

⁷⁵⁻⁷⁷Br Radyoizotoplarının Üretim Tesir Kesiti Hesaplamalarında Bazı Seviye Yoğunluğu Modellerinin Etkilerinin İncelenmesi

Mert ŞEKERCİ¹, Hasan ÖZDOĞAN², Abdullah KAPLAN^{1*}

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fizik Bölümü, Isparta, 32260, Türkiye

²Antalya Bilim Üniversitesi, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, Antalya, 07190, Türkiye

Geliş / Received: 06/04/2020, Kabul / Accepted: 31/08/2020

Öz

Radyoizotopların kullanım alanları, gelişen teknoloji ve bilimsel ilerlemeler sayesinde giderek yaygınlaşmış ve çeşitlenmiştir. Radyoizotopların en yaygın kullanıldığı alan ise medikal teşhis ve tedavi uygulamalarıdır. Bu amaçlarla kullanılan pek çok radyoizotop arasında karakteristik özellikleri ve uygulamalardaki faydaları nedeniyle ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotopları da bulunmaktadır. Medikal uygulamalarda radyoizotopların sahip oldukları etki ve değer neticesinde bu izotopların üretim rotaları ile ilgili çalışmalar da literatüre katkı sağlayan çalışmalar olmuştur. Bu kapsamda, deneysel çalışmaların gerçekleştirilemediği durumlarda araştırmacılara bilgi verebilecek çeşitli parametrelerin elde edilmesinde farklı teorik modellerin kullanımını oldukça yaygındır. Kısaca bir reaksiyonun gerçekleşme ihtimali olarak açıklanabilecek tesir kesiti değeri de araştırmacılar için önemli bir parametredir ve bu değerın hesaplanmasında etkili faktörlerden biri de seviye yoğunluğu modelleridir. Tüm bunlar göz önüne alınarak bu çalışmada, ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotoplarının bazı (p,xn) reaksiyonları ile üretim tesir kesiti hesaplamalarında bazı seviye yoğunluğu modellerinin etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Hesaplamalarda TALYS kodunun 1.9 sürümü kullanılmış ve elde edilen hesaplama sonuçları literatürde mevcut olan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Brom; Tesir kesiti; Seviye yoğunluğu modelleri; TALYS

Investigation of the Effects of Some Level Density Models in the Production Cross-Section Calculations of ⁷⁵⁻⁷⁷Br Radioisotopes

Abstract

The use of radioisotopes has become increasingly widespread and diversified thanks to advancing technology and scientific advances. The most widely used field of radioisotopes are medical diagnosis and treatment applications. Among the many radioisotopes used for these purposes, there are also ⁷⁵⁻⁷⁷Br radioisotopes due to their characteristics and benefits in applications. As a result of the impact and value of radioisotopes in medical applications, studies on the production routes of these isotopes have also contributed to the literature. In this context, the use of different theoretical models is quite common in obtaining various parameters that can inform researchers in cases where experimental studies cannot be carried out. The cross-section value, which can be explained briefly as the probability of a reaction, is an important parameter for the researchers and one of the effective factors in the calculation of this value is the level density models. Considering all these, in this study, it is aimed to investigate the effects of some level density models in the production cross-section calculations with some (p,xn) reactions of ⁷⁵⁻⁷⁷Br radioisotopes. In calculations, 1.9 version of TALYS code was used and the results obtained were compared with the experimental data available in the literature.

Keywords: Bromine; Cross-section; Level density models; TALYS

1. Giriş

Çeşitli endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilmek için hem doğal olarak oluşan hem de yapay olarak üretilmiş radyoizotoplar farklı alanlarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında doğal olarak oluşan radyoizotopların kullanım

alanlarına örnek olarak Karbon-14 ile odun ve diğer karbon içeren malzemelerin, Klor-36 ile Klorür ve su kaynaklarının, Kurşun-210 ile yer küre ve toprak katmanlarının yaş tayini gösterilebilir. Yapay olarak üretilmiş radyoizotopların kullanım alanlarına örnek olarak ise Amerikyum- 241'in duman detektörlerinde, dolum yüksekliği

detektörlerinde ve kömürün kül içeriğinin ölçülmesinde, Kobalt-60'ın gama sterilizasyon, endüstriyel radyografi, yoğunluk ve dolgu yüksekliği anahtarlarında, İridyum-192'nin gama radyografiyle metal bileşenlerdeki kusurların tayin edilmesinde, Selenyum-75'in gama radyografisinde ve tahribatsız muayenede kullanılması gösterilebilir (WNA, 2019).

Radyoizotopların endüstriyel alandaki kullanımlarına ek olarak, medikal alandaki kullanımları da bilimsel çalışmaların ortaya koydukları bilgi birikimi ve gelişen teknolojiyle birlikte artmıştır. Karakteristik özellikleri sayesinde sağladıkları faydalar göz önünde bulundurularak tanı ve tedavi amaçlı pek çok medikal uygulamada çeşitli radyoizotoplar kullanılmaktadır. Ayrıca, pek çok uygulamada farklı izotopların birlikte kullanılmalarının söz konusu olduğu da bilinmektedir (Das ve Pillai, 2013; Yeong vd., 2014). Parçacık hızlandırıcıları ve özellikle de siklotronlar, 1935'ten II. Dünya Savaşı'nın sonuna kadar radyoizotopların hazırlanmasında oldukça önemli yer tutmaktaydı. II. Dünya Savaşı'ndan sonra, radyoaktif elementler üretmek için reaktörler kullanılmaya başlanmış olması, hızlandırıcıların bu amaçla kullanımında bir azalma meydana getirmiştir (IAEA, 2008). Ancak günümüzde radyoizotop kullanımında artan talebin reaktörler tarafından karşılanamaması, radyoizotop üretimi için hızlandırıcılara bu amaçla hala ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Tanısal görüntüleme ve/veya terapötik tedaviler gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılan radyoizotopların hızlandırıcılarda üretimi yüklü parçacık bombardımanı ile gerçekleştirilir. Radyoizotop üretimi için parçacık demetinin nükleer reaksiyonu meydana getirecek yeterli enerjiye sahip olması gerekmektedir (IAEA, 2008).

