

Kanser Tedavi ve Teşhisinde Kullanılan ¹³¹I Radyoizotopun Fisyon Bariyer Modelleri Kullanılarak Üretim Tesir Kesitlerinin İncelenmesi

Veli ÇAPALI^{1*}

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Görüntüleme Bölümü

Geliş / Received: 15/10/2019 Kabul / Accepted: 27/03/2022

Öz

Kanser hastalıklarının teşhis ve tedavisinde radyoizotopların kullanılması tıbbi radyolojide oldukça önemlidir. Radyoizotop üretiminde, reaksiyon veriminin yüksek ve üretim maliyetinin düşük olması istenmektedir. Bunları sağlamak için nükleer reaksiyonların teorik olarak önceden araştırılması gereklidir. Bu çalışmada, tiroid ve böbrek kanserinin teşhis ve tedavisinde kullanılan ¹³¹I'nın farklı üretim yöntemleri araştırılmıştır. ¹³¹I radyoizotopunun (p,f) reaksiyonları ile üretilmesi için muhtemel reaksiyonlar teorik olarak incelenmiştir. Teorik çalışmalar için TALYS bilgisayar kodu içerisinde yer alan fisyon bariyer modelleri kullanılmıştır. Her bir model hem birbirleri ile hem de EXFOR veri tabanından alınan deneysel veriler ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kanser tedavisi, ¹³¹I, radyoizotop, tesir kesiti, TALYS, EXFOR.

Investigation of Production Cross-Sections by Fission Barrier Models of ¹³¹I Radionuclide used in Cancer Treatment and Diagnosis

Abstract

The use of radioisotopes in the diagnosis and treatment of cancer diseases is very important in medical radiology. In radioisotope production, it is desirable that the reaction efficiency is high and the production cost is low. In order to achieve these conditions, it is necessary to investigate theoretically the nuclear reactions in advance. In this study, different production methods of ¹³¹I used in the diagnosis and treatment of thyroid and kidney cancer were investigated. The possible reactions for the production of ¹³¹I radioisotope by the (p, f) reactions were theoretically examined. For theoretical studies, fission barrier models in TALYS computer code were used. Each model was compared with each other and with the experimental data obtained from EXFOR database.

Keywords: Cancer treatment, ¹³¹I, radioisotope, cross-section, TALYS, EXFOR.

1. Giriş

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) 2018 verilerinde, kanser vakaları dünya genelinde en yaygın hastalık ve ölüm vakaları olarak bildirilmiştir. Sadece 2018 yılı içerisinde yaklaşık olarak 18.1 milyon insan kansere yakalanmış ve bunların 9.6 milyonu yaşamını yitirmiştir (WHO, Latest Global Cancer Data, 2018). Bilim insanları; kanser vakalarına yönelik yeni teşhis ve tedavi yöntemleri geliştirmektedirler. Günümüzde kanser tedavisi için kemoterapi, radyasyon tedavisi, immünoterapi, ışın tedavisi gibi bazı tedavi yöntemleri kullanılırken, teşhis için bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MR), single-photon emission tomography (SPECT)”, pozitron emisyon tomografisi (PET) ve hibrid sistemler (SPECT/CT, PET/CT) gibi yöntemleri kullanmaktadırlar. Tümörlerin teşhis ve tedavisinde literatür ve hastane uygulamaları incelendiğinde pek çok radyoizotop kullanılmalıdır. Bu radyoizotoplardan en yaygın kullanılan izotop ise İyot-131 (¹³¹I) izotopudur. Bu radyoizotop; β^- bozunumu yapar, 0.37 – 7400 MBq (10 μ Ci-200mCi) aktivasyon değerine ve 8,02 gün yarı ömrü sahip filyon reaksiyonun bir ürünüdür. Genel olarak ¹³¹I, primer veya metastatik kanser hücrelerinin tanısı, evrenmesi, tedavi sonrası izleme ve nükslerin erken saptanması için kullanılmakla beraber, böbrek ve tiroid bezlerinde bulunabilecek tümörlerin teşhisi ve tedavisi ile kontrolü amacıyla kullanılan bir radyoizotoptur (Gündoğdu vd., 2018).

Günümüzde; radyoizotoplar siklotron, reaktör ve jeneratörlerde çeşitli nükleer reaksiyonlar kullanılarak üretilmektedirler. Radyoizotop-ların üretimi öncesi, üretim reaksiyonu belirlenmeli ve bu reaksiyon teorik olarak modellenmelidir. Bunun için de birçok teorik nükleer model de dahil olmak üzere doz hesaplamalarını da gerçekleştirmek TALYS, EMPIRE, ALICE/ASH benzeri farklı nükleer reaksiyon yazılım kodları geliştirilmiş ve bu kodlar kullanılarak literatürde pek çok çalışma yapılmıştır (Demir vd., 2015, Tel vd., 2012, Büyüksulu vd., 2010).

Teorik hesaplamalar deneysel çalışmalar öncesinde kritik öneme sahiptir. Yanı sıra, deneysel zorluklar ve veri eksikliği nedeniyle teorik hesaplamalar ön plana da çıkmaktadır. Nükleer reaksiyonların meydana gelme olasılığını incelemek için tesir kesiti verilerinden ve hesaplamalarından yararlanır. Teorik olarak nükleer tesir kesiti hesaplamaları için birçok teorik nükleer reaksiyon modeli ve bu modellere bağlı hesaplamaların yapılabilmesi için farklı nükleer reaksiyon kodları geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, ¹³¹I üretmek için Tablo 1’de yer alan filyon reaksiyonları kullanılmış ve ¹³¹I üretim tesir kesiti hesaplamaları filyon bariyer modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan reaksiyonlar ve enerji aralıkları.

