

## Bazı Medikal Radyoizotopların ( $\alpha, xn$ ) Reaksiyonlarıyla Üretim Tesir Kesiti Hesaplamalarında Seviye Yoğunluğu Modellerinin Etkilerinin İncelenmesi

Mert ŞEKERCİ<sup>1\*</sup>

**ÖZET:** Medikal alanda teşhis ve tedavi amaçlarıyla kullanılan radyoizotopların pek çok yararlı etkileri bulunmaktadır. Özellikle, kanser türlerinin erken teşhisinde ve ilerleyen evrelerdeki tedavi aşamalarında radyoizotopların kullanıldığı metotlar son derece yaygın ve etkindir. Bu nedenle; bu radyoizotopların üretim rotaları hakkında detaylı bilgi sahibi olunması yönündeki çalışmalar, daha efektif planlamaların yapılabilmesini destekleyici niteliktedir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilemediği durumlarda kullanılabilir olan teorik nükleer reaksiyon modelleri ile yapılan hesaplamalar ise, bu alandaki eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır. Bu motivasyon ile bu çalışmada; farklı seviye yoğunluğu modellerinin medikal alanda kullanılabilen <sup>51</sup>Cr, <sup>97</sup>Ru ve <sup>123</sup>I radyoizotoplarının bazı ( $\alpha, xn$ ) reaksiyonları ile üretim tesir kesiti hesaplamaları üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen hesaplama sonuçları, literatürde mevcut olan deneysel veriler ile görsel ve istatistiki olarak karşılaştırılmış ve incelenen reaksiyon rotalarına göre en uyumlu seviye yoğunluğu modellerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Medikal radyoizotop, üretim tesir kesiti, seviye yoğunluğu modelleri

## Investigation of the Effects of Level Density Models on Production Cross-Section Calculations of Some Medical Radioisotopes via ( $\alpha, xn$ ) Reactions

**ABSTRACT:** Radioisotopes used in medical field for diagnostic and therapeutic purposes have many beneficial effects. Especially in early diagnosis of cancer types and in the stages of treatment, the methods that employ the use of radioisotopes are quite common and effective. Therefore; the studies to obtain detailed information about the production routes of these radioisotopes have been supportive of the further effective planning. The calculations made with theoretical nuclear reaction models that are available in cases where experimental studies can't be performed; aim to eliminate the lack of this area. With this motivation, it is aimed to investigate the effects of different level density models on the production cross-section calculations of <sup>51</sup>Cr, <sup>97</sup>Ru and <sup>123</sup>I radioisotopes available in medical field via some ( $\alpha, xn$ ) reactions. Obtained results from the calculations are compared visually and statistically with the experimental data available in the literature and it is aimed to determine the most compatible level density models with respect to the examined reaction routes.

**Keywords:** Medical radioisotope, production cross-section, level density models

<sup>1</sup> Mert ŞEKERCİ (Orcid ID: 0000-0003-0870-0506), Yazar Adresi: Süleyman Demirel Üniversitesi, Fizik Bölümü, Isparta, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mert ŞEKERCİ, e-mail: mertsekerce@sdu.edu.tr

## GİRİŞ

İhtiyaçlar doğrultusunda, farklı özelliklerinden yararlanılarak tanı ve tedavi amaçlı aşamaların planlanması amacıyla medikal radyoizotopların kullanılması oldukça yaygındır (Das ve Pillai, 2013; Yeong ve ark., 2014). Bu alandaki pek çok çalışma deneysel ve kliniksel araştırmalara dayanmasına rağmen; radyoizotopların üretimlerine yönelik gerçekleştirilen teorik araştırmalar da literatüre katkı sağlamaktadır ve bu alandaki ihtiyacın giderilmesi amacıyla benzer çalışmaların gerçekleştirilmesi de oldukça önemlidir (Aydın ve ark., 2008; Tel ve ark., 2009; Büyüksulu ve ark., 2010; Tel ve ark., 2011; Aydın ve ark., 2012; Kaplan ve ark., 2013a; Kaplan ve ark., 2013b; Kaplan ve ark., 2014; Sahan ve ark., 2015; Özdoğan ve ark., 2019a). Bu motivasyon ile, tanı ve tedavi amaçlarına yönelik gama yayıcı olarak kullanılabilen bazı radyoizotoplarının üretim tesir kesitlerinin teorik olarak hesaplanmasında seviye yoğunluğu modellerinin etkilerinin araştırılması bu çalışmanın ana amacı olarak belirlenmiştir.

Bir reaksiyona ait tesir kesiti değeri, en anlaşılır ifade ile o reaksiyonun gerçekleşme ihtimalini ortaya koyan değer olarak açıklanabilir. Bu değer; deneysel çalışmalar yardımıyla ölçülebilmektedir ve bu sayede kontrollü şekilde sürdürülerek tamamlanan bir reaksiyona ait tesir kesiti değerleri elde edilebilmektedir. Ancak; incelenmek istenen her reaksiyon için, deneysel tüm koşulların maddi olanaklar, teknik altyapı ve gelişmiş ekipmanlar gibi farklı bileşenlerin tamamlanması anlamında mümkün olmadığı durumlarda, tesir kesiti değerinin elde edilmesi için teorik nükleer reaksiyon modelleri kullanılabilir. Bu sayede, deneysel çalışmaların gerçekleştirilemediği durumlar için araştırmacıların bir öngörüye sahip olmaları da sağlanabilmektedir (Aydın ve ark., 2008; Aydın ve ark., 2008; Sarpün ve ark., 2010; Yalım ve ark., 2010; Kaplan, 2013; Aydın ve ark., 2013; Kaplan ve ark., 2013c; Aydın ve ark., 2014). Teorik

modellerin deneysel veriler ile daha uyumlu sonuçlar üretebilmeleri amacıyla, deneysel çalışmalardan yapılan çıkarımlar ve teorik model iyileştirmelerinin yanı sıra farklı parametrelerin etkilerinin araştırılmasına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar literatürde mevcuttur (Sarpün ve ark., 2014; Aydın ve ark., 2015). Bu parametreler arasında; nükleer yapı hakkında önemli bilgiler edinilmesini sağlayan ve belirli bir enerji düzeyindeki uyarılmış seviyeleri ifade eden seviye yoğunluğu parametresi oldukça önemli bir yer tutmaktadır (Bucurescu ve Egidu, 2015). Teorik modeller; deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinin olası olmadığı durumlarda literatürde kabul görebilecek sonuçlar üretebilecek kadar başarılı olsalar da içerdikleri karmaşık ve uzun matematiksel işlemler düşünüldüğünde el yordamıyla çözümlenemeyecek düzeydedirler. Bu karmaşık ve uzun matematiksel işlemlere ek olarak, her farklı hedef ve mermi parçacık durumuna göre farklı parametre ve ön tanımlı değerlerin hesaplamalarda kullanılması gerekliliğinin bir sonucu olarak, bilgisayar destekli hesaplama kodları geliştirilmiştir. Bu kodlar arasında en yaygın kullanılan ise, literatürde kabul gören sonuçlar üretebilmesinin yanı sıra farklı reaksiyonlara yönelik çeşitli senaryolara bağlı hesaplamaları gerçekleştirebilme yeteneğine sahip olan TALYS kodu (Koning ve ark., 2017) olarak gösterilebilir. Bu radyoizotoplardan elde edilen farklı enerjilerdeki gama ışınları, farklı kanser türlerine yönelik teşhis ve tedavi amaçlı uygulamalarda kullanılabilir (Tárkányi ve ark., 2018; Nichols ve ark., 2011; IAEA, 2001).

