



^{151,153}Eu İzotoplarında (p,n) ve (p,3n) Reaksiyonları için Tesir Kesiti Hesaplamaları ve Seviye Yoğunluğu Modellerinin İncelenmesi

Mert ŞEKERCİ¹, Abdullah KAPLAN¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye
*yazışılan yazar e-posta: mertsekerci@sdu.edu.tr

(Alınış: 21.09.2018, Kabul: 05.11.2018, Yayımlanma: 30.11.2018)

Özet: Evropiyum; ince süperiletken yapıların üretilmesi, televizyon ve monitörlerde renklerin elde edilmesi, biyomedikal uygulamalar, brakiterapi ve nükleer reaktör kontrol çubukları gibi farklı alanlarda kullanılan lantanit grubu bir metaldir. Bu çalışmada; deneysel verilere ulaşmanın mümkün olmadığı durumlarda kullanılmak amacıyla geliştirilmiş teorik nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak, ^{151,153}Eu izotoplarının (p,n) ve (p,3n) reaksiyonlarındaki tesir kesiti hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar; farklı teorik modellerin kullanılabilmesi amacıyla geliştirilmiş olan bilgisayar destekli TALYS 1.8 ve EMPIRE 3.2 kodlarında denge ve denge-öncesi modeller seçilerek gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler ile en uyumlu sonuçları üreten model, göreceli varyans analizi ile tespit edilmiştir ve farklı seviye yoğunluğu modellerinin hesaplamalara etkileri araştırılmıştır. Elde edilen teorik hesaplama sonuçları, Uluslararası Deneysel Nükleer Veri Kütüphanesi (EXFOR) veri tabanından alınan deneysel veriler ve TENDL 2017 veri tabanından alınan teorik değerler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Tesir kesiti, Seviye yoğunluğu, TALYS 1.8, EMPIRE 3.2, Evropiyum.

Cross-Section Calculation and Investigation of Level Density Models for (p,n) and (p,3n) Reactions on ^{151,153}Eu Isotopes

Abstract: Europium is a lanthanide group metal used in different areas such as the production of thin superconducting structures, generating the colors on televisions and monitors, biomedical applications, brachytherapy and nuclear reactor control rods. In this study; reaction cross-section calculations of ^{151,153}Eu isotopes on (p,n) and (p,3n) reactions have been carried out using theoretical nuclear reaction models that have developed for the use in cases of being able to reach experimental data. The calculations have been carried out by selecting equilibrium and pre-equilibrium models in computer-aided TALYS 1.8 and EMPIRE 3.2 codes which have been developed for the use of different theoretical models. The model that produces the results that are most compatible with the experimental data has been determined by the analysis of relative variance and the computational effects of different level intensity models were investigated. The obtained theoretical calculation results have been compared with the experimental data taken from International Experimental Nuclear Data Library (EXFOR) database and theoretical data taken from TENDL 2017 database.

Key words: Cross-section, Level density, TALYS 1.8, EMPIRE 3.2, Europium.

1. Giriş

Deneysel çalışmalar kadar, teorik çalışmaların da bilimsel ilerlemeye ve dolaylı diğer alanlara katkı sağladığı bir gerçektir. Birçok alanda olduğu gibi, nükleer fizikte de teorik çalışmaların yadsınamaz bir yeri vardır. Zaman, maliyet ve imkanlar gibi pek çok diğer faktöre bağlı olan deneysel çalışmaların gerçekleştirilememesi gibi durumlarda kullanılmak üzere teorik modeller geliştirilmiştir. Bu sayede; araştırmacıların bir öngörü sahibi olabilmeleri amaçlanmıştır. Nükleer reaksiyon süreçlerinde incelenebilecek birden çok değer bulunmakla birlikte, en çok dikkat çekenlerinden birisi de tesir kesiti ifadesidir. Bu değer; basitçe bir reaksiyonunu meydana gelebilme olasılığı olarak tanımlanabilir ve sayısal olarak bu değer bilmesi sayesinde reaksiyon süreci ve detayları yorumlanabilir. Tesir kesitinin deneysel olarak ölçülebilmesi mümkün olmakla birlikte, bu değer teorik olarak hesaplanma yöntemi de literatürde kabul görmektedir. Tesir kesiti ifadesinin teorik olarak hesaplanmasında birçok etki olmakla birlikte, dikkat çeken bir tanesi olarak seviye yoğunluğu gösterilebilir. Tesir kesiti hesaplamalarına seviye yoğunluğu etkisinin anlaşılabilmesi için de geliştirilmiş farklı modeller mevcuttur. Teorik modellerin kullanımı; karmaşık ve çok adımlı matematiksel işlemler içermeleri, hedef ve mermi parçacıkların özelliklerinin değişken olması, pek çok hesaplama parametresine sahip olmaları ve uzun süreli hesaplamalar gerektirdikleri için hızlı, pratik ve doğruluğu kabul görmüş bilgisayar destekli hesaplama kodlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu amaçla; CEM95, ALICE/ASH, PCROSS, TALYS ve EMPIRE gibi pek çok program geliştirilmiştir [1-6].

Bu çalışmada; ¹⁵¹Eu(p,n)¹⁵¹Gd, ¹⁵³Eu(p,3n)¹⁴⁹Gd, ¹⁵³Eu(p,n)¹⁵³Gd ve ¹⁵³Eu(p,3n)¹⁵¹Gd reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamaları denge ve denge-öncesi modeller kullanılarak TALYS 1.8 [7] ve EMPIRE 3.2 [8] kodları ile gerçekleştirilmiş ayrıca seviye yoğunluğunun etkisi araştırılmıştır. Çeşitli kullanım ve uygulamalara sahip olan Evropiyum, nadir toprak gurubu elementlerindedir ve en aktif lantanit olarak bilinir. En bilinen kullanım alanı; iyi nötron tutuculukları nedeniyle nükleer reaktörlerin kontrollü şekilde çalışmaları için en önemli bileşenlerden biri olan kontrol çubukları yapısıdır. Bilinen diğer bazı kullanım alanları olarak; ince süperiletken yapıların üretimi, enerji tasarruflu ampullerde gün ışığı üretilmesi, televizyonlarda ve monitörlerde renklerin eldesi gösterilebilir [9]. Ayrıca; tıbbi görüntüleme sistemlerinin X-ışını detektörlerinde evropiyum aktif fosfor kullanımı, biyomedikal uygulamalar için lüminesans nanopartiküllerin üretimi ve brakiterapi gibi alanlarda kullanımına yönelik çalışmalar da mevcuttur [10-12].

