

Ir-191 ve Ir-193 izotoplarının (n,2n), (n,p) ve (n, α) Reaksiyon Tesir Kesitlerinin İncelenmesi

Halide Şahan^{*1}, Eda Şenyiğit²

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 80000, Osmaniye, TÜRKİYE

<https://orcid.org/0000-0002-6223-6807>

*yazışılan yazar: halidesahan@osmaniye.edu.tr

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 80000, Osmaniye, TÜRKİYE

<https://orcid.org/0000-0003-3437-5807>

(Alınış / Received: 18.11.2022, Kabul / Accepted: 21.02.2023, Yayınlanma / Published: 22.06.2023)

Öz: 20,0 MeV'e kadar nötron kaynaklı reaksiyonlar için nükleer veriler, nükleer fizik, astrofizik ve tıp gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı seviye yoğunluk modelleri kullanılarak iridyum izotoplarının (^{191,193}Ir) (n,2n), (n,p) ve (n, α) reaksiyon tesir kesitleri 20,0 MeV'e kadar hesaplanmıştır. Model hesaplamalarında, ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 bilgisayar kodları kullanılmıştır. ALICE-ASH'de Fermi Gas Modeli, EMPIRE-3.2'de Genelleştirilmiş Süper Akışkan Modeli ve TALYS-1.95'de Sabit Sıcaklık Fermi Gaz Modeli seçilmiştir. Sonuçlar tartışılmış ve literatürde bulunan deneysel verilerle ve ENDF veri kütüphanesinden elde edilen değerlendirilmiş verilerle (ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017) kıyaslanmıştır. Sonuçların, gelecekte yapılacak olan tesir kesit araştırmalarının geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacağına inanılmaktadır.

Anahtar kelimeler: (n,2n), (n,p) ve (n, α) reaksiyon tesir kesitleri, Teorik nükleer reaksiyon modelleri: ALICE-ASH, EMPIRE-3.2, TALYS-1.95

Investigation of (n,2n) and (n,p) Reaction Cross Sections of Ir-191 and Ir-193 Isotopes

Abstract: The nuclear data for neutron induced reactions up to 20.0 MeV is used in many different fields such as nuclear physics, astrophysics, and medicine. In this study, cross-section calculations for (n,2n), (n,p) and (n, α) reactions of iridium isotopes (^{191,193}Ir) have been calculated using different level density models up to 20,0 MeV. The ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 and TALYS-1.95 nuclear codes were used in model calculations. The Fermi Gas Model in ALICE-ASH, The Generalized Superfluid Level Density Model in EMPIRE-3.2 and the Constant Temperature Fermi Gas Level Density Model in TALYS-1.95 code have been selected. The results have been discussed and compared with the experimental data found in literature and with different evaluated nuclear data (ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 and JENDL-2017). It is believed that the results will make important contributions to the development of future cross-section studies.

Key words: (n,2n), (n,p) and (n, α) reaction cross sections, Theoretical nuclear reaction models, ALICE-ASH, EMPIRE-3.2, TALYS-1.95

1. Giriş

Nötron tesir kesit verilerinin belirlenmesi, hem uyarılmış çekirdek özelliklerinin tutarlı teorik tanımlarının oluşturulmasında hem de nükleer fizikte, nükleer astrofizikte, atom çekirdeğinin yapısının ve bileşenlerinin daha iyi anlaşılmasında, nükleer tıpta ve tıptaki uygulamalı alanlarda, nükleer reaktörlerin tasarım ve bakımları gibi birçok alanda oldukça ilgi görmektedir. Ayrıca, bu veriler füzyon reaktörlerinin yapısal malzemelerinin, metallerin ve alaşımların radyasyon hasarının tespitinde ve reaksiyon hızının araştırılmasında kapsamlı bir şekilde kullanılabilir [1-20]. Bu nedenle, nükleer modellerin teorik olarak tahminlerini iyileştirmek için yeni nükleer kesit verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle deneysel verilerin olmadığı, yetersiz olduğu veya deneysel olarak tesir kesitlerinin ölçülmesinin çok zor olduğu durumlarda, parçacık kaynaklı reaksiyon tesir kesitlerini tahmin etmek için nükleer reaksiyon modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Elde edilen teorik reaksiyon sistematiği, nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin tahmininin ve hesaplanması ile ilgili çalışmanın önemli bir parçasıdır. Deneysel ölçüm sonuçları ve teorik modellerle yapılan hesaplamaların yardımıyla reaksiyon tesir kesiti değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5, 21-22].

14,0-15,0 MeV civarındaki nötron gelme enerjileri; (n,p), (n,2n) ve (n, α) gibi reaksiyonlar için çekirdeği uyarıya yeterlidir. Nötron girişli reaksiyon tesir kesitleri, malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleriyle nükleer olayları anlamak için en temel ve gelişmiş füzyon reaktörlerinin tasarımı için oldukça önemlidir. Literatürde, araştırmacılar tarafından 14,0 MeV nötron enerjisi civarındaki tesir kesit oranlarının belirlenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır [5-6, 8-9, 11-13, 23-29]. Fakat yarı kararlı durumlarda taban durum tesir kesit verilerinde uyumsuzluklar olduğu görülmekte ve geniş enerji bölgelerinde önemli miktarda yeni nükleer verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, veri tabanının güvenilirliğini arttırmak için daha hassas ölçümlerin yapılması gerekmektedir.

Nükleer reaksiyon tesir kesit verileri, başta deneysel ölçümler olmak üzere, teorik model hesaplamaları ve ENDF (Evaluated Nuclear Data File) kütüphanesinde olduğu gibi değerlendirilmiş veri dosyaları olmak üzere üç farklı şekilde elde edilebilir. Teorik model hesaplamalarında genel olarak ALICE-ASH [5], TALYS-1.95 [26,28] ve EMPIRE-3.2 [30-32] gibi farklı nükleer reaksiyon programı kodları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, ALICE-ASH, TALYS-1.95 ve EMPIRE-3.2 kodları kullanılarak farklı seviye yoğunluk modellerinde Ir-191 ve Ir-193 izotopları için (n,p), (n,2n) ve (n, α) reaksiyon tesir kesitlerinin teorik hesaplamaları araştırılmıştır. Periyodik tablonun 8B grubunda bulunan ve atom numarası 77 olan iridyum (Ir) elementi 1844 yılında kimyacı Klaus tarafından keşfedilmiştir. Çok sert, yoğun ve kırılğan bir yapıya sahip olan iridyum elementi, yüksek sıcaklıklarda işlenebilen ve en yüksek korozyon direncine sahip metaldir. Toz halindeki İridyum (Ir-192) reaktiftir ve gama ışını kaynağı olarak kullanılabilir. Saf iridyum, hiçbir asitten etkilenmez. Alaşımlara sertlik ve dayanıklılık kazandırmak amacıyla ve dayanıklı kimyasal materyallerin yapımında kullanılır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada; $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$, $^{193}\text{Ir}(n,2n)^{192}\text{Ir}$, $^{191}\text{Ir}(n,p)^{191}\text{Os}$, $^{193}\text{Ir}(n,p)^{193}\text{Os}$, $^{191}\text{Ir}(n,\alpha)^{188}\text{Re}$ ve $^{193}\text{Ir}(n,\alpha)^{190}\text{Re}$ reaksiyonları için tesir kesitleri hesaplanmıştır. Teorik model hesaplamalarında ALICE-ASH TALYS-1.95 ve EMPIRE-3.2 bilgisayar programları kullanılmıştır. Bu bilgisayar kodları, nükleer reaksiyonlarla tesir kesiti hesaplamalarında ve uyarma fonksiyonlarının değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Hesaplamalardan elde edilen sonuçlar, EXFOR'dan (National Nuclear Data Center) elde edilen deneysel sonuçlarla ve ENDF'den (Evaluated Nuclear Data File) elde edilen değerlendirilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

İlk kez Blann (1991) [21] tarafından ALICE-91 kodu olarak geliştirilen ve daha sonra güncellenen ALICE-ASH kodu 300.0 MeV enerjiye kadar nükleer reaksiyon tesir kesit hesaplamalarında kullanılmaktadır. ALICE-ASH kodu, bileşik çekirdek bozunumu için Weisskopf-Ewing (WE) formalizmini [33,34] ve Denge-öncesi (pre-equilibrium: PEQ) bozunma süreci için Geometrik Bağımlı Hibrit Modellerini (GDH) uygular [21,34-36]. Bu çalışmada, Fermi gaz seviye yoğunluk (FGM) modeli kullanılmıştır.