Hesaplamalarda kullanılan seviye yoğunluğu modelleri; Sabit Sıcaklık Fermi Gaz Modeli (SSFGM) (Gilbert ve Cameron, 1965; Ignatyuk ve ark., 1979), Geri Kaydırmalı Fermi Gaz Modeli (GKFGM) (Baba, 1970; Digl ve ark., 1973), Genelleştirilmiş Süperakışkan Modeli (GSM) (Ignatyuk ve ark., 1975; Koning ve ark., 2008) ile sıcaklığa bağlı Hartree-Fock-Bogolyubov (HFB) hesaplamalarına dayanarak

Gogny kuvvetini kullanan ve Hilaire'nin tablolarını baz alan mikroskobik seviye yoğunluğu modeli (HFB-Gogny-Hilaire) (Hilaire ve ark., 2012)'dir. Her bir radyoizotopun üretim tesir kesitine yönelik hesaplamalar, literatürde mevcut deneysel verilerin enerji aralığına uygun olarak bahsedilen tüm modeller kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Uluslararası Deneysel Nükleer Veri Kütüphanesi (EXFOR) (Zerkin ve Pritychenko, 2018)'nden alınan değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların görsel olarak analiz edilebilmesi amacıyla deneysel veriler ile hesaplama sonuçları grafikleştirilmiş ve istatistiki olarak yorumlanabilmesi için ise, görelî varyans analizi yapılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

$^{51}\text{Cr}$ ,  $^{97}\text{Ru}$  ve  $^{123}\text{I}$  radyoizotoplarının bazı ( $\alpha, xn$ ) reaksiyonları ile üretim tesir kesiti değerlerinin hesaplanmasında seviye yoğunluğu modellerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen hesaplamalarda; TALYS 1.9 kodu kullanılmıştır. TALYS; nükleer reaksiyon modelleri ve mekanizmalarına ait pek çok özelliğin, kullanıcılar tarafından ayarlanabildiği ve araştırmacılara farklı reaksiyonlara ait çeşitli sonuçları sunabilen bütünleşik, işlevsel ve açık kaynaklı bir kod sistemidir. Direkt reaksiyon modelleri, fisyon reaksiyon modelleri, denge ve denge-öncesi reaksiyon modelleri ile optiksel modeller ve seviye yoğunluğu modelleri gibi farklı modeller ile parametrelerin kullanılabilirdiği TALYS kodunda; 1 keV-1GeV enerji aralığındaki yüklü parçacıklar (proton, döteron, alfa, triton), nötron veya fotonların, kütle numarası 12 ve daha büyük olan hedef çekirdekler ile olan etkileşimleri incelenebilmektedir.

Çalışma kapsamında TALYS 1.9 kodu;  $^{48}\text{Ti}(\alpha, n)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{49}\text{Ti}(\alpha, 2n)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{94}\text{Mo}(\alpha, n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Mo}(\alpha, 2n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{96}\text{Mo}(\alpha, 3n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{97}\text{Mo}(\alpha, 4n)^{97}\text{Ru}$  ve  $^{121}\text{Sb}(\alpha, 2n)^{123}\text{I}$  reaksiyonlarında, radyoizotopların üretim tesir kesitlerinin teorik hesaplamalarında seviye

yoğunluğu modellerinin etkisinin araştırılması amacıyla kullanılmış ve hesaplamalar SSFGM, GKFGM, GSM ve Gogny kuvveti ile sıcaklık bağımlı Hartree-Fock-Bogolyubov hesaplamaları yapabilen mikroskobik seviye yoğunluğu modeli (HFB-Gogny-Hilaire) ile gerçekleştirilmiştir. Bu modeller, bilim insanlarının farklı nükleer reaksiyonların doğalarını ve süreçlerini daha iyi anlayabilmek amacıyla geliştirdikleri çeşitli parametreleri içeren pek çok teorik modelden bazılarıdır. Farklı nükleer reaksiyonlar için; spesifik olarak bir reaksiyona ait süreçleri daha iyi açıklayabilecek farklı modeller öne sürülebilir. Ancak; bilinen teorik modeller arasında seviye yoğunluğu modellerinin genel olarak nükleer yapının daha iyi anlaşılmasında en büyük katkıyı sağladıkları ve pek çok çalışmada etkin rol oynadıkları da bilinmektedir (Yiğit, 2017; Yiğit, 2018a; Yiğit, 2018b; Artun, 2018; Özdoğan ve ark., 2018; Özdoğan, 2019; Özdoğan ve ark., 2019b). Bu modellerin geliştirilmesine yönelik sürdürülen çalışmaların bir neticesi olarak spesifik mikroskobik seviye yoğunluğu modellerinin geliştirilmesi son derece önemli bir başarı olsa da fenomenolojik modeller bu süreçte temel taşları oluşturduklarından hala değerli ve önemlidirler. Temel olarak kabul edilen ve diğer fenomenolojik modellerin de türetilmesinde kullanılmış olan seviye yoğunluğu modeli Fermi Gaz Modeli (FGM) (Fermi, 1926)'dir. Bu modeli oluşturan varsayıma göre; protonlar ve nötronlar en düşük enerji seviyelerini işgal etmektedirler ve eğer uyarılırlarsa daha yüksek seviyeleri doldururlar. Bu basit görünen ama temel oluşturan varsayım, düşük enerjiler için FGM'nin başarılı sonuçlar üretmesini sağlamış olsa da çok daha yüksek enerjilerde başarısız sonuçlar üretmesine neden olmuştur. Modelde iyileştirme yapılarak bu durumun ortadan kaldırılması amaçlanmış ve bunun için bir sabit sıcaklık yaklaşımı uygulanarak enerji bölgesinin düşük ve yüksek olarak ikiye ayrıldığı SSFGM olarak adlandırılan model geliştirilmiştir. Bu modelin varsayımda ise; sabit sıcaklık durumuna ait

yaklaşım 0 MeV'den başlanarak eşleşme enerjilerine kadar olan aralıkta geçerli kabul edilirken, eşleşme enerjilerinden büyük enerji değerlerinde ise FGM'nin uygulanmasını sağlamıştır. Yüksek enerjilerde FGM'nin uyarılma enerjisi tanımına ayarlanabilir bir kayma parametresi eklenmesi ile de GKFGM geliştirilmiştir. Bir diğer fenomenolojik seviye yoğunluğu modeli ise, Bardeen-Cooper-Schrieffer teorisine göre süperiletken korelasyonları olan düşük enerjili süperakışkan davranışı bölgesinden Fermi Gaz Modeli tarafından tanımlanan yüksek enerjili bölgeye bir faz geçişi ile karakterize edilen GSM'dir. Bu çalışma kapsamında bahsedilen fenomenolojik seviye yoğunluğu modellerine ek olarak;

