

Araştırma Makalesi / Research Article

Bazı Samaryum ve Gadolinyum İzotoplarının (n,2n) Reaksiyonlarında Teorik Modellerin Tesir Kesiti Hesaplamalarına Etkilerinin İncelenmesi

Mert ŞEKERCİ^{1*}, Abdullah KAPLAN²

^{1*} Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Bölümü, Isparta, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0870-0506>, mertsekerce@sdu.edu.tr

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Bölümü, Isparta, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2990-0187>, abduallahkaplan@sdu.edu.tr

Geliş/ Received: 28.01.2025;

Revize/Revised: 22.03.2025

Kabul / Accepted: 31.03.2025

ÖZET: Bu çalışmada, Samaryum ve Gadolinyum elementlerinin farklı izotopları için (n,2n) reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamalarında denge ve denge-öncesi nükleer reaksiyon modellerinin etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Samaryum elementinin 144, 148, 150, 152 ve 154 kütle numaralı izotopları ile Gadolinyum elementinin 155, 156, 157, 158 ve 160 kütle numaralı izotopları için (n,2n) reaksiyonlarına ait tesir kesiti hesaplamalarında TALYS ve EMPIRE isimli kodlar kullanılmıştır. TALYS kodunun 1.8 versiyonun kullanıldığı hesaplamalarda İki Bileşenli Eksiton Model ve Hauser-Feshbach Model, EMPIRE kodunun 3.2 versiyonun kullanıldığı hesaplamalarda ise PCROSS Eksiton Model ve Hauser-Feshbach Model denge ve denge-öncesi etkilerin analiz edilebilmesi için seçilmiş olan modellerdir. Elde edilen hesaplama sonuçları, EXFOR veritabanından temin edilen deneysel verilerle karşılaştırılmış ve bulgular her bir reaksiyon için grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde çıktıların literatürde de mevcut olan iki durumu destekleyecek nitelikte olduğu söylenebilmektedir. Bunlardan ilki deneysel çalışmaların gerçekleştirilemediği durumlarda teorik hesaplama yöntemlerinin bilimsel araştırmalar için bir alternatif olabileceği iken diğeri ise bu tarz çalışmaların hesaplamalarda kullanılan teorik modellerin gelişimine destek sağlayabileceği öngörüsüdür.

Anahtar Kelimeler: Samaryum, Gadolinyum, Tesir kesiti, TALYS, EMPIRE, EXFOR

*Sorumlu yazar / Corresponding author: mertsekerce@sdu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Investigation of the Effects of Some Samarium and Gadolinium Isotopes on Cross Section Calculations of Theoretical Models in (n,2n) Reactions

ABSTRACT: This study aims to investigate the effects of equilibrium and pre-equilibrium nuclear reaction models on cross-section calculations for (n,2n) reactions of different isotopes of Samarium and Gadolinium elements. In this context, cross-section calculations for (n,2n) reactions of the isotopes 144, 148, 150, 152, 154 of Samarium and 155, 156, 157, 158, 160 of Gadolinium elements were performed using the TALYS and EMPIRE codes. In the calculations performed with version 1.8 of the TALYS code, the Two-Component Exciton Model and Hauser-Feshbach Model were employed, while in the calculations using version 3.2 of the EMPIRE code, the PCROSS Exciton Model and Hauser-Feshbach Model were chosen to analyze the effects of equilibrium and pre-equilibrium mechanisms. The obtained theoretical results were examined with experimental data sourced from the EXFOR database, and the findings were visualized graphically for each reaction. When the outcomes of the study are examined as a whole, it is possible to say that the outputs support two situations that are also present in the literature. The first among them is that theoretical calculation methods can be an alternative for scientific research in situations where experimental works may not possible to be carried out, while the other is the prediction that such studies can support the development of theoretical models used in calculations.

Keywords: Samarium, Gadolinium, Crosss-section, TALYS, EMPIRE, EXFOR

1. GİRİŞ

Modern dünyada enerji ihtiyacının hızla artması yüksek verimli, uzun ömürlü ve kesintisiz sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan talebin artmasına neden olmuştur (Şekerci, 2018). Bu gelişmeler çerçevesinde nükleer güç santralleri, enerji üretiminde bu hususlarda ön plana çıkmışlardır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'nın (IAEA) Güç Reaktörü Bilgi Sistemi (Power Reactor Information System – PRIS) verilerine göre, 15 Ocak 2025 itibarıyla enerji üretimi amacıyla aktif reaktör sayısı 416 iken, 23 adet durdurulmuş operasyonel reaktör ve 62 adet yapım aşamasındaki reaktör bulunmaktadır (IAEA, 2025). Nükleer reaktörlerde, kontrollü zincirleme fisyon reaksiyonlarının güvenli ve verimli bir şekilde yürütülebilmesi için reaktör kontrol çubuklarının doğru tasarımı ise tüm süreç içerisinde oldukça yüksek önem derecesine sahip bir durumdur (DOE, 2025; IAEA, 1995; IAEA, 2000; IAEA, 2007; IAEA, 2025).

Bu noktada samaryum ve gadolinyum elementleri, yüksek nötron absorpsiyon kapasiteleri nedeniyle reaktör kontrol çubuklarında yaygın olarak kullanılmalarından dolayı ön plana çıkmaktadırlar (Ashby ve Smidman, 2010; IAEA, 1995; IAEA, 1996; IAEA, 2000; IAEA, 2007; Kalcheva ve Koonen, 2007). Bu elementlerin farklı izotoplarının nükleer reaksiyon süreçlerindeki davranışlarının detaylı incelenmesi, hem teorik model doğrulamasının sağlanması hem de pratik uygulamalarda reaktör kontrol sistemlerinin güvenliğinin ve verimliliğinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu motivasyonla bu çalışmada; samaryumun 144, 148, 150, 152 ve 154, gadolinyumun ise 155, 156, 157, 158 ve 160 kütle numarası taşıyan izotoplarının (n,2n) reaksiyonları için tesir kesiti hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve bu hesaplamalarda denge ve denge-öncesi nükleer reaksiyon modellerinin etkileri analiz edilmiştir. Tesir kesiti değeri en kolay anlaşılabilir anlatımı ile bir nükleer reaksiyonun meydana gelme olasılığı olarak tanımlanabilir ve bu değer deneysel olarak

ölçülebileceği gibi gelişmiş teorik modellerin kullanılmasıyla da hesaplanabilir. Hesaplamaların bir araştırmacı tarafından elle yapılması durumunda karşılaşılabilecek hataların ortadan kaldırılması için ise çeşitli yazılımlar oluşturulmuştur. Bu amaçla geliştirilmiş ve literatürde pek çok çalışmada da (Aydın vd., 2013; Kaplan vd., 2016; Kaplan vd., 2017; Kaplan, 2013; Özdoğan vd., 2019; Özdoğan vd., 2023; Özdoğan vd., 2024; Şekerci vd., 2019; Üncü vd., 2023) tercih edilmiş olan kodlardan en çok bilinenleri ise TALYS (Koning vd., 2023) ve EMPIRE (Herman vd., 2007) kodlarıdır.