1980 yılında ilk kez yayınlanan EMPIRE kodu doğrudan reaksiyonlar, denge öncesi reaksiyonlar ve bileşik reaksiyonlar için kullanılmaktadır [30-32]. Bu kod sistemi, Hauser-Feshbach modeli, optik modeli, Multi-step Direc (MSD), Multi-step Compound (MSC), eksiton ve hibrit Monte Carlo simülasyon modellerini hesaplar. Ağır iyon kaynaklı reaksiyonlar için enerji aralığı rezonans bölgesinin hemen üstünden birkaç yüz MeV'e kadar değişmektedir [32,36]. Bu çalışmada, EMPIRE-3.2 (Malta) ile Genelleştirilmiş Süper Akışkan Modeli (Generalized Superfluid Model: GSFM) [2-3] kullanılmıştır.

Linux tabanlı bir bilgisayar kod programı olan TALYS kod sistemi 1 keV – 1 GeV enerji aralığında çalışan, nükleer fizikçiler tarafından en çok kullanılan ve deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu sonuçlar veren bir nükleer reaksiyon programıdır. Genel olarak, doğrudan, bileşik, denge öncesi ve fisyon reaksiyonları için en yeni nükleer modellerin birçoğunu uygulamak için kullanılabilir [28,33]. Bu çalışmada, Sabit Sıcaklık Fermi Gaz Modeli (Constant Temperature Fermi Gas Model: CTFGM) [1] kullanılmıştır.

3. Bulgular

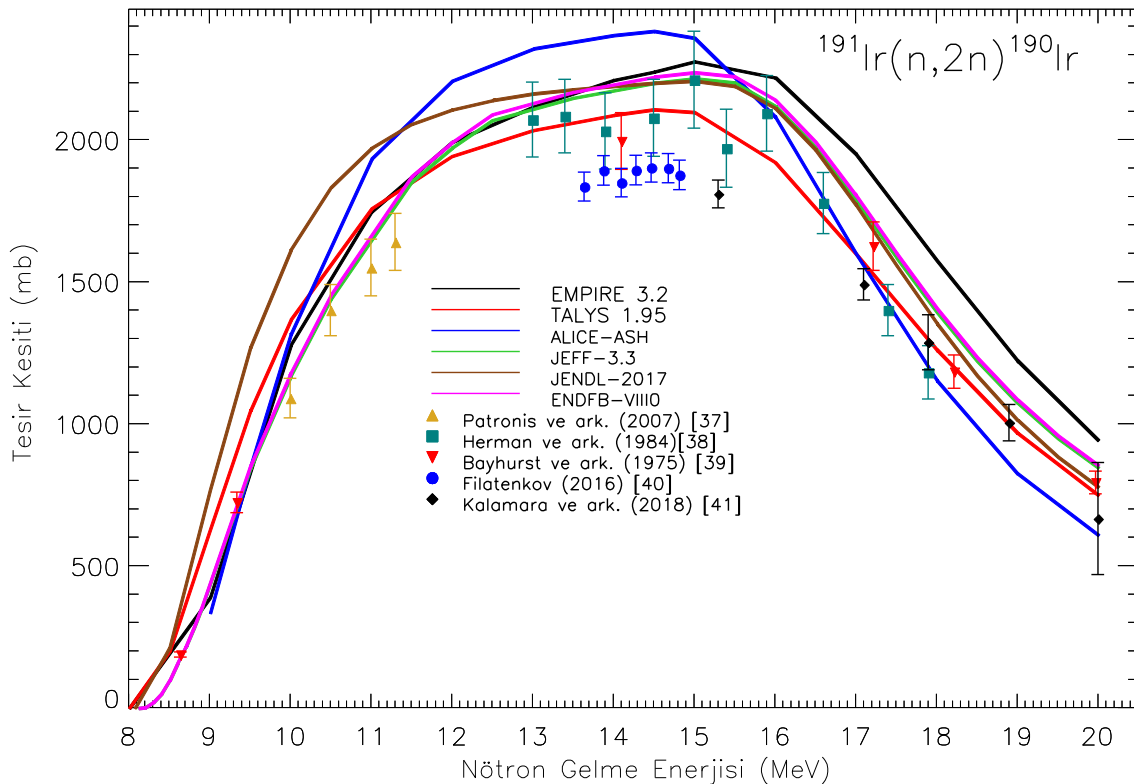
Bu çalışmada, 20,0 MeV'e kadar $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$, $^{193}\text{Ir}(n,2n)^{192}\text{Ir}$, $^{191}\text{Ir}(n,p)^{191}\text{Os}$, $^{193}\text{Ir}(n,p)^{193}\text{Os}$, $^{191}\text{Ir}(n, \alpha)^{188}\text{Re}$ ve $^{193}\text{Ir}(n,\alpha)^{190}\text{Re}$ reaksiyonlarının tesir kesitleri teorik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 bilgisayar programları kullanılmıştır. Hesaplamalarda, seviye yoğunluğu hesaplamaları için ALICE-ASH kodunda Fermi gaz model (FGM), EMPIRE-3.2 kodunda Genelleştirilmiş Süper Akışkan Modeli (GSFM) [2-3] ve TALYS-1.95 kodunda Sabit Sıcaklık+Fermi Gaz Modeli (CTFGM) [1,3] yoğunluk modelleri kullanılmıştır. Modellerden hesaplanan $^{191,193}\text{Ir}$ izotoplarının (n,2n), (n,p) ve (n, α) tesir kesit sonuçları EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data) veri tabanındaki deneysel verilerle ve ENDF (Evaluated Nuclear Data File) veri tabanındaki ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 kütüphanelerindeki hesaplanmış olan değerlendirilmiş verilerle karşılaştırılır. Ayrıca, 14,5 MeV civarında modellerden, değerlendirilmiş verilerden ve deneysel verilerden oluşan sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. 14,5 MeV civarında $^{191,193}\text{Ir}$ izotopları için teorik (n,2n),(n,p) ve (n, α) reaksiyon tesir kesitleri