Reaksiyonlar	Enerji Aralığı (MeV)
$^{232}\text{Th}(p,f)^{131}\text{I}$	23,9 – 87,03
$^{233}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	8,2 – 15,5
$^{235}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	9 – 18
$^{236}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	9 – 15,6
$^{238}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	9,5 – 85
$^{237}\text{Np}(p,f)^{131}\text{I}$	9,8 – 31,7
$^{239}\text{Pu}(p,f)^{131}\text{I}$	9,8 – 15,5
$^{244}\text{Pu}(p,f)^{131}\text{I}$	10,2 – 18
$^{241}\text{Am}(p,f)^{131}\text{I}$	9 – 16
$^{248}\text{Cm}(p,f)^{131}\text{I}$	10,5 – 20

Hesaplamalar için, TALYS 1.96 (Koning vd., 2021) kodu ve bu kodun içerisinde yer alan Deneysel Filyon Bariyer, Mamdouh Teorik Filyon Bariyer (Mamdouh vd., 2001), Sierk Teorik Filyon Bariyer, Dönen Sıvı Damlası Teorik Filyon Bariyer ve WKB Yaklaşımlı Teorik Filyon Bariyer modelleri kullanılmıştır. Tüm hesaplamala sonuçları birbirleriyle ve Deneysel Nükleer Reaksiyon Verilerinden (NRDC-EXFOR) elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

2. TALYS Hesaplama Kodu ve Filyon Bariyer Modelleri

TALYS 1.96 nükleer reaksiyon hesaplama kod programı, nükleer modeller kullanarak tüm reaksiyon mekanizmalarını, reaksiyon kanallarını ve reaksiyonlara yönelik tüm ihtimalleri belirler. Bu program ile gerçekleştirilen nükleer hesaplamalar için mermi parçacıkları olarak n, p, d, t, ^3He , α parçacıkları ve γ ışın demeti, 1 keV – 1 GeV enerji bölgesinde çalışabilmektedir. Hedef çekirdeklerin kütlesi ise $5 < A \leq 339$ arasında olup çok farklı reaksiyon modelleri ile çekirdek modellerine bağlı nükleer reaksiyon hesaplamaları gerçekleştirilir. Hesaplamalar için optik modeller, bileşik çekirdek reaksiyon modelleri, seviye yoğunluğu modelleri, direkt reaksiyon modelleri, filyon reaksiyon modelleri ve denge-öncesi reaksiyon modelleri kullanılır.

Bu çalışmada, TALYS 1.96 yazılımında yer alan beş farklı filyon bariyer parametresi ve modelleri kullanılmıştır. Filyon reaksiyonu ağır çekirdekler için enerji açısından uygundur ancak, filyon reaksiyonunun kendiliğinden gerçekleşmesinin önündeki en büyük engel filyon bariyerdir. Kütle numarası 100 den büyük olan ($A > 100$) çekirdekler filyon reaksiyonuna karşı enerjetik olarak kararsızdırlar, ancak yüksek filyon bariyeri sebebiyle filyon reaksiyonu gözlenmez. Fakat, bu ağır kütleli çekirdeklere yeterli uyarılma enerjisi verildiğinde, bu filyon bariyerinin üstüne çıkabilir ve filyon reaksiyonunu gerçekleştirebilirler. Bu çalışmada, filyon bariyer modelleri kullanılarak ağır çekirdeklerin (p,f) reaksiyonu sonucunda ^{131}I üretimine

yönelik reaksiyon tesir kesitleri incelenmiştir. Kullanılan fiyon bariyer modelleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Deneysel fiyon bariyer modeli

Deneysel fiyon bariyer modeli, Capote ve arkadaşlarının (Capote vd., 2009) yapmış olduğu çalışmaların sonucunda deneysel tesir kesiti verileri mikroskobik seviye yoğunluğu parametreleri kullanılarak, parabolik fitleme yöntemi ile yeniden derlenerek üretilen ampirik bir tesir kesiti fonksiyonudur. Aktinid öncesi (pre-actinide) çekirdekler ile yapılan fiyon tesir kesiti hesaplamalarına dayanan deneysel fiyon bariyer modeli, sadece ana band geçiş durumları için geçerlidir.

V. Maslov (Maslov vd., 1996 ve Maslov vd., 1977) tarafından derlenen deneysel veriler ile üretilen deneysel fiyon reaksiyon fonksiyonu ile yapılan hesaplamaların, derleme için kullanılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış bir modeldir.

Mamdouh teorik fiyon bariyer modeli

Mamdouh teorik fiyon bariyer modeli, Mamdouh ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada kullanılan izotoplar için çift tepeli fiyon bariyer yüksekliklerinin ayarlanması için türetilmiş bir fiyon tesir kesiti hesaplama fonksiyonudur. Genişletilmiş Thomas-Fermi ile Strunsky integrali metodu (ETFSI) kullanılarak 2000 egzotik çekirdekten, $N = 184$, $Z \leq 120$ olan bazı süper ağır çekirdeklerin fiyon bariyer değerleri hesaplanmış bir modeldir (Mamdouh vd. 2001).

Sierk teorik fiyon bariyer modeli

Sierk teorik fiyon bariyer modeli, tek tepeli fiyon bariyer yüksekliklerinin nükleer yüzey enerjisi ve Coulomb enerjisinde sonlu yüzey dağılımına etkileri, sonlu menzilli etkiler ile genişletilmiştir. Sıvı damlası modelinin, yakınlık etkisini göz önüne almaması en büyük eksikliğidir. Tamamen bozulmuş şekiller için gerçek dışı yüzey enerjisi olması ve ayrılmış çekirdekler arasında çekim olmayışı bundan kaynaklanmaktadır (Krappe, vd., 1979).

