



¹³¹Cs Radyoizotopunun Üretildiği Bazı Nükleer Reaksiyonların Uyarılma Fonksiyonları

Sedat ZENGİN¹, Vildan ÖZKAN BİLİCİ¹, İsmail Hakkı SARPÜN^{*2,3,4}

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

²Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 07057, Antalya, Türkiye

³Akdeniz Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı, 07057, Antalya, Türkiye

⁴Akdeniz Üniversitesi, Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi, 07057, Antalya, Türkiye

*yazışılan yazar e-posta: isarpun@gmail.com

(Alınış / Received: 04.11.2020, Kabul / Accepted: 10.11.2020, Yayınlanma / Published : 29.11.2020)

Özet: Nükleer fizikteki sürekli devam eden gelişmeler nükleer teknolojiye önemli katkılar sağlamakta ve bağlantılı olan birçok alanda da önemli gelişmeler olmasını sağlamaktadır. Bunun başlıca sebepleri çekirdeğin yapısı ve özelliklerinin anlaşılması ile nükleer reaksiyonların fiziksel teorilerinin geliştirilmesidir. Özellikle sağlık ve teknoloji alanında kullanılan nükleer reaksiyonların tesir kesitlerinin bilinmesi, reaksiyonun olası sonuçlarının kullanılması hakkında fikir vermektedir. Bazı durumlarda nükleer reaksiyonların tesir kesitlerini deneysel olarak bulmak hem maliyet hem koşullar bakımından mümkün olmaz. Reaksiyon tesir kesitleri, teorik olarak çeşitli nükleer reaksiyon kodlarıyla hesaplanmaktadır. Kanser tedavisinde kullanılan diğer radyoizotoplara göre ¹³¹Cs, daha kısa yarı ömre ve daha yüksek enerjiye sahip olmasından dolayı son yıllarda kanser tedavilerinde kullanılmaya başlanılmıştır. Bu çalışmada ¹³¹Cs radyoizotopunun elde edilmesinde kullanılan, deneysel verileri EXFOR kütüphanesinde mevcut olan ¹³³Cs($\gamma,2n$), ¹³³Cs(p,x), ¹²⁷I(α,γ) ve ¹³¹Xe(p,n) reaksiyonlarının uyarılma fonksiyonları incelenmiştir. TALYS 1.95 nükleer kod programı ile elde edilen teorik sonuçlar ile EXFOR veri kütüphanesinden alınan veriler karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Nükleer reaksiyonlar, Tesir kesiti, TALYS 1.95, EXFOR

Excitation Functions of Some Nuclear Reactions of ¹³¹Cs Radioisotope Production

Abstract: Continuous advances in nuclear physics make significant contributions to nuclear technology and provide significant advances in many related fields. The main reasons for this are understanding the structure and properties of the nucleus and developing physical theories of nuclear reactions. Knowing the cross-section of nuclear reactions used especially in the field of health and technology gives an idea about the possible results of the reaction. In some cases, it is not possible to experimentally find cross sections of nuclear reactions both in terms of cost and conditions. The reaction cross sections are calculated theoretically with various nuclear reaction codes. ¹³¹Cs has been used in cancer treatments in recent years due to its shorter half-life and higher energy compared to other radioisotopes used in cancer treatment. In this study, the excitation functions of ¹³³Cs ($\gamma,2n$), ¹³³Cs (p,x), ¹²⁷I (α,γ) and ¹³¹Xe (p,n) reactions used to produce ¹³¹Cs radioisotope and whose experimental data are available in the EXFOR library were investigated. The compatible theoretical results obtained with the TALYS 1.95 nuclear code program and the experimental data obtained from the EXFOR library were compared.

Key words: Nuclear reactions, Cross section, TALYS 1.95, EXFOR

1. Giriş

Nükleer fizik, önemli bir şekilde modern dünyamıza girmiş olup çeşitli bilim dallarını da etkilemekte ve toplum içinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle sağlık alanındaki kullanımı önem kazanmakta ve sürekli gelişmeler olmaktadır. Parçacık hızlandırıcılarında ve reaktörlerde üretilen radyoizotoplar kanser tedavisinde sıkça kullanılmaktadır.

