

# ThO<sub>2</sub> Yakıtlı Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Farklı Reflektör Malzemelerin Nötronik Performansa Etkisi

Adem ACIR  
Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi  
06500 Teknikokullar, ANKARA

## ÖZET

Reflektör malzemeler, manto performansını artırmak ve manto yapısındaki dezavantajları ortadan kaldırmak amacıyla füzyon-fisyon reaktör yapısında incelenmiştir. Bu çalışmada, ThO<sub>2</sub> yakıtlı bir füzyon-fisyon hibrid reaktöründe çeşitli reflektör malzemeler, sırasıyla, Carbon (C) Zirkonyum hidrür (ZrH<sub>2</sub>), Titanyum karbür (TiC) ve Zirkonyum karbür (ZrC) kullanılarak reaktörün nötronik performansını düzgünleştirmek amacıyla araştırılmıştır. Nötron yükü 5 MW/m<sup>2</sup> alınmış ve ilk duvar yapı malzemesi olarak SS-304 kullanılmıştır. Ayrıca, blanketteki ısıyı transfer etmek amacıyla yakıt bölgesinde Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> ötektik lityum soğutucu seçilmiştir. Füzyon nötron kaynağı olarak 14.1 MeV ortalama enerjili D-T nötron kaynağı kullanılmıştır. Nötron transport hesaplamaları, tek boyutlu SCALE 5 bilgisayar sistem kodu yardımıyla yapılmıştır. Araştırılan reflektör malzemeler arasında, trityum üretim performansı açısından grafit karbon ve ZrH<sub>2</sub> diğer reflektör malzemelerine göre en iyi performansı gösterirken, ZrC en kötü performansı göstermiştir. ZrH<sub>2</sub>, blanketteki en az nötron kaçığından dolayı ZrH<sub>2</sub> en iyi nötron zırlama malzemesi olarak belirlenmiştir. Öte yandan ZrC en iyi fisil yakıt üretimini gösterirken, ZrH<sub>2</sub> en kötü performansı vermiştir. Sonuç olarak, bu aday reflektör malzemeleri hibrid reaktörlerde nötronik performansı düzgünleştirmek amacıyla kullanılabilirlerdir.

**Anahtar Kelimeler:** Hibrid Reaktör, Füzyon, Fisyon, Trityum, <sup>233</sup>U, Nötron Zırlaması, Reflektör

# Impact of Various Reflector Materials on the Neutronic Performance of A Fusion-Fission Hybrid Reactor With ThO<sub>2</sub> Fuel

## ABSTRACT

Reflector materials were performed in the fusion-fission reactor design to enhance the blanket performance and to eliminate the main disadvantage of this blanket concept. In this study, to improve the neutronic performance of the fusion-fission hybrid reactor with ThO<sub>2</sub>, various reflector materials, namely, graphite (C), Zirconium Hydride (ZrH<sub>2</sub>), Titanium Carbide (TiC) and Zirconium Carbide (ZrC) were investigated. The neutron wall load was taken at 5 MW/m<sup>2</sup> and SS-304 alloy was used in the first wall. And also Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> eutectic lithium was utilized for coolant in the fuel zone to supply heat transfer out of the blanket. 14.1 MeV D-T neutron source were used as a fusion neutron source. Neutron transport calculations were done with the aid of one dimensional computer system code of SCALE 5. Among the investigated reflector materials, graphite and ZrH<sub>2</sub> showed better tritium breeding ratio (TBR) than others whereas ZrC had the worst performance. ZrH<sub>2</sub> was determined the best neutron shielding because of minimal neutron leakage from the blanket. On the other hand, while ZrC showed better fissile fuel breeding, ZrH<sub>2</sub> had the worst performance. As a result, these candidate reflector materials could be used in hybrid reactors to improve the neutronic performances.

**Key words:** Hybrid Reactor, Fusion, Fission, Tritium, <sup>233</sup>U, Neutron Shielding, Reflector

## 1. GİRİŞ

D-T füzyon nötron kaynaklı hibrid reaktörler üzerinde nötronik performansları değerlendirmek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından farklı çalışmalar yapılmıştır (1-16). Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte bünyesinde füzyon-fisyon tepkimelerini bileştiren hibrid reaktörlerin nötronik performansını daha da düzgün hale getirmek amacıyla daha önceki yıllarda tasarlanan manto geometrisi (5-11) üzerinde farklı tasarım yaklaşımları uygulanmıştır. Bu amaçla yapılan bu çalışmalarda farklı yakıt bileşikleri (5-18), yapı malzemeleri (19), yeni tip soğutucular (12,20-22), katı trityum

üretim malzemeleri (23-24), nötron enerji grup yapıları (25-26) incelenmiş ve nötronik performansa katkısı değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda ele alınan parametreler hem reaktör performansı hemde emniyet açısından büyük önem arz etmektedir. İncelenen bu parametrelerin nötronik tepkimeleri ve radyal yapıdaki nötron kaçığı en aza indirilmesi, hem nötronik performans artırılması hemde nötron zırlaması açısından oldukça önemlidir. Daha önce yapılan çalışmalarda nötronik performansı değerlendirmek amacıyla manto geometrisinde reflektör malzemesi olarak grafit karbon malzemesi kullanılmıştır.

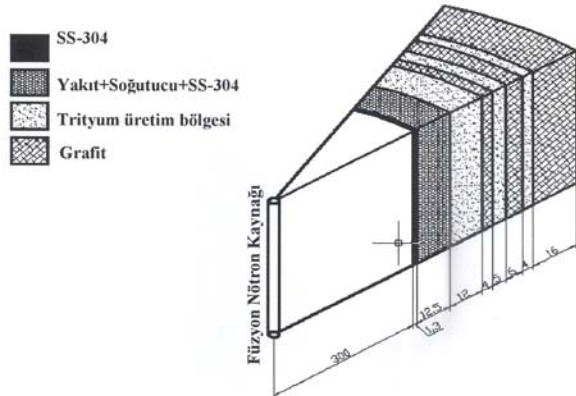
Bu çalışmada ise, daha önce tasarlanmış manto geometrisi üzerinde grafit carbon reflektör için kalınlığı optimize edilmiş bölgelere karşılaştırma amacıyla yeni tip reflektör malzemeler sırasıyla ZrH<sub>2</sub>, TiC ve ZrC yerleştirilmiş ve bu malzemelerin manto geometrisinde hem nötron zırhlanması hem de nötronik performansı açısından etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, soğutucu olarak manto yakıt bölgesinde oluşan ısıyı transfer etmek amacıyla füzyon teknolojisinde yaygın olarak kullanılan ötektik lityum (Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>) (27-29) ve yakıt olarak klasik nükleer reaktörlerde değerlendirilemeyen hibrid reaktörde yüksek enerjili füzyon nötronlarıyla fisyonu uğrayan ve ayrıca orta enerjili nötronlarla klasik reaktörlerin kullanabileceği kaliteli yakıtlara dönüştürülebilen ThO<sub>2</sub> (30) kullanılmıştır.