Radyoizotopların medikal alanda kullanımları ile ilgili olarak çeşitli klinik araştırmalarının

literatürde mevcut olmasının yanı sıra, radyoizotopların üretim rotalarının incelendiği ve çeşitli modellerin farklı parametrelerin hesaplanmasındaki etkilerinin araştırıldığı pek çok teorik çalışmada literatürde mevcuttur ve bu alana katkı sağlamaktadır. Bu çalışmalar, hem teorik modellerin geliştirilmesi hem de mevcut ve yeni radyoizotop üretim rotalarının araştırılması açısından önemlidirler (Tel vd., 2009; Aydın vd., 2012; Tel vd., 2012; Demir vd., 2015).

Bu bağlamda, bu çalışmada medikal alanda kullanılan ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotoplarının üretim tesir kesiti hesaplamalarında bazı seviye yoğunluğu modellerinin etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bir nükleer reaksiyonun meydana gelme ihtimali tesir kesiti olarak adlandırılır. Temel nükleer fizik araştırmaları için tesir kesiti verisinin ölçülmesi ve/veya teorik olarak hesaplanması oldukça önemlidir. Bu değer deneysel olarak ölçülmesinin mümkün olmadığı durumlarda, çeşitli modellerin kullanılabileceği hesaplamalar ile elde edilmesi mümkündür. Seviye yoğunluğu modelleri de bu modeller arasındadır ve nükleer yapı hakkında değerli bilgiler edinilmesine katkı sağladıkları için önemlidirler. Bu nedenle, seviye yoğunluğu modellerinin etkilerinin araştırıldığı çeşitli çalışmaların var olduğu bilinmektedir (Yiğit, 2018a; Yiğit, 2018b; Sarpün vd., 2019; Şekerci vd., 2019; Özdoğan, 2019; Şekerci vd., 2020).

Bu çalışma kapsamında ise; ⁷⁶Se(p,2n)⁷⁵Br, ⁷⁷Se(p,3n)⁷⁵Br, ⁷⁸Se(p,4n)⁷⁵Br, ⁷⁶Se(p,n)⁷⁶Br, ⁷⁷Se(p,2n)⁷⁶Br, ⁷⁸Se(p,3n)⁷⁶Br, ⁸⁰Se(p,5n)⁷⁶Br, ⁷⁷Se(p,n)⁷⁷Br, ⁷⁸Se(p,2n)⁷⁷Br ve ⁸⁰Se(p,4n)⁷⁷Br reaksiyonları için, TALYS kodunun 1,9 versiyonu (Koning vd., 2017) ile Sabit Sıcaklık + Fermi Gaz Modeli (SS+FGM) (Gilbert ve Cameron, 1965; Ignatyuk vd., 1979), Geri Kaydırmalı Fermi Gaz Modeli (GKFGM) (Baba, 1970; Dilg vd.,

1973) ve Genelleştirilmiş Süperakışkan Modeli (GSM) (Ignatyuk vd., 1975; Koning vd., 2008) kullanılarak ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotoplarının üretim tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen hesaplama sonuçları, Uluslararası Deneysel Nükleer Veri Kütüphanesi (EXFOR) (Zerkin ve Pritychenko, 2018)'dan alınan mevcut deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Medikal uygulamalarda sıkça kullanılan pek çok radyoizotoptan bazıları da bromuna aittir. Bilinen 30 izotopu bulunan bromun en kararlı izotopları yaklaşık % 51 bolluk oranı ile ⁷⁹Br ve yaklaşık % 49 bolluk oranı ile ⁸¹Br'dir (Berglund ve Wieser, 2011). Medikal alanda en yaygın kullanılan izotopları ise ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotoplarıdır. 96,7 dakika yarı ömre sahip olan ⁷⁵Br'nin bozunma oran ve yolları, % 73,02 pozitron emisyonu (β^+) ve % 26,98 elektron yakalama (EC)'dir. Pozitron emisyonunda en yüksek 2,008 MeV ve ortalama 0,719 MeV enerjili parçacıklar oluşabilir. ⁷⁶Br 16,2 saatlik yarı ömre sahiptir. % 54,7 oranında en fazla 3,941 MeV, ortalama 1,180 MeV enerjili pozitron emisyonu ve % 45,3 oranında elektron yakalama şeklinde bozunur. Bu çalışmada incelenen üç brom radyoizotopu arasında ⁷⁷Br, 57,036 saat ile en uzun yarı ömre sahip olanıdır. ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotopları arasında, pozitron emisyonu ile bozunma oranı % 0,74 ile en düşük, elektron yakalama ile bozunma oranı ise % 99,26 ile en yüksek olan radyoizotoptur. En yüksek ve ortalama pozitron emisyonu değerleri 0,343 MeV ve 0,152 MeV'dir (Rowland vd., 2002). Bu karakteristik özellikleri sayesinde, ^{75,76}Br radyoizotopları genellikle Pozitron Emisyon Tomografisi (PET) amaçlı kullanılırken, ⁷⁷Br ise daha çok Auger terapi amaçlı kullanılmaktadır (Wilbur ve Adam, 2019). Medikal uygulamalardaki faydaları ve etkileri nedeniyle de bu çalışmada bu radyoizotopların üretim tesir kesitlerinin