Sezyum elementinin atom ağırlıkları 112-151 arasında değişen ve bilinen 39 izotopu bulunur ve bazı izotopları tıp alanında kanser tedavilerinde kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda ^{192}Ir elementinden daha düşük yarılanma ömrü ve enerjileri olmasından dolayı ^{131}Cs , ^{125}I ve ^{103}Pd elementleri, prostat kanserinin tedavisinde kullanılmaya başlanılmıştır. ^{131}Cs elementinin prostat kanserinde kullanılan diğer elementlerle beraber sahip olduğu yarılanma ömrü ve ortalama foton enerjileri Tablo 1’de verilmiştir [1].

Tablo 1. Prostat brakiterapisinde kullanılan radyoaktif kaynakların özellikleri [1].

Brakiterapi	Radyoaktif Kaynak	Yarı Ömür (Gün)	Ortalama Foton Enerjisi (keV)	İmplanttaki Başlangıç Doz Hızı (cGy/Saat)
Kalıcı Çekirdek İmplantlarla Tek Fraksiyonda Uygulanan Çok Düşük Doz Hızında Brakiterapi (VLDR)	İyot-125	59,6	28	7
	Paladyum-103	17	22	21
	Sezyum-131	9,7	29	30
Geri Çekilen Kaynaklarla Birden Fazla Fraksiyonda Uygulanabilen Yüksek Doz Hızında Brakiterapi (HDR)	İridyum-192	73,85	380	>1200

^{131}Cs elementi foton emisyonu için 29 keV ile 34 keV enerji aralığında maksimum tesir kesit değerlerine ulaştığından, düşük enerji gereksinimine sahip kısa yarı ömürlü bir radyoizotoptur. Bu özelliklerinden dolayı prostat, meme, beyin, akciğer, boyun ve pankreas kanserlerinde ^{125}I ve ^{103}Pd radyoizotopları yerine son yıllarda ^{131}Cs radyoizotopu daha çok kullanılmaya başlanılmıştır [2]. ^{131}Cs radyoizotopu elde edilmesi için EXFOR [3] kütüphanesinde deneysel verileri bulunan ^{133}Cs ($\gamma,2n$) reaksiyonuna ait deneysel çalışmalar Lepretre vd. [4], Berman vd. [5] ve Varlamov vd. [6], ^{133}Cs (p,x) reaksiyonuna ait deneysel çalışma Riehl [7], ^{127}I (α,γ) reaksiyonuna ait deneysel çalışmalar Kiss vd. [8] ve Carlson vd. [9] ve ^{131}Xe (p,n) reaksiyonuna ait deneysel çalışma Tarkanyi vd. [10] olarak tespit edilmiştir.

Nükleer reaksiyonlar oluşum mekanizmasına göre genel olarak 2 grupta incelenir: Saçılma reaksiyonları ve çekirdek reaksiyonları. Çekirdek reaksiyonları ise 3’e ayrılır: Denge öncesi reaksiyonlar, direkt reaksiyonlar ve bileşik çekirdek reaksiyonları. Burada ilgilendiğimiz çekirdek reaksiyonları olduğu için basitçe ele alınmıştır.

Direkt reaksiyonlar, çekirdek sınırlarında kısa süreli temaslar ile gerçekleşmektedir. Enerji ve madde aktarım miktarı küçüktür. Bunun yanında reaksiyonlar hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Ürün parçacıkların açısal dağılımı genellikle ileri yönde pik yapar [11]. Direkt reaksiyonlar diğer reaksiyonlara göre çok daha kısa sürede (10^{-22} s) gerçekleşir. Direkt reaksiyonlarda, düşük açılarda tesir kesitleri pik yaparken, büyük açılarda ise şiddetleri düşmektedir. Direkt reaksiyonlar genellikle yüksek enerji değerlerinde görülmektedir [12].

