

BİR TORYUM FÜZYON-FİSYON REAKTÖRÜNDE NÜKLEER ATIKLARIN FARKLI SOĞUTUCULARLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Hacı Mehmet ŞAHİN^a, Kadir YILDIZ^a, Taner ALTINOK^b ve Yusuf KILIÇ^c
^aGazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, 06500 Teknikokullar, ANKARA
^bKara Kuvvetleri Komutanlığı, Anıttepe, ANKARA
^cDenizcilik Müşterarlığı, Tandoğan, ANKARA

ÖZET

Bu çalışmada 14.1 MeV füzyon nötron kaynaklı ve ThO₂ yakıtlı bir hibrid reaktörde 48 aylık çalışma süresince Np, Am ve Cm gibi nükleer atıkların değerlendirilmesinin farklı soğutucularla nötronik analizi yapılmıştır. Soğutucu olarak flibe, tabii lityum ve gaz soğutucu seçilmiştir. Flibe soğutuculu manto diğer soğutuculara nazaran başlangıçtaki ²³⁷Np miktarının % 49.83'ünü tüketerek 48. ayda en iyi sonucu vermiştir.

Önemli bir nükleer atık olan ²⁴¹Am ve ²⁴³Am çekirdekleri reaktör işlem zamanı boyunca hibrid manto içinde azalmakta ve özellikle flibe ve gaz soğutuculu mantolarda tabii lityum soğutuculu mantoya göre daha fazla tüketilmektedir. 48 ay sonunda ²⁴¹Am ve ²⁴³Am çekirdekleri flibe soğutuculu mantoda sırasıyla % 51.68 ve % 44.32 oranında tüketilmektedir.

²⁴⁴Cm tüketiminin bir kısmı çok kıymetli bir nükleer yakıt olan ²⁴⁵Cm üretimini sağlamaktadır. 48 aylık işlem periyodu sonunda en fazla ²⁴⁵Cm miktarı 1.27 kg/m ile flibe soğutuculu mantoda görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hibrid Reaktör, Nükleer Atık, Toryum.

AN EVALUATION OF NUCLEAR WASTE IN A THORIUM FUSION-FISSION REACTOR WITH DIFFERENT MODERATORS

ABSTRACT

In this work, a neutronic analysis and an evaluation of the nuclear waste such as Np, Am, Cm has been performed for a hybrid reactor with different moderators used ThO₂ as fuel and fusion neutron drivers with 14.1MeV as neutron source. Flibe, natural lithium and gas were selected as coolant in hybrid blankets. Flibe moderated blanket spent amount of ²³⁷Np with 49.83 % according to the start at the end of 48th months and it gave well result.

Amount of ²⁴¹Am and ²⁴³Am, important nuclear waste, have decreased in hybrid blanket during reactor operation time. They are spent in especially flibe and gas moderated blankets more than natural lithium moderated blanket. At the end of 48th months, ²⁴¹Am and ²⁴³Am were consumed in ratio of 51,68 % and 44,32 % in flibe moderated blanket.

The portion of the consumption of ²⁴⁴Cm produces ²⁴⁵Cm, which is very precious nuclear fuel. It was shown that flibe moderated blanket has produced amount of ²⁴⁵Cm with 1,27 kg/m more than the other blankets during 48th months operation time.

Key words: Hybrid Reactor, Nuclear Waste, Thorium.

1. GİRİŞ

Dünya toryum rezervlerinin doğal uranyum rezervlerinden yaklaşık olarak üç kat daha fazla olduğu öngörülmektedir (1). Buna ilaveten günümüz nükleer santralleri ²³⁷Np, ²⁴¹Am, ²⁴³Am, ²⁴⁴Cm gibi nükleer atıklar üretmektedir (2). Bu atıkların saklanması için yüksek maliyet ve güvenlik insanı için giderek bir tehlike oluşturmaktadır.

Hibrid reaktörler üzerine yapılan daha önceki çalışmalarda toryum yakıtından ²³³U gibi fisyon olabilen yakıt elde edilebildiği gösterilmiştir (3-12). Ayrıca yine hibrid reaktörlerde bazı nükleer atıklar hem yüksek termal fisyon tesir ke-

sitli malzemelere hem de ²⁴⁵Cm (t_{1/2}= 9300 yıl) ve ^{242m}Am (t_{1/2}= 152 yıl) gibi daha uzun yarılanma ömürlü malzemelere dönüşebilmektedir (13).

Dünya enerji ihtiyacı sürekli artmakta, bu ihtiyacı karşılayabilmek için mevcut fosil yakıtlar yeterli olmadığından ve bu fosil yakıtların çok büyük miktarlarda çevre facialarına yol açmalarından dolayı daha temiz ve daha güvenli bir enerji kaynağı olan nükleer santrallere olan talep artmaktadır. Dünyanın çeşitli yerlerinde yeni nükleer santraller inşa edilmektedir. Kasım 2001 tarihi itibarıyla dünyada 438 adet reaktör mevcuttur ve bunların toplam gücü 353.411MWe'dir. İnşası devam eden reaktör sayısı 35 olup bunların gücü

28.911MWe, yapılması planlanan reaktör sayısı 32 olup bunların toplam gücü 34.660MWe'dir. Tüm bu reaktörler için gerekli Uranyum miktarı ise 64.956 ton olarak hesaplanmıştır (14).

Bu gün üretilen nükleer enerjinin tamamı doğal uranyum veya % 2 - % 4 oranında zenginleştirilmiş uranyum kullanan nükleer santrallerde üretilebilmektedir. Bu reaktörler 30-40 yıl ömürlü olup bol miktarda nükleer yakıt gerektirirler. Bilindiği gibi termal nötronlarla en iyi fisyon yapabilen malzeme ^{235}U 'dir ve bu da doğal uranyumun içinde % 0,7 oranında bulunmaktadır. Bu da günümüz reaktörlerinin nükleer yakıtın çok az bir miktarını enerjeye dönüştürebildiğini ve kalan büyük miktarının nükleer atık olarak tutulduğunu göstermektedir. Dünyadaki uranyum rezervlerinin sınırlı olması ve zenginleştirme işleminin yüksek maliyet getirmesinden dolayı yeni tip nükleer yakıtlar ve bunlara göre yeni tip reaktör dizaynları araştırılmaya başlanmıştır. Toryum bu çalışmalarda üzerinde yoğun olarak durulan yeni bir yakıt olarak yakın gelecekte kullanılmaya adaydır.

