



Füzyon Reaktörü Yapısal Malzemelerinde Kullanılan Bazı Elementler için Proton Girişli Reaksiyonlarda ^3He Yayınlanma Spektrumlarının İncelenmesi

Hasan ÖZDOĞAN^{*1}, Mert ŞEKERCİ², Abdullah KAPLAN²

¹Akdeniz Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Biyofizik Anabilim Dalı, 07058, Antalya, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

*yazışılan yazar e-posta: hasanozdogan@akdeniz.edu.tr

(Alınış: 23.01.2018, Kabul: 16.04.2018, Yayınlanma: 31.05.2018)

Özet: Reaksiyon tesir kesiti bir nükleer reaksiyonun gerçekleşme ihtimalini ifade eder. Hızlandırıcılar, güç santralleri, fisyon ve füzyon reaktörleri gibi nükleer tesislerde güvenliğin sağlanabilmesi için kullanılan malzeme ile parçacıklar arasındaki gerçekleşebilecek tüm etkileşimlerin göz önüne alınması gerekmektedir. Tesir kesiti verileri; radyoizotop üretimi, zırlama ve malzeme geliştirme çalışmaları olmak üzere geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu yüzden, bir reaksiyonun tesir kesiti verilerinin ve reaksiyon sonucu açığa çıkan parçacıkların enerji spektrumlarının deneysel ve teorik yöntemlerle araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, tek enerjili protonlarla bombardıman edilen füzyon reaktörü yapısal elementleri ^{27}Al , ^{56}Fe , ^{58}Ni ve ^{90}Zr için, ^3He enerji spektrumları teorik modeller ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tesir kesiti, Yayınlanma spektrumu, Fisyon ve füzyon reaktörü, Yapısal elementler

Investigation of ^3He Emission Spectra in Proton Induced Reactions for Some Elements Used in Fusion Reactor Structural Materials

Abstract: Reaction cross section refers to the possibility of a nuclear reaction's occurrence. All possible interactions between the used material and the particles needed to be considered in nuclear facilities such as accelerators, power plants, fission and fusion reactors for providing the security. Cross section data have been using in a wide range of area including radioisotope production, shielding and material development works. Therefore, the cross section data of a reaction and the energy spectra of outgoing particles as a result of that reaction must be investigated with experimental and theoretical methods. In this study, the ^3He energy spectra of the fusion reactors structural elements ^{27}Al , ^{56}Fe , ^{58}Ni and ^{90}Zr , which were bombarded with single energetic protons, were investigated by theoretical models. The obtained results were analyzed by comparing with the experimental data.

Key words: Cross section, Emission spectra, Fission and fusion reactor, Structural elements

1. Giriş

Modern dünyanın en önemli problemi; ucuz, temiz ve güvenli bir şekilde enerji üretimini gerçekleştirmektir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler, ekonomisinin büyük bir

bölümünü enerji ithalatına harcamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2012 raporunda; 2035 yılına kadar dünya genelinde elektrik enerjisi ihtiyacının % 70 artacağı öngörülmektedir [1]. Bilim insanları, gelecekte enerji ihtiyacının en büyük bölümünün fisyon ve füzyon reaktörleri ile karşılanacağını öngörmektedir. Malzeme geliştirme çalışmaları, yeni nükleer santrallerin tasarımında ve geliştirilmesinde, işletme reaktörlerinin ömrünün uzatılmasında önemli bir rol oynamaktadır [2].

Döteryum-Tritiyum (D-T) reaksiyonunun son ürünü olan nötronlar; füzyon reaktörünün duvarında zamanla hasara yol açarlar. Bu yüzden; duvarların zamanla değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, nötron yakalama sonucunda, duvarlar zamanla radyoaktif olmaya başlarlar [3]. Reaktör güvenliği için nötron içermeyen füzyon reaksiyonları kullanımı gerekmektedir. Ancak, temel füzyon reaksiyonlarının tesir kesiti-enerji ilişkisi incelendiğinde en olası reaksiyonun D-T reaksiyonu olduğu görülmektedir [4]. O halde; füzyon reaktörlerinde kullanılan malzemelerin reaksiyon tesir kesitleri ve reaksiyon sonucu açığa çıkan parçacıkların enerji spektrumları gibi özellikleri iyi araştırılmalıdır [5].