Bu çalışmada TALYS kodunun 1.8 versiyonunda İki Bileşenli Eksiton ve Hauser-Feshbach modelleri, EMPIRE kodunun 3.2 versiyonunda ise PCROSS Eksiton ve Hauser-Feshbach modelleri, denge ve denge-öncesi süreçlerin etkilerini analiz etmek üzere kullanılmışlardır. Bu çalışmada da kullanılan bu kodlar, yani hem TALYS hem de EMIPRE kodları, literatürde pek çok çalışmada tercih edildiği görülen ve özellikle deneysel verilerin mevcut olmadığı durumlarda araştırmacılar için son derece önemli olan öngörülerini sunabilecek yetkinlikte olan araçlardır. Bu yeteneklerini ve geniş kullanım yelpazelerini göz önünde bulundurarak yapılmış ve literatürde mevcut olan pek çok çalışmada; bu programlar ve bu programların kullanıcılarına sundukları çeşitli hesaplama modelleri ile hesaplama sonuçlarına etkisi olabilecek olan parametrelerin tesir kesiti gibi önemli değerlerin hesaplanmasındaki etkilerinin araştırılması amacıyla deneysel veriler ile teorik hesaplama sonuçlarının karşılaştırmalı olarak kıyaslandığı görülmektedir (Büyüksulu, 2025; Ozdogan vd., 2025; Yiğit vd., 2024; Küçüksucu vd., 2024; Kara vd., 2024; Yiğit, 2023; Yettou vd., 2023; Kavun vd., 2022; Büyüksulu, 2019). Bu çalışmada elde edilen teorik hesaplamaların sonuçları, EXFOR (Otuka vd., 2014) veri tabanından alınan deneysel tesir kesiti verileriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve bulgular görsel olarak analiz edilebilmek amacıyla grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca TENDL (Sublet vd., 2016) olarak bilinen TALYS tabanlı değerlendirilmiş nükleer veri kitaplığından alınan tesir kesiti değerlerine de yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iki temel olguyu destekler niteliktedir: Birincisi, deneysel çalışmaların mümkün olmadığı durumlarda teorik modellerin bilimsel araştırmalara önemli bir alternatif sunduğudur. İkincisi ise, bu tür teorik çalışmaların, kullanılan modellerin geliştirilmesine ve daha geniş bir uygulama alanına uyarlanmasına katkı sağlayabileceğidir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada; samaryumun ve gadolinyumun daha önce belirtilmiş olan kütle numaralarına sahip izotoplarının ($n,2n$) reaksiyonlarına ait tesir kesiti hesaplamalarında, nükleer reaksiyonların teorik analizinde yaygın olarak kullanılan TALYS ve EMPIRE kodları kullanılmıştır. Bu kodlar; denge ve denge-öncesi süreçlerin analizi için farklı teorik modelleri hesaplamalara entegre edebilme özelliklerine sahiptirler ve bu sayede nükleer reaksiyonların detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlarlar. Kullanılan modellerin işleyiş mekanizmaları ve teorik yapıları, bu çalışmanın temel bileşenlerini oluşturan unsurlardandır. TALYS 1.8 kodu, geniş bir enerji aralığında nükleer reaksiyonların teorik analizini yapabilen, kapsamlı bir yazılımdır (Koning vd., 2023). Kullanıcı tanımlı girdi dosyası ile çalışan TALYS kodunda mevcut yüzlerce anahtar kelime ile bir reaksiyona ait istenilen hesaplama için farklı model ve parametrelerin tetiklendiği pek çok kombinasyonun elde edilmesi mümkündür. Bunlar arasında bu çalışmada, çalışmanın motivasyonuna uygun olarak denge ve denge-öncesi reaksiyon mekanizmalarının etkilerinin incelenebilmesi amacıyla İki Bileşenli Eksiton Model ve Hauser-Feshbach Model ayrı ayrı kullanılarak tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır.

Eksiton modeli, nükleer reaksiyonlarda denge-öncesi süreçlerin anlaşılmasında önemli bir yere sahiptir. Eksitonlar, reaksiyon sırasında oluşan parçacık-deşik çiftlerini ifade eder ve bu çiftlerin

sayısı, enerjinin ve momentumun sistem içinde nasıl dağıldığını belirler. İki bileşenli eksiton model, nötronlar ve protonlar için ayrı ayrı enerji ve momentum dağılımlarını ele alarak, daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamayı amaçlar. Bu model, özellikle yüksek enerjili reaksiyonlarda denge-öncesi süreçlerin etkilerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi için de oldukça kullanışlıdır (Koning vd., 2007). TALYS ile gerçekleştirilen tesir kesiti hesaplamalarında kullanılan bir diğer model ise Hauser-Feshbach Modeli'dir. Bu model, bileşik çekirdek reaksiyonlarını istatistiksel olarak analiz eden bir yaklaşıma sahiptir. Reaksiyonun denge durumunda gerçekleştiğini varsayan bu model, bileşik çekirdeğin çeşitli kanallara parçacık veya gama ışını yayılımı yapma olasılıklarını da hesaplar. Nükleer seviyelerin yoğunluğu ve geçiş olasılıkları gibi parametreleri kullanan bu model, hem düşük enerji seviyelerindeki reaksiyonların hem de daha karmaşık süreçlerin doğru bir şekilde modellenmesine olanak tanıyacak yetkinliktedir (Koning vd., 2007).

Literatürde TALYS kadar popüler olan ve kullanıcıların sıklıkla tercih ettikleri, bu çalışmada da kullanılan diğer kod ise EMPIRE kodudur. Oldukça kapsamlı bir geliştirme sürecine neticesinde araştırmacıların kullanımına sunulmuş olan EMPIRE kodunun bu çalışmada kullanılan versiyonu ise 3.2'dir. EMPIRE, modüler yapısıyla nükleer reaksiyonların teorik analizi için geniş bir uygulama alanı sunar. Bu çalışmada, EMPIRE kodunda mevcut olan PCROSS Eksiton ve Hauser-Feshbach modelleri tetiklenerek tesir kesiti hesaplamaları incelenen her bir reaksiyon için birbirlerinden bağımsız olacak şekilde tekrarlı adımlarda tamamlanmıştır. PCROSS, denge-öncesi süreçlerin modellenmesinde kullanılan bir eksiton modelidir. Bu model; eksitonların oluşum ve evrim süreçlerini izlerken, aynı zamanda kompleks parçacık yayılımını da dikkate almaktadır. Bu bağlamda model, eksitonların dinamik davranışlarını detaylı bir şekilde ele alan bir model olarak bilinir ve ayrıca bu ve diğer özellikleri sayesinde yüksek enerjili reaksiyonlarda enerjinin nasıl dağıldığını anlamak için de tercih edilir (Herman vd., 2007). Hauser-Feshbach Modeli ise bileşik çekirdek reaksiyonlarının istatistiksel analizi için temel bir araçtır. Enerji seviyelerinin yoğunluğu ve geçiş olasılıkları gibi parametreleri kullanarak farklı yayılım kanallarının olasılıklarını hesaplayan bu model, hem düşük hem de yüksek enerjili süreçlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir (Herman vd., 2007).