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \sigma_i^{\text{hesaplama}} - \sigma_i^{\text{deneysel}} \right| / \sigma_i^{\text{deneysel}} \quad (1)$$

Eşitlik 1.'de gösterilen  $\sigma_i^{\text{hesaplama}}$  seviye yoğunluğu modelleri ile hesaplanan tesir kesiti değerlerini ifade ederken,  $\sigma_i^{\text{deneysel}}$  ise literatürden alınmış deneysel verileri ifade etmektedir. Her bir reaksiyon için hesaplamalarda kullanılan modellerin sonuçları ve deneysel veriler baz alınarak, her reaksiyon kendi özelinde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler neticesinde elde edilen görelî varyans analiz sonuçları ( $D$  değerleri) hesaplanarak birbirleri ile kıyaslanmıştır. En küçük  $D$  değerinin elde edilmesini sağlayan model, deneysel veriler ile diğerlerine göre en uyumlu sonuçların üretilmesini sağlayan model olarak seçilmiştir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, medikal alanda teşhis ve tedavi amaçlarıyla kullanılabilecek gama yayıcı bazı radyoizotopların üretim tesir kesiti hesaplamalarında seviye yoğunluğu modellerinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla;  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{97}\text{Ru}$  ve  $^{123}\text{I}$  radyoizotoplarının üretim rotalarından olan  $^{48}\text{Ti}(\alpha, n)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{49}\text{Ti}(\alpha, 2n)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{94}\text{Mo}(\alpha, n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Mo}(\alpha, 2n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{96}\text{Mo}(\alpha, 3n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{97}\text{Mo}(\alpha, 4n)^{97}\text{Ru}$  ve  $^{121}\text{Sb}(\alpha, 2n)^{123}\text{I}$

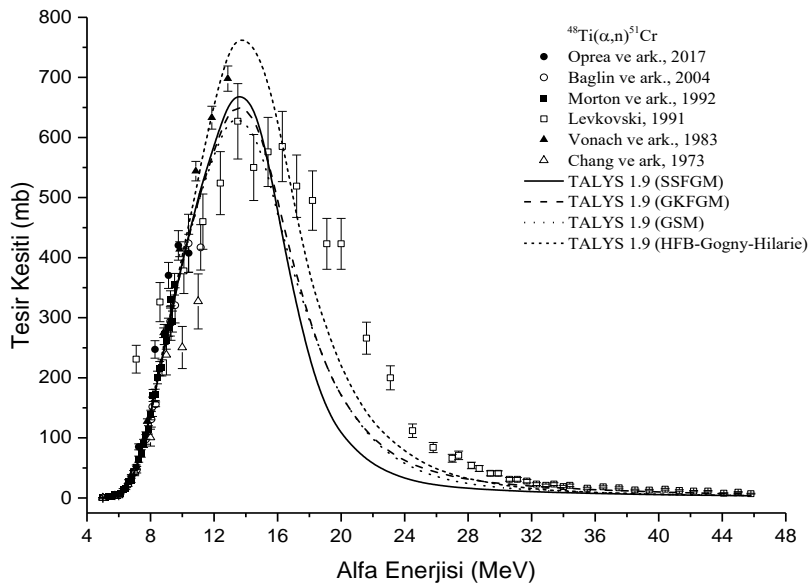
mikroskobik seviye yoğunluğu modellerinden, HFB-Gogny-Hilaire modeli de kullanılmıştır. Mikroskobik seviye yoğunluğu modelleri, nükleer reaksiyonlarla ilgili girdi parametrelerinin birlikte sağlanması amacıyla sürdürülen çalışmaların bir neticesi olarak geliştirilmiş tabloların kullanımı ile geliştirilmiştirler (Capote ve ark., 2009). Bahsedilen seviye yoğunluğu modelleri ile elde edilen üretim tesir kesiti değerleri, literatürde mevcut olan deneysel değerler ile hem grafiksel hem de istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler ile en uyumlu modelin tespiti için gerçekleştirilen görelî varyans analizi, Eşitlik 1. (Kurenkov ve ark., 1999) ile gösterildiği şekilde yapılmıştır.

reaksiyonlarında üretim tesir kesiti hesaplamaları SSFGM, GKFGM, GSM ve HFB-Gogny-Hilaire seviye yoğunluğu modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların görsel olarak analiz edilebilmesi için çıktılar Şekil 1–7'de gösterilmiş ve istatistiksel olarak analiz edilebilmesi için gerçekleştirilen görelî varyans analizine ait sonuçlar ise Çizelge 1'de verilmiştir.

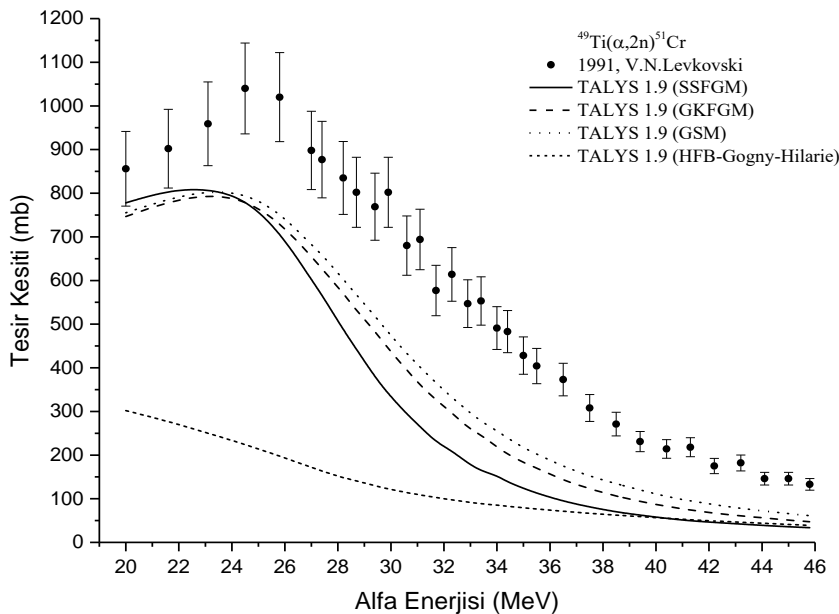
İncelenen reaksiyonlardan olan  $^{48}\text{Ti}(\alpha, n)^{51}\text{Cr}$  reaksiyonuna ait hesaplama sonuçlarının görsel olarak karşılaştırılması amacıyla verilen Şekil 1'de; tüm model hesaplamalarının genel olarak deneysel veriler ile uyumlu olduğu ve benzer geometrik şekil oluşturabilecek sonuçlar ürettikleri görülmektedir. Literatürde mevcut deneysel verilere göre (Chang ve ark., 1973; Vonach ve ark., 1983; Levkovski, 1991; Morton ve ark., 1992; Baglin ve ark., 2005; Oprea ve ark., 2017) yaklaşık olarak 4-48 MeV arasında gerçekleştirilen hesaplama sonuçlarında; teorik olarak maksimum tesir kesiti değeri 12-16 MeV aralığında HFB-Gogny-Hilaire modeli ile elde edilmiştir.  $^{48}\text{Ti}(\alpha, n)^{51}\text{Cr}$  reaksiyonu için seviye yoğunluğu modellerinin ve optiksel