Hesaplamalarda; denge-öncesi reaksiyon modeli olarak İki Bileşenli Eksiton Model [7] kullanılırken, denge modeli olarak Hauser-Feshbach Modeli [13] seçilmiştir. Seviye yoğunluğu etkisinin araştırılması için ise; TALYS 1.8 kodunda Sabit Sıcaklık Fermi Gaz [14], Genelleştirilmiş Süperakışkan [15] ve Sabit Sıcaklık Mikroskopik Hartree-Fock-Bogoliubov Modelleri [16] ile EMPIRE 3.2 kodunda sabit sıcaklık modeli olarak da bilinen Gilbert-Cameron [17], Genelleştirilmiş Süperakışkan ve Mikroskopik Hartree-Fock-Bogoliubov [18] modelleri kullanılmıştır. Elde edilen tesir kesiti hesaplamalarının; literatürde mevcut deneysel veriler ile kıyaslanabilmesi için Uluslararası Deneysel Nükleer Veri Kütüphanesi (EXFOR)'nden [19] alınan veriler, teorik hesaplama sonuçları ile kıyaslanabilmesi için ise TENDL 2017'den [20] alınan veriler kullanılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

^{151,153}Eu izotoplarının (p,n) ve (p,3n) reaksiyonlarına ait tesir kesiti hesaplamalarında TALYS 1.8 ve EMPIRE 3.2 kodları kullanılmıştır. TALYS kodu; nükleer reaksiyonlar ve mekanizmaları hakkındaki araştırmalara yönelik teorik hesaplamaların, tek bir yazılım paketi ile sağlanabilmesi amacıyla geliştirilmeye başlanmış bir hesaplama kodudur. Mermi parçacık olarak proton, alfa, döteron ve triton gibi yüklü parçacıklara ek olarak nötron ve foton kullanımını mümkün kılan kodun bu çalışmada da kullanılan TALYS 1.8 versiyonunda mermi parçacık enerjisi 1 keV-1 GeV aralığında seçilebilmektedir. TALYS; kütle numarası 12 ve daha büyük olan hedef çekirdekler için belirtilen mermi parçacıkları ile optiksel modeller, seviye yoğunluğu modelleri, fisyon reaksiyon modelleri, direkt reaksiyon modelleri, denge ve denge-öncesi reaksiyon modellerini kullanarak hesaplamalar gerçekleştirebilmektedir [7]. Bu çalışmada; TALYS'in kaynak kodlamasında mevcut modeller arasından denge hesaplamaları için Hauser-Feshbach, denge-öncesi hesaplamalar için ise İki Bileşenli Eksiton modelleri kullanılmıştır.

TALYS koduna benzer şekilde EMPIRE'da nükleer reaksiyon araştırmalarına yönelik teorik hesaplamalarda farklı modellerin kullanılmasına olanak sağlayan modüler bir programdır. EMPIRE; hesaplamalarda optiksel, çok adımlı direk reaksiyon, çok adımlı bileşik çekirdek reaksiyonu, eksiton ve tam özellikli Hauser-Feshbach gibi modeller kullanılmasına olanak verir. TALYS kodunun sağladığı mermi parçacık seçeneklerine ek olarak, EMPIRE'da bazı ağır ve hafif iyonlar da mermi parçacık olarak seçilebilmektedir. Bu parçacıklar için enerji aralığı, hesaplamalarda kullanılacak teorik modellerin izinli aralığında seçilen parçacığa bağlı olarak rezonans bölgesinden başlayarak birkaç yüz MeV'e kadar çıkabilmektedir [8]. Bu çalışma kapsamında EMPIRE kodu ile tesir kesiti hesaplamaları için Hauser-Feshbach denge modeli ile PCROSS Eksiton [21] denge-öncesi modeli kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen tesir kesiti hesaplaması sonuçlarının, literatürden alınan deneysel veriler ile uyumluluğunun araştırılması için görelî varyans analizi, Denklem 1'e [22] göre gerçekleştirilmiş ve en uyumlu kod ile model tespit edilmiştir.

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

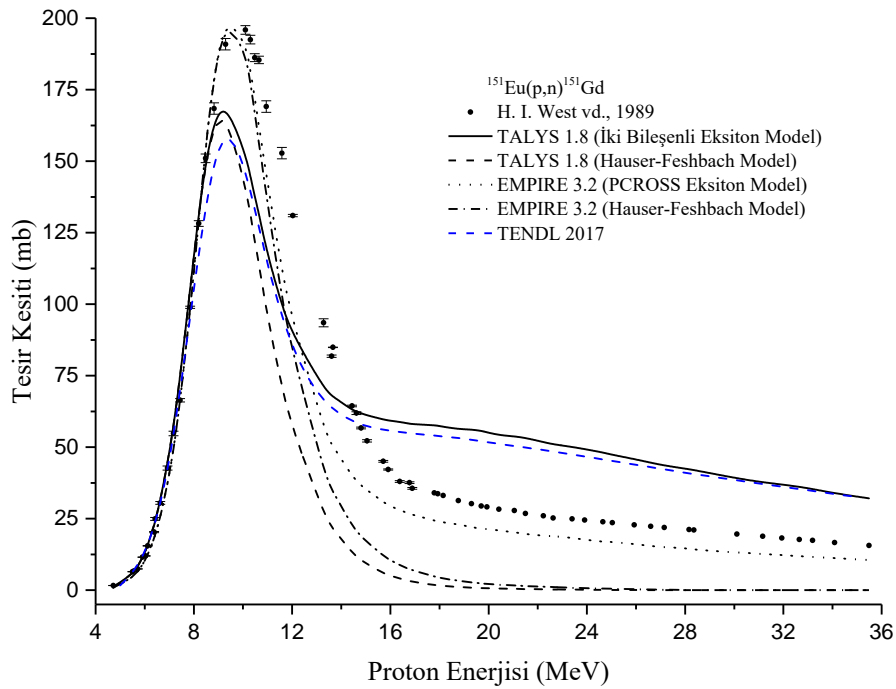
Denklem 1'de $\sigma_i^{\text{hesaplama}}$ hesaplama sonucunda elde edilen tesir kesiti değerlerini, $\sigma_i^{\text{deneysel}}$ literatürden alınan tesir kesiti verileri ve N ise mevcut veri sayısını ifade etmektedir. Tesir kesiti hesaplamalarına seviye yoğunluğunun etkisinin araştırılması aşaması; görelî varyans analizi ile en küçük D değerine sahip modelin sabit tutularak seviye yoğunluğu modelleri ile hesaplamaların tekrarlanması ile gerçekleştirilmiştir. Temel seviye yoğunluğu modeli, diğer seviye yoğunluğu modellerinin de türetilmesinde kullanılmış olan Fermi Gaz Modelidir. Bu model; taban durumunda proton ve nötronların en düşük enerji durumlarını işgal ettiğini ve uyarım durumunda daha yüksek seviyeleri doldurduğunu varsayar. Bu yaklaşımla Fermi Gaz Modeli; düşük enerjilerde, yüksek enerjilerde olduğu kadar başarılı sonuçlar üretememektedir. Bu sorunun aşılması; enerji bölgesini, düşük ve yüksek olacak şekilde iki bölüme ayıran sabit sıcaklık yaklaşımı ile sağlanmıştır. Bu yaklaşımda, 0 MeV'den eşleşme enerjilerine kadar olan enerji aralığında sabit sıcaklık kanunu uygulanırken, eşleşme enerjisinden yüksek olan enerjilerde ise Fermi Gaz Modeli uygulanmaktadır. Genelleştirilmiş Süperakışkan Modeli ise, Bardeen Cooper-Schrieffer teorisine göre süperiletkenlik korelasyonları olan düşük enerjili süper

