna ait deneysel ve teorik hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 1’ de verilmiştir. TALYS 1.6 (İki Bileşenli Exciton Model ve Pre–Equilibrium Model) ve EMPIRE 3.1 Exciton Model hesaplama değerleri bir biri ile uyum içerisinde olmakla birlikte, genelde deneysel verileri aşağıdan takip etmektedir ve 15–18 MeV arasında deneysel değerler ile uyumludur. PCROSS Weisskopf–Ewing Model hesaplamaları deneysel değerler ile aynı yapıyı sergilese de uyumsuzdur.  $^{58}\text{Ni}(\gamma,p)^{57}\text{Co}$  reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 2), TALYS 1.6 hesaplamaları ve EMPIRE 3.1 Exciton Model değerleri deneysel verilerle 22 MeV foton gelme enerjisine kadar tamamen olmamakla birlikte uyumludur. PCROSS Weisskopf–Ewing Model hesaplamaları ise, 20 MeV’ e kadar deneysel değerleri üstten takip etmiştir.

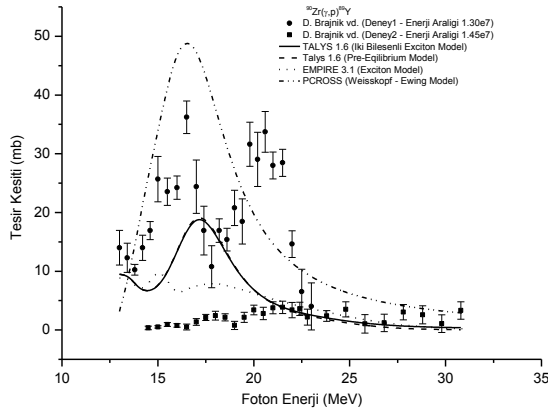


Şekil 1.  $^{54}\text{Fe}(\gamma,p)^{53}\text{Mn}$  reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.

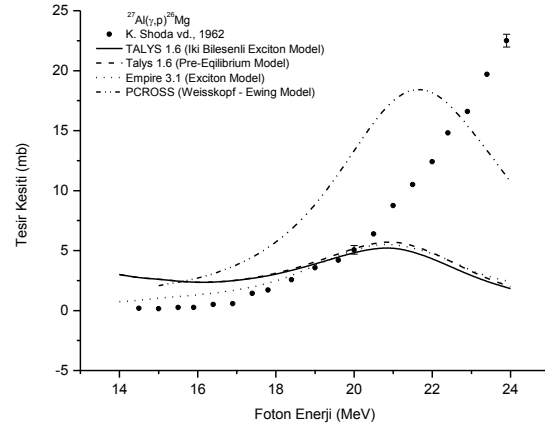


Şekil 2.  $^{58}\text{Ni}(\gamma,p)^{57}\text{Co}$  reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.

$^{90}\text{Zr}(\gamma,p)^{89}\text{Y}$  reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 3), TALYS 1.6 (İki bileşenli Exciton Model ve Pre–Equilibrium Model) modelleri *D. Barjnik vd.*’in [12] birinci deneysel değerleri ile 23 MeV’ e kadar uyumlu olup, *D. Barjnik vd.*’in ikinci deneysel verileri için ise 23–31 MeV enerji aralığında tam uyumludur. EMPIRE 3.1 Exciton Model ise; deneysel verilerden düşük değerler olsa da, 21–31 MeV arasında *D. Barjnik vd.*’in ikinci deneysel değerleri ile uyumludur. PCROSS Weisskopf–Ewing Model hesaplamaları deneysel değerleri, *D. Barjnik vd.*’in birinci deneysel sonuçları ile kısmen uyumlu olup, 25 MeV den sonra *D. Barjnik vd.*’in ikinci deneysel değerleri ile uyum sergilememektedir.  $^{27}\text{Al}(\gamma,p)^{26}\text{Mg}$  reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 4), EMPIRE 3.1 Exciton Model hesaplamaları deneysel veriler ile 20 MeV kadar uyumlu olup, bu değerden sonra deneysel verilerden sapmıştır. TALYS 1.6 hesaplamaları ise, 19 MeV kadar deneysel verilerden yüksek değerler almasına rağmen 20 MeV den sonra uyumsuzdur. PCROSS Weisskopf–Ewing Model hesaplamaları deneysel değerleri ile uyum göstermemiştir.



