



Türk Doğa ve Fen Dergisi
Turkish Journal of Nature and Science

<http://www.bingol.edu.tr/dergiler/turk-doga-ve-fen-dergisi.aspx>



Toryum ve uranyumun nötron yakalama ve eksitasyon fonksiyonlarının hesaplanması ve deneysel veriler ile kıyası

İskender DEMİRKOL

Özet

Bu çalışmada nükleer reaksiyon modelleri sınıflandırılarak ^{232}Th ve ^{233}U çekirdekler için düşük gelme enerjilerinde nötron yakalama ve eksiton (n, xn) reaksiyon tesir kesitlerine ait nötron yayınlanma spektrumları hesaplanmıştır. Hesaplamalar geometri bağımlı hibrid model, exciton model ve cascade exciton model, optik model ve multistep istatistiksel model kullanılarak yapılmıştır. Deneysel data Uluslararası Atom Enerjisi Kurumunun ENDF/B kütüphanelerinden temin edilmiştir. Deneysel data ile teorik hesaplamalar sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hızlandırıcı kaynaklı sistem, enerji yükseltici, radyoaktif atık, toryum

Calculation of neutron capture and excitation functions of thorium and uranium and comparison with experimental data

Abstract

This research was conducted to determine the most optimum sowing date of common and Narbonne vetch at the ecological conditions of Bingöl in 2015. The study was arranged in a completely randomized block design in split plots and it was conducted with two common vetch, two Narbonne vetch and three sowing date. In the study; plant height, green herbage yield, dry herbage yield, seed yield, straw yield, thousand grain weight, crude protein ratio, acid detergent fiber (ADF) and neutral detergent fiber (NDF) characteristics were investigated. According to the results, the highest values were obtained from early sowing dates. Therefore, it was concluded that the best optimum sowing date for Bingöl could be April.

Keywords: Accelerator driven system, energy amplifier, radioactive waste, thorium

1. Giriş

Dünya enerji tüketiminin giderek artması ile mevcut enerji kaynakları azalmakta ve işletimde olan mevcut reaktörler büyük miktarda radyoaktif atık oluşturmaktadır. Bu problemler ile karşılaşan Dünya ülkeleri alternatif enerji üretimi ve atıkların ortadan kaldırılması için büyük Ar-Ge çalışmaları yürütmektedirler. Günümüzdeki nükleer enerji üretimi daha ziyade hafif su reaktörleri teknolojisine dayalıdır. Bu reaktörler yakıt olarak az zenginleştirilmiş ^{235}U kullanılmaktadır. Bu izotop, tabii uranyumun ancak %0,7 kadarını oluşturmaktadır. Tabii uranyum içinde bulunan diğer izotop %99,3 oranında ^{238}U dir. Mevcut reaktörler uranyum yakıtının ancak %1 kadarını değerlendirip %99 kadarını kullanılmayan radyoaktif atık olarak geride bırakırlar. Hafif su reaktör teknolojisinin yaygın oluşu ve nükleer enerjinin dünya enerji üretiminde giderek artması; nükleer yakıt üretimi için başka alternatif kaynakların aranmasını zorunlu hale getirmektedir.

1990'ların başından beri Uluslararası Bilim Komitesi tarafından (Accelerator Driven System, Hızlandırıcı

Kaynaklı Sistem) ADS, yüksek seviyedeki nükleer atık sorununu çözmek için geliştirilebilecek bir sistem olarak dikkate alınmaya başlandı ve birçok temel araştırma programları başlatıldı. Bu araştırma programları mümkün olabilecek alternatiflerin ve bununla ilgili teknolojik konuların araştırılması ve tanımlanmasına ışık tutmaktadır. C. Rubbia ve ekibi tarafından tasarlanan, son derece güvenli olan ADS reaktörü dikkat çekmiştir. Nobel Ödülü sahibi Prof. Dr. C. Rubbia'nın önderliğinde bir ekip yoğun akıllı bir proton hızlandırıcısına dayalı toryuma dayalı yeni bir nükleer reaktör tipi önerdiler [1]. Yeni reaktörün yapısı geleneksel reaktörlerden oldukça farklıdır. Bu reaktörün en önemli özelliği nükleer sürecin tam kontrollü olmasıdır. Yakıt çevrim sorunu nedeniyle, bugün için toryumla çalışan ticari ölçekli santraller bulunmamakla birlikte, bu santrallerin prototipleri ABD, İngiltere, Almanya, Hindistan ve Japonya'da bulunmaktadır [2-4]. Avrupa'da yapılan çalışmalar özellikle İtalya'da ve CERN'de Enerji Yükseltici kullanılarak atıkların dönüştürülmesi ve bu sırada enerji üretimini içeren alanlarda çalışmalar yapılmaktadır [5-9].

