

ThSi₂ Yakıtlı Flibe Soğutuculu Bir Füzyon-Fisyon Hibrid Reaktöründe Farklı Trityum Üretim Malzemelerinin Kullanılmasının Fisil ve Fusil Yakıt Üretimine Etkileri

Adem ACIR*, Kadir YILDIZ**, Mahmut ALKAN***, Necmettin ŞAHİN**

* Gazi Üniversitesi, Makina Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi
06500 Teknikokullar, ANKARA

**Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray Üniversitesi, AKSARAY

***Makine Mühendisliği Bölümü, Niğde Üniversitesi, NİĞDE

ÖZET

Bu çalışmada, ThSi₂ yakıtlı flibe (Li₂BeF₄) soğutuculu bir füzyon-fisyon hibrid reaktörde trityum üretim bölgesinde Li₂TiO₃, Li₂ZrO₃, Li₄SiO₄ ve Li₂O gibi dört farklı Li bileşikleri kullanılmıştır. Füzyon nötron kaynağı olarak 14.1 MeV ortalama enerjili nötronlar üreten D-T reaksiyonları kullanılmış ve Δt=10 gün olmak üzere 4 yıllık çalışma süresince reaktörde füzyon nötron kaynağı için gerekli fusil yakıt üretimi, fisil izotop üretimi, fisyon enerjisi üretimi ve nükleer güç üretiminin değişimleri incelenmiştir. Trityum üretim bölgesinde Li₂O kullanıldığında en yüksek fusil yakıt üretimi elde edilirken, fisil üretimde ve fisyon enerjisi üretiminde Li₂TiO₃ ve Li₂ZrO₃ bileşiklerinin kullanıldığı mantolarda en iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hibrid Reaktör, Füzyon, Fisyon, Fusil ve Fisil Yakıt Üretimi.

The Effects of the Different Tritium Breeding Materials to Fusil and Fisil Fuel Breeding in a ThSi₂ Fuelled- Flibe Moderated Fusion-Fission Hybrid Reactor

ABSTRACT

In this work, in a ThSi₂ fuelled-flibe moderated fusion-fission reactor in the tritium breeding zones of the reactor are used four different Li compound, respectively, Li₂TiO₃, Li₂ZrO₃, Li₄SiO₄ and Li₂O. D-T fusion reactions are used as a fusion neutron source which produces 14.1 MeV neutrons with averaged energy. Fusil and fissile fuel breeding rates, fission energy breeding rates and fission power production are investigated for Δt=10 days during a reactor operation period in four years. In tritium breeding zones used Li₂O of the reactor provided highest fusil breeding rate whereas, highest value of fissile breeding and production of the fission energy are reached with using of Li₂TiO₃ and Li₂ZrO₃ in tritium breeding zones of the blanket.

Key words: Hybrid Reactor, Fusion, Fission, Fusil and Fissile Fuel Breeding.

1. GİRİŞ

Dünya toryum rezervlerinin doğal uranyum rezervlerinden yaklaşık olarak üç kat daha fazla olduğu öngörülmektedir (Ünak, 2000). Bunun anlamı doğal ²³²Th izotopunun bolluğu ²³⁵U izotopundan yaklaşık olarak 400 kat daha fazladır. Uranyuma dayalı nükleer santrallerin sayısında meydana gelen artışlar yakıt ihtiyacını da artırmakla birlikte atıkların depolanması için de ek maliyetler yüklemektedir. Geleceğe yönelik nükleer santral konseptlerinde, hem günümüz nükleer santrallerin yakıt ihtiyaçlarını karşılamak hem de enerji üretimini arttırmak açısından mevcut toryum rezervlerinin değerlendirilmesine yönelik pek çok çalışmalar yapılmaktadır (Berwald, 1982; Şahin et. al., 1984, 1986a,

1986b, 1998, 1999, 2000, 2002, 2003; Yapıcı et. al., 2000; Yıldız, 2005).