Dünya toryum rezervleri dağılımına bakıldığında Brezilya, Türkiye, Hindistan, ve Mısır toryum rezervlerinin yaklaşık % 70'ine sahiptirler (1). Toryum ve uranyum elementleri genel olarak doğada geniş bir şekilde dağılmışlardır. Bu elementlerin dünyadaki miktarları tam olarak bilinmemesine rağmen stratejik önemlerinden dolayı, toryumun dünya genelindeki rezervleri hemen uranyuma göre üç kat daha fazla olduğu biliniyor. Bunun anlamı doğal Th-232 izotopunun bolluğu U-235 izotopundan yaklaşık olarak 416 kat daha fazladır. Tablo I'de en önemli toryum rezervlerine sahip 10 ülke sıralanmıştır (1,15). Tablo I'de Türkiye 800.000 ton toryum rezerviyle birinci sırada yer almaktadır. Bu da dünya rezervlerinin % 52'si demektir.

Tablo I. Bazı ülkelerdeki toryum rezervleri (15).

Ülkeler	Belirli Rezervler	
	Ton	%
Türkiye	798,000	51,81
Hindistan	319,000	20,71
Norveç	132,000	8,57
U.S.A	122,000	7,92
Brezilya	68,000	4,41
Danimarka	54,000	3,50
Avustralya	21,000	1,36
Mısır	15,000	0,97
Güney Afrika	11,000	0,71

Genel Toplam	1,540,000	100,00
--------------	-----------	--------

Füzyon-Fisyon hibrid sistemi füzyon ve fisyon proseslerinin birleştirilmiş bir durumudur. Sistemin ana temeli, füzyon plazmasının etrafına üretken yakıtlardan (^{238}U veya ^{232}Th) oluşan bir mantonun geçirilmesi esasına dayanır. Füzyon plazmasından çıkan yüksek enerjili nötronlar bu mantoda tutulmakta ve üretken yakıtları ^{233}U ve ^{239}Pu gibi yüksek kaliteli fisyon olabilen yakıtlara dönüştürmektedir. Ayrıca bu yüksek enerjili nötronlar üretken yakıtlara da fisyon yaptırabilmektedir. Burada üretilen yeni tip kaliteli fisyon olabilen yakıtlar mevcut LWR'lerde nükleer yakıt olarak kullanılabilir.

Hibrid reaktörünün diğer bir avantajı, Tablo II.'de de verilen günümüz nükleer reaktörlerin ürettiği nükleer atık olan aktinitleri yüksek verimle yakabilmeleridir (2). Yüksek enerjili füzyon nötronları bu aktinitleri yakabilir veya fisyon olabilen bir yakıtı dönüştürebilir ya da uzun yarı ömürlü başka bir malzemeye dönüştürebilir.

Tablo II. Nükleer atık içindeki Aktinit miktarları (birim ünite için) (2).

AKTİNİT	PWR ^a (kg/y)	PWR ^b (kg/y)	LMFBR ^c (kg/y)
^{237}Np	20.4	15.1	3.07
^{241}Am	1.32	6.0	4.02
^{242m}Am	0.0119	0.079	0.071
^{243}Am	2.48	21.8	1.92
^{244}Cm	0.911	15.6	0.127
^{245}Cm	0.0554	1.74	-

a: 1000-MWe PWR, 150 gün sonra ;

b: Plutonyum çevrimli PWR, 1000-MWe reaktör, %80 kapasite faktörü, 33 MWd/kg, %32.5 termal verim, 150 gün sonra

c: Plutonyum çevrimli sıvı-metal üretken reaktör, 1000-MWe reaktör, %80 kapasite faktörü, 67.6 MWd/kg, %41.8 termal verim, 60 gün sonra

2. REAKTÖR MANTO GEOMETRİSİ

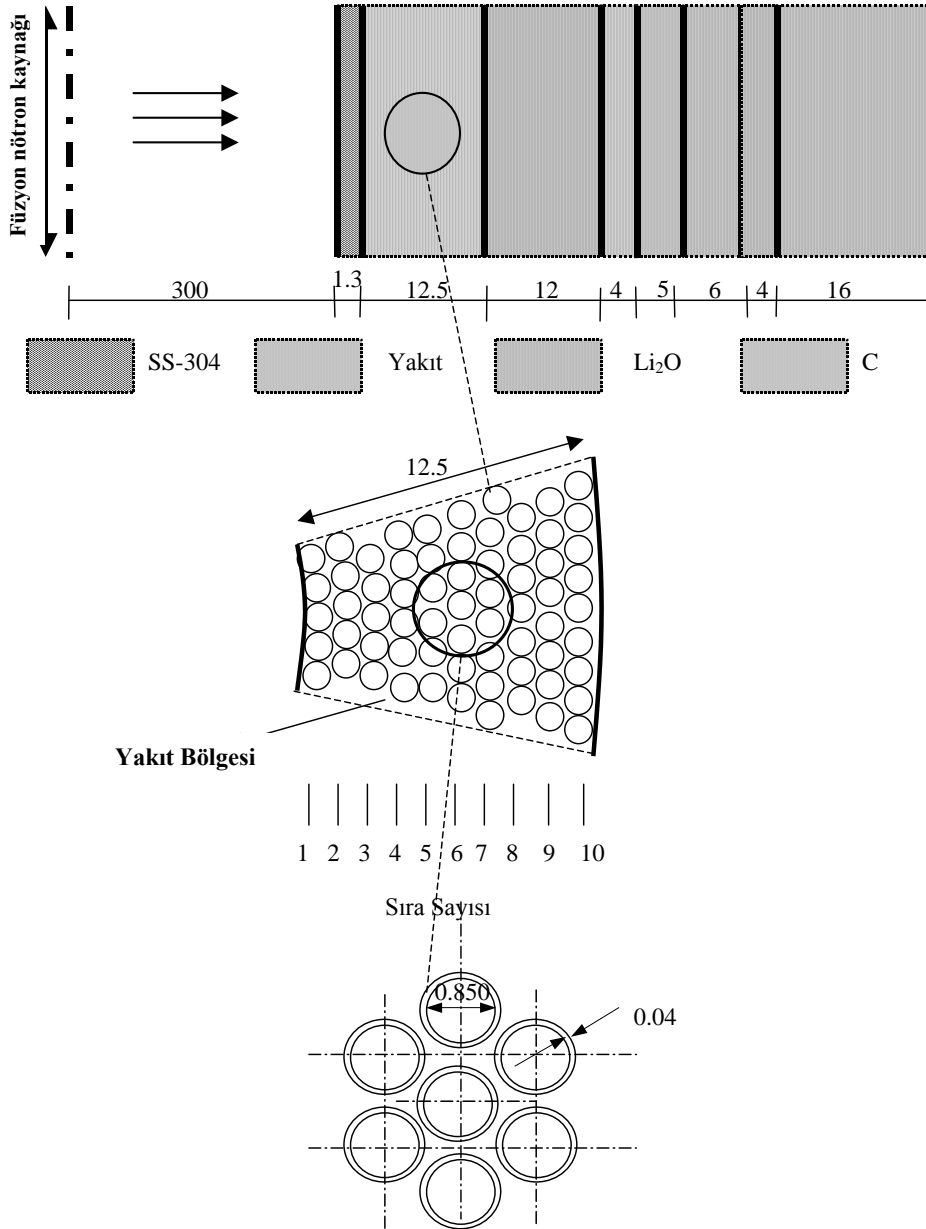
Çalışmada kullanılan manto geometrisi Şekil 1.'de gösterilmektedir (16,17,18,19). Reaktör merkezindeki silindirik boşluğun içerisine (D,T) füzyon nötron kaynağı yerleştirilmiştir. Füzyon nötron kaynağının etrafı Li_2O ve grafitten oluşan yakıt ve soğutucu ihtiva eden ve bir mantoyla çevrilmiştir.