potansiyellerin etkilerini inceleyen Yalçın (2017); çalışmasında Vonach ve ark. (1983), Morton ve ark. (1992) ile ve Baglin ve ark. (2005) tarafından literatüre kazandırılmış olan deneysel verileri kullanarak TALYS kodundaki altı farklı seviye yoğunluğu modeli ve sekiz farklı optiksel potansiyelin tesir kesiti hesaplarına olan etkilerini araştırmıştır. Seçilen deneysel verilerin enerji aralığı olan yaklaşık 5-13 MeV'de gerçekleştirilen çalışmada, hesaplama

sonuçlarına göre incelenen deneysel veriler ile bu enerji aralığındaki en uyumlu sonuçların seviye yoğunluğu modellerinden GSM ile elde edildiği belirtilmiştir (Yalçın, 2017). Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamaların sonuçlarında ise, tüm enerji aralığı ve tüm deneysel veriler birlikte düşünüldüğünde, deneysel veriler ile en uyumlu sonuçların HFB-Gogny-Hilaire modeli ile elde edildiği Çizelge 1 ile gösterilen görece varyans analizi sonuçlarında da anlaşılmaktadır.



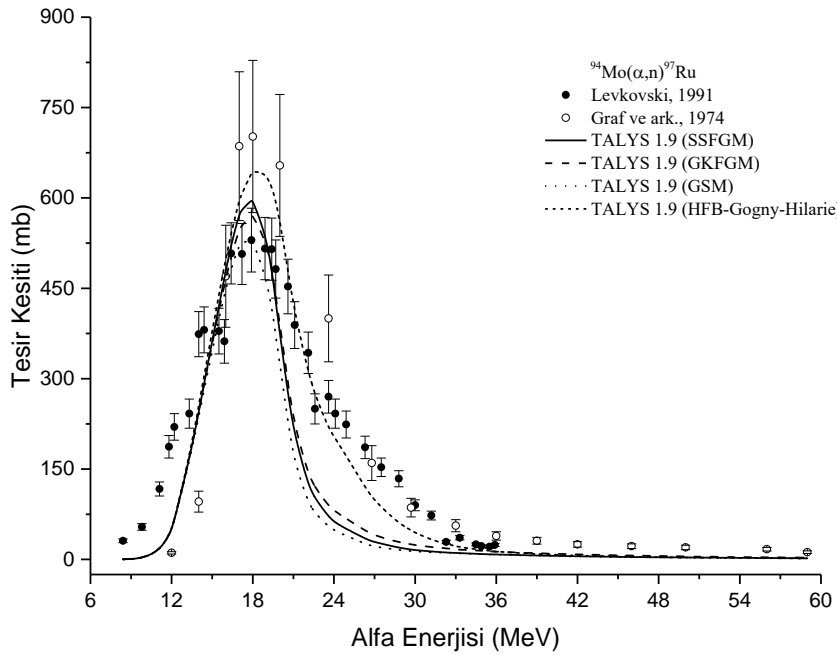
Şekil 1.  $^{48}\text{Ti}(\alpha, n)^{51}\text{Cr}$  reaksiyonunda seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırılması.



Şekil 2.  $^{49}\text{Ti}(\alpha, 2n)^{51}\text{Cr}$  reaksiyonunda seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırılması.

$^{51}\text{Cr}$  radyoizotopunun ( $\alpha, 2n$ ) reaksiyonu ile üretilmesine ait hesaplamaların sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. Yaklaşık olarak 20-46 MeV gelme enerjili alfa parçacıkları ile tamamlanan hesaplamalar için enerji değerleri literatürde (Levkovski, 1991) mevcut olan değerler olarak seçilmiştir. Yaklaşık olarak 38 MeV alfa parçacığı enerjisi bölgesine kadar, fenomenolojik modeller birbirlerinden farklı ama deneysel verilerinkine benzer bir geometri oluşturabilecek

değerlerde sonuçlar üretmişlerken, mikroskobik seviye yoğunluğu modeli ancak 38 MeV enerji bölgesinden sonra diğer modeller ile uyum gösterebilmiştir. Tüm enerji aralığında; kullanılan tüm modeller deneysel değerlerden aşağıda sonuçlar üretmiş olmalarına rağmen, modeller arasında deneysel değerler ile en uyumlu sonucu üreten model görece varyans analizi hesaplamalarından da görüleceği üzere, GSM olmuştur.



Şekil 3.  $^{94}\text{Mo}(\alpha, n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonunda seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırılması.

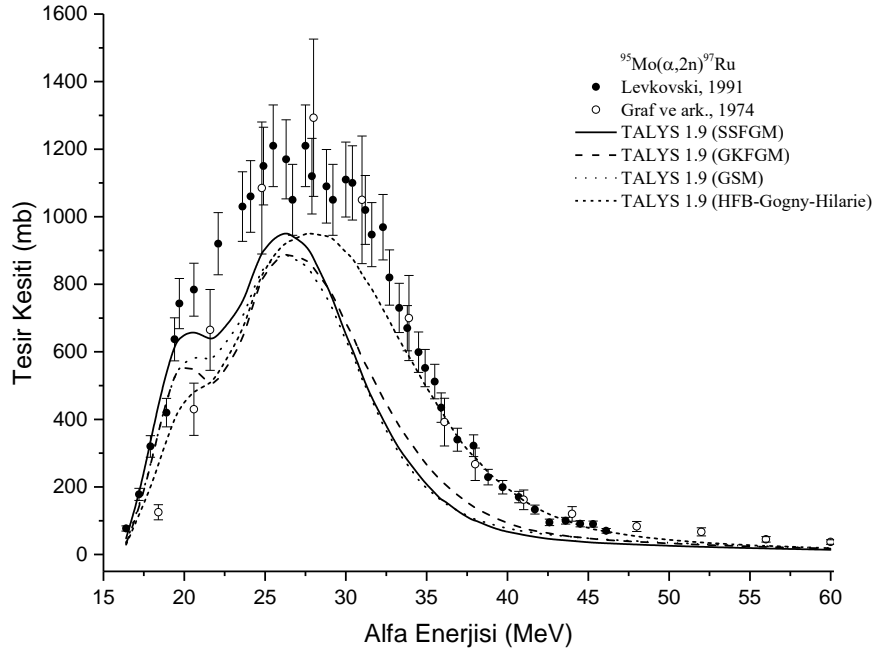
İncelenen bir diğer reaksiyon olan  $^{94}\text{Mo}(\alpha, n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonuna ait farklı seviye yoğunluğu modelleri ile elde edilmiş olan teorik üretim tesir kesiti sonuçları, literatürde mevcut olan (Graf ve Münzel, 1974; Levkovski, 1991) veriler kullanılarak karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 3'de gösterilmiştir. Teorik modeller ile elde edilen sonuçların, maksimum tesir kesiti değerinin gözlemlendiği pik bölgesinde farklılaşmakta olduğu ancak; deneysel verilerin hata payları düşünüldüğünde sonuçların deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmektedir. 18 MeV alfa gelme enerjisinden sonra SSFGM, GKFGM ve GSM ile elde edilen sonuçlar deneysel verilerin altında kalarak benzer bir harmoni oluşturmuşlardır. Mikroskobik seviye yoğunluğu

modeli ile elde edilen hesaplama sonuçlarının, tüm deneysel veriler ile diğer model sonuçlarına göre daha uyumlu olduğu hem Çizelge 1'deki görece varyans analizi sonuçlarından anlaşılabilen hem de özellikle 21-30 MeV alfa gelme enerjisi aralığında Şekil 3'de net şekilde görülmektedir.