akışkan davranışından, Fermi Gaz Modeli tarafından tanımlanan yüksek enerji bölgesine bir faz geçişi ile karakterize edilir. Literatürde mevcut olan bu modellere ek olarak; nükleer reaksiyonlarla ilgili hesaplamalar için geliştirilmiş modellerin ihtiyaç duyduğu girdi parametrelerinin bir arada sağlanması amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiş olan mikroskopik bütünleştirici yaklaşımlarla oluşturulmuş modeller de mevcuttur. Bu modellerde, Hartree-Fock-Bogoliubov yönteminden elde edilen tek parçacık seviyesinde tablolar kullanılmaktadır [23].

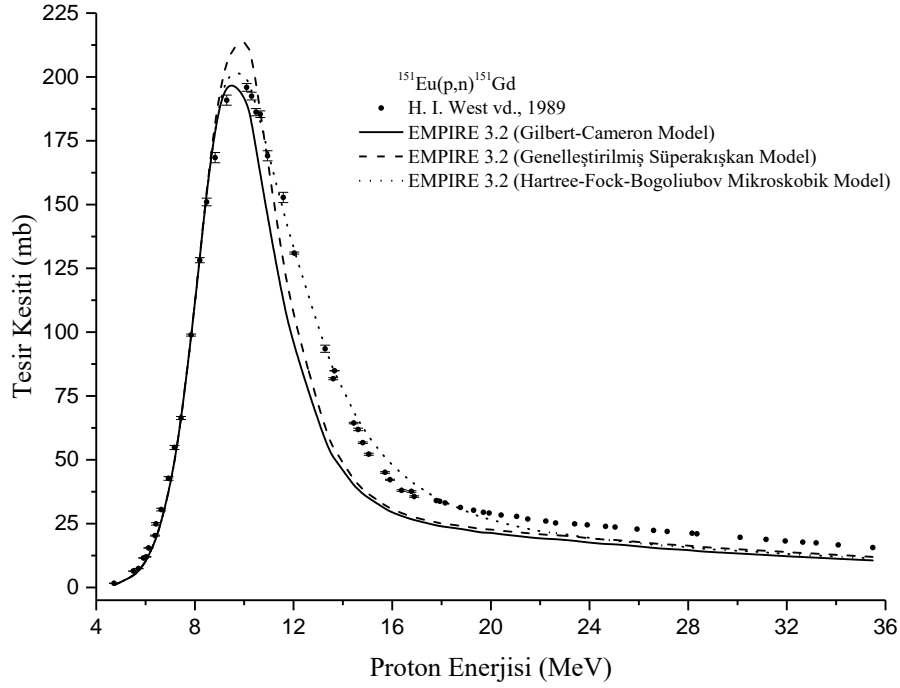
Bu çalışmada; TALYS ve EMPIRE kodlarında kullanılması mümkün olan seviye yoğunluğu hesaplama modellerden Sabit Sıcaklık Fermi Gaz, Genelleştirilmiş Süperakışkan ve Sabit Sıcaklık Mikroskopik Hartree-Fock-Bogoliubov Modelleri TALYS 1.8 kodunda; Gilbert-Cameron, Genelleştirilmiş Süperakışkan ve Mikroskopik Hartree-Fock-Bogoliubov modelleri ise EMPIRE 3.2 kodunda kullanılmıştır.

3. Bulgular

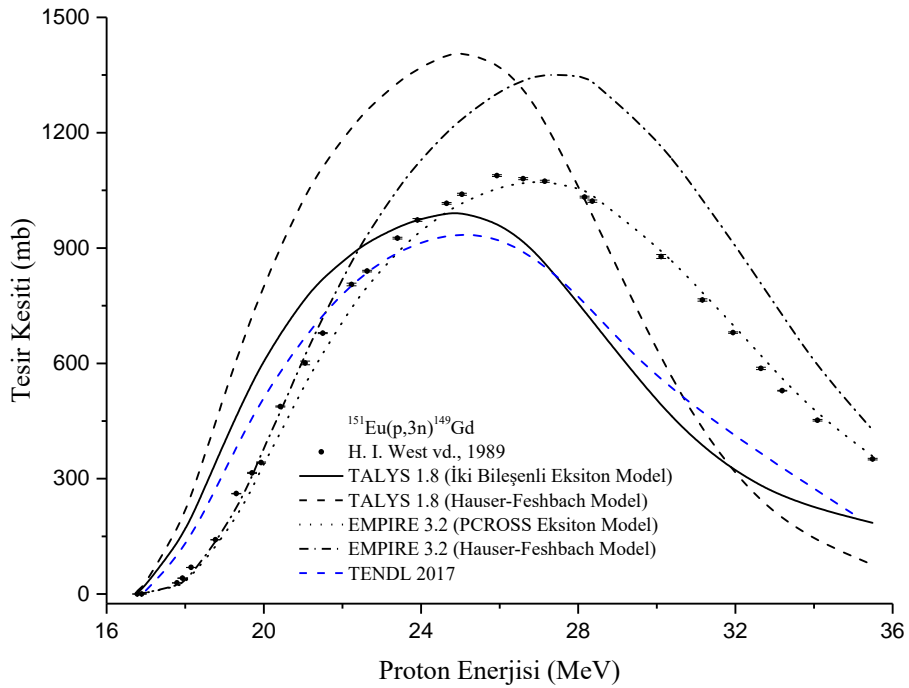
Bu çalışma kapsamında $^{151}\text{Eu}(p,n)^{151}\text{Gd}$, $^{151}\text{Eu}(p,3n)^{149}\text{Gd}$, $^{153}\text{Eu}(p,n)^{153}\text{Gd}$ ve $^{153}\text{Eu}(p,3n)^{151}\text{Gd}$ reaksiyonları için tesir kesiti hesaplamaları TALYS 1.8 ve EMPIRE 3.2 kodları ile denge ve denge-öncesi reaksiyon modelleri kullanılarak tamamlanmıştır. Ayrıca; her bir reaksiyon özelinde görelî varyans analizi yöntemi ile belirlenen en uyumlu kod ve kullanılan model ilgili reaksiyon için sabit tutularak seviye yoğunluğu modellerinin tesir kesiti hesaplamalarına etkisi araştırılmıştır. Hesaplanan tesir kesiti değerlerinin literatürden alınmış deneysel veriler ile karşılaştırması ve seviye yoğunluğu modelleri ile yapılan tesir kesiti hesaplamaları Şekil 1-8’de gösterilmiştir. Tesir kesiti hesaplamalarında deneysel veriler ile en uyumlu kod ve modelin tespiti için gerçekleştirilmiş olan görelî varyans analizi sonuçları ise Tablo 1’de verilmiştir.