Bileşik çekirdek reaksiyonları, merkez veya merkeze yakın yerlerde meydana gelen bir çarpışma çeşididir. Çarpışmalar birbirinden bağımsız evrelerden oluştuğu düşünülmektedir. Çarpışmanın başında mermi parçacık ve hedef çekirdek birbiriyle birleşir ve sonrasında bileşik sistem içerisinde nükleon-nükleon etkileşimleriyle birçok nükleon arasında enerji paylaşılır. Nükleonlardan biri kaçacak enerjiyi bulduğu zaman süreç tersine işlemeye başlar [11]. Direkt reaksiyonlara göre daha uzun bir sürede (10^{-18} s'den daha fazla) gerçekleşmektedir. Bileşik reaksiyonlarda son oluşan ürünler ilk gelen ürünlerden bağımsız bir şekilde alınan enerjiye bağlı oluşur. Bileşik çekirdek reaksiyonları gelen parçacığın çekirdekten kaçma şansının daha küçük olduğu 10 MeV ile 20 MeV enerji aralıklarında daha iyi çalışmaktadır. Bu yüzden düşük enerji seviyelerinde bileşik reaksiyonlar daha fazla görülür [12].

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada $^{133}\text{Cs}(\gamma,2n)$, $^{133}\text{Cs}(p,x)$, $^{127}\text{I}(\alpha,\gamma)$ ve $^{131}\text{Xe}(p,n)$ reaksiyonları ^{131}Cs radyoizotopunun üretilmesi için kullanılmıştır. Tesir kesitleri teorik olarak hesaplarken TALYS 1.95 [13] nükleer reaksiyon kodu kullanılmıştır. Yukarıda verilen deneysel çalışmaların sonuçları EXFOR deneysel veri kütüphanesinden alınarak TALYS 1.95 nükleer kod programında elde ettiğimiz teorik sonuçlar ile karşılaştırılmış ve ayrıca reaksiyon tipleri incelenmiştir.

2.1. TALYS Nükleer Reaksiyon Kodu

TALYS 1.95 nükleer kod programı, nükleer modeller kullanarak tüm reaksiyon mekanizmalarını, reaksiyon kanallarını ve gözlenebilir tüm ihtimalleri belirler. Bu programda oluşturulan simülasyon reaksiyonlarında mermi parçacıkları olarak n, p, d, t, ^3He , α parçacıkları ve γ ışın demeti ile 1 keV – 1 GeV enerji bölgesinde çalışabilir. Hedef çekirdeğin kütlesi ise $5 < A \leq 339$ arasında olup çok farklı reaksiyon modelleri ile çekirdek modellerine bağlı nükleer reaksiyon hesaplamaları gerçekleştirilir. Kullanılabilecek modeller arasında optik modeller, bileşik çekirdek reaksiyon modelleri, seviye yoğunluğu modelleri, direkt reaksiyon modelleri, fisyon reaksiyon modelleri ve denge-öncesi reaksiyon modelleri vardır [13].

2.2. EXFOR Veri Kütüphanesi

EXFOR [3] veri kütüphanesi, deneysel nükleer reaksiyon verilerinin kapsamlı bir şekilde toplanıp, depolanıp ve tekrardan kullanıma hazır hale getirilen bir kütüphanedir. EXFOR web veri tabanı erişim sistemi; veri arama, çeşitli biçimlerde çıktı, ENDF ile çizim karşılaştırma, eski verileri yeni standartlara göre yeniden düzenleme, ters reaksiyonlar ve verileri hesaplama, kısmi belirsizliklerden korelasyon matrisleri oluşturma gibi birçok hizmeti vardır.