## 2. GEOMETRİK MODEL

Şekil 1’de radyal yönde kesiti alınmış Hibrid reaktör manto geometrisi gösterilmektedir (5-12). Reaktör merkezine (D,T) füzyon nötron kaynağı yerleştirilmiştir. Füzyon nötron kaynağı olarak aşağıdaki tepkimelere göre yüksek enerjili nötronlar üreten plazma kullanılmaktadır (5-12),

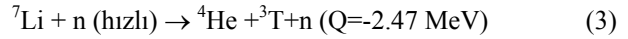
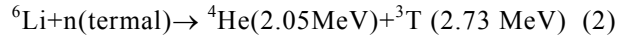


Füzyon plazma odasının etrafı 1.3 cm kalınlığındaki SS-304 paslanmaz çeliği ile çevrelenmiştir. Daha sonra gelen bölge yakıt bölgesidir ve içinde ThO<sub>2</sub> yakıtı bulunan radyal yönde 10 sıralı yakıt çubuğu ve Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> soğutucu bulunmaktadır. Yakıt ile soğutucu arasındaki hacimsel oran 1:2 olarak alınmıştır. Buna göre her bölge % 31.3 yakıt (ThO<sub>2</sub>), % 62.6 soğutucu (Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub>) ve % 6.1 oranında yakıt zarfı kalınlığı 0.04 cm olan SS-304 paslanmaz çeliğinden oluşmaktadır. Yakıt bölgesi kalınlığı hacimsel orana bağlı olarak 12.5 cm alınmıştır. Yakıt çubukları yakıt bölgesinde silindirik geometrinin eksenine dik bir düzlemde altıgen yapı oluşturacak şekilde dizilmiştir. Reaktördeki yakıt malzemesi yardımıyla oluşan fisyon ürünlerinin yakıt çubukları içerisinde tutulması açısından ve daha az nötron yutması nedeniyle zarf malzemesi olarak SS-304 çeliği kullanılmıştır (5-11)



Şekil 1. Hesaplama için kullanılan hibrid reaktör manto geometrisinin kesit görünüşü.

Yakıt bölgesini radyal yönde katmanlı yapıda trityum üretim ve reflektör bölgeleri izlemektedir. Reflektör malzemeleri nötronları yavaşlatma özelliklerine sahip olmasından dolayı nötron kaçaklarını en aza indirerek iyi bir nötron ekonomisi sağlamaktadır (5-12). Reaktördeki nötron akısı, füzyon nötron kaynağından saçılan ortalama 14.1 MeV enerjili nötronlar ile <sup>232</sup>Th izotopunun fisyon tepkimeleri sonucu ortaya çıkan ortalama 2 MeV enerjili nötronlardan oluşmaktadır. Yakıt ve trityum üretim bölgesinde kullanılan bölgede kullanılan Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> ve Li<sub>2</sub>O bileşiği yüksek enerjili bu nötronlarla reaksiyon yaparak nötronların enerjilerini düşürmektedir. Ekzotermik reaksiyon yapan <sup>6</sup>Li (% 7.5) termal enerjili nötronlarla reaksiyona girerek reaktörde trityum üretimine büyük katkıda bulunmaktadır. Benzer şekilde endotermik reaksiyon yapan <sup>7</sup>Li (% 92.5) izotopu ise yüksek enerjili nötronları yutarak trityum üretimine katkı sağlamaktadır. Bu reaksiyonlar Eşitlik (2) ve (3)’te verilmiştir (8).



Hibrid reaktör için gerekli trityum üretimi, yakıt/soğutucu ve trityum üretim bölgesinde genel olarak lityum izotoplarının termal veya hızlı nötron tepkimelerinden faydalanılarak eşitlik (2) ve (3)’ten elde edilir. Radyal yönde katmanlı yapıda bulunan trityum üretim ve reflektör malzemeleri, yakıt bölgesinden kaçan nötronlarla tepkimeye girerek trityumun üretilmesini sağlar. Bu bölgede kullanılan Li<sub>2</sub>O bileşiği nötronla tepkimeye girerken, trityum üretim bölgesinden kaçan nötronların reflektör bölgelerindeki yeni tip reflektör malzemeler tarafından enerjileri düşürülerek ve geri yansıtılırlar. Reflektör malzemeleri yardımıyla enerjileri düşürülen ve geri yansıtılan bu nötronlar yeniden trityum üretim bölgesindeki Li atomları ile tepkimeye girerek trityumun üretimine katkıda bulunmakla beraber reaktör emniyet nötron zırhlanmasına büyük katkı sağlar. Nötron zırhlaması ve nötronik performansı düzgülendirmek amacıyla bu çalışmada kullanılan bazı reflektör malzemelerinin temel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Reflektör malzemelerinin bazı karakteristik özellikleri (31-32).

Özellik	C	ZrH <sub>2</sub>	ZrC	TiC
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.76	5.61	6.73	4.93
Ergime sıcaklığı (°C)	3800	~640	3540	3140

## 3. HESAPLAMA YÖNTEMİ

Nötron transport hesaplamaları için manto yakıt bölgesinde hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri tesir kesitleri kullanılmıştır. Yakıt bölgesi için önce SCALE (33) sisteminin en geniş kütüphanesi olan 238 Grup ENDF/B-V (34) kütüphanesi kullanılarak CSAS (35) kontrol modülü ile hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri tesir kesitleri elde edilmiştir. Bu modül hücre geometrisi için rezonans işlemcisi olarak ilk önce Bondarenko (36)

faktörlerine sahip BONAMI (37) kodu kullanılır ve buradan aldığı verileri NITAWL-II (38) kodu kullanarak hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri tesir kesitlerini elde eder. Blanket nötron taşınım hesaplaması S<sub>N</sub> transport kodu olan XSDRNPM (39) kodu kullanılarak Boltzman taşınım denklemi çözülerek yapılmıştır. Bu kod hücre ağırlıklı kütüphaneden aldığı verileri mantodaki yakıt bölgesinde işleyerek Boltzman taşınım denkleminin sayısal çözümünü gerçekleştirerek suretiyle nötron akı dağılımlarını hesaplayarak nötron tepkimelerini veren bir işlemcidir. XSDRNPM kodu ile yapılmış bütün taşınım hesaplamalarında, açısız nötron akısının integrasyonu Gaussian Kuadratürleri (40) kullanılarak 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=30 günlük periyotlarda olmak üzere toplam 4 yıl için incelenmiştir. Bu işlem için hesaplamalarda ERDEMLI (41) ara yüz programı kullanılmıştır. Anlatım ve gösterim kolaylığı sağlaması açısından manto hesaplamalarında nötronik performans değerlendirmesi açısından reflektör bölgesinde kullanılan malzeme çeşitlerine göre:

