

³⁹K ve ⁴¹K İzotoplarının 0-20 MeV Enerji Aralığında Nötron Reaksiyonları Tesir Kesiti Hesaplamaları

Nergiz YILDIZ YORGUN¹, Ömer Faruk ÖZDEMİR

¹Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Van
nergiz_yildiz@yahoo.com

Özet : Force Free Helical Reactor (FFHR) tasarımı, sıvı blanket sistemine sahip füzyon reaktörlerinden biridir. Flinak (LiF-NaF-KF), FFHR'de trityum üretimi, soğutucu ve ısı transferi için blanket olarak kullanıma potansiyeline sahip eriyik tuzlardan biridir. Yüksek sıcaklıklarda düşük buhar basıncına (900 °C de 0,5 mmHg) sahip olan Flinak'ın korozyon karakteristikleri Flibe (Li₂BeF₄) 'ye benzerdir ve termal iletkenliği $k = 0,92 W/m \cdot K$ dir. FFHR tasarımlarında kullanım potansiyeli, Flinak bileşenlerinin nükleer özelliklerinin belirlenmesinin önemini artırır.

Bu çalışmada ³⁹K ve ⁴¹K'in 0-20 MeV gelme enerjili nötronlarla gerçekleştireceği nükleer reaksiyonlardan (n,p) ve (n, α) reaksiyonları için tesir kesiti hesaplamaları denge ve denge öncesi modeller kullanılarak yapıldı. Hesaplamalarda denge öncesi için Full Exciton Model, Hibrid Model, Geometri Bağımlı Hibrid Model ve Kaskad Eksiton Model kullanılırken, denge modeli hesaplamalarında Weisskopf-Ewing Modeli kullanıldı ve yapılan hesaplama sonuçları EXFOR, JEFF 3.2 ve TENDL-2015'den alınan deneysel ve değerlendirilmiş tesir kesiti verileriyle karşılaştırıldı.

Anahtar Kelimeler: Denge öncesi reaksiyonlar, Denge reaksiyonları, Flinak, Tesir kesiti,

Calculation of Neutron Reaction Cross Sections of ³⁹K and ⁴¹K Isotopes Between 0-20 MeV Energy Region

Abstract : Design of Force Free Helical Reactor (FFHR) is one of the fusion reactor which has liquid blanket system. Flinak is one of the molten salt to use thermal transfer, coolant and production of tritium at FFHR. Corrosion characteristic of Flinak show similar properties to Flibe. Also, Flinak has low vapor pressure at high temperature (at 900 °C, 0.5 mmHg) and its thermal conductivity is $k = 0.92 W / m \cdot K$. It is very important to determine nuclear potential of Flinak components due to potential use in FFHR design.

In this study, we calculated (n,p) and (n, α) reactions cross section calculations for ³⁹K and ⁴¹K with neutron which has energy between 0-20 MeV using pre-equilibrium and equilibrium models. While FEM, Hybrid, Geometry Dependent Hybrid Model and Cascade Exciton Model were used for pre-equilibrium state, Weisskopf Ewing Model was used for equilibrium model calculations. Obtained results were compared with experimental and evaluated cross section data obtained from EXFOR, JEFF 3.2 and TENDL-2015.

Keywords: Cross section, Equilibrium reactions, Flinak, Pre-equilibrium reactions

Giriş

Eriyik tuzların, nükleer reaktörlerde soğutucu ve blanket olarak kullanımı yanı sıra, hidrojen üretim tesislerinden güneş enerjisi depolama tesislerine kadar farklı enerji sistemlerinde de kullanıldığı, çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir (Olson ve ark. 2009, Ferng ve ark. 2012, Forsberg ve ark. 2007, Williams 2006, Ouyang ve ark. 2013). Eriyik tuzlar sahip oldukları yüksek kaynama sıcaklığı, yüksek öz ısı,

yüksek termal iletkenlik, düşük buhar basıncı ve düşük viskozite özelliklerinin yanı sıra görece olarak düşük maliyetleri ile yüksek sıcaklık ve düşük basınç istenilen enerji sistemlerinde kullanıma uygundur (Olson ve ark. 2009, Ferng ve ark. 2012).

Eriyik tuzların düşük buhar basıncına sahip olması, Eriyik Tuz Reaktör (Molten Salt Reactor, MSR)'lerin yaklaşık atmosfer basıncında çalışarak

yapısal malzemelerin karşılaştacağı mekanik stresin azaltılmasını sağlar. D-T füzyon reaktörlerinde ise, eriyik tuzların blanket ve sıvı ilk duvar olarak kullanımı önerilmektedir (LeBlanc 2010, Abdou ve ark. 2001).