Nükleer bilim dünyasında günümüze kadar yapılan yaklaşık 23000 deney bulunmaktadır. Bu deneylerin sonuçlarının bulunduğu EXFOR veri kütüphanesi, IAEA Nükleer Data Bölümü tarafından koordine edilen uluslararası Nükleer Reaksiyon Veri Merkezleri Ağı adlı bir dünya çapındaki iş birliğinin bir ürünüdür [3].

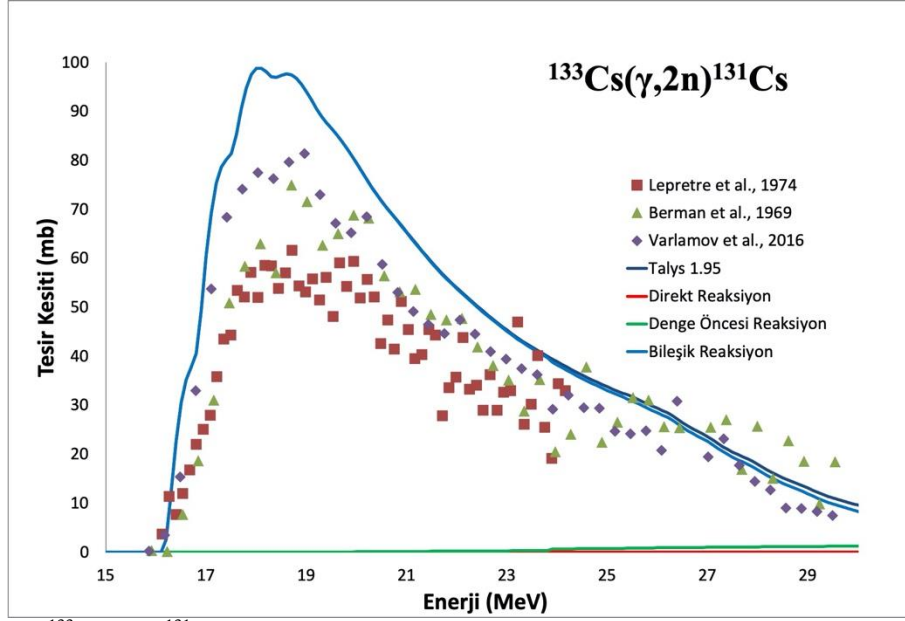
3. Bulgular

Bu çalışmada, TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kodu kullanılarak ^{131}Cs izotopunu elde etmek için kullanılabilecek reaksiyon tesir kesitleri teorik olarak hesaplanmıştır. Elde

edilen teorik tesir kesitleri EXFOR nükleer data kütüphanesinde var olan deneysel tesir kesitleri ile karşılaştırılmıştır.

3.1. $^{133}\text{Cs}(\gamma,2n)^{131}\text{Cs}$ Reaksiyonu

$^{133}\text{Cs}(\gamma,2n)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için EXFOR da var olan deneysel tesir kesit değerleriyle TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kodu ile hesaplanan teorik tesir kesiti değerleri Şekil 1'de verilmiştir.