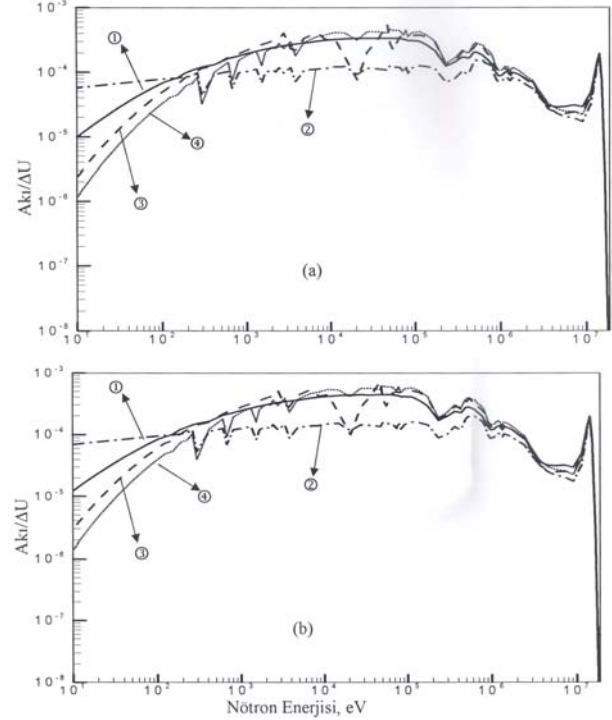
- **Mod ①:** Reflektör bölgesinde Grafit (C) bileşiği,
- **Mod ②:** Reflektör bölgesinde ZrH<sub>2</sub> bileşiği,
- **Mod ③:** Reflektör bölgesinde TiC bileşiği
- **Mod ④:** Reflektör bölgesinde ZrC bileşiği şeklinde modellenmiştir.

#### 4. SAYISAL SONUÇLAR

##### 4.1.Manto Reflektör Bölgesinde Nötron Akı Dağılımı ve Nötron Kaçağı

Nötron spektrumları, nükleer reaktör uygulamalarında ve nötronik performans değerlendirilmelerinde büyük bir öneme sahiptir. Reaktörlerdeki nötron enerjileri tek düze (monoenergetic) enerji seviyelerinde olmamalarından dolayı reaktör yakıt bölgesinde yoğun bir şekilde rezonans etkisi gözlenir. Nötron tepkimelerinin önemli bir kısmı yakıt ve soğutucu bölgede meydana gelmekte ve nötron spektrumları burada şekillenmektedir. Bu tepkimelerden sonra, bu bölgeden kaçan yüksek enerjili nötronların radyal yöndeki katmanlı yapıda bulunan trityum üretim ve reflektör malzemeleri yardımıyla enerji seviyeleri düşürülmektedir. Böylece, katmanlı yapıdaki bölgede enerji seviyeleri düşürülen nötronlar, nötron zırlaması ve Li izotopu ile tepkimeye girerek trityum üretimini açısından büyük katkı sağlar. Bu durumun gerçekleşme olasılığını değerlendirmek amacıyla, radyal yönde katmanlı yapıda bulunan trityum üretim bölgelerinde Li<sub>2</sub>O ve reflektör bölgelerinde ise farklı malzemeler Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ kullanılmıştır. Blanket yapısında her bir reflektör malzemesinin nötron akı dağılımına etkisini görebilmek amacıyla ilk reflektör bölgesinin orta kısmındaki nötronik akı da-

ğılımı Şekil 2 (a) ve (b) de işlem zamanı başlangıcı ve sonu için incelenmiştir. Diğer reflektör bölgeleri için malzeme özelliğine göre nötron akı dağılımları, ilk bölgede olduğu gibi benzer bir yapı sergilediklerinden bu çalışmada yer verilmemiştir



Şekil 2. İlk reflektör bölgesi için nötron akı dağılımı a: İşlem başlangıcı, b: işlem zamanı sonu

Şekil 2 (a) ve (b)'de ilk reflektör bölgesinde kullanılan malzemelerin nötron akı dağılımları karşılaştırıldığında Mod ②'nin, Mod ①, Mod ③ ve Mod ④'e göre nötron akı dağılımının daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bununla birlikte sebeplerinden biri ZrH<sub>2</sub> bileşiği içindeki Zr izotopunun (n, 2n) tepkimesinin nötron ekonomisine katkıda bulunmasına rağmen hidrojen izotopunun nötronlarla tepkimeye girmesi sonucu yüksek enerjili nötronları termal seviyelere kadar yavaşlatmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum reaktör nötron zırlama emniyeti açısından büyük bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Bir diğer avantaj ise, reflektör bölgelerinde Mod ②'nin nötron akı dağılımının oldukça yumuşak bir yapıya sahip olması nötron kaçaklarının en az olduğunun bir göstergesi olup bununla trityum üretimine büyük katkıda bulunmasıdır. Mod ①, Mod ③ ve Mod ④'teki akı dağılımındaki artışın temel nedeni ise Zr ve Ti izotoplarındaki (n, 2n) tepkimesinin nötron ekonomisine katkıda bulunmasıdır.

Gerek mantodaki nötron ekonomisi açısından gerekse de bütün reaktör tiplerinde biyolojik zırlama açısından radyal yöndeki nötron kaçakları önemli bir etkidir. İncelenen bu manto yapısında, yakıt bölgesinden radyal yönde katmanlı yapıdaki nötron kaçak değerleri yüzdelik olarak incelendiğinde, ilk Li<sub>2</sub>O bölgesinden son Li<sub>2</sub>O bölgesine kadar işlem zamanı başlangıcında

Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ işlem modlarında, sırasıyla %~88 (0.4494 - 0.0539), %~97.31 (0.4243 - 0.0114), %~83.84 (0.4166 - 0.0673) ve %~81.13 (0.44103 - 0.0832) oranlarında azalırken, işlem zamanı sonunda bu değerlerdeki azalma aynı mod sıralamasında %~88.22 (0.5712 - 0.0672), %~97.56 (0.5210 - 0.0127), %~83.96 (0.5382 - 0.0863) ve %~81.30 (0.57113 - 0.1068) olarak belirlenmiştir. Reflektör bölgeleri için ise elde edilen bu nötron kaçak değerleri yüzdelik olarak ilk reflektör bölgesinden son reflektör bölgesine kadar işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ işlem modlarında, sırasıyla %~88.38 (0.4452 - 0.0517), %~99.53 (0.3660 - 0.0017), %~88.88 (0.3994 - 0.0444) ve %~86.23 (0.40761 - 0.0561) oranlarında azalırken, işlem zamanı sonunda bu değerler aynı mod sıralamasında %~88.58 (0.4469-0.0647), %~99.59 (0.4469 - 0.0018), %~89.04 (0.5159 - 0.0565 ve %~86.48 (0.5262 - 0.0711) olarak hesaplanmıştır. Li<sub>2</sub>O ve reflektör bölgelerindeki nötron kaçakları işlem zamanı sonunda, işlem zamanı başlangıcına göre kısmen artış göstermektedir. Bu artışın nedeni zaman bağlı olarak blankette meydana fisyon tepkimeleri ile ilgilidir. Yapılan hesaplamalar sonucunda Mod ② yapılı mantonun en az nötron kaçağına sahip olması ve reflektör bölgelerinde nötron akı dağılımının da diğer modlara göre yumuşak bir eğilim göstermesinden dolayı reaktör nötron zırlama emniyet güvenliği açısından en iyi sonucu vermiştir.

#### 4.2. Manto Reflektör Bölgesinin Füzyon Yakıt (Tritiyum) Üretimine Etkisi

Füzyon teknolojisine dayalı füzyon-fisyon hibrid reaktörlerde füzyon reaksiyonlarının sürdürülebilmesi için gerekli füzyon yakıtının sağlanması gerekli olup toplam trityum üretiminin oranı (TBR) >1.05 olması gereklidir (1-29,42). Bir hibrid reaktörün kendi kendine tepkimeyi sürdürebilecek düzeyde yeterli olabilmesi için gerekli TBR, trityum üretim bölgesinde kullanılan Li<sub>2</sub>O ve yakıt bölgesinde soğutucu olarak kullanılan Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> bileşikler tarafından eşitlik 2 ve 3'de ki tepkimelere bağlı olarak gerçekleşir. Özellikle reflektör bölgelerindeki farklı malzemeler, trityum üretim bölgesinde kullanılan Li<sub>2</sub>O bileşiği üzerinde trityum üretimi açısından önemli etkiye sahip olacaktır. Kullanılan reflektör malzeme yapısına göre reaktördeki ve bu bölgedeki trityum üretimi önemli ölçüde farklılıklar gösterecektir.

T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub> ve TBR değerlerinin işlem zamanına göre mantodaki değişimini Şekil 3'de verilmiştir. Her bir model için TBR'nin 1.05 değerinden büyük olduğu görülmektedir. Reaktörde, ortamdaki fisyon reaksiyonundaki artış ve reflektör malzemelerin iyi bir yavaşlatıcı olmalarından dolayı TBR ve T<sub>6</sub> üretiminde işlem zamanı boyunca artış gözlenmektedir.

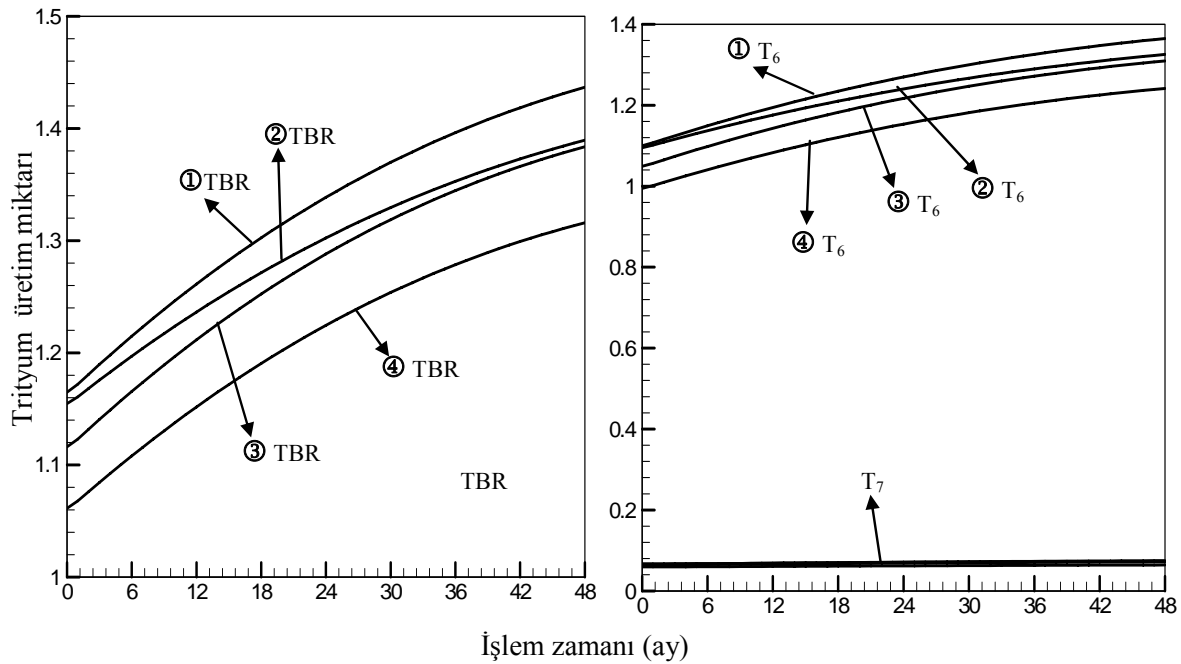
Öte yandan Li<sub>2</sub>O bölgelerinde üretilen trityum <sup>6</sup>Li izotopundan elde edilme oranları işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ için sırasıyla %~93.91, %~94.41, %~93.87 ve %~93.53

iken, <sup>7</sup>Li izotopundan üretilme oranları sırasıyla %~6.09, %~5.59, %~6.13 ve %~6.47'dir. İşlem zamanı sonunda ise <sup>6</sup>Li izotopundan elde edilme oranları sırasıyla %~94.85, %~95.17, %~94.83 ve %~94.54 oranındayken, <sup>7</sup>Li izotopundan üretilme oranları sırasıyla %~5.15, %~4.83, %~5.17 ve %~5.46'dür. Elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi reflektör bölgesinde ZrH<sub>2</sub> bileşiği içinde bulunan Hidrojen atomları ile çarpışan yüksek enerjili nötronlar enerjilerinin önemli bir bölümünü kaybederek termal enerji seviyelerine düşmekte ve <sup>6</sup>Li tepkimesini gerçekleştirerek Mod ② en yüksek TBR değerine sahip olmaktadır.