Dönen sıvı damlası teorik fiyon bariyer modeli

Fiyon reaksiyonunun meydana gelme olasılığını hesaplamak için, öncelikli olarak fiyon engel enerjisinin belirlenmesi gerekir. Bu enerjiyi belirlemek ve fiyon reaksiyonunu anlayabilmek için sıvı damlası modeli kullanılır. Sıvı damlası modeline göre çekirdek, proton ve nötron sıvılarından oluşmuş sabit yoğunluklu bir damla olarak varsayılabilir. Bu durumda çekirdeğin hacmi nükleon sayısı A ile orantılı ve bağlanma enerjisi ise nükleon sayısına, yani çekirdek hacmine bağlı olmalıdır. Çekirdek yüzeyindeki bir nükleon içindeki bir nükleona göre daha az sayıda komşu nükleon ile etkileşeceğinden bağlanma enerjisine daha az katkıda bulunur. Bu nedenle hacim enerjisinden yüzey enerjisi diyebileceğimiz bir enerjiyi çıkarmak gerekir. Bu enerji alanı ile orantılıdır. Çekirdeği damla olarak kabul ettiğimiz bu modelde damlamız $Q=eZ$ yükü ile yüklüdür. Yüklü nükleonlar arasındaki Coulomb etkileşmesi bağlanma enerjisini azaltır. Bu enerji $(eZ)^2/R$ ile orantılıdır. Hafif çekirdeklerde Coulomb enerjisinin bağlanma enerjisine katkısı oldukça azdır. Hafif çekirdekler bölgesinde en büyük

bağlanma enerjisi $N=Z=A/2$ koşulu ile sağlanır. Bu durum çekirdek kuvvetlerinin simetrik bir nötron proton dağılımı tercih ettiğini gösterir. Bu nedenle fiyon reaksiyonunda meydana gelen nötron veya proton fazlalığı, $N-Z \geq 0$, bağlanma enerjisini azaltır. Bu görelî fazlalık $|N-Z/A| \ll 1$ dir. Reaksiyon sonucunda meydana gelen $N \neq Z$ durumu için asimetri enerjisi hesaplanır ve asimetri enerjisine bağılı olarak bağlanma enerjisi spine bağılı çift enerjisidir (Cohen vd., 1974 ve Gediklioğlu, 1988).

WKB yaklaşımlı teorik fiyon bariyer modeli

Adını Gregor Wentzel, Hendrik Anthony Kramers ve Leon Brillouin'den alan WKB yaklaşımı (bazen "J"nin Harold Jeffreys'i temsil ettiği JWKB yaklaşımı olarak adlandırılır), zamandan bağımsız Schrödinger denkleminde yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan bir tekniktir. Wentzel, Kramers ve Brillouin bu yaklaşımı 1926'da geliştirirken, daha önce 1924, matematikçi Harold Jeffreys, daha genel bir matematik yöntemi geliştirmişti. Tek boyutta potansiyel engeller aracılığıyla sınır durum enerjilerini ve kuantum tünelleme oranlarını hesaplamak için kullanılan bir yaklaşımdır (Jeffreys, 1924, Brillouin, 1926, Kramers, 1926 ve Wentzel, 1926.).

Hill–Wheeler yaklaşımına alternatif olarak, fiyon iletim katsayılarının hesaplanması için WKB yaklaşımı kullanılabilir. Birçok diferansiyel denkleme ve üç boyutta Schrödinger denkleminin radyal kısmına uygulanabilir. Özellikle, bağılı durum enerjilerinin ve potansiyel engellerden tünelleme hızlarının hesaplamasında kullanılan bir yöntemdir (Koning vd., 2018).

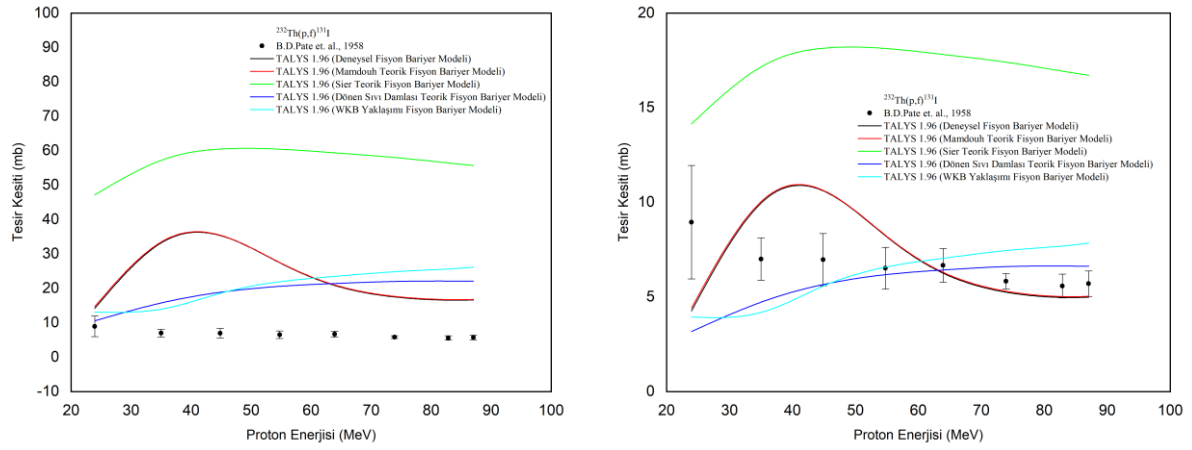
3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, ^{131}I izotopunun üretimine yönelik olarak muhtemel (p,f) reaksiyonları incelenmiştir. Fiyon reaksiyon modelleri kullanarak gerçekleştirilen teorik hesaplama sonuçları ile EXFOR veri tabanından alınan veriler değerlendirilmiştir. Teorik hesaplama sonuçları, deneysel değerler ile doğrusal olarak uyumlu ancak, değer olarak daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu durumu ortadan kaldırmak, veri bütünlüğünü sağlamak ve bu hesap kodlarını kullanılması için doğrusal normalizasyon yöntemi kullanılmış ve normalizasyon katsayısı elde edilmiştir. Her bir fiyon bariyer modeline uygun normalizasyon hesaplaması yapılarak Tablo 2'de her bir reaksiyon için elde edilen ve kullanılan normalizasyon katsayılarına yer verilmiştir. Teorik sonuçların her biri bu katsayıya göre yeniden hesaplanmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 1-10' da (a) grafikleri normalize edilmemiş değerleri içerirken (b) grafikleri normalize edilmiş değerlere yer verilmiştir.

