

PAPER DETAILS

TITLE: Eriyik Tuz Reaktörlerinde Yakıt Malzemesi Olarak Kullanılan Na Çekirdeğinin Üretim Tesir Kesiti Hesaplamaları

AUTHORS: S Sedat DOGAN,Veli ÇAPALI,Hasan ÖZDOĞAN,Abdullah KAPLAN

PAGES: 100-106

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/116411>

Eriyik Tuz Reaktörlerinde Yakıt Malzemesi Olarak Kullanılan Na Çekirdeğinin Üretim Tesir Kesiti Hesaplamaları

S. Sedat Doğan^{1,*}, Veli Çapalı¹, Hasan Özdoğan^{1,2}, Abdullah Kaplan¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

²Akdeniz Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Biyofizik A.D., 07070, Antalya, Türkiye

*Yazışılan yazar e-posta: s_s_dogan32@hotmail.com

Alınış: 05 Mayıs 2014, Kabul: 16 Haziran 2014

Özet: Bu çalışmada, eriyik tuz reaktörlerinde yakıt malzemesi olarak kullanılan Na çekirdeğinin üretim tesir kesitleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar; $^{24}\text{Mg}(p,\alpha)^{21}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$, $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$, $^{20}\text{Ne}(d,n)^{21}\text{Na}$ ve $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ reaksiyonları için 70 MeV parçacık gelme enerjisine kadar denge ve denge-öncesi nükleer reaksiyon modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Denge-öncesi hesaplamalar için; Full Exciton Model, Hibrit Model, Geometri Bağımlı Hibrit Model ve Cascade Exciton Model, denge hesaplamaları için ise; Weisskopf-Ewing Model kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Deneysel Nükleer Reaksiyon Data (EXFOR) Kütüphanesi'nden alınan deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca; $^{21,22,24}\text{Na}$ üretimi için optimum enerji aralıkları belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Eriyik tuz reaktörleri, reaksiyon tesir kesiti, EXFOR, denge ve denge-öncesi reaksiyonlar, nükleer reaksiyonlar modelleri

Production Cross Section Calculations of Na Nucleus Used as Fuel Material in Molten Salt Reactors

Abstract: In this study, the production cross sections of Na nucleus used as fuel material in molten salt reactors have been calculated. The calculations for $^{24}\text{Mg}(p,\alpha)^{21}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$, $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$, $^{20}\text{Ne}(d,n)^{21}\text{Na}$ and $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ reactions have been carried out up to 70 MeV incident particle energies by using the equilibrium and pre-equilibrium nuclear reaction models. Full Exciton Model, Hybrid Model, Geometry Dependent Hybrid Model and Cascade Exciton Model for the pre-equilibrium reactions and Weisskopf-Ewing Model for the equilibrium reactions have been used. The calculated results have been compared with experimental data taken from the Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR) library. Also, the optimum energy ranges for $^{21,22,24}\text{Na}$ production have been determined.

Key words: Molten salt reactor, reaction cross section, EXFOR, equilibrium and pre-equilibrium reactions, nuclear reaction models

1. Giriş

Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde hızlı nüfus artışı, gelişen teknoloji ve sanayileşme gibi etkenler enerjiye olan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Bu gereksinimi karşılamak için, ülkeler artık fosil yakıtları kullanmak istememektedir. Bunun nedenleri ise; fosil yakıtların çevreye zarar vermesi, belli miktarda rezerve sahip olması ve belli ülkelere bağımlılık yaratmasıdır. Enerji gereksinimini karşılamak için, verimi çok yüksek olan nükleer reaktörler tercih edilmiş ve geliştirilmiştir. Günümüzde kullanılan 3. Nesil reaktörler, gelecekte yapılması planlanan 4. Nesil reaktörler için bir model oluşturmaktadır.