#### 4.3. Manto Reflektör Bölgesinin Fisyon Yapabilen Yakıt Üretim Karakteristiklerine Etkisi

Düşük enerjili nötronlarla çok iyi fisyon yapabilen çok kaliteli kaliteli <sup>233</sup>U yakıt üretimi <sup>232</sup>Th(n,  $\gamma$ ) tepkimeleri sonucu oluşur. <sup>232</sup>Th(n,  $\gamma$ ) reaksiyonunda orta enerjili nötronlar oldukça etkili olmaktadır. Farklı reflektör malzeme yapılarına sahip manto geometrisi için <sup>232</sup>Th(n,  $\gamma$ )<sup>233</sup>U tepkimeleri, işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ için sırasıyla 0.28385, 0.25524, 0.29272 ve 0.29621 iken, işlem zamanı sonunda 0.27892, 0.24542, 0.28887, 0.29317'dir. Buna karşılık gelen 48 aylık reaktör işlem zamanı boyunca mantoda üretilen <sup>233</sup>U izotopunun kütleli değişimi Şekil 4'de gösterilmiştir. Bütün hesaplama modlarında işlem zamanı boyunca mantoda <sup>232</sup>Th izotopu tarafından sürekli olarak nötron tepkimesi neticesinde <sup>233</sup>U izotopunun üretiminde artış görülmektedir. İşlem zamanı boyunca miktar olarak incelendiğinde Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④'de sırasıyla 3026.63, 2905.15, 3058.40 ve 3084.56 kg <sup>233</sup>U izotopu üretilmiş ve <sup>233</sup>U izotopu üretiminde en yüksek değer işlem zamanı boyunca Mod ④'de, en düşük değer Mod ②'de elde edilmiştir. Mod ①, Mod ③ ve Mod ④ durumlarında <sup>233</sup>U izotopu üretimi birbirine yakın miktarlarda elde edilirken, Mod ②'de daha düşük oranda elde edilmiştir. Mod ②'de yakıt üretiminin düşük olma nedeni ise ZrH<sub>2</sub> bileşiği içindeki H atomlarının yakıt bölgesinden kaçan nötronları tepkimeye girerek nötronları termal seviyelere kadar yavaşlatması ve bunun sonucunda fisyon tepkimelerinin daha düşük seviyede gerçekleşmesidir. Fakat diğer modlardaki yakıt üretiminde artışın sebebi ise ZrC ve TiC bileşiğinde bulunan Zr ve Ti izotoplarındaki (n, 2n) tepkimesinden dolayı nötron ekonomisine katkıda bulunmasıdır.

Reflektör malzeme modellerine göre manto yapısındaki toplam TBR yakıt ve trityum üretim bölgesinde olmak üzere Tablo 2'deki üretim oranları için yüzdelik olarak incelenirse, reaktör işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ işlem modlarında Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> soğutucudan toplam trityum miktarının sırasıyla %~5.58, %~5.15, %~5.97, %~6.28, %~6.38, %~6.12 ve %~7.46'sı elde edilirken, Li<sub>2</sub>O bileşiğinden %~94.42, %~94.85, %~94.03, %~93.72, %~93.62,



Şekil 3. Hesaplama modelleri için mantodaki trityum üretim miktarının işlem zamanına göre değişimi

%~93.88 ve %~92.54'ü elde edilmektedir. Reaktör işlem zamanı sonunda ise Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> soğutucudan sırasıyla %~4.49, %~4.61, %~5.35, %~5.65, %~5.78, %~5.53 ve %~6.80'i karşılanırken, Li<sub>2</sub>O bileşiğinden sırasıyla %~95.51, %~95.39, %~94.65, %~94.35, %~94.22, %~94.47 ve %~93.2 oranlarında trityum üretimi sağlanmaktadır.

üretiminde Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ işlem modlarında, reaktör işlem zamanı başlangıcında <sup>6</sup>Li izotopu, toplam TBR'nin sırasıyla %~93.29, %~93.73, %~93.24 ve %~92.88'ni oluştururken, <sup>7</sup>Li izotopu ise sırasıyla %~6.71, %~6.27, %~6.76 ve %~7.12 oranlarında üretime katkıda bulunmaktadır. Reaktör işlem zamanı sonunda ise toplam TBR'nin <sup>6</sup>Li izotopu sırasıyla

Tablo 2. Araştırılan mantoda işlem zamanı başlangıcı ve sonu için trityum üretimi

Modlar		Mod ①	Mod ②	Mod ③	Mod ④
Yakıt Bölgesi	T <sub>6</sub>	0.05385 <sup>a</sup> 0.06001 <sup>b</sup>	0.04833 0.05249	0.05556 0.06235	0.05547 0.06271
	T <sub>7</sub>	0.01118 0.01174	0.01117 0.01165	0.01118 0.01176	0.01118 0.01177
	TBR	0.06503 0.07175	0.05950 0.06414	0.06674 0.07411	0.06664 0.07448
Trityum Üretim Bölgesi	T <sub>6</sub>	1.03294 1.29469	1.03404 1.26150	0.98513 1.24199	0.93046 1.17372
	T <sub>7</sub>	0.06688 0.07023	0.06121 0.06392	0.06423 0.06765	0.06430 0.06778
	TBR	1.09982 1.36492	1.09525 1.32542	1.04936 1.30964	0.99476 1.24150
Toplam TBR		1.16485 1.43668	1.15474 1.38956	1.11610 1.38375	1.06141 1.31598

\*: a: işlem zamanı başlangıcı

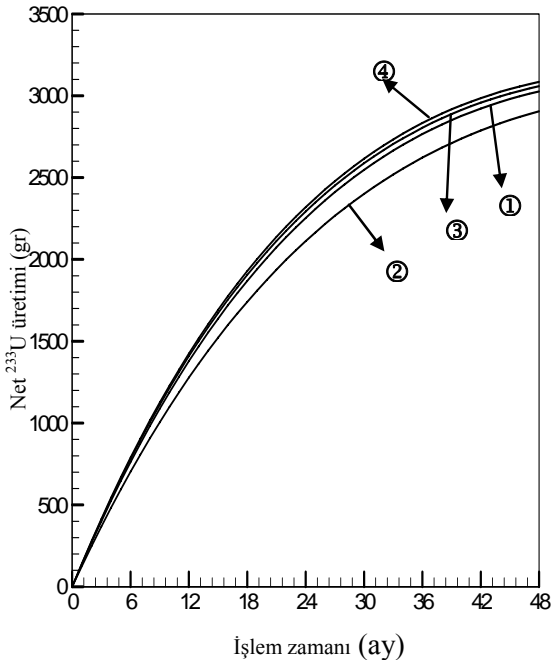
b: işlem zamanı sonu

Tablo 2'de belirtildiği gibi işlem zamanı başlangıcı ve sonunda manto işlem modlarına göre Li<sub>17</sub>Pb<sub>83</sub> soğutucudan ve Li<sub>2</sub>O bölgelerinde üretilen toplam TBR incelenirse, bütün işlem modları için toplam TBR'nin büyük bir kısmı <sup>6</sup>Li izotopundan, kalan miktarın ise <sup>7</sup>Li izotopundan üretildiği görülmektedir. Toplam trityum

