



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<http://dergipark.gov.tr/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Reaktör Yapı Materyallerinde Bulunan ^{45}Sc , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{59}Co ve ^{63}Cu İzotoplarının (γ, n) Reaksiyon Tesir Kesitleri Hesaplamaları*

Ömer Faruk ÖZDEMİR^{*1}, Ali ARASOĞLU²

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 65080, Van, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Emekli Öğretim Üyesi, 65130, Van, Türkiye

Ömer Faruk ÖZDEMİR, ORCID No: 0000-0002-2389-1139, Ali ARASOĞLU, ORCID No: 0000-0001-7753-0016

*Sorumlu yazar e-posta: o.f.ozdemir@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 12.04.2021

Kabul: 11.05.2021

Yayınlanma Ağustos 2021

DOI: 10.53433/yyufbed.913870

Anahtar Kelimeler

Foto-nötron reaksiyonları,

Tesir kesiti,

Denge modelleri,

Denge öncesi modelleri

Öz: Bu çalışmada reaktör korunda veya zırhlama betonunda kullanılan yapı malzemelerin de bulunan ^{45}Sc , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{59}Co ve ^{63}Cu izotoplarının, 10 - 50 MeV enerji aralığında foto - nötron reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamaları yapıldı. Hesaplamalarda Weisskopf - Ewing Model için PCROSS, Hibrid Monte - Carlo Simülasyon Modeli için ALICE - 2011 ve Kaskad Eksiton Model için de CEM03.01 programları kullanıldı. Her model için yapılan tesir kesiti hesaplamaları birbirleriyle, EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data) veri tabanından alınan deneysel veriler ile ve literatürde yer alan JANIS (Java - based Nuclear Information Software) veri kütüphanesinden elde edilen değerlendirilmiş verilerle (JENDL/PD - 2004 ve TENDL - 2014) karşılaştırıldı.

(γ, n) Reaction Cross Section Calculations of ^{45}Sc , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{59}Co and ^{63}Cu Isotopes in Reactor Building Materials

Article Info

Received: 12.04.2021

Accepted: 11.05.2021

Published August 2021

DOI: 10.53433/yyufbed.913870

Keywords

Photo-neutron reactions,

Cross section,

Equilibrium models,

Pre-equilibrium models

Abstract: In this study, the cross - section calculations of photo - neutron reactions of ^{45}Sc , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{59}Co and ^{63}Cu isotopes which are used in building materials of reactor core or shielding concrete in the range of 10 - 50 MeV were performed. PCROSS for the Weisskopf - Ewing Model, ALICE - 2011 for the Hybrid Monte - Carlo Simulation Model, and CEM03.01 for the Cascade Exciton Model were performed in the calculations. The findings obtained from cross - section calculations of each model were compared not only with each other, but also experimental and theoretical data gathered from EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data) database and JANIS (Java - based Nuclear Information Software) data library (JENDL / PD - 2004 and TENDL - 2014), respectively.

* Bu çalışma, Ömer Faruk ÖZDEMİR'in doktora tezinden üretilmiştir.

1. Giriş

Nükleer reaktörler için malzeme ve yakıt seçimi, fizik, kimya, malzeme bilimi ve mühendisliği, sistem analizi ve ekonomi dahil çok disiplinli bir yaklaşımı içerir. Uygun malzemeyi seçmek için, her bir malzemenin bakımı ve geri dönüşümü için kimyasal bileşimleri dikkate alınmalıdır. Ayrıca yapısal malzemelerin de yüksek radyasyona dayanıklı, yoğun nötron akısına karşı düşük aktivasyona sahip olması diğer zorunluluklardır (Simnad, 2003).