4. Nesil reaktörler için; aralarında A.B.D, Japonya, Fransa, Güney Afrika ve Arjantin gibi ülkelerin bulunduğu bir grup ülke, 2030 ve sonrasında sürdürebilir kalkınma perspektifi içinde nükleer enerji kullanımına yönelik alternatiflerin belirlenmesi ve bu sistemlerin geliştirilebilmesi için gerekli araştırma-geliştirme çalışmalarını yapmaya

yönelik bir çalışma başlatmışlardır. 4. Nesil bir reaktör olan eriyik tuz reaktörü, kendi yakıtını üretebilme veya uzun dönemde çevresel risk yaratabilecek kullanılmış yakıtları kullanabilecek özelliklere sahip olmasından dolayı, nükleer sanayide kullanılması hedeflenmiştir. Nükleer reaktörlerin doğada bulunan tek yakıt malzemesi uranyumdur. Eriyik tuz reaktörü doğal uranyum kaynaklarının çok uzun süreler yetmesini sağlayacaktır. Eriyik tuz reaktörlerine fazla radyoaktif sıvı taşınması ve fazla radyoaktif elemanlardan kaynaklanan ekstra bir maliyeti olmayacağından tercih edilebilir. Eriyik Tuz yakıt karışımına dayanan deneysel bir reaktör 1960'lı yıllarda başarıyla çalışmış fakat ticari anlamda uygulaması yoktur. Eriyik tuz reaktörleri, gelecekte nükleer enerjinin yaygın olarak kullanılabilmesi için gereken özelliklere sahiptir fakat iyimser bir yaklaşımla 2030 tarihinden itibaren kullanılabilecek konuma geçeceklerdir [1].

Günümüzde deneysel çalışmalara teorik çalışmaların da katkısı ile bilim hızla ilerlemektedir. Ayrıca, teorik çalışmaların deneysel çalışmalarla birebir uyum sağlaması bu çalışmaların hızla gelişmesinde önemli olmuştur. Reaktörlerde üretilen geçici çekirdekler genellikle kısa yarı ömürlüdür. Dolayısıyla, bu çekirdeklerin tesir kesitlerinin ve parçacıkların yayınlanma spektrumlarının doğrudan ölçülmesi pek mümkün olmamaktadır. Zaman kazanılması açısından yapılacakların en önemlisi, bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanmasıdır. Bu hesaplamalar için çeşitli bilgisayar kodları geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, 0–70 MeV parçacık gelme enerji aralığında; $^{24}\text{Mg}(p,\alpha)^{21}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$, $^{24}\text{Mg}(p,n)^{24}\text{Na}$, $^{20}\text{Ne}(d,n)^{21}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ reaksiyonları için teorik tesir kesiti hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalarda; PCROSS [2], CEM95 [3] ve ALICE/ASH [4] bilgisayar kodları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Deneysel Nükleer Reaksiyon Data (EXFOR/CSISRS) Kütüphanesi'nden [5] alınan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılan; PCROSS, CEM95 ve ALICE/ASH bilgisayar kodları hesaplamadaki başarısı ve kullanım kolaylığı nedeniyle, yaygın kabul gören bilgisayar kodlarıdır. PCROSS kodunda denge hesapları için Weisskopf–Ewing Model [6], denge–öncesi hesapları için ise, Full Exciton Model kullanılmıştır. CEM95 programında tesir kesiti hesaplamaları için Cascade Exciton Model kullanılmıştır. ALICE/ASH bilgisayar kodunda, denge hesaplaması için; denge modeli, denge–öncesi hesaplamalar için ise; Geometri Bağımlı Hibrit (GBH) ve Hibrit Modelleri [7,8] kullanılmıştır.

2.1. Weisskopf–Ewing Model

Reaksiyonun denge bileşenine ait tesir kesiti hesaplamaları; Weisskopf–Ewing Modeline göre, açılma momentumu ihmal edilerek yapılmıştır. Denge reaksiyonu hesaplamaları için temel parametreler; ters reaksiyon kesiti, bağlama enerjileri, çift oluşum enerjisi ve seviye yoğunluk parametreleridir.

Nükleer reaksiyonda, giriş kanalı a ve çıkış kanalı b olmak üzere reaksiyon tesir kesiti;

$$\sigma_{ab}^{WE} = \sigma_{ab}(E_{inc}) \frac{\Gamma_b}{\sum_{b'} \Gamma_{b'}} \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Denklem 1’de; Γ_b ,

$$\Gamma_b = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^2} \mu_b \int d\varepsilon \sigma_b^{inv}(\varepsilon) \varepsilon \frac{\omega_1(U)}{\omega_1(E)} \quad (2)$$

dir. Denklem 2’de; U çekirdek uyarım enerjisi, μ_b indirgenmiş kütle, S_b spindir. Toplam tek parçacık yoğunluk seviyesi;

$$\omega_1(E) = \frac{1}{\sqrt{48}} \frac{\exp \left[2 \sqrt{\alpha (E - D)} \right]}{E - D} \quad \alpha = \frac{6}{\pi^2} g \quad (3)$$

ile hesaplanır. Burada; σ_b^{inv} ters tepkime tesir kesiti, E bileşik çekirdek uyarım enerjisi, D çift oluşum enerjisi ve g tek parçacık için yoğunluk seviyesidir [6].