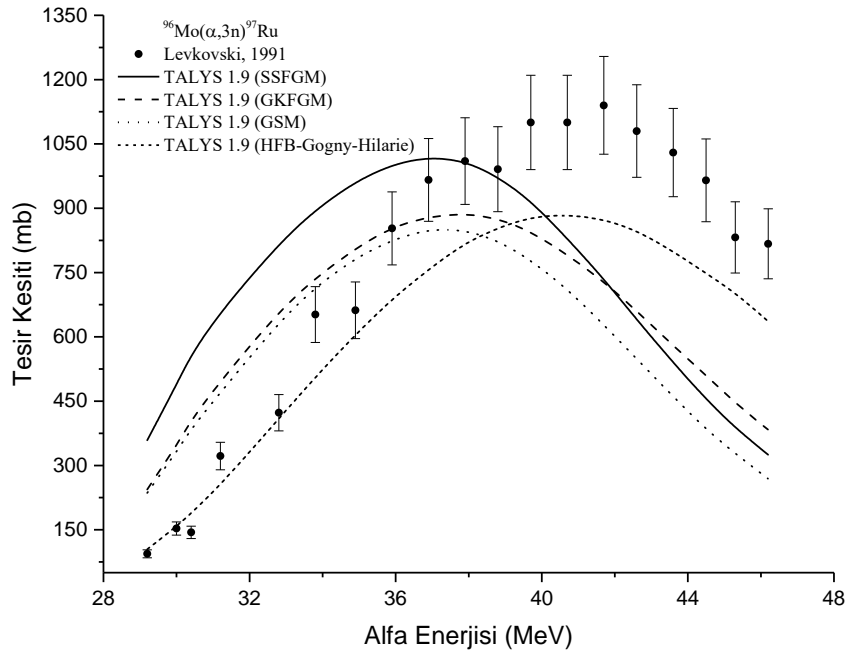
$^{97}\text{Ru}$  üretiminde incelenen ikinci reaksiyon olan ve  $^{94}\text{Mo}(\alpha, n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonu ile aynı literatürden elde edilmiş enerji aralığına göre gerçekleştirilen  $^{95}\text{Mo}(\alpha, 2n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonuna ait hesaplamaların sonuçları, Şekil 4 ile gösterilmiştir. Deneysel verilerinkine benzer bir geometrinin elde edildiği görülen hesaplama sonuçlarında, mikroskobik seviye yoğunluğu modeli dışındaki modellerin sonuçlarının

yaklaşık olarak 23 MeV ve sonrasındaki tüm enerjilerde deneysel verileri aşağıdan takip ettikleri görülmektedir. Diğer reaksiyonlarda olduğu gibi, tüm enerji aralığı ve literatürden

alınan tüm deneysel veriler düşünülerek gerçekleştirilen göreceli varyans analizine göre, en uyumlu sonuçları mikroskobik seviye yoğunluğu modelinin ürettiği görülmektedir.



Şekil 4.  $^{95}\text{Mo}(\alpha,2n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonunda seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırılması.



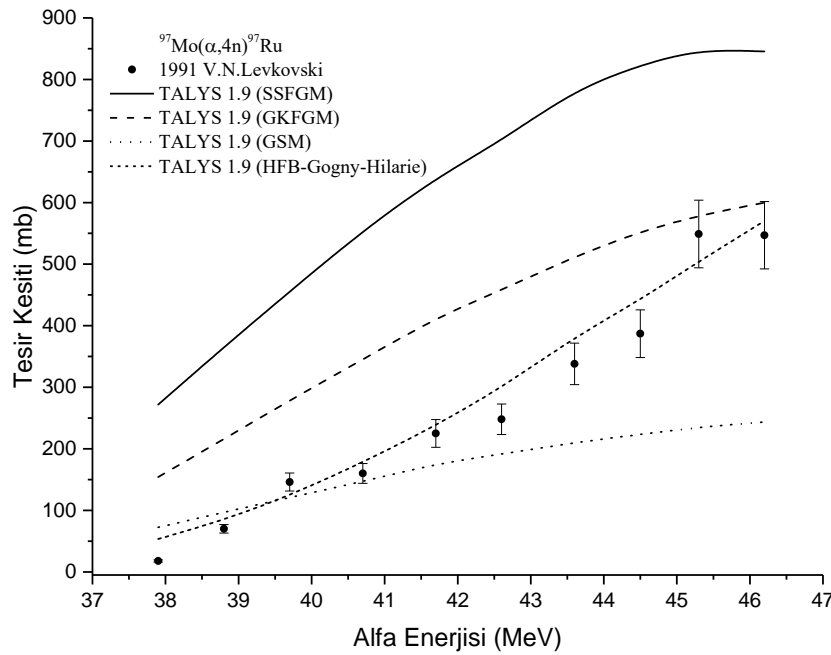
Şekil 5.  $^{96}\text{Mo}(\alpha,3n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonunda seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırılması.

$^{96}\text{Mo}(\alpha,3n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonu,  $^{97}\text{Ru}$  üretimi açısından bu çalışma kapsamında incelenen bir diğer reaksiyondur. Literatür verisine göre

(Levkovski, 1991); yaklaşık olarak 28-48 MeV enerji aralığında gerçekleştirilen hesaplamalarda, tüm teorik model sonuçlarının deneysel veriler ile

benzer geometrik yapı oluşturdukları Şekil 5’de gösterilmiştir. Buna rağmen, hem deneysel verilerin hem de tüm modellerin maksimum üretim tesir kesiti değerlerinin ve bu değerlerin elde edildiği alfa parçacığı enerji değerlerinin birbirlerinden farklı oldukları görülmektedir. Yaklaşık 36 MeV enerjisine kadar olan bölgede, SSFGM, GKFGM ve GSM modelleri ile elde edilen sonuçlar deneysel verilerin üzerinde,

sonrasında ise deneysel verilerin altında elde edilmiştir. Mikroskobik seviye yoğunluğu modeli ile elde edilen sonuçlar ise, yaklaşık olarak 32 MeV’den sonra sürekli deneysel verilerin altındaki değerlerdedir. Buna rağmen, deneysel veriler ile en uyumlu sonuçların mikroskobik seviye yoğunluğu modeli kullanılarak elde edilen hesaplamalar olduğu Çizelge 1’de gösterilen görece varyans sonuçlarından anlaşılmaktadır.



Şekil 6.  $^{97}\text{Mo}(\alpha,4n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonunda seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırılması.