Manto geometrisindeki ilk bölge füzyon nötron kaynağını çevreleyen 1,3 cm kalınlığındaki SS-304 çeliği içeren ilk duvardır (20,21).

İkinci bölge 10 sıralı yakıt bölgesidir. Bu bölge daha hassas tesir kesiti sağlaması açısından 10 ayrı yakıt bölgesine ayrılmış ve her bölgenin yoğunluk değerleri Tablo III.'de belirtilen oranlarda ThO_2 ve Aktinit bileşiği ile birlikte soğutucudan oluşmaktadır. Her bölge % 31.3 yakıt, % 62.6 soğutucu ve % 6.1 oranında yakıt zarfı olarak SS-304 çeliğinden oluşmaktadır. Reaktördeki yakıt malzemesinin bir zarf içinde kullanılması şarttır. Tüm yakıt elemanlarının zarflanması fisyon ürünlerinin burada

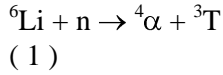
tutulması açısından önemlidir ve daha az nötron absorbe etmesi bakımından SS-304 çeliği seçilmiştir. Burada soğutucu olarak Flibe (Li_2BeF_4), tabii Lityum ve Gaz olmak üzere üç farklı tip soğutucu seçilmiştir ve bütün nötronik analizler bu soğutucu türlerine göre yapılmıştır. Hibrid reaktörde yakıt bölgesinde yakıt çubukları silindirik geometrinin eksenine dik bir düzlemde hegzagonal yapı oluşturacak şekilde dizilmiştir. Her yakıt çubuğu dış çapı 0.425 cm ve iç çapı 0.04 cm olan SS-304 çeliği ile kaplanmıştır. Yakıt bölgesi kalınlığı V_m/V_f oranına bağlı olarak 12.5 cm alınmıştır.

Üçüncü ve dördüncü bölge olarak sırasıyla



Şekil 1. Çalışılan manto geometrisinin kesit görünüşü

radyal yönde sandviç yapıda Li_2O bileşiğinden oluşan trityum üretim bölgesi ve grafitten oluşan reflektör bölgesidir. Grafitin nötronları yavaşlatma oranı oldukça büyüktür. Nötronlar Lityum ile etkileşime girdiğinde (D,T) füzyon reaksiyonu için gerekli trityumun üretilmesini sağlar. Li_2O bölgesinden kaçan yüksek enerjili nötronlar grafit bölgesinden geçerken enerjilerini düşürürler ve bir sonraki Li_2O bölgesinde denklem 1’de de gösterildiği gibi özellikle ${}^6\text{Li}$ ile etkileşerek trityum üretilmesini sağlayacaktır. Böylece daha iyi bir nötron ekonomisi sağlanacaktır .



Tablo III. Yakıt bölgesindeki yakıt çubuğu dizilişine göre ThO_2 ve Aktinit bileşiminin kütleli yüzdeleri

Sıra no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ThO_2	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
Aktinit	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9

3. NÜMERİK SONUÇLAR

3.1. Hesaplama Metodu

Nötron transport hesaplamalarında Boltzman transport denkleminin S_N metoduyla çözümü için XSDRNPM [22] kodu kullanılmıştır. Nötron tesir kesit kütüphanesi olarak 238 gruplu ENDF/B-V [23] nötron kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane genel amaçlı kritiklik analizleri kütüphanesidir ve SCALE sisteminin en geniş kütüphanesidir. Bu kütüphane LAW (Radyoaktif atıkların analiz kütüphanesi) olarak bilinir. AMPX-77 sistemi tarafından oluşturulmuş 300’den fazla çekirdek için datalar ihtiva eder. 148 hızlı nötron ve 90 termal nötron grubuna (3 eV’un altında) sahiptir. 238 grup kütüphanesindeki bütün çekirdekler aşağıda belirtilen dağılım spektrumlarını kullanırlar,

a-) 10^{-5} eV’dan 0.125 eV’a kadar Maxwellian spektrumu (300K’de tepe noktası)

b-) 0.125eV’dan 67.4 keV’a kadar 1/E spektrumu

c-) 67.4 keV’dan 10 MeV’a kadar fisyon spektrumu (1.273 MeV’da efektif sıcaklık)

d-) 10 MeV’dan 20 MeV’a kadar 1/E spektrumu

Nötron akısının açığa göre değişimi Gaussian quadrature metodu kullanılarak S_8 - P_3

yaklaşımıyla hesaplanmıştır (25). Hibrid reaktör operasyon periyodu boyunca zamana bağlı olarak Δt zaman aralıkları için hesaplanan üretim reaksiyonu,

$$+\Delta N_2 = \Delta t N_1 PF . \Delta t \int_E \sigma_{bl}(E) . \Phi(E) . dE + \Delta t \lambda_2 . N_2 \quad (2)$$

şeklinde dir. Burada 1 indisi asıl izotopu, 2 indisi türev izotopları göstermektedir. Tüketim reaksiyonu,

$$-\Delta N = PF . \Delta t . N . \int_E \sigma_{dep}(E) . \Phi(E) . dE. \quad (3)$$

şeklinde dir. Burada, E: Nötron enerjisi ; N: İzotopik atom yoğunluğu ; σ : Mikroskopik tesir kesiti ; λ : Radyoaktif bozunma sabiti ; Φ : Nötron akısını göstermektedir.