2.1. Exciton Model

Denge-öncesi nükleer reaksiyon hesaplamaları için Exciton model kullanılmaktadır. Exciton model, gelen parçacık ile hedef çekirdek arasındaki ilk etkileşmeden sonra uyarılmış sistemin giderek artan karmaşıklıkta bir dizi basamaktan geçtikten sonra dengeye ulaşılabilirdiğini varsayar. Exciton model hesaplamaları için; Cline [9] ve Ribansky [10] tarafından önerilen,

$$\begin{aligned} -q_{t=0}(n) &= \lambda_+(E, n+2)\tau(n+2) + \lambda_-(E, n-2)\tau(n-2) \\ &\quad -[\lambda_+(E, n)\lambda_+(E, n) + L(E, n)]\tau(n) \end{aligned} \quad (4)$$

Denklem 4 kullanılmaktadır. Burada; $q_t(n)$ “ n ” eksiton sayısı olmak üzere kompozit çekirdeğin ilk oluşum ihtimali, $\lambda_+(E, n)$ ve $\lambda_-(E, n)$ komşu izotoplar için bozunum geçiş oranı ve $L(E, n)$ parçacıklar ve γ -ışını için yayınlanma enerjisi üzerinden hesaplanan toplam yayınlanma oranıdır. Denge-öncesi spektrum hesaplamaları için,

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{a,b}}{d\varepsilon_b}(\varepsilon_b) &= \sigma_{a,b}^r(E_{inc}) D_{a,b}(E_{inc}) \times \sum_n W_b(E, n, \varepsilon_b) \tau(n) \\ &\quad \sigma_{a,b}^r(E_{inc}) \end{aligned} \quad (5)$$

Denklem 5 kullanılmaktadır. Burada; (a, b) reaksiyonu için tesir kesiti, $W_b(E, n, \varepsilon_b)$ “ n ” eksiton’undaki ε_b enerjili parçacığın yayınlanma olasılığı ve E birleşik çekirdek eksiton enerjisidir. $D_{a,b}(E_{inc})$ azaltma faktörüdür [11].

2.2. Cascade Exciton Model

Cascade Exciton Model (CEM) , reaksiyonların üç aşamada meydana geldiğini kabul eder. İlk aşama nükleer seviyelerdeki geçiştir. İkinci aşama denge-öncesine, üçüncü aşama ise, denge (veya bileşik çekirdek) durumuna karşılık gelir. Genel olarak, bu üç bileşen deneysel olarak ölçülen değerlere katkıda bulunur. Buna göre parçacık spektrumu için;

$$\sigma(p)dp = \sigma_{in} [N^{cas}(p) + N^{d.\ddot{o}.}(p) + N^{denge}(p)] dp \quad (6)$$

yazılır. Burada, σ_{in} inelastik saçılma tesir kesiti kaskat modeli ile hesaplanır. Cascade modeli hızlı parçacıkların kinematik karakteristikleri hakkında bütün bilgileri içinde bulunduran reaksiyon geometrisini hesaba katar, fakat cascade parçacıkları arasındaki etkileşimleri ihmal eder. Cascade modelinin şartları, parçacığın kinetik enerjisi nükleonun bağlanma enerjisini aştığı yüksek enerjilerde daha iyi yerine getirilir. Geniş bir enerji bölgesinde yayılan parçacıkların nükleer reaksiyon özelliklerinin tanımını geliştirmek için Cascade ve Exciton modellerini birleştirmek önemlidir [3].