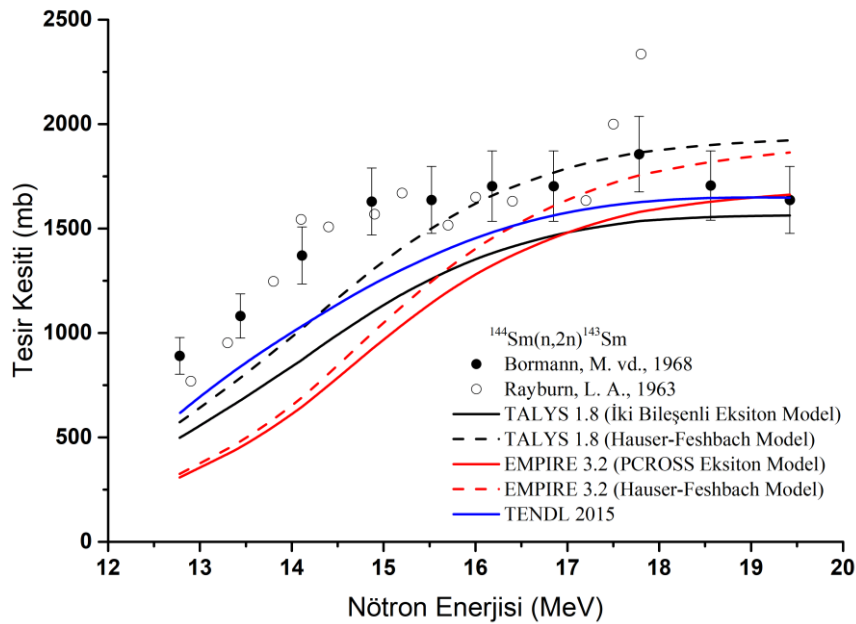
Hem TALYS hem de EMPIRE kodları birçok parametre ve modelin kullanıcı tarafından tanımlanarak hesaplamaların bu parametre ve model ve parametrelerin etkileri ile gerçekleştirilmesini sağlayabilecek yetkinliktedirler. Bu çalışmanın motivasyonunda ise incelenmek üzere seçilen reaksiyonlarda TALYS ve EMPIRE kodlarındaki denge ve denge-öncesi reaksiyon modellerinin etkilerinin tesir kesiti hesaplamaları üzerine olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu motivasyona uygun olarak hesaplamalarda TALYS ve EMPIRE kodlarının mevcut seçenekler arasından kullanıcının tercihi için izin verdiği pek çok parametre her iki kodun da kendi ön tanımlı varsayılan değerinde tutularak kullanılmıştır. Bu sayede kodların geniş parametre seçenekleri arasından sadece bu çalışma motivasyonuna uygun parametrelerin değiştirilmesi durumunda hesaplamaların nasıl etkileneceğinin incelenmesi sağlanabilmektedir. Çalışmanın motivasyonuna uygun olarak incelenmek üzere seçilmiş reaksiyonlarda TALYS ve EMPIRE kodları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen tesir kesiti değerleri hem birbirleri ile hem de deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Buradaki amaçlardan bir tanesi, incelenen reaksiyon özelinde denge ve denge-öncesi reaksiyon mekanizmalarına ait modellerden hangisinin deneysel veriler ile daha uyumlu sonuçlar ortaya koyduğunu anlayabilmek iken bir diğer amaç da TALYS ve EMPIRE kodları kullanılması durumunda sonuçlarda nasıl farklılaşmalar olacağını inceleyebilmektedir. Hesaplama sonuçları ve deneysel veriler arasındaki ilişkinin daha rahat gözlemlenerek yorumlanabilmesi

amacıyla her bir incelenen reaksiyon için hesaplama sonuçları ve deneysel veriler birlikte olacak şekilde grafikler oluşturulmuştur.

TALYS ve EMPIRE kodları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda her bir reaksiyon için elde edilen tesir kesiti değerleri, ilgili reaksiyona ait EXFOR'dan temin edilmiş deneysel veriler ve TALYS tabanlı değerlendirilmiş veri tabanı olan TENDL'dan alınmış hesaplama verileri ile birlikte grafikleştirilmiştir. Bu aşamadan önce hesaplama işlemlerinde dikkat edilen bir hususun burada açıklanması yerinde olacaktır. İncelenen her bir reaksiyon için EXFOR veri tabanı kontrol edilerek deneysel verilerin mevcudiyeti görüldükten sonra gerçekleştirilen hesaplama işlemlerinde kullanılan enerji değerleri, deneysel verilerdeki enerji değerleri ile aynı olacak şekilde seçilmiştir. Bu durum; TENDL veri tabanından ilgili reaksiyona ait tesir kesiti sonuçlarına erişim aşamasında da geçerli olmuştur. Bu sayede, incelenen her bir reaksiyon için doğru kıyaslama yapılabilecek uygun enerji aralığı kendiliğinden seçilmiştir. Bu durum aynı zamanda kıyaslamada bütüncül bir yapı oluşturarak okuyucuların daha rahat bir şekilde yorum yapabilmelerine olanak sağlamayı amaçlamıştır. Ayrıca bu amaca destek olacak şekilde oluşturulan tüm grafiklerde yatay ekseninde enerji değerleri, dikey ekseninde ise tesir kesiti verileri yerleşecek şekilde sistematik bir gösterim yapılmıştır.

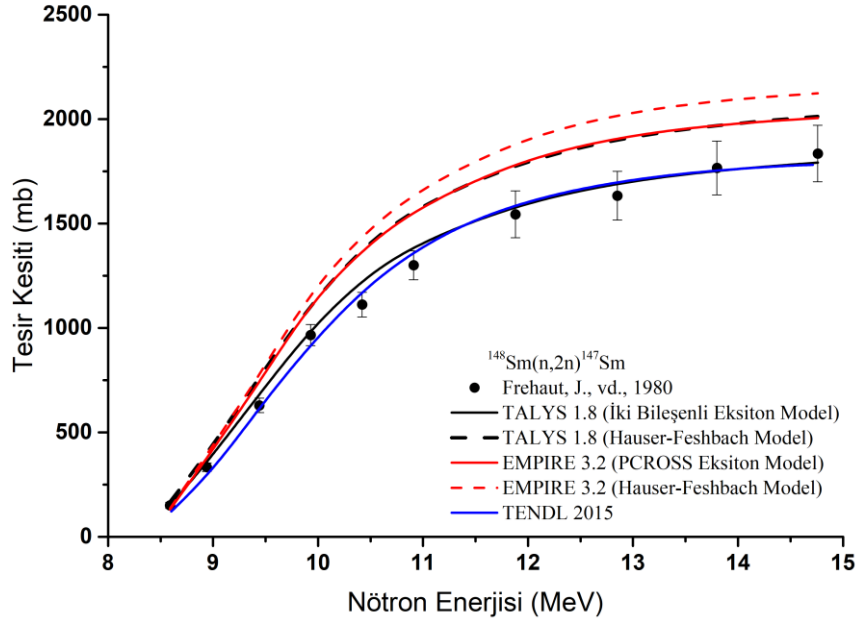
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Denge ve denge-öncesi nükleer reaksiyon mekanizmalarının incelenebilmesine olanak sağlayacak yapıda geliştirilmiş olan nükleer reaksiyon modellerini içeren TALYS ve EMPIRE kodları ile $^{144,148,150,152,154}\text{Sm}$ ve $^{155,156,157,158,160}\text{Gd}$ izotopların $(n,2n)$ reaksiyonlarında tesir kesiti hesaplama sonuçlarının EXFOR'dan temin edilmiş olan deneysel sonuçlar ve TENDL'dan edinilen hesaplama verileri ile kıyaslanmasının amaçlandığı bu çalışmada elde edilen bulgular bu bölümde gösterilmiştir. Bulguların daha kolay şekilde yorumlanabilmesi amacıyla incelenen her bir reaksiyon için x-ekseninde enerji ve y-ekseninde tesir kesiti değeri olacak şekilde bulgular grafik olarak sunulmuştur.