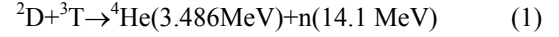
Bu konseptlerden biri de bünyesinde füzyon-fisyon reaksiyonlarını bileştiren hibrid reaktörlerin geliştirilmesine yöneliktir. Füzyon-Fisyon Hibrid reaktöründe nötron enerji kaynağı olarak 14.1 MeV ortalama enerjili nötronlar üreten (D-T) füzyon reaksiyonu, fisyon olabilen yeni yakıt üretiminde ise ²³²Th izotopu kullanılmaktadır (Şahin et. al., 1984, 1986a, 1986b, 1998, 1999, 2000, 2002). Füzyon reaksiyonları için gerekli D izotopu sudan elde edilebilir ancak T izotopu doğada mevcut olmadığından reaktörde çeşitli nükleer reaksiyonlar vasıtasıyla üretilmesi gereklidir.

^{232}Th izotopunun füzyon-fisyon hibrid reaktörlerde kullanılmasına yönelik pek çok çalışmada ThO_2 , ThC_2 ve ThC gibi yakıtlar kullanılmıştır (Şahin et. al., 1986a, 1998, 1999, 2000, 2002, Yapıcı et. al., 2000, 2003, 2005; Yapıcı, 2003; Yıldız, 2004, 2005). Bu çalışmalarda trityum üretimi için trityum üretim bölgelerinde Li_2O bileşiğinin kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada (D-T) füzyon nötron kaynaklı ve ThSi_2 yakıtlı bir nükleer reaktörde flibe soğutucunun ve trityum üretim bölgelerinde Li_2O , Li_2TiO_3 , Li_2ZrO_3 ve Li_4SiO_4 gibi farklı trityum üretim malzemelerinin fusil ve fisil üretime etkileri araştırılmıştır.

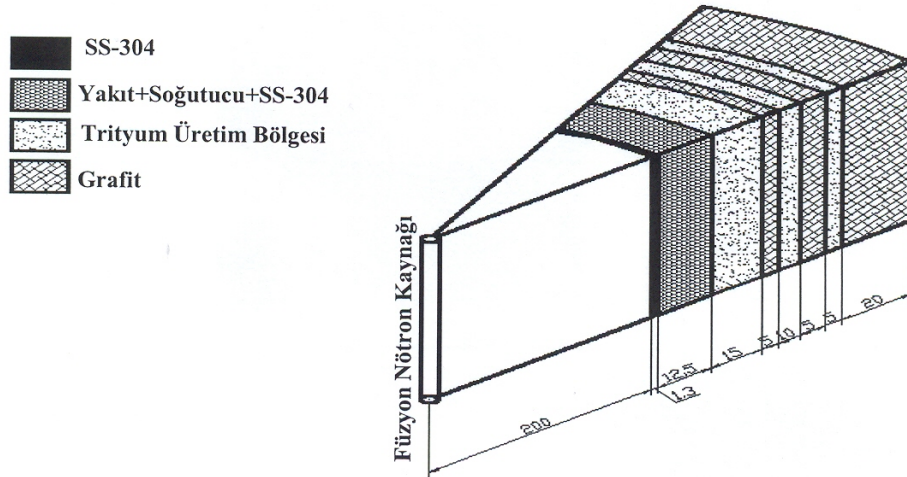
2. HİBRİD REAKTÖR MODELİ ve MANTO YAPISI

Hibrid reaktörlerde, reaktör merkezinde yüksek enerjili nötronlar üreten bir füzyon nötron kaynağı vardır ve bu kaynağın etrafına üretken izotoplardan (^{232}Th) oluşan bir manto yerleştirilir. Üretken izotoplar füzyon nötronlarını yutarak dönüşüm yoluyla yüksek kaliteli



Şekil 1'den de görüleceği üzere füzyon plazma odasının etrafı 1.3 cm kalınlığındaki SS-304 paslanmaz çeliği ile çevrelenmiştir. Daha sonra gelen bölge yakıt bölgesidir ve içinde ThSi_2 yakıtı bulunan radyal yönde 10 sıralı yakıt çubuklarından oluşur. Yakıt bölgesi flibe ile soğutulur. Yakıt ile soğutucu arasındaki hacimsel oran 1:2 olarak alınmıştır. Buna göre her bölge % 31.3 yakıt (ThSi_2), % 62.6 soğutucu (flibe) 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 yutması nedeniyle SS-304 çeliği seçilmiştir (Lee, 1994; Şahin et. al., 1994).