2.2. Hibrit ve Geometri Bağımlı Hibrit Model

Bu model, her bir nükleer durum için uyarılmış parçacıkların uyarılma enerjilerinin dağılımını hesaplar. Her parçacık uyarılma enerjisi için, yeni parçacık-deşik oluşumuna bağlı olarak kısmi parçacık yayınlanma oranları hesaplanır. Denge-öncesi bozunma için hibrit model formülü;

$$P_v(\varepsilon) = \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=+2}}^{\bar{n}} \left[n \chi_v N_n(\varepsilon, U) / N_n(E) \right] g d\varepsilon \{ \lambda_c(\varepsilon) / \lambda_c(\varepsilon) + \lambda_+(\varepsilon) \} D_n \quad (7)$$

$$d\sigma(\varepsilon) / d\varepsilon = \sigma_R P_v(\varepsilon)$$

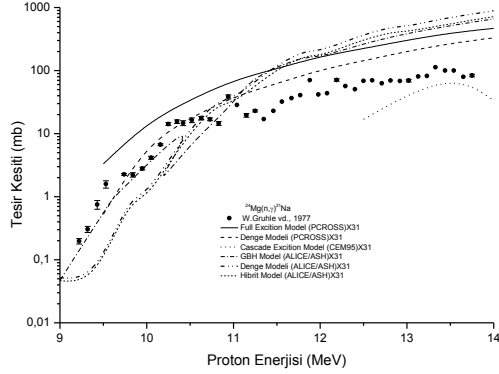
şeklinde [12]. Burada $P_v(\varepsilon) d\varepsilon$ enerjisi ε ile $\varepsilon + d\varepsilon$ arasında olan ve sürekli bölgeye yayınlanan v tipi parçacıkların (nötron ve proton) sayısı s , $\bar{n}$ denge konumundaki (en muhtemel) eksiton sayısı, nX_v bir n eksiton durumundaki v türündeki parçacıkların sayısı, E bileşik sisteminin uyarılma enerjisi, $N(\varepsilon, U)$ bir eksiton ε kanal enerjisiyle yayınlandığında kalan çekirdeğin $U=E-B_v-\varepsilon$ uyarılma enerjisinin diğer $n-1$ eksitonları arasında paylaşılacak şekilde n eksitonunun uygun bir biçimde düzenlenme sayısı, $N_n(E)$ E uyarılma enerjisinde n parçacık artı deşik toplam birleştirim sayısı, $\lambda_c(\varepsilon)$ bir parçacığın (ε) kanal enerjisiyle sürekli bölgeye yayınlanma hızı, $\lambda_+(\varepsilon)$, ε enerjili bir parçacığın sürekli bölgeye yayınlanmış olduğu zamanki çekirdek içi geçiş hızı, D_n bir n -eksiton zincirinde başlangıç popülasyon kesiti, σ_R reaksiyon tesir kesiti, g tek-parçacık düzey yoğunluğudur. Konu başındaki ilk denklemdaki köşeli parantez içindeki nicelik sürekli bölgede enerjisi ε ile $\varepsilon+d\varepsilon$ arasında olan parçacık sayısını verir [13].

3. Bulgular

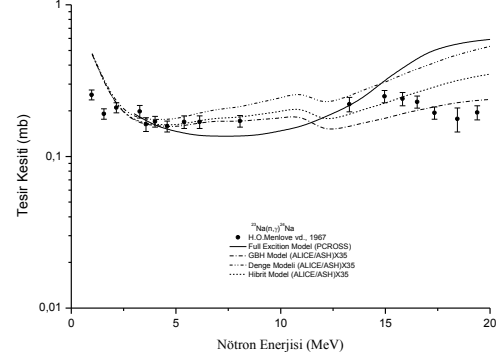
Bu çalışmada, 0–70 MeV parçacık gelme enerji aralığında $^{24}\text{Mg}(p,\alpha)^{21}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$, $^{24}\text{Mg}(p,n)^{24}\text{Na}$, $^{20}\text{Ne}(d,n)^{21}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ reaksiyonları için $^{21,22,24}\text{Na}$ çekirdeğinin üretim tesir kesitleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, PCROSS, CEM95 ve ALICE/ASH bilgisayar kodları kullanılmıştır.

$^{24}\text{Mg}(p,\alpha)^{21}\text{Na}$ reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 1), PCROSS–Denge Modeli değerleri, deneysel verileri 11 MeV proton gelme enerjisinden sonra yukarıdan takip etmektedir ve diğer modellere göre en uyumlu modeldir. CEM95 hesaplamaları deneysel değerleri 12,5–14 MeV enerji aralığında biraz aşağıdan takip etmiştir. $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 2), ALICE/ASH (GBH ve Hibrit Model) değerleri deneysel veriler ile 2–8 MeV

nötron gelme enerjisine kadar tamamen uyumludur. ALICE/ASH–Denge Modeli hesaplamaları, deneysel değerleri 7 MeV den sonra yukarıdan takip etmiştir. PCROSS–Full Exciton Model ise, 14 MeV nötron gelme enerjisinden sonra deneysel değerler ile uyumsuzdur.