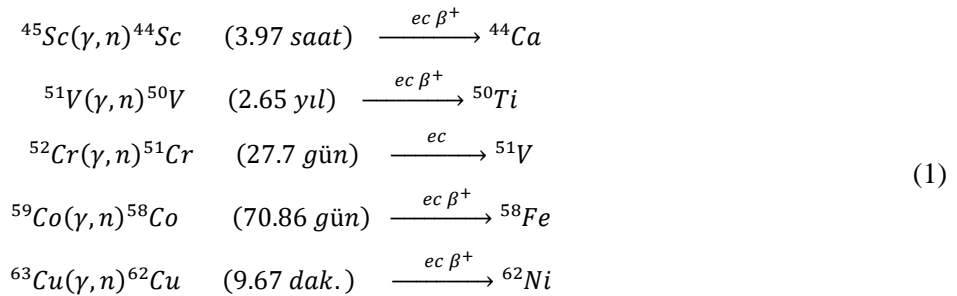
Nükleer reaktörlerde kullanılan yapısal malzemelerin gerçekleştirdikleri reaksiyonlar, reaktör ömrü ile reaktörün bakım ve onarım sürelerini etkiler (Clement, 2010). Yüksek radyasyona maruz kalan yapısal malzemenin transmutasyon sonucu radyoaktif izotoplara dönüşmesi istenmeyen bir sonuçtur. Bu nedenle söz konusu reaksiyonların türü ve reaksiyon tesir kesitlerinin öngörülebilir olması uygun malzeme seçimi için çok önemlidir (Simnad, 2003). Nükleer teknolojiyi verimli ve güvenli bir şekilde kullanmak için çok sayıda deneysel ve teorik veriye ihtiyaç duyulur. Deneysel verinin elde edilememesi veya deneysel araştırma yapılamaması durumunda teorik kesit hesaplamaları önemli bir rol üstlenir. Dolayısıyla tasarımda zırh geometrisi, kullanılan malzemenin bileşenleri ile yoğunlukları, elementlere ait tesir kesitleri ve termal özelliklerinin bilinmesi zorunludur (Shultis & Faw, 2012).

Tesir kesiti hesaplamaları için bileşik çekirdek modeli (Weisskopf & Ewing, 1940), denge öncesi bozunma için (eksiton model) (Griffin, 1966), denge öncesi reaksiyon modellerinin sentezi olarak kabul edilen hibrid model (Blann, 1971) ve yine denge öncesi parçacık yayınlama hesaplamaları için Kaskad - Eksiton Model (Gudima ve ark., 1983) önerilmiştir. Blann (1996) tarafından Monte Carlo simülasyon modeli kullanılarak yeni bir denge öncesi reaksiyon modeli sunulmuş ve Hibrid Monte - Carlo simülasyon modeli ile hesaplamalar için ALICE - 2011 bilgisayar programı yayınlanmıştır (Blann, 2011). Nükleer reaksiyon modelleri ile denge ve denge öncesi parçacık yayınlama ve foto nötron tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır (Uğur ve ark., 2013; Siddik, 2019; Özdoğan ve ark., 2020; Fynan ve ark., 2021).

Foto - nötron reaksiyonlarının, fisyon, füzyon ve hibrit reaktör korundaki nötron ekonomisine katkısı oldukça önemlidir. Ayrıca reaktör korundan yayınlanan yüksek enerjili gama ışınlarının menzili ve gericiliğinin büyük olması, reaktör zırlamasında foto - nötron reaksiyonlarının önemini artırmaktadır. Radyasyonun personel güvenliğini tehdit etmesi ve elektronik ekipmanlarda tahribata sebep olması nedeniyle reaktörlerde zırlama büyük öneme sahiptir (Gupta, 2001; Pearton ve ark., 2013). Bu nedenle yapısal malzemelerin seçiminde kullanılacağı yer ve oluşabilecek ikincil radyasyonlar göz önüne alınarak bir planlama yapılması zorunluluktur seçilen malzeme içindeki izotopların nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin belirlenmesi ve öngörülebilmesi oldukça önemlidir.

Foto - nükleer reaksiyon tesir kesitleri için uygulamada en önemli uyarılma enerji aralığı, birçok laboratuvar ve hastanede bulunan küçük doğrusal hızlandırıcılar ile elde edilebilen 25 MeV'e kadardır. Ayrıca, 30 MeV'nin altındaki düşük enerjilerde, dev dipol rezonansı (GDR) baskın uyarma mekanizmasıdır. 50 MeV enerjeye kadar olan foto nükleer veriler, geliştirilmekte olan yeni tıbbi hızlandırıcı teknolojileri için de yararlıdır (IAEA, 2000).

Nükleer reaktörlerde yapı malzemesi olarak yaygın bir kullanım alanına sahip olan betonun hidrojen içermesi (%0.54-2.22) nötron ve gama zırlama için de uygun bir malzeme olmasını sağlar (Shultis, 2010). Reaktörlerde zırlama amacıyla kullanılan beton içerisinde yer alan elementlerden bazılarının foto - nötron reaksiyonları ile yayınlanan ikincil radyasyon ve oluşan kararlı çekirdekler aşağıda verildiği gibidir.