Şekil 2.'de gösterildiği gibi hibrid reaktörde 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 paslanmaz

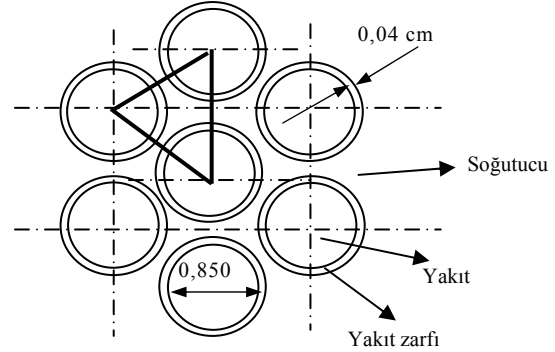


Şekil 1. Hibrid reaktör mantosunun kesit görünüşü.

fisyon yapabilen izotoplara (^{233}U) dönüşmektedir. Bu da günümüzdeki hafif sulu reaktörler (LWR) için ihtiyaç duyulan yüksek zenginleştirilmiş yakıt ihtiyacının karşılanmasını sağlar. Üretken malzemeler ayrıca özellikle yüksek enerjili nötronlarla sürekli fisyon yaparak enerji üretiminin artmasına katkı sağlarlar. Buna ilaveten üretken izotopların meydana getirdiği yüksek kaliteli fisyon yapabilen izotoplar (^{233}U) termal enerjili nötronlarla fisyon reaksiyonları yaparak reaktörün enerji performansını arttırmaktadır (Şahin et. al., 1999, 2000, 2002, 2003; Yıldız, 2005).

Hibrid reaktör manto geometrisi Şekil 1.'de gösterilmektedir (Şahin et. al., 1984, 1986a, 1986b). Reaktör merkezine (D,T) füzyon nötron kaynağı yerleştirilmiştir. Füzyon nötron kaynağı olarak aşağıdaki reaksiyona göre yüksek enerjili nötronlar üreten plazma kullanılır (Dolan, 1982),

çeliği ile kaplanmıştır. Yakıt bölgesi kalınlığı yakıt-soğutucu hacimsel oranına bağlı olarak 12.5 cm alınmıştır.



Şekil 2. Yakıt bölgesindeki çubukların hegzagonal yapısı.

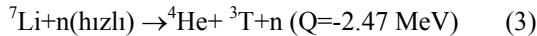
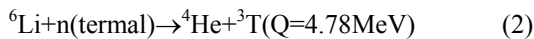
Yakıt bölgesini radyal yönde sandviç yapıda trityum üretim bölgeleri ve grafitten oluşan reflektör bölgeleri izlemektedir. Bu bölgesinde nötron kaçaklarını en aza indirmek amacıyla, nötronları yavaşlatma oranı oldukça yüksek olan grafit kullanılmıştır (Şahin et. al., 2002,2003).

D-T füzyon reaksiyonu için gerekli olan döteryum ihtiyacı doğal sudan (%0.015) karşılanabilmesine karşın trityum doğal olarak bulunamadığından dolayı

Tablo1. Li₂O, Li₂TiO₃, Li₂ZrO₃ ve Li₄SiO₄ bileşiklerinin bazı karakteristik özellikleri (Futamura et. al., 1999).