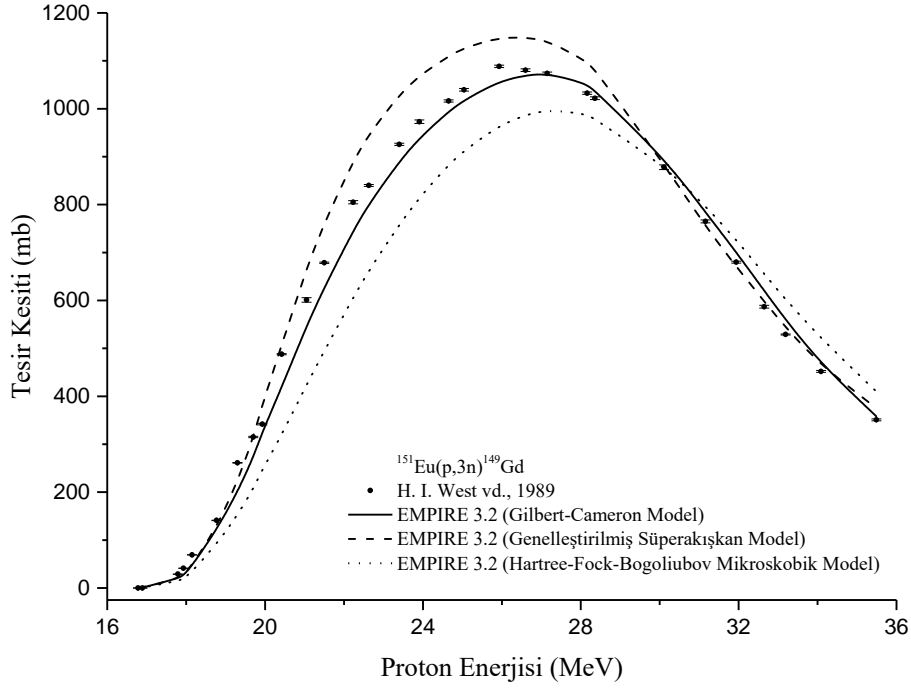
Şekil 1. $^{151}\text{Eu}(p,n)^{151}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamaları ile deneysel verilerin karşılaştırması



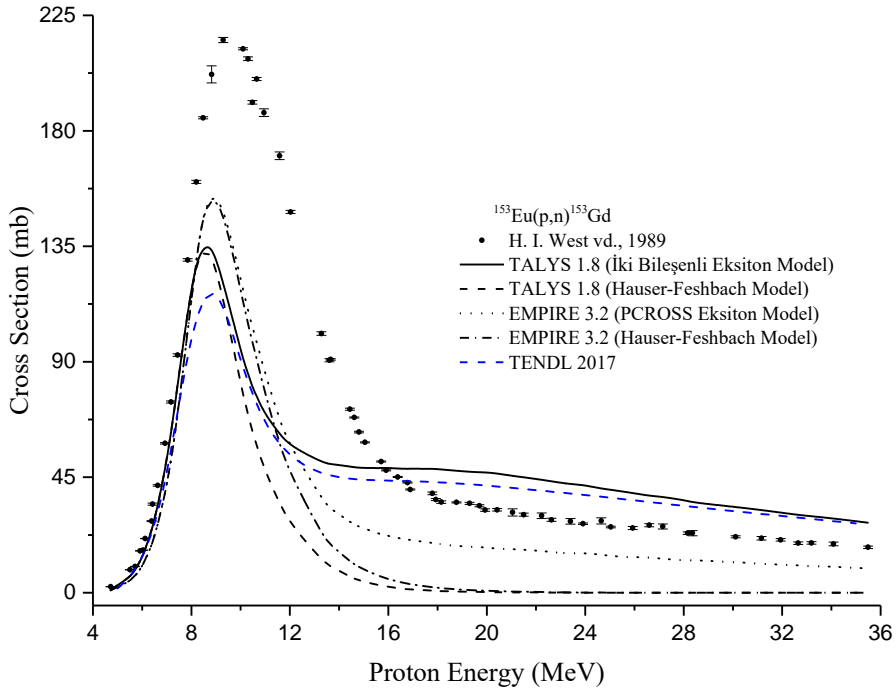
Şekil 2. $^{151}\text{Eu}(p,n)^{151}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarında seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırması



