

## ThC<sub>2</sub> YAKITLI ve Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> SOĞUTUCULU BİR FÜZYON-FİSYON REAKTÖRÜNDE TRİTYUM ÜRETİM BÖLGESİNDE FARKLI LI BİLEŞİKLERİ KULLANILMASININ REAKTÖR PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kadir YILDIZ  
Niğde Üniversitesi, Aksaray Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü  
AKSARAY

### ÖZET

Bu çalışmada ThC<sub>2</sub> yakıtlı ve Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> soğutuculu bir füzyon-fisyon reaktörü ele alınmıştır. Reaktörün trityum üretim bölgesinde LiH ve LiO<sub>2</sub> olmak üzere iki farklı Li bileşiği kullanılmıştır. Reaktörde füzyon nötron kaynağı olarak 14.1 MeV D-T nötronları kullanılmış ve Δt=3 gün olmak üzere 2 yıllık çalışma süresince reaktörün nötronik performansı, termal nötronlarla fisyon olabilen yakıt ve nükleer güç üretiminin değişimleri incelenmiştir. İlk duvar füzyon nötron akısı 5 MW/m<sup>2</sup> olan mantoda yakıt bölgesinde  $\frac{V_m}{V_f} = 2$  hacimsel oranı alınmıştır. Trityum üretim bölgesinde LiH kullanılması 2 yıllık reaktör işlem zamanı için en yüksek trityum üretimini sağlamıştır. Fisyon olabilen kaliteli yakıt üretiminde en yüksek değere mantonun trityum üretim bölgesinde LiO<sub>2</sub> kullanılmasıyla ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hibrid reaktör, füzyon, fisyon, LiH, LiO<sub>2</sub>.

### INVESTIGATION OF THE EFFECTS ON REACTOR PERFORMANCE OF USING DIFFERENT LI COMPOUNDS IN TRITIUM BREEDING ZONES OF A FUSION-FISSION REACTOR FUELLING WITH UC<sub>2</sub> AND COOLING WITH Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>

### ABSTRACT

In this work, a fusion-fission reactor fuelling with ThC<sub>2</sub> and cooling with Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> are investigated. Two different Li compounds as LiH and LiO<sub>2</sub> are used in tritium breeding zones of the reactor. 14.1 MeV D-T neutrons are used as a fusion neutron source and it is investigated that variations of neutronic performances, fissile fuel breeding and fission power production as Δt=3 days during a reactor operation period over two years. In the blanket in which first-wall neutron flux is 5 MW/m<sup>2</sup> and volumetric ratio is selected as  $\frac{V_m}{V_f} = 2$  in the fuel zone. During a reactor operation period over two years, using LiH in tritium breeding zones of the reactor provides highest tritium breeding rate. Highest value of fissile fuel breeding is reached with using of LiO<sub>2</sub> in tritium breeding zones of the reactor.

**Key words:** Hybrid reactor, fusion, fission, LiH, LiO<sub>2</sub>

### 1. GİRİŞ

<sup>232</sup>Th izotopu yüksek enerjili (MeV seviyesinde) nötronlarla fisyon reaksiyonları yapar. Ayrıca, termal ve orta enerjili nötronları yutarak çok kaliteli fisyon olabilen bir izotop olan <sup>233</sup>U izotopunu üretir. <sup>233</sup>U izotopu çok iyi fisyon yapma özelliği nedeniyle klasik nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilir. <sup>232</sup>Th izotopunun bu özelliği onu, yeni bir reaktör dizayn konsepti olan füzyon-fisyon (hibrid) reaktörlerinde kullanılacak yakıtlardan yapmaktadır.

<sup>232</sup>Th izotopunun hibrid reaktörlerde yakıt olarak kullanılmasına ilişkin literatürde pek çok çalışma mevcuttur (1-6). ThC ve ThC<sub>2</sub> gibi seramik malzemeler hibrid reaktörlerde değerlendirilecek bir yakıt türü olarak üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (7-11). Bu çalışmada kullanılan ThC<sub>2</sub> yakıtının ergime sıcaklığı 2665 °C'dir.

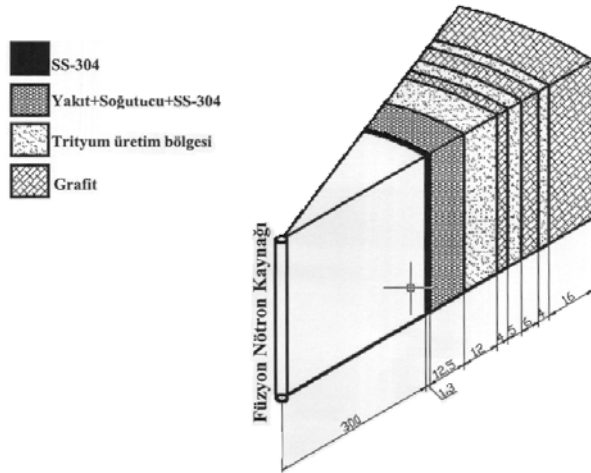
Hibrid reaktörleri klasik nükleer reaktörlerde değerlendirilemeyen <sup>232</sup>Th izotopunu yüksek enerjili füzyon nötronları ile fisyonla uğratmakta ve ayrıca orta enerjili nötronlarla klasik reaktörlerin kullanabileceği kaliteli yakıtlara dönüştürmektedir. Bu tip füzyon reaktörlerinin kendi kendine yeterli olabilmesi için trityum üretim oranının (TBR) ≥ 1.05 olması gereklidir. Yapılan pek çok çalışmada füzyon nötron kaynağı için gerekli trityum üretiminin LiO<sub>2</sub> bileşiğinden elde edildiği görülmektedir. Buna ilaveten LiH bileşiğinde trityum üretiminde kullanılabilir (12).