Yüksek enerjilerde spallasyon nötron kaynağı ile enerji yükseltici sistemi arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır ve bu ilişkiden dolayı üretilen nötron sayısı anahtar

¹ Bingöl Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 12000 Bingöl, Türkiye

*Sorumlu yazar E-posta: idemirkol@bingol.edu.tr

parametredir. Burada nötron üretilecek hedefin seçimi ve bu nötronların toryum numunesinde oluşturacağı nükleer süreçlerin incelenmesi çalışılacak iki önemli konu olarak gösterilebilir. Enerji yükseltici sistemi yüksek enerjili proton demeti altında çalıştığı için hedef çekirdeğin nükleonik karakteristiklerinin extra çalışmalarını gerektirmektedir. Özellikle de atık ürün çekirdek verimleri önemlidir. Hedef materyalden çıkan nötronların enerji spektrumu, nötron ürünü ve proton ile bombardıman edildiği zaman hedef içinde depo edilen enerji gibi detaylı bilgilere enerji yükseltici sisteminde gerek duyulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ^{232}Th ve ^{233}U gibi aktinidler ele alınarak üzerlerine düşük gelme enerjilerinde nötronlar gönderilerek (n,gama) ve (n,xn) reaksiyon tesir kesitlerine ait nötron yayınlanma spektrumları hesaplanmıştır. Hesaplamalar geometri bağımlı hibrid model, exciton model ve cascade exciton model, optik model ve multistep istatistiksel model kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen veriler Uluslararası Atom Enerjisi Kurumunun ENDF/B kütüphanesinden temin edilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.1. Nükleer Modeller

Full Exciton Model, Hibrid Model, Geometri Bağımlı Hibrid Model ve Cascade Exciton Model.

Belirli enerjilere sahip nötronlar, nükleer deneyler sonucu ile elde edilir. Mermi olarak gönderilen parçacıkla elde edilen nötronun enerjisini ve oluşma spektrumlarını bu deneylerden sonra söylemek mümkündür. Ancak deneyden önce ve sonra teorik hesaplarla oluşacak tesir kesitinin ve çıkacak olan parçacıkların spektrumlarının modellerin tutarlılığı göz önüne alınarak incelenmesi hem zaman kaybını engelleyecek hem de gereksiz masraftan kaçınılmasına yardımcı olacaktır. Bahse konu olan bu teorik tesir kesiti ve spektrum değerleri de bazı nükleer paket modeller kullanılarak hesaplanabilir. Fakat bu hesaplanan değerlerin doğruluğu daha önceden yapılmış deneyler ve bu deneylerin sonucunda elde edilen veriler ile karşılaştırılıp yorumlandıktan ve sahip oldukları hata payı hesabından sonra tartışılır. Hatta bu modeller ile daha deneyi yapılamamış yüksek mertebeli enerjilere sahip olan parçacıkların bombardıman sonrası oluşacak yeni izotopları ile parçacığın tesir kesiti ve spektrumlarının hesabının mümkün olması modellerin kullanımını cazip hale getirmiştir. Bu çalışmada kullanılan paket programlar yoğun bir matematik işleme sahip olan dinamiksel Liouville ve istatistiksel metot kullanılarak nümerik çözümlerin bulunduğu, matematiğin maksimum seviyede kullanıldığı denge ve denge-öncesi modelleri içerir. Buna ek olarak, uyarılmış bir nükleer sistemin hamiltonyeni olarak da ifade edilirler.

$$H=H_0+V \quad (1)$$

Burada; H_0 , kararlı bileşenlere aittir. Kuantum mekaniğin zamana bağımlı perturbe (etkileşim) teorisinin çözümü ile birinci mertebeden V bulunur ve buradan da durum yoğunlukları hesabına geçilir. Bu sistemin çözülmesi de dengeöncesi modeller için alt yapıyı oluşturur [10,11].