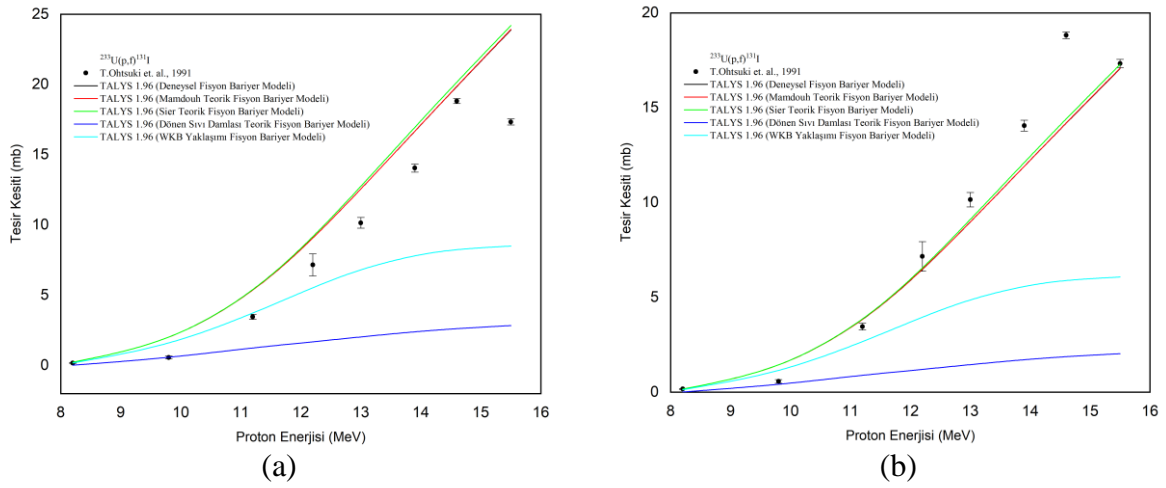
Tablo 2. Teorik olarak hesaplanan reaksiyon tesir kesitleri için elde edilen normalizasyon katsayıları.

Reaksiyonlar	Normalizasyon Katsayısı
$^{232}\text{Th}(p,f)^{131}\text{I}$	3,33
$^{233}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	1,44
$^{235}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	1,55
$^{236}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	1,2
$^{238}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$	0,7
$^{237}\text{Np}(p,f)^{131}\text{I}$	1,5
$^{239}\text{Pu}(p,f)^{131}\text{I}$	0,8
$^{244}\text{Pu}(p,f)^{131}\text{I}$	2,2
$^{241}\text{Am}(p,f)^{131}\text{I}$	0,7
$^{248}\text{Cm}(p,f)^{131}\text{I}$	0,9