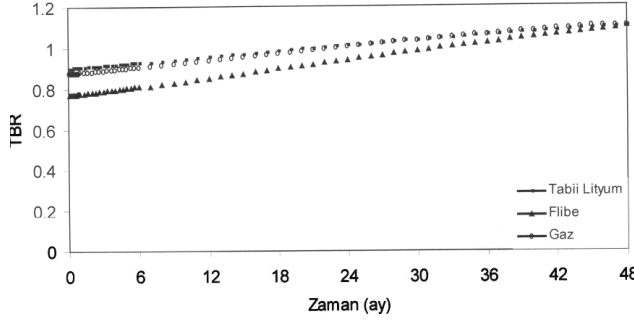
Yakıt kompozisyonundaki zamana bağlı değişim, hibrid reaktör tesisinin 48 aylık çalışma süresi boyunca Δt zaman aralığında hesaplanmıştır. Her bir yakıt çubuğunun nükleer kalitesindeki değişim, nötron spektrumundaki, fisyon olabilir ve üretken izotopların atomik yoğunluklarındaki değişimde dikkate alınarak radyal koordinatlarda (D,T) füzyon modunda $\Delta t=3$ günlük periyotlarda incelenmiştir. Zaman periyodunun daha kısa seçilmesiyle (D,T) füzyon modundaki nükleer yakıtın kalitesindeki değişimin daha hassas olarak gözlenmesi sağlanabilir. Araştırılan mantoda birinci duvar nötron yükü 2.25 MW/m^2 ve tesis faktörü %100 olarak alınmıştır. Nötron kaynağı olarak döteryum-trityum (D,T) nötron kaynağı seçilmiştir. Trityumun döteryum ile reaksiyonu sonucunda yüksek enerjili nötronlar saçılır. (D,T) reaksiyonunda gelen parçacıklar ihmal edilebilir küçüklükte kinetik enerjilere sahiptirler. Açığa çıkan 17.586 MeV ’luk enerjinin 3.486 MeV ’u ${}^4\text{He}$ ’e ve 14.1 MeV ’u ise nötrona aittir. (D,T) füzyon reaksiyonu aşağıdaki şekilde meydana gelmektedir.



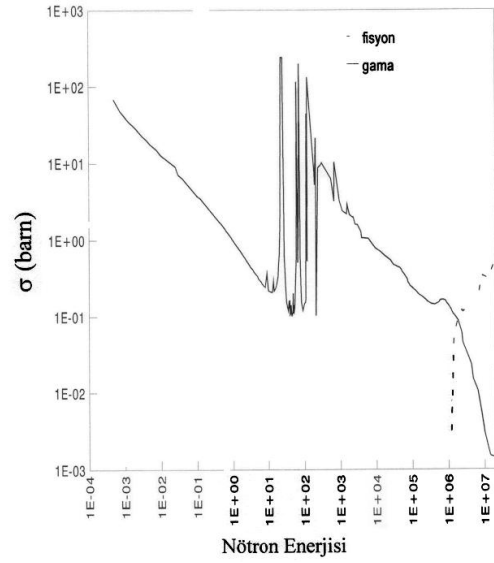
3.2. Hesaplama Sonuçları

Bir füzyon reaktöründe füzyon olayının devam edebilmesi için trityum üretiminin (TBR) 1.05’den büyük olması gerekmektedir. (D,T) füzyon reaksiyonu için gerekli trityum mantodaki trityum üretim bölgesinden elde edilir. Bu bölgenin malzemesi Li bileşiklerinden oluşmaktadır. Tablo IV.’de her üç soğutucu modu için mantolardaki toplam trityum üretimi (TBR)

verilmektedir. Reaktörün başlangıç modunda en iyi trityum üretim miktarını tabii lityum soğutuculu manto (0.9) vermektedir. Şekil 2.'de üç soğutucu modu için reaktör işlem zamanı boyunca trityum üretiminin lineer olarak arttığı görülmektedir. Şekil 2.'den de



Şekil 2. 48 aylık çalışma süresi boyunca mantoda üretilen TBR.



Şekil 3. 238 grup ENDF/B-V kütüphanede

232

Tablo IV. Araştırılan mantodaki 14.1MeV füzyon nötronu başına nötronik veriler.

Soğutucu Tipi	Flibe			Tabii Lityum			Gaz			
	Zaman (Ay)	0	24	48	0	24	48	0	24	48
TBR		0.769	0.940	1.100	0.9	1.010	1.100	0.874	1.004	1.100
$\nu\Sigma_f$		0.146	0.552	0.866	0.166	0.403	0.576	0.182	0.473	0.682
Σ_f		0.041	0.191	0.319	0.047	0.133	0.203	0.051	0.158	0.242
M		1.842	4.028	5.895	1.972	3.228	4.252	2.020	3.582	4.809
L		0.043	0.050	0.056	0.056	0.061	0.066	0.066	0.074	0.080
$^{232}\text{Th}(n,\gamma)$		0.392	0.417	0.426	0.278	0.282	0.279	0.304	0.312	0.310

TBR: $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$; Mantodaki toplam trityum üretimi ; $\nu\Sigma_f$: Toplam fisyon nötronu miktarı

Σ_f : Toplam fisyon reaksiyonu miktarı ; M: Manto enerji çoğalım faktörü

L: Radval nötron kazağı ; $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$; ^{233}U üretim miktarı

Th'nin fisyon ve gama tesir kesitlerinin nötron enerjisine göre değişimi.

görülebileceği üzere her üç soğutucu modu için 48 ay sonunda TBR>1.05 değerine ulaşılmaktadır.