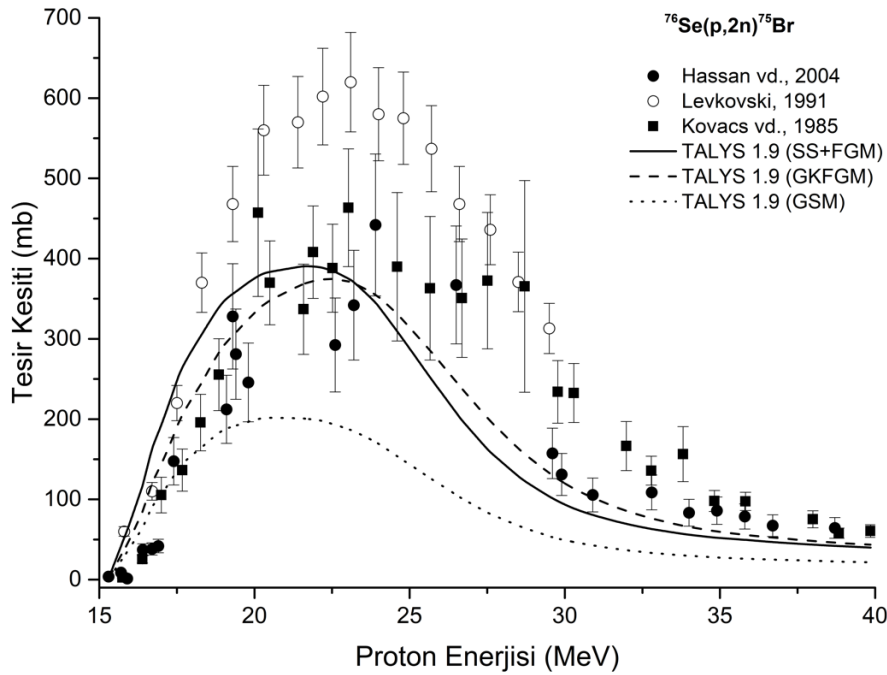
seviye yoğunluğu modelleriyle incelenmesi ve farklı seviye yoğunluğu modellerinin hesaplamalara olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda; SS+FGM, GKFGM ve GSM modelleri TALYS 1,9 kodunda kullanılarak hesaplamalar tamamlanmıştır. İncelenen her üç seviye yoğunluğu modeli de fenomenolojik seviye yoğunluğu modelleri olarak bilinirler. Seviye yoğunluğu, en basit şekilde MeV başına düşen seviye sayısı olarak tanımlanabilir ve optik model potansiyelleri ile birlikte tesir kesiti, enerji spektrumu ve diğer gözlemlenebilir nükleer reaksiyon değerlerinin güvenilir teorik analizleri için oldukça önemli bir bileşendir (Canbula, 2017; Özdoğan, 2018). Diğer fenomenolojik seviye yoğunluğu modellerinin de türetilmesinde kullanılmış olan ve en iyi bilinen fenomenolojik seviye yoğunluğu modeli Fermi Gaz Modeli (FGM)'dir (Fermi, 1926). Bu model, çekirdeğin uyarılmış seviyelerinin eşit aralıklı olduğu ve kolektif seviyelerinin bulunmadığı tek parçacık durumu varsayımına dayanmaktadır. Gilbert ve Cameron (1965) tarafından ortaya konulan SS+FGM, Birleşik Gilbert Cameron Modeli olarak da bilinir. Bu modelde, uyarılma enerjisi ikiye ayrılmıştır. Birinci aralık; sabit sıcaklık yasalarının geçerli olduğu, 0 MeV ile eşleşme enerjisi E_M 'ye kadar olan düşük enerji bölgesidir. E_M 'nin üstünde kalan daha yüksek enerji bölgesinde ise FGM uygulanır. GKFGM'de ise, eşleşme enerjisi ayarlanabilir bir parametre gibidir ve yüksek enerjilerde FGM'nin uyarılma enerjisine ayarlanabilir bir parametre eklenmesi ile geliştirilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan diğer fenomenolojik seviye yoğunluğu modeli ise GSM'dir. Bu model; GKFGM'de olduğu gibi uyarılma enerjisini iki bölgeye ayırır ancak GKFGM'den farklı olarak Bardeen-Cooper-Schrieffer teorisine göre süperakışkan davranışının gözlemlendiği düşük enerjili bölgeden FGM tarafından tanımlanan yüksek enerjili bölgeye faz geçişi ile karakterize edilmiş bir modeldir. Bu çalışmada kullanılan

her üç fenomenojik seviye yoğunluğu modeli de TALYS 1,9 kodunun içerdiği modelleridir. Bu seviye yoğunluğu modelleri hakkında ayrıntılı bilgiye TALYS kullanım kılavuzundan erişilebilir (Koning vd., 2017). Seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler, her reaksiyon için Uluslararası Deneysel Nükleer Veri Kütüphanesi (EXFOR)'dan alınan deneysel veriler ile grafikleştirilerek görsel olarak karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular

Bu çalışmada, ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotoplarının üretim tesir kesitleri hesaplamalarında sadece proton girişli ve nötron çıkışlı reaksiyonlar incelenmiştir. Seçilen reaksiyonlar ⁷⁶Se(p,2n)⁷⁵Br, ⁷⁷Se(p,3n)⁷⁵Br, ⁷⁸Se(p,4n)⁷⁵Br, ⁷⁶Se(p,n)⁷⁶Br, ⁷⁷Se(p,2n)⁷⁶Br, ⁷⁸Se(p,3n)⁷⁶Br, ⁸⁰Se(p,5n)⁷⁶Br, ⁷⁷Se(p,n)⁷⁷Br, ⁷⁸Se(p,2n)⁷⁷Br ve ⁸⁰Se(p,4n)⁷⁷Br için elde edilen sonuçlar ve deneysel veriler Şekil 1-10 arasında verilmiştir.

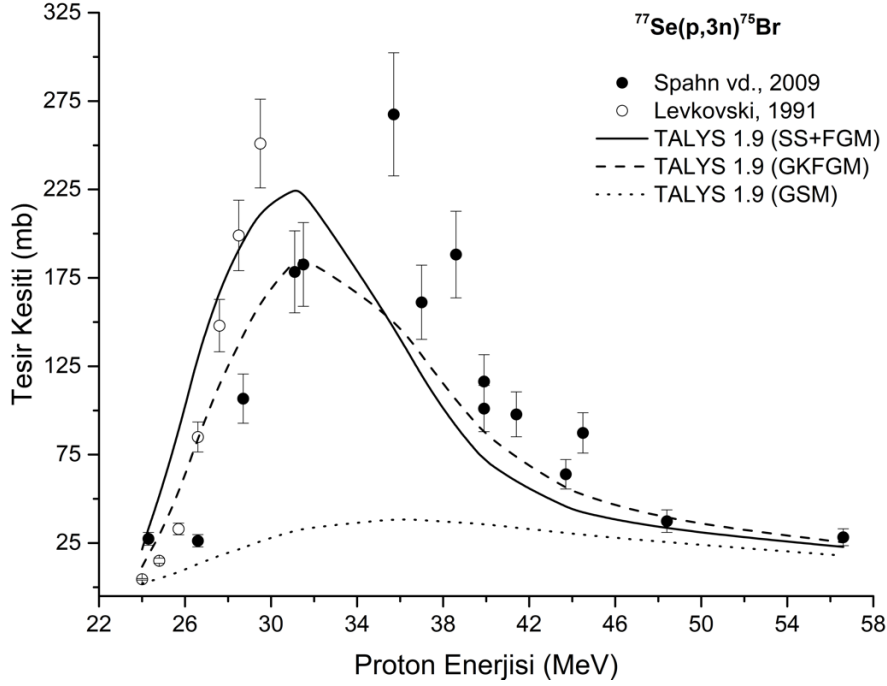
Şekil 1 ile gösterilen ⁷⁶Se(p,2n)⁷⁵Br reaksiyonuna ait seviye yoğunluğu modelleri