Hafif çekirdeklere sahip olan FlibE (Li₂BeF₄), Flinabe (LiF-NaF-BeF₂) ve Flinak (%46,5LiF %11,5NaF %42 KF), gibi florid tuzlar, klor'a kıyasla, flor'un izotop ayırımına gerek duyulmaması ve yüksek nötron akısı altında daha uygun nötronik özelliklere sahip olması nedeniyle tercih edilmektedirler (Ouyang ve ark. 2013). Ancak Berilyum çok yüksek düzeyde bir toksin madde olması nedeniyle çevresel zarar endişesi doğurur ve uygun bir alternatif ihtiyacı gündeme gelir.

Blanket (soğutucu ve trityum üretici) olarak eriyik tuzların kullanımı planlanan tasarımlardan biri de FFHR reaktör tasarımıdır (Kondo ve ark. 2009). FFHR reaktör tasarımı; "Large Helical Device" (LHD)'nin temel alındığı helisel tipteki bir D-T reaktörüdür (Yapıcı 2003). Plasma hapsedme yöntemi olarak büyük avantaj sağlayan dış helisel manyetik alanla hapsedmenin kullanıldığı LHD deneyleri 1998'de başlamıştır (Watanabe ve ark. 2000). FFHR-1 ve FFHR-2 olmak üzere iki ana tasarım vardır (Sagara ve ark. 2000).

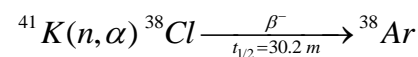
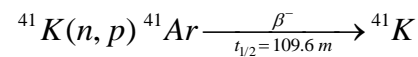
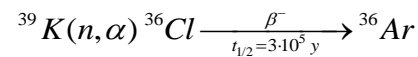
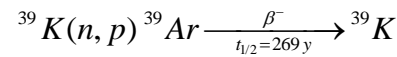
Flinak (%46.5 LiF, %11.5 NaF %42 KF), FFHR'de trityum üretimi, soğutucu ve ısı transferi için blanket olarak kullanılma potansiyeline sahip eriyik tuzlardan biridir. Flibe'ye benzer korozyon karakteristiklerine sahip olan Flinak; yüksek kaynama sıcaklığı, düşük buhar basıncı (900 °C de 0,5 mmHg), yüksek termal iletkenliği ($k = 0,92 W/m \cdot K$) ve yüksek sıcaklıklardaki kararlılığı gibi üstün termo-fiziksel özellikleri ile füzyon reaktörlerinde sıvı blanket olarak önerilmesinin yanı sıra eriyik tuzlu nükleer reaktörlerde (MSFBR) soğutucu

olarak ta önerilmektedir (Fukada ve Morisaki 2006, Sona ve ark. 2014).

Yeni nesil reaktörlerin inşası ve atık dönüşüm teknolojisinin geliştirilmesi, tesir kesitlerine ait ölçüm ve hesaplamaların daha hassas olmasını gerekli kılmaktadır [Block 2010]. Nötron reaksiyonlarının tesir kesiti hesaplamaları özellikle fisyon ve füzyon reaktör tasarımları için, çok kısa yarı ömürlü izotop oluşumu nedeniyle, oldukça önemlidir. Dolayısıyla gerek soğutucu gerekte blanket olarak önerilen eriyik tuz bileşenlerinin düşük ve yüksek enerjili nötronlarla gerçekleştirecekleri reaksiyonlar, reaktör tasarımı için oldukça önemli yer tutar.

Bu çalışmada Flinak'ın bileşenlerinden potasyumun ³⁹K ve ⁴¹K izotopları için (n,p) ve (n,α) reaksiyon tesir kesiti hesaplamaları yapıldı. Nötron gelme enerjisinin 0-20 MeV aralığında seçildiği bu hesaplamalarda denge ve denge öncesi modeller kullanıldı.

Füzyon reaktörlerinde nötron sayısını yani nükleer reaktörlerdeki nötron ekonomisini doğrudan ilgilendiren bu reaksiyonlardan (n,p) ve (n,α) reaksiyonları, yayınlanan taneciklerin yapısal malzemede tahribata sebep olma olasılıkları nedeniyle önem arz eder. Ayrıca ³⁹K ve ⁴¹K'in incelenen nötron reaksiyonlarına ait ürünlerin genellikle kısa yarı ömürlü radyoizotoplar olduğu ve ürünlerin bozunumuyla zehirli atık oluşmadığı görülmektedir.