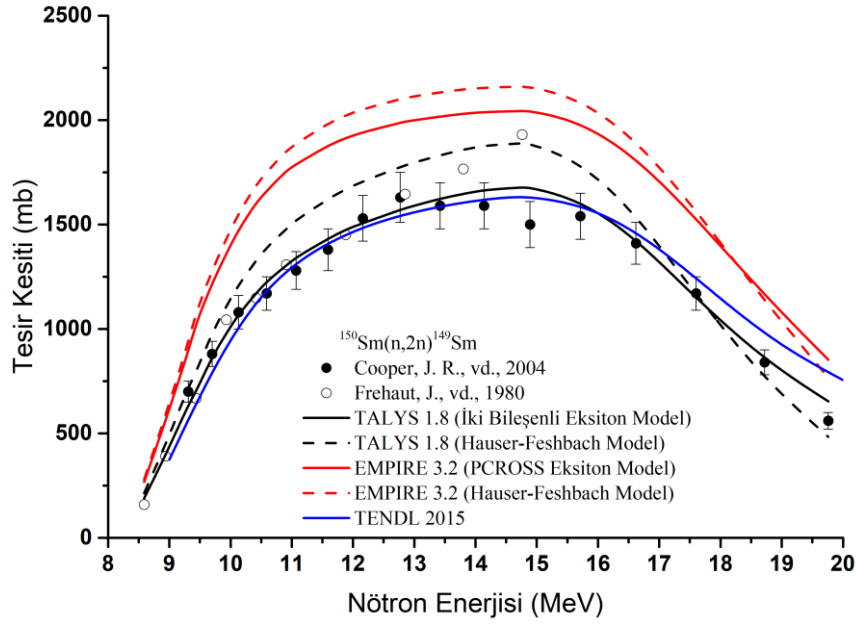
Şekil 1. $^{144}\text{Sm}(n,2n)^{143}\text{Sm}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

Bu çalışmada incelenen ilk reaksiyon olan $^{144}\text{Sm}(n,2n)^{143}\text{Sm}$ reaksiyonu kapsamında yapılan hesaplama işlemlerinin sonuçları ve bu sonuçların deneysel verilerle kıyaslanması Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu reaksiyon özelinde incelenen tüm enerji aralığı göz önünde bulundurulursa modellerin kullanılması ile elde edilen hesaplama sonuçlarının birbirleri ile benzer bir dağılım sergiledikleri görülmektedir. Bunun yanı sıra, hesaplamalarda kullanılan modellerin ürettikleri sonuçlar arasında diğerlerine nazaran daha başarılı olanının 15.5 MeV’den büyük enerji değerlerinde deneysel sonuçlara daha yakın değerlerde sonuçların da elde edildiği TALYS 1.8 kodunun Hauser–Feshbach modeli olduğu görülmüştür.



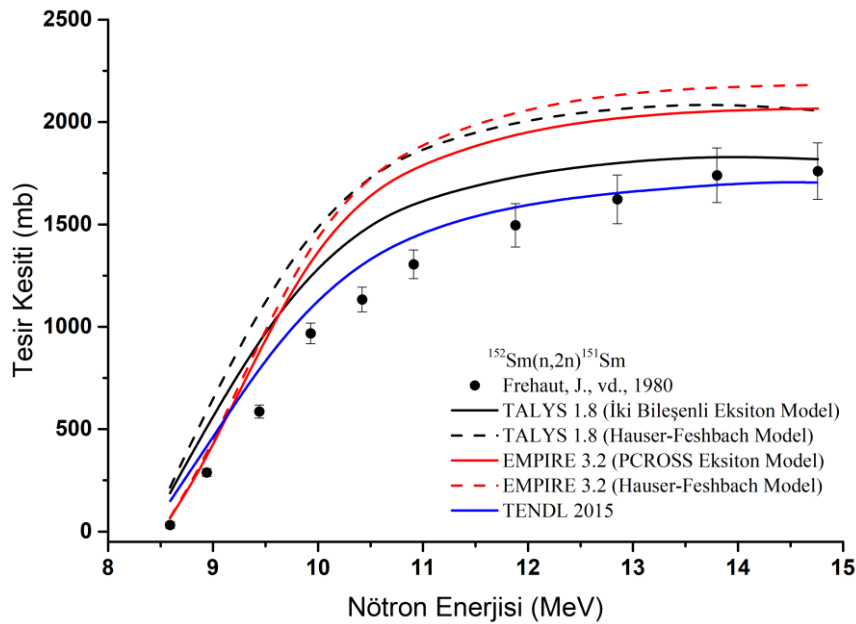
Şekil 2. $^{148}\text{Sm}(n,2n)^{147}\text{Sm}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

Literatürden temin edilmiş olan deneysel çalışmalara ait tesir kesiti verileri ile diğer modellere nazaran daha uyumlu sonuçlar veren modelin TALYS 1.8 kodunun İki Bileşenli Eksiton Modeli olan hesaplama sonuçlarının elde edildiği $^{148}\text{Sm}(n,2n)^{147}\text{Sm}$ reaksiyonuna ait grafik, Şekil 2’de sunulmuştur. Şekilden kolaylıkla görülebilen bir diğer sonuç ise, nötron gelme enerjisinin yaklaşık olarak 10.5 MeV’den büyük olduğu durumlarda TALYS İki Bileşenli Eksiton Model kullanılarak elde edilen tesir kesiti hesaplama sonuçları ile TENDL verileri arasındaki farklılığının ortadan kalkmaya başlaması ve bu değerden sonraki enerji değerlerinde neredeyse aynı tesir kesiti değerlerinde sonuçlar elde edilmiş olmasıdır.



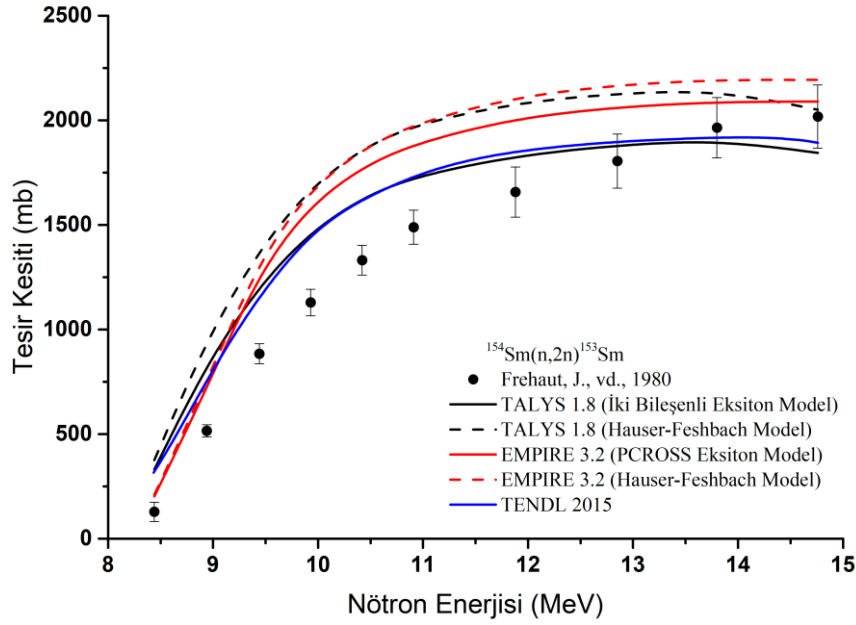
Şekil 3. $^{150}\text{Sm}(n,2n)^{149}\text{Sm}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