2.1.1. Full Exciton Model

Bu model, hedef çekirdek ile bombardıman parçacık arasındaki ilk etkileşmeden sonra sistemin uyarılacağını ve exciton sonucunda sisteme giren fazla enerjiden dolayı

sistemde düzensizlik oluşacağını ifade eder. Fakat bu düzensizliğin bir süre sonra tekrar dengeye ulaşabileceği varsayılır. Bu da, süreç içerisinde oluşan bir kısım basamakların her birinde sistemin temel hale dönebilmeye için gerekli enerjinin yayılması anlamına gelmektedir. Bu yayılan enerjiler sayesinde değişiklikler ve parçacıklar uyarılabilir. Süreç farklı düzensizlikteki uyarılmış parçacık ve deşik sayılarına göre sınıflandırılır. Bu modelde; çekirdek potansiyeli eşit aralıklarla yerleştirilmiş tek-parçacık durumuyla temsil edilmektedir. Gönderilen bombardıman parçacığı hedef çekirdeğe girdiği zaman $1p-0h$ (veya 1-exciton) durumunu, hedef çekirdeğe ait nükleonlardan birisiyle etkileşerek $2p-1h$ (veya 3-exciton) durumunu oluşturmaktadır.

Burada p ; parçacık sayısını, h ; deşik sayısını ifade eder. Daha sonraki etkileşmelerle birlikte de daha çok parçacık-deşik çiftinden oluşan durumları oluşturur.

Ayrıca, Exciton Model'inde denge süreçleri vardır. Bu süreç içerisinde parçacık yayınlanma olasılığını da hesaplamak mümkündür. Çiftlenimli Pauli Master denklemlerinin doğrudan nümerik çözümleri bu hesaplama yöntemini oluşturur. Nükleer reaksiyonun zamana göre fonksiyonu olması bu modelin temel özelliğidir. Bu bilgiler denklem 3'te tanımlanmıştır.

$$dP/dt = \lambda^+ (n-2) \quad (2)$$

$$P(n-2,t) + \lambda^- (n+2) P(n+2,t) - \{ \lambda_+(n) + \lambda_-(n) W(n) \} P(n,t) \quad (3)$$

Denklem 3'te $P(n,t)$ n ($n = p+h$), exciton durumunda bulunma olasılığıdır. λ_+ , $\lambda_- \rightarrow n+2$ ve $n \rightarrow n-2$ geçiş hızları, parçacıkların $W(n)$ n exciton durumunda tüm enerjilerde yayınlanma hızını verir [12].

2.1.2. Hibrid Model ve Geometri Bağımlı Hibrid Model

Exciton Modelde olduğu gibi tek parçacık durumlarını eşit aralıklı bir yerleşim olarak değerlendirir. Çekirdek durumlarını uyarılmış parçacık ve deşikleri içerecek şekilde sınıflandırır. Gelen nükleon, hedef çekirdekle $1p - 0h$ durumu oluşturur. Sonra $2p - 1h$ durumu oluşturmak için hedef nükleonla etkileşmeye girer. Bunun sonucunda iki cisim etkileşmeleri, daha fazla parçacık-deşik çifti oluşumuna sebebiyet verirler. Bu model, her bir nükleer durum için uyarılmış parçacıkların exciton enerjilerinin dağılımını hesaplar. Her parçacık exciton enerjisi için, yeni parçacık-deşik oluşumuna bağlı olarak kısmi parçacık yayınlanma oranları hesaplanır. Bahsi geçen tüm süreçler parçacık yayınlanmasında denge-öncesi spektrumuna katkıda bulunurlar. Bu süreç, denge sistemindeki en muhtemel exciton sayısına ulaşana kadar devam eder. Reaksiyonun denge kısmı için standart bir bileşik çekirdek modeli hesaba katılır. Böylece, hedef çekirdek ve gönderilen parçacığın etkileşmeleri ile parçacık-deşik çifti oluşumuna neden olan bu modelde, bileşik öncesi bozunmadan bahsedilebilir. Bu bozunma da,

$$P_v(\epsilon) = \sum_{n=n_0}^n \sum_{d=n+2} [\alpha \chi_v N_n(\epsilon, U) / N_n(E)] g d \epsilon \{ \lambda_c(\epsilon) / \lambda_c(\epsilon) + \lambda_+(\epsilon) \} D_n \quad (4)$$

$$d\sigma(\epsilon)/d\epsilon = \sigma_R P_v(\epsilon) \quad (5)$$

şeklinde formüllerle ifade edilebilir. $P_v(\epsilon)d\epsilon$; enerjisi ϵ ile $\epsilon+d\epsilon$ arasında olan ve sürekli bölgeye yayınlanan v tipi parçacıkların (nötron ve proton) sayısı, n ; denge konumundaki en muhtemel exciton sayısı, $\alpha \chi_v$; bir n exciton durumundaki v türündeki parçacıkların sayısı, E ; bileşik sisteminin exciton enerjisi, $N(\epsilon, U)$; bir exciton ϵ kanal enerjisiyle yayınlandığında kalan çekirdeğin $U=E-Bv-\epsilon$ exciton enerjisinin diğer $n-1$ excitonları arasında