Tablo IV.'de her üç soğutucu modu için fisyon reaksiyonu miktarları incelendiğinde, reaktörün çalışma zamanı boyunca Σ_f 'in arttığı görülmektedir. Mantoda çalışma zamanı boyunca fisyon olabilen malzeme miktarı arttıkça fisyon nötronlarında da ($\nu\Sigma_f$) benzer durumda artış olmakta ve bu durum mantonun nötronik performansını arttırarak yakıt bölgesinde daha çok fisyon olayının olmasını sağlamaktadır. Şekil 3.'den de görüleceği üzere ^{232}Th yüksek enerjili nötronlarla fisyon yapabilen bir malzemedir. Füzyon nötron kaynağından saçılan 14.1MeV mertebesindeki nötronların direkt

^{232}Th ile reaksiyona girmesinden dolayı başlangıçta gaz soğutuculu mantoda fisyon miktarının diğerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Çalışma zamanı ilerledikçe mantoda fisyon olabilen yeni yakıtlar özellikle de ^{233}U birikecek ve bu nedenle fisyon miktarında artış olacaktır. Flibe soğutuculu mantoda fisyon miktarının artması ^{233}U miktarının artmasından dolayıdır. 48 aylık çalışma zamanı sonunda fisyon miktarındaki en yüksek artış 0.319 değeriyle flibe soğutuculu mantoda olmaktadır.

Hibrid mantodaki en önemli göstergelerden biri enerji çoğaltım faktörüdür (M). Mantodaki toplam enerji oluşumunu gösteren M faktörü, fisyon enerjisi, nötron knetik enerji transferi ve ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ gibi nükleer ısınmayı kapsayan bütün exoenerjik nükleer reaksiyonları içerir. Fisyon reaksiyonu başına ortalama 200 MeV ve ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ reaksiyonu sonucu ortalama 4.784 MeV enerji açığa çıktığı gözönüne alınırsa M enerji çoğaltım faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanır:

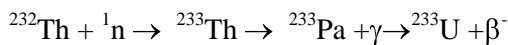
$$M = \frac{200 * \langle \Phi \bullet \Sigma_f \rangle + 4.784 * T_6}{14.1} + 1 \quad (4)$$

$\langle \Phi \bullet \Sigma_f \rangle$: toplam fisyon miktarı

Tablo IV.'de de görüleceği üzere mantodaki fisyon miktarı arttıkça M değerinde artmaktadır. Çalışma zamanı başında gaz ve tabii lityum soğutuculu mantolar en iyi M değerini vermekle beraber ilerleyen zamanlarda fisyon olabilen malzemelerdeki artış nedeniyle flibe soğutuculu manto 48 ay sonunda 5.895 değeriyle en yüksek M değerine ulaşmaktadır.

Gerek mantodaki nötron ekonomisi açısından gereksede bütün reaktör tiplerinde biyolojik zırlama açısından radyal yöndeki nötron kaçakları önemli bir etkidir. Tablo IV incelendiğinde, reaktördeki işlem zamanı boyunca radyal yöndeki nötron kaçaklarının (L) en yüksek artış oranının 48 ay sonunda %7.96 ile gaz soğutuculu mantoda olduğu görülecektir.

Toryum kullanılan hibrid reaktörlerde ana üretim ;



reaksiyonuyla elde edilir. Şekil 3.'den görüleceği üzere ^{232}Th eV seviyelerindeki nötronları yutarak gama ışınması sonucu iyi bir fisyon yakıtı olan ^{233}U

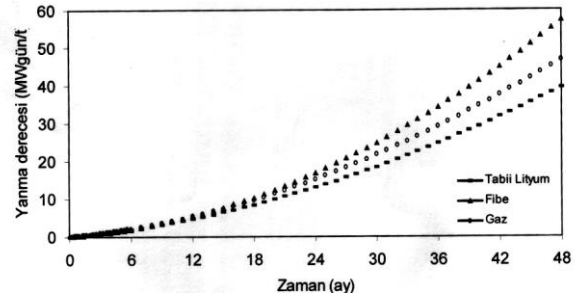
üretmektedir. Buna karşılık MeV seviyelerindeki nötronlarla ancak fisyon reaksiyonu yapabilmektedir. Bu nedenle füzyon nötron kaynağından saçılan yüksek enerjili nötronların büyük ölçüde yavaşlatılması gerekmektedir. Tablo IV.'den de görüleceği üzere flibe soğutuculu moderatörde reaktör işlem zamanı boyunca en yüksek değerde fisyon olabilir yakıt üretilebilmektedir.

Reaktör çalışma zamanı boyunca fisyon olabilir yakıt hibrid mantoda fisyon enerjisi üretir. Üretken yakıtlardan üretilen fisyon olabilir yakıt miktarı mantoda arttıkça fisyon enerjisi de artar. Fisyon olabilir yakıtların tümünü tüketmek mümkün değildir. Bu durum aşağıda verilen yakıt yanma denklemiyle ölçülebilir (25-27).

$$BU = E_f \times 10^{14} F_w C_f \frac{\iint \Sigma_f \Phi dEdV}{M_f} \Delta t \quad (5)$$

Denklem (5)'de verilen toplam fisyon miktarı tek bir füzyon nötronu için XSDRNPM [22] ile hesaplanır. $2.25\text{MW}/\text{m}^2$ 'lik nötron akısı için nötron akı yükü $10^{14} F_w (14.1\text{MeV n})/\text{cm}^2\text{s}$ dir. Burada F_w füzyon nötronlarının saçıldığı ilk duvar yüzey alanı, C_f dönüşüm faktörü olup birimi $1.6021 \times 10^{-19} \text{MWs}/\text{MeV}$, M_f ise mantodaki toplam yakıt miktarıdır.