### 2. HİBRİD REAKTÖR MANTO YAPISI

Hibrid reaktörlerde, reaktörün merkezine D-T veya D-D reaksiyonları yaparak yüksek enerjili nötronlar üreten bir füzyon nötron kaynağı yerleştirilir. Bu kaynağın etrafı nükleer yakıt malzemesini ihtiva eden bir manto ile çevrelenir. Nükleer

yakıt içinde bulunan üretken izotoplar ( $^{238}\text{U}$  veya  $^{232}\text{Th}$ ) yüksek enerjili füzyon nötronları ile fisyon reaksiyonu yapabildikleri gibi, orta enerjili nötronları yutarak dönüşüm yoluyla termal nötronlarla parçalanabilen izotoplara ( $^{239}\text{Pu}$  ve  $^{233}\text{U}$ ) dönüşmektedir. Bu şekilde günümüz hafif su reaktörleri (LWR) için gerekli yüksek kaliteli fisyon olabilen yakıt ihtiyacı karşılanır. Buna ilaveten reaktör çalışma süresi boyunca üretken izotopların meydana getirdiği yeni izotoplar, termal enerji seviyesindeki nötronlar ile fisyon reaksiyonları yaparak reaktörün enerji performansını artırırlar.

Bu çalışmada kullanılan hibrid manto yapısı Şekil 1.'de gösterilmektedir (13-14). Burada reaktör merkezine (D,T) füzyon nötron kaynağı yerleştirilmiştir. Füzyon nötron kaynağı aşağıdaki reaksiyona göre yüksek enerjili nötronlar üreten bir plazmadır;

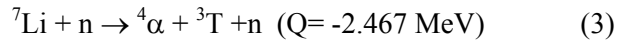
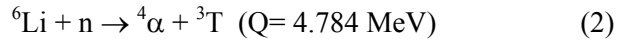


Şekil 1. Çalışmada incelenen hibrid mantının kesit görünüşü.

Füzyon plazmasının etrafı sırasıyla ilk duvar, yakıt bölgesi, trityum üretim bölgesi ve grafitten oluşan bir mantıyla çevrilmiştir. Manto geometrisindeki ilk duvar füzyon nötron kaynağını çevreleyen 1.3 cm kalınlığındaki SS-304 çeliğidir. İkinci bölge 10 sıralı yakıt çubuğu ihtiva eden yakıt bölgesidir ve bu bölge % 31.3 yakıt ( $\text{ThC}_2$ ), % 62.6 soğutucu ( $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ ) ve % 6.1 oranında yakıt zarfından oluşur. Reaktördeki yakıt malzemesinin bir zarf içinde kullanılması şarttır. Tüm yakıt elemanlarının zarflanması fisyon ürünlerinin burada tutulması açısından önemlidir ve daha az nötron yutması nedeniyle SS-304 çeliği seçilmiştir (15,16). Hibrid reaktörlerde yakıt bölgesinde yakıt

çubukları silindirik geometrinin eksenine dik bir düzlemde hegzagonal yapı oluşturacak şekilde dizilmişlerdir. Her yakıt çubuğu iç yarıçapı 0.425 cm ve kalınlığı 0.04 cm olan SS-304 çeliği ile kaplanmıştır. Yakıt bölgesi kalınlığı  $V_m/V_f$  oranına bağlı olarak 12.5 cm alınmıştır.

Yakıt bölgesini radyal yönde sandviç yapıdaki trityum üretim bölgesi takip etmektedir. Bu çalışmada trityum üretim bölgesinde LiH (Mod ①) ve  $\text{Li}_2\text{O}$  (Mod ②) bileşikleri kullanılmıştır. Bu bölgeyi takiben reflektör bölgesi gelmektedir. Reflektör bölgesinde nötronları yavaşlatma oranı yüksek grafit kullanılmaktadır. Trityum üretim bölgelerinden kaçan yüksek enerjili nötronlar grafit bölgelerinden geçerken enerjilerinin bir kısmını kaybederler. Enerjileri düşen nötronlar trityum üretim bölgelerinde  $^6\text{Li}$  (denklem 2) ile, yüksek enerjili nötronlar ise  $^7\text{Li}$  (denklem 3) ile reaksiyona girerek, füzyon nötron kaynağı için gerekli trityum üretilmesini sağlar. Daha iyi bir nötron ekonomisi sağlamak için trityum üretim ve grafit bölgeleri ardışık olarak sıralanmıştır.