Özellik	Li ₂ TiO ₃	Li ₂ ZrO ₃	Li ₄ SiO ₄	Li ₂ O
Yoğunluk (g/cm ³)	3.43	4.16	2.40	2.03
Li atomu yoğunluğu (g/cm ³)	0.43	0.38	0.55	0.94
Ergime sıcaklığı (°C)	1535	1695	1255	1432

yapay olarak elde edilmelidir. Genel olarak trityum üretimi için lityum izotoplarının termalveya hızlı nötron reaksiyonlarından faydalanılır. Doğal lityum içinde %7.5 oranında ⁶Li izotopu ve %29.5 oranında ⁷Li izotopu vardır. ⁶Li izotopu termal termal enerjili nötronları yutarak ürün olarak trityum verir ve reaksiyon exotermiktir, ⁷Li ise yüksek enerjili nötronları yutarak ürün olarak trityum verir fakat reaksiyon endotermiktir. Bu reaksiyonlar aşağıdaki şekilde gösterilebilir (Dolan, 1982),



Reaktördeki nötron akısı, füzyon nötron kaynağından saçılan ortalama 14.1 MeV enerjili nötronlar ile ²³²Th izotopunun fisyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan ortalama 2 MeV enerjili nötronlardan oluşur. Yakıt bölgesinde kullanılan flibe bileşiği yüksek enerjili bu nötronlarla saçılma reaksiyonları yaparak nötronların enerjilerini düşürdüğü gibi, aynı zamanda da denklem 2 ve denklem 3 ile verilen reaksiyonları gerçekleştirerek reaktördeki trityum üretimine katkıda bulunurlar. Yakıt bölgesinden kaçan nötronlar trityum üretim bölgesindeki Li bileşikleriyle etkileşime girdiğinde trityumun üretilmesini sağlarlar. Trityum üretim bölgelerinden kaçan nötronlar grafit bölgelerinden geçerken enerjilerini düşürürler. Bu nötronlar yeniden trityum üretim bölgesinde Li atomları ile reaksiyona girerek trityumun üretilmesini sağlar.

Tablo 1.'de trityum üretim bölgelerinde kullanılan Li₂TiO₃, Li₂ZrO₃, Li₄SiO₄ ve Li₂O bileşiklerinin bazı karakteristik özellikleri verilmektedir (Futamura et. al., 1999). Bu bileşikler içinde, içerdiği Li atomu bakımından en yoğun malzeme Li₂O bileşiğidir. Ergime sıcaklığı açısından ise en dayanıklı malzeme ise Li₂ZrO₃ bileşiğidir. Reaktör uygulamalarında malzemelerin nükleer özelliklerinin yanı sıra mühendislik açısından da reaktör ortamında meydana gelen yüksek sıcaklıklara dayanımı arzu edilir. Li₂O bileşiği içerdiği Li atomu sayısınca daha fazla nötronlarla reaksiyon yapma ihtimali

olmasına karşın ergime sıcaklığı açısından da Li₂TiO₃ ve Li₂ZrO₃ bileşiklerinden daha düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir.

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 (Jordan et. al., 2000) tesir-kesit kütüphanesi seçilmiştir. SCALE (Petrie, 2000) 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 (Greene et. al., 2000a) tarafından oluşturulmuş rezonans datalara ve kararsız rezonans (unresolved) bölgesinde BONAMI (Greene, 2000b) tarafından oluşturulmuş Bondarenko (Bondarenko, 1964) 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 (Landers et. al., 2000) kontrol modülü ile hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri 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_N transport kodu olan XSDRNPM (Greene et. al., 2000c) kodu kullanılarak Boltzman transport denklemi çözülerek yapılmıştır. Bu kod hücre ağırlıklı kütüphaneden aldığı dataları manto-daki yakıt bölgesinde işleyerek Boltzman transport denkleminin nümerik çözümünü gerçekleştirerek suretiyle nötron akı dağılımlarını hesaplayarak nötron reaksiyonlarını veren bir işlemcidir.

XSDRNPM kodu ile yapılmış bütün transport hesaplamalarında, açılal nötron akısının integrasyonu Gaussian Kuadratürleri (Şahin, 1991a) kullanılarak S₈P₃ yaklaşımıyla yapılmıştır. Her bir yakıt çubuğunun nükleer kalitesindeki değişim, nötron spektrumu ile parçalanabilir ve üretken izotoplarının atomik yoğunluklarındaki değişimler dikkate alınarak radyal koordinat-

larda $\Delta t=10$ günlük periyotlarda olmak üzere toplam 4 yıl için incelenmiştir. Bu işlem için hesaplamalarda ara yüz programı olarak ERDEMLİ (Şahin et. Al., 1991b) programı kullanılmıştır.