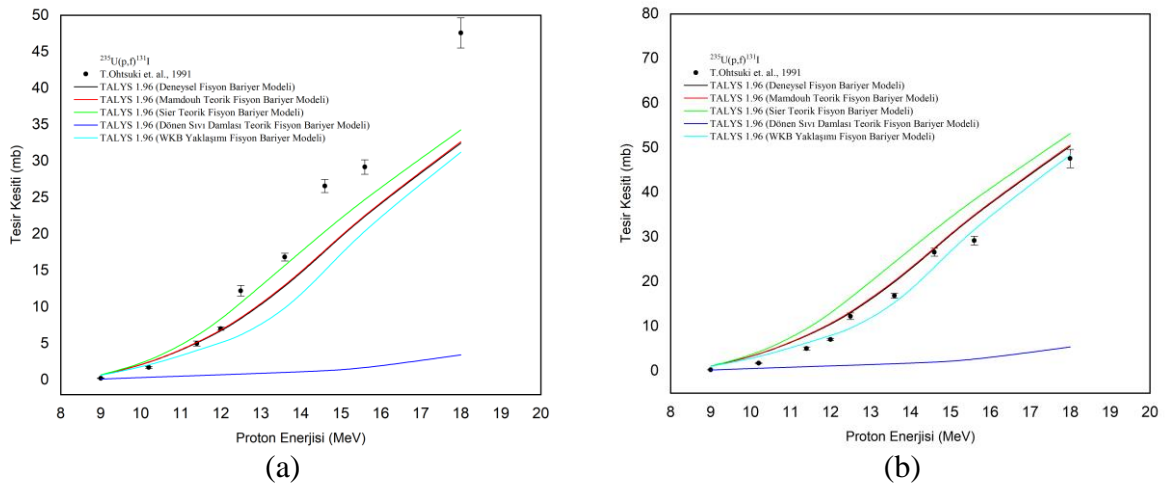
Şekillerde (a) grafiklerinde yer alan, normalize edilmemiş teorik hesaplamaların her biri incelendiğinde, genel olarak deneysel sonuçlardan daha yüksek bir değer aldıkları görülmüştür. Ancak bu durum, Sierk Teorik Filyon Bariyer modeli için pek geçerli değildir. Bu model ile gerçekleştirilen hesaplamalar normalize edilmeden de deneysel değerlere oldukça yakın değerler vermiştir. Şekillerde (b) grafiklerinde yer alan, normalize edilmiş değerler deneysel değerler karşılaştırıldığında genel olarak ^{232}Th izotopu için Sıvı Damlası modeli 40 MeV enerjiden sonra daha başarılı sonuçlar verirken, diğer reaksiyonlarda bu model ile gerçekleştirilen hesaplama sonuçları deneysel değerlerden oldukça uzak kalmaktadır. Uranyum izotopları için normalizasyon kullanılsa dahi Mamdouh, Sierk ve Deneysel Filyon bariyer modelleri deneysel değerlere yakın sonuçlar vermiştir. Ancak, daha uyumlu sonuçlar için normalizasyon katsayısı eklenerek hesaplama yapılırsa neredeyse deneysel sonuçlara ile aynı sonuçlar alınabilmektedir. ^{237}Np izotopu için normalize edilmemiş değerler incelendiğinde Dönen Sıvı Damlası modeli hariç diğer modellere deneysel değerlerin altında ancak doğrusal olarak oldukça uyumlu iken, normalize edilmiş değerler incelendiğinde deneysel değerlere ait tüm enerji aralığı için daha uyumlu sonuçlar vermiş olduğu görülmektedir. $^{239,244}\text{Pu}$ izotoplarına ait normalize edilmiş hesaplamalar incelendiğinde Mamdouh Teorik Filyon Bariyer modelinin daha uyumlu olduğu görülmektedir. 10 MeV enerjiye kadar ^{241}Am izotopu için tüm modeller neredeyse uyumlu iken 10 MeV enerjiden sonra tüm modeller için deneysel değerlerden yüksek bir değer olarak uzaklaştığı görülmektedir. Normalize edilmiş değerler ile deneysel değerler karşılaştırıldığında tüm enerji aralığı için hemen hemen uyumlu olduğu görülmektedir.



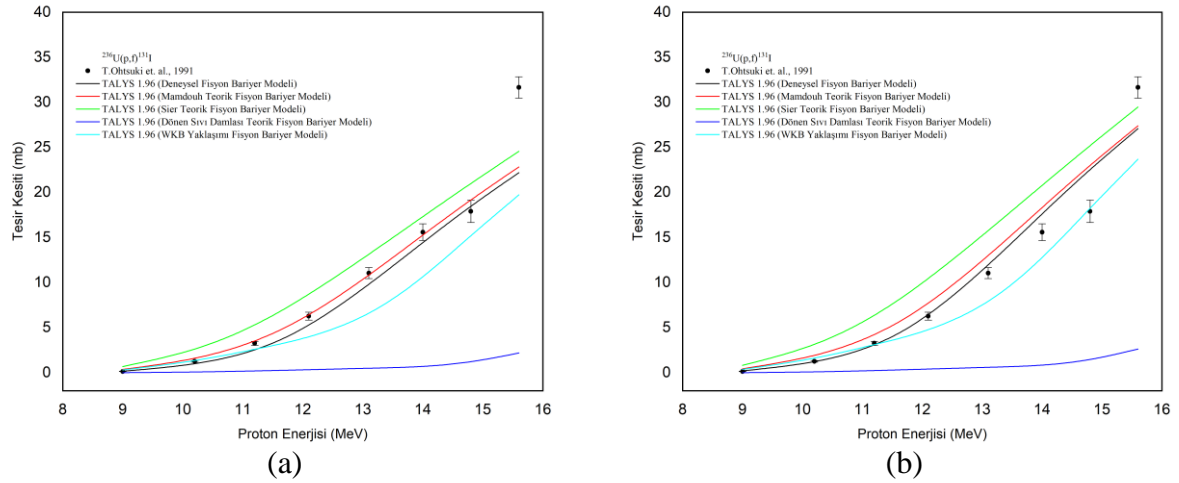
Şekil 1. $^{232}\text{Th}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



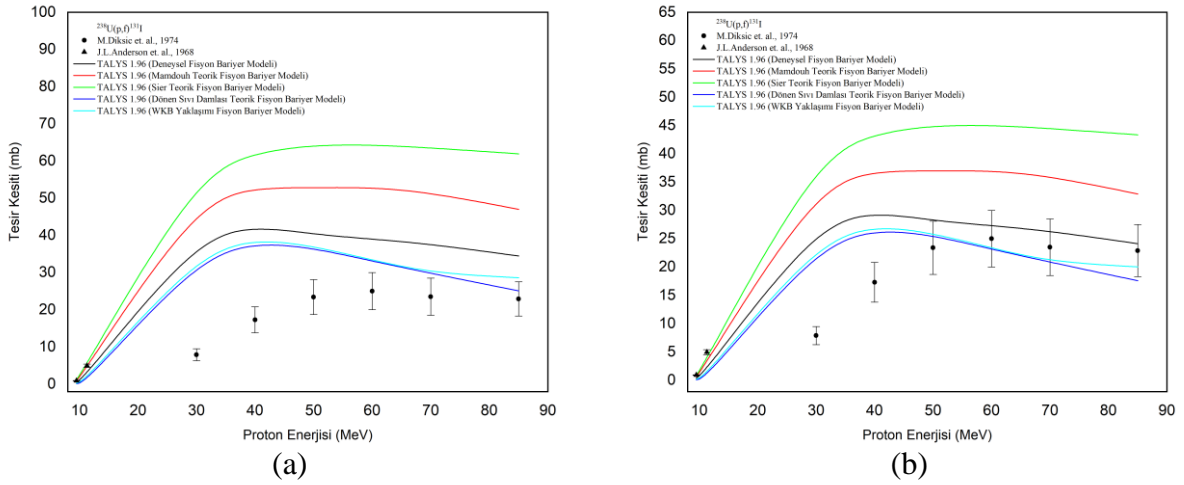
Şekil 2. $^{233}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