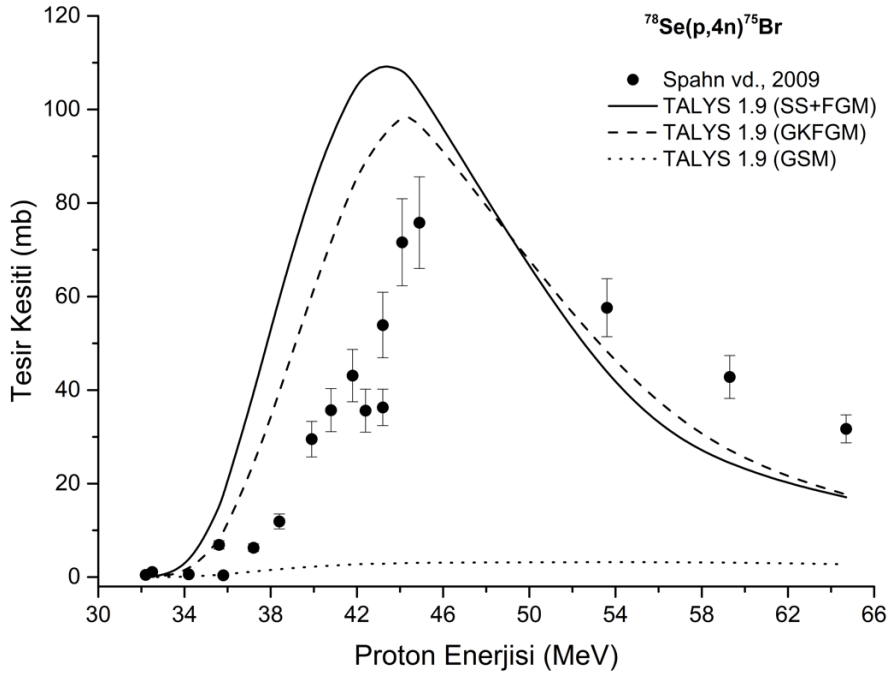
Şekil 1. ⁷⁶Se(p,2n)⁷⁵Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

kullanılarak elde edilmiş üretim tesir kesiti hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması için Hassan vd. (2004), Levkovski (1991) ve Kovacs vd. (1985)'in deneysel verileri kullanılmıştır. ⁷⁷Se(p,3n)⁷⁵Br reaksiyonu için gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler ise Spahn vd. (2009) ile Levkovski (1991)'in deneysel sonuçları ile Şekil 2'de karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ⁷⁵Br radyoizotopunun üretim tesir kesiti hesaplamalarının incelenmesi amacıyla seçilen son reaksiyon olan ⁷⁸Se(p,4n)⁷⁵Br için ise elde edilen teorik değerler Spahn vd. (2009)'in deneysel verileri ile Şekil 3'de karşılaştırılmıştır.

Her üç reaksiyon için de tüm enerji aralıkları düşünüldüğünde GSM modelin deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar üretmedikleri görülmüştür. GSM modelinin deneysel verilerden düşük tesir kesiti verileri ürettiği gözlenmiştir. SS+FGM ve GKFGM modellerinin genel olarak deneysel verilerle uyumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır. ⁷⁵Br üretimi için en uyumlu seviye yoğunluğu modeli GKFGM olarak bulunmuştur.



Şekil 2. ⁷⁷Se(p,3n)⁷⁵Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması



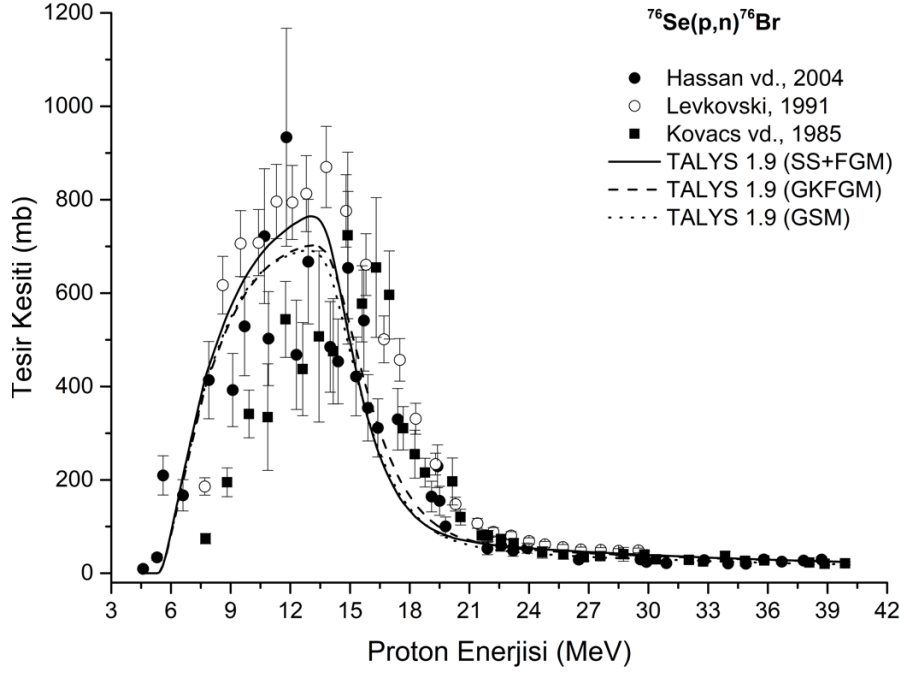
Şekil 3. ⁷⁸Se(p,4n)⁷⁵Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

⁷⁶Br'nin üretimiyle ilgili olarak incelenen proton girişli reaksiyonlar ⁷⁶Se(p,n)⁷⁶Br, ⁷⁷Se(p,2n)⁷⁶Br, ⁷⁸Se(p,3n)⁷⁶Br, ⁸⁰Se(p,5n)⁷⁶Br olarak seçilmiştir. Bu reaksiyonlarda fenomenolojik seviye yoğunluğu kullanılarak elde edilen üretim tesir kesiti sonuçları reaksiyonlar sırasıyla Şekil 4-7 arasında