paylaşılacak şekilde n excitonun uygun bir biçimde düzenlenme sayısı, $N_n(E)$; exciton enerjisinde n parçacık artı deşik ($n = p+h$) toplam birleşen sayısı, $\lambda_c(\epsilon)$; bir parçacığın (ϵ) kanal enerjisiyle sürekli bölgeye yayınlanma hızı, $\lambda_c(\epsilon)$; enerjili bir parçacığın sürekli bölgeye yayınlanmış olduğu zamanki çekirdek içi geçiş hızı, D_n ; bir n -exciton zincirinde başlangıç popülasyon kesiti, σ_R ; reaksiyon tesir kesiti, g ; tek-parçacık düzey yoğunluğunu ifade eder. Yukarıda verilmiş olan (4) denklemindeki köşeli parantez içindeki nicelik, sürekli bölge enerjisi ϵ ile $\epsilon+d\epsilon$ arasında olan parçacık sayısını belirler. Diğer parantez içindeki ifade ise, sürekli bölgeye geçiş hızının toplam geçiş hızına oranı belirler [13,14]. Ayrıca Geometri Bağımlı Hibrid Modelde parçacık-deşik durum yoğunluğu önemlidir ve parçacık-çekirdek oluşumunun nükleer yüzeye bağımlılığı vardır. Bu yüzden, sürekli bölgedeki enerjilerde küçük de olsa bir farklılık oluşur. Buna ek olarak, soğulan parçacığın açılma katkısı ve dışarı çıkacak olan parçacığın az da olsa açılma değişiminden dolayı Hibrid Model’inden ayrıldığı gözlenmektedir.

2.1.3. Cascade Exciton Model

Çok yüksek enerjiye sahip olmayan parçacık ile hedef çekirdek arasında gerçekleşen reaksiyonların, denge-öncesi hesaplarını yapmak için kullanılan diğer bir hesaplama yöntemi de Cascade Exciton Modeli (CEM) dir. Hedefe gönderilen parçacık hedef çekirdeğin exciton işlemini gerçekleştirir. Daha sonra, oluşan bu nükleer sistem istatistiksel dengeye ulaşana kadar parçacık yayınlamaya başlar. Bu yayınlanma mekanizması; oluşmuş bileşik çekirdeğin bozunumlarına ve direkt etkileşmelere göre incelenir.

Denge ve denge-öncesi modellerin kullanılması; nükleer yapının anlaşılmasına ve parçacık yayınlanma mekanizmasının açıklanmasına imkan tanır. Yüksek enerjilerde nükleer reaksiyonların birçok özellikleri, nükleer seviyelerde geçiş işlemi (Cascade) dikkate alınarak iyi bir şekilde incelenebilir. Cascade Model, reaksiyonların üç aşamada meydana geldiğini kabullenir. Birinci aşama, nükleer seviyelerdeki geçiştir. İkinci aşama denge öncesine, üçüncü aşama ise denge (veya bileşik çekirdek) durumuna karşılık gelir. Bu üç aşama deneysel olarak ölçülen değerlere katkıda bulunur. Buna göre parçacık spektrumu için;

$$\sigma(p)dp = \sigma_{in} \{N_{cas}(p) + N_{prq}(p) + N_{eq}(p)\} dp \quad (6)$$

yazılır. Burada: σ_{in} : İnelastik tesir kesitini; N_{cas} :Kaskat durumunu; N_{prq} :Dengeöncesi durumunu; N_{eq} : Denge durumunu ifade eder. Bu denklemdeki inelastik saçılma tesir kesiti ardı ardına geçiş model içinde hesaplanır. Fakat optiksel model hesaplamalarından bağımsızdır; bu yüzden bu model hesaplamalarında bir normalize kat sayısına ve ek veriye gerek kalmaz. Cascade Modeli, hızlı parçacıkların kinematik karakteristikleri hakkında bütün bilgileri içinde bulunduran reaksiyon geometrisini hesaba katar. Fakat bu parçacıklar arasındaki etkileşmeleri ihmal eder. Exciton Modeli uyarılmış bir çekirdeği; hh, ph ve pp etkileşmeleri hesaba katan yarı-parçacık gazı gibi düşünür. Cascade modeli aşamaları, gelen parçacığın kinetik enerjisi nükleonun bağlanma enerjisini aştığı durumda gerçekleşir. Geniş bir enerji aralığında yayılan parçacıkların nükleer reaksiyon özelliklerinin tanımını geliştirmek için bu iki modelin birleştirilmesi önemlidir. Ayrıca, Cascade Exciton Modeli için; bombardıman parçacıkları ve çekirdek iki farklı tür olarak düşünülür ve bu parçacıklar arasında da çarpışmalar ihmal edildiği için hesaplamalarda verilen enerjiler arasında dalgalanma görülebilmektedir [15-17].