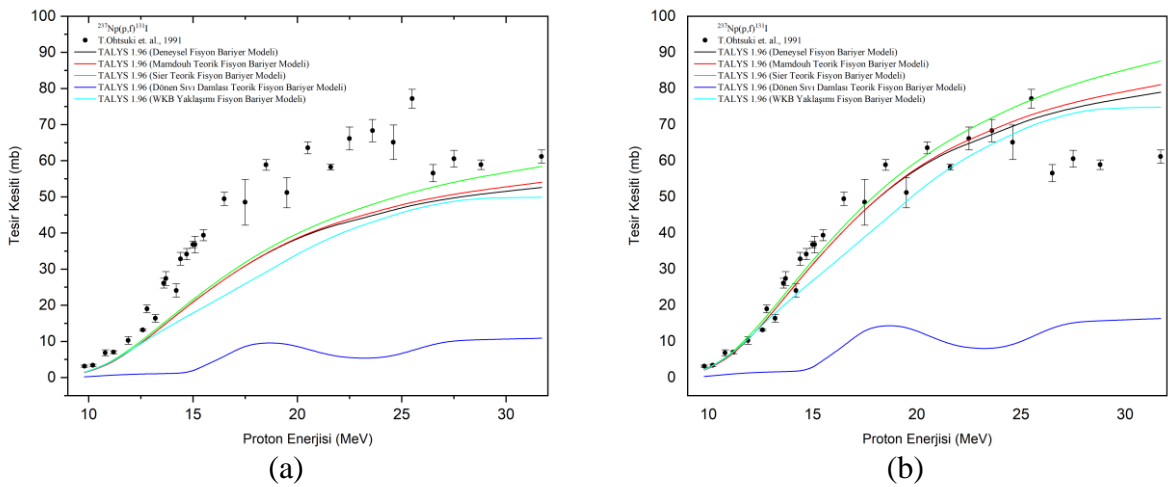
Şekil 3. $^{235}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



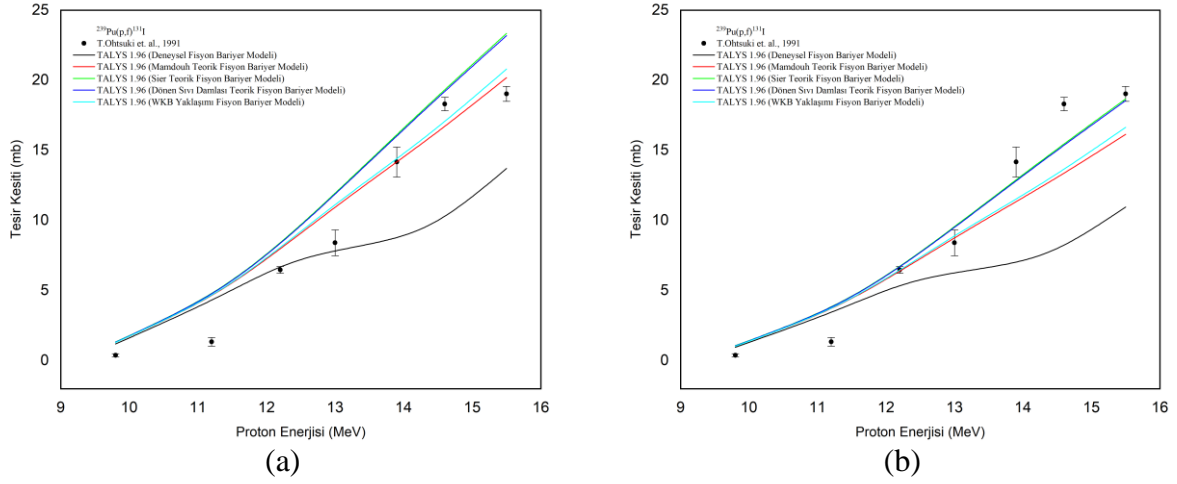
Şekil 4. $^{236}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



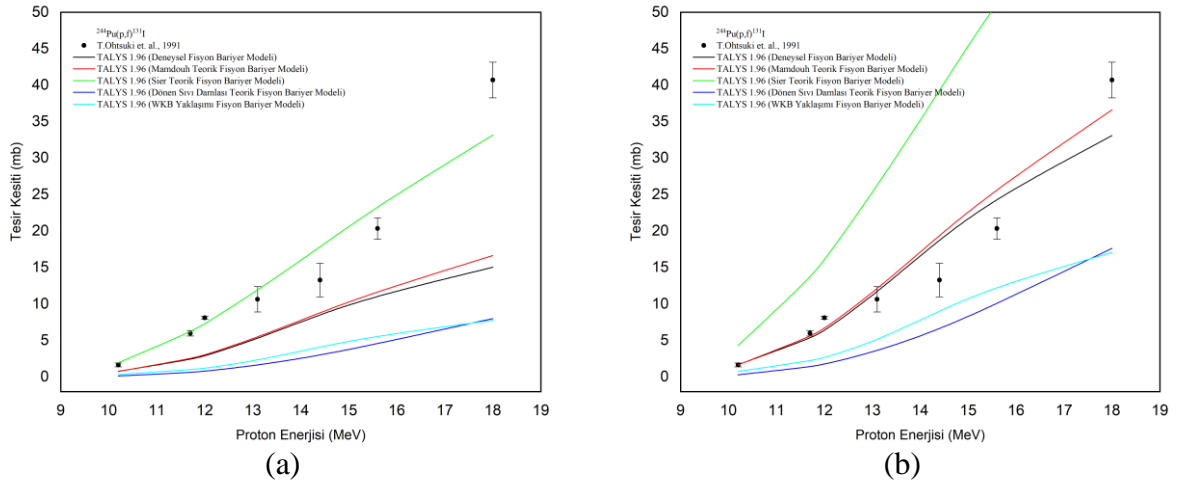
Şekil 5. $^{238}\text{U}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