	$^{191}\text{Ir} (mb)$			$^{193}\text{Ir} (mb)$		
	<i>n,2n</i>	<i>n,p</i>	<i>n,α</i>	<i>n,2n</i>	<i>n,p</i>	<i>n,α</i>
EMPIRE-3.2	2240,90	10,01	1,10	2319,70	6,09	0,43
TALYS-1.95	2108,55	6,4	0,87	1980,72	3,92	0,29
ALICE-ASH	2384,30	7,92	0,66	2447,75	5,4	0,27
ENDFB-VIII.0	2201,53	4,57	0,71	2189,50	2,69	0,23
JEFF-3.3	2201,53	4,57	0,70	2189,50	2,68	0,22
JENDL-2017	2201,31	4,68	0,74	2199,59	2,51	0,29
Literatür (EXFOR)	2077,0±135	4,38±1,15	0,63±0,03	2005,0±100	4,9±0,6	0,1
	1995,0±100	4,8±0,8		1818,0±112	2,44±1,2	
	1902,0±5,14			2040,0±100		
				2034,0±4,56		

3.1 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ reaksiyonu

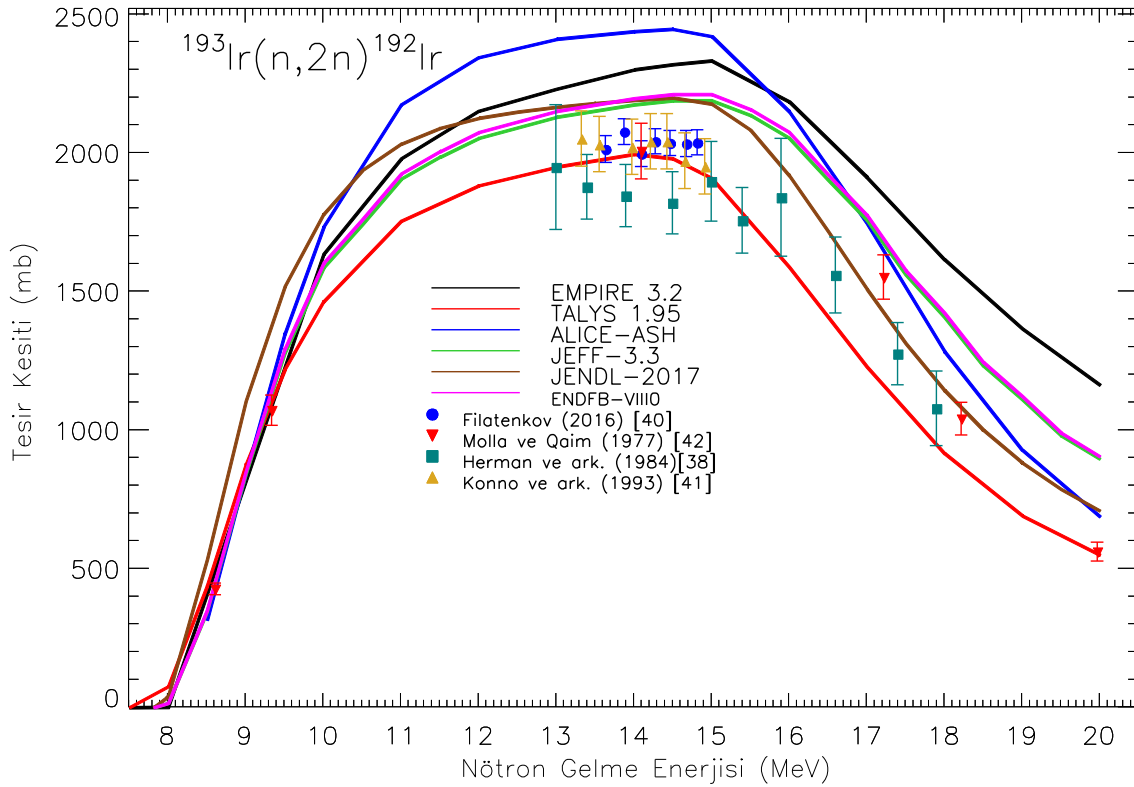
Üç farklı seviye yoğunluk modeli kullanılarak $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ reaksiyonunun 20,0 MeV'e kadar hesaplanan tesir kesitlerinin değişimini veren grafik Şekil 1'de verilmiştir. Modellerden hesaplanan tesir kesit eğrileri incelendiğinde, 8,0-11,0 MeV'e kadar EMPIRE-3.2, TALYS-1.95 ve ALICE-ASH modellerinden hesaplanan tesir kesit eğrileri Patronis ve ark. (2007) [37] tarafından verilen deneysel değerler ile yaklaşık olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca, aynı enerji aralığında JENDL-2017 dışında ENDF veri kütüphanesinden alınan diğer değerlendirilmiş tesir kesit verileriyle de uyumlu olduğu gözlenmiştir. 11,0-15,0 MeV'lik enerji aralığında EMPIRE-3.2 ile hesaplanan Genelleştirilmiş Süper Akışkan Modeli (GSFM) [2-3] ile hesaplanan tesir kesit değerleri bütün diğer tesir kesit değerlerinden daha yüksek olduğu gözlenirken, 15,0-20,0 MeV aralığında düşmeye başlamıştır. 16,0-18,0 MeV aralığında EXFOR'dan elde edilen Herman ve ark. (1984) [38] tarafından verilen deneysel değerler ile uyumluluk göstermiştir. Benzer şekilde, TALYS-1.95 kodunda CTFGM [1, 3] ile elde edilen tesir kesit değerleri 13,0 MeV'den sonra özellikle EXFOR'dan elde edilen Herman ve ark. (1984) [38] ve Bayhurst ve ark. (1975) [39] tarafından verilen deneysel değerler ile uyumluluk göstermiştir. ALICE-ASH kodunda FGM ile elde edilen tesir kesit değerleri yaklaşık olarak 14,0 MeV'den sonra diğerlerinden daha fazla değişim gösterdiği gözlenmiştir. Tablo 1'de verildiği gibi, 14,5 MeV'lik nötron enerjisinde EMPIRE-3.2, TALYS-1.95 ve ALICE-ASH seviye yoğunluk modellerinden hesaplanan tesir kesit değerleri sırasıyla 2240,9 mb, 2108,55 mb ve 2384,3 mb olarak verilmiştir. ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 kütüphanelerden alınan değerlendirilmiş verilerin ise sırasıyla 2100,42 mb, 2201,53 mb, 2201,53 mb ve 2201,31 mb olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, 14,5 MeV civarında Herman ve ark. (1984) [38], Bayhurst ve ark. (1975) [39] ve Filatenkov (2016) [40] tarafından elde edilen deneysel değer ise sırasıyla $2077,0 \pm 135$ mb, $1995,0 \pm 100$ mb ve $1902,0 \pm 5,14$ mb (EXFOR) olarak verilmiştir.



Şekil 1. $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ reaksiyonunun tesir kesitleri