Yukarıda verilen reaksiyonlar için yapılan hesaplamalarda PCROSS programı ile Weisskopf Ewing ve Full Exciton Model hesaplamaları, Alice/Ash

programı ile Denge, Hibrid ve Geometri Bağımlı Hibrid model hesaplamaları, CEM03.01. programı ile de Kaskad Eksiton model hesaplamaları yapıldı. Elde edilen sonuçlar, EXFOR veri tabanından alınan deneysel verilerle ayrıca JEFF-3.2 ve TENDL-2015 değerlendirilmiş verileri ile karşılaştırıldı.

Hesaplamalar

Bileşik çekirdek modeli, sıvı damlası modeli benzetimini kullanır ve nükleer reaksiyonların, bileşik çekirdeğin istatistiksel dengeye ulaşımından bozunduğu bağımsız iki aşamada gerçekleştiğini varsayar (Weisskopf, 1937).

Weisskopf Ewing Model (WE), bileşik çekirdek reaksiyonlarının (BÇR) hesaplamaları için önerilmiş önemli modellerden biridir. WE modele göre bileşik çekirdek reaksiyon tesir kesiti;

$$\sigma(a,b) = \sigma_a(\varepsilon) \eta_b(E)$$

şeklinde verilir (Weisskopf ve Ewing, 1940). Burada $\sigma_a(\varepsilon)$; ε enerjisine sahip a parçacıkları ile bombardıman edilen hedef çekirdeğin bileşik çekirdek oluşturma tesir kesiti, $\eta_b(E)$ ise E uyarılma enerjisine sahip bileşik çekirdeğin b parçacığı yayınlama olasılığıdır. E uyarılma enerjisi; mermi parçacığın ε kinetik enerjisi ile bileşik çekirdeğe bağlı olduğu en düşük bağlanma enerjisinin (E_a) toplamıdır.

WE model ile yapılan BÇR hesaplamalarında nükleon yayınlama olasılığı;

$$W_b(\varepsilon_b) \propto (2s_b + 1) \mu_b \varepsilon_b \sigma_b^{inv}(\varepsilon_b) \frac{\rho(U)}{\rho(E)}$$

ile verilir (Broeders ve ark., 2006). Burada ε_b yayınlama enerjisi, s_b yayınlanan nükleonun spini, μ_b indirgenmiş kütlesi ve σ_b^{inv} ters reaksiyon

tesir kesitidir. $\rho(U)$ nükleer seviye yoğunluğu, $\rho(E)$ nükleon yayınlama çekirdeğin nükleer seviye yoğunluğudur. U ürün çekirdeğin uyarılma enerjisi ve E de nükleon yayınlama çekirdeğin uyarılma enerjisidir.

İstatistiksel dengeye ulaşma sürecinde bileşik çekirdekdeki parçacıkların enerjileri Maxwell dağılımına uygundur. Yani parçacıklar, denge öncesi her hangi bir anda yayınlama enerjisine ulaşmış olabilirler. Bu durumda uyarılma enerjisi tamamen paylaşılmasından önce parçacık yayınlaması gerçekleştiği için yayınlanan parçacıkların enerjisi, denge durumuna kıyasla daha büyüktür. Böylece direk reaksiyonlara göre daha uzun bir sürede yayınlanan ve bileşik çekirdek reaksiyon modelinin öngördüğünden daha enerjik parçacıkların varlığının belirlenmesi sonucu denge-öncesi reaksiyon modelleri ortaya konulmuştur. (Blann, 1975). Bu reaksiyonlara Denge Öncesi (Pre-Equilibrium) Reaksiyonlar denilmesinin sebebi, direk reaksiyonlar ile bileşik çekirdek reaksiyonları zaman dilimleri arasında gerçekleşmesidir.