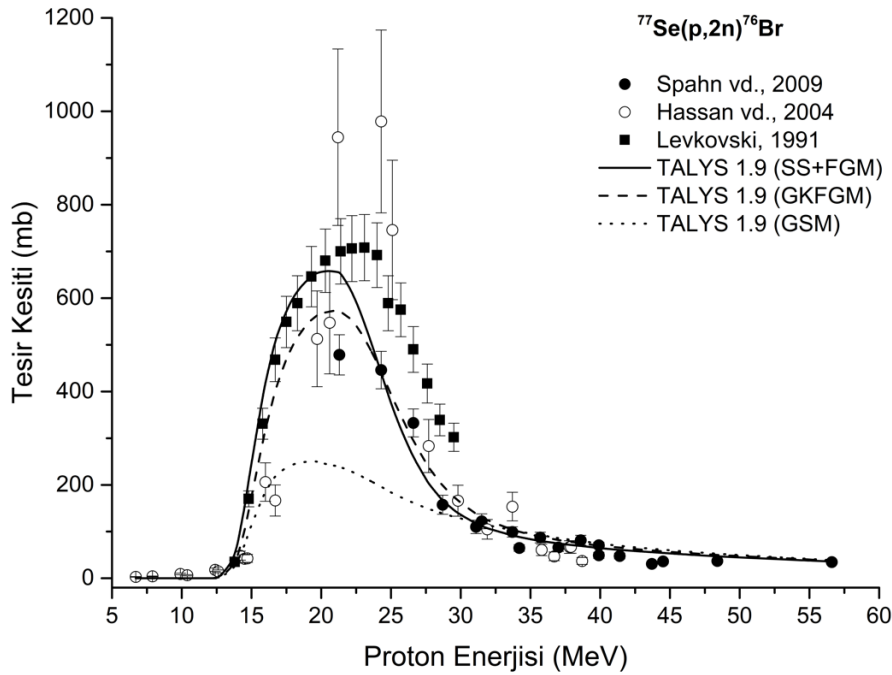
gösterilmiştir. Hassan vd. (2004), Levkovski (1991) ve Kovacs vd. (1985)'in deneysel verileri ⁷⁶Se(p,n)⁷⁶Br reaksiyonu için, Spahn vd. (2009), Hassan vd. (2004) ve Levkovski (1991)'in deneysel sonuçları ⁷⁷Se(p,2n)⁷⁶Br reaksiyonu için, Spahn vd. (2009) ve Levkovski (1991)'nin çalışmalarından elde

edilen deneysel veriler ⁷⁸Se(p,3n)⁷⁶Br reaksiyonu için, Spahn vd. (2009)'nin deneysel veriler ise ⁸⁰Se(p,5n)⁷⁶Br reaksiyonu için kullanılmıştır. GSM modelinin deneysel verilerle uyumsuz olduğu görülmüştür. Diğer seviye yoğunluğu modellerinin, Şekil 7 ile verilen

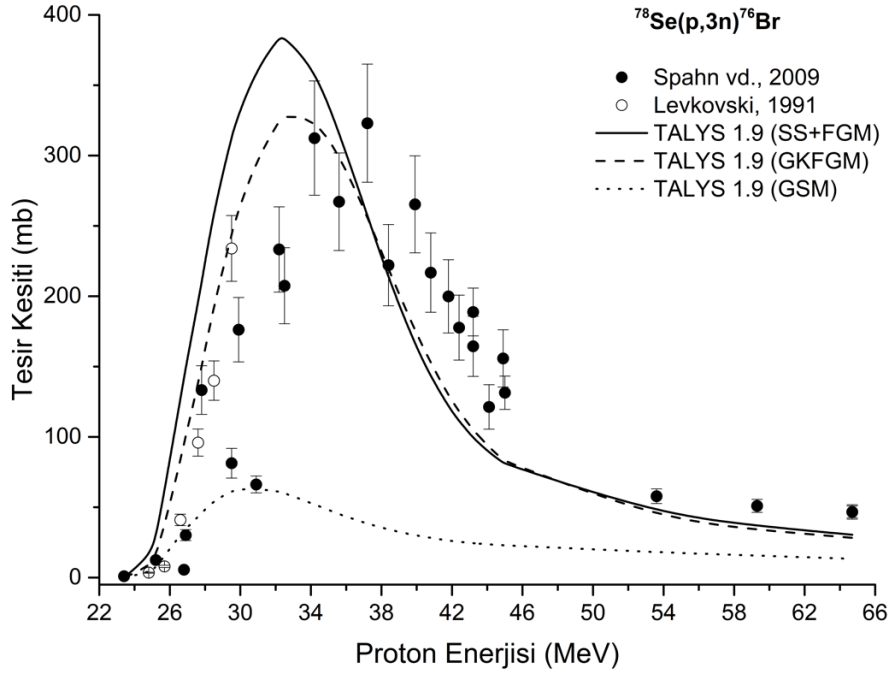
⁸⁰Se(p,5n)⁷⁶Br reaksiyonu dışında deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu reaksiyon için deneysel verilerde 65 MeV sonrası ikincil parçacık çıkışı olduğu düşünülmektedir. ⁷⁶Br üretimi için en uyumlu seviye yoğunluğu modeli GKFGM olarak bulunmuştur.