3.2 $^{193}\text{Ir}(n,2n)^{192}\text{Ir}$ reaksiyonu

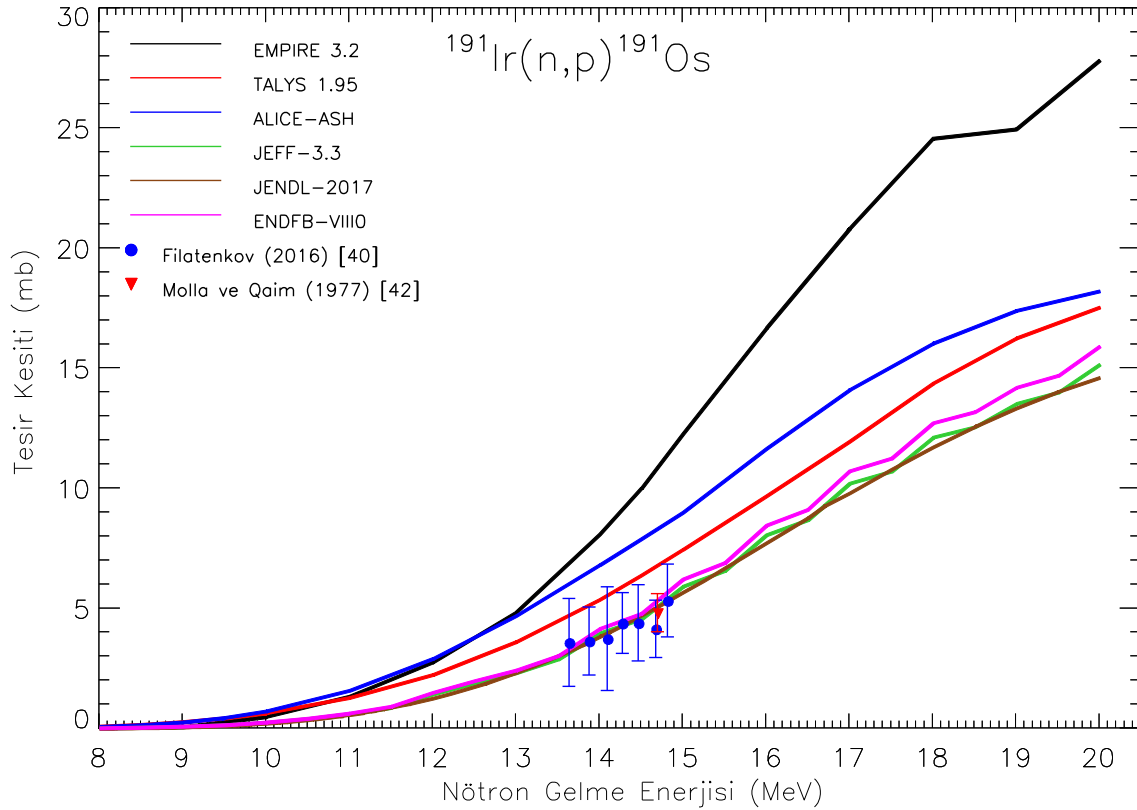
8,0-20,0 MeV enerji aralığındaki $^{193}\text{Ir}(n,2n)^{192}\text{Ir}$ reaksiyonu için hesaplanan ve elde edilen tesir kesit verileri Şekil 4.2’de verilmiştir. ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 ile hesaplanan tesir kesit eğrileri incelendiğinde, yaklaşık 11,0 MeV’e kadar değerlendirilmiş kütüphane (ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017) eğrileriyle EXFOR’dan alınan Bayhurst ve ark. (1975) [39] tarafından verilen deneysel eğrisiyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. 10,0 MeV’den sonra EMPIRE-3.2 eğrisi diğer tesir kesit eğrilerine göre daha yüksek olarak artış gösterirken, TALYS-1.95 eğrisinin ise diğer tesir kesit eğrilerine göre daha düşük olarak artış gösterdiği görülmüştür. 12,0 MeV’den sonra ALICE-ASH eğrisi diğer tüm tesir kesit değerlerine göre daha yüksek değişim göstermiştir. Hemen hemen tüm enerji aralığında ENDFB-VIII.0 ve JEFF-3.3 kütüphane verilerinin bir biriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. 15,0 MeV’den sonra JENDL-2017 kütüphane verisinin ise hata değerleri aralığı göz önüne alındığında Bayhurst ve ark. (1975) [39] ve Herman ve ark. (1984) [38] tarafından verilen deneysel değere yaklaşık uyumlu olduğu gözlenmiştir. Tablo 1’de 14,5 MeV civarında Ir-193 izotopu için teorik (n,2n) reaksiyon tesir kesitleri EMPIRE-3.2 ile 2319,7 mb, TALYS-1.95 ile 1980,72 mb ve ALICE-ASH ile 2447,75 mb olarak hesaplanırken ENDF’den elde edilen eğrisi ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 ait değerlendirilmiş verilerin ise sırasıyla 2053,48 mb, 2189,5 mb, 2189,5 mb, ve 2199,59 mb olarak elde edilmiştir. 14,5 MeV’de EXFOR’dan elde edilen deneysel değerler Bayhurst ve ark. (1975) [39] tarafından $2005,0 \pm 100$ mb, Filatenkov (2016) [40] tarafından $2034,0 \pm 4,56$ mb, Herman ve ark. (1984) [38] tarafından $1818,0 \pm 11$ mb ve Konno ve ark. (1993) [41] tarafından $2040,0 \pm 1$ mb olarak verilmiştir.



Şekil 2. $^{193}\text{Ir}(n,2n)^{192}\text{Ir}$ reaksiyonunun tesir kesitleri

3.3 $^{191}\text{Ir}(n,p)^{191}\text{Os}$ reaksiyonu

13,0-20,0 MeV'lik enerji aralığında $^{191}\text{Ir}(n,p)^{191}\text{Os}$ reaksiyonunun modellerden, değerlendirilmiş kütüphane verilerinden ve EXFOR'dan alınan deneysel tesir kesit verileri Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'den görüldüğü gibi, EMPIRE-3.2 ile hesaplanan tesir kesit eğrisi 13,0 MeV'den sonra diğer tesir kesit eğrilerine göre daha yüksek artış göstermiştir. ALICE-ASH ve EMPIRE-3.2 eğrileri tüm enerji aralığı boyunca deneysel değerlerden oldukça yüksek değerlere sahipken, TALYS-1.95 ile hesaplanan tesir kesit eğrisinin EXFOR'dan elde edilen deneysel değerlere en yakın değişim gösterdiği görülmektedir. 13,0 MeV – 15,0 MeV aralığında elde edilen deneysel değerlere en uygun eğrilerin ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 kütüphanelerden alınan değerlendirilmiş verilere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Tablo 1'de görüldüğü gibi, 14,5 MeV civarında teorik olarak EMPIRE-3.2 ile 10,01 mb, TALYS-1.95 ile 6,4 mb ve ALICE-ASH ile 7,92 mb olarak hesaplanmıştır. Değerlendirilmiş kütüphane verileri ise sırasıyla ENDFB-VIII.0 ile 4,57 mb, JEFF-3.3 ile 4,57 mb ve JENDL-2017 ile 4,68 mb olarak tespit edilmiştir. Literatürden (EXFOR) elde edilen deneysel veriler ise aynı enerji civarında Filatenkov (2016) [40] tarafından $4,38 \pm 1,15$ mb ve Molla ve ark. (1977) [42] (EXFOR) tarafından 14,7 MeV'de $4,8 \pm 0,8$ mb olarak ölçülmüştür.