Nükleer fizikteki problemlerin doğasındaki karmaşıklık, analitik çözüm yapmayı olanaksız kılmaktadır. Bilim ve teknolojiye ilerlemeler problemlerin doğasındaki karmaşıklığı arttırmaktadır. Teknoloji ve bilgisayar sistemlerindeki gelişmeler, sanal olarak nükleer fizik laboratuvarlarının kurulmasını ve yapılmak istenen deney ve hesaplamaların bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Nükleer fizik araştırmaları için PCROSS, ALICE/ASH, CEM95, TALYS, EMPIRE, GEANT, FLUKA, MCNP ve GNASH gibi birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu programlar vasıtasıyla uygun geometri ve laboratuvar sistemlerinde istenilen reaksiyonlar incelenebilmektedir. Bu programlar deneysel verilerin bulunmadığı, deney yapma imkânı olmayan durumlarda araştırmacılara bir öngörü sağlarlar. Reaksiyon tesir kesiti verilerinin ve reaksiyon sonrası açığa çıkan parçacıkların enerji spektrumlarının ölçülmesi veya teorik olarak hesaplanması; temel nükleer fizik problemlerinin araştırılması, radyoizotop üretimi ve radyasyon zırlama başta olmak üzere birçok alanda oldukça önemlidir. Bu yüzden; deney yapmanın mümkün olmadığı durumlarda, bu verilerin hesaplama ve benzetim programları yardımıyla elde edilmesi gerekir. Bu yüzden, araştırmacılar fisyon ve füzyon reaktörlerinde kullanılan malzemelerin tesir kesitlerini ve reaksiyon sonucu açığa çıkan parçacıkların enerji spektrumlarını bilgisayar kodları yardımı ile hesaplamaktadırlar [6-11].

Bu çalışmada; füzyon reaktör malzemelerinde kullanılan ²⁷Al, ⁵⁶Fe, ⁵⁸Ni ve ⁹⁰Zr elementler için (p,x³He) reaksiyonu sonucunda elde edilen ³He yayınlanma spektrumları incelenmiştir. Hesaplamalar, TALYS 1.8 [12] ve ALICE/ASH [13] bilgisayar kodları ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Uluslararası Deneysel Nükleer Veri Kütüphanesi (EXFOR)'nden [14] alınan deneysel verilerle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

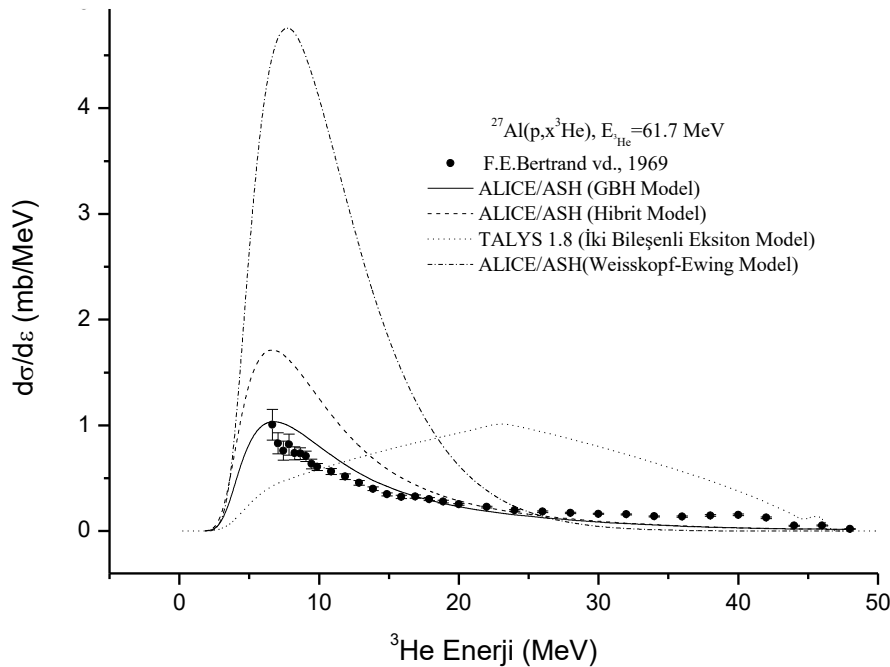
TALYS; FORTRAN dilinde yazılmış, açık kaynak kodlu bir programdır. Bu programla çalışanlar; kendi geliştirdikleri parametreleri TALYS kodunun varsayılan değerleri ile değiştirerek kendi verilerini elde edebilirler. Bu çalışmada da kullanılan TALYS 1.8 versiyonunda; 1 keV–1 GeV gelme enerjisi aralıklarında nötron, proton, döteron, triton,