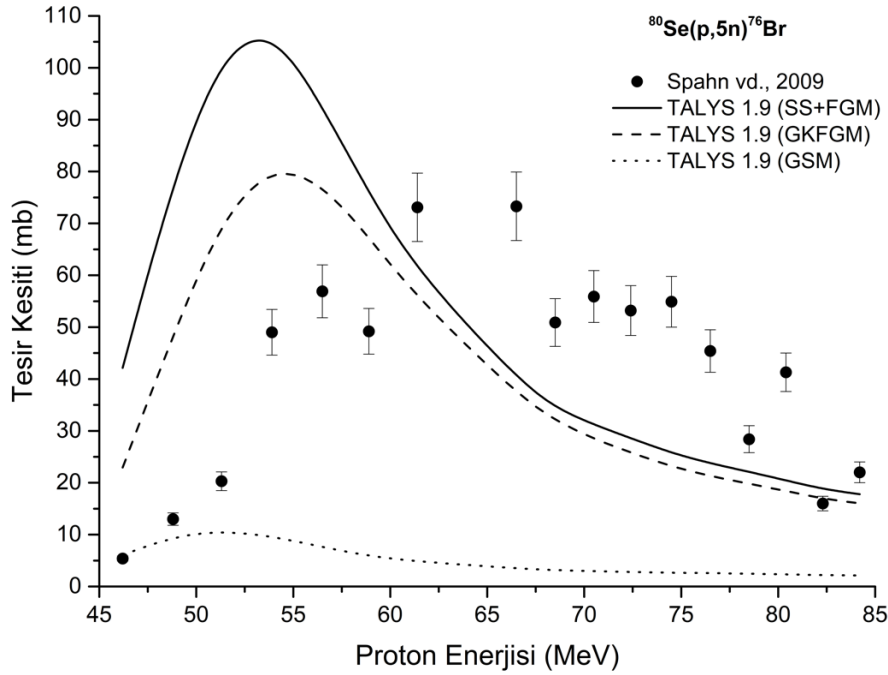
Şekil 4. ⁷⁶Se(p,n)⁷⁶Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması



Şekil 5. ⁷⁷Se(p,2n)⁷⁶Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması



Şekil 6. ⁷⁸Se(p,3n)⁷⁶Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması



Şekil 7. ⁸⁰Se(p,5n)⁷⁶Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında incelenen son radyoizotop olan ⁷⁷Br'nin üretim tesir kesiti ⁷⁷Se(p,n)⁷⁷Br, ⁷⁸Se(p,2n)⁷⁷Br ve ⁸⁰Se(p,4n)⁷⁷Br reaksiyonları ile seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 8'de ⁷⁷Se(p,n)⁷⁷Br reaksiyonu için elde edilen hesaplama sonuçları Spahn

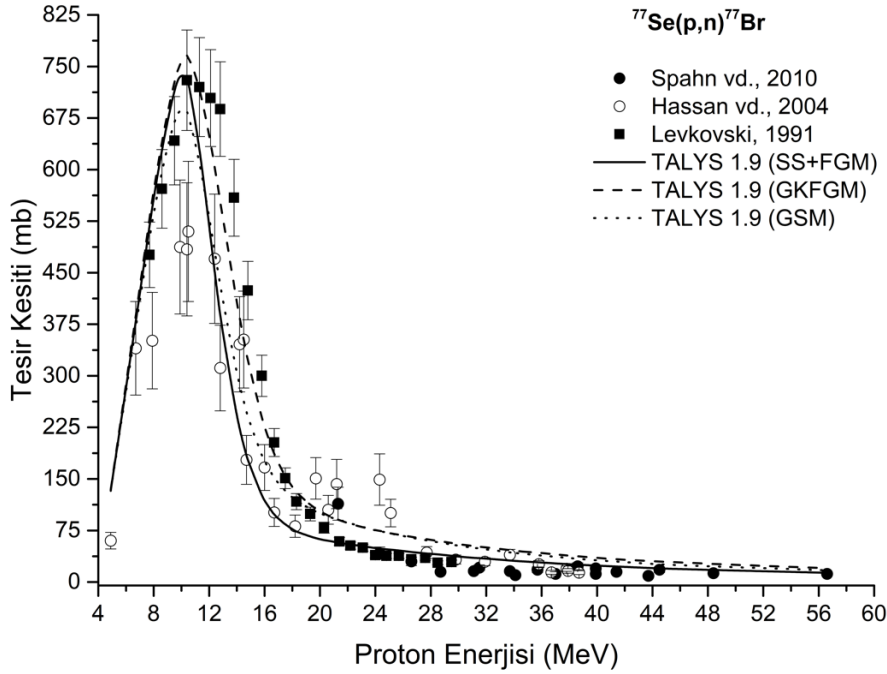
vd. (2010), Hassan vd. (2004) ve Levkovski (1991)'nin deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. ⁷⁸Se(p,2n)⁷⁷Br reaksiyonu için Spahn vd. (2010) ve Levkovski (1991)'nin çalışmalarından elde ettikleri veriler ile hesaplama sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 10'da ise ⁸⁰Se(p,4n)⁷⁷Br

reaksiyonuna ait hesaplama sonuçları Spahn vd. (2010)'nin deneysel değerleri ile karşılaştırılmıştır.

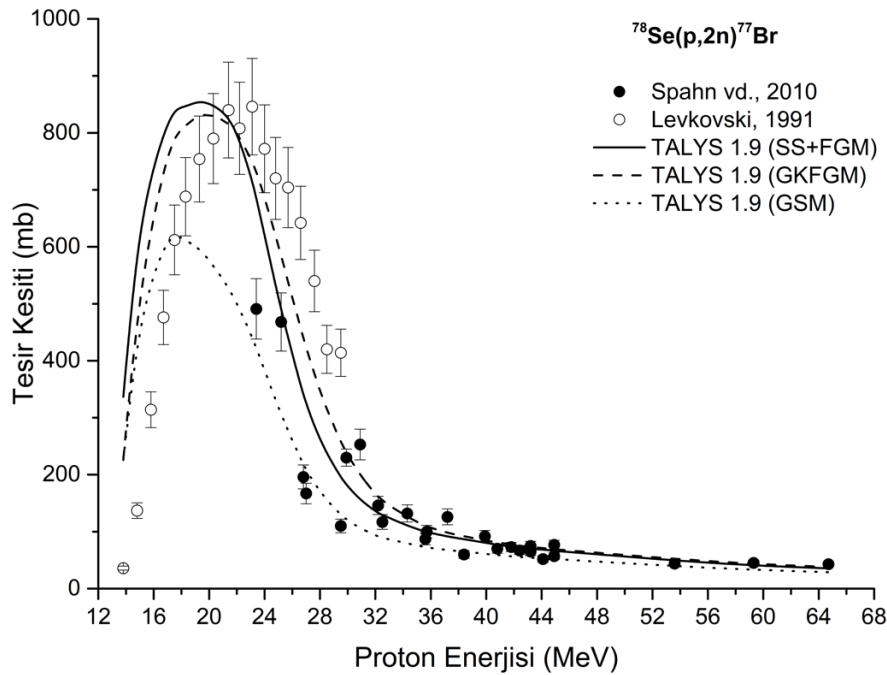
Genel olarak tüm seviye yoğunluğu modelleri deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermiştir.