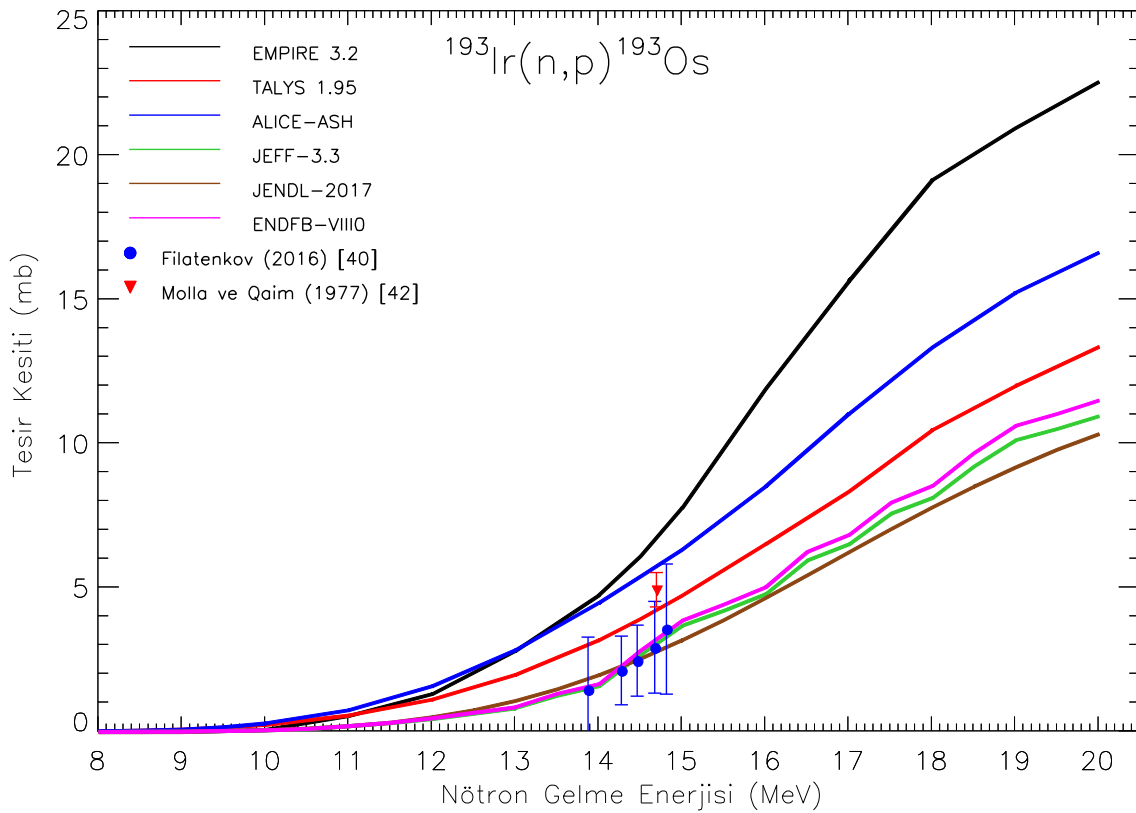


Şekil 3. $^{191}\text{Ir}(n,p)^{191}\text{Os}$ reaksiyonunun tesir kesitleri

3.4 $^{193}\text{Ir}(n,p)^{193}\text{Os}$ reaksiyonu

$^{193}\text{Ir}(n,p)^{193}\text{Os}$ reaksiyonunun nötron enerjisine bağlı tesir kesitlerini gösteren grafik Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, EMPIRE-3.2 ile hesaplanan tesir kesit eğrisi 14,0 MeV'den sonra TALYS-1.95 ve ALICE-GDH'den elde edilen teorik tesir kesit eğrilerine göre ve özellikle ENDF kütüphane verilerine ve deneysel verilere göre daha yüksek artış göstermiştir. ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 ile hesaplanan tesir kesit eğrileri incelendiğinde ve kendi aralarında kıyaslandığında, ALICE-ASH eğrisinin EMPIRE-3.2 eğrisine göre daha düşük olduğu gözlenirken TALYS-1.95

eğrisine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 14,0 MeV – 15,0 MeV aralığındaki deneysel EXFOR verilerinin hata değerleri aralığında tesir kesit verilerinin TALYS-1.95 ile uyumlu oldukları gözlenmiştir. 14,7 MeV’de TALYS-1.95 kodu ile hesaplanan tesir kesit değerine en yakın deneysel değer Molla ve ark. (1977) [42] tarafından ($4,9 \pm 0,6$ mb) verilen değer olduğu görülmektedir. Ayrıca, ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 kütüphane verilerine en yakın değişim gösterdiği görülürken ALICE-GDH’den, EMPIRE-3.2 eğrilerinin daha yüksek oldukları görülmüştür. Tablo 1’de verildiği gibi 14,5 MeV civarında Ir-193 izotopunun (n,p) reaksiyonunun modellerden hesaplanan tesir kesit değerleri 6,09 mb (EMPIRE-3.2), 3,92 mb (TALYS-1,95 [28]) ve 5,4 mb (ALICE-ASH) olarak hesaplanırken, ENDF’den alınan değerler 2,69 mb (ENDFB-VIII.0), 2,68 mb (JEFF-3.3) ve 2,51 mb (JENDL-2017) olarak kaydedilmiştir. EXFOR’dan alınan Filatenkov (2016) [40] ve Molla ve ark. (1977) [42] tarafından elde edilen deneysel değerlerin ise sırasıyla $2,44 \pm 1,2$ mb ve $4,9 \pm 0,6$ mb olduğu görülmektedir.