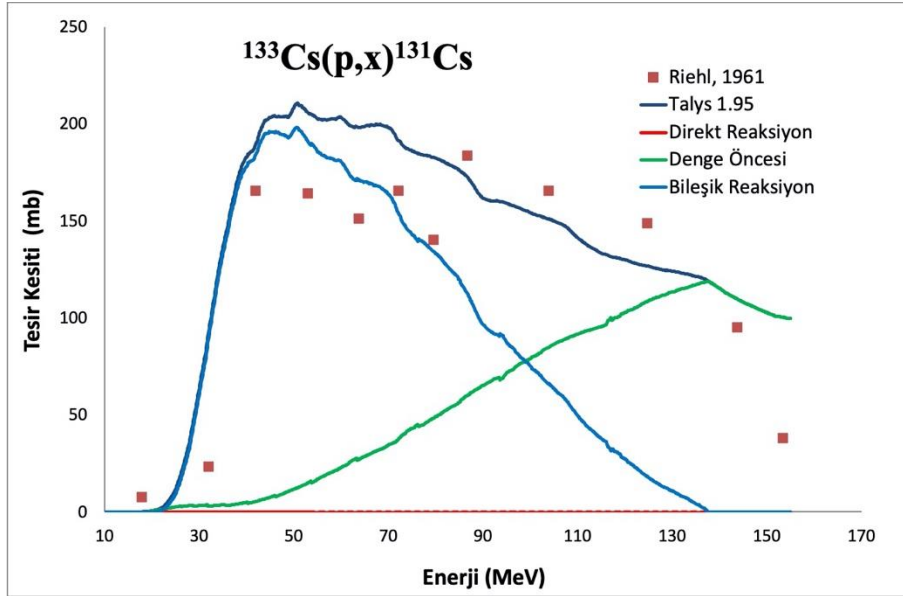


Şekil 1. $^{133}\text{Cs}(\gamma,2n)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

$^{133}\text{Cs}(\gamma,2n)^{131}\text{Cs}$ nükleer reaksiyonuyla ilgili hesaplamalar ve karşılaştırmalar sonucunda, Lepretre vd.'nin [4], Berman vd.'nin [5] ve Varlamov vd.'nin [6] yaptığı deneysel çalışmalar ile TALYS 1.95 ile elde edilen teorik sonuçların biçimsel olarak uyum içinde olduğu görülmektedir. TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kod programı ile yapılan hesaplama sonucunda maksimum tesir kesitine 18,1 MeV enerji değerinde ulaşıldığı ve maksimum tesir kesitinin de 98,8 mb olduğu görülmüştür. Ayrıca, 20 MeV enerji değerinden sonra denge öncesi reaksiyonlar oldukça hafif bir şekilde aktif olmasına rağmen tüm enerji değerlerinde bileşik reaksiyonun baskın reaksiyon olduğu görülmüştür. Reaksiyonda direkt reaksiyonların etkisi görülmemiştir.

3.2 $^{133}\text{Cs}(p,x)^{131}\text{Cs}$ Reaksiyonu

$^{133}\text{Cs}(p,x)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için EXFOR'daki mevcut deneysel tesir kesitleriyle TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kodu ile elde edilen teorik tesir kesiti değerleri Şekil 2'de verilmiştir.

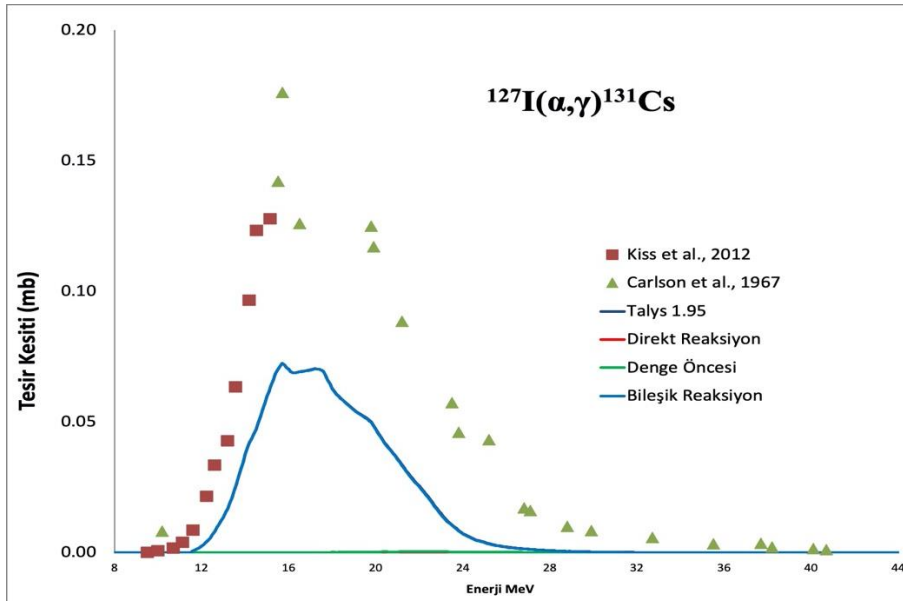


Şekil 2. $^{133}\text{Cs}(p,x)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