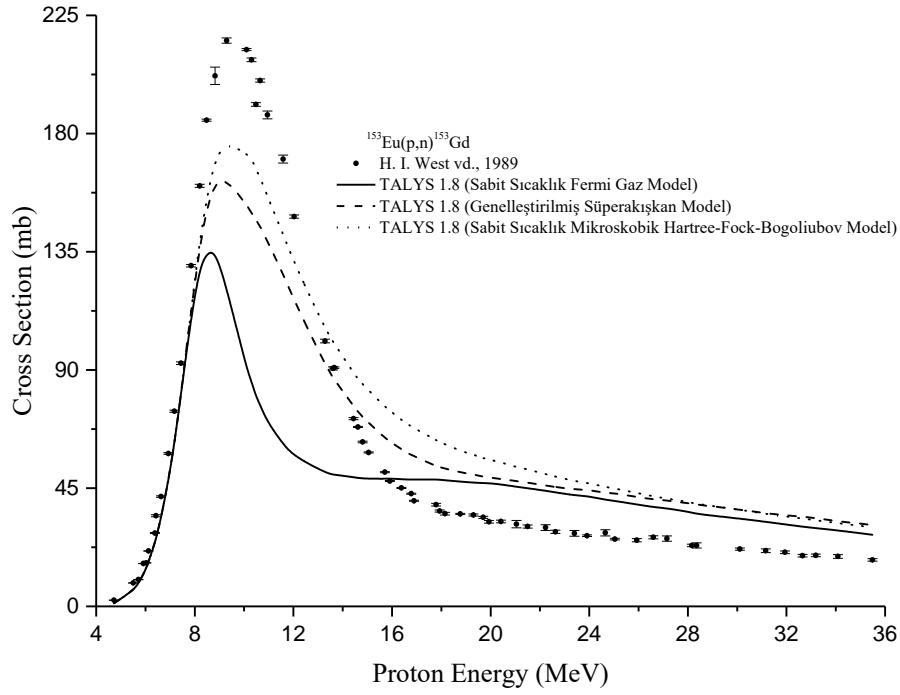
Şekil 3. $^{151}\text{Eu}(p,3n)^{149}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamaları ile deneysel verilerin karşılaştırması



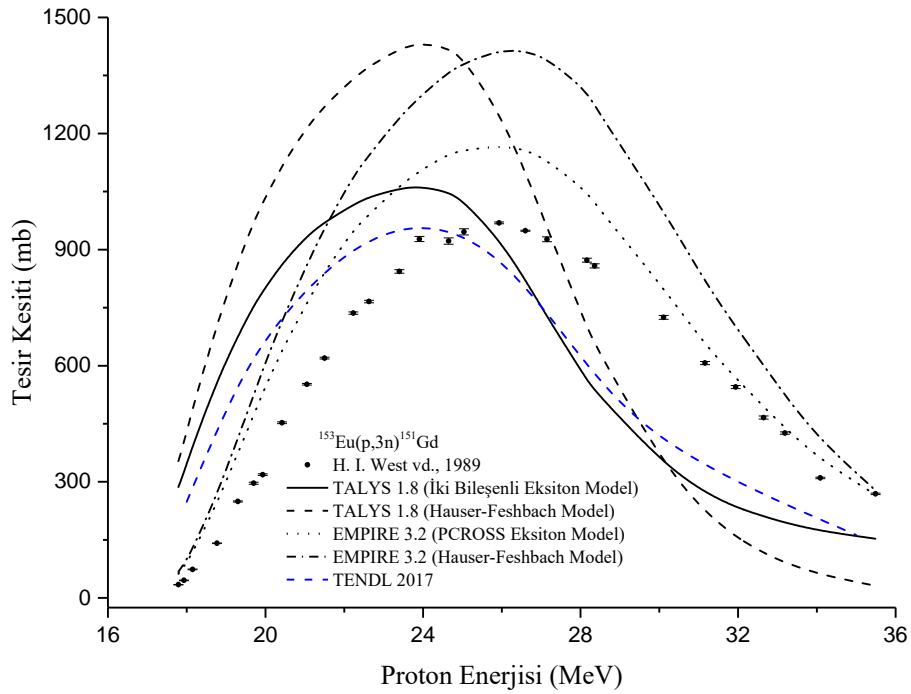
Şekil 4. $^{151}\text{Eu}(p,3n)^{149}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarında seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırması



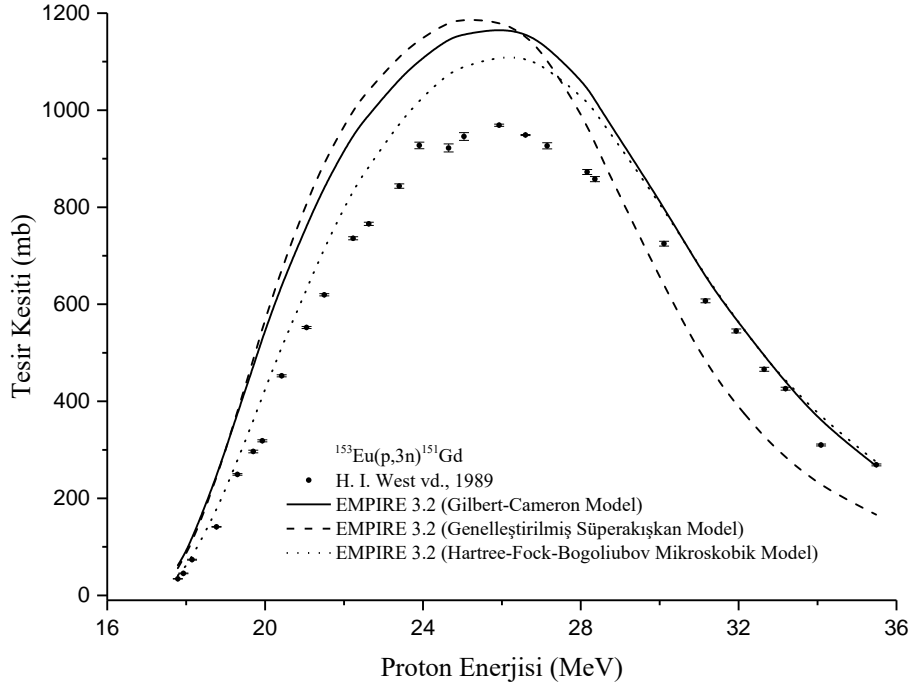
Şekil 5. $^{153}\text{Eu}(p,n)^{153}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamaları ile deneysel verilerin karşılaştırması



Şekil 6. $^{153}\text{Eu}(p,n)^{153}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarında seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırması



Şekil 7. $^{153}\text{Eu}(p,3n)^{151}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamaları ile deneysel verilerin karşılaştırması



Şekil 8. $^{153}\text{Eu}(p,3n)^{151}\text{Gd}$ reaksiyonu tesir kesiti hesaplamalarında seviye yoğunluğu modellerinin karşılaştırması