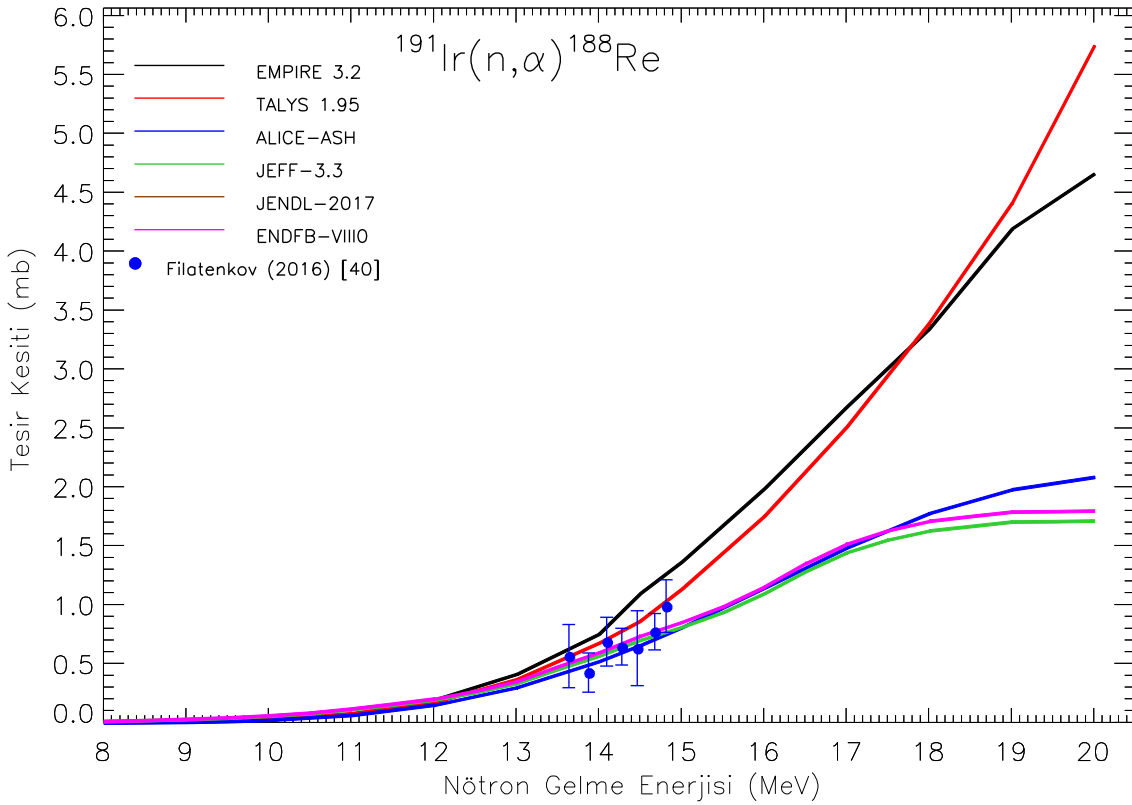


Şekil 4. $^{193}\text{Ir}(n,p)^{193}\text{Os}$ reaksiyonun tesir kesitleri

3.5 $^{191}\text{Ir}(n,\alpha)^{188}\text{Re}$ reaksiyonu

$^{191}\text{Ir}(n,\alpha)^{188}\text{Re}$ reaksiyonunun 10,0 - 20,0 MeV aralığında EMPIRE-3.2, TALYS-1.95 ve ALICE-ASH kodları kullanılarak değişik yoğunluk modellerinde hesaplanan tesir kesiti değerlerinin değişim grafikleri Şekil 5’de verilmiştir. Filatenkov (2016) [40] tarafından verilen deneysel tesir kesit değerleri 13,64 ile 14,82 MeV aralığında olup hata değerlerinin ise 0,42 mb ile 0,99 mb aralığındadır. 13,7 MeV’de her üç modelden hesaplanan tesir kesit değerleri Filatenkov (2016) [40] tarafından verilen deneysel tesir kesit değerlerine oldukça yakın değer almıştır. ALICE-ASH ve TALYS-1.95 kodları ile hesaplanan tesir kesit eğrilerinin hata değerleri aralığında deneysel değerler ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Aynı şekilde, 10,0 - 20,0 MeV aralığında ALICE-ASH eğrisinin ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 eğrilerine benzer olduğu görülmektedir. Bu reaksiyonda, özellikle 15,0 MeV’den sonra modellerden hesaplanan EMPIRE-3.2 ile TALYS-1.95 tesir kesit eğrileri yaklaşık aynı değişimi gösterirken

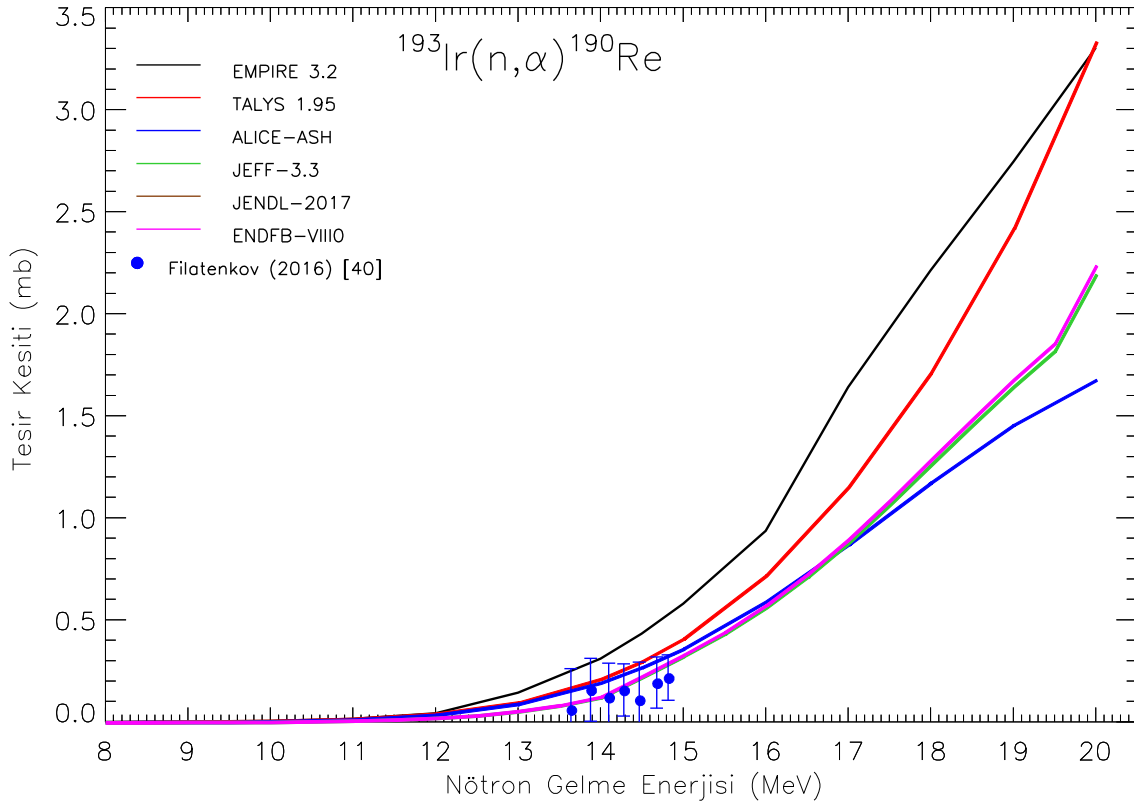
ALICE-ASH, ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 eğrilerine göre ise daha fazla artış gösterdiği görülmektedir. Tablo 1’de görüldüğü gibi yaklaşık 14,5 MeV’de Ir-191 izotopu için teorik (n, α) reaksiyon tesir kesitleri EMPIRE-3.2 ile 1,10 mb, TALYS-1.95 ile 0,87 mb ve ALICE-ASH ile 0,66 mb olarak hesaplanırken ENDF’den elde edilen eğrisi ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 ait değerlendirilmiş verileri ise sırasıyla 1,12 mb, 0,71 mb, 0,70 mb, ve 0,74 mb olarak elde edilmiştir. Filatenkov (2016) [40] tarafından (EXFOR) verilen deneysel tesir kesit değeri ise 14,7 MeV’de $0,63 \pm 0,03$ mb olarak verilmiştir.



Şekil 5. $^{191}\text{Ir}(n,\alpha)^{188}\text{Re}$ reaksiyonunun tesir kesitleri

3.6 $^{193}\text{Ir}(n,\alpha)^{190}\text{Re}$ reaksiyonu

20,0 MeV nötron gelme enerjisine kadar ^{193}Ir izotopunun (n, α) reaksiyonunun teorik tesir kesiti hesaplamalarının grafikleri Şekil 6’da verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde, EMPIRE-3.2 eğrisinin diğerlerine göre daha fazla artış gösterdiği görülmektedir. EXFOR’dan elde edilen 13,64-14,82 MeV aralığındaki deneysel tesir kesit değerleri 0,05 mb ile 0,18 mb aralığında değişmektedir (Filatenkov 2016) [40]. Deneysel tesir kesit değerlerinin hata değerleri de göz önüne alındığında hem modellerden hesaplanan TALYS-1.95 [28], ALICE-ASH değerlerine hem de ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 kütüphane değerlerine benzer olduğu görülmektedir. Tablo 1’de verildiği gibi 14,5 MeV’de, EMPIRE-3.2, TALYS-1.95 ve ALICE-ASH model kodlarından hesaplanan tesir kesitleri sırasıyla 0,43 mb, 0,29 mb ve 0,27 mb olarak hesaplanırken, ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017’ye ait değerlendirilmiş kütüphane verileri ise sırasıyla 0,23 mb, 0,22 mb, ve 0,29 mb olarak verilmiştir. EXFOR’dan elde edilen deneysel tesir kesit değeri ise 14,7 MeV’de $0,09 \pm 0,03$ mb (Filatenkov 2016) [40] olarak verilmiştir.