Şekil 4. mantodaki çalışma zamanı boyunca yakıt yanma derecesini gösteren grafikdir. Şekil incelendiğinde yanma derecesinin fisyon miktarının



daki artışla birlikte arttığı görülmektedir. İlk 18 aylık periyotta her üç soğutucu modunda yanma derecesi yaklaşık aynı olmasına rağmen 18 ay sonunda özellikle flibe soğutuculu mantoda fisyon olabilir yakıt miktarındaki artıştan dolayı yanma derecesinin de diğer soğutuculara nazaran daha önemli oranda arttığı görülmektedir. 48 aylık çalışma zamanı sonunda en yüksek yanma derecesine yine flibe soğutuculu mantoda ulaşılmıştır.

Hibrid reaktörlerde yakıt gençleştirme kabiliyeti (FOM) net ^{233}U ve Pu miktarının fisyon güç çıkışına oranıdır. FOM'un matematiksel formülasyonu (g/MW_{th}yıl) veya (kg/GW_{th}yıl) olarak şöyle yapılır (25-27) :

$$M_{\text{Pu}} = 10^{14} \cdot F_w \cdot C_{\text{Pu}} \cdot \Delta t \cdot \int_V \left[\sum_{\gamma} \langle \sigma_{f,233\text{U}} \rangle - \sum_{\text{dep}} \langle \sigma_{a,233\text{U}} \rangle \right] \Phi \cdot dE \cdot dV \quad (6)$$

$$M_{\text{U}} = 10^{14} \cdot F_w \cdot C_{\text{U}} \cdot \Delta t \cdot \int_V \left[\sum_{\gamma} \langle \sigma_{f,233\text{U}} \rangle - \sum_{\text{dep}} \langle \sigma_{a,233\text{U}} \rangle \right] \Phi \cdot dE \cdot dV \quad (7)$$

$$C_{\text{Pu}} = 3.968 \cdot 10^{-22} \text{ g/atom Pu ,}$$

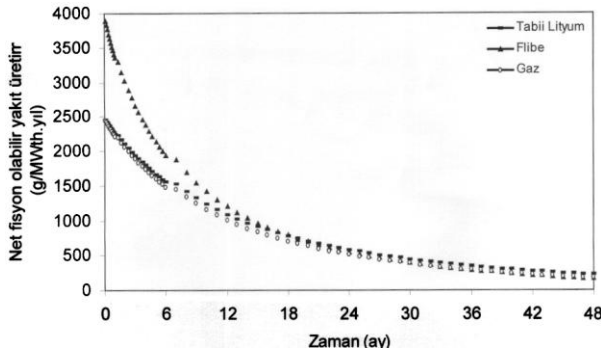
$$C_{\text{U}} = 3.869 \cdot 10^{-22} \text{ g/atom } ^{233}\text{U ,}$$

$$P_{\text{th}} = E_f \cdot 10^{14} \cdot F_w \cdot C_f \cdot \int_V \left[\sum_f \langle \sigma_f \rangle \right] \Phi \cdot dE \cdot dV \quad (8)$$

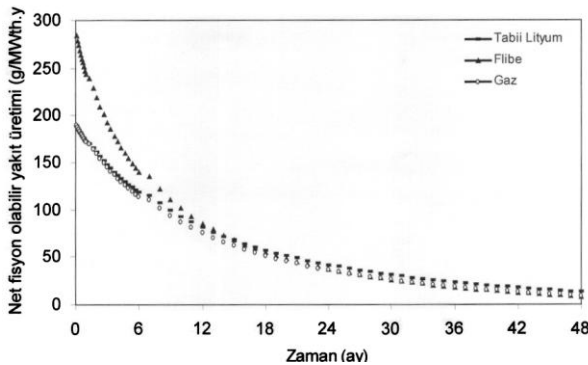
$$\text{FOM}_{\text{Pu}} = M_{\text{Pu}} / P_{\text{th}} \text{ net Pu [gr./ (MW}_{\text{th}} \cdot \text{yıl)}] \text{ or [kg/(GW}_{\text{th}} \cdot \text{yıl)}] \quad (8a)$$

$$\text{FOM}_{\text{U}} = M_{\text{U}} / P_{\text{th}} \text{ net } ^{233}\text{U [gr./ (MW}_{\text{th}} \cdot \text{yıl)}] \text{ or [kg/(GW}_{\text{th}} \cdot \text{yıl)}] \quad (8b)$$

Şekil 5. ve Şekil 6. manto geometrisi için her üç soğutucu modunda sırayla ^{233}U için FOM ve Pu için FOM değerlerini vermektedir. Her iki şekilden



Şekil 5. 48 aylık çalışma süresi boyunca net ^{233}U üretimi.

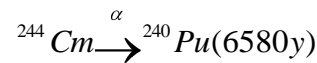
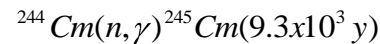
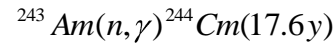
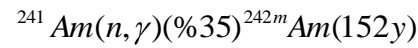
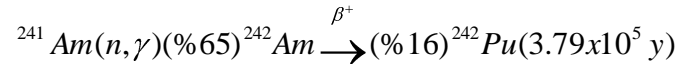
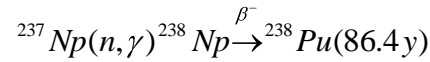


Şekil 6. 48 aylık çalışma süresi boyunca net Pu üretimi.

de görüleceği üzere reaktör çalışma zamanı başlangıcında fisyon olabilir yakıt üretiminde çok hızlı bir artış olduğundan FOM değerleri oldukça yüksektir. Bu durum fisyon enerjisinin artmasına dolayısıyla da reaktörün toplam gücünün artmasına ve fisyon olabilir yakıtların daha verimli yakılması sağlamaktadır. Çalışma zamanı dikkate alındığında 48. ayın sonunda flibe soğutuculu manto fisyon olabilir yakıtı, tabii lityum ve gaz soğutuculu mantolara göre daha iyi yakmaktadır. Bütün soğutucu modlar için fisyon olayları arttığından FOM değerleri çalışma zamanı ilerledikçe düşmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere ilk 12 ay itibariyle en iyi FOM değerlerini flibe soğutuculu manto vermektedir.

4. AKTİNİTLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada göze alınan hususlardan biri de hibrid mantoya yerleştirilmiş olan tablo II.'de verilen nükleer atıkların ThO₂ yakıtı ile belli oranlarda karıştırılarak bunların hem mantonun fisyon enerjisini arttırmada hem de fisyon olabilir yeni yakıt elde edilmesinde değerlendirilmesidir. Yeni yakıt eldesinde geçerli olan ana nükleer reaksiyonlar aşağıdaki şekilde verilebilir:

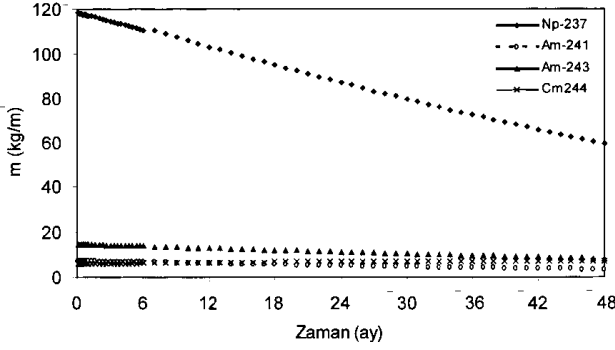


Ayrıca yine hibrid reaktörlerde bazı nükleer atıklar hem yüksek termal fisyon tesir kesitli malzemelere hem de ^{245}Cm ($t_{1/2} = 9300$ yıl) ve ^{242m}Am ($t_{1/2} = 152$ yıl) gibi daha uzun yarılanma ömürlü malzemelere dönüşebilmektedir (13).

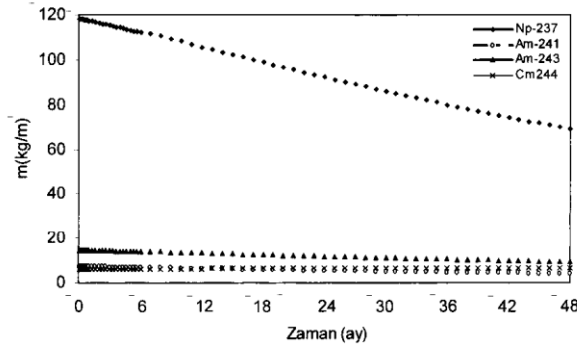
Şekil 7., Şekil 8. ve Şekil 9. sırasıyla flibe, tabii lityum ve gaz soğutuculu mantolar için reaktör işlem zamanı boyunca birim yakıt çubuğu uzunluğu için aktinit miktarlarını vermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi bütün soğutucu modlarında ^{237}Np en çok tüketilen aktinittir. Flibe soğutuculu manto diğer soğutuculara nazaran baş-

langıçtaki ^{237}Np miktarının %49.83'ünü tüketerek 48. ayda en iyi sonucu vermiştir.

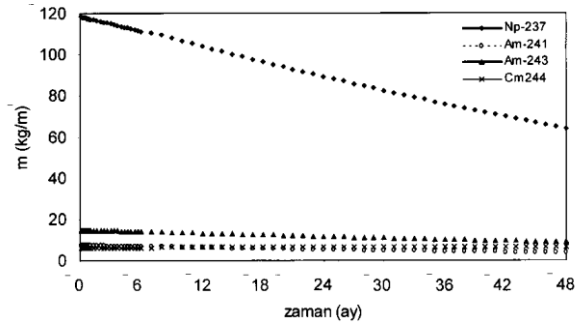
Önemli bir nükleer atık olan ^{241}Am ve ^{243}Am çekirdekleri reaktör işlem zamanı boyunca hibrid manto içinde azalmakta ve özellikle flibe ve gaz soğutuculu mantolarda tabii lityum soğutuculu



Şekil 7. 48 aylık çalışma süresi boyunca flibe soğutuculu mantoda aktinit miktarının değişimi.



Şekil 8. 48 aylık çalışma süresi boyunca tabii lityum soğutuculu mantoda aktinit miktarının değişimi



Şekil 9. 48 aylık çalışma süresi boyunca gaz soğutuculu mantoda aktinit miktarının değişimi.

mantoya göre daha fazla tüketilmektedir. ^{241}Am ve ^{243}Am çekirdekleri flibe soğutuculu mantoda

sırasıyla %51.68 ve %44.32 oranında tüketilmektedir.

Şekiller incelendiğinde ^{244}Cm miktarında hafif bir artış görülmektedir. Bu artışlar her üç soğutuculu mantolarda $^{243}\text{Am}(n, \gamma)^{244}\text{Cm}$ üretiminin ^{244}Cm tüketiminden daha fazla olduğunu göstermektedir. ^{244}Cm tüketiminin bir kısmı çok kıymetli bir nükleer yakıt olan ^{245}Cm üretiminde olmaktadır. 48 aylık işlem periyodu sonunda en fazla ^{245}Cm miktarı 1.27kg/m ile flibe soğutuculu mantoda görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu çalışmada bir toryum füzyon-fisyon reaktöründe nükleer atıkların flibe, tabii lityum ve gaz soğutucuları kullanılarak değerlendirilmesi incelenmiş ve reaktör için bazı nötronik parametrelerin değişimi araştırılmıştır. Hibrid reaktörler olarak adlandırılan füzyon-fisyon reaktörleri, hem enerji elde etmede hem de günümüz reaktörlerinin ürettiği nükleer atıkları yakıt olarak kullanarak şimdiki reaktörler için taze yakıt üretme amacıyla gelecek yıllar için tasarlanmaktadır. Dünya'da ki ve özellikle ülkemizin sahip olduğu toryum rezervlerinin değerlendirilmesinde hibrid reaktörler çok büyük önem kazanmaktadır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda;

1-) 48 aylık reaktör çalışma süresi boyunca nötron kaynağı için gerekli trityumun üretilmesi açısından her üç soğutuculu manto 1.1 ile en iyi performansı gerçekleştirmişlerdir.

2-) Mantolardaki nötron ekonomisi açısından en iyi performansı flibe soğutuculu manto vermiş, kaçakların en yoğun olduğu manto ise gaz soğutuculu manto olmuştur.

3-) Mantolardaki toplam fisyon miktarları incelendiğinde, en çok fisyon olayının olduğu mantonun enerji çoğaltım faktörünün de yüksek olduğu görülmektedir. Bu açıdan en yüksek fisyon enerjisinin elde edildiği manto flibe soğutuculu manto olmuştur.

4-) ^{232}Th yakıtından elde edilen ve çok kıymetli bir yakıt olan ^{233}U 'ün elde edilmesi açısından 48 ay sonunda en iyi değere flibe soğutuculu mantoda ulaşılmış ve birim reaktör uzunluğu başına 508 kg ^{233}U elde edilmiştir.