Tablo 1. Tesir kesiti hesaplamalarının göreceli varyans analizi sonuçları

Reaksiyonlar	TALYS 1.8	TALYS 1.8	EMPIRE 3.2	EMPIRE 3.2
	İki Bileşenli Eksiton Model	Hauser-Feshbach Model	PCROSS Eksiton Model	Hauser-Feshbach Model
$^{151}\text{Eu}(p,n)^{151}\text{Gd}$	0,52098	0,65341	0,24474	0,60568
$^{151}\text{Eu}(p,3n)^{149}\text{Gd}$	3,65347	4,71468	0,14919	0,26358
$^{153}\text{Eu}(p,n)^{153}\text{Gd}$	0,37880	0,75212	0,46044	0,74597
$^{153}\text{Eu}(p,3n)^{151}\text{Gd}$	1,20738	1,69207	0,31416	0,51849

4. Sonuç ve Yorum

$^{151}\text{Eu}(p,n)^{151}\text{Gd}$ reaksiyonu için gerçekleştirilen tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırması, Şekil 1’de gösterilmiştir. Genel olarak; kullanılan tüm model hesaplamalarının ve TENDL 2017 verilerinin, deneysel verilerin oluşturduğu geometriye benzer bir yapı sergiledikleri söylenebilecek olsa da, TALYS İki Bileşenli Eksiton ve Hauser-Feshbach modelleri, kabaca 8-12 MeV aralığında olduğu görülen pik bölgesinde deneysel verilerin altında sonuçlar üretmişlerdir. EMPIRE kodunun her iki modeli de bu bölgedeki pik yapısını daha yakından takip etmiştir. Yaklaşık olarak 12 MeV’den sonra tüm hesaplama sonuçları, deneysel verilerde olduğu gibi artan mermi parçacık enerjisi ile azalan tesir kesiti değerleri üretmiş olmalarına rağmen; TALYS 1.8 İki Bileşenli Eksiton model hesaplamaları ve TENDL 2017 verileri deneysel değerlerin üzerinde, diğer model sonuçları ise deneysel verilerin altında seyretmiştir. İncelenen tüm enerji aralığı düşünüldüğünde, deneysel veriler ile en uyumlu sonuçları veren modelin EMPIRE 3.2 PCROSS Eksiton model olduğu Şekil 1’den açıkça görülmektedir. Bu durum; Tablo 1 ile verilen göreceli varyans analizi sonuçları ile de doğrulanmıştır. En düşük göreceli varyans analizi değeri 0,24474 ile EMPIRE 3.2 PCROSS Eksiton modelinde elde edilmiştir. Bu reaksiyona ait seviye yoğunluğu hesaplamaları ise Şekil 2’de gösterilmiştir. Seçilen

seviye yoğunluğu modelleri arasından Genelleştirilmiş Süperakışkan modeli, pik bölgesinden önce Gilbert-Cameron model ile neredeyse aynı sonuçları vermiş ancak pik bölgesinde hem Gilbert-Cameron model sonuçlarından hem de deneysel verilerden daha yüksek değerlerde sonuçlar üretmiştir. Ayrıca, bu bölgeden sonra Genelleştirilmiş Süperakışkan model ile elde edilen sonuçlar, Gilbert-Cameron model sonuçlarından sürekli olarak daha yüksek değerlerde seyretmiştir. Mikroskopik Hartree-Fock-Bogoliubov hesaplamaları ise bu iki model hesaplamaların kıyasla deneysel verilere tüm enerji aralığında daha yakından ve uyumlu sonuçlar üretmiştir.

Şekil 3, ¹⁵¹Eu(p,3n)¹⁴⁹Gd reaksiyonu için gerçekleştirilen tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ve TENDL 2017 sonuçları ile karşılaştırmasını göstermektedir. Bu reaksiyona ait sonuçlar; Şekil 3'den ve görelî varyans analizi hesaplamalarını içeren Tablo 1'den incelendiğinde, deneysel veriler ile en uyumlu modelin ¹⁵¹Eu(p,n)¹⁵¹Gd reaksiyonunda olduğu gibi EMPIRE 3.2 PCROSS Eksiton model olduğu görülmektedir. Deneysel verilerin oluşturdukları çan yapısı; tüm modeller tarafından farklı yarı yükseklikteki tam genişlik ve pik değerleri ile sergilenmiş olmasına rağmen, tüm enerji aralığında EMPIRE 3.2 PCROSS Eksiton model hesaplamaları deneysel verilere çok daha yakında olacak sonuçlar vermiştir. Pik değerinde en düşük tesir kesiti sonuçları ise TENDL 2017 verileri ile oluşmuştur. Şekil 4 ile gösterilen ve ¹⁵¹Eu(p,3n)¹⁴⁹Gd reaksiyonu için gerçekleştirilen seviye yoğunluğu hesaplamaları, tesir kesiti hesaplamalarında en düşük görelî varyans analizi sonucunun elde edildiği EMPIRE 3.2 kodundaki farklı seviye yoğunluğu modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Farklı modellerin kullanılması ile gerçekleştirilen hesaplamalarda, her üç model de deneysel verilerin ortaya koyduğuna benzer birer geometrik yapı oluşturmuşlardır. Ancak; yaklaşık olarak 18 MeV'den sonra belirginleşmeye başlayan hesaplama sonuçlarının deneysel verilere göre konumları, yaklaşık olarak 30 MeV'e kadar benzer şekilde sürmüş iken 30 MeV'den sonra farklılaşmıştır. 18-30 MeV enerji aralığında; Genelleştirilmiş Süperakışkan model sonuçları deneysel verilerden ve diğer model hesaplamalarından daha yüksek değerlerde iken Gilbert-Cameron model ve Mikroskopik Hartree-Fock-Bogoliubov hesaplamalarının ise deneysel verilerden daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Ancak; yaklaşık olarak 30 MeV'den sonra Mikroskopik Hartree-Fock-Bogoliubov hesaplama sonuçlarının hem deneysel verilerden hem de Gilbert-Cameron model hesaplamalarından daha yüksek değerlerde oldukları anlaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında ve Şekil 4'ün incelenmesi neticesinde; bu reaksiyon özelinde deneysel verilere göre incelenen enerji aralığında en uyumlu seviye yoğunluğu modelinin Gilbert-Cameron modeli olduğu söylenebilir.