Şekil 6. $^{193}\text{Ir}(n,\alpha)^{190}\text{Re}$ reaksiyonunun tesisir kesitleri

4. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada, iridyum izotoplarının ($^{191,193}\text{Ir}$) ($n,2n$), (n,p) ve (n,α) reaksiyon tesisir kesitleri 20,0 MeV'e kadar teorik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar, ALICE-GDH'de [5] Fermi gaz modeli (FGM), EMPIRE-3.2'de (Herman ve ark., 2013) Genelleştirilmiş Süper Akışkan Modeli (GSFM) ve TALYS-1.95 'de Sabit Sıcaklık Fermi Gaz Modeli (CTFGM) gibi yoğunluk modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellerden hesaplanan reaksiyon tesisir kesit sonuçları EXFOR'dan alınan deneysel verilerle, ENDF nükleer veri kütüphanesinden alınan ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 değerlendirilmiş veri sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, 14,5 MeV civarındaki ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 değerleri hem deneysel hem de değerlendirilmiş kütüphane verileriyle de karşılaştırılmıştır (Tablo 1).

ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 kullanılarak 20,0 MeV'e kadar elde edilen sonuçlar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

- $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ ve $^{193}\text{Ir}(n,2n)^{192}\text{Ir}$ nükleer reaksiyonlarında; ALICE-ASH ile hesaplanan tesisir kesit değerlerinin 10,0-15,0 MeV aralığında diğer tüm tesisir kesit değerlerinden daha yüksek olduğu ve 15,0 MeV'den sonra azalarak EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 verilerine ve deneysel ve değerlendirilmiş verilere benzer değişim gösterdiği gözlenmiştir. TALYS-1.95 eğrisinin deneysel değerlere daha yakın değişim gösterdiği gözlenmiştir. EMPIRE-3.2 ile elde edilen tesisir kesit eğrilerinin 15,0 MeV'e kadar deneysel ve değerlendirilmiş verilerle uyumlu olduğu görülürken, 15 MeV'den sonra daha fazla artış gösterdiği görülmektedir.
- $^{191}\text{Ir}(n,p)^{191}\text{Os}$ ve $^{193}\text{Ir}(n,p)^{193}\text{Os}$ nükleer reaksiyonlarında; EMPIRE-3.2 ile hesaplanan tesisir kesit değerlerinin 10,0-15,0 MeV nötron gelme aralığında genel olarak diğerlerine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

- $^{191}\text{Ir}(n,p)^{191}\text{Os}$ reaksiyonunda, TALYS-1.95 verilerine göre ALICE-ASH ve EMPIRE-3.2 ile hesaplanan teorik verilerin deneysel ve kütüphane verilerinden genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. TALYS-1.95 değerlerinin deneysel değerlere daha yakın olduğu görülmektedir. ALICE-ASH değerlerinin EMPIRE-3.2'e göre daha düşük, TALYS-1.95'e göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Deneysel verilerin ENDFB-VIII.0, JEFF-3.3 ve JENDL-2017 kütüphane verilerine daha yakın olduğu görülmüştür.
- $^{193}\text{Ir}(n,p)^{193}\text{Os}$ reaksiyonunda, ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 modellerinden hesaplanan tesir kesit eğrilerinin deneysel ve değerlendirilmiş kütüphane verilerine göre daha yüksek değerlere sahip oldukları ve özellikle, EMPIRE-3.2 eğrisinin 14,0 MeV'den sonra daha da fazla artış gösterdiği görülmektedir. TALYS-1.95 ile hesaplanan tesir kesit değerlerinin ise deneysel ve değerlendirilmiş değerlere daha yakın olduğu görülmektedir.
- $^{191}\text{Ir}(n, \alpha)^{188}\text{Re}$ ve $^{193}\text{Ir}(n,\alpha)^{190}\text{Re}$ reaksiyonlarında, genel olarak 15,0 MeV'e kadar her üç modelden hesaplanan tesir kesit eğrileri deneysel ve kütüphane verilerine benzerlik gösterirken, 15,0 MeV'den sonra EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 eğrilerinin daha fazla arttığı görülmektedir. ALICE-ASH eğrilerinin hem deneysel hem de değerlendirilmiş kütüphane verileri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, nükleer teknolojide farklı uygulamalar için 20,0 MeV'e kadar nötron gelme enerjili reaksiyon kesit verileri nükleer fizik, nükleer astrofizik, nükleer tıp gibi pek çok nükleer alanda gereklidir. Bu nedenle, 20,0 MeV'e kadar ALICE-ASH, EMPIRE-3.2 ve TALYS-1.95 bilgisayar kodları kullanılarak hesaplanan iridyum ($^{191,193}\text{Ir}$) izotoplarının (n,2n), (n,p) ve (n, α) reaksiyon tesir kesit sonuçlarının literatüre katkı sağlayacağına ve sonuçların gelecekte yapılacak olan tesir kesit araştırmalarının geliştirilmesine ve özellikle deneysel verilerin bulunmadığı durumlar için araştırmacılara önemli katkılar sağlayacağına inanılmaktadır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Halide ŞAHAN: Araştırma, Veri Temini, Veri Analizi, Orijinal Taslak Yazımı, İnceleme ve Düzenleme, Görselleştirme.

Eda ŞENYİĞİT: Araştırma, Veri Temini, Veri Analizi, Kaynak, Materyal, Analiz.

Çatışma Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Etik Kurul Onayı ve Aydınlatılmış Onam Bilgileri

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir etik kurul onayı ve/veya aydınlatılmış onam bilgileri beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Kaynakça

- [1] A. Gilbert and A. G. W. Cameron, "A composite nuclear level density formula with shell correction," *Can. J. of Phys.*, 43 (8),1446-1496, 1965.
- [2] V. Ignatyuk, G. N. Smirenkin, and A. S. Tishin, "Phenomenological description of energy dependence of the level density parameter," *Sov. J. Nucl. Phys. (Yad. Fiz., v.)*, 21 (3), 485-490, 1975.
- [3] A. V. Ignatyuk, K. K. Istekov, and G. N. Smirenkin, "The role of collective effects in the systematics of nuclear level densities," *Sov. J. Nucl. Phys.*, 29 (4), 450, 1979.
- [4] S. K. Kataria, V. S. Ramamurthy, and S. S. Kapoor, "Semiempirical nuclear level density formula with shell effects," *Phys. Rev. C*, 18, 549, 1978.
- [5] C. H. M. Broeders, A. Yu. Konobeyev, Yu. A. Korovin, V. P. Lunev, and M. Blann, "Report FZKA