### 3. NÜMERİK SONUÇLAR

#### 3.1. Hesaplama Metodu

Nötron transport ve reaksiyon miktarı hesaplamalarında kullanılan tesir-kesit kütüphanelerindeki nötron enerji aralıklarının sıklığı çok önemli bir rol oynar. Reaktördeki nötron akı dağılımı ve reaksiyon miktarları nötron enerjisine bağlı olduğundan, çalışmada nötron enerji aralığı en sık olan 238 Grup ENDF/B-V (17) tesir-kesit kütüphanesi seçilmiştir. SCALE (18) sisteminin en geniş kütüphanesi olan bu kütüphane genel amaçlı kritiklik analizleri kütüphanesidir ve 300'den fazla çekirdek için datalar ihtiva eder. 45 hızlı nötron grubu, 145 rezonans nötron grubu ve 48 termal nötron grubuna sahiptir. Bir çok rezonans çekirdekler kararlı (resolved) rezonans bölgesinde NITAWL-II (19) tarafından oluşturulmuş rezonans datalara ve kararsız rezonans (unresolved) bölgesinde BONAMI (20) tarafından oluşturulmuş Bondarenko (21) faktörlerine sahiptir.

Manto hesaplamaları için yakıt bölgesinde hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri tesir kesitleri kullanılmıştır. Yakıt bölgesi için önce 238 Grup ENDF/B-V kütüphanesi kullanılarak CSAS (22) kontrol modülü ile hücre ağırlıklı ve rezonans iş-

lemli tesir kesitleri elde edilmiştir. Bu modül hücre geometrisi için rezonans işlemcisi olarak ilk önce BONAMI kodunu kullanır ve buradan aldığı dataları NITAWL-II kodu kullanarak hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri tesir kesitlerini elde eder. Manto hesaplamaları nötron transport hesaplaması S<sub>N</sub> transport kodu olan XSDRNPM (23) kodu kullanılarak Boltzman transport denklemi çözülerek yapılmıştır. Bu kod hücre ağırlıklı kütüphaneden aldığı dataları mantodaki yakıt bölgesinde işleyerek Boltzman transport denkleminin nümerik çözümünü gerçekleştirerek suretiyle nötron akı dağılımlarını hesaplayarak nötron reaksiyonlarını veren bir işlemcidir.

XSDRNPM kodu ile yapılmış bütün

Tablo 1. Araştırılan mantoda işlem zamanı başlangıcı ve sonu için nötronik datalar.

Hesaplama Modu	İşlem zamanı başlangıcı		İşlem zamanı sonu	
	Mod ①	Mod ②	Mod ①	Mod ②
T <sub>6</sub> ( <sup>6</sup> Li(n,α)T)	1.23254	1.06607	1.36027	1.28062
T <sub>7</sub> ( <sup>7</sup> Li(n,αn)T)	0.04791	0.07657	0.04879	0.07906
TBR (T <sub>6</sub> + T <sub>7</sub> )	1.28046	1.14264	1.40905	1.35967
<sup>232</sup> Th (n,f)	0.02850	0.02913	0.02818	0.02945
Σ <sub>f</sub> (toplam fisyon)	0.02850	0.02913	0.11227	0.20302
vΣ <sub>f</sub>	0.09808	0.09970	0.31334	0.54478
<sup>232</sup> Th(n, γ)	0.20374	0.34923	0.19991	0.36057
L	0.03123	0.04961	0.03273	0.05948

transport hesaplamalarında, açısız nötron akısının integrasyonu S<sub>8</sub>-P<sub>3</sub> yaklaşımıyla yapılmıştır.

Her bir yakıt çubuğunun nükleer kalitesindeki değişim, nötron spektrumu ile parçalanabilir ve üretken izotopların atomik yoğunluklarındaki değişimler dikkate alınarak radyal koordinatlarda Δt=3 günlük periyotlarda olmak üzere toplam 2 yıl için incelenmiştir. Bu işlem için hesaplamalarda arayüz programı olarak ERDEMLI (24) programı kullanılmıştır. Zaman periyodunun daha kısa seçilmesiyle nükleer yakıtın değişiminin daha hassas olarak gözlenmesi sağlanabilir. İncelenen mantoda birinci duvar nötron yükü 5 MW/m<sup>2</sup> ve tesis faktörü %100 olarak alınmıştır. Füzyon 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 <sup>4</sup>He'e ve 14.1 MeV'u ise nötrona aittir.

### 3.2. Manto Performansı

Tablo 1, iki yıllık reaktör işlem zamanı süresince her iki hesaplama modunda mantolarda elde edilen integral nötronik dataları vermektedir.