Denge öncesi reaksiyonların açıklanabilmesi için ortaya konulmuş ilk modellerden biri olan Griffin Eksiton Model, nükleer potansiyelin eşit aralıklı tek parçacık durumlardan oluştuğunu kabul eder (Griffin, 1966). Mermi tanecik ile etkileşen, hedef çekirdeğin nükleonları Fermi seviyesi üzerine uyarılır ve geride boşluk (deşik) bırakırlar. Boşluklar ile Fermi enerji seviyesinin üzerindeki parçacık sayısının toplamı eksiton olarak isimlendirilir ve sistem eksiton sayısına göre tanımlanır. Bu uyarılma sürecinin herhangi bir anında parçacık yayınlaması gerçekleşebilir. Parçacık yayınladıktan sonra kalan uyarılma enerjisi sistem tarafından paylaşılır. Parçacık-boşluk çiftlerinin oluşumu tamamlanınca çift yakalama süreciyle tekrar dengeye ulaşılır.

n eksiton durumunda ε enerjili bir b parçacığının toplam yayınlanma oranı için;

$$W_b(E, n, \varepsilon_b) = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^3} \mu_b \varepsilon_b \sigma_b^{inv}(\varepsilon_b) \times \frac{\rho(p-b, h, U)}{\rho(p, h, E)} Q_b(p, h)$$

yazılır. Burada $\rho(p, h, E)$; parçacık-deşik durum yoğunluğu, $Q_b(n)$; proton ve nötron ayırt etme faktörüdür (Capote ve ark., 1991).

$\rho(p, h, E)$ ve $\rho(p, h, U)$ sırasıyla E uyarılmış durumda bulunan bileşik çekirdek ile U enerjisindeki ürün çekirdek eksiton durum yoğunluklarıdır.

Denge sürecinde uyarılmış durum parçacık sayısının, eksiton modelde önerilen kısmi durum yoğunluğu ve Pauli düzeltmesi de eklenerek hesaplandığı Hibrid model, Blann (1971) tarafından önerilmiştir. Hibrid modelde iç geçiş oranları çekirdek nükleonlarının ortalama serbest yol hesaplamalarından elde edilir. Bu modele göre enerji korunumu ve Pauli prensibi koşulları altında her bir seviyenin dolma olasılığı eşittir ve denge sürecinde ulaşılabilecek son durumun çeşitliliği seviyeler arasındaki geçişlerin farklılığına bağlıdır (Blann, 1971).

Hibrid modelde denge öncesi parçacık yayınlama olasılığı;

$$P_x(\varepsilon) d\varepsilon = \sum_{n=n_0}^{\bar{n}} \left(\frac{\left[\frac{\rho_{p,h}(U, \varepsilon) g d\varepsilon}{\rho_{p,h}(E)} \right]}{\left[\frac{\lambda_c(\varepsilon)}{\lambda_c(\varepsilon) + \lambda_{n+2}(\varepsilon)} \right]} \right) D_n = \sum_{n=n_0}^{\bar{n}} P_x(\varepsilon) d\varepsilon$$

şeklinindedir (Blann, 1975). Burada E bileşik çekirdeğin, U ise ürün çekirdeğin uyarılma enerjisidir. $\rho_{p,h}(E)$; n eksiton durumların yoğunluğu, $\rho_{p,h}(U, \varepsilon)$;

ε kanal enerjili n eksiton durumların yoğunluğu, g ; tek parçacık durum yoğunluğudur ve $\lambda_c(\varepsilon)$; ε kanal enerjili sürekliliğe (continuum) geçiş oranı, $\lambda_{n+2}(\varepsilon)$; iç geçiş oranıdır.

Geometri Bağımlı Hibrid Model (GDH) ise Hibrid Model'e nükleer yüzeyde gerçekleşen etkileşimlerin dahil edildiği denge öncesi reaksiyon modelidir. Reaksiyonun, yarıçapı çarpışma parametresi ile belirlenen ve $\lambda = \lambda/2\pi$ kalınlığa sahip küresel bir kabuğun içine ilerleyen, kısmi dalgalar tarafından başlatılacağı varsayımı ile nükleer yoğunluk dağılımının denge öncesi parçacık yayınlamasına katkısı hesaplamaya dahil edilir.

Böylece Geometri Bağımlı Hibrid Model'de parçacık yayınlama tesir kesiti;

$$\sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \pi \lambda \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell + 1) T_{\ell} P(\varepsilon) d\varepsilon$$

olarak verilir (Blann, 1972). Burada T_{ℓ} mermi parçacık iletim katsayıları ve mermi parçacığın $\ell\hbar$ ile temsil edilen bölgede etkileşiminin bir ifadesidir.