Anlatım ve gösterim kolaylığı sağlaması açısından manto hesaplamalarında trityum üretim bölgesinde kullanılan trityum üretim malzemelerine göre:

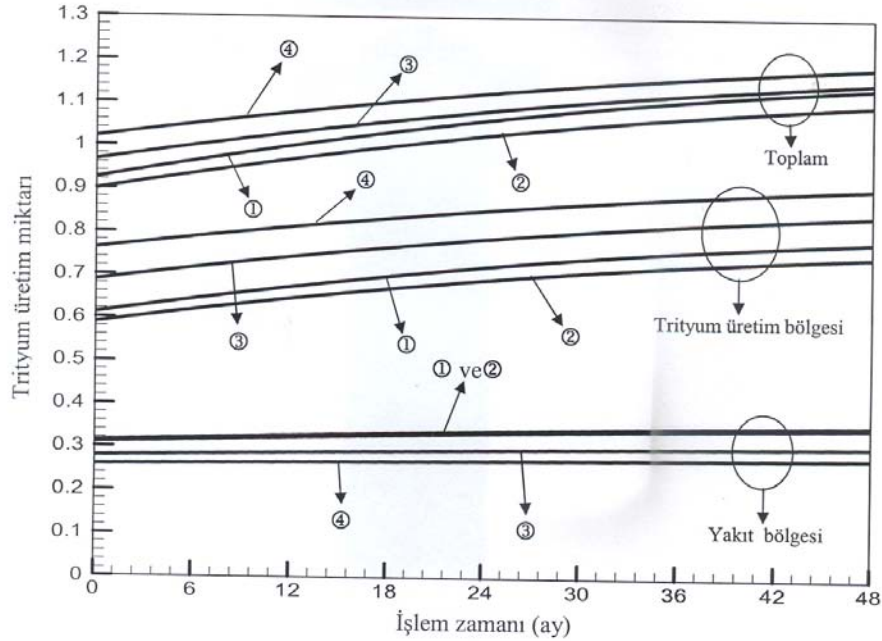
- **Mod ①:** Trityum üretim bölgesinde Li_2TiO_3 bileşiği kullanılmıştır
- **Mod ②:** Trityum üretim bölgesinde Li_2ZrO_3 bileşiği kullanılmıştır
- **Mod ③:** Trityum üretim bölgesinde Li_2SiO_4 bileşiği kullanılmıştır
- **Mod ④:** Trityum üretim bölgesinde Li_2O bileşiği kullanılmıştır

3.2. Fusil Yakıt (Trityum) Üretimi

Füzyon-füzyon hibrid reaktör sisteminde füzyon reaksiyonlarının devam edebilmesi 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 ken-

lan Li bileşikler tarafından denklemler 2 ve 3'de ki reaksiyonlara göre iki bölgede gerçekleştirilmektedir.

Şekil 3'de mantonun yakıt bölgesinde ve trityum üretim bölgelerinde kullanılan Li izotoplarından reaktör işlem zamanı boyunca üretilen trityum miktarları ile birlikte toplam trityum üretim miktarları görülmektedir. Şekil incelendiğinde, reaktörün çalışma süresi boyunca ortamdaki füzyon nötronu sayısındaki artışa paralel olarak üretilen toplam trityum miktarı da reaktör işlem zamanı boyunca artmaktadır. Bütün işlem modlarında işlem zamanı başlangıcında toplam trityum üretimi 1.05 değerinin altında kalmaktadır, ancak işlem zamanı arttıkça toplam trityum üretim miktarı da artmakta ve işlem zamanı sonunda bütün modlarda 1.05 değeri aşılmaktadır. Reaktör işlem zamanı başlangıcında, Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ işlem modlarında, toplam trityum miktarının sırasıyla %~33.5, %~34.1, %~28.5 ve %~25'i, reaktör işlem zamanı sonunda ise sırasıyla %~31, %~31.6, %~26.4 ve %~23.4'ü soğutucu flibe içindeki Li izotoplarından karşılanmaktadır. Trityum üretim bölgesinde ki Li bileşiklerinden ise reaktör işlem zamanı başlangıcında, Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ işlem modlarında, toplam trityum miktarının sırasıyla %~66.5, %~65.5, %~71.1 ve %~74.6'sı, reaktör işlem zamanı sonunda ise sırasıyla %~68.7, %~68, %~73.3