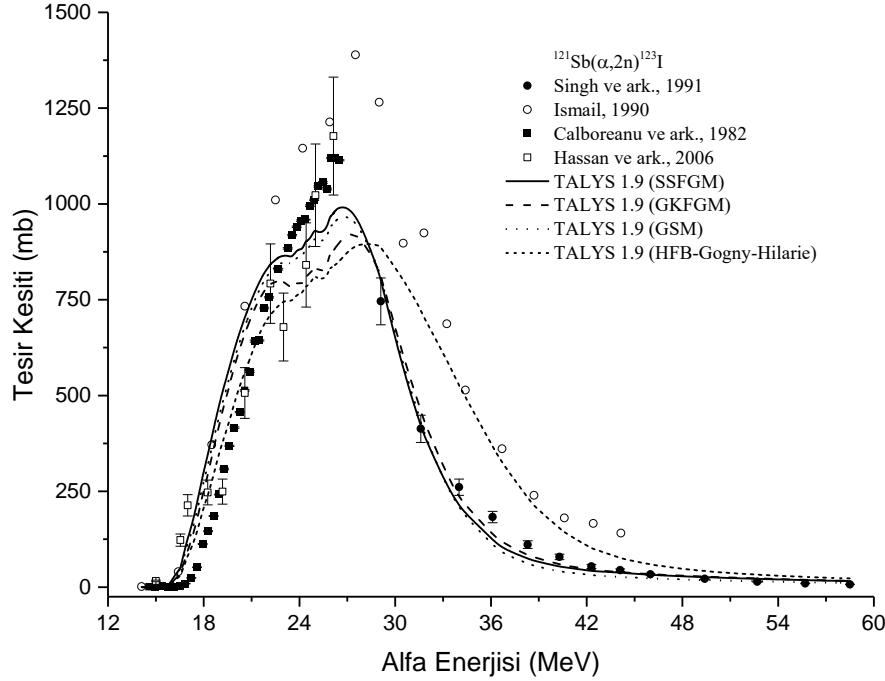
$^{97}\text{Ru}$  üretim tesir kesiti hesaplamalarında seviye yoğunluğu modellerinin etkilerinin incelendiği bir diğer reaksiyon ise,  $^{97}\text{Mo}(\alpha,4n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonudur.  $^{96}\text{Mo}(\alpha,3n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonu ile aynı kaynaktan elde edilen değerlere göre  $^{97}\text{Mo}(\alpha,4n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonu yaklaşık olarak 38-47 MeV alfa enerjisi aralığında incelenmiştir. SSFGM ve GKFGM modelleri ile deneysel verilerden daha yüksek tesir kesiti değerleri elde edildiği görülmektedir. Bu reaksiyon için en uyumsuz modelin SSFGM olduğu hem Şekil 6’da verilen grafiksel karşılaştırmadan hem de Çizelge 1’de sunulan görece varyans hesabı sonuçlarından anlaşılmaktadır. Deneysel veriler ile en uyumlu model ise, mikroskobik seviye yoğunluğu modeli olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, seviye yoğunluğu modellerinin üretim tesir kesiti hesaplamalarına etkisinin incelendiği son reaksiyon olan  $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$ ’a ait hesaplama sonuçları ile literatürden alınan (Hassan ve ark., 2006; Singh ve ark., 1991; Ismail, 1990; Calboreanu ve ark., 1982) deneysel verilere göre gerçekleştirilen hesaplama sonuçları Şekil 7’de karşılaştırılmıştır. Başlangıç enerjilerinden sonra; artan parçacık enerjisi ile arttığı görülen üretim tesir kesiti değerinde, deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçlarının uyumlu yapısı maksimum pik bölgesinde korunmamış ve teorik modellerin tümü deneysel değerlerin altında olacak sonuçlar üretmişlerdir. Daha sonrasındaki bölgede ise, artan alfa parçacığı enerjisi ile SSFGM, GKFGM ve GSM Singh ve ark. (1991) tarafından elde



edilmiş deneysel verilere uyumlu değerler üretmişlerken, mikroskobik seviye yoğunluğu modeli ise Ismail (1990)'e uyumlu değerler üretmiştir. İncelenen tüm enerji aralığı göz önüne alındığında ise, deneysel verilerin tamamı ile en

uyumlu sonuçların mikroskobik seviye yoğunluğu modeli HFB-Gogny-Hilaire modeli ile elde edilmiş olduğu görelî varyans analizi hesabı ile elde edilmiştir.



Şekil 7.  $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$  reaksiyonunda seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırılması.

Çizelge 1. Görelî varyans analizi sonuçları

Reaksiyon	SSFGM	GKFGM	GSM	HFB-Gogny-Hilaire
$^{48}\text{Ti}(\alpha,n)^{51}\text{Cr}$	1,1841817	1,1855629	1,1466451	1,1352588
$^{49}\text{Ti}(\alpha,2n)^{51}\text{Cr}$	0,5753504	0,4720941	0,4064546	0,7853569
$^{94}\text{Mo}(\alpha,n)^{97}\text{Ru}$	0,6392608	0,5705497	0,6610965	0,4801222
$^{95}\text{Mo}(\alpha,2n)^{97}\text{Ru}$	0,4826403	0,4346444	0,4674449	0,2192578
$^{96}\text{Mo}(\alpha,3n)^{97}\text{Ru}$	0,7498967	0,5059349	0,5306225	0,1794888
$^{97}\text{Mo}(\alpha,4n)^{97}\text{Ru}$	3,0254042	1,4571104	0,6075874	0,3113114
$^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$	1,1095354	0,8684679	1,0015090	0,8125455

## SONUÇ

Bu çalışmada,  $^{48}\text{Ti}(\alpha,n)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{49}\text{Ti}(\alpha,2n)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{94}\text{Mo}(\alpha,n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Mo}(\alpha,2n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{96}\text{Mo}(\alpha,3n)^{97}\text{Ru}$ ,  $^{97}\text{Mo}(\alpha,4n)^{97}\text{Ru}$  ve  $^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$  reaksiyon rotalarında medikal alanda kullanılan  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{97}\text{Ru}$  ve  $^{123}\text{I}$  radyoizotoplarının üretim tesir kesiti hesaplamaları SSFGM, GKFGM, GSM ve HFB-Gogny-Hilaire seviye yoğunluğu modelleri ile

gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular literatürde mevcut deneysel veriler ile görsel ve istatistiki olarak karşılaştırılmıştır.  $^{49}\text{Ti}(\alpha,2n)^{51}\text{Cr}$  reaksiyonu dışında incelenen reaksiyonlarda deneysel veriler ile en uyumlu sonuçların mikroskobik seviye yoğunluğu modeli ile elde edildiği görülmüştür. Bu reaksiyonda ise, en başarılı model GSM iken mikroskobik seviye