$^{133}\text{Cs}(\rho,x)^{131}\text{Cs}$ nükleer reaksiyonu ile ilgili TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kod programında elde ettiğimiz simülasyon değerleri ile EXFOR veri kütüphanesinden alınan Riehl'nin [7] deneysel değerlerin incelendiği zaman biçimsel olarak uyumlu oldukları görülmüştür. TALYS 1.95 hesaplamalarında maksimum tesir kesitine ait enerji değerinin 51,7 MeV olduğu ve maksimum tesir kesitinin de 210 mb olduğu görülmüştür. Tüm reaksiyonda denge öncesi ve bileşik reaksiyonların aktif oldukları ve 15,1 ile 99,1 MeV enerji aralığında bileşik reaksiyonların, 99,1 ile 155 MeV enerji aralığında ise denge öncesi reaksiyonların baskın olduğu görülmüştür.

3.3 $^{127}\text{I}(\alpha,\gamma)^{131}\text{Cs}$ Reaksiyonu

$^{127}\text{I}(\alpha,\gamma)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için EXFOR da var olan Kiss vd. [8] ve Carlson ve Daily'nin [9] deneylerine ait reaksiyon tesir kesitleriyle TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kodu ile elde edilen teorik tesir kesiti değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



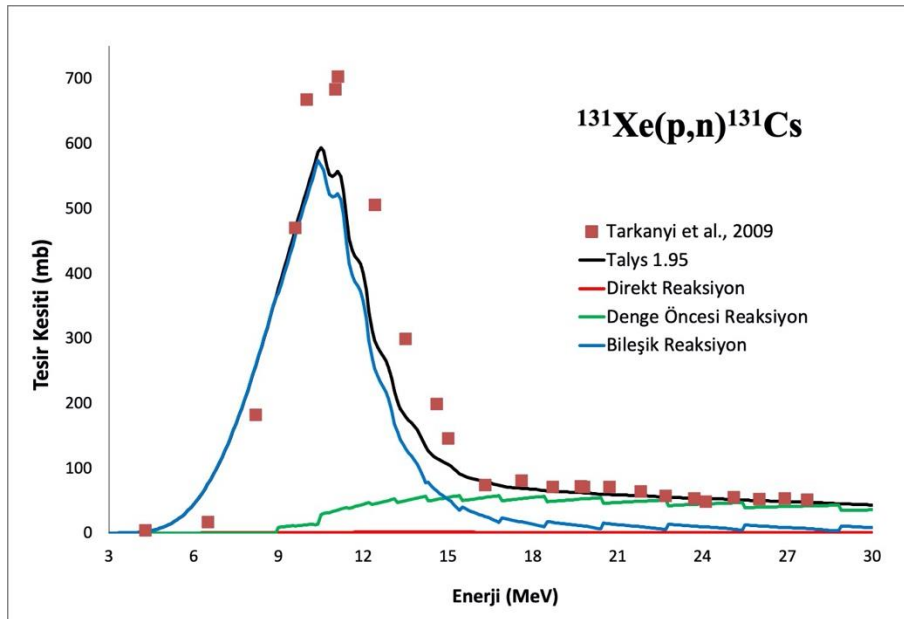
Şekil 3. $^{127}\text{I}(\alpha,\gamma)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

$^{127}\text{I}(\alpha,\gamma)^{131}\text{Cs}$ nükleer reaksiyonu ile ilgili TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kod programında elde ettiğimiz simülasyon deneylerinin sonuçları ile EXFOR veri kütüphanesinden alınan deneysel sonuçların grafikleri incelendiği zaman biçimsel olarak uyumlu oldukları görülmüştür. TALYS 1.95 ile yapılan hesaplamalarda maksimum tesir kesitine 15,7 MeV enerji değerinde ulaşıldığı ve maksimum tesir kesitinin de 0,0724 mb olduğu görülmüştür. Ayrıca, reaksiyon boyunca bileşik reaksiyonun baskın olduğu görülmüştür. Reaksiyonda direkt ve denge öncesi reaksiyonların etkisi görülmemiştir.