⁴⁵Sc, ⁵¹V, ⁵²Cr, ⁵⁹Co ve ⁶³Cu izotopları için verilen reaksiyonlarda görülen son ürünlerin kararlı izotoplar olmaları bir avantaj sağlamakta ancak oluşan ikincil parçacıklar (β^+) ortam içerisindeki elektronlarla annihilasyon gerçekleştirerek yeniden düşük enerjili bir gama yayınlanmasına neden olurlar. Yapısal malzeme içinde oluşan ikincil gamalar şayet zırlama malzemesinin yüzeyinden yayınlanırsa personel ve ekipman güvenliği için dezavantaj oluşturabilir. Bu nedenle yapısal malzemelerin seçiminde kullanılacağı yer ve oluşabilecek ikincil radyasyonlar göz önüne alınarak bir planlama yapılması zorunluluktur. Bu amaçla malzeme içindeki seçilen izotopların nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin belirlenmesi ve öngörülebilmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada reaktör korunda veya zırlama betonunda kullanılan yapı materyallerinde bulunan ⁴⁵Sc, ⁵¹V, ⁵²Cr, ⁵⁹Co ve ⁶³Cu izotopların, 10-50 MeV aralığında foto - nötron reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamaları yapıldı. Hesaplamalarda Weisskopf - Ewing Model için PCROSS, Hibrid Monte - Carlo Simülasyon Modeli için ALICE - 2011 ve Kaskad Eksiton Model için de CEM03.01 programları kullanıldı. Her model için yapılan tesir kesiti hesaplamaları birbirleriyle, EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data) veri tabanından alınan deneysel veriler ile ve literatürde yer alan JANIS (Java - based Nuclear Information Software) veri kütüphanesinden elde edilen değerlendirilmiş verilerle (JENDL/PD - 2004 ve TENDL - 2014) karşılaştırıldı.

2. Materyal ve Yöntem

Sıvı damlası modeli benzetiminin kullanıldığı Bileşik Çekirdek Modeli nükleer reaksiyonların iki bağımsız aşamada gerçekleştiğini varsayar. Bu aşamalardan ilki; çekirdeğin mermi tanecik ile istatistiksel dengeye ulaştığı bileşik çekirdeğin oluşumu, ikincisi ise; bileşik çekirdeğin bozunumudur.

Weisskopf - Ewing (WE) modele göre bileşik çekirdek reaksiyon tesir kesiti;

$$\sigma(a,b) = \sigma_a(\varepsilon) \eta_b(E) \quad (2)$$

şeklinde verilir (Weisskopf & Ewing, 1940). Burada $\sigma_a(\varepsilon)$; ε enerjili a parçacıkları ile bombardıman edilen hedef çekirdeğin bileşik çekirdek oluşturma tesir kesitidir. Kısmi parçacık yayınlama olasılığı η_b ise;

$$\eta_b = \frac{\Gamma_b}{\sum_{b'} \Gamma_{b'}} \quad (3)$$

olarak tanımlanır. Burada Γ_b bileşik çekirdeğin birim zamanda b parçacığı yayınlama olasılığıdır ve E uyarılma enerjisinin ölçülmesindeki belirsizliğin bir ölçüsüdür.

$$\Gamma_b = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^2} \mu_b \int d\varepsilon \sigma_b^{inv}(\varepsilon) \varepsilon \frac{\omega_1(U)}{\omega_1(E)} \quad (4)$$

Burada σ_b^{inv} , U, μ_b ve s_b sırasıyla ters reaksiyon tesir kesiti, ürün çekirdeğin uyarılmış durum enerjisi, indirgenmiş kütle ve spindir. E uyarılma enerjisine sahip bileşik çekirdeğin yoğunluk seviyesi

$$\omega_1(E) = \frac{1}{\sqrt{48}} \frac{\exp\left[2\sqrt{\alpha(E-D)}\right]}{E-D} \quad (5)$$

şeklinde verilir ve D çiftlenim enerjisidir. α , g, tek parçacık seviye yoğunluğu olmak üzere $\alpha = 6g/\pi^2$ şeklinde verilir (Capote ve ark., 1991).

Hesaplamalarda kullanılan ikinci model, Kaskad Eksiton Modelde (CEM) nükleer reaksiyonların i. Intranükleer Kaskad (INC), ii. Denge öncesi (Pre-Equilibrium) ve iii. Denge (Bileşik Çekirdek) olmak üzere üç aşamada gerçekleştiği varsayılır:

İlk aşama olan INC Model; çekirdeğe giren mermi parçacığın enerjisi çekirdek tarafından soğurulana kadar çarpışmalarla saparak ikincil parçacıklar oluşturması sürecidir ve Monte Carlo hesaplama yöntemine dayanan bir istatistik modeldir. INC Model'e göre; enerjinin nükleonlar arasında paylaşımı ile çekirdek, istatistik anlamda dengeye ulaşır ve WE Modele benzer şekilde buharlaşma ile parçacık yayınlar (Mashnik ve ark., 2005).