Kaskad eksiton model (CEM) denge ve denge öncesi etkilerin incelenmesi için kullanılan bir diğer modeldir. CEM nükleer reaksiyonların iç çarpışmalar (Intra Nuclear Cascad, INC), denge öncesi ve denge şeklinde üç aşamada gerçekleştiğini varsayar. INC model, Monte Carlo hesaplama yöntemine dayanan istatistik bir modeldir ve bu modele göre enerjinin nükleonlar arasında paylaşımı ile çekirdek, istatistiksel dengeye ulaşıp WE modelde olduğu gibi buharlaşma ile parçacık yayınlar (Serber, 1947). CEM; INC ile denge aşaması arasında da denge öncesi parçacık yayınlamasını öngörür. Çekirdeğin eksiton durumu belirlenir ve denge durumuna ulaşana kadar eksiton model'de verildiği gibi her adımda parçacık yayınlatabilir (Gudima ve ark., 1983).

CEM'de tesir kesiti hesaplamalarına her üç aşamanın da katkısı dahil edilir:

$$\sigma(p)dp = \sigma_{in} \left[\begin{array}{l} N^{cas}(p) + N^{prq}(p) \\ + N^{eq}(p) \end{array} \right] dp$$

burada p ; momentum ve σ_{in} ; inelastik tesir kesitidir. σ_{in} cascade model içinde hesaplanır.

Bulgular

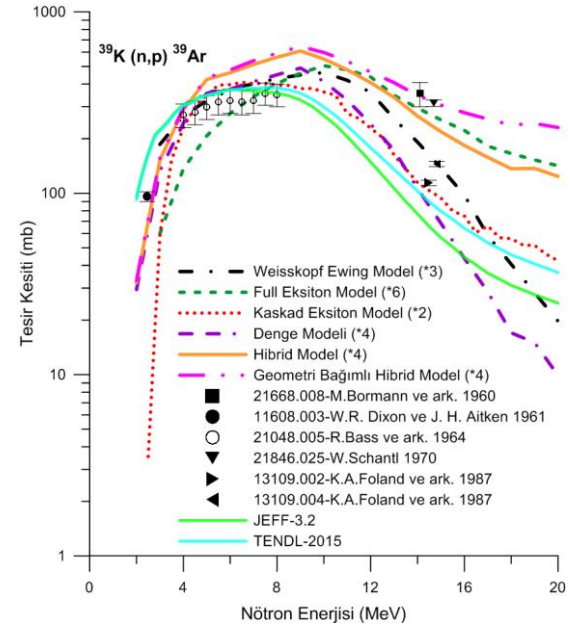
Bu çalışmada ^{39}K ve ^{41}K 'in, 20 MeV'e kadar gelme enerjili nötronlarla (n,p) ve (n, α) reaksiyonları için tesir kesiti hesaplamalarında denge ve denge öncesi etkileri araştırıldı.

Denge etkileri için Weisskopf-Ewing (Equilibrium) Model, denge öncesi etkiler için Eksiton Model, Hibrid Model, Geometri Bağımlı Hibrid Model ve Kaskad Eksiton Model (CEM) kullanıldı.

Denge ve denge öncesi model hesaplamaları için PCROSS, ALICE/ASH ve CEM03.01 bilgisayar programları kullanıldı. Hesaplama sonuçları literatürde yer alan deneysel sonuçlar, JEFF 3.2 (The Joint Evaluated Fission and Fusion File) ve TENDL-2015 (TALYS-based evaluated nuclear data library) değerlendirilmiş verileri ile karşılaştırıldı ve aşağıdaki bulgular elde edildi.

$^{39}\text{K}(n,p)^{39}\text{Ar}$ reaksiyonu için yapılan hesaplamalarda; kullanılan reaksiyon modellerinin sonuçları tüm enerji aralığında birbirleri ve değerlendirilmiş verilere şekil olarak benzer ancak daha düşük sonuçlar vermektedir (Şekil 1). Bu nedenle elde ettiğimiz hesaplama değerlerini literatürde yer alan çalışmalara benzer şekilde (Uğur ve ark. 2013, Kaplan ve ark. 2014) Şekil 1'de belirtilen katsayılarla çarparak deneysel değerlerle uyumlu sonuçlar elde ettik. Çarpan uygulandıktan sonra, tüm model sonuçları düşük enerji bölgesinde yer alan deneysel verilerle oldukça iyi uyumlu sonuçlar vermekte, yüksek enerji bölgesinde ise,

WE, Denge ve CEM sonuçları JEFF3.2, TENDL-2015 değerlendirilmiş verileri ile iyi uyum göstermektedir.