alfa, ^3He parçacıkları ve fotonlar ile kütle numarası 12 ve daha ağır hedef çekirdekler için nükleer reaksiyon modellerine bağlı nükleer hesaplamalar gerçekleştirilebilmektedir. TALYS hesaplamalarında; optik modeller, seviye yoğunluğu modelleri, fisyon reaksiyon modelleri, direk reaksiyon modelleri, denge reaksiyon modelleri ve denge-öncesi reaksiyon modelleri kullanılabilir. Bu modeller arasından, denge-öncesi hesaplamalar için İki Bileşenli Eksiton [12] ve denge hesaplamaları için ise, Hauser-Feshbach [15] modelleri TALYS tarafından ön tanımlı olarak seçilmektedir. Bu çalışma, TALYS programının denge-öncesi hesaplamalar için kullandığı İki Bileşenli Eksiton model ile gerçekleştirilmiştir.

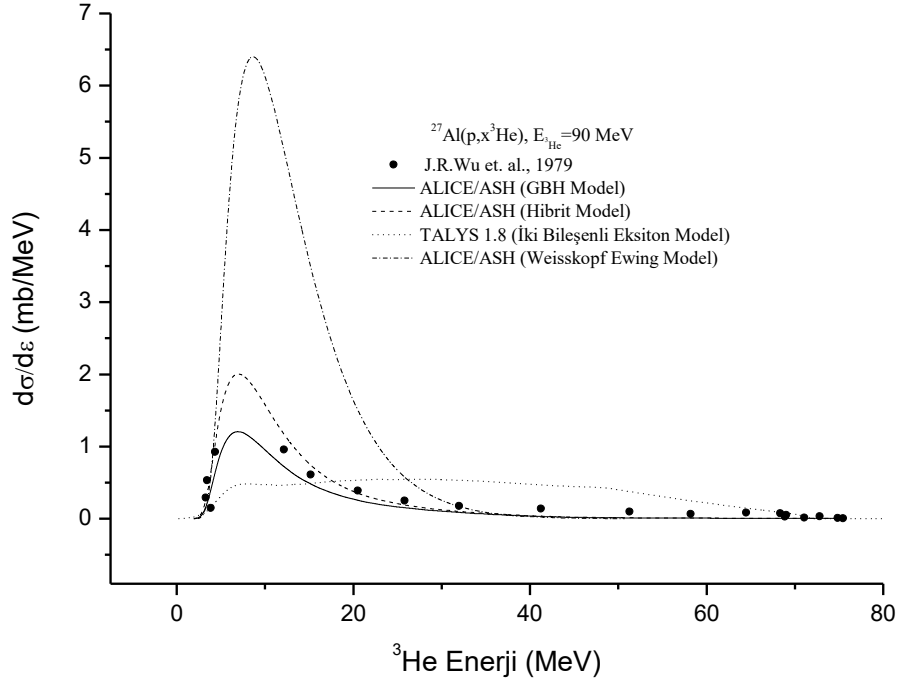
TALYS kodu ile yapılan çalışmalara ek olarak bu çalışmada; ALICE kodlarının geliştirilmiş ve değiştirilmiş bir sürümü olan ALICE/ASH kodu kullanılmıştır. ALICE/ASH kodu ile 300 MeV'lik gelme enerjisine kadar proton, nötron, alfa, döteryum ve ^3He mermi parçacıkları için tesir kesiti, ikincil parçacıkların açısız dağılımı ve enerji hesaplamaları gibi çalışmalar yapılabilir. Nükleer reaksiyon mekanizmalarına bağlı olarak pek çok modelin kullanılabilmesine olanak sağlayan ALICE/ASH kodu ile bu çalışmada; denge-öncesi hesaplamalar için Geometri Bağımlı Hibrit (GBH) [17] ve Hibrit [17] ile denge hesaplamaları için Weisskopf-Ewing [18] modelleri kullanılmıştır.