GSM hesaplamaları ⁸⁰Se(p,4n)⁷⁷Br

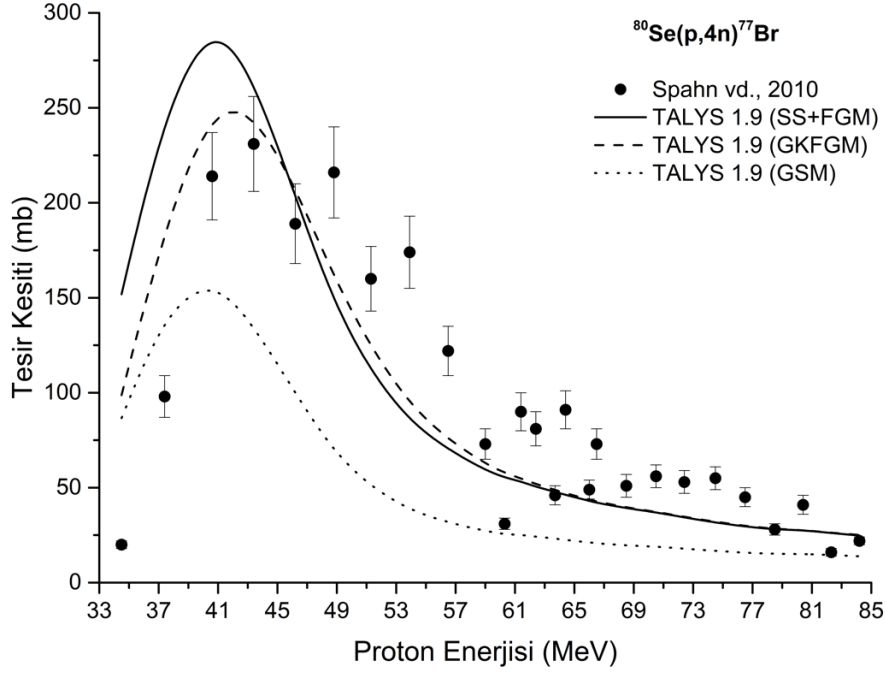
reaksiyonu için deneysel verilerden düşük tesir kesitleri vermesine rağmen deneysel verilerle benzer geometri sergilemiştir. ⁷⁷Br üretim için deneysel verilerle en uyumlu model GKFGM olarak bulunmuştur.



Şekil 8. ⁷⁷Se(p,n)⁷⁷Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması



Şekil 9. ⁷⁸Se(p,2n)⁷⁷Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması



Şekil 10. ⁸⁰Se(p,4n)⁷⁷Br reaksiyonu için seviye yoğunluğu model sonuçları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, ⁷⁵⁻⁷⁷Br radyoizotoplarının üretim tesir kesitleri (p,xn) reaksiyonları için incelenmiştir. ⁷⁶Se(p,2n)⁷⁵Br, ⁷⁷Se(p,3n)⁷⁵Br, ⁷⁸Se(p,4n)⁷⁵Br, ⁷⁶Se(p,n)⁷⁶Br, ⁷⁷Se(p,2n)⁷⁶Br, ⁷⁸Se(p,3n)⁷⁶Br, ⁸⁰Se(p,5n)⁷⁶Br, ⁷⁷Se(p,n)⁷⁷Br, ⁷⁸Se(p,2n)⁷⁷Br ve ⁸⁰Se(p,4n)⁷⁷Br reaksiyonları için fenomenolojik seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak elde edilen tesir kesiti sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- GSM hesaplamaları deneysel verilerle uyumsuz sonuçlar vermiştir. Bu modelin parametrelerinin çalışmada incelenen reaksiyonlar için güncellenmesi gerekmektedir.
- SS+FGM ve GKFGM hesaplamaları deneysel verilerle uyumlu sonuçlar vermiştir.
- GKFGM deneysel verilerle en uyumlu seviye yoğunluğu modeli olarak bulunmuştur.
- Genel olarak reaksiyon çıkış kanalında nötron sayısı arttıkça seviye yoğunluğu modellerinin deneysel verilerle uyumunun

azaldığı gözlenmiştir. Hesaplamalar denge öncesi mekanizması temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Gelen parçacık enerjisi arttıkça direkt reaksiyon mekanizmasının baskın hale gelmesinin bunun sebebi olabileceği düşünülmektedir.

- Hesaplamalar sonucunda; ⁷⁵Br üretimi için ⁷⁶Se(p,2n)⁷⁵Br reaksiyonu, ⁷⁶Br üretimi için ⁷⁶Se(p,n)⁷⁶Br reaksiyonu ve ⁷⁷Br üretimi için ⁷⁷Se(p,n)⁷⁷Br reaksiyonu en uygun reaksiyonlar olarak belirlenmiştir. Bu reaksiyonlar için proton demet enerjileri ise sırasıyla 22 MeV, 13 MeV ve 10 MeV olarak bulunmuştur.
- Yaklaşık 25 MeV enerjisine sahip bir proton hızlandırıcısı ile ⁷⁵⁻⁷⁷Br izotopları üretmek mümkündür.

5. References

Aydin, A., Tel, E., Pekdoğan, H., Kaplan, A., 2012. "Nuclear Model Calculations on the Production of ^{125,123}Xe and ^{133,131,129,128}Ba Radioisotopes". *Physics of Atomic Nuclei*, 75(3), 310-314.