$^{150}\text{Sm}(n,2n)^{149}\text{Sm}$ 'ye ait sonuçlar Şekil 3'de gösterilmiştir. Literatürdeki deneysel veriler ile aynı olacak şekilde seçilen bu reaksiyonda incelenen enerji aralığında neredeyse tüm deneysel tesit kesiti sonuçlarını yakalayacak kadar uyumlu tesir kesiti hesaplaması yapabilen model TALYS 1.8 kodunun İki Bileşenli Eksiton Modeli olarak öne çıkmaktadır. Bu duruma ek olarak, hesaplamaların gerçekleştirildiği her iki kodda kullanılan her iki modelin de deneysel verilerinkine benzer geometrik yapılar oluşturabildiğinden rahatlıkla bahsedilebilir. Bu hususta gözden kaçmayan önemli bir durum ise; aynı enerji değerleri için EMPIRE kodu kullanılarak yapılan hesaplamalarda elde edilen sonuçların, hem deneysel verilerden hem de TALYS kodu kullanılarak elde edilen hesaplamalarda daha yüksek değerlerde tesir kesiti sonuçları vermiş olmasıdır.



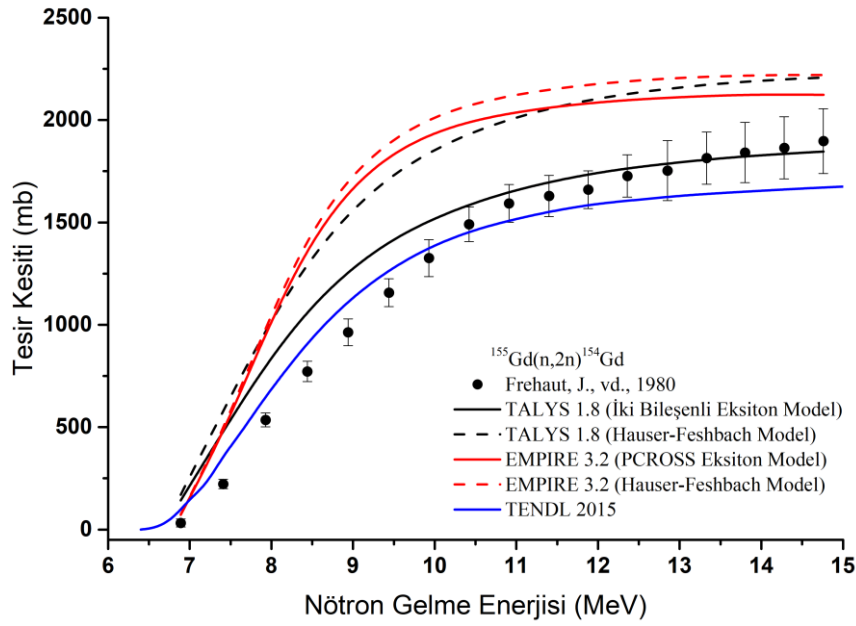
Şekil 4. $^{152}\text{Sm}(n,2n)^{151}\text{Sm}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

Şekil 4, $^{152}\text{Sm}(n,2n)^{151}\text{Sm}$ reaksiyonuna ait sonuçların gösterildiği grafiği içermektedir. Şekilden kolaylıkla anlaşılabileceği üzere deneysel veriler ile modellerin kullanıldığı hesaplama sonuçları tam olarak uyuşmamakta ancak hesaplama sonuçları deneysel verilerin oluşturdukları dağılıma benzer bir yapı sergilemektedirler. Bu bağlamda Şekil 4'ün incelenmesi ile deneysel veriler ile diğerlerine kıyasla daha uyumlu olabilecek hesaplama sonuçları üreten modelin TALYS 1.8'den İki Bileşenli Eksiton Model olduğu kanısına varılabilmektedir. $^{152}\text{Sm}(n,2n)^{151}\text{Sm}$ reaksiyonu sonuçlarının dikkat çekici bir diğer durumu ise, TENDL verilerinin deneysel verilere hem TALYS hem de EMPIRE kodu ile yapılan hesaplama sonuçlarından daha uyumlu olarak elde edilmiş olmasıdır.



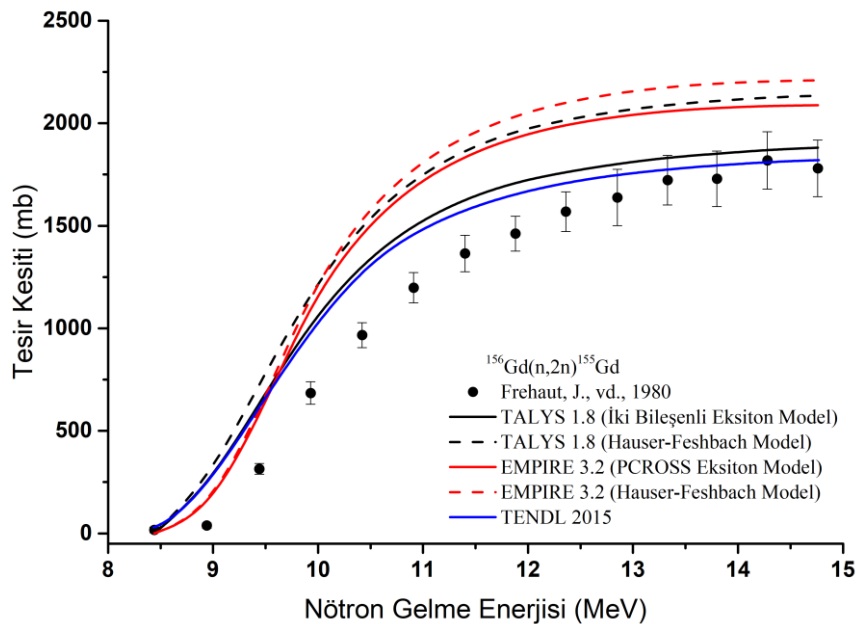
Şekil 5. $^{154}\text{Sm}(n,2n)^{153}\text{Sm}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

Şekil 5 ile $^{154}\text{Sm}(n,2n)^{153}\text{Sm}$ reaksiyonu kapsamında yapılan hesaplama sonuçları neticesinde elde edilen tesir kesiti sonuçları ile literatürde mevcut deneysel veriler birlikttegrafikleştirilerek sonuçların görsel olarak analiz edilebilmesi amaçlanmıştır. Şekil 5'den kolaylıkla anlaşılabileceği gibi, hem denge hem de denge-öncesi modeller kullanılarak elde edilen hesaplama sonuçlarının incelenen aynı enerji değeri için birbirlerinden farklı değerlerde oldukları görüldüğü halde, tüm enerji aralığının bir bütün olarak değerlendirilmesi ile genel olarak deneysel veriler ile uyumlu bir yapı oluşturabildikleri söylenebilir. Bu reaksiyon için yapılan hesaplamalar sonucunda diğer modeller arasından deneysel veriler ile daha uyumlu sonuçları üreten modelin TALYS 1.8 İki Bileşenli Eksiton Model olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu sonuçların TENDL veriler ile de neredeyse aynı değerlerde olduğu söylenebilir.