3. Bulgular ve Tartışma

^{232}Th ve ^{233}U elementlerinin enerjisi 1 MeV den 20 MeV e kadar olan nötronlar ile bombardımanı sonucunda nötron yakalama yani gama yayınlanması hesaplamaları farklı modelleri kullanan SCAT2, ALICE91 ve CEM03 bilgisayar programları ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo: 1-4’ de sırasıyla verilmiştir.

3.1. $n + ^{90}\text{Th}^{232}$ Reaksiyonu

Enerji aralığı 1-20 MeV olan nötronlar ile ^{232}Th elementinin etkileşmesi sonucunda nötron yakalama $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ tesir kesitlerinin hesaplanması SCAT2, ALICE91 ve CEM03 bilgisayar programları ile yapılmıştır. Nötron enerjisine göre gama yayınlanması incelenmiş ve sonuçlar Tablo.1’de verilmiştir. Düşük gelme enerjilerinde nötron yakalama tesir kesitinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Gelme enerjisi arttıkça nötron yakalama tesir kesiti gittikçe azalma eğilimi göstermektedir. Program sonuçlarının paralellik gösterdiği ve birbirine yakın sonuçlar verdiği de görülürken deneysel data ile programların sonuçları arasında iyi bir uyum olmadığı görülmektedir. Deneysel sonuçların üç ayrı programla elde edilen sonuçlara uyumsuzluğun sebebi yapılan deneyin daha yüksek enerjilerde hatalı sonuçlar verdiği atfedilebilir.

3.2. $n + ^{92}\text{U}^{233}$ Reaksiyonu

^{233}U elementinin enerji aralığı 1-20 MeV olan nötronlar ile etkileşmesi sonucunda nötron yakalama $^{233}\text{Th}(n,\gamma)$ tesir kesitlerinin hesaplanması SCAT2, ALICE91 ve CEM03 bilgisayar programları ile yapılmıştır. Nötron enerjisine göre gama yayınlanması incelenmiş ve sonuçlar Tablo.2’de verilmiştir. Düşük gelme enerjilerinde nötron yakalama tesir kesitinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Gelme enerjisi arttıkça nötron yakalama tesir kesiti gittikçe azalma eğilimi göstermektedir. Program sonuçlarının paralellik gösterdiği ve birbirine yakın sonuçlar verdiği de gözlenmiştir.

3.3. $^{90}\text{Th}^{232}(n,xn)$ Reaksiyonu

^{232}Th elementinin enerji aralığı 1-20 MeV olan nötronlar ile etkileşmesi sonucunda oluşan (n,xn) eksiton nötron yayınlanma tesir kesitlerinin hesaplanması SCAT2, ALICE91 ve CEM03 bilgisayar programları ile yapılmıştır. Nötron gelme enerjisine göre (n,xn) yayınlanması incelenmiş ve sonuçlar Tablo.3’de verilmiştir. Düşük gelme enerjilerinde (n,n) oluşması daha büyük tesir kesiti değerlerine sahip iken nötron gelme enerjisi 8- 16 MeV aralığında $(n,2n)$ oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu, 15-20 MeV aralığındaki nötron gelme enerjisinde ise $(n,3n)$ oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu Tablo.3’ den anlaşılmaktadır.

3.4. $^{92}\text{U}^{233}(n,xn)$ Reaksiyonu

^{233}U elementinin enerji aralığı 1-20 MeV olan nötronlar ile etkileşmesi sonucunda oluşan (n,xn) eksiton nötron yayınlanma tesir kesitlerinin hesaplanması SCAT2, ALICE91 ve CEM03 bilgisayar programları ile yapılmıştır. Nötron gelme enerjisine göre (n,xn) yayınlanması incelenmiş ve sonuçlar Tablo.4’de verilmiştir. 2-8 MeV gibi düşük gelme enerjilerinde (n,n) oluşumu daha büyük tesir kesiti değerlerine sahip iken nötron gelme enerjisi 9-17 MeV aralığında $(n,2n)$ oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu, 17-20 MeV aralığındaki nötron gelme enerjisinde ise $(n,3n)$ oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu Tablo.4’ den anlaşılmaktadır.