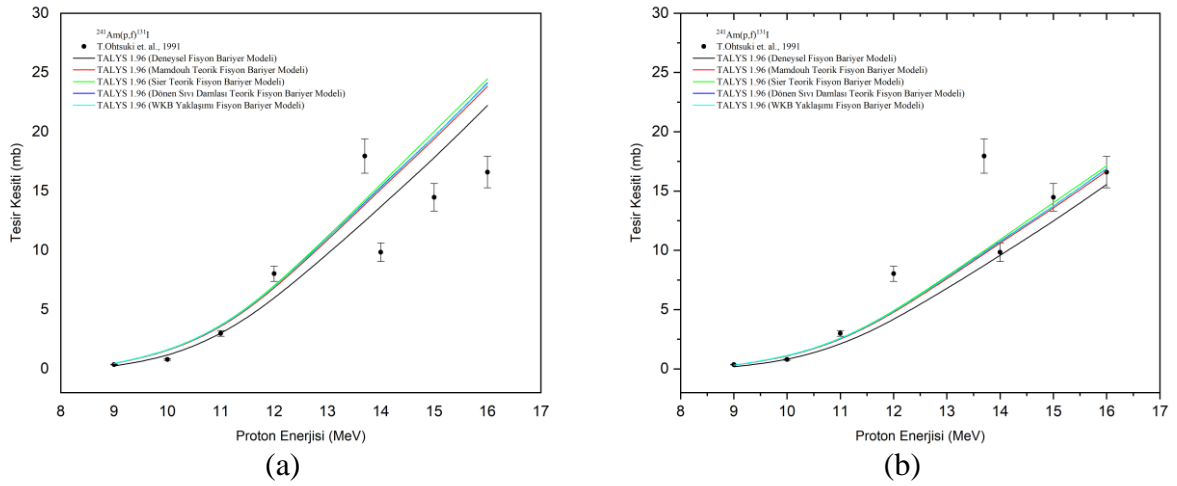
Şekil 6. $^{237}\text{Np}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



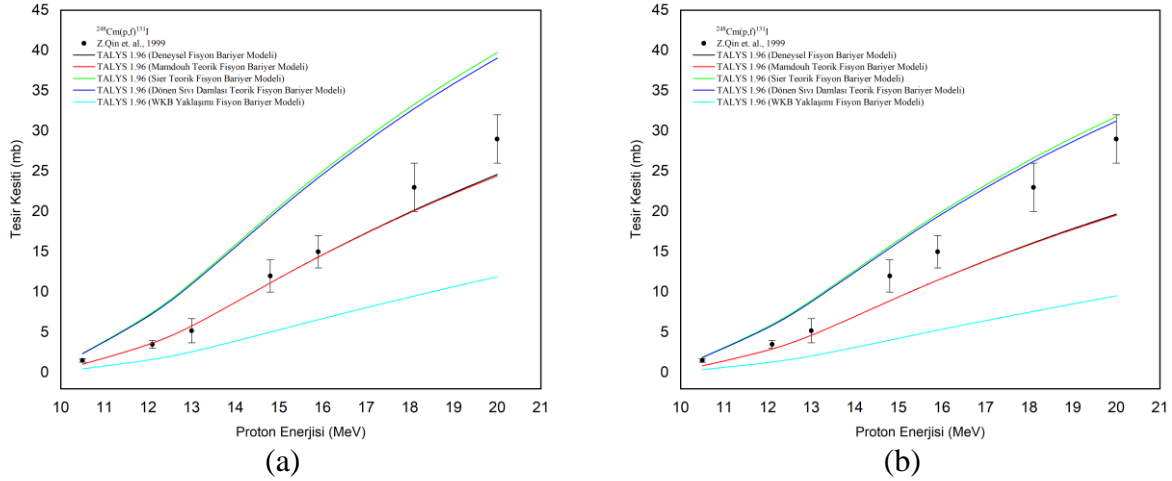
Şekil 7. $^{239}\text{Pu}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



Şekil 8. $^{244}\text{Pu}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



Şekil 9. $^{241}\text{Am}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.



Şekil 10. $^{248}\text{Cm}(p,f)^{131}\text{I}$ reaksiyonu için teorik tesir kesiti değerleri ile deneysel değerlerin karşılaştırılması.

^{248}Cm izotopu için Mamdouh Teorik ve Deneysel Fiyon bariyer modelleri, deneysel hata payının içerisinde kalacak şekilde bire bir örtüştüğü görülmektedir. Dönen Sıvı Damlası ve WKB Yaklaşımı ile gerçekleştirilen hesaplamalar ise daha yüksek değer aldığı görülmüştür. Normalize katsayısı kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalarda, Dönen Sıvı Damlası ve WKB Yaklaşımı deneysel değerlere uyum gösterirken diğer modeller deneysel değerlerin altında kalarak uzaklaşmaktadır. Bu nedenle, ^{248}Cm izotopu için gerçekleştirilecek fiyon bariyer hesaplamalarında Mamdouh Teorik ve Deneysel Fiyon modelleri için normalizasyon katsayısı kullanılmamalıdır.