3. Bulgular

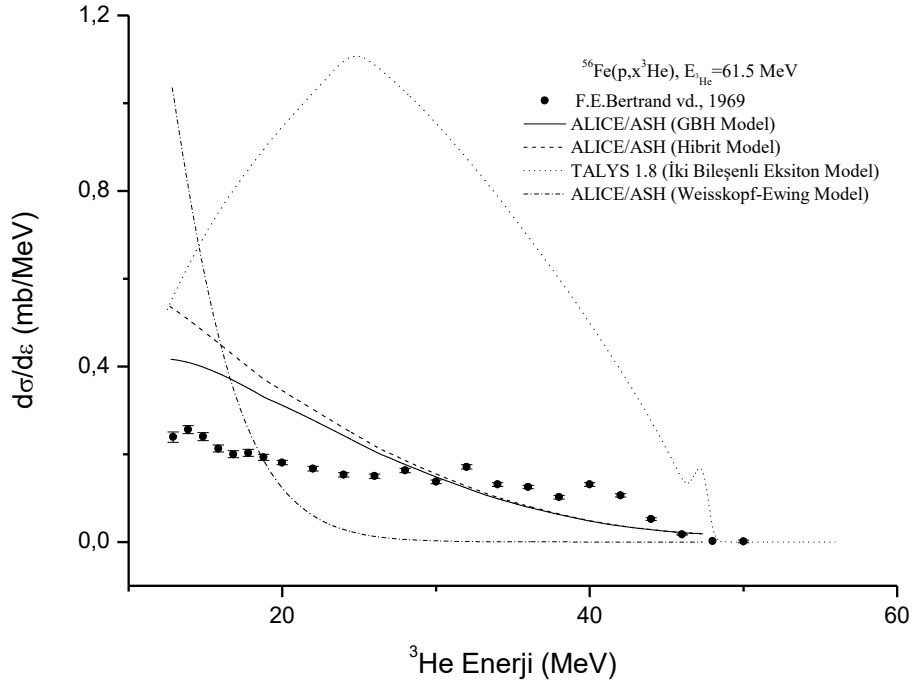
61.5, 61.7 ve 90 MeV enerjili protonlarla bombardıman edilen ^{27}Al , ^{56}Fe , ^{58}Ni ve ^{90}Zr hedeflerinin $(p, x^3\text{He})$ reaksiyonu için TALYS 1.8 ve ALICE/ASH kodları ile gerçekleştirilen hesaplamaların deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 1-5'de verilmiştir. Hesaplamalar tüm mevcut reaksiyon kanalları dikkate alınarak; İki Bileşenli Eksiton, GBH, Hibrit ve Weisskopf-Ewing Model'leri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



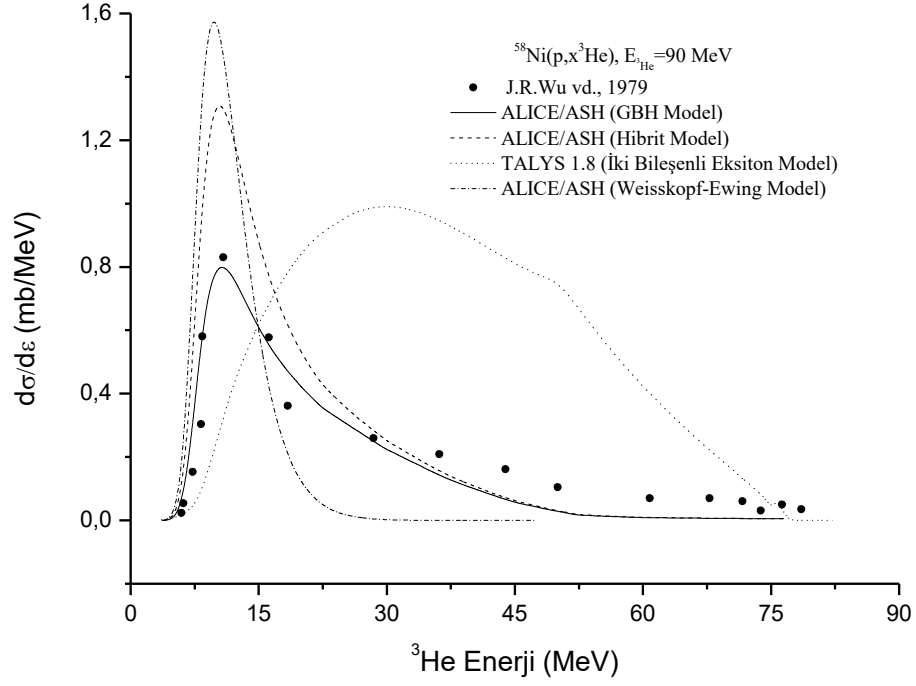
Şekil 1. 61.7 MeV enerjili protonlarla bombardıman edilen ^{27}Al için, elde edilen ^3He yayınlanma spektrumlarının deneysel verilerle karşılaştırılması