Tablo 1. ^{232}Th elementinin nötron yakalama tesir kesitlerinin SCAT2, ALICE91 ve CEM03 programları kullanılarak hesaplanması, bulunan sonuçların birbirleri ile ve deneysel (Ref,18-21 den alınan) sonuçlar ile karşılaştırılması

$^{232}\text{Th}(n, \gamma)$ Reaksiyonu				
Enerji E_n (MeV)	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) SCAT2	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) ALICE91	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) CEM03	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) Deneysel [18-21]
0,001				3400
0,005	7730			1070
0,01	6300			670
0,05	5560			
0,1	5780			
0,15	5780			187
0,3	5220			162
0,5	4520	3830		152
0,75	4120			161
1	4000	3620	2791	126
1,25	3960			114
1,5	3900	3670		104
2	3660		2872	57
2,5	3390			30
3	3210	3360	2908	
4	3030	3200	2926	
5	3000	3080	2934	
6	3010	3010	2937	
7	2980			
8	2900	2830	2935	
9	2830			
10	2780	2580	2589	
12	2720	2360	2914	
14	2620	2140	2900	
16	2530	1910	2884	
18	2500	1710	2868	
19			2589	
20	2480	1530		

Tablo 2. ^{233}U elementinin nötron yakalama tesir kesitlerinin SCAT2, ALICE91 ve CEM03 programları kullanılarak hesaplanması, bulunan sonuçların birbirleri ile ve deneysel (Ref, 22-24 den alınan) sonuçlar ile karşılaştırılması

$^{233}\text{U}(n, \gamma)$ Bileşik çekirdek reaksiyonu				
Nötron Enerjisi (MeV)	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) SCAT2	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) ALICE91	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) CEM03	Bileşik çekirdek tesir kesiti (mb) Deneysel [22-24]
0,0000005				146000
0,001	15100			
0,005	7720			
0,01	6320			
0,03				425
0,05	5660			
0,1	5890			
0,15	5880			236
0,3	5280			
0,4				176
0,5	4550	3780		
0,6				124
0,75	4130			
1,00	4010	3600	2795	58
1,25	3970			
1,5	3900	3630		
2	3650	3600	2877	
2,5	3390			
3	3200	3350	2912	
4	3040	3190	2930	
5	3000	3090	2938	
6	3020	3030	2941	
7	2980		2941	
8	2910	2890	2939	
9	2840		2935	
10	2790	2680	2930	
12	2730	2510	2918	
14	2620	2330	2903	
16	2540	2130	2888	
18	2510	1960	2871	
20	2490	1800	2863	

Tablo 3. $^{90}\text{Th}^{232}$ (n,xn) reaksiyonu için nötron spektrumu üretim tesir kesitlerinin CEM03 programı ile elde edilen hesaplama sonuçları ve deneysel datanın karşılaştırılması

(n+ ^{232}Th) Reaksiyonu								
Nötron Enerjisi $E_n(\text{MeV})$	CEM03- Teoriksel							Deneysel [25]
	(n,n) Tesir kesiti (mb)	(n,2n) Tesir kesiti (mb)	(n,3n) Tesir kesiti (mb)	(n,4n) Tesir kesiti (mb)	(n,5n) Tesir kesiti (mb)	(n,6n) Tesir kesiti (mb)	(n,xn) Toplam Tesir kesiti (mb)	(n,2n) Tesir kesiti (mb)
1	2526,44							
2	2791,17							
3	2802,57	19,39	11,18	21	7,24	5		
4	2837,98	19,95	9,8	22,54	7,71	4,97		
5	2857,33	16,97	9,86	22,77	7,37	5,79		
6	2868,50	15	8,80	20,98	9,24	6,37	2931	
7	2869,78	15,28	9,31	22,50	9,05	6,93	2934	
8	2134,48	724,28	18,71	26,41	17,95	9,58	2935	1420
9	840,68	1958,66	34,81	34,67	38,92	15,67	2933	1500
10	459,29	2320,56	38,55	36,53	42,80	19,26	2929	1440
11	325,74	2439,30	40,18	37,22	47,82	21	2924	2100
12	272,09	2488,05	38,52	34,79	50,79	20,91	2919	1690
13	234,95	2503,33	45,49	35,15	51,29	24,63	2913	1750
14	212,82	2016,11	543,82	34	52,25	26,34	2906	1330
15	187,69	1223,93	1323,61	42,49	60,87	32,74	2899	980
16	169,18	705,02	1806,27	52,24	74,33	45,41	2890	
17	162,42	477,96	2001,71	56,25	82,32	54,29	2881	
18	144,65	376,74	2094,20	58,07	85,00	59,97	2872	
19	133,10	324,26	2135,54	56,59	86,61	61,95	2860	
20	124,67	304,31	2142,15	59,36	88,93	64,34	2849	