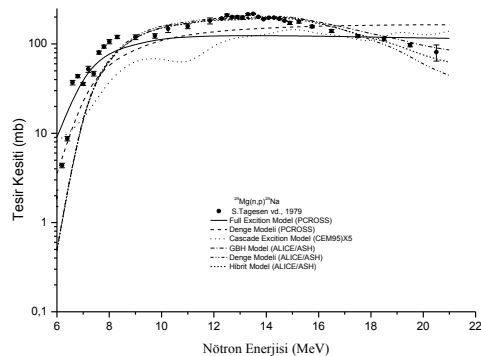


Şekil 1. $^{24}\text{Mg}(p,\alpha)^{21}\text{Na}$ reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.

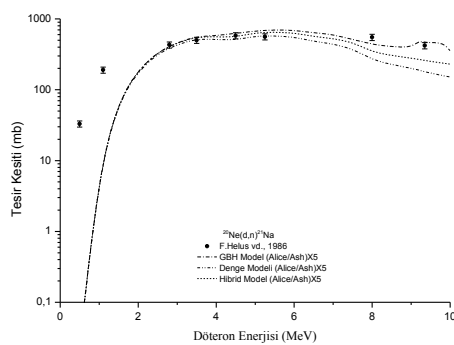


Şekil 2. $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.

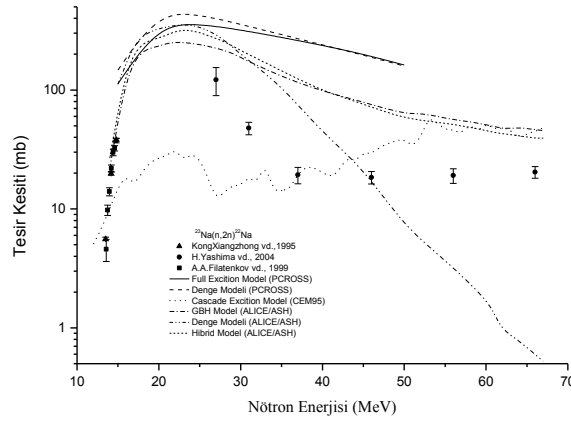
$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$ reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 3), ALICE/ASH (GBH Model, Denge Modeli ve Hibrit Model) modelleri deneysel değerler ile 8,5 MeV nötron gelme enerjisinden sonra uyumludur. PCROSS–Full Exciton Model hesaplamaları, deneysel verilerden düşük değerler olsa da, 7–18 MeV arasında deneysel değerler ile uyumludur. CEM95 hesaplamaları ise, 15–18 MeV enerji aralığında deneysel değerler ile uyum sergilemektedir. $^{20}\text{Ne}(d,n)^{21}\text{Na}$ reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 4), ALICE/ASH (GBH Model, Denge Modeli ve Hibrit Model) değerleri deneysel veriler ile 3 MeV döteron gelme enerjisinden sonra uyumludur. $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ reaksiyonu için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre (Şekil 5), ALICE/ASH (Denge Modeli) hesaplamaları sadece 15 MeV civarında uyum sergilese de, diğer modeller ile beraber uyumsuzdur. PCROSS bilgisayar kodu, 56 MeV’lik gelme enerjisinden daha yüksek mertebeye sahip enerji değerleri için tesir kesiti hesaplamamaktadır.



Şekil 3. $^{24}\text{Mg}(p,n)^{24}\text{Na}$ reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.



Şekil 4. $^{20}\text{Ne}(d,n)^{21}\text{Na}$ reaksiyonu için tesir kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması.