4. Sonuç

^{131}I radyoizotopunun (p,f) reaksiyonu ile üretilmesi için muhtemel on farklı reaksiyonun incelendiği bu çalışmada, fiyon bariyer modelleri kullanılarak hesaplanan tesir kesiti değerleri, deneysel değerden daha yüksek sonuç aldığı ve ^{232}Th izotopu hariç genel uyumu yakaladığı gözlemlenmiştir. Teorik modeller ile gerçekleştirilen hesaplamalar, normalizasyon fonksiyonu ve katsayısı kullanılarak deneysel değerler ile daha uyumlu sonuçlar verebileceği bu çalışmada incelenmiştir. Normalizasyona yönelik Tablo 2'de yer alan katsayılar kullanılması koşulu ile ^{248}Cm izotopu için Mamdouh Teorik ve Deneysel Fiyon modelleri hariç mevcut bariyer modelleri deneysel değerler ile uyumu yakalamaktadır. Teorik hesaplamalar irdelendiğinde, deneysel değerler ile Mamdouh ve Deneysel Fiyon bariyer modellerinin daha başarılı sonuçlar verdiği söylenebilir. Son olarak, bu çalışmanın sonuçları ^{131}I radyoizotopunun alternatif üretiminde kullanılacak reaksiyonların gelişmesi ve anlaşılabilmesi için kullanılabilir.

Yayın Etiği

Bu çalışmanın yayınlanması ile ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- Brillouin, L., 1926, La mécanique ondulatoire de Schrödinger: une méthode générale de resolution par approximations successives, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. 183, 24–26.
- Büyükuslu, H., Kaplan, A., Tel, E., Yıldırım, G., Aydın, A., 2010, Production Cross Sections of Medical 110, 111In Radioisotopes, Kerntechnik 75 (3) 103-108.
- Capote, R., vd., 2009. RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. Nuclear Data Sheets 110. 3107–3214.
- Cohen, S, Plasil, S., and Swiatecki, W. J., 1974, Equilibrium configurations of rotating charged or gravitating liquid masses with surface tension, Ann. of Phys. 82(2), 557-596.
- Demir, B., Kaplan, A., Çapalı, V., Sarpün, İ. H., Aydın, A. and Tel, E., 2015, Production Cross-Section Calculations of Medical 32P, 117Sn, 153Sm and 186,188Re Radionuclides Used in Bone Pain Palliation Treatment, Kerntechnik 80 (1), 58-65.
- Gediklioğlu, A., 1988. Çekirdek Fizikine Giriş. Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Yayın No: 130, 220s. Trabzon.
- Gündoğdu E. A, Özgenç E., Ekinci M., Özdemir D., Aşıkoglu M., 2018, Nükleer Tıpta Görüntüleme ve Tedavide Kullanılan Radyofarmasötikler, J. Lit. Pharm Sci., 7 (1) 24-34.
- Jeffreys, H., 1924, On certain approximate solutions of linear differential equations of the second order, Proceedings of the London Mathematical Society, 23, 428–436.
- Koning, A. J., Hilaire, S., Goriely S. 2021. “TALYS–1.96 A Nuclear Reaction Program, User Manual”, Nuclear Research and Consultancy Group (NRG), Netherlands.
- Kramers, H. A., 1926, Wellenmechanik und halbzahlige Quantisierung, Zeitschrift für Physik. 39(10–11), 828–840.
- Krappe, H. J., Nix, J. R. Ve Sierk A.J., 1979. Unified Nuclear Potential For Heavy-Ion Elastic Scattering, Fusion, Fission, and Ground-State Masses And Deformations. Phys. Rev. C20, 992.
- Mamdouh, A., Pearson, J.M., Raget, M. and Tondeur, F. 2001. Fission barriers of neutron-rich and superheavy nuclei calculated with the ETFSI method. Nuclear Physics A, 679: 337–358.
- Maslov, V.M., Sukhovitskij, E.Sh., Porodzinskij, Yu.V., Morogovskij, G.B., 1997. Evaluation of neutron data for 242mAm, Rep. INDC(BLR)-7, Evaluation of Neutron data for 238Pu, Rep. INDC(BLR)-9, Evaluation of neutron data for 242Pu, Rep. INDC(BLR)10, International Atomic Energy Agency, Austria.

Maslov, V.M., Kikuchi, Y., 1996. Statistical model calculations of the ²³²U fission cross section. Nuclear Science Engineering, 124, 492-497.

NRDC-EXFOR (Experimental Nuclear Reaction Data File), Database Version of Mayıs 5, 2019. Brookhaven National Laboratory National Nuclear Data Centre. <http://www.nndc.bnl.gov/nndc/exfor/>. Son Erişim Tarihi: 05.04.2019.

Tel, E., Aydın, A., Kara, A., Kaplan, A., 2012, Investigation of Ground State Features for Some Medical Radionuclides Using an effective Nuclear Force, Kerntechnik 77 (1) 50-55.

Wentzel, G., 1926, Eine Verallgemeinerung der Quantenbedingungen für die Zwecke der Wellenmechanik. Zeitschrift für Physik, 38 (6-7), 518-529.

World Health Organization, Latest Global Cancer Data, The International Agency for Research on Cancer (IARC), France (September 12, 2018).