- Baba, H., 1970. "A Shell-Model Nuclear Level Density", *Nuclear Physics A*, 159(2), 625- 641.
- Berglund, M., Wiesser, M. E., 2011. "Isotopic compositions of the elements 2009 (IUPAC Technical Report)". *Pure and Applied Chemistry*, 83(2), 397-410.
- Canbula, B., 2017. "Bazı tellür izotoplarının nötron yakalama tesir kesiti analizi," *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13 (2), 445-455.
- Das, T., Pillai, M. R. A., 2013. "Options to Meet the Future Global Demand of Radionuclides for Radionuclide Therapy". *Nuclear Medicine and Biology*, 40, 23-32.
- Demir, B., Kaplan, A., Çapalı, V., Sarpün, İ. H., Aydın, A., Tel, E., 2015. "Production Cross-Section Calculations of Medical ³²P, ¹¹⁷Sn, ¹⁵³Sm and ^{186,188}Re Radionuclides Used in Bone Pain Palliation Treatment". *Kerntechnik*, 80 (1), 58-65.
- Dilg, W., Schantl, W., Vonach, H., Uhl, M., 1973. "Level Density Parameters for the BackShifted Fermi Gas Model in the Mass Range 40<A<250". *Nuclear Physics A*, 217, 269-298.
- Fermi, E., 1926. "Zur Quantelung des Idealen Einatomigen Gases". *Zeitschrift für Physik*, 36(11-12), 902-912.
- Gilbert, A., Cameron, A. G. W., 1965. "A Composite Nuclear-Level Density Formula with Shell Corrections". *Canadian Journal of Physics*, 43, 1446-1496.
- Hassan, H. E., Qaim, S. M., Shubin, Yu., Azzam, A., Morsy, M., Coenena, H. H., 2004. "Experimental studies and nuclear model calculations on proton-induced reactions on ^{nat}Se, ⁷⁶Se and ⁷⁷Se with particular reference to the production of the medically interesting radionuclides ⁷⁶Br and ⁷⁷Br", *Applied Radiation and Isotopes*, 60 (6), 899-909.
- IAEA (International Energy Agency). "Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice", Technical Reports Series No. 465, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs465_web.pdf, Erişim Tarihi: 21.03.2020.
- Ignatyuk, A. V., Istekov, K. K., Smirenkin, G. N., 1979. "The Role of Collective Effects in the Systematics of Nuclear Level Densities". *Yadernaja Fizika*, 29(4), 875-883.
- Ignatyuk, A. V., Smirenkin, G. N., Tishin, A. S., 1975. "Phenomenological Description of the Energy Dependence of the Level Density Parameter", *Yadernaja Fizika*, 21(3), 485-490.
- Koning, A. J., Hilaire, S., Goriely, S., 2008. "Global and Local Level Density Models", *Nuclear Physics A*, 810(1-4), 13-76.
- Koning, A., Hilaire, S., Goriely, S., 2017. TALYS-1.9 A Nuclear Reaction Program, User Manual, 1st ed. 21 December 2017.
- Kovács, Z., Blessing, G., Qaim, S. M., Stöcklin, G., 1985. "Production of ⁷⁵Br via the ⁷⁶Se(p,2n)⁷⁵Br reaction at a compact cyclotron". *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 36 (8), 635-642.
- Levkovski, V. N., 1991. "Act.Cs. by Protons and Alphas, Cross-Sections of Medium Mass Nuclide Activation (A=40-100) by Medium Energy Protons and Alpha-Particles (E=10-50 MeV)", Inter-Vesi, Moscow.
- Özdoğan, H., 2018. "¹⁸¹Ta(α,xn) Reaksiyonu Tesir Kesitlerinin İncelenmesi". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 13 (2), 54-66 .
- Özdoğan, H., 2019. "Theoretical Calculations of Production Cross-Sections for the ²⁰¹Pb, ¹¹¹In, ¹⁸F and ¹¹C Radioisotopes at Proton Induced Reactions". *Applied Radiation and Isotopes*, 143, 1-5.
- Rowland, D. J., McCarthy, T. J., Welch, M. J., 2002. "Radiobromine for Imaging and Therapy", Handbook of Radiopharmaceuticals: Radiochemistry and Applications, John Wiley & Sons, Ltd, 441-465.
- Sarpün, İ. H., Özdoğan, H., Taşdöven, K., Yalim, H.A., Kaplan, A., 2019. "Theoretical photoneutron cross-section calculations on Osmium isotopes by Talys and Empire codes", *Modern Physics Letters A*, 34, 195210-195210.
- Şekerci, M., Özdoğan, H., Kaplan A., 2019. "Investigation on the Different Production Routes of ⁶⁷Ga Radioisotope by Using

- Different Level Density Models”. *Moscow University Physics Bulletin*, 74, 277-281.
- Şekerci, M., Özdoğan, H., Kaplan, A., 2020. “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,g) reactions”. *Radiochimica Acta*, 108, 11-17.
- Spahn, I., Steyn, G. F., Vermeulen, C., Kovács, Z., Szelecsényi, F., Coenen, H. H., Qaim, S. M., 2009. “New cross section measurements for production of the positron emitters ⁷⁵Br and ⁷⁶Br via intermediate energy proton induced reactions”, *Radiochimica Acta*, 97 (10), 535–541.
- Spahn, I., Steyn, G. F., Vermeulen, C., Kovács, Z., Szelecsényi, F., Shehata, M. M., Spellerberg, S., Scholten, B., Coenen, H. H., Qaim, S. M., 2010. “New cross section measurements for the production of the Auger electron emitters ⁷⁷Br and ^{80m}Br”. *Radiochimica Acta*, 98 (12), 749–755.
- 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.
- Tel, E., Aydın, E. G., Kaplan, A., Aydın, A., 2009. “New Calculations of Cyclotron Production Cross Sections of Some Positron Emitting Radioisotopes in Proton Induced Reactions”. *Indian Journal of Physics*, 83(2), 193-212.
- Wilbur, D. S., Adam, M. J., Adam, 2019. “Radiobromine and radioiodine for medical applications”. *Radiochimica Acta*, 107 (9-11), 1033–1063.
- WNA (World Nuclear Association). “Radioisotopes in Industry”, <https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-industry.aspx>, Erişim Tarihi: 21.03.2020.
- Yeong, C. H., Cheng, M., Ng, K. H., 2014. “Therapeutic Radionuclides in Nuclear Medicine:Current and Future Prospects”. *Journal of Zhejiang University Science B*, 15, 845- 863.
- Yiğit, M., 2018a. “Analysis of Cross Sections of (n,t) Nuclear Reaction using Different Empirical Formulae and Level Density Models”. *Applied Radiation and Isotopes*, 139, 151-158.
- Yiğit, M., 2018b. “A Review of (n,p) and (n,a) Nuclear Cross Sections on Palladium Nuclei Using Different Level Density Models and Empirical Formulas”, *Applied Radiation and Isotopes*, 140, 355-362.
- Zerkin, V. V., Pritychenko, B., 2018. “The Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR): Extended Computer Database and Web Retrieval System”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 888, 31-43