CEM03.01 programında INC model hesaplamaları için Dubna kaskad modelinin standart (zamandan bağımsız) versiyonunu kullanılır ve tüm kaskad hesaplamaları üç-boyutlu olarak ele alınır. 10~40 MeV aralığındaki enerjilerde foton tek bir nükleonla değil rezonans bölgesiyle bütün olarak etkileştiğinden INC model kullanılamaz (Mashnik ve ark., 2005). Gelme enerjisinin, GDR bölgesinin üzerinde olduğu reaksiyonlar için ortaya konulan, Dubna INC modelin fotonükleer versiyonu kullanılır. CEM, INC ile Denge arasında denge-öncesi parçacık yayınlanmasını öngörür. Eksiton durumu belirlenen çekirdek, denge durumuna ulaşana kadar, Eksiton Model'de verildiği gibi her adımda parçacık yayımlayabilir (Gudima ve ark., 1983).

CEM'de tesir kesiti hesaplamalarına her üç aşamanın da katkısı dahil edilir ve parçacık spektrumu

$$\sigma(p)dp = \sigma_{in} [N^{cas}(p) + N^{prq}(p) + N^{eq}(p)] dp \quad (6)$$

denklemini elde edilir. Burada p ; momentum ve σ_{in} ; inelastik tesir kesitidir. σ_{in} cascade model içinde hesaplanır (Mashnik ve ark., 2005).

Hibrid Monte - Carlo Simulasyon (HMS) modeli; denge - öncesi Hibrid model temel alınarak hazırlanmış, kinematik açıdan doğrulanmış iki ya da üç eksiton durumlu, her bir çekirdeğin sınırsız sayıda denge öncesi parçacık yayımlama olasılığını göz önüne alan bir modeldir (Blann, 1996). Bu modelde, Monte Carlo seçimi için öncelikle, uyarılmış nükleonun çarpışacağı nükleon türü belirlenir. Saçılmaya uğrayan nükleonların ve boşluğun, Fermi seviyesi üzerindeki enerjileri belirlenerek parçacıkların saçılma ya da yayımlanma durumu seçilir. Bu süreç; çekirdek, denge durumuna yakın enerjilere ulaşana kadar devam eder.

HMS model de, ε_L kanal enerjili bir nükleonun sürekliliğe (continuum) yayımlanma olasılığı;

$$P_v(\varepsilon_L) = \frac{\lambda_c(\varepsilon_L)}{\lambda_c(\varepsilon_L) + \lambda_+ [\varepsilon_L + BE(Z, A, \nu)]} \quad (7)$$

şeklinde verilir. Burada, $\lambda_c(\varepsilon_L)$; ε_L enerjili nükleonların sürekliliğe geçiş oranı, λ_+ ; iç geçiş oranıdır. Rölativistik kanal enerjisi ε_L ;

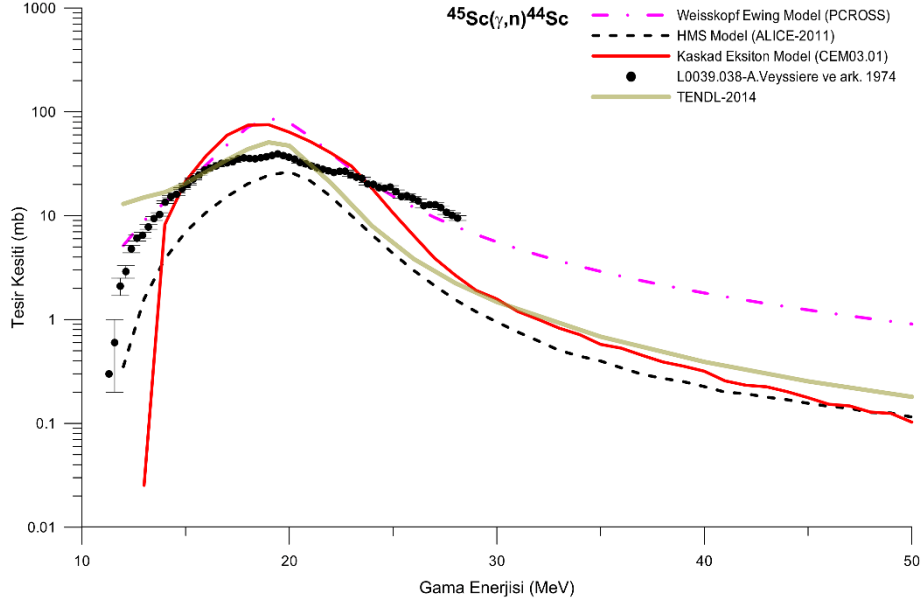
$$\varepsilon_L = \varepsilon - BE(Z', A', \nu) \quad (8)$$

olarak tanımlanır. ε ; Fermi enerjisi üzerindeki nükleon enerjisi, ν ; proton ya da nötron, Z' ve A' ; sırasıyla kaskad sürecindeki çekirdeğin atom ve kütle numaralarıdır (Blann, 2011).