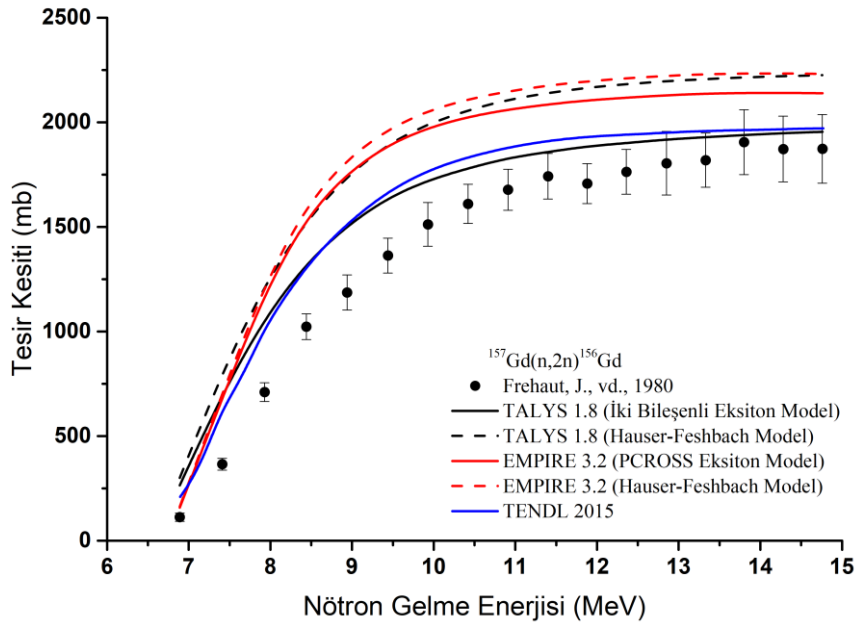
Şekil 6. $^{155}\text{Gd}(n,2n)^{154}\text{Gd}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

^{155}Gd izotopu için $(n,2n)$ reaksiyonuna ait karşılaştırmalar Şekil 6 ile gösterilmiştir. Bu reaksiyon için yapılan hesaplamaların sonuçları ve deneysel verilerin kıyaslanması bir bütün olarak düşünüldüğünde; deneysel veriler ile diğerlerine oranla daha uyumlu sonuçlar üreten kod ve model olarak TALYS kodu ve İki Bileşenli Eksiton Model işaret edilebilir. Öte yandan, deneysel verilerin nötron gelme enerjisine göre göstermiş olduğu tesir kesiti hesaplamasındaki değişimin diğer modeller tarafından da benzer bir yapı oluşturacak şekilde elde edildiği görülmüş ancak, TALYS İki Bileşenli Eksiton Model tarafından üretilmiş olan hesaplama sonuçlarından daha yüksek tesir kesiti hesaplama sonuçları ürettikleri anlaşılmıştır. TALYS İki Bileşenli Eksiton Model kullanılarak elde edilen tesir kesiti hesaplama sonuçlarının özellikle 9–12 MeV aralığındaki nötron gelme enerjisi bölgesinde deneysel veriler oldukça uyumlu oldukları, 12 MeV sonrasındaki bölgede ise deneysel veriler ile neredeyse aynı sonuçlarda oldukları dikkat çekmektedir.



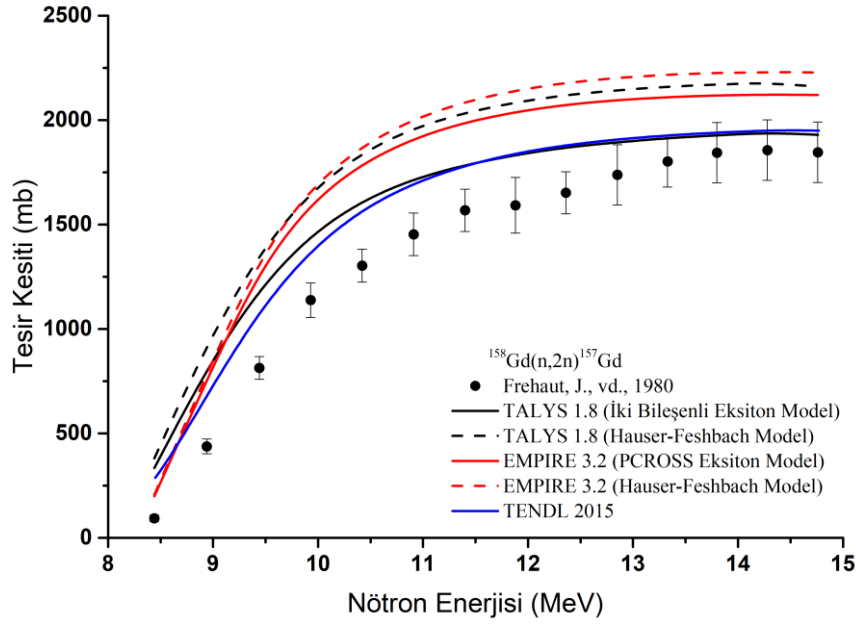
Şekil 7. $^{156}\text{Gd}(n,2n)^{155}\text{Gd}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

Bu çalışmada incelenmek üzere seçilmiş olan bir diğer gadolinyum izotopu olan ^{156}Gd için (n,2n) reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarının sonuçları Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu reaksiyonda da maksimum nötron gelme enerjisi 15 MeV’dir ve bu reaksiyon için de literatürde mevcut deneysel veri aralığı baz alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar neticesinde deneysel veriler ile en uyumlu hesaplama sonuçlarının TALYS 1.8 kodunun İki Bileşenli Eksiton Model kullanılması durumunda elde edildiği görülmüştür. Öte yandan; bu reaksiyonda bu model ile eşde edilen hesaplama sonuçlarının deneysel verileri bir önceki reaksiyon olan $^{155}\text{Gd}(n,2n)^{154}\text{Gd}$ reaksiyonuna göre daha az miktarda yakalayabildiği de görülmektedir. Bu duruma rağmen, tüm enerji aralığı bir bütün olarak değerlendirildiğinde modeller kullanılarak elde edilen tesir kesiti hesaplama sonuçlarının deneysel verilerin oluşturduğuna benzer bir yapı sergileyebildikleri de görülmektedir.



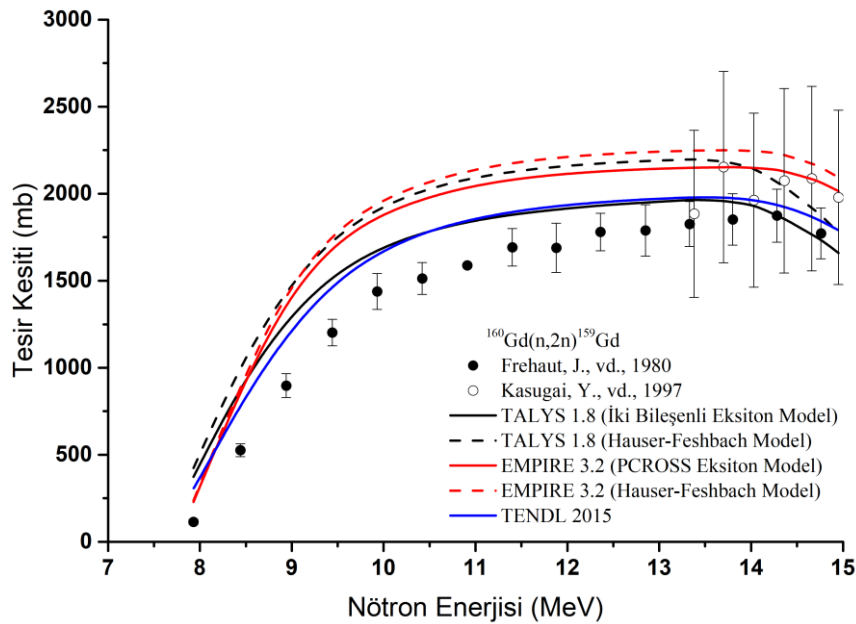
Şekil 8. $^{157}\text{Gd}(n,2n)^{156}\text{Gd}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