3.4 $^{131}\text{Xe}(p,n)^{131}\text{Cs}$ Reaksiyonu

$^{131}\text{Xe}(p,n)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için EXFOR’da var olan Tarkanyi vd. [10] çalışmasına ait deneysel tesir kesitleriyle TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kodu ile elde edilen teorik tesir kesiti değerleri Şekil 4’te verilmiştir.

$^{131}\text{Xe}(\rho,n)^{131}\text{Cs}$ nükleer reaksiyonu ile ilgili TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kod programında elde ettiğimiz simülasyon deneylerinin sonuçları ile EXFOR veri kütüphanesinden alınan deneysel sonuçların grafikleri incelendiği zaman uyumlu oldukları görülmüştür. TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kod programındaki hesaplamalarda maksimum tesir kesitine ait enerji değerinin 10,5 MeV olduğu ve maksimum tesir kesitinin de 593,137 mb olduğu görülmüştür. 9 ile 30 MeV enerji aralığında denge öncesi reaksiyonların, 2,4 ile 30 MeV enerji aralığında ise direkt ve bileşik reaksiyonların aktif olduğu görülmüştür. 2,4 ile 15 MeV enerji aralığında bileşik reaksiyonlar baskın olduğu, 15 ile 30 MeV enerji aralığında ise denge öncesi reaksiyonların baskın olduğu görülmüştür.



Şekil 3. $^{131}\text{Xe}(\rho,n)^{131}\text{Cs}$ reaksiyonu için hesaplanan tesir kesiti değerlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

4. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada ^{131}Cs radyoizotopu elde etmek için kullanılabilir olan reaksiyonlara ait uyarılma fonksiyonları incelendi. Tesir kesitlerini hesaplanırken TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kod programı kullanıldı. EXFOR ve TALYS 1.95’den elde edilen veriler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2’yi incelediğimizde ^{131}Cs radyoizotopunu elde etmek için, $^{131}\text{Xe}(\rho,n)$ nükleer reaksiyonuna ait maksimum tesir kesiti değeri, maksimum tesir kesiti enerjisi, verim ve reaksiyonun meydana getirecek uygun maliyet koşulları bakımından en uygun nükleer reaksiyon olduğu görülmektedir.

Tablo 2. TALYS 1.95 nükleer kod programı ile Deneysel verilerin karşılaştırılması

Reaksiyon	$^{133}\text{Cs}(\gamma,2n)$		$^{133}\text{Cs}(p,x)$		$^{127}\text{I}(\alpha,\gamma)$		$^{131}\text{Xe}(p,n)$	
	Teo	Den	Teo	Den	Teo	Den	Teo	Den
Maks. Tesir Kesiti (mb)	98,8	72,7	210	183,6	0,07	0,12	593	703
Maks. Tesir Kesiti Enerji Değeri (MeV)	18,1	18,8	51,7	86,6	15,7	15,4	10,5	11,1
Enerji Aralığı (MeV)	16,2-32	15,9-29,5	15,1-155	17,8-153,3	7,6-45	9,5-40,7	2,4-30	4,3-27,7

Nükleer reaksiyonları hem maliyet hem de uygun koşullarla her zaman deneysel olarak gerçekleştirmek mümkün olmamaktadır. Kimi zaman ise reaksiyona giren maddeler çok değerli olduğundan doğru şekilde kullanmak gerekmektedir. Bu gibi durumlar da simülasyon programları ile teorik deneyler yapmak çok daha avantajlı bir seçenek haline gelmektedir. TALYS 1.95 nükleer reaksiyon kod programı ise bu çalışmada araştırdığımız nükleer reaksiyonların tesir kesitleri için yüksek oranda uyumlu sonuçlar vermiştir. Hem maliyet hem zaman açısından bu tür nükleer kod programlarını kullanmak, nükleer çalışmaların ilerlemesi açısından önemi yadsınamaz bir gerçektir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazar 1 Sedat ZENGİN: Araştırma, Orijinal Taslak Yazımı.