Tablo 1'in incelenmesinden şu sonuçlar çıkarılabilir;

Toplam trityum üretiminin (TBR) çok önemli bir kısmını <sup>6</sup>Li(n,α)T reaksiyonu (T<sub>6</sub>) ile elde edilen trityumun oluşturduğu görülmektedir. <sup>6</sup>Li düşük enerjili nötronlarla trityum üretimi yapar. Trityum üretim bölgesinde LiH bileşiğinin kullanıldığı Mod ①'deki trityum üretimi ve LiO<sub>2</sub> bileşiğinin kullanıldığı Mod ②'den daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni üzerinde bö-

lüm 3.3'de durulacaktır. <sup>7</sup>Li(n,αn)T reaksiyonu hızlı nötron enerjilerinde gerçekleşen bir reaksiyondur. Tablo 1 incelendiğinde T<sub>7</sub> üretiminin bütün modlardaki TBR içindeki payı oldukça azdır.

<sup>232</sup>Th'in fisyon reaksiyonunda hızlı nötronlar çok etkilidir. Füzyon nötron kaynağından yayılan 14.1 MeV ortalama enerji değerindeki nötronlarla fisyon reaksiyonu yapar. İşlem zamanı başlangıcında <sup>232</sup>Th(n,f) miktarında Mod ②'de Mod ①'e göre çok küçük bir artış görülmektedir. Benzer durum işlem zamanı sonunda da görülmekte ve her iki modda da <sup>232</sup>Th'in fisyon miktarı yaklaşık işlem zamanı boyunca sabit kalmaktadır.

Toplam fisyon miktarı (Σ<sub>f</sub>) ve fisyon nötronu miktarı (vΣ<sub>f</sub>) her iki modda da işlem zamanı başlangıcından sonuna doğru önemli bir oranda artış göstermektedir. Bunun en önemli nedeni <sup>232</sup>Th(n, γ) reaksiyonu ile üretilen <sup>233</sup>U izotopunun da fisyon reaksiyonu yaparak toplam fisyon miktarının ve dolayısıyla fisyon nötronu sayısının artmasına katkıda bulunmasıdır. Reaktör işlem za-

manı başlangıcında Mod ① ve Mod ②'de  $\Sigma_f$  miktarları hemen hemen aynı iken, işlem zamanı sonunda  $\Sigma_f$  miktarında Mod ①'de ki artış %395 iken, Mod ②'deki artış %700 olmakta ve Mod ②'de en yüksek fisyon miktarına ulaşmaktadır. Buradan da işlem zamanı boyunca üretilen  $^{233}\text{U}$  izotopunun Mod ②'de Mod ①'e nazaran daha fazla fisyon yaptığı ve mantonun enerji artışına daha fazla katkıda bulunduğu anlaşılmaktadır.

$^{232}\text{Th}(n, \gamma)$  reaksiyonunda orta enerjili nötronlar oldukça etkili olmaktadır. İşlem zamanı başlangıcında  $^{232}\text{Th}(n, \gamma)^{233}\text{U}$  reaksiyonu Mod ②'de Mod ①'e oranla % 71 daha fazladır. İşlem zamanı sonunda  $^{232}\text{Th}(n, \gamma)$  reaksiyonu miktarında Mod ①'de küçük bir düşüş olmakta, Mod ②'de ise küçük bir artış olmaktadır. Bu da Mod ①'de net  $^{233}\text{U}$  üretiminde bir düşüş, Mod ②'de ise bir artış olduğunu göstermekte ve Mod ②'de fisyon olabilir yakıt üretiminin Mod ①'e göre daha fazla olduğunu göstermektedir.

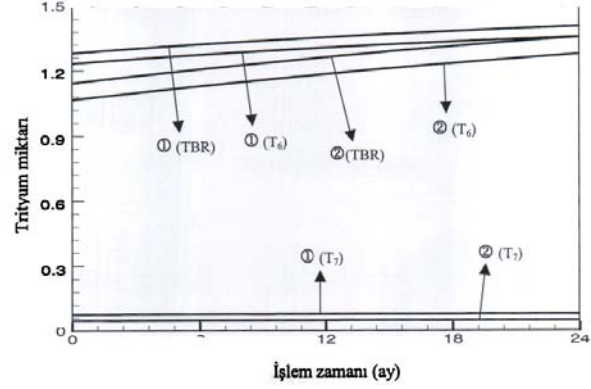
Gerek mantodaki nötron ekonomisi açısından gerekse de bütün reaktör tiplerinde biyolojik zırhlama açısından radyal yöndeki nötron kaçakları (L) önemli bir etkidir. Reaktör işlem zamanı başlangıcında Mod ②'deki nötron kaçakları Mod ①'e göre % 59 oranında daha fazladır. İşlem zamanı sonunda Mod ①'deki kaçak oranı yaklaşık sabit kalmakta iken Mod ②'deki kaçak oranı artmakta ve Mod ①'e göre % 82 daha fazla olmaktadır.

### 3.3. Füzyon Yakıtı (Tritiyum) Üretimi

Hibrid reaktör sisteminde füzyon reaksiyonlarının devam edebilmesi için füzyon kaynağı için gerekli füzyon yakıtının sağlanması gereklidir. D-T füzyon reaksiyonu için gerekli Döteryum doğal sudan temin edilebilirken, çok kısa yarı ömürlü olan ve doğal olarak bulunmayan trityumun reaktörde üretilmesi gereklidir. Kendi kendine yeterli bir füzyon reaktörü için toplam trityum üretiminin  $\text{TBR} > 1.05$  olması gereklidir.