Şekil 8, $^{157}\text{Gd}(n,2n)^{156}\text{Gd}$ reaksiyonuna ait hesaplamaların gösterildiği şekildir. Bu reaksiyona ait hesaplamalar sonucunda, tüm modellerin ürettikleri sonuçların deneysel verilerle uyumlu bir geometrik şekil ortaya çıkarmış olduğu görülmektedir. Öte yandan tüm hesaplamalar içinde tüm enerji bölgelerinde diğer modellere kıyasla daha başarılı hesaplama sonuçları veren modelin TALYS 1.8 kodunun İki Bileşenli Eksiton Modeli olduğu da rahatlıkla Şekil 8’den görülmektedir. TENDL verilerinin de, hem deneysel veriler hem de TALYS İki Bileşenli Eksiton Model hesaplamaları ile uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 9. $^{158}\text{Gd}(n,2n)^{157}\text{Gd}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

$^{158}\text{Gd}(n,2n)^{157}\text{Gd}$ reaksiyonuna ait sonuçlar Şekil 9’da sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında incelenmiş olup şimdiye kadar sonuçlarından bahsedilen diğer gadolinyum izotoplarına ait (n,2n) reaksiyonlarında olduğu gibi, $^{158}\text{Gd}(n,2n)^{157}\text{Gd}$ reaksiyonunda da deneysel veriler ile diğer modellerin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlardan daha uyumlu hesaplama sonuçları üretebilmiş olan model TALYS kodunun İki Bileşenli Eksiton Modeli olmuştur. Diğer modellerin kullanılması ile elde edilmiş olan hesaplama sonuçlarının ise, özellikle artan enerji değerleri ile birlikte tesir kesiti sonuçlarının değişim eğilimi göz önünde bulundurulduğunda, bundan önceki gadolinyum izotopları için yapılan hesaplama sonuçlarındakine benzer bir düzende elde edildiği de açıkça görülebilmektedir.



Şekil 10. $^{160}\text{Gd}(n,2n)^{159}\text{Gd}$ reaksiyonu için hesaplama sonuçları, deneysel veriler ve TENDL verileri

Gadoliniumun nötron girişli reaksiyonlarda incelenen son izotopu olan ^{160}Gd için gerçekleştirilen (n,2n) reaksiyonuna ait hesaplamaların deneysel veriler ile karşılaştırmaları Şekil 10'da verilmiştir. Bu reaksiyonda bu izotop için yapılan hesaplamaların sonuçlarının bir bütün olarak değerlendirilmesi ile tesir kesiti hesaplamalarının gerçekleştirildiği modeller arasında deneysel veriler ile diğerlerine göre daha uyumlu sonuçları veren modelin TALYS kodunun İki Bileşenli Eksiton Modeli olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu çalışmada incelenen diğer gadolinium izotopları için yapılan (n,2n) reaksiyon hesaplamaları arasında TENDL verileri ile en uyumlu sonuçlarının bu izotop için olduğu da görülmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, samaryum ve gadolinium elementlerinin 144,148,150,152,154Sm ve 155,156,157,158,160Gd izotoplarına ait (n,2n) reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamaları, TALYS ve EMPIRE kodları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte bu kodların kullanıcılara kullanım imkânı sunduğu farklı modeller ile denge ve denge-öncesi süreçlere ait etkilerin de incelenmesi amaçlanmıştır. Teorik hesaplama sonuçları, EXFOR veri tabanından alınan deneysel veriler ve TENDL veri tabanındaki hesaplamalı metodlarla elde edilmiş tesir kesiti değerleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, teorik modellerin kullanıldığı hesaplamalarla üretilmiş tesir kesiti değerlerinin deneysel verilerle genellikle uyumlu olacak şekilde elde edildiği sonucunu ortaya koymaktadır. Özellikle TALYS kodunun İki Bileşenli Eksiton Modeli, bu çalışmada incelenen birçok reaksiyon için deneysel verilere en yakın sonuçları sağlayan model olmuştur. Bu sonuç sayesinde bu modelin, bu çalışmada incelenen spesifik enerji aralığındaki reaksiyonlarda denge-öncesi süreçleri doğru bir şekilde temsil edebildiği yorumu yapılabilir. Benzer şekilde, Hauser-Feshbach modeli de bileşik çekirdek reaksiyonlarının analizi için güvenilir sonuçlar üretmiştir. EMPIRE kodu ile yapılan hesaplamalar da genel olarak deneysel verilerle uyumlu bir eğilim gözlemlenmiş, ancak bazı durumlarda TALYS koduna kıyasla tesir kesiti hesaplamalarının sonuçlarını daha yüksek değerlerde olacak şekilde ürettiği görülmüştür. Bu durum, farklı modellerin ve kodların teorik hesaplamalarda nasıl farklılıklar yaratabileceğini de açıkça göstermektedir.

Çalışmanın sonuçları; teorik hesaplama yöntemlerinin, deneysel çalışmaların mümkün olmadığı durumlarda nükleer reaksiyonların anlaşılmasında önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca; bu tür çalışmaların, kullanılan modellerin geliştirilmesine ve daha geniş bir uygulama alanına uyarlanmasına katkı sağlama potansiyeline sahip olduğu da öngörülebilecek bir diğer sonuçtur. Öte yandan, özellikle nükleer reaktör kontrol çubuklarında kullanılan samaryum ve gadolinium gibi elementlerin izotoplarının nükleer reaksiyon süreçlerindeki davranışlarının detaylı bir şekilde incelenmesi, hem teorik hem de pratik açıdan önemli sonuçlar doğurabilecek niteliktedir.

Sonuç olarak; bu çalışma, nükleer reaksiyonların teorik modelleme ve hesaplama araçları ile detaylı bir şekilde analiz edilebileceğini ve bu analizlerin deneysel verilerle desteklenerek bilimsel araştırmalara önemli katkılar sağlayabileceğini gösteren önemli bir çalışmadır. Bu tür çalışmalar, nükleer bilim ve teknoloji alanında gelecekteki araştırmalar için güçlü bir temel oluşturmakta ve enerji üretimi, medikal uygulamalar ve diğer endüstriyel alanlarda katkı sağlayabilecek çalışmalara zemin hazırlayabilecek niteliktedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bağlantılı olduğu Doktora tezi Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 4599-D2-16 kodlu proje ile desteklenmiştir.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Mert ŞEKERCİ çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, son onay ve tam sorumluluk konusunda, Abdullah KAPLAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk konusunda katkı sağlamıştır.