Yazar 2 Vildan ÖZKAN BİLİCİ: Doğrulama, İnceleme ve Düzenleme.

Yazar 3 İsmail Hakkı SARPÜN: Denetim/Gözlem/Tavsiye.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir destek ve teşekkür beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Çatışma Beyanı

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Kaynakça

- [1] A. Özen, M. Saynak, V. Çaloğlu ve M. Uzal, “Prostat kanseri brakiterapisinin radyobiolojik temelleri,” *Okmeydanı Tıp Dergisi*, 33(2), 99-107, 2017.
- [2] M. Murphy, K. Piper, and L. Greenwood, “Evaluation of the new cesium-131 seed for use in low-energy x-ray brachytherapy,” *Med. Phys.*, 31(6), 1529-1538, 2004.
- [3] EXFOR, (Experimental Nuclear Reaction Data File), Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center, Database Version of 2020-03-02
- [4] A. Lepretre, H. Beil, R. Bergere, P. Carlos, A. De Miniac, A. Veysiere, and K. Kernbach, “A study of the giant dipole resonance of vibrational nuclei in the $103 \leq A \leq 133$ mass region,” *Nucl. Phys. A*, 219, 39-60, 1974.
- [5] B. L. Berman, R. L. Bramblett, J. T. Caldwell, H. S. Davis, M. A. Kelly, and S. C. Fultz, “Photoneutron cross sections for As75, Ag107, and Cs133,” *Phys. Rev.*, 177, 1745, 1969.
- [6] V. V. Varlamov, B. S. Ishkhanov, V. N. Orlin, and N. N. Peskov, “Data on photoneutron reactions from various experiments for ^{133}Cs , ^{138}Ba and ^{209}Bi nuclei,” *Phys. Atom. Nucl.*, 79, 501-502, 2015.
- [7] C. Riehl, “Reactions (p,pxn) sur le cesium,” *J. Phys. Radium*, 22, 770-771, 1961.
- [8] G. G. Kiss, T. Szücs, Zs. Török, Z. Korkulu, Gy. Gyürky, Z. Halasz, Zs. Fülöp, E. Somorjai, and T. Rauscher, “Investigation of α -induced reaction on ^{127}I for the astrophysical γ process,” *Phys. Rev. C*, 86, 035801, 2012.
- [9] R. V. Carlson and P. J. Daly, “Excitation functions for ($^3\text{He},\gamma$) and ($^4\text{He},\gamma$) reactions,” *Nucl. Phys. A*, 102, 161-176, 1967.

- [10] F. Tarkanyi, A. Hermanne, S. Takacs, R.A. Rebeles, P. Van den Winkel, B. Kiraly, F. Ditroi, and A.V. Ignatyuk, "Cross section measurements of the $^{131}\text{Xe}(p,n)$ reaction for production of the therapeutic radionuclide ^{131}Cs ," *Appl. Radiat. Isot.*, 67, 1751-1757, 2009.
- [11] J. Lilley, Nükleer Fizik İlkeler ve Uygulamalar, (Çeviri Editörü: A. Aydın, İ.H. Sarpün, E. Tel ve A. Kaplan), Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2018.
- [12] H. Özdoğan, "Fe, Zr, Nb ve Ag füzyon reaktörleri yapısal elementlerinin tesir kesitlerinin nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak incelenmesi," Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2018.
- [13] A. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, TALYS 1.95 Nuclear Research and Consultancy Group (NRG), The Netherlands, 2019.