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

dine yeterli bir füzyon reaktörü için toplam trityum üretiminin 1.05'den büyük olması gereklidir (Youssef and Sawan, 2002; Şahin et al., 1994; 1998; 1999; 2000, 2002, 2003, Şahin ve Yapıcı, 1999; Yıldız, 2004; Yapıcı, 2003; Yapıcı ve İpek, 2003; İpek, 2003).

Mantoda trityum üretimi, yakıt bölgesinde soğutucu olarak kullanılan flibe bileşiği içindeki Li izotopları tarafından ve trityum üretim bölgesinde kullanı-

ve %~76.4'ü karşılanmaktadır.

Soğutucu flibeden üretilen trityum miktarına göre en yüksek üretim, reaktör işlem zamanı başlangıcında 0.31024 ve reaktör işlem zamanı sonunda 0.35308 ile Mod ①'de, en düşük üretim reaktör işlem zamanı başlangıcında 0.2554 ve reaktör işlem zamanı sonunda 0.27723 ile Mod ④'de meydana gelmektedir.

Trityum üretim bölgesindeki Li bileşiklerinden üretilen trityum miktarına göre en yüksek üretim, reaktör işlem zamanı başlangıcında 0.76141 ve reaktör işlem zamanı sonunda 0.90592 ile Mod ④'de, en düşük üretim reaktör işlem zamanı başlangıcında 0.5885 ve reaktör işlem zamanı sonunda 0.74756 ile Mod ②'de meydana gelmektedir. Burada yakıt bölgesindeki üretim durumuna göre tam tersi bir durum söz konusudur.

Toplam trityum üretim miktarında ise en yüksek değere reaktör işlem zamanı başlangıcında 1.01992 ve işlem zamanı sonunda 1.1863 değeri ile Mod ④'de, en düşük değere ise reaktör işlem zamanı başlangıcında

%~5.7, %~7.9 ve %~10.3 iken işlem zamanı sonunda sırasıyla %~5, %~4.7, %~6.5 ve %~8.9 şeklindedir.

Tablo 2'den de görüldüğü gibi trityum üretim bölgelerinde ⁶Li izotopundan trityum üretim oranları flibe soğutucudan üretilenlere nazaran daha yüksektir. Bunun başlıca nedeni yakıt bölgesinden kaçan yüksek enerjili nötronlar trityum üretim bölgesinde oluşturulmuş sandviç yapıdan dolayı grafit atomları ile saçılmalar sonucu enerjileri oldukça düştüğünden buralarda ⁶Li izotopu ile daha fazla reaksiyon yapmalarındandır.

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

	Modlar	İşlem zamanı başlangıcı				İşlem zamanı sonu			
		Mod ①	Mod ②	Mod ③	Mod ④	Mod ①	Mod ②	Mod ③	Mod ④
Yakıt Bölgesi	⁶ Li(n,α)T	0.25516	0.25151	0.22064	0.20024	0.29577	0.29041	0.24730	0.22039
	⁷ Li(n,nα)T	0.05508	0.05507	0.05512	0.05516	0.05731	0.05729	0.05701	0.05684
Trityum Üretim Bölgesi	⁶ Li(n,α)T	0.57297	0.55437	0.63367	0.68241	0.74282	0.71195	0.78775	0.82447
	⁷ Li(n,nα)T	0.03801	0.03413	0.05344	0.07900	0.03966	0.03561	0.05539	0.08145
Toplam		0.92433	0.89819	0.96598	1.01992	1.13871	1.09841	1.15059	1.18630

0.89819 ve işlem zamanı sonunda 1.09841 değeri ile Mod ②'de meydana gelmektedir.