%~94.29, %~94.56, %~94.26 ve %~93.95'lik kısmının üretimine büyük ölçüde katkıda bulunurken, <sup>7</sup>Li izotopunda sırasıyla %~5.71, %~5.44, %~5.74 ve %~6.05'lik kısmı karşılanmaktadır. Elde edilen bu değerler hem toplam trityum üretimi için hem de soğutucu ve Li<sub>2</sub>O bölgelerinde üretilen toplam TBR için yüzdelik olarak

incelendiğinde işlem zamanı başlangıcı ve sonunda  $Li_{17}Pb_{83}$  soğutucudan elde edilen toplam TBR Mod ②'de en düşük iken,  $Li_2O$  bileşiminde elde toplam TBR ise Mod ② en yüksek değerdedir.  $Li_2O$  bölgesinde en yüksek üretime sahip olmasının başlıca nedeni  $ZrH_2$  bileşiği içinde bulunan hidrojen atomlarından kaynaklanmaktadır. Hidrojen atomları ile çarpışan yüksek enerjili nötronlar enerjilerinin önemli bir bölümünü kaybederek termal enerji seviyelerine düşmektedir. Şekil 2'yi incelendiğinde nötron akısının Mod ②'de düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda enerjisi düşürülmüş nötronların  ${}^6Li$  izotopu ile daha fazla tepkime yapmalarından dolayı Mod ②'de trityum üretim bölgesinde TBR daha fazla gerçekleşmiştir.

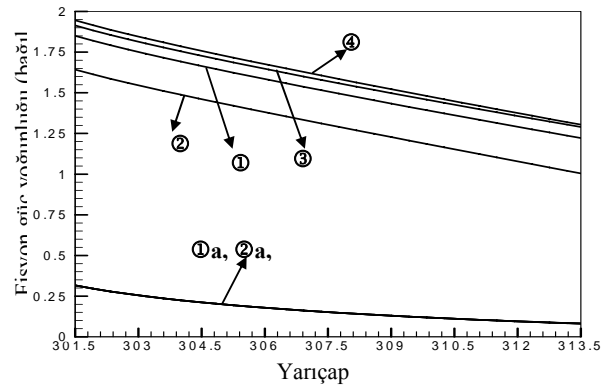
Ayrıca soğutucu ve katı trityum üretim malzemesinden elde edilen  $T_6$  üretimi incelendiğinde ise reaktör işlem zamanı başlangıcında soğutucu ve katı trityum üretim malzemesinden elde edilen  $T_6$  üretiminde Mod ① ve Mod ② aynı üretim oranlarında sonuç verirken, Mod ③ ve Mod ④ daha düşük seviyelerde TBR'ye sahiptir. İşlem zamanına bağlı olarak ise Mod ①, diğer modlara göre daha iyi bir performans gösterirken, Mod ②'de benzer bir yaklaşım sergilemektedir. Yakıt bölgesinde kullanılan  $Li_{17}Pb_{83}$  soğutucudan üretilen toplam TBR'nin işlem zamanı başlangıcında  ${}^6Li$  izotopundan elde edilme oranları Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ için sırasıyla %~82.80, %~81.22, %~83.24 ve %~83.23 iken,  ${}^7Li$  izotopundan üretilme oranları sırasıyla %~17.2, %~18.78, %~16.76 ve %~16.77'dir.  $Li_{17}Pb_{83}$  soğutucudan işlem zamanı sonunda ise  ${}^6Li$  izotopundan elde edilme oranları sırasıyla %~83.63, %~81.83, %~84.13 ve %~84.19 iken,  ${}^7Li$  izotopundan üretilme oranları sırasıyla %~16.37, %~18.17, %~15.87 ve %~15.81 şeklindedir.



Şekil 4. Hesaplama modelleri için mantoda işlem zamanı boyunca  ${}^{233}U$  üretimi.

#### 4.4. Manto Reflektör Bölgesinin Fisyon Güç Dağılımına Etkisi

Manto yakıt bölgesinde üretilen fisyon enerji miktarının radyal yöndeki değişimi fisyon güç yoğunluğu olarak tanımlanır. Farklı reflektör malzeme modları için fisyon güç yoğunluğu Şekil 5'da gösterilmiştir. Her bir mod için fisyon güç yoğunluğu benzer bir yapı göstermektedir. Şekil 5'dan da görüldüğü gibi toplam fisyon miktarındaki azalma mantonun işlem zamanı başlangıcı (a) ve sonunda (b) görülmektedir. İşlem zamanı başlangıcında (a)  ${}^{232}Th$  izotopunun füzyon nötron kaynağından uzaklaştıkça tepkimelere bağlı olarak fisyon reaksiyonlarının azalmasından dolayı fisyon güç yoğunluğunda radyal yönde bir azalma meydana gelmektedir. İşlem zamanı boyunca farklı reflektör malzemelere sahip mantoda meydana fisyon reaksiyonları ve fisyon reaksiyonlarının önemli bir miktarını oluşturan üretken yakıtlarında  ${}^{233}U(n,f)$  reaksiyonları sonucu artmasından dolayı fisyon güç yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. İşlem zamanı sonunda (b) reaktör merkezinden uzaklaştıkça fisyon reaksiyonları miktarında meydana gelen azalmalar ise nötron yutulmalarının artmasına bağlı olduğu için radyal yönde fisyon güç yoğunluğunda düşüşe sebep olmaktadır.



Şekil 5. Hesaplama modelleri için yakıt bölgesindeki fisyon güç yoğunluğunun radyal yöndeki değişimi (a: işlem zamanı başlangıcı; b: işlem zamanı sonu)

Şekil 5 incelendiğinde, işlem zamanı boyunca fisyon güç yoğunluğunda meydana gelen en yüksek artış Mod ④'de, en düşük artış ise Mod ②'de meydana gelmektedir. Mod ②'de en düşük artışın nedeni reflektör bölgesinde kullanılan  $ZrH_2$  bileşiği içindeki H atomlarının nötronları termal seviyelere kadar yavaşlatarak nötronlarla Mod ①, Mod ③ ve Mod ④'e göre daha fazla tepkimeye girmesidir. Bu tepkimeler sonucunda  $Li_2O$  bölgesindeki TBR Mod ②'de en yüksek değere sahip olurken,  ${}^{232}Th$  (n,f) ve  $\Sigma_f$  (toplam fisyon) oranları daha düşük seviyede elde edilmektedir. Şekil 5'da görüldüğü gibi her bir farklı reflektör yapı malzemesine sahip manto modelleri için nötron yoğunluk dağılımının düzgün olmasından dolayı güç üretiminin yoğunluğunun da benzer yapılar göstermesine ve düzgün kalmasına sebep olmaktadır.