Şekil 2,  $T_6$ ,  $T_7$  ve TBR değerlerinin işlem zamanına göre mantodaki değişimini vermektedir. Her iki hesaplama modunda da TBR'nin 1.05 değerinden büyük olduğu görülmektedir. Reaktör işlem zamanı boyunca TBR ve  $T_6$  üretimi artmaktadır. Reaktör işlem zamanı başlangıcında ve sonunda  $T_6$  üretiminde Mod ① Mod ②'ye göre daha iyi bir sonuç vermektedir. Bunun başlıca nedeni LiH bileşiği içinde bulunan Hidrojen atomlarından

kaynaklanmaktadır. Hidrojen atomları ile çarpışan yüksek enerjili nötronlar enerjilerinin önemli bir bölümünü kaybederek termal enerji seviyelerine düşmektedir.



Şekil 2. Hesaplama modları için mantodaki  $T_6$ ,  $T_7$  ve TBR'nin işlem zamanına göre değişimi

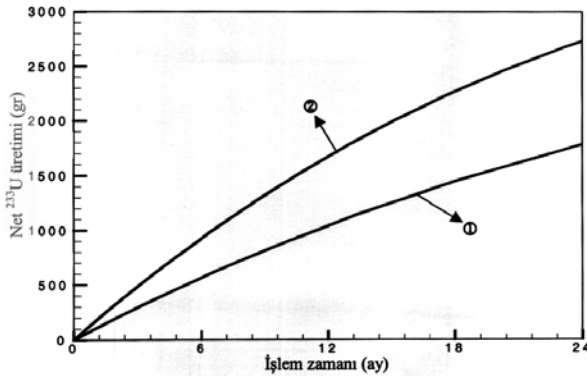
Tablo 1'de de görüldüğü üzere TBR üretiminin çok önemli bir miktarı  $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$  reaksiyonu ile elde edildiğinden, hidrojen atomları ile çarpışarak termal enerji seviyelerine düşen nötronlar  $^6\text{Li}$  çekirdeği ile reaksiyona girmekte ve trityum üretimini arttırmaktadır.

$^7\text{Li}$ 'nin 3 MeV üzerindeki nötronlarla trityum reaksiyon tesir kesiti  $\sim 0.01$  barn'dır. Bu enerjinin altındaki nötronlarla reaksiyona girmediğinden  $T_7$  değerindeki artışlar önemsenmeyecek kadar küçük kalmaktadır. Mod ② ile yapılan hesaplamada diğerine göre küçük bir miktar artış olmaktadır.

### 3.4. Termal Nötronlarla Fisyon Yapabilen Yakıt Üretim Karakteristikleri

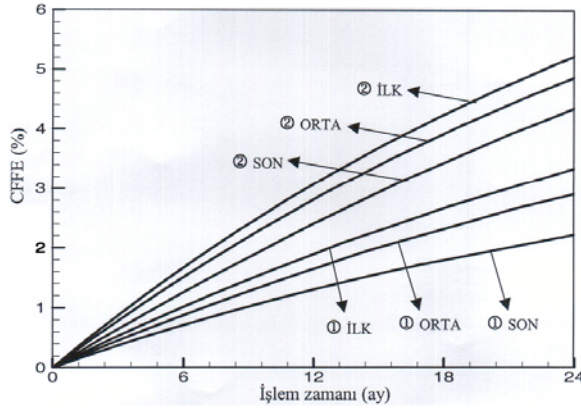
Fisyon reaktörlerinde başlıca yakıtlar  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ 'dur.  $^{233}\text{U}$  ve  $^{239}\text{Pu}$  doğal olarak bulunmaz. Çalışan her nükleer reaktörün yakıtı içinde  $^{232}\text{Th}(n, \gamma)$  ve  $^{238}\text{U}(n, \gamma)$  reaksiyonları sonucu  $^{233}\text{U}$  veya  $^{239}\text{Pu}$  oluşur.  $^{233}\text{U}$  ve  $^{239}\text{Pu}$  düşük enerjili nötronlarla çok iyi fisyon yapabilen çok kaliteli izotoplardır. Bu çalışmada yakıt olarak  $\text{ThC}_2$  kullanıldığından  $^{233}\text{U}$  üretimi göz önüne alınmıştır.

Şekil 3'de reaktör işlem zamanı boyunca mantoda üretilen  $^{233}\text{U}$  miktarının değişimi görülmektedir. İşlem zamanı boyunca Mod ②'de ki  $^{233}\text{U}$  miktarındaki artış Mod ①'den daha fazla olmakta, 2 yıl sonunda Mod ①'de net 1.78 kg  $^{233}\text{U}$  üretilmekte iken Mod ②'de 2.73 kg  $^{233}\text{U}$  üretilmektedir.



Şekil 3. Hesaplama modları için işlem zamanı boyunca mantoda üretilen <sup>233</sup>U miktarındaki değişim.