3. Bulgular

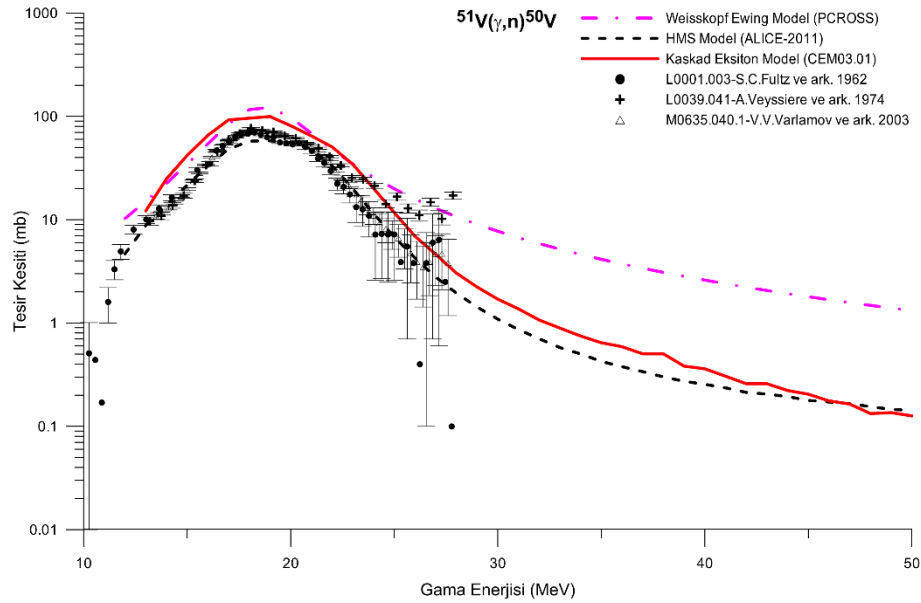
Bu çalışmada ⁴⁵Sc(γ,n)⁴⁴Sc , ⁵¹V(γ,n)⁵⁰V , ⁵²Cr(γ,n)⁵¹Cr , ⁵⁹Co(γ,n)⁵⁸Co ve ⁶³Cu(γ,n)⁶²Cu reaksiyonları için 10 - 50 MeV aralığında foto - nötron reaksiyon tesir kesitleri hesaplamaları WE Model için PCROSS, HMS model için ALICE - 2011 ve Kaskad Eksiton Modeli için de CEM03.01 programları kullanılarak yapıldı. Her model için yapılan tesir kesiti hesaplamaları birbirleri ve EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data) veri tabanından alınan deneysel veriler ile karşılaştırıldı. Deneysel verilerin sınırlı olması nedeniyle yapılan karşılaştırmalarda; JANIS (Java - based Nuclear Information Software) üzerinden alınan ve literatürde yer alan JENDL - 4.0 (Japanese Evaluated Nuclear Data Library), TENDL - 2014 (TALYS - based Evaluated Nuclear Data Library) ve JEFF - 3.2 (Joint Evaluated Fission and Fusion File) değerlendirilmiş veri kütüphanelerinden yararlanılarak Şekil 1, 2, 3, 4 ve 5 teki grafikler çizildi.

$^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44}\text{Sc}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarından (Şekil ; WE model sonuçları 12 - 28 MeV aralığında deneysel verilerle uyumludur. 28 MeV'den itibaren diğer model sonuçlarından ve değerlendirilmiş verilerden daha büyük değerli ancak benzer yapıdadır. HMS model ve CEM hesaplamaları, deneysel ve TENDL - 2014 verileri iyi uyum içerisindedir.