yoğunluğu modeli diğer modellere kıyasla deneysel veriler ile en uyumsuz sonuçları üretmiştir.  $^{97}\text{Ru}$  üretim rotalarından ( $\alpha, 2n$ ), ( $\alpha, 3n$ ) ve ( $\alpha, 4n$ ) ile  $^{123}\text{I}$  üretim rotası olan ( $\alpha, 2n$ ) reaksiyonlarında SSFGM, diğer modellere kıyasla deneysel veriler ile en az uyumlu sonuçları üreten model olarak tespit edilmiştir.  $^{94}\text{Mo}(\alpha, n)^{97}\text{Ru}$  reaksiyonunda ise, tüm modeller arasında en az uyum GSM modeli sonuçlarında gözlenmiştir. İncelenen reaksiyonlarda; artan alfa parçacığı enerjisi ile görülen önce pik atması sonra yatay seyir sergileyen yapılar, modeller arasındaki farklılığın en belirgin oldukları bölgelerin pik atmasında maksimum üretim tesir kesitinin elde edildiği bölgelerde belirginleştiği görülmüştür. Medikal alanlarda kullanılan radyoizotoplar; insan hayatının daha konforlu ve sağlıklı şekilde sürdürülmesine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle; deneysel çalışmaların gerçekleştirilemediği durumlarda teorik çalışmaların literatüre ve uygulama alanlarına sağlayacakları katkılar göz önünde bulundurularak bu çalışma gibi farklı teorik modeller ile gerçekleştirilecek çalışmaların sürdürülmesinin yararlı olacağı görüşü ortaya çıkmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Artun O, 2018. Calculation of Productions of PET Radioisotopes via Phenomenological Level Density Models, Radiation Physics and Chemistry, 149, 73-83.
- Aydın EG, Tel E, Kaplan A, Aydın A, 2008. Equilibrium and Pre-equilibrium Calculations of Neutron Production in Medium-Heavy Targets Irradiated by Protons up to 100 MeV, Annals of Nuclear Energy, 35(12), 2306-2312.
- Aydın A, Pekdoğan H, Kaplan A, Sarpun İH, Tel E, Demir B, 2015. Comparison of Level Density Models for the  $^{60,61,62,64}\text{Ni}(p, n)$  Reactions of Structural Fusion Material Nickel from Threshold to 30 MeV, Journal of Fusion Energy, 34(5), 1105-1108.
- Aydın A, Sarpun İH, Kaplan A, Tel E, 2013. Calculations of Double-Differential Deuteron Emission Cross Sections at 62 MeV Proton Induced Reactions, Journal of Fusion Energy, 32(3), 378-381.
- Aydın A, Sarpun İH, Kaplan A, 2014. Calculations of Double-Differential Triton Emission Cross Sections at 62 MeV Proton Induced Reactions, Physics of Atomic Nuclei, 77(3), 321-324.
- Aydın A, Tel E, Kaplan A, 2008. Calculation of 14-15 MeV (n,d) Reaction Cross Sections Using Newly Evaluated Empirical and Semi-Empirical Systematics, Journal of Fusion Energy, 27(4), 308-313.
- Aydın A, Tel E, Pekdoğan H, Kaplan A, 2012. Nuclear Model Calculations on the Production of  $^{125,123}\text{Xe}$  and  $^{133,131,129,128}\text{Ba}$  Radioisotopes, Physics of Atomic Nuclei. 75(3), 310-314.
- Aydın EG, Tel E, Kaplan A, Aydın A, 2008. New Calculations of Excitation Functions of Some Positron Emitting and Single Photon Emitting Radioisotopes, Kerntechnik. 73(4), 184-189.
- Baba H, 1970. A Shell-Model Nuclear Level Density, Nuclear Physics A, 159(2), 625-641.
- Baglin CM, Norman EB, Larimer R-M, Rech GA, 2005. Measurement of  $^{107}\text{Ag}(\alpha, \gamma)^{111}\text{In}$  Cross Sections. AIP Conference Proceedings 769, 1370.
- Bucurescu D, Egidy T, 2015. Nuclear Level Density Predictions, EPJ Web of Conferences 93, 06003.
- Büyükuslu H, Kaplan A, Tel E, Yıldırım G, Aydın A, 2010. Production Cross Sections of Medical  $^{110,111}\text{In}$  Radioisotopes, Kerntechnik 75 (3) 103-108.
- Calboreanu A, Pencea C, Salagean O, 1982. The Effect of Gamma De-Excitation Competition on the ( $\alpha, n$ ) and ( $\alpha, 2n$ ) Reactions on Gold and Antimony. Nuclear Physics A, 383(2), 251-263.

- Capote R, Herman M, Obložinský P, Young PG, Goriely S, Belgia T, Ignatyuk AV, Koning AJ, Hilaire S, Plujko VA, Avrigeanu M, Bersillon O, Chadwick MB, Fukahori T, Ge Z, Yinlu H, Kailas S, Kopecky J, Maslov VM, Reffo G, Sin M, Soukhovitskii ESh, Talou P, 2009. RIPL–Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. Nuclear Data Sheets, 110 (12), 3107–3214.
- Chang CN, Kent JJ, Morgan JF, Blatt SL, 1973. Total Cross Section Measurements by X-ray Detection of Electron-Capture Residual Activity. Nuclear Instruments and Methods, 109(2), 327–331.
- Das T, Pillai MRA, 2013. Options to Meet the Future Global Demand of Radionuclides for Radionuclide Therapy. Nuclear Medicine and Biology, 40, 23-32.
- Dilg W, Schantl W, Vonach H, Uhl M, 1973. Level Density Parameters for the Back-Shifted 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 AGW, 1965. A Composite Nuclear-Level Density Formula with Shell Corrections. Canadian Journal of Physics, 43, 1446-1496.
- Graf HP, Münzel H, 1974. Excitation Functions for  $\alpha$ -particle Reactions With Molybdenum Isotopes. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 36(12), 3647–3657.
- Hassan KF, Qaim SM, Saleh ZA, Coenen HH, 2006. Alpha-Particle Induced Reactions on  $^{nat}\text{Sb}$  and  $^{121}\text{Sb}$  with Particular Reference to the Production of the Medically Interesting Radionuclide  $^{124}\text{I}$ . Applied Radiation and Isotopes, 64(1), 101–109.
- Hilaire S, Girod M, Goriely S, Koning AJ, 2012. Temperature-Dependent Combinatorial Level Densities with the D1M Gogny Force, Physical Review C 86(6), (2012) 064317(1)- 064317(10).
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2001. Charged Particle Cross-Section Database for Medical Radioisotope Production: Diagnostic Radioisotopes and Monitor Reactions, IAEA-TECDOC-1211, Austria.
- Ignatyuk AV, Istekov KK, Smirenkin GN, 1979. The Role of Collective Effects in the Systematics of Nuclear Level Densities, Yadernaja Fizika 29(4), 875-883.
- Ignatyuk, AV, Smirenkin GN, Tishin AS, 1975. Phenomenological Description of the Energy Dependence of the Level Density Parameter, Yadernaja Fizika 21(3), 485-490.
- Ismail M, 1990. Measurement and Analysis of the Excitation Function for Alpha-Induced Reactions on Ga and Sb Isotopes. Physical Review C, 41(1), 87–108.
- Kaplan A, 2013. Investigation of Neutron-Production Cross Sections of the Structural Fusion Material  $^{181}\text{Ta}$  for ( $\alpha, xn$ ) Reactions up to 150 MeV Energy, Journal of Fusion Energy, 32(3), 382-388.
- Kaplan A, Özdoğan H, Aydın A, Tel E, 2013a. Photo-neutron Cross Section Calculations of Several Structural Fusion Materials, Journal of Fusion Energy 32 (3), 344-349.
- Kaplan A, Özdoğan H, Aydın A, Tel E, 2013b. Deuteron-Induced Cross Section Calculations of Some Structural Fusion Materials, Journal of Fusion Energy 32 (1), 97-102.
- Kaplan A, Özdoğan H, Aydın A, Tel E, 2013c. Photo-neutron Cross Section Calculations of Several Structural Fusion Materials, Journal of Fusion Energy, 32(4), 431-436.