## 6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada; füzyon-fisyon reaktörlerinde manto geometrisinin nötronik performansını artırmak amacıyla farklı reflektör malzemeleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmayla ilgili değerlendirmeler aşağıda belirtilmiştir:

- ✓ Bu çalışmada kullanılan reflektör malzemeleri arasında, D-T kaynaklı füzyon-fisyon hibrid reaktörünün kendi kendine yeterli olabilmesi için gerekli toplam TBR göz önüne alındığında en iyi sonucu Carbon (C) yapısına sahip blanket geometrisi verirken, en düşük sonucu ZrC yapısına sahip blanket geometrisi göstermiştir. Fakat soğutucu ve tritium üretim bölgesinde üretilen toplam TBR incelendiğinde ise soğutucu bölgede en düşük TBR oranını ZrH<sub>2</sub> verirken, yine aynı malzeme tritium üretim bölgesinde H izotoplarının nötronları termal seviyeye düşürmesinden dolayı Carbon (C), TiC ve ZrC'e göre en yüksek TBR değerini vermiştir.
- ✓ Füzyon-fisyon reaktörlerinde nötron kaçağı, nötron ekonomisi açısından oldukça önemlidir. Dolayısıyla blanket geometrisinden en az nötron kaçağı ve nötron zırlaması için ZrH<sub>2</sub>'de en iyi sonuçlar elde edilirken, ZrC yapısına sahip blanket geometrisinde Zr izotopu (n, 2n) tepkimesi gerçekleştirerek nötron ekonomisine katkıda bulunmasından dolayı daha fazla nötron kaçağı gözlenmiştir. Ayrıca ZrH<sub>2</sub> bileşiğinde bulunan Zr izotopu (n, 2n) tepkimesi gerçekleştirerek nötron ekonomisine katkıda bulunmasına rağmen H izotopunun nötronlarla tepkimeye girerek yüksek enerjili nötronlar daha düşük enerji seviyesine düşürerek nötron akı dağılımı daha yumuşak bir yapıya dönüştürmesinden dolayı en iyi nötron zırlama malzemesi olarak belirlenmiştir.
- ✓ Carbon (C), TiC ve ZrC reflektör malzemelerine sahip manto geometrileri için reaktör işlem zamanı sonunda <sup>233</sup>U izotopu üretimi değerlendirildiğinde, üretim miktarları birbirlerine oldukça yakındır. Fakat, ZrH<sub>2</sub> malzeme yapılı manto geometrisi için <sup>233</sup>U izotopu üretimi daha düşük miktardadır. Bunun sebebi, H izotopunun iyi bir yavaşlatıcı ve yutucu olmasından dolayı nötronlarla reflektör bölgesinde tepkimeye girerek nötronları daha az geri yansıtması sonucunda <sup>232</sup>Th(n,  $\gamma$ ) ve fisyon tepkimelerinin daha düşük seviyede gerçekleşmesine neden olmasıdır.
- ✓ Fisyon güç yoğunluğunun değişiminde işlem zamanı sonunda en yüksek değere ZrC yapılı manto geometrisinde ulaşılırken, en düşük değer ZrH<sub>2</sub> malzeme yapılı manto geometrisinde elde edilmiştir.

Yapılan bu değerlendirmeler sonucunda nötron kaçağı, manto nötron zırlaması ve tritium üretimi açısından Karbon ve hidrojen içeren malzemeler iyi bir nötron yavaşlatıcısıdır. Bu reflektör malzemeleri nötron reaksiyonlarında önemli ölçüde etkili olmaktadır. ZrH<sub>2</sub> gerek tritium üretimi gerekse nötron zırlaması açısından en iyi performansı göstermesinden dolayı füzyon reaktörlerinde kullanımını ön plana çıkarmıştır. Fakat TiC, ZrC ve ZrH<sub>2</sub> reflektör malzemeleri, Carbon (C) reflektör malzemesine göre mühendislik uygulamaları açısından oldukça maliyeti artırıcı bir etkene sahiptir. Bu yüzden genel olarak yapılan füzyon reaktör çalışmalarında ekonomiklik açısından Carbon (C) tercih edilmektedir. Yinede gelişen teknolojiye dayalı olarak TiC, ZrC ve ZrH<sub>2</sub> reflektör malzemeleri son yıllarda füzyon reaktör tasarımlarında göz önüne alınmıştır. Dolayısıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sayısal nötronik veriler, ZrH<sub>2</sub> ve diğer modlardaki reflektör malzemeleri için nötron kaçağı, blanket nötron zırlaması ve tritium üretimine bağlı olarak reaktör performansını düzğünleştirmek açısından bundan sonraki çalışmalarda faydalı olacaktır.

## 7. KAYNAKLAR

1. Berwald D H et al., 1982 Fission Suppressed Hybrid Reactor Fusion Breeder, *Lawrence Livermore National Laboratory*, UCID-19327.
2. Greenspan E 1984 Fusion-Fission Hybrid Reactors, *Advances in Science and Technology*, J. LEWINS and M. BECKER, Eds., Plenum Press, 16, 289.
3. Lee J D et al, 1982 Feasibility Study of a Fission-Suppressed Tandem-Mirror Hybrid Reactor Fusion Breeder, *Lawrence Livermore National Laboratory*, CA, UCID-19327.
4. Smith D L, Morgan G D et al, 1985 Blanket comparison and selection study. *Fusion Technology* 8: 10.
5. Şahin, S., Al-Kusayer, T., 1986, “<sup>244</sup>Cm as Multiplier and Breeder in a ThO<sub>2</sub> Hybrid Blanket Driven by a (Deuterium-Tritium) Source”, *Fusion Technology*, 10, p. 1297.
6. Şahin S., Al-Kusayer T., Raoof M. A., 1986, “Preliminary Design Studies of A Cylindrical Experimental Hybrid Blanket With Deuterium-Tritium Driver”, *Fusion Technology*, 10, p. 84.
7. Şahin S., Yapıcı H., 1988, “Rejuvenation of Light Water Reactor Spent Fuel in Fusion Blankets”, *Annals of Nuclear Energy*, 25, p. 1317.
8. Şahin S., Yapıcı H., 1999, “Neutronic Analysis of a Thorium Fusion Breeder with Enhanced Protection Against Nuclear Weapon Proliferation”, *Annals of Nuclear Energy*, 26, p.13.
9. Şahin S, Yapıcı H., Şahin N., 2000, “Neutronic Performance of Proliferation Hardened Thorium Fusion Breeders”, *Fusion Engineering and Design*, 54, no. 1, p. 63.
10. Yapıcı H., Şahin N., Bayrak M., 2000, “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.
11. Şahin S., Şahin H. M., Sözen A., Bayrak M., 2002, “Power Flattenig and Minor Actinide Burning in a