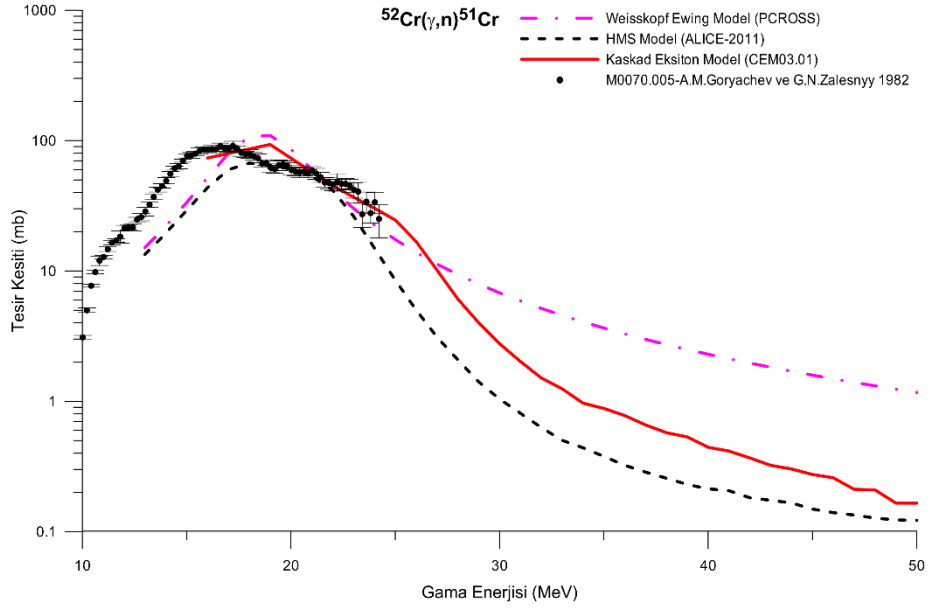
Şekil 1. $^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44}\text{Sc}$ reaksiyonunun hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel (EXFOR) ve değerlendirilmiş verilerle (TENDL - 2014) karşılaştırılması.

$^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarından (Şekil ; HMS model sonuçları 12-27 MeV aralığında deneysel verilerle çok iyi uyumludur. Tüm enerji aralığında diğer model sonuçlarından daha düşük değerli ancak CEM hesaplamaları ile benzer yapıdadır. WE model ve CEM hesaplamaları, deneysel veriler ile iyi uyum içerisindedir. $^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$ reaksiyonu için JANIS veri tabanında değerlendirilmiş veri bulunmamaktadır.



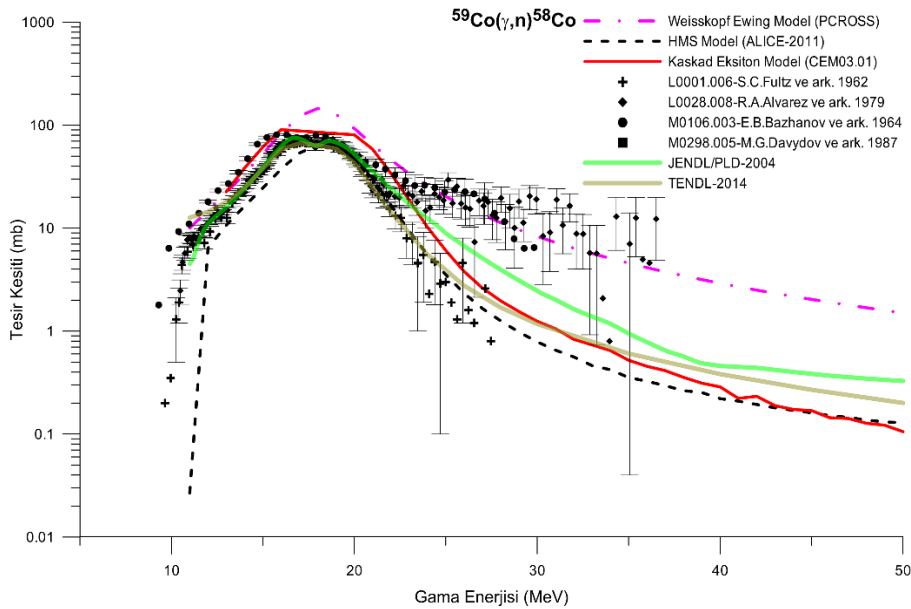
Şekil 2. $^{51}\text{V}(\gamma, n)^{50}\text{V}$ reaksiyonunun hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel (EXFOR) ve değerlendirilmiş verilerle (JENDL/PD-2004, TENDL-2014) karşılaştırılması.

$^{52}\text{Cr}(\gamma, n)^{51}\text{Cr}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarından (Şekil ; WE model sonuçları 18 - 25 MeV aralığında deneysel verilerle çok iyi uyumludur. 25 MeV'den itibaren diğer model sonuçlarından daha büyük değerlidir. HMS model ve CEM hesaplamaları, deneysel verilerle iyi uyum içerisindedir. $^{52}\text{Cr}(\gamma, n)^{51}\text{Cr}$ reaksiyonu için JANIS veri tabanında değerlendirilmiş veri bulunmamaktadır.



Şekil 3. $^{52}\text{Cr}(\gamma, n)^{51}\text{Cr}$ reaksiyonunun hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel (EXFOR) verilerle karşılaştırılması.