¹⁵³Eu(p,n)¹⁵³Gd reaksiyonuna için elde edilen tesir kesiti hesaplamaları sonuçları ve deneysel veriler Şekil 5'de, seviye yoğunluğu hesaplamaları ise Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 5'de gösterildiği gibi, ne bu reaksiyon için gerçekleştirilen hesaplamalarda kullanılan modeller ne de TENDL 2017 verileri deneysel değerlerin oluşturduğu pik yapısını yakından takip edememiş, ancak deneysel verilere benzer bir geometri sergilemişlerdir. 16 MeV enerji bölgesinden sonra TENDL 2017 ve TALYS 1.8 İki Bileşenli Eksiton model sonuçlarının, deneysel verilerden daha büyük değerlerde sonuçlar üretmesi dışında tüm model sonuçları incelenen enerji bölgesi aralığının tamamında deneysel verilerden daha düşük tesir kesiti değerleri hesaplamışlardır. EMPIRE 3.2 ve TALYS 1.8 Hauser-Feshbach modelleri, yaklaşık olarak 16 MeV'den sonra birbirleriyle neredeyse aynı sonuçları üretmiş ve tesir kesiti hesaplamalarını sıfıra yakın değerlerde elde etmişlerdir. Tüm model hesaplamalarının sonuçları dikkate alınarak gerçekleştirilen ve Tablo 1'de de verilen görelî varyans analizi sonuçlarına göre deneysel

veriler ile en uyumlu kod ve model TALYS 1.8 İki Bileşenli Eksiton model olmuştur. Bu nedenle, seviye yoğunluğu hesaplamaları bu reaksiyon için TALYS 1.8 kodu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen hesaplama sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir. Pik yapısının oluştuğu ve artan mermi parçacık enerjisiyle hesaplanan tesir kesiti değerinde artışın görüldüğü bölgede yaklaşık 8 MeV'e kadar tüm seviye yoğunluğu modelleri; birbirleriyle neredeyse aynı değerlerde hesaplama sonuçları üretirken, maksimum tesir kesiti değerlerinin hesaplanmasında deneysel verilere göre daha düşük değerlerde sonuçlar vermişlerdir. Pik yapısında ve sonrasında yaklaşık 14 MeV'e kadar deneysel verilere en uyumlu sonuçların Sabit Sıcaklık Mikroskobik Hartree-Fock-Bogoliubov hesaplamaları ile elde edildiği görülmektedir. 16 MeV'den sonra ise tüm modellerin hesaplamaları deneysel verilerin üzerinde olacak şekilde sonuçlanmıştır. Tüm enerji aralığı dikkate alındığında, seviye yoğunluğu modellerinin deneysel verilere benzeyen birer geometri oluşturmayı başardıkları hesaplama sonuçlarında, deneysel veriler ile en uyumlu seviye yoğunluğunun Genelleştirilmiş Süperakışkan model ile elde edildiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında incelenen son reaksiyon; ¹⁵³Eu(p,3n)¹⁵¹Gd reaksiyonudur. Bu reaksiyon için elde edilmiş tesir kesiti hesaplamaları Şekil 7'de verilmiştir. ¹⁵¹Eu(p,3n)¹⁴⁹Gd reaksiyonunda olduğu gibi bu reaksiyonda da, tüm tesir kesiti hesaplamaları ve TENDL 2017 verileri deneysel değerlerinki gibi birer çan yapısı oluşturmuşlar ancak; farklı yarı yükseklikteki tam genişlik ve pik değerleri sergilemişlerdir. Bunun gibi görsel olarak yorumlanması zor olan durumlarda, son derece kullanışlı olan görelî varyans analizi hesaplaması sayesinde Tablo 1'de de verilmiş değerlerde görüleceği üzere bu reaksiyon için deneysel veriler ile en uyumlu hesaplama sonuçlarının EMPIRE 3.2 PCROSS Eksiton model ile elde edildiği ortaya konulmuştur. ¹⁵³Eu(p,3n)¹⁵¹Gd reaksiyonu için seviye yoğunluğu hesaplamaları EMPIRE 3.2 kodu kullanılarak tamamlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir. Her üç modelin de hesaplama sonuçları deneysel verilerine benzer şekilde bir harmoni sergilemişler ve deneysel verilerin ortaya çıkardığı çan yapısını daha yüksek pik tesir kesiti değeri hesaplamaları elde ederek sergilemişlerdir. Pik bölgesinden sonra, artan mermi parçacık enerjisiyle düşen tesir kesiti değeri hesaplamalarını en fazla sergileyen model, sonuçlarını deneysel verilerin de altında olacak şekilde üreten Genelleştirilmiş Süperakışkan model olmuştur. Bu azalış trendinde Gilbert-Cameron model ve Mikroskobik Hartree-Fock-Bogoliubov hesaplamaları birbirlerine oldukça yakın değerlerde sonuçlar üretmişlerdir. Deneysel verilere en yakın pik yapısı, düşük enerjilerde de deneysel verilere en yakın sonuçları üretmiş olan Mikroskobik Hartree-Fock-Bogoliubov hesaplamaları ile elde edilmiştir. Bu reaksiyon bazında tüm enerji aralığı düşünüldüğünde, deneysel veriler ile en uyumlu sonuçların Mikroskobik Hartree-Fock-Bogoliubov hesaplamaları ile elde edildiği görülmektedir.

Bu çalışma ile deneysel araştırmaların farklı faktörler nedeniyle gerçekleştirilmesinin zor olduğu veya mümkün olmadığı durumlarda, literatürde kabul görmüş teorik modellerin kullanılarak araştırmalara devam edilebileceğinin ve bu tür çalışmaların araştırmacılara sağlayacağı öngörüler nedeniyle yadsınamaz derecede önemli olduğu ortaya konulmaya çalışılmıştır. Pek çok uygulama alanı olan ve farklı alanlarda kullanım araştırmaları devam eden ^{151,153}Eu izotoplarına yönelik deneysel verilerin uygun olduğu enerji aralığında gerçekleştirilen çalışmada; ¹⁵¹Eu(p,n)¹⁵¹Gd, ¹⁵¹Eu(p,3n)¹⁴⁹Gd ve ¹⁵³Eu(p,3n)¹⁵¹Gd reaksiyonlarına yönelik tesir kesiti hesaplamalarının EMPIRE 3.2 PCROSS Eksiton modeli, ¹⁵³Eu(p,n)¹⁵³Gd reaksiyonuna ait tesir kesiti hesaplamalarının ise TALYS 1.8 İki Bileşenli Eksiton modeli ile deneysel verilere uyumlu şekilde

hesaplanabileceği gösterilmiştir. Bu verilerin elde edilmesi; farklı uygulama alanlarında kullanılacak şekilde materyal geliştirmeye ve teorik veri tabanları oluşturmaya yönelik çalışmalara fayda sağlayabilecektir. Ayrıca; tesir kesiti hesaplamalarında önemli bir yeri olan seviye yoğunluğu durumlarının detaylıca incelenmesi ve farklı seviye yoğunluğu modelleri ile bu modellerdeki farklı parametrelerin incelenerek optimize edilmesi çalışmalarının sürdürülmesinin teorik modellerin deneysel verilere daha da yakın sonuçlar elde edilecek şekilde geliştirilmesine katkı sağlayacağı da anlaşılmıştır.