- 7183,” <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7183.pdf>, 2006.
- [6] M. Şahan, E. Tel, A. Aydın, and İ. Yegingil, “Investigation of some stellar iron group fusion materials for (n, p) reactions,” *J. Fusion. Energ.*, 31, 52-64, 2012.
- [7] T. Wang, G. Kim, Y. D. Oh, M. H. Cho, and I. S. Ko, W. “Namkung, neutron total cross sections and resonance parameters of palladium,” *Nucl. Sci. Eng.*, 183, 286-297, 2016.
- [8] M. Yiğit and A. Kara, “Model-based predictions for nuclear excitation functions of neutron-induced reactions on 64,6668Zn targets,” *Nucl. Sci. Eng.*, 49, 996-1005, 2017.
- [9] M. Yiğit, “A review of (n,p) and (n,α) nuclear cross sections on palladium nuclei using different level density models and empirical formulas,” *Appl. Radiat. Isotopes*, 140: 355–362, 2018.
- [10] I. Pasha, B. Rudraswamy, S. V. Suryanarayana, H. Naik, S. P. Ram, L.S. Danu, T. Patel, S. Bishnoi, and M. P. Karantha, “Measurement of neutron induced reaction cross sections of palladium isotopes at the neutron energy of 14.54 +/- 0.24 MeV with covariance analysis,” *J. Radioanal. Nucl. Ch.*, 325(2): 175-182, 2020.
- [11] A. Kaplan, M. Şekerci, V. Çapalı, and H. Özdoğan, “Photon Induced Reaction Cross-Section Calculations of Several, Structural Fusion Materials,” *J. Fusion. Energ.*, 36, 213–217, 2017.
- [12] A. Kaplan, H. Özdoğan, A. Aydın, and E. Tel, “(γ,2n) Reaction Cross Section Calculations on Several Structural Fusion Materials,” *J. Fusion. Energ.*, 32, 431–436, 2013.
- [13] A. Kaplan, H. Özdoğan, A. Aydın, and E. Tel, “Deuteron-induced cross section calculations of some structural fusion materials,” *J. Fusion. Energ.*, 32, 97–102, 2013.
- [14] M. Şekerci, H. Özdoğan, and A. Kaplan, “Level density model effects on the production cross-section calculations of some medical isotopes via (α, xn) reactions where x = 1–3,” *Mod. Phys. Lett. A*, 35, 24, 2050202, 2020.
- [15] M. Şekerci, H. Özdoğan, and A. Kaplan, “An investigation of effects of level density models and gamma ray strength functions on cross-section calculations for the production of 90Y, 153Sm, 169Er, 177Lu and 186Re therapeutic radioisotopes via (n,γ) reactions,” *Radiochim. Acta*, 105, 1, 2019.
- [16] M. Şekerci, H. Özdoğan, and A. Kaplan, “Investigation on the different production routes of 67Ga radioisotope by using different level density models,” *Biophysics and Medical Physics*, 74, 277–281, 2019.
- [17] M. Yiğit, “Analysis of cross sections of (n,t) nuclear reaction using different empirical formulae and level density models,” *Appl. Radiat. Isotopes*, 139, September 2018, Pages 151-158
- [18] A. Kaplan, E. Tel, and A. Aydın, “The equilibrium and preequilibrium neutron-emission spectra of some structural fusion materials for (n, xn) reactions up to 16 MeV energy,” *Phys. Atom. Nucl+*, 72, 6, 903–910, 2009.
- [19] H. Özdoğan, M. Şekerci, İ. H. Sarpun, and A. Kaplan, “Investigation of level density parameter effects on (p,n) and (p,2n) reaction cross-sections for the fusion structural materials 48Ti, 63Cu and 90Zr,” *Appl. Radiat. Isotopes*, 140, 29-34, 2018.
- [20] H. Özdoğan, M. Şekerci, and A. Kaplan, “Investigation of gamma strength functions and level density models effects on photon induced reaction cross-section calculations for the fusion structural materials 46,50Ti, 51V, 58Ni and 63Cu,” *Appl. Radiat. Isotopes*, 143, 6-10, 2019.
- [21] M. Blann, “ALICE-91, Statistical model code system with fission competition”, *RSIC Code Package PSR-146, Lawrence Livermore National Laboratory, California, USA, 1991.*
- [22] R. Capote, V. Osorio, R. Lopez, E. Herrera, and M. R. Piris, “PCROSS program code” (Higher Institute of Nuclear Science and Technology, Cuba, 1991); Translated by the IAEA on the March 1991.
- [23] H. Sahan, M. Sahan, and E. Tel, “Cross-Section Calculation of (n, p) and (n, 2n) reactions for high temperature reactors construction materials tungsten and rhenium,” *Phys. Atom. Nucl+*, 84 (5), 724–738, 2021.
- [24] E. Tel, M. H. Bölükdemir, S. Okuducu, A. Aydın, and A. Kaplan, “Investigation of neutron skin effect, with density dependence by using a new calculation method for initial exciton numbers on pre-equilibrium reactions,” *Phys. Scripta*, 80, 065201, 2009.
- [25] A. J. Koning and J. P. Delaroche, “Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200.0 MeV”, *Nuclear Physics A*, 713 (3-4), 231–310, 2003.
- [26] C. Kalbach, “Preequilibrium reactions with complex particle channels,” *Phys. Rev. C*, 71, 034606, 2005.
- [27] M. Sahan, E. Tel, H. Sahan, U. Gevher, and A. Kara, “Cross section calculations of (n,2n) and (n,p) nuclear reactions on germanium isotopes at 14–15 MeV,” *J. Fusion. Energ.*, 35:730–742, 2016.
- [28] A. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, “User Manuel TALYS-1.95, A nuclear reaction program,” new edition- 24 december 2019 ed. <http://www.talys.eu/download-talys/>, 2019.
- [29] J. Luo, F. Tuo, and X. Kong, “Activation cross sections and isomeric cross section ratios for 184Os(n,2n)183m.gOs, 190Os(n,p)190m.gRe and 86Sr(n,2n)85m.gSr reactions from 13.5 to 14.8 MeV,” *J. Radioanal. Nucl. Ch.*, 279 (2), 443–454, 2009.
- [30] C. K. Cline, “Extensions to the pre-equilibrium statistical model and a study of complex particle emission,” *Nucl. Phys. A*, 193, 417, 1972.

- [31] I. Ribansky, P. Oblozinsky, and E. Betak, "Pre-equilibrium decay and the exciton model," *Nucl. Phys. A*, 205, 545-560, 1973.
- [32] M. Herman, R. Capote, M. Sin, A. Trkov, B. Carlson, D. Brown, G. Nobre, P. Oblozinsky, C. Mattoon, H. Wienke, S. Hoblit, Y. S. Cho, V. Plujko, and V. Zerkin, "EMPIRE-3.2 Malta modular system for nuclear reaction calculations and nuclear data evaluation," *User's Manual*, 2013.
- [33] A. J. Koning and J. P. Delaroche, "Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200.0 MeV," *Nucl. Phys. A*, 713 (3-4), 231-310, 2003.
- [34] V. F. Weisskopf and D. H. Ewing, "On the yield of nuclear reactions with heavy elements," *Phys. Rev.*, 57, 472, 1940.
- [35] M. Blann and H. K. Vonach, "Global test of modified precompound decay models," *Phys. Rev.*, 28 (4), 1475-1492, 1983.
- [36] W. Hauser and H. Feshbach, "Inelastic scattering of neutrons," *Phys. Rev. C*, 87, 366, 1952.
- [37] N. Patronis, C. T. Papadopoulos, S. Galanopoulos, M. Kokkoris, G. Perdikakis, R. Vlastou, A. Lagoyannis, and S. Harissopoulos, "Activation cross section and isomeric cross-section ratio for the (n,2n) reaction on 191-Ir," *Phys. Rev. C*, 75, 2007.
- [38] M. Herman, A. Marcinkowski, and K. Stankiewicz, "Statistical multi-step compound emission in (n,2n) reactions," *Nucl. Phys. A*, 430 (1), 19, 69-83, 1984.
- [39] B. P. Bayhurst, J. S. Gilmore, R. J. Prestwood, J. B. Wilhelmy, N. Jarmie, B. H. Erkkila, and R. A. Hardekopf, "Cross sections for (n,xn) reactions between 7.5 and 28 MeV," *Phys. Rev. C*, 12 (2), 451.
- [40] A. A. Filatenkov, "Neutron activation cross sections measured at KRI in neutron energy region 13.4 - 14.9 MeV", *USSR report to the INDC*. No. 0460, Austria, 2016.
- [41] C. Konno, Y. Ikeda, K. Osihi, K. Kawede, H. Yamamoto, and H. Maekawa, "JAERI- Reports", No. 1329, *Japan Atomic Energy Research Institute*, Japan, 1993.
- [42] N. I. Molla and S. M. Qaim, "A systematic study of (n,p) reactions at 14.7 MeV," *Nucl. Phys. A*, 283 (2), 13 977 269-288, 1977.