8. KAYNAKLAR

- Ashby M. F., Smidman M., Materials for Nuclear Power Systems, Granta Material Inspiration, Version 1.1, 20 s, 2010.
- Aydın A., Sarpün İ. H., Kaplan A., Tel E., Calculations of Double Differential Deuteron Emission Cross Sections at 62 MeV Proton Induced Reactions, Journal of Fusion Energy, 32(3), 378-381, 2013.
- Büyüksulu H., Dispersive optical-model potential parameters for neutron scattering on ^{197}Au up to 200 MeV, Nuclear Physics A, 1055, 123004, 2025.
- Büyüksulu H., Parametrization study for the estimation of light particles (p, d, ^3He , α) induced total reaction cross sections of target mass greater than 9 within the energy range of 10–200 MeV, Radiation Physics and Chemistry, 165, 108431, 2019.
- DOE, 2025. DOE Fundamentals Handbook, Nuclear Physics and Reactor Theory Volume 2 of 2, <https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1000/1019-bhdbk-1993-v2> (Erişim Tarihi: 15.01.2025).
- Herman M., Capote R., Carlson B. V., Oblozinsky P., Sin M., Trkov A., Wienke H., EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation, Nucl. Data Sheets, 108, 2655-2715, 2007.
- IAEA, 1995. Advances in Control Assembly Materials for Water Reactors, IAEATECDOC-813, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/077/26077302.pdf (Erişim Tarihi:20.01.2025).
- IAEA, 1996. Absorber Materials, Control Rods and Designs of Shutdown Systems for Advanced Liquid Metal Fast Reactors, IAEATECDOC-884, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/072/27072854.pdf (Erişim Tarihi:20.01.2025).
- IAEA, 2000. Control assembly materials for water reactors: Experience, performance and perspectives, IAEATECDOC-1132, http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1132_prn.pdf (Erişim Tarihi:20.01.2025).

- IAEA, 2007. Nuclear Power Plant Design Characteristics, IAEATECDOC-1544, http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1544_web.pdf (Erişim Tarihi:20.01.2025).
- IAEA, 2025. Power Reactor Information System (PRIS), <https://www.iaea.org/pris/> (Erişim Tarihi:16.01.2025).
- Kalcheva S., Koonen E., Optimized Control Rods of the BR2 Reactor, Open Report SCK-CEN-BLG-1054, SCK-CEN, 139s, 2007.
- Kaplan A., Investigation of Neutron Production Cross Sections of the Structural Fusion Material ^{181}Ta for xn Reactions up to 150 MeV Energy, Journal of Fusion Energy, 32(3), 382-388, 2013.
- Kaplan A., Şekerci M., Çapalı V., Özdoğan H., Computations of a xn Reaction Cross Section for ^{107}Ag Coated Materials with Possible Application in Accelerators and Nuclear Systems, Journal of Fusion Energy, 35(4), 715-723, 2016.
- Kaplan A., Şekerci M., Çapalı V., Özdoğan H., Photon Induced Reaction Cross-Section Calculations of Several Structural Fusion Materials, Journal of Fusion Energy, 36(6), 213-217, 2017
- Kara A., Mammadzada E., Analyzing neutron emission cross sections for 22.2 MeV proton-induced reactions on ^{58}Ni and ^{52}Cr , Applied Radiation and Isotopes, 206, 111242, 2024.
- Kavun Y., Vashi V., Makwana R., Investigation of $(d, 3n)$ reaction cross section using theoretical nuclear codes calculations on some nuclear materials, Applied Radiation and Isotopes, 189, 110426, 2022.
- Koning A. J., Hilaire S., Goriely S., TALYS: modeling of nuclear reactions, Eur. Phys. J. A 59, 131, 2023.
- Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. TALYS-1.0: A nuclear reaction program. Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, 211-214, 2007.
- Küçüksucu S., Yiğit M., Paar N., Isotopic dependence of (n,α) reaction cross sections for Fe and Sn nuclei, Nuclear Physics A, 1041, 122779, 2024.
- Otuka N., Dupont E., Semkova V., Pritychenko B., Blokhin A. I., Aikawa M., Babykina S., Bossant M., Chen, G., Dunaeva S., Forrest R. A., Fukahori T., Furutachi N., Ganesan S., Ge, Z., Gritzay O.O., Herman M., Hlavač S., Katō K., Lalremruata B., Lee Y. O., Makinaga A., Matsumoto K., Mikhaylyukova M., Pikulina G., Pronyaev V. G., Saxena A., Schwerer O., Simakov S. P., Soppera N., Suzuki R., Takács S., Tao X., Taova S., Tárkányi F., Varlamov V. V., Wang J., Yang S. C., Zerkov V., Zhuang Y., Towards a more complete and accurate experimental nuclear reaction data library (EXFOR): International collaboration between nuclear reaction data centres (NRDC), Nuclear Data Sheets, 120, 272, 2014.
- Ozdoğan H., Uncu Y. A., Sekerci M., Kaplan A., Calculation of double differential neutron cross-sections for the $^{115}\text{In}(a,xn)$ reaction, Applied Radiation and Isotopes, 219, 111713, 2025.
- Özdoğan H., Şekerci M., Kaplan A., Investigation of gamma strength functions and level density models effects on photon induced reaction cross-section calculations for the fusion structural materials ^{46}Ti , ^{51}V , ^{58}Ni and ^{63}Cu , Applied Radiation and Isotopes, 6-10, 2019.
- Özdoğan H., Üncü Y. A., Şekerci M., Kaplan A., Calculation of double differential neutron cross-sections of ^{56}Fe and ^{90}Zr isotopes, Applied Radiation and Isotopes, 199, 110922, 2023.
- Özdoğan H., Üncü Y. A., Şekerci M., Kaplan A., Investigation of $^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)^{211}\text{At}$ reaction route for the production of α -emitter ^{211}At , The European Physical Journal Plus, 139(6), 511, 2024.
- Sublet J. Ch., Koning A. J., Rochman D., Fleming M., Gilbert M., TENDL-2015: Delivering Both Completeness and Robustness, Advances in Nuclear Nonproliferation Technology and Policy Conference, Sept. 25-30, Santa Fe, NM, USA, 2016.

- Şekerci M., Nükleer Reaktör Kontrol Çubuklarında Kullanılan Bazı Malzemeler için Farklı Reaksiyon ve Enerjilerde Parçacık Yayınlanma Spektrumu, Durdurma Gücü, Giricilik Mesafesi ve Tesir Kesiti Hesaplamaları, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Doktora Tezi (Basılmış), 2018.
- Şekerci M., Özdoğan H., Kaplan A., Investigation on the Different Production Routes of ^{67}Ga Radioisotope by Using Different Level Density Models, Moscow University Physics Bulletin, 74(3), 277-281, 2019.
- Üncü Y. A., Özdoğan H., Şekerci M., Kaplan A., Investigation of the production routes of Palladium-103 and Iodine-125 radioisotopes, Radiation Physics and Chemistry, 2023.
- Yettou L., Belgaid M., Belouadah N., Preequilibrium models for ^{58}Ni (n, xp) and ^{60}Ni (n, xp) reactions in neutrons at 8, 9, 9.4, 11 and 14.8 MeV using the EMPIRE and TALYS codes, Applied Radiation and Isotopes, 193, 110643, 2023.
- Yiğit M., (n,2n) cross section calculations for tungsten, tantalum and osmium nuclei, Applied Radiation and Isotopes, 201, 110999, 2023.
- Yiğit M., Kara A., Yılmaz A., A study on interactions of 14.7-MeV protons and 3.6-MeV alphas in ^{93}Nb target, Fusion Science and Technology, 80(2), 156-165, 2024.