Hibrid reaktörlerde faydalı amaçlar için nükleer yakıtın kalitesini ifade etmek kümülatif fisyon olabilir yakıt zenginleştirilmesi (CFFE) ile yapılabilir. CFFE termal nötronlarla fisyon reaksiyonu yapan yakıt izotoplarının izotopik yüzdesinin toplamıdır. Şekil 4 işlem zamanına göre manto yakıt bölgesinin ilk, orta ve son sırasındaki yakıt çubukları için CFFE değişimini vermektedir.



Şekil 4. Hesaplama modları için işlem zamanı boyunca yakıt bölgesindeki ilk, orta ve son sıra yakıt çubuklarında ki CFFE değişimi.

Şekilden 4'den de görülebileceği üzere Tablo 1'deki toplam fisyon miktarına ( $\Sigma_f$ ) benzer şekilde Mod ②'de kümülatif yakıt zenginleştirilmesi Mod ①'e göre daha yüksek olmaktadır.

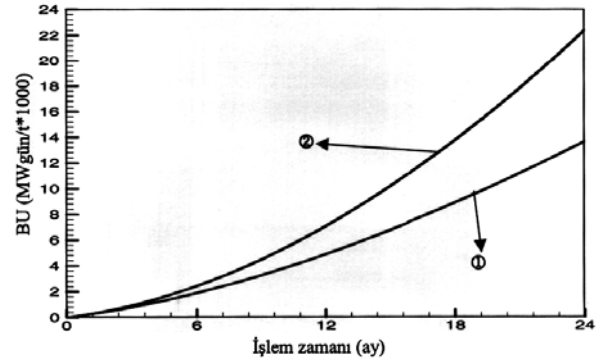
### 3.5. Yakıt Yanma Derecesi

Reaktör işlem zamanı boyunca nükleer yakıt hibrid mantoda fisyon enerjisi üretir. Üretken yakıtlardan elde edilen fisyon olabilen yeni izotopların miktarı mantoda arttıkça fisyon enerjisi de artar. Fisyon reaksiyonları ile yakıtın tümünü tüketmek mümkün değildir. Bu durum, aşağıda verilen

işlem zamanı boyunca hibrid mantodaki yakıt yanma derecesi (BU) yardımıyla ölçülebilir [3,4].

$$BU = E_f (2.2 \times 10^{14} F_w) C_f \frac{\iint \Sigma_f \Phi dEdV}{M_f} \Delta t \quad (4)$$

Denklem (4)'de  $5 \text{ MW/m}^2$  'lik nötron akısı için nötron akı yükü  $2.2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  'dir. Burada  $F_w$  füzyon nötronlarının saçıldığı ilk duvar yüzey alanı,  $C_f$  dönüşüm faktörü olup birimi  $1.6021 \times 10^{19} \text{ MWs/MeV}$ ,  $E_f$  fisyon reaksiyonu başına açığa çıkan enerji (200 MeV),  $M_f$  ise mantodaki toplam yakıt miktarıdır. Şekil 5 mantodaki işlem zamanı boyunca yakıt yanma derecesinin değişimini göstermektedir. Şekil 5 incelendiğinde yanma derecesinin fisyon miktarındaki artışla birlikte arttığı gözlenmektedir ve 3. aydan sonra Mod ②'de Mod ①'den daha yüksek yanma derecelerine erişilmektedir.



Şekil 5. Hesaplama modları için işlem zamanı boyunca mantodaki yakıt yanma derecesinin değişimi.

### 3.6. Enerji Çoğaltım Faktörü (M)

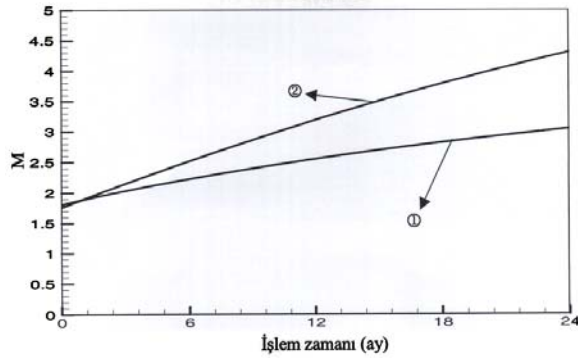
Hibrid mantodaki en önemli göstergelerden biri enerji çoğaltım faktörüdür (M). Mantodaki toplam enerji oluşumunu gösteren M faktörü, fisyon enerjisi, nötron kinetik enerji transferi ve  ${}^6\text{Li}(n, \alpha)T$  gibi nükleer ısınmayı kapsayan bütün exoenerjik nükleer reaksiyonları içerir. M enerji çoğaltım faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$M = \frac{200 \cdot (\Phi \cdot \Sigma_f) + 4.784 \cdot T_6 - 2.467 \cdot T_7}{14.1} + 1 \quad (5)$$

$(\Phi \cdot \Sigma_f)$ : toplam fisyon miktarı

Denklem (5)'den de görülebileceği üzere M'deki artış daha çok mantonun fisyon miktarındaki artışa ve kısmen de  ${}^6\text{Li}(n, \alpha)T$  reaksiyonuna bağlıdır. Şekil 6 manto geometrisi