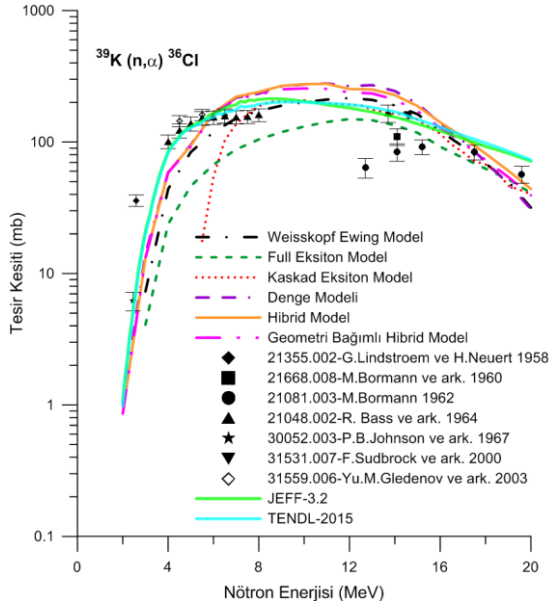


Şekil 1. $^{39}\text{K}(n,p)^{39}\text{Ar}$ reaksiyonunun, verilen nükleer modeller ile yapılan tesir kesiti hesaplamalarının, deneysel ve değerlendirilmiş verilerle karşılaştırılması.

Şekil 2'de verilen $^{39}\text{K}(n,\alpha)^{36}\text{Cl}$ reaksiyonuna ait hesaplamalarda, WE, Denge, Hibrid ve GDH model sonuçları düşük enerji bölgesinde deneysel ve değerlendirilmiş verilerle oldukça iyi uyum içerisindedir. 7-20 MeV enerji aralığında FEM dışındaki tüm model sonuçları birbirleri ve değerlendirilmiş verilerle iyi uyumludur. 14-20 MeV aralığında yer alan deneysel verilerle benzer sonuçlar içermektedir. FEM sonuçları tüm enerji aralığında diğer model sonuçlarından daha düşük değerdedir.

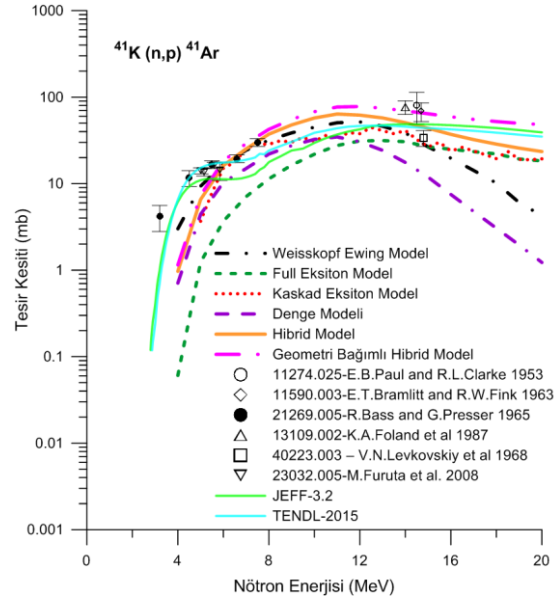
$^{41}\text{K}(n,p)^{41}\text{Ar}$ reaksiyonu için yapılan Hibrid ve GDH model hesaplamaları tüm enerji aralığında birbirleriyle çok yakın sonuçlar vermektedir (Şekil 3). Bu modellere ait hesaplama sonuçları 4-8 MeV ve 13-15 MeV aralığında yer alan deneysel değerlerle örtüşmektedir. Aynı enerji aralıklarında başarılı sonuçlar veren

diğer modeller WE ve CEM hesaplamaları ise, 8 MeV sonrasında Hibrid ve GDH model hesaplamalarından daha düşük ancak değerlendirilmiş verilerle uyumlu sonuçlar vermektedir. Denge modeli hesaplamaları 10 MeV'e kadar değerlendirilmiş verilerle uyumlu sonuçlar vermektedir.