5-) Reaktördeki yakıt çubuklarına ThO_2 yakıtı ile beraber belli oranlarda karıştırılarak yer-

leştirilen ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am ve ^{244}Cm gibi nükleer atıklar bütün soğutucu modlarında ortalama yarı yarıya tüketilmiştir. Atıkların değerlendirilmesi açısından en iyi performansı flibe soğutuculu manto göstermiş ve ayrıca çok kaliteli ve değerli bir madde olan ^{245}Cm elementi 48 ay sonunda birim reaktör uzunluğu başına 1,27 kg olarak elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Ünak, T., What is the Potential Use of Thorium in the Future Energy Production Technology? *Progress in Nuclear Energy*, Vol. **37**, No. 1-4, pp. 137-144, (2000)
2. Manson, B., Thomas, H. P. and Hans W. L., Nuclear Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Company, (1981)
3. Mynatt, F.R., Analysis of Acceleration Breeder Concepts with LMFBR, GCFF and Molten Salt Type Blankets, *Proc. Information Mtg. Accelerator Breeding, Upton*, January 18 - 19, New York (1977).
4. Blinkin, L.V. and Novikov, M.V., Optimal Symbiotic Molten Salt Fission-Fusion System, *Kurchatov Institute of Atomic Energy*, 1 AE-2819, Moscow, UCRL-Trans-11288 (1977).
5. Moir, R.W. (editor), Tandem Mirror Hybrid Reactor Design Study Annual Report, UCRL-52875, Lawrence Livermore Laboratory (1979).
6. Ragheb, M.H., et al., Nuclear Performance of Molten Salt Fusion-Fission Symbiotic Systems for Catalyzed DD and DT Reactors, ORNL-TM-6560, OAK Ridge National Laboratory (1979).
7. Teller, E., *Fusion, Magnetic Confinement*, Vol. **1**, Part B, Academic Press (1981).
8. Berwald, D.H., et al., Fission Suppressed Hybrid Reactor-the Fusion Breeder, *UCID-19638, Lawrence Livermore Laboratory* (1982).
9. Lee, D.J. et al., Feasibility Study of a Fission-Suppressed Tandem-Mirror Hybrid Reactor, *UCID-19327, Lawrence Livermore National Laboratory* (1982).
10. Greenspan, E., Fusion-Fission Hybrid Reactors, *Advances in Science and Technology*, Vol. **16**, p. 289, J. LEWINS and M. BECKER, Eds., Plenum Press (1984).
11. Moir, R. W. et al., Helium-Cooled, Flibe Breeder, Beryllium Multiplier Blanket, *Fusion Technology*, Vol. **8**, p. 133 (1985)
12. Moir, R. W. and Lee, J. D., Helium-Cooled , FLiBe-Breeder, Beryllium-Multiplier Blanket for Minimars, *Fusion Technology*, Vol. **10**, p. 619 (1986)
13. Seelmann- Eggebert, W., Pfenning, G., Münzel, H., Klewe-Nebenius, H., Chart of the Nuclides, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Radiochemie, (1981).
14. "Information on nuclear energy for electricity, and uranium for it", Uranium Information Centre (<http://www.uic.com.au>), Melbourne, Australia.
15. Wilson D. J., The Use of Thorium as an Alternative Nuclear Fuel, *Australian Atomic Energy Commission, Research Establishment*, (1992)
16. Şahin, S. and T. Al-Kusayer, ^{244}Cm as Multiplier and Breeder in a ThO_2 Hybrid Blanket Driven by a (Deuterium-Tritium) Source, *Fusion Technology*, Vol. **10**, p. 1297 (1986)
17. Şahin, S.: "Power Flattening in a Catalyzed (D,D) Fusion Driven Hybrid Blanket Using Nuclear Waste Actinides", *Nuclear Technology*, Vol. **92**, pp. 93-105 (1990)
18. Şahin, S., H. Yapıcı and E. Baltacıoğlu, "Regeneration of LWR Spent Fuel in Hybrid Reactors," *Kerntechnik*. Vol. **59**, No. 6, p. 270 (1994).
19. Şahin, S., H. Yapıcı, "Neutronic Analysis of a Thorium Fusion Breeder with Enhanced Protection Against Nuclear Weapon Proliferation", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. **26**, no. 1, p. 13 (1998)
20. Lee, D.J., Waste Disposal Assessment of HYLIFE-II structure, *Fusion Technology*, Vol. **26**, p. 74 (1994).
21. Şahin, S., R. W. Moir and S. Ünalın: "Neutronic Investigation of a Power Plant Using Peaceful Nuclear Explosives", *Fusion Technology*, Vol. **26**, No. 4, p. 1311 (1994).

22. Greene N. M., L. M. Petrie, (1997). "XSDRNPM, A One-Dimensional Discrete-Ordinates Code For Transport Analysis", *NUREG/CR-0200*, Revision 5, 2, Section F3, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R5, Oak Ridge National Laboratory.
23. Jordan W. C., S. M. Bowman , (1997). "Scale Cross-Section Libraries", *NUREG/CR-0200*, Revision 5, 3, section M4, ORNL/NUREG/CSD-2/V3/R5, Oak Ridge National Laboratory.
24. Şahin, S., "Comparison of Diffusion and Transport Theory for Fast Reactor Shielding Calculations," *Atomkernenergie*, Vol. **22**, p. 24 (1973), also presented in extended form as Habilitation Thesis (in Turkish) to the Faculty of Science, University of Ankara, Turkey (1973).
25. Şahin, S., E. Baltacıoğlu and H. Yapıcı "Potential of a Catalyzed Fusion Driven Hybrid Reactor for the Regeneration of CANDU Spent Fuel," *Fusion Technology*, Vol. 20, p. 26 (1991).
26. Şahin, S, H. Yapıcı and M. Bayrak, "Spent Mixed Oxide Fuel Rejuvenation in Fusion Breeders", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 47, pp. 9-23 (1999).
27. Şahin, S, H. Yapıcı and N. Şahin, "Neutronic Performance of Proliferation Hardened Thorium Fusion Breeders", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 54, no. 1, pp. 63-77, (2000).