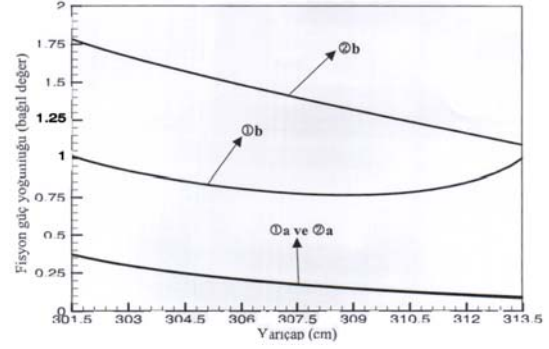
için M değerinin işlem zamanı boyunca değişimini vermektedir. 48 aylık reaktör işlem zamanı boyunca Mod ②'deki artış 2.44 kat, Mod ①'deki ise 1.68 kat büyük olmaktadır. İşlem zamanı sonunda en yüksek M değerini Mod ② vermektedir.



Şekil 6. Hesaplama modları için manto M değerinin işlem zamanı boyunca değişimi

### 3.7. Filyon Güç Yoğunluğu

Diferansiyel/integral miktar olarak filyon güç yoğunluğu her iki hesaplama modu için Şekil 7'de görülmektedir. Geometrik şekil olarak her ik hesaplama modu için işlem zamanı başlangıcında filyon güç yoğunluğu benzer bir yapı göstermektedir. Buna karşın, işlem zamanı sonunda Mod ① ile yapılan hesaplamalarda yakıt bölgesinin trityum üretim bölgesine yakın bölümlerinde filyon güç yoğunluğunda belirgin bir artış gözlenmektedir. Bu da reaktör mantosunda sıcaklık dağılımında düzgünlüklere neden olacağı için mühendislik uygulamaları açısından tercih edilmez. Bu düzgünlüğün başlıca nedeni, işlem zamanının yaklaşık 12. ayından sonra mantonun trityum üretim bölgesine yakın kısımlarındaki yakıt çubuklarında oluşan  $^{233}\text{U}$  izotopunun filyon miktarının diğer bölgelerdeki yakıt çubuklarından daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu duruma trityum üretim bölgesinde kullanılan LiH bileşiği içindeki H atomlarının nötronları termal seviyelere kadar yavaşlatarak bu bölgeye yakın olan yakıt çubuklarındaki  $^{233}\text{U}$  izotoplarıyla kolayca filyon reaksiyonları yapması neden olur.



Şekil 7. Hesaplama modları için filyon güç yoğunluğunun radyal yöndeki değişimi.

(a: işlem zamanı başlangıcı; b: işlem zamanı sonu)

## 4. SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu çalışmada  $\text{ThC}_2$  yakıtlı ve  $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$  soğutuculu bir hibrid reaktöründe trityum üretim bölgelerinde farklı Li bileşiklerinin kullanılmasının mantonun nötronik performanslarına etkileri zamana bağlı olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Filyon nötron kaynağı için gerekli trityum yakıtının üretimi açısından değerlendirildiğinde, Tablo 1 (TBR) ve şekil 2'den de görülebileceği üzere, LiH bileşiği kullanılan Mod ① ile yapılan hesaplama Mod ②'den daha iyi sonuç vermektedir. İşlem zamanı başlangıcında Mod ①'deki toplam trityum üretimi Mod ②'den % 12, işlem zamanı sonunda % 3.6 daha fazladır.
- Hibrid reaktörlerinin önemli bir işlevleri de günümüz reaktörleri için gerekli olan kaliteli filyon olabilir yakıtların üretimidir. Tablo 1 ( $^{232}\text{Th}(n, \gamma)$ ) ve şekil 3'den de görülebileceği üzere Mod ② ile yapılan hesaplamalar kaliteli filyon olabilir yakıt üretiminin Mod ①'e göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.
- Hibrid reaktörlerde enerji üretiminin büyük bir kısmı filyon reaksiyonları ile gerçekleşir. Tablo 1 ( $\Sigma_f, M$ ) ve şekil 6'da görülebileceği gibi Mod ② ile yapılan hesaplamalarda diğerine göre daha yüksek filyon enerjisi elde edilebilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Şahin, S., Al-Kusayer, T., "244Cm as Multiplier and Breeder in a  $\text{ThO}_2$  Hybrid Blanket Driven by a (Deuterium-Tritium) Source", Fusion Technology, 10, p. 1297, 1986.