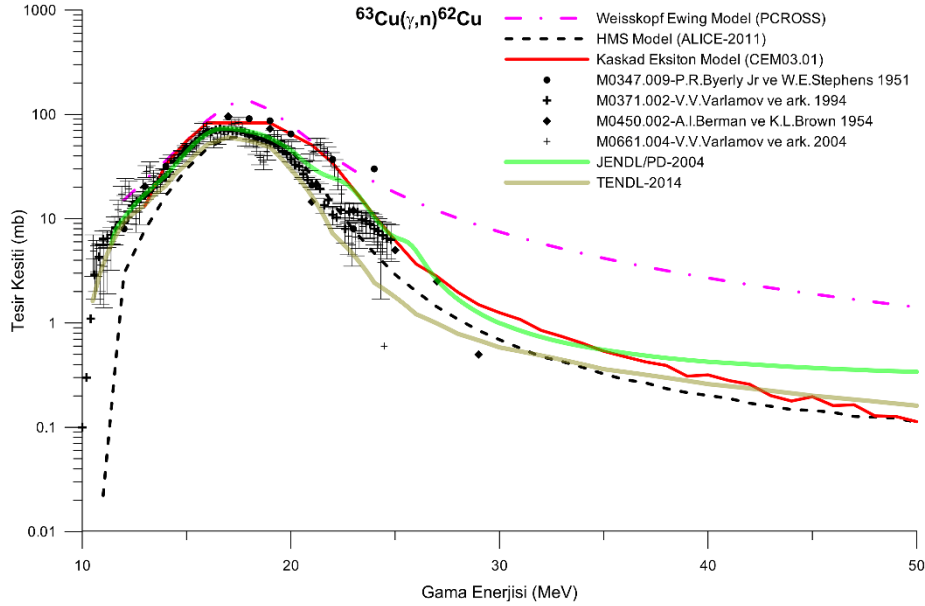
$^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarından (Şekil ; WE model sonuçları 10 - 30 MeV aralığında deneysel verilerle çok iyi uyumludur. 30 MeV'den itibaren diğer model sonuçlarından ve değerlendirilmiş verilerden daha büyük değerli ancak benzer yapıdadır. HMS model ve CEM hesaplamaları, deneysel ve JENDL/PD - 2004 ile TENDL - 2014 verileri çok iyi uyum içerisindedir.



Şekil 4. $^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}$ reaksiyonunun hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel (EXFOR) ve değerlendirilmiş verilerle (JENDL/PD - 2004, TENDL - 2014) karşılaştırılması.

$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarından (Şekil ; WE model sonuçları 12 - 22 MeV aralığında deneysel verilerle çok iyi uyumludur. 22 MeV'den itibaren diğer model sonuçlarından

ve değerlendirilmiş verilerden daha büyük ancak benzer yapıdadır. HMS model ve CEM hesaplamaları, deneysel ve JENDL/PD - 2004 ile TENDL - 2014 verileri çok iyi uyum içerisindedir.



Şekil 5. $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ reaksiyonunun hesaplanan tesir kesitlerinin deneysel (EXFOR) ve değerlendirilmiş verilerle (JENDL/PD - 2004, TENDL - 2014) karşılaştırılması.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada nükleer reaktör yapı materyallerinde bulunan ^{45}Sc , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{59}Co ve ^{63}Cu izotoplarının, 10 - 50 MeV aralığında foto - nötron reaksiyon tesir kesiti hesaplamaları yapıldı.

Denge ve denge öncesi reaksiyon modellerinin kullanıldığı hesaplamalar, Weisskopf-Ewing Model için PCROSS, Hibrid Monte Carlo Simulasyon Modeli için Alice-2011 ve Kaskad Eksiton Model için de CEM03.01 bilgisayar programları ile yapıldı. Elde edilen sonuçlar birbirleri ve literatürde yer alan deneysel ve değerlendirilmiş verilerle karşılaştırıldı.

Sonuçlar ayrıntılı olarak incelendiğinde WE model sonuçlarının 10 - 28 MeV enerji aralığında deneysel ve değerlendirilmiş verilerle uyumlu ancak yüksek enerji bölgesinde diğer model sonuçlarından ve değerlendirilmiş verilerden daha büyük sonuçlar verdiği görülür. ^{59}Co hesaplamalarında ise WE model yüksek enerji bölgesinde değerlendirilmiş verilerden daha başarılı sonuçlar vermekte ve deneysel verilerle çok iyi uyum göstermektedir.

HMS ve CEM ^{45}Sc hesaplamaları haricinde deneysel verilerle iyi uyum göstermekte, yüksek enerji bölgesinde de değerlendirilmiş verilerle uyumunu sürdürmektedir.

Elde edilen bulgular, düşük enerji bölgesinde her üç modelinde literatürde yer alan verilerle uyumlu olduğunu ve başarılı hesaplamalar yaptığını gösterir. Yüksek enerji bölgesinde ise HMS ve CEM model değerlendirilmiş verilerle uyumludur ve herhangi bir parametre düzeltmesine gerek olmadan kullanılacakları şeklinde yorumlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından 2013-FBE-D005 No'lu proje olarak desteklenmiştir.