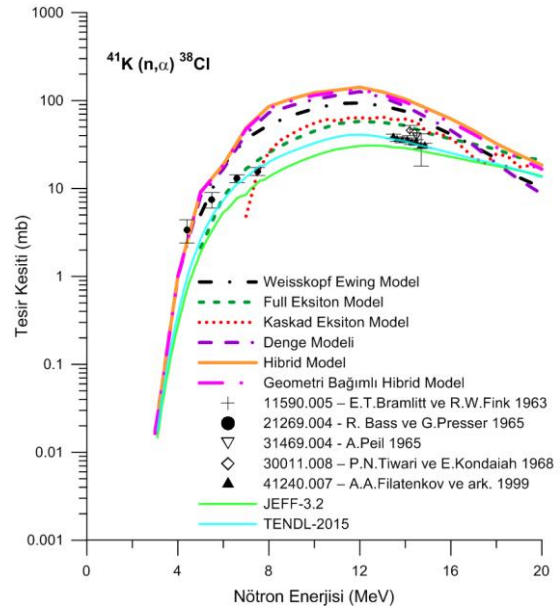


Şekil 2. ³⁹K(n,α)³⁶Cl reaksiyonunun, verilen nükleer modeller ile yapılan tesir kesiti hesaplamalarının, deneysel ve değerlendirilmiş verilerle karşılaştırılması.

Şekil 4'de verilen ⁴¹K(n,α)³⁸Cl reaksiyonuna ait hesaplamalarda WE, Denge, Hibrid ve GDH model sonuçları 8 MeV'e kadar birbirleriyle uyumludur. Bu modellere ait sonuçlar tüm enerji enerji aralığında değerlendirilmiş ve deneysel verilerden daha büyük değerlerdedir. FEM ve CEM hesaplamaları ise şekilde verilen deneysel değerlerle oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir.



Şekil 3. ⁴¹K(n,p)⁴¹Ar reaksiyonunun, verilen nükleer modeller ile yapılan tesir kesiti hesaplamalarının, deneysel ve değerlendirilmiş verilerle karşılaştırılması.



Şekil 4. ⁴¹K(n,α)³⁸Cl reaksiyonunun, verilen nükleer modeller ile yapılan tesir kesiti hesaplamalarının, deneysel ve değerlendirilmiş verilerle karşılaştırılması.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, FFHR reaktör tasarımında blanket olarak kullanılması önerilen Flinak bileşenlerinden potasyumun (K) ^{39}K ve ^{41}K izotopları için (n,p) ve (n, α) reaksiyon tesir kesiti hesaplamaları yapıldı.

PCROSS, Alice/ASH ve CEM03.01 bilgisayar programları kullanılarak, denge ve denge öncesi reaksiyon modellerinden Weisskopf Ewing Model, Full Eksiton Model, Denge Modeli, Hibrid Model, Geometri Bağımlı Hibrid Model ve Kaskad Eksiton Model hesaplamaları yapıldı. Hesaplamalarda nötron uyarılma enerji aralığı 0-20 MeV olarak seçildi.

Çalışmada Hibrid ve GDH model hesaplamalarının birbirleriyle uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Tüm modellerin seçilen enerji aralığında değerlendirilmiş verilerle benzer şekilli sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ayrıca WE, Hibrid, GDH ve Kaskad Model sonuçları, çoğunlukla deneysel verilerle uyum içerisindedir. FEM yalnızca $^{41}\text{K}(n,\alpha)^{38}\text{Cl}$ reaksiyonunda deneysel verilerle uyum göstermiş, diğer hesaplamalarda, daha düşük değerler vermiştir.

Kaynaklar

- Abdou, M. A., Ying, A., Morley, N., Gulec, K., Smolentsev, S., Kotschenreuther, M., ... & Nelson, B. 2001. On the exploration of innovative concepts for fusion chamber technology. *Fusion Engineering and Design*. 54;2:181-247.
- Blann, M. 1971. Hybrid model for pre-equilibrium decay in nuclear reactions. *Physical Review Letters*. 27;6:337-340.
- Blann, M. 1972. Importance of the nuclear density distribution on pre-equilibrium decay. *Physical Review Letters*. 28;12:757.
- Blann, M. 1975. Preequilibrium Decay. *Annual Review of Nuclear Science*. 25;1: 123-166.
- Block, R. C., Danon, Y., Gunsing, F., Haight, R. C. 2010. Neutron Cross Section Measurements, c.1. *Handbook of Nuclear Engineering* (D. G. Cacuci). ISBN 978-0-387-98150-5. Springer, US.
- Broeders, C. H., Konobeyev, A. Y., Korovin, Y. A., Lunev, V. P., Blann, M., 2006. ALICE/ASH MANUAL.
- Capote, R., Osorio, V., Lopez, R., Herrera, E., Piris, M. 1991. Analysis of Experimental Data on Neutron-Induced Reactions and Development of Code PCROSS for The Calculation of Differential Pre-equilibrium Emission Spectra With Modelling of Level Density Function. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- EXFOR, <http://www.oecdnea.org/janisweb/search/exfor>.
- Evaluated Data Library, <http://www.oecdnea.org/janisweb/>
- Ferng, Y. M., Kun-Yueh Lin, and Chen-Wei Chi. 2012. CFD investigating thermal-hydraulic characteristics of FLiNaK salt as a heat exchange fluid. *Applied Thermal Engineering*. 37: 235-240.
- Forsberg, C. W., Peterson, P. F., & Zhao, H. 2007. High-temperature liquid-fluoride-salt closed-Brayton-cycle solar power towers. *Journal of Solar Energy Engineering*. 129;2: 141-146.
- Fukada, S., & Morisaki, A. 2006. Hydrogen permeability through a mixed molten salt of LiF, NaF and KF (Flinak) as a heat-transfer fluid. *Journal of nuclear materials*. 358;2:235-242.
- Griffin, J. J. 1966. Statistical model of intermediate structure. *Physical Review Letters*. 17;9:478-481.