Tablo 4. $^{92}\text{U}^{233}$ (n,xn) reaksiyonu için nötron spektrumu üretim tesir kesitlerinin CEM03 programı ile elde edilen hesaplama sonuçları

$^{92}\text{U}^{233}$ (n,xn) Reaksiyonu							
CEM03-Teoriksel							
Tesir kesiti (mb)							
Nötron Enerjisi (MeV)	(n,n)	(n,2n)	(n,3n)	(n,4n)	(n,5n)	(n,6n)	Toplam(mb) (n,xn)
1,5							
2	2314	93,49	114,54	105	68,61	36,51	2743
3	2398	91,69	112,81	106	69,48	38,78	2830
4	2430	87,47	113,89	110	74,07	40,75	2871
5	2449	78,94	106,69	114	78,56	46,80	2892
6	2468	74,49	102,26	109	79,17	53,63	2906
7	2469	68,89	101,43	109	84,84	56,16	2914
8	1818	674,91	103,34	122	99,69	67,92	2916
9	690	1520	163,66	199	166	117	2917
10	359	1746	173,22	226	197	139	2917
11	264	1792	171,08	229	211	155	2913
12	221	1814	163,72	229	213	167	2910
13	197,65	1822	155,28	226	217	176	2905
14	181,93	1833	145,54	218	217	182	2899
15	157,40	1814	136,49	220	221	200	2893
16	142,24	1649	254,30	220	234	218	2884
17	136,07	1162	599,75	241	265	261	2876
18	122,93	756,50	880,24	257	293	293	2865
19	111,63	523,76	1041	258	301	321	2853
20	104	405,95	1103	256	302	333	2840

4. Sonuç ve Öneriler

Nükleer reaksiyon çalışmalarından elde edilen deneysel sonuçlar temel çekirdek fiziğinin anlaşılabilirliği bakımından önemlidir. Nükleer reaksiyonların enerji bağımlılığı daha detaylı olarak bilinmediğinden çok sayıda enerji için tesir kesitlerinin ve spektral yayınlanmasının incelenmesi gerekmektedir. Zaman kazanılması açısından yapılacakların en önemlisi bu tesir kesitlerinin teorik olarak önceden hesaplanmasıdır. Deneysel tesir kesitlerinin ve yayınlanma spektrumlarının

ölçülmesi ve önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için de teorik hesaplamaların yapılması gerekli bir durumdur.

Hızlandırıcı kaynaklı toryum yakıtlı sistemlerin, gelecekte en önemli enerji kaynaklarından biri olması kuvvetle muhtemeldir. Fosil yakıt rezervleri tükendikçe petrol ve diğer konvansiyonel enerji türlerinin fiyatının artmaya devam etmesi nedeniyle ADS teknolojisinin en ucuz ve en güvenli enerji üretim mekanizmalarından biri olması kaçınılmazdır. Türkiye toryum rezervine sahip Dünyanın ikinci büyük ülkesi olması ve nükleer enerji

reaktörleri kurma planları oluşturması nedeniyle, yerli nükleer yakıt olabilecek toryuma ve toryum yakıtlı reaktörleri inceleme açısından Ar- Ge çalışmalarına gereken önemi vermemelidir.

Bu çalışmada enerji aralığı 1-20 MeV olan nötronlar ile ^{232}Th ve ^{233}U elementlerinin etkileşmesi sonucunda nötron yakalama tesir kesitlerinin hesaplanması yapılmış ve sonuçlar Tablo.1 ve 2'de verilmiştir. Düşük gelme enerjilerinde nötron yakalama tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Gelme enerjisi arttıkça nötron yakalama tesir kesiti de gittikçe azalma eğilimi göstermektedir.

İkinci aşamada ^{232}Th ve ^{233}U elementinin enerji aralığı 1-20 MeV olan nötronlar ile etkileşmesi sonucunda oluşan (n,xn) eksiton nötron yayınlanma tesir kesitlerinin hesaplanması yapılmış ve sonuçlar Tablo.3 ve 4'de verilmiştir. Düşük gelme enerjilerinde (n,n) oluşması daha büyük tesir kesiti değerlerine sahip iken nötron gelme enerjisi 8-16 MeV aralığında (n,2n) oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu, 15-20 MeV aralığındaki nötron gelme enerjisinde ise (n,3n) oluşum tesir kesitlerinin daha yüksek olduğu Tablo.3' den anlaşılmaktadır.