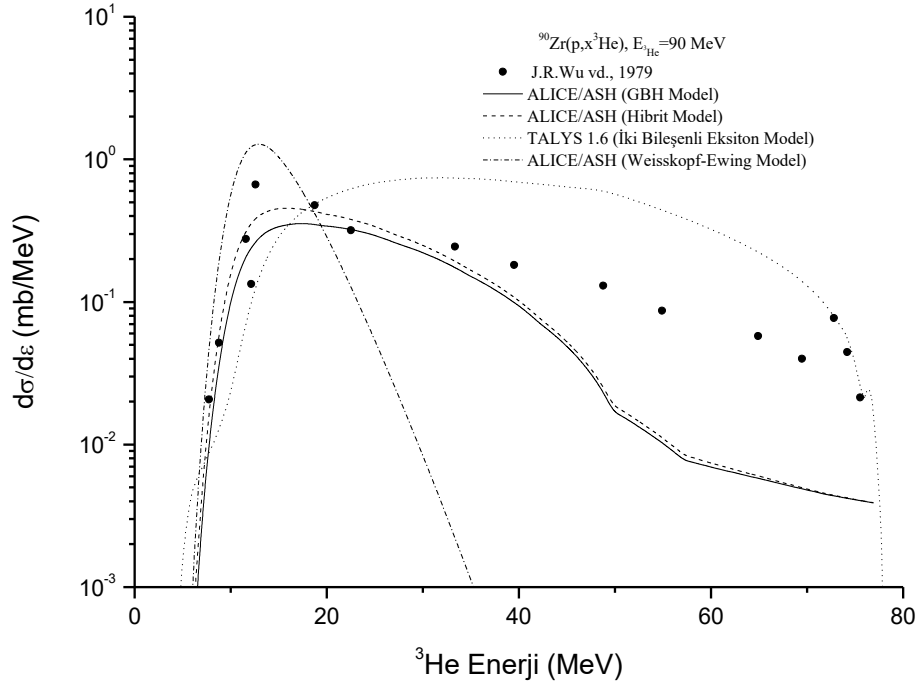
Şekil 2. 90 MeV enerjili protonlarla bombardıman edilen ^{27}Al için, elde edilen ^3He yayınlanma spektrumlarının deneysel verilerle karşılaştırılması



Şekil 3. 61.5 MeV enerjili protonlarla bombardıman edilen ^{56}Fe için, elde edilen ^3He yayınlanma spektrumlarının deneysel verilerle karşılaştırılması



Şekil 4. 90 MeV enerjili protonlarla bombardıman edilen ^{58}Ni için, elde edilen ^3He yayınlanma spektrumlarının deneysel verilerle karşılaştırılması



Şekil 5. 90 MeV enerjili protonlarla bombardıman edilen ^{90}Zr için, elde edilen ^3He yayınlanma spektrumlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

4. Sonuç ve Yorum

Şekil 1’de; 61.7 MeV gelme enerjili protonlarla bombardıman edilen ^{27}Al için, elden edilen ^3He yayınlanma spektrumlarının deneysel verilerle karşılaştırılması verilmiştir. Analiz sonucunda, İki Bileşenli Eksiton Model hesaplamalarının deneysel verilerle uyumsuz olduğu görülmüştür. Hibrit Model, deneysel verilerle benzer geometriye sahip olmasına rağmen daha yüksek sonuçlar ortaya koymuştur. Weisskopf-Ewing Model, 25 MeV enerjisine kadar EXFOR verilerinden yüksek sonuçlar vermiştir. GBH Model; bu reaksiyon için, deneysel verilerle en uyumlu model olarak bulunmuştur.