- Kaplan A, Özdoğan H, Aydın A, Tel E, 2014. Photo-Neutron Cross-Section Calculations of  $^{142,143,144,145,146,150}\text{Nd}$  Rare-Earth Isotopes for (g,n) Reaction, *Phys. Atom Nucl.* 77 (11), 1371-1377.
- Koning A, Hilaire S, Goriely S, 2017. TALYS-1.8 A Nuclear Reaction Program, User Manual, 1st ed. 21 December 2017, NRG, The Netherlands.
- Koning AJ, Hilaire S, Goriely S, 2008. Global and Local Level Density Models, *Nuclear Physics A* 810(1-4), 13-76.
- Kurenkovb VN, Luneva VP, Shubina YN, 1999. Evaluation of Calculation Methods for Excitation Functions for Production of Radioisotopes of Iodine, Thallium and Other Elements, *Applied Radiation and Isotopes*, 50(3), 541-549.
- Levkovski VN, 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), Moskova.
- Morton AJ, Tims SG, Scott AF, Hansper VY, Tingwell CIW, Sargood DG, 1992. The  $^{48}\text{Ti}(\alpha, n)^{51}\text{Cr}$  and  $^{48}\text{Ti}(\alpha, p)^{51}\text{V}$  Cross Sections. *Nuclear Physics A*, 537(1-2), 167-182.
- Nichols AL, Qaim, SM, Noy RC, 2011. Intermediate-term Nuclear Data Needs for Medical Applications: Cross Sections and Decay Data, INDC(NDS)-0596, Austria.
- Oprea A, Glodariu T, Filipescu D, Gheorghe I, Mitu A, Boromiza M, Bucurescu D, Costache C, Cata-Danil I, Florea N, Ghita DG, Ionescu A, Marginean N, Marginean R, Mihai C, Mihai R, Negret A, Nita C, Olacel A, Pascu S, Sotty C, Suvaila R, Stan L, Stroe L, Serban A, Stiru I, Toma S, Turturica A, Ujeniuc S, 2017. Absolute Cross Sections of the  $^{86}\text{Sr}(\alpha, n)^{89}\text{Zr}$  Reaction at Energies of Astrophysical Interest. *EPJ Web of Conferences*, 146, 1016.
- Özdoğan H, 2019. Theoretical Calculations of Production Cross-Sections for the  $^{201}\text{Pb}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{18}\text{F}$  and  $^{11}\text{C}$  Radioisotopes at Proton Induced Reactions, *Applied Radiation and Isotopes*, 143, 1-5.
- Özdoğan H, Şekerci M, Kaplan A, 2019a. A new developed semi-empirical formula for the (a,p) reaction cross-section at  $19\pm 1$  MeV, *Modern Physics Letters A* 34(6), 1950044-1 - 1950044-9.
- Özdoğan H, Şekerci M, Kaplan A, 2019b. Investigation of Gamma Strength Functions and Level Density Models Effects on Photon Induced Reaction Cross-Section Calculations for the Fusion Structural Materials  $^{46,50}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  and  $^{63}\text{Cu}$ , *Applied Radiation and Isotopes*, 143, 6-10.
- Özdoğan H, Şekerci M, Sarpün İH, Kaplan A, 2018. Investigation of Level Density Parameter Effects on (p,n) and (p,2n) Reaction Cross-Sections for the Fusion Structural Materials  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{63}\text{Cu}$  and  $^{90}\text{Zr}$ , *Applied Radiation and Isotopes*, 140, 29-34.
- Sahan M, Tel E, Sahan H, Kara A, Aydın A, Kaplan A, Sarpun IH, Demir B, Akca S, Yıldız E, 2015. Calculations of Double-Differential Neutron Emission Cross Sections for  $^9\text{Be}$  Target Nucleus at 14.2 MeV Neutron Energy, *J. Fusion Energ.* 34 (3), 493-499.
- Sarpün İH, Aydın A, Kaplan A, Koca H, Tel E, 2014. Comparison of Fission Barrier and Level Density Models in (a,f) Reactions of Some Heavy Nuclei, *Annals of Nuclear Energy*, 70, 175-179.
- Sarpün İH, Yalım HA, Ünal R, Oruncak B, Aydın A, Kaplan A, Tel E, 2010. Determination of (n,2n) Reaction Cross Sections for Some Nuclei with Asymmetry Parameter, *Journal of Fusion Energy*, 29(4) 387-394.

- Singh BP, Bhardwaj HD, Prasad R, 1991. A Study of Pre-Equilibrium Emission in  $\alpha$ -Induced Reactions on  $^{121,123}\text{Sb}$ . Canadian Journal of Physics, 69(11), 1376–1382.
- Tárkányi FT, Ignatyuk AV, Hermanne A, Capote R, Carlson BV, Engle JW, Kellett MA, Kibedi T, Kim GN, Kondev FG, Hussain M, Lebeda O, Luca A, Nagai Y, Naik H, Nichols AL, Nortier FM, Suryanarayana SV, Takács S, Verpelli M, 2018. Recommended Nuclear Data For Medical Radioisotope Production: Diagnostic Gamma Emitters. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 319(2), 487–531.
- Tel E, Aydın EG, 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.
- Tel E, Sahan M, Aydın A, Sahan H, Uğur FA, Kaplan A, 2011. The Newly Calculations of Production Cross Sections for Some Positron Emitting and Single Photon Emitting Radioisotopes in Proton Cyclotrons, InTech - Radioisotopes - Applications in Physical Sciences, pp. 141-154.
- Vonach H, Haight R, Winkler G, 1983. ( $\alpha, n$ ) and Total  $\alpha$ -Reaction Cross Sections for  $^{48}\text{Ti}$  and  $^{51}\text{V}$ . Physical Review C, 28(6), 2278–2285.
- Yalım HA, Aydın A, Sarpün İH, Ünal R, Oruncak B, Kaplan A, Tel E, 2010. Investigation of Nucleon Mean Free Path Dependence in Tritium Emission Spectra Produced by Proton Induced Reactions at 62 MeV, Journal of Fusion Energy 29 (1) 55-61.
- Yeong CH, Cheng M, Ng KH, 2014. Therapeutic Radionuclides in Nuclear Medicine: Current and Future Prospects. Journal of Zhejiang University Science B, 15, 845- 863.
- Yalçın C, 2017. İnce Katman Aktivasyon Yöntemi için  $^{48}\text{Ti}(\alpha, n)^{51}\text{Cr}$  Reaksiyon Tesir Kesiti Hesabı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17, 432-439.
- Yiğit M, 2017. Investigating the (p,n) Excitation Functions on  $^{104-106,108,110}\text{Pd}$  İsootopes, Applied Radiation and Isotopes, 139, 151-158.
- 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 VV, 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.