Nötronlarla oluşturulan reaksiyon tesir kesitleri fisyon ve füzyon enerji reaktörlerinin özellikle ADS'nin tasarımında önemli yer tutmaktadır. Bu tür reaksiyonların oluşturulması sırasında materyallerin yapısal dayanıklılığını etkileyecek değişimler oluşabilmektedir. Bu olumsuz durumların öneminin anlaşılabilmesi ve sorunların giderilebilmesi için deneysel tesir kesitlerinin ve yayınlanma spektrumlarının ölçülmesi ve önceden oluşabilecek durumların belirlenebilmesi için de teorik hesaplamaların yapılması gerekli bir durumdur.

Geleceğin enerji kaynağı olarak düşünülen ADS teknolojisini geliştirme çalışmaları çeşitli ülkelerde devam etmektedir. Dünyadaki tahmin edilen toryum rezervinin yaklaşık beşte birinin Türkiye'de bulunduğu göz önüne alınırsa, ülkemizde de ADS teknolojisi ile ilgili AR-GE çalışmalarının acilen başlatılması gereklidir. Türkiye'deki toryum rezervinin insanlığın enerji ihtiyacını yüzyıllar boyunca karşılayacak miktarda olduğu da unutulmamalıdır. Bu sebeplerden dolayı projedeki yapılan çalışma ADS için bir önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinasyon Birimi (BÜBAP) tarafından BAP-55-258-2015 No'lu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Roche, C. and Rubbia, C., Some Preliminary Considerations on the Economical Issues of the Energy Amplifier. CERN AT/95-45 (ET), 1995.
- [2] Maiorino, J.R., Carluccio, T., A review of thorium utilization as an option for advanced fuel cycles – potential option for Brazil in the future. 2004. Americas Nuclear Energy Symposium, Miami Beach, Florida, USA.
- [3] Maiorino, J.R., Moreira, J.M.L., Laranjo, S.G., Busse, A., Santos, T., Thorium as a new primary source of nuclear energy. In: IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE), SBPE, Florianópolis, Brasil, 2014.
- [4] Maiorino J.R. and at al., Annals of Nuclear Energy 102 47–55, 2017.

- [5] Rubbia. C., et al., Fast Neutron Incineration in the Energy Amplifier as Alternative to Geologic Storage: The Case of Spain. European Organization For Nuclear Research CERN/LHC/97-01 (EET), 1997.
- [6] Hesketh, K., Advanced fuel designs for existing and future generations of reactors: driving factors from technical and economic points of view. Nuclear Engineering and Design, 221:277-292, 2003.
- [7] Rubbia, C. and Rubio, J.A., A Tentative Programme towards a Full Scale Energy Amplifier. CERN/LHC/96-11, Geneva, 36 p. 1996.
- [8] Gudowski, W., Accelerator-driven Transmutation Projects. The Importance of Nuclear Physics Research for Waste Transmutation. Nuclear Physics, A654: 436c-457c., 1999.
- [9] Rubbia, C., et al. Conceptual design of a fast Neutron operated high power energy amplifier. CERN/AT/95-44(ET), 1995.
- [10] Hüfner J. and Chiang C. C., Nucl. Phys. A 349, 466, 1980.
- [11] Bogolubov N. N., (Moskov: Gostekhizdat), in Russian, 1946.
- [12] Kaplan, A., Aydın, A., Tel, E. and Sarer, B., "Equilibrium and Pre-Equilibrium Emissions In Proton - Induced Reactions on ^{203}Tl , ^{205}Tl ", Pramana - Journal of Physics, 72 (2): 343-353, 2009.
- [13] Gudima K.K., Mashnik S.G. and Toneev V.D., Nuclear Physics A401, 329, 1983.
- [14] Blannand M., Vonach H.K., Global Test of Modified Precompound Decay Models Physical Review C, 28(4)1475-1492, 1983.
- [15] Blann M., Ann. Rev. Nucl. Sci. 25, 123, 1975.
- [16] Seidel K., Seeliger D., Reif R. and Toneev V. D., Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei 499, 517, 1976.
- [17] Barashenkov V. S. and V. Toneev D., (Atomizdat, in Russian 1972), RSIC CODE PACKAGE PSR-357, 1972.
- [18] Lindner M. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 10221
- [19] Grumitt W.E. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 12040.003
- [20] Belanova T.S. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 40072
- [21] Chelnokov V.B. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 40105
- [22] Eiland H.M. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 10143
- [23] Hopkins J.C. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 12331
- [24] Cabell M.J. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service 20459
- [25] Tewes H.A. and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 11504
- [26] Gryntakis E.M., and at al., NEA, Data Bank, Nuclear Data Service, 20625