- Thorium Fusion Breeder,” *Energy Conversion and Management*, 43, p. 799.
12. M. Übeyli, A. Acir, 2007, Utilization of thorium in a high power density hybrid reactor with innovative coolants, *Energy Conversion and Management* 48 (2): 576-582.
  13. Şahin S., Yalçın Ş., Yıldız K., 2003, “Fissile Fuel Breeding with Peaceful Nuclear Explosives”, *Fusion Engineering and Design*, vol. 65, p. 643.
  14. Şahin S., Şahin H. M., Yıldız K., Acir A., 2005, “Effects of spectral shifting in an inertial confinement fusion system”, *Kerntechnik*, vol. 70/4.
  15. Şahin S., Moir R. W., Ünalın S., 1994, “Neutronic Investigation of a Power Plant Using Peaceful Nuclear Explosives”, *Fusion Technology*, 26, p. 1311.
  16. Yapıcı H., Übeyli M., Yalçın Ş., 2002, “Neutronic Analysis of Prometheus Reactor Fueled with Various Compounds of Thorium and Uranium”, *Annals of Nuclear Energy*, 29:1871 – 1889.
  17. 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.
  18. Acir A., “PACER Füzyon Reaktöründe Yakıt ve Enerji Üretimini İncelenmesi, PhD Thesis, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
  19. M. Übeyli and E. Tel, 2003, Effect of different structural materials on neutronic performance of a hybrid reactor, *Journal of Fusion Energy* 22 (4) 173-179.
  20. M. Übeyli, 2004, Neutronic performance of new coolants in a fusion-fission (hybrid) reactor, *Fusion Engineering and Design* 70(4) 319-328.
  21. Ş.Yalçın, M. Übeyli, A. Acir, 2005, Neutronic analysis of a high power density hybrid reactor using innovative coolants, *Sadhana*, 30(4), 585-600.
  22. M. Übeyli, 2003, On the tritium breeding capability of flibe, flinabe and  $Li_{20}Sn_{80}$  in a fusion-fission (hybrid) reactor, *Journal of Fusion Energy* 22 (1) 51-57.
  23. Yıldız K., Acir A., 2005, “Doğal Li soğutuculu-ThSi<sub>2</sub> Yakıtlı Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Farklı Tritiyum Üretim Malzemelerinin Etkinliğinin İncelenmesi”, *Journal of the Faculty of the Engineering and Architecture of the Gazi University*, vol. 20, no 4, pp. 463-471.
  24. M. Übeyli, 2006, Impact of solid breeder materials on tritium breeding in a hybrid reactor, *Journal of Fusion Energy*, 25 (1-2): 99-106.
  25. Yıldız K., 2005, “An investigation of the Effects of Neutron Energy-Group Structures and Resonance Treatment in a Fusion-Fission Hybrid Reactor Fuelling with ThO<sub>2</sub>”, *Annals of Nuclear Energy*, vol.32/1, pp. 101-118.
  26. Şahin S., Şahin H. M., Yıldız K., 2002, Investigation of The Effects of The Resonance Absorption in a Fusion Breeder Blanket”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 29, p. 1641.
  27. M.Z. Youssef M.A. Abdou, 2000, “Heat deposition, damage, and tritium breeding characteristics in thick liquid wall blanket concepts”, *Fusion Engineering and Design* 49–50, 719–725
  28. Yapıcı H, Bayrak M, 2005, Neutronic Analysis Of Denaturing Plutonium in a Thorium Fusion Breeder and Power Flattening, *Energy Conversion And Management* 46 (7-8): 1209-1228.
  29. Yapıcı H, Ipek O, Özceylan V, Erişen A., 2000 “Analysis of the rejuvenation performance of hybrid blankets by using uranium fuels (UN, UC, UO<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>) and different coolants for various volume fraction”, *Annals Of Nuclear Energy* 27 (4): 279-294.
  30. Ünak, T. 2000. What is the Potential Use of Thorium in the Future Energy Production Technology?, *Progress in Nuclear Energy*, 37, p. 137.
  31. Gohar Y., Smith D.L., 2000, Multiplier, moderator, and reflector materials for advanced
  32. Lithium-vanadium fusion blankets, *Journal of Nuclear Materials* 283-287, 1370-1374.
  33. Kim Y., Hong B.G., Kim C.H., 2005, “A neutronic investigation of He-cooled liquid Li-breeder blankets for fusion power reactor” *Fusion Engineering and Design* 75–79, 1067–1070.
  34. Petrie L. M., 2000, “SCALE System Driver”, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 3, Section M1, ORNL/NUREG/CSD-2/R6, Oak Ridge National Laboratory.
  35. Jordan, W. C., Bowman, S. M., 2000, “Scale Cross-Section Libraries”, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 3, section M4, ORNL/NUREG/CSD-2/V3/R6, Oak Ridge National Laboratory.
  36. Landers N. F., Petrie L. M., 2000, “CSAS, Control Module For Enhanced Criticality Safety Analysis Sequences”, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 1, Section C4, ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R6, Oak Ridge National Laboratory.
  37. Bondarenko I. I. (Ed.), 1964, “Group Constants For Nuclear Reactor Calculations”, Consultants Bureau, New York.
  38. Greene N. M., 2000, “BONAMI, Resonance Self-Shielding by the Bondarenko Method”, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 2, section F1, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6, Oak Ridge National Laboratory.
  39. Greene N. M., Petrie L. M., Westfall R. M., 2000, “NITAWL-II, Scale System Module For Performing Resonance Shielding and Working Library Production”, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 2, Section F2, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6, Oak Ridge National Laboratory.
  40. Greene N. M., Petrie L. M., 2000, “XSDRNPM, A One-Dimensional Discrete-Ordinates Code For Transport Analysis”, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 2, Section F3, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6, Oak Ridge National Laboratory.
  41. Şahin S. 1991, “Radiation Shielding Calculations For Fast Reactors (in Turkish)”, Gazi University, Publication # 169, Faculty of Science and Literature, Publication number 22, Ankara, Turkey.
  42. Şahin S., Yapıcı H., Ünalın S., 1991, “ERDEMLI, A Computer Program to Process ANISN Output Data”, Gazi University, Ankara, Turkey.
  43. Youssef, MZ, Sawan, ME, Sze D K., 2002, The Breeding Potential of ‘Flinabe’ and Comparison to ‘Flibe’ in ‘CLIFF’ High Power Density Concept., *Fusion Eng. Design* 61–62: 497–503.