- Gudima, K. K., Mashnik, S. G., Toneev, V. D. 1983. Cascade-exciton model of nuclear reactions. Nuclear Physics A. 401;2:329-361.
- Kaplan, A., Çapalı, V., Özdoğan, H., Aydın, A., Tel, E., Sarpün, İ. H. 2014. (³He,xn) reaction cross-section calculations for the structural fusion material ¹⁸¹Ta in the energy range of 14–75 MeV. Journal of Fusion Energy. 33;5: 510-515.
- Kondo, M., Nagasaka, T., Xu, Q., Muroga, T., Sagara, A., Noda, N., ... & Fujii, N. 2009. Corrosion characteristics of reduced activation ferritic steel, JLF-1 (8.92 Cr–2W) in molten salts Flibe and Flinak. Fusion Engineering and Design. 84;7:1081-1085.
- LeBlanc, D. 2010. Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. Nuclear Engineering and Design. 240;6:1644-1656.
- Mashnik, S. G., Gudima, K. K., Sierk, A. J., Baznat, M. I., Mokhov, N. V. 2005. CEM03. 01 User Manual. Los Alamos National Laboratory.
- Olson, L. C., Ambrosek, J. W., Sridharan, K., Anderson, M. H., & Allen, T. R. 2009. Materials corrosion in molten LiF-NaF-KF salt. Journal of Fluorine Chemistry. 130;1:67-73.
- Ouyang, F. Y., Chang, C. H., You, B. C., Yeh, T. K., & Kai, J. J. 2013. Effect of moisture on corrosion of Ni-based alloys in molten alkali fluoride FLiNaK salt environments. Journal of Nuclear Materials. 437;1: 201-207.
- Sagara, A., Yamanishi, H., Imagawa, S., Muroga, T., Uda, T., Noda, T., ... & Kohyama, A. 2000. Design and development of the Flibe blanket for helical-type fusion reactor FFHR. Fusion Engineering and Design. 49:661-666.
- Serber, R. 1947. Nuclear reactions at high energies. Physical Review. 72;11:1114.
- Sona, C. S., Khanwale, M. A., Mathpati, C. S., Borgohain, A., & Maheshwari, N. K. 2014. Investigation of flow and heat characteristics and structure identification of FLiNaK in pipe using CFD simulations. Applied Thermal Engineering. 70;1:451-461.
- Uğur, F. A., Tel, E., Gökçe, A. A., 2013. A study on 19F (n, α) reaction cross section. Journal of Fusion Energy. 32;3: 414-418.
- Watanabe, K. Y., Sagara, A., Yamada, H., Sakakibara, S., Narihara, K., Tanaka, K., ... & Fujiwara, M. 2000. Helical Reactor Design Studies Based on New Confinement Scalings. Research Report NIFS-Series.
- Williams, D. F. 2006. Assessment of candidate molten salt coolants for the NGNP/NHI Heat-Transfer Loop. ORNL/TM-2006/69, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Weisskopf, V., 1937. Statistics and nuclear reactions. Physical Review. 52;4: 295.
- Weisskopf, V. F., Ewing, D. H. 1940. On the yield of nuclear reactions with heavy elements. Physical Review. 57;6:472.
- Yapıcı, H. 2003. Study of fissile fuel breeding concept for the force-free helical reactor. Fusion engineering and design. 65;4:599-609.