Şekil 3.  $^{90}\text{Zr}(\gamma,p)^{89}\text{Y}$  reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.



Şekil 4.  $^{27}\text{Al}(\gamma,p)^{26}\text{Mg}$  reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.

#### 4. Sonuç ve Yorum

Genelde; TALYS 1.6 (İki bileşenli Exciton Model ve Pre-Equilibrium Model) modelleri birbirleri ile uyumlu sonuçlar vermesine rağmen, deneysel verileri aşağıdan takip etmektedir. Weisskopf-Ewing Model, deneysel verilerin geometrisini yakalasa da, deneysel verilerden yüksek değerler almıştır. EMPIRE 3.1 Exciton Model model hesaplamaları deneysel verilerden düşük değerler olsa da, TALYS 1.6 modelleri ile yaklaşık 20 MeV den sonra yakın sonuçlar vermektedir. Kullanılan bilgisayar kodlarında yer alan model parametre değerleri değiştirilerek, hesaplama sonuçları deneysel verilerle uyum sağlayabilir.

Bu çalışmadaki bulgular; yapılması planlanan füzyon reaktörleri ve yapılmakta olan hızlandırıcı merkezlerinde kullanılan ve/veya kullanılacak olan yapı elementlerinin nükleer reaksiyon modellerine dayanan tesir kesiti hesaplamaları; radyoizotop üretim programları için gerekli veri tabanının güçlendirilmesi, yeni veri tabanı oluşturulması, üretim teknolojisinin geliştirilmesi, fisyon ve füzyon reaktörlerinin anlaşılması ve yapılacak deneysel çalışmalara model oluşturulması açısından değerlendirilebilir.

#### Teşekkür ve Bilgi

Bu çalışma; Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi 3748-D2-13 nolu proje tarafından desteklenmektedir. Ayrıca, Adım Fizik Günleri III 2014'de poster olarak sunulmuştur.

#### Kaynaklar

- [1] Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center, EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data File). Database Version of November 20, 2013 (2013), (<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/>)
- [2] Capote R., et al., Final Report on Research Contract 5472/RB, INDC(CUB)-004 (Higher Institute of Nuclear Science and Technology, Cuba), Translated by the IAEA on March 1991 (PCROSS program code)

- [3] Weisskopf V.F., Ewing D.H., 1940. On the yield of nuclear reactions with heavy elements, *Physical Review*, 57(6): 472-486.
- [4] Herman M., et al., 2007. EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation, *Nucl. Data Sheets*, 108: 2655-2715.
- [5] Herman M., et al., EMPIRE-3.1 Rivoli Modular System for Nuclear Reaction Calculations and Nuclear Data Evaluation, User's Manual (2012).
- [6] Koning, A., Hilaire, S., Goriely, S., TALYS-1.6 A Nuclear Reaction Program, User Manual (NRG, The Netherlands), First Edition: December 23, 2013.
- [7] Özdoğan H., Kaplan, A., 2013.  $^{197}\text{Au}$  için reaksiyon tesir kesiti hesaplamaları, *SDÜ Fen Dergisi*, 8 (1): 82-91.
- [8] Cline C.K., 1972. The Pauli exclusion principle in pre-equilibrium decay, *Nuclear Physics A*, 195: 353-360.
- [9] Ribansky I., et al., 1973. Pre-equilibrium decay and the exciton model, *Nuclear Physics A*, 205: 545-560.
- [10] Kaplan A., Çapalı, V., 2014. Cross-section calculations on several structural fusion materials for  $(\gamma, 3n)$  reactions in the photon energy range of 20–110 MeV, *Journal of Fusion Energy*, 33: 299-303.
- [11] Kalbach C., 2005. Preequilibrium reactions with complex particle channels, *Physical Review C*, 71: 034606.
- [12] Brajnik D., et al., 1976. Photonuclear reactions in  $^{90}\text{Zr}$ , *Physical Review C*, 13: 1852-1863.

Hasan ÖZDOĞAN e-posta : [hasanozdogan@akdeniz.edu.tr](mailto:hasanozdogan@akdeniz.edu.tr)

S. Sedat DOĞAN e-posta: [s\\_s\\_dogan32@hotmail.com](mailto:s_s_dogan32@hotmail.com)

Abdullah KAPLAN e-posta: [abdullahkaplan@sdu.edu.tr](mailto:abdullahkaplan@sdu.edu.tr)