Kaynakça

- Blann, M. (1971). Hybrid model for pre-equilibrium decay in nuclear reactions. *Physical Review Letters*, 27(6), 337–340. doi:10.1103/PhysRevLett.27.337
- Blann, M. (1996). New precompound decay model. *Physical Review C - Nuclear Physics*, 54(3), 1341–

1349. doi:10.1103/PhysRevC.54.1341
- Blann, M. (2011). Particle Spectra from HMS Precompound Nucleus Decay (ALICE2011). *Package ID USCD1238*, 5.
- Capote, R., Osorio, V., Lopez, R., Herrera, E., & Piris, M. (1991). *Analysis of Experimental Data on Neutron-Induced Reactions and Development of Code PCROSS for The Calculation of Differential Pre-equilibrium Emission Spectra With Modelling of Level Density Function*.
- Clement Lemaignan (2010). Nuclear Materials and Irradiation Effects. Dan Gabriel Cacuci (Ed.), *Handbook of Nuclear Engineering* (545-631). Boston, MA, USA: Springer. doi:10.1007/978-0-387-98149-9
- Fynan, D. A., Seo, Y., Kim, G., Barros, S., & Kim, M. J. (2021). Photoneutron production in heavy water reactor fuel lattice from accelerator-driven bremsstrahlung. *Annals of Nuclear Energy*, 155, 108141. doi:10.1016/j.anucene.2021.108141
- Griffin, J. J. (1966). Statistical model of intermediate structure. *Physical Review Letters*, 17(9), 478–481. doi:10.1103/PhysRevLett.17.478
- Gudima, K. K., Mashnik, S. G., & Toneev, V. D. (1983). Cascade-exciton model of nuclear reactions. *Nuclear Physics, Section A*, 401(2), 329–361. doi:10.1016/0375-9474(83)90532-8
- Gupta, C. K. (2001). Nuclear Reactor Materials. In K.H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Iilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, P. Veyssière (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 6339–6349). Pergamon. doi:10.1016/B0-08-043152-6/01123-2
- IAEA. (2000). *Handbook on Photonuclear Data for Applications Cross-sections and Spectra*. 7, 284. <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6043/Handbook-on-Photonuclear-Data-for-Applications-Cross-sections-and-Spectra>
- Mashnik, S. G., Gudima, K. K., Sierk, A. J., Baznat, M. I., & Mokhov, N. V. (2005). CEM03. 01 user manual. *LANL Report LA UR*, 5, 7321.
- NEA (2015). JANIS 4.0 Java-based Nuclear Data Information System. <https://www.oecd-nea.org/janis/>. Erişim tarihi: 25.03.2021.
- 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}Cr(α,x) Reactions. *Physics of Atomic Nuclei*, 83(6), 820–827. doi:10.1134/s1063778820660060
- Pearnton, S. J., Deist, R., Ren, F., Liu, L., Polyakov, A. Y., & Kim, J. (2013). Review of radiation damage in GaN-based materials and devices. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 31(5), 050801. doi:10.1116/1.4799504
- Shultis, J. K., & Faw, R. E. (2010). Radiation Shielding and Radiological Protection, v.2. In D. G. Cacuci (Eds.), *Handbook of Nuclear Engineering* (pp. 1313-1448). Boston, MA, USA: Springer. doi:10.1007/978-0-387-98149-9_11.
- Shultis, J. K., & Faw, R. E. (2012). Radiation Shielding. In R. A. Meyers (Eds.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 8536-8559). Newyork, USA: Springer-Verlag New York. doi:10.1007/978-1-4419-0851-3_25
- Siddik, T. (2019). Theoretical cross-sectional calculation of some structural fusion material on (n, α)-induced reactions. *Indian Journal of Physics*, 93(7), 921–925. doi:10.1007/s12648-018-1349-3
- Simmad, M. T. (2003). Nuclear Reactor Materials and Fuels. In R. A. Meyers (Eds.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)* (pp. 775–815). USA: Academic Press. doi:10.1016/b0-12-227410-5/00498-1
- Uğur, F. A., Tel, E., & Gökçe, A. A. (2013). A study on 19F(n,α) reaction cross section. *Journal of Fusion Energy*, 32(3), 414–418. doi:10.1007/s10894-012-9587-4
- Weisskopf, V. F., & Ewing, D. H. (1940). On the yield of nuclear reactions with heavy elements. *Physical Review*, 57(6), 472–485. doi:10.1103/PhysRev.57.472