Şekil 5. $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ reaksiyonu için tesis kesiti hesaplamalarının deneysel veriler ile karşılaştırılması

4. Sonuç ve Yorum

$^{21,22,24}\text{Na}$ çekirdeklerinin üretim tesis kesiti hesaplamalarına yönelik olan bu çalışmada; modeller ile yapılan hesaplama değerleri, belli çarpanlar kullanılarak en uygun hesaplama modelini bulmak için, deneysel değerlere yakınlştırılmaya çalışılmıştır. PCROSS–Denge Modeli aynı enerjilerdeki deneysel sonuçlardan daha yüksek değer almasına karşın ALICE/ASH–Denge modeli deneysel çalışmalar ile genelde uyumludur. CEM95 ile yapılan hesaplama sonuçları deneysel değerler ile genelde uyumsuzdur ve $^{21,22,24}\text{Na}$ çekirdek üretimi tesis kesiti hesaplamaları için uygun bir hesaplama modeli değildir. Yanı sıra, ALICE/ASH (GBH Model ve Hibrit Model) her bir reaksiyon için belli bir enerji aralıklarında uyum göstermektedir. Ayrıca, $^{21,22,24}\text{Na}$ üretimi için optimum enerji aralıkları Tablo 1’de belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan nükleer reaksiyon modellerine dayanan tesis kesiti hesaplamaları; radyoizotop üretim programları için gerekli veri tabanının güçlendirilmesi, yeni veri tabanı oluşturulması çalışmalarında genel olarak ALICE/ASH modellerinin deneysel veriler ile uygunluğu açısından kullanılabilir.

Tablo 1. $^{21,22,24}\text{Na}$ üretimi için optimum enerji aralıkları

Reaksiyon	Optimum Üretim Enerji Aralıkları
$^{24}\text{Mg}(p,\alpha)^{21}\text{Na}$	11→13 MeV
$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	5→10 MeV
$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	10→16 MeV
$^{20}\text{Ne}(d,n)^{21}\text{Na}$	3→6 MeV
$^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$	17→27 MeV

Teşekkür ve Bilgi

Bu çalışma Adım Fizik Günleri III 2014’de poster olarak sunulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Yeni Nükleer Reaktörler: Tasarım Kriterleri, Doç. Dr. Cemal Niyazi SÖKMEN (Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi).

- [2] Capote R., et al., Final Report on Research Contract 5472/RB, INDC(CUB)-004 (Higher Institute of Nuclear Science and Technology, Cuba), Translated by the IAEA on March 1991 (PCROSS program code).
- [3] Mashnik S. G., 1995. CODE CEM95. Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for nuclear research. Dubna, Moscow, 141980, Russia.
- [4] C. H. M. Broeders, A. Yu. Konobeyev, Yu. A. Korovin, V. P. Lunev, M. Blann, ALICEIASH — 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. FZK 7183 (2006).
- [5] Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center, EXFOR/CSISRS (Experimental Nuclear Reaction Data File). Database Version of November 20, 2013 (2013), (<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/>).
- [6] Weisskopf, V. F., Ewing, D. H., 1940. On the yield of nuclear reactions with heavy elements, *Physical Review*, 57(6): 472-486.
- [7] Blann, M. 1971. Hybrid model for pre-equilibrium decay in nuclear reactions, *Physical Review Letters*, 27: 337-340.
- [8] Blann, M. 1972. Importance of the nuclear density distribution on pre-equilibrium decay, *Physical Review Letters*, 28: 757-759.
- [9] Cline C.K., 1972. The Pauli exclusion principle in pre-equilibrium decay, *Nuclear Physics A*, 195: 353-360.
- [10] I. Ribansky et al., 1973, Pre-equilibrium decay and the exciton model, *Nuclear Physics A*, 205: 545-560.
- [11] Kaplan A., Çapalı V., 2014. Cross-section calculations on several structural fusion materials for ($\gamma, 3n$) reactions in the photon energy range of 20–110 MeV, *Journal of Fusion Energy*, 33: 299-303.
- [12] Blann, M., Vonach, H. K., 1983. Global Test of Modified Pre-Compound Decay Models, *Physical Review C*, 28: 1475–1492.
- [13] Kaplan A., Tel E., Aydın A., 2009. The equilibrium and preequilibrium neutron emission spectra of some structural fusion materials for (n,xn) reactions up to 16 MeV energy, *Physics of Atomic Nuclei*, 72(6): 903-910.

Veli ÇAPALI e-posta : velicapali@sdu.edu.tr

Hasan ÖZDOĞAN e-posta : hasanozdogan@akdeniz.edu.tr

Abdullah KAPLAN e-posta: abdullahkaplan@sdu.edu.tr