Kaynakça

- [1] H. Özdoğan, M. Şekerci, İ. H. Sarpün, and A. Kaplan, "Investigation of level density parameter effects on (p,n) and (p,2n) reaction cross-sections for the fusion structural materials ⁴⁸Ti, ⁶³Cu and ⁹⁰Zr," *Appl. Radiat. Isot.* vol. 140, pp. 29-34, 2018.
- [2] İ. H. Sarpün, H. A. Yalım, R. Ünal, B. Oruncak, A. Aydın, A. Kaplan, and E. Tel, "Determination of (n,2n) Reaction Cross Sections for Some Nuclei with Asymmetry Parameter," *J. Fusion Energ.* vol. 29, pp. 387-394, 2010.
- [3] A. Aydın, H. A. Yalım, E. Tel, B. Şarer, R. Ünal, İ. H. Sarpün, A. Kaplan, and M. Dağ, "Level density parameter dependence of the fission cross sections of some subactinide nuclei induced by protons with the incident energy up to 250 MeV," *Ann. Nucl. Energy* vol. 36, pp. 1307-1312, 2009.
- [4] A. Aydın, G. Türeci, E. Tel, and A. Kaplan, "Investigation of deuteron emission spectra at 62 MeV proton incident energy," *J. Fusion Energ.* vol. 29, pp. 327-331, 2010.
- [5] A. Aydın, H. Pekdoğan, A. Kaplan, İ. H. Sarpün, E. Tel, and B. Demir, "Comparison of level density models for the ^{60,61,62,64}Ni(p,n) reactions of structural fusion material nickel from threshold to 30 MeV," *J. Fusion Energ.* vol. 34, pp. 1105-1108, 2015.
- [6] A. Kaplan, E. Tel, E. G. Aydın, A. Aydın, and M. Yılmaz, "Spallation neutron emission spectra in medium and heavy target nuclei by a proton beam up to 140 MeV energy," *Appl. Radiat. Isot.* vol. 67, pp. 570-576, 2009.
- [7] A. J. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, "TALYS-1.8 A Nuclear Reaction Program," <http://www.talys.eu/fileadmin/talys/user/docs/talys1.8.pdf>, 2015.
- [8] M. Herman, R. Capote, M. Sin, A. Trkov, B. V. Carlson, P. Obložinsk, C. M. Mattoon, H. Wienkey, S. Hoblit, Young-Sik Cho, G. P. A. Nobre, V. Plujko and V. Zerkin, *EMPIRE-3.2 MALTA Modular System for Nuclear Reaction Calculations and Nuclear Data Evaluation, User's Manual*, 2013.
- [9] Royal Society of Chemistry, *Periodic Table*, <http://www.rsc.org/periodic-table/element/63/europium>. Erişim Tarihi:06.08.2018
- [10] I. Kandarakis, D. Cavouras, G. S. Panayiotakis, D. Triantis, and C. D. Nomicos, "Europium-activated phosphors for use in X-ray detectors of medical imaging systems," *Eur. Radiol.*, vol. 8, pp. 313-318, 1998.
- [11] S. S. Syamchand and G. Sony, "Europium enabled luminescent nanoparticles for biomedical applications," *J. Lumin.*, vol. 165, pp. 190-215, 2015.
- [12] S. L. Adelman, "Europium-152: A novel and economical isotope for use in Brachytherapy", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. L1277-L1279, 1998.
- [13] W. Hauser and H. Feshbach, "The inelastic scattering of neutrons," *Phys. Rev.*, vol. 87, pp. 366-373, 1952.
- [14] A. V. Ignatyuk, K. K. Istekov, and G. N. Smirenkin, "The role of collective effects in the systematics of nuclear level densities," *Yad. Fiz.*, vol. 29, pp. 875-883, 1979.
- [15] A. V. Ignatyuk, G. N. Smirenkin, and A. S. Tishin, "Phenomenological description of the energy dependence of the level density parameter," *Yad. Fiz.*, vol. 21, pp. 485-490, 1975.
- [16] S. Hilaire, M. Girod, S. Goriely, and A. J. Koning, "Temperature-dependent combinatorial level densities with the D1M Gogny force," *Phys. Rev. C.*, vol. 86, pp. 064317(1)- 064317(10), 2012.
- [17] A. Gilbert and A. G. W. Cameron, "A composite nuclear-level density formula with shell corrections", *Can. J. Phys.*, vol. 43, pp. 1446-1496, 1965.
- [18] S. Goriely, M. Samyn, and J. M. Pearson, "Further explorations of Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov mass formulas. VII. Simultaneous fits to masses and fission barriers," *Phys. Rev. C.*, vol. 75, pp. 064312(1)-064312(7), 2007.
- [19] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. Database Version of 2018-06-29, <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Erişim Tarihi:09.08.2018
- [20] TENDL 2017: TALYS based evaluated nuclear data library. Release Date: December 30, 2017. Erişim Tarihi: 11.08.2018

- [21] J. J. Griffin, “Statistical model of intermediate structure,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 17, pp. 478-481, 1966.
- [22] N. V. Kurenkov, V. P. Lunev, and Yu. N. Shubina, “Evaluation of calculation methods for excitation functions for production of radioisotopes of iodine, thallium and other elements,” *Appl. Radiat. Isot.* vol. 50, pp. 541-549, 1999.
- [23] R. Capote, M. Herman, P. Oblozinsky, P.G. Young, S. Goriely, T. Belgia, A.V. Ignatyuk, A.J. Koning, S. Hilaire, V.A. Plujko, M. Avrigeanu, O. Bersillon, M.B. Chadwick, T. Fukahori, Zhigang Ge, Yinlu Han, S. Kailas, J. Kopecky, V.M. Maslov, G. Reffo, M. Sin, E.Sh. Soukhovitskii, and P. Talou, “RIPL - Reference input parameter library for calculation of nuclear reactions and nuclear data evaluations,” *Nucl. Data Sheets*, vol. 110, pp. 3107-3214, 2009.

Mert ŞEKERCİ, mertsekerci@sdu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0870-0506>

Abdullah KAPLAN, abduhkaplan@sdu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2990-0187>