2. Şahin S., Yapıcı, H., “Neutronic Analysis of a Thorium Fusion Breeder with Enhanced Protection Against Nuclear Weapon Proliferation”, *Annals of Nuclear Energy*, 26, p.13, 1999.
3. Şahin, S., Yapıcı, H., Şahin, N., “Neutronic Performance of Proliferation Hardened Thorium Fusion Breeders”, *Fusion Engineering and Design*, 54, no. 1, p. 63, 2000.
4. Şahin, S., Şahin, H. M., Sözen, A., Bayrak, M., “Power Flattening and Minor Actinide Burning in a Thorium Fusion Breeder,” *Energy Conversion and Management*, 43, p. 799, 2002.
5. Yapıcı H, İpek O., “Neutronic Analysis Of Coupled Hybrid Blanket Fueled With ThO<sub>2</sub> And UO<sub>2</sub>”, *Energy Conversion And Management*, 44: 1853-1873, 2003.
6. Yapıcı H, “Power Flattening Of An Inertial Fusion Energy Breeder With Mixed Tho<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> Fuel”, *Fusion Engineering And Design*, 65: 89-108, 2003.
7. Yapıcı, H., Şahin, N., Bayrak, M., “Investigation of Neutronic Potential of a Moderated (D-T) Fusion Driven Hybrid Reactor Fueled with Thorium to Breed Fissile Fuel for LWRs”, *Energy Conversion and Management*, 41, p. 435, 2000.
8. Yapıcı H, Akansu S.O., Özceyhan V., “Neutronic Analysis Of A Moderated (D, T) Fusion Driven Hybrid Blanket”, *Annals Of Nuclear Energy*, 27: 1237-1244, 2000.
9. Yapıcı, H., Übeyli, M., Yalçın, Ş., “Neutronic Analysis of PROMETHEUS Reactor Fueled with Various Compounds of Thorium and Uranium”, *Annals of Nuclear Energy*, 29, p. 1871, 2002.
10. Yapıcı H, Übeyli M., “Power Flattening In Prometheus Breeder Reactor Using Nuclear Fuel And Waste Actinide”, *Annals Of Nuclear Energy*, 30: 159-173, 2003.
11. Şahin S., Yalçın Ş., Şahin H.M., Übeyli M., “Neutronic Investigation Of A Hybrid Version Of The ARIES-RS Fusion Reactor”, *Annals Of Nuclear Energy*, 30, 245-259, 2003.
12. Ünalın S., Ayata T., Akansu S.O., Erişen A., Bölükbaşı A., “Light and Heavy Water Cooled Hybrid Reactors for Rejuvenation of LWR Spent Fuels”, *Energy Conversion and Management*, 44, p. 2567, 2003.
13. Şahin S., Al-Kusayer, T., Al-Samair, M., Raouf, M. A., “Neutronic Investigations of Experimental AYMAM Hybrid Blankets”, *Transactions of the American Nuclear Society 1984 International Conference*, 47, 151, 1984.
14. Şahin S., Al-Kusayer, T., Raouf, M. A., “Preliminary Design Studies of A Cylindrical Experimental Hybrid Blanket With Deuterium-Tritium Driver”, *Fusion Technology*, 10, p. 84, 1986.
15. Lee, D.J., “Waste Disposal Assessment of HYLIFE-II Structure”, *Fusion Technology*, 26, p. 74, 1994.
16. Şahin, S., Moir, R. W., Ünalın, S., “Neutronic Investigation of a Power Plant Using Peaceful Nuclear Explosives”, *Fusion Technology*, 26, p. 1311, 1994.
17. Jordan W. C., Bowman, S. M., “Scale Cross-Section Libraries”, *NUREG/CR-0200, Revision 6, 3, section M4, ORNL/NUREG/CSD-2/V3/R6, Oak Ridge National Laboratory*, 2000.
18. Petrie L. M., “SCALE System Driver”, *NUREG/CR-0200, Revision 6, 3, Section M1, ORNL/NUREG/CSD-2/R6, Oak Ridge National Laboratory*, 2000.
19. Greene N. M., Petrie, L. M., Westfall, R. M., “NITAWL-II, Scale System Module For Performing Resonance Shielding and Working Library Production”, *NUREG/CR-0200, Revision 6, 2, Section F2, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6, Oak Ridge National Laboratory*, 2000.
20. Greene N. M., “BONAMI, Resonance Self-Shielding by the Bondarenko Method”, *NUREG/CR-0200, Revision 6, 2, section F1, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6, Oak Ridge National Laboratory*, 2000.
21. Bondarenko I. I. (Ed.), “Group Constants For Nuclear Reactor Calculations”, *Consultants Bureau, New York*, 1964.
22. Landers N. F., Petrie, L. M., “CSAS, Control Module For Enhanced Criticality Safety Analysis Sequences”, *NUREG / CR-0200, Revision 6, 1, Section C4, ORNL / NUREG /*

CSD-2 / V1/ R6, Oak Ridge National Laboratory, 2000.

23.Greene N. M., Petrie, L. M., “XSDRNPM, A One-Dimensional Discrete-Ordinates Code For Transport Analysis”, NUREG / CR-0200, Revision 6, 2, Section F3, ORNL / NUREG /

CSD-2 / V2 / R6, Oak Ridge National Laboratory, 2000.

24.Şahin S., H. Yapıcı, S. Ünalın, “ERDEMLI, A Computer Program to Process ANISN Output Data”, Gazi University, Ankara, Turkey, 1991.