90 MeV enerjili protonlarla oluşan $^{27}\text{Al}(p,x^3\text{He})$ reaksiyonu için elde edilen sonuçların EXFOR verileri ile karşılaştırılması Şekil 2’de verilmiştir. İki Bileşenli Eksiton Model deneysel verileri açıklamada başarısız olmuştur. ALICE/ASH kodu hesaplamalarının, deneysel verilerle benzer geometriye sahip olduğu görülmüştür. Weisskopf-Ewing Model, 25 MeV enerjisine kadar EXFOR verilerinden yüksek sonuçlar vermiştir. Hibrit Model, GBH Model’e göre daha yüksek bir maksimum verse de, deneysel verilerle en uyumlu model olarak bulunmuştur.

Şekil 3’de 61.5 MeV gelme enerjili protonlarla oluşan $^{54}\text{Fe}(p,x^3\text{He})$ reaksiyonu için elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılması verilmiştir. GBH ve Hibrit Model hesaplamaları, 30 MeV enerji değerinden sonra deneysel veriler yakın sonuçlar verse de, genel olarak kullanılan modeller deneysel verilerle uyumsuz bulunmuştur.

90 MeV enerjili protonlarla oluşan $^{58}\text{Ni}(p,x^3\text{He})$ reaksiyonu için elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması Şekil 4’de görülmektedir. İki Bileşenli Eksiton Model deneysel verilerle uyumsuz bulunmuştur. Hibrit ve Weisskopf-Ewing Model’leri deneysel verilerle maksimum değer dışında uyumlu sonuçlar vermiştir. GBH Model deneysel verileri açıklamada en uyumlu model olarak bulunmuştur.

Şekil 5’de, 90 MeV enerjili protonlarla oluşan $^{90}\text{Zr}(p,x^3\text{He})$ reaksiyonu için elde edilen sonuçların EXFOR verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. İki Bileşenli Eksiton Model deneysel verilerle uyum göstermemiştir. GBH ve Hibrit Model hesaplamaları deneysel verilere yakın bir geometri ortaya koymuştur. Weisskopf-Ewing Model EXFOR verilerine kıyasla daha dar bir maksimum değer ortaya koymuştur.

Genel olarak İki Bileşenli Eksiton Model ^3He enerji spektrumu için deneysel verilerle uyum sağlamamıştır. Weisskopf-Ewing Model genellikle deneysel verileri yukarıdan takip etmiştir. Hibrit Model; deneysel verilerden daha yüksek maksimum verse de, deneysel verilerle uyum göstermiştir. GBH Model, bu çalışmada incelenen reaksiyonlar için deneysel verilerle en uyumlu model olarak bulunmuştur. Şekil 3’de gösterilen $^{56}\text{Fe}(p,x^3\text{He})$ reaksiyonu için ise çalışılan modellerden hiçbirisi uyum göstermemiştir.

Füzyon reaktörü yapısal malzemelerinin üretiminde ve bu malzemelerle ilgili çalışmalarda, deneysel zorluklar, zaman ve bütçe gibi kısıtlamalar ve/veya denenmesi zor olan daha yüksek enerjilerdeki durumlar için, nükleer reaksiyon modelleri ile gerçekleştirilen bu çalışma, bir öngörü niteliği taşımaktadır. Ayrıca; çalışmanın farklı enerjilerde proton girişli reaksiyonlar sonucu oluşacak ^3He ’e ait yayınlanma enerjisi değerlerinin bilinmesi ile malzeme içerisinde oluşabilecek ikincil reaksiyonlar ve deformasyonların önlenmesi amacıyla literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- [1] World Energy Outlook 2012, *Uluslararası Enerji Ajansı*, Erişim Tarihi: 05.05.2017. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2012_free.pdf.
- [2] Characterization and Testing of Materials for Nuclear Reactors, *Uluslararası Atom Enerji Ajansı*, Erişim Tarihi: 14.01.2018, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1545_web.pdf
- [3] Y. A. Hakan vd., Ed., Nükleer Enerji Nükleer Süreç Kavramlarına, Sistemlerine, ve Uygulamalarına Giriş, Çeviri: Nuclear Energy An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes, Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, 2015.
- [4] P. Magaud, G. Marbach and I. Cook, "Nuclear Fusion Reactors" in *Encyclopedia of Energy*, vol. 4, ed. C. J. Cleveland, Elsevier, 2004, pp. 365-381.
- [5] A. Kaplan, E. Tel, and A. Aydin, "The Equilibrium and Pre-equilibrium Neutron Emission Spectra of Some Structural Fusion Materials for (n,xn) Reactions up to 16 MeV Energy," *Phys. Atom Nucl.*, vol. 72, pp. 903-910, 2009.
- [6] H. A. Yalim, A. Aydin, İ. H. Sarpün, R. Ünal, B. Oruncak, A. Kaplan, and E. Tel, "Investigation of Nucleon Mean Free Path Dependence in Tritium Emission Spectra Produced by Proton Induced Reactions at 62 MeV," *J. Fusion Energ.*, vol. 29, pp. 55-61, 2010.
- [7] E. Tel, M. Yiğit, and G. Tanır, "Study on (n,t) Reactions of Zr, Nb and Ta Nuclei," *J. Fusion Energ.*, vol. 31, pp. 184-190, 2012.
- [8] A. Aydin, H. A. Yalim, 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.
- [9] M. Sahan, E. Tel, H. Sahan, A. Kara, A. Aydin, A. Kaplan, İ. H. Sarpun, B. Demir, S. Akca, and E. Yildiz, "Calculations of Double-Differential Neutron Emission Cross Sections for 9Be Target Nucleus at 14.2 MeV Neutron Energy," *J. Fusion Energ.*, vol. 34, pp. 493-499, 2015.
- [10] İ. H. Sarpün, H. A. Yalim, R. Ünal, B. Oruncak, A. Aydin, A. Kaplan, E. Tel, "Determination of (n,2n) Reaction Cross Sections for Some Nuclei with Asymmetry Parameter," *J. Fusion Energ.*, vol. 29, pp. 387-394, 2010.
- [11] A. Aydin, H. Pekdogan, A. Kaplan, İ. H. Sarpün, E. Tel and B. Demir, "Comparison of Level Density Models for the 60,61,62,64Ni(p, n) Reactions of Structural Fusion Material Nickel from Threshold to 30 MeV," *J. Fusion Energ.*, vol. 34, pp. 1105-1108, 2015.
- [12] A. J. Koning, S. Hilaire and S. Goriely (2015) *TALYS-1.8 A Nuclear Reaction Program*, <http://www.talys.eu/fileadmin/talys/user/docs/talys1.8.pdf>
- [13] C. H. M Broeders, A. Y. Konobeyev, Y. A. Korovin, V. P. Lunev, and M. Blann (2006) *ALICE/ASH - Pre-compound and evaporation model code system for calculation of excitation functions, energy and angular distributions of emitted particles in nuclear reactions at intermediate energies*, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/270064701/3814806>
- [14] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. Database Version of 2018-01-09, <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Erişim Tarihi: 14.01.2018
- [15] W. Hauser and H. Feshbach, "The Inelastic Scattering of Neutrons," *Phys. Rev.*, vol. 87, pp. 366-373, 1952.
- [16] M. Blann, "Importance of the Nuclear Density Distribution on Pre-equilibrium Decay," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 28, pp. 757-759, 1972.
- [17] M. Blann, "Hybrid Model for Pre-Equilibrium Decay in Nuclear Reactions," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 27, pp. 337-340, 1971.
- [18] V. F. Weisskopf and D. H. Ewing, "On the Yield of Nuclear Reactions with Heavy Elements," *Phys. Rev.*, vol. 57, pp. 472-485, 1940.

Hasan ÖZDOĞAN, hasanozdogan@akdeniz.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6127-9680>

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

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