Tablo 2'de manto işlem modlarında soğutucu flibeden ve trityum üretim bölgelerinde üretilen trityum miktarları işlem zamanı başlangıcına ve sonuna göre verilmektedir. Tablo incelendiğinde bütün işlem modlarında toplam trityum miktarının çok büyük bir bölümü (~%90) ⁶Li izotopundan, kalan miktarın ise (~%10) ⁷Li izotopundan üretildiği görülmektedir.

Soğutucu flibeden üretilen trityumun ⁶Li izotopundan karşılanma oranları işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ için sırasıyla %~82.2, %~82, %~80 ve %~78.4 iken işlem zamanı sonunda sırasıyla %~83.7, %~83.5, %~81.2 ve %~79.4 şeklindedir. Benzer şekilde trityum üretim bölgesindeki Li bileşiklerinden üretilen trityum ⁶Li izotopundan karşılanma oranları işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ için sırasıyla %~93.7, %~94.2, %~92.2 ve %~89.6 iken işlem zamanı sonunda sırasıyla %~94.9, %~95.2, %~93.4 ve %~91 şeklindedir.

Soğutucu flibeden üretilen trityumun ⁷Li izotopundan karşılanma oranları işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ için sırasıyla %~17.7, %~17.9, %~19.9 ve %~21.5 iken işlem zamanı sonunda sırasıyla %~16.2, %~16.4, %~18.7 ve %~20.5 şeklindedir. Aynı şekilde trityum üretim bölgesindeki Li bileşiklerinden üretilen trityumun ⁷Li izotopundan karşılanma oranları işlem zamanı başlangıcında Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④ için sırasıyla %~6.2,

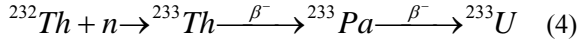
Flibe soğutucuda ⁶Li izotopundan trityum üretim miktarına göre işlem zamanı başlangıcında 0.25516 ve işlem zamanı sonunda 0.29577 değeri ile en iyi sonuç Mod ①'de, işlem zamanı başlangıcında 0.20024 ve işlem zamanı sonunda 0.22039 değeri ile en kötü sonuç Mod ④'de elde edilmiştir. Benzer şekilde trityum üretim bölgesi için ⁶Li izotopundan trityum üretim miktarına göre en iyi sonuç işlem zamanı başlangıcında 0.68241 ve işlem zamanı sonunda 0.82447 değeri ile Mod ④'de, en kötü sonuç ise işlem zamanı başlangıcında 0.55437 ve işlem zamanı sonunda 0.71195 değeri ile Mod ②'de elde edilmiştir.

⁷Li izotopundan trityum üretim miktarına göre, soğutucu flibeden en iyi sonuç işlem zamanı başlangıcında 0.05516 değeri ile Mod ④'de ve işlem zamanı sonunda 0.05731 değeri ile Mod ①'de, en kötü sonuç işlem zamanı başlangıcında 0.05507 değeri ile Mod ②'de ve işlem zamanı sonunda 0.05684 değeri ile Mod ④'de elde edilmiştir. Trityum üretim bölgesinde kullanılan Li bileşiklerine göre ⁷Li izotopundan trityum üretim miktarında en iyi sonuç işlem zamanı başlangıcında 0.079 ve işlem zamanı sonunda 0.08145 değeri ile Mod ④'de elde edilmiş iken, en kötü sonuç işlem zamanı başlangıcında 0.03413 ve işlem zamanı sonunda 0.03561 değeri ile Mod ②'de elde edilmiştir.

3.3. Fisil Yakıt (²³³U İzotopu) Üretimi

Toryum yakıtlı füzyon-fisyon reaktörlerinin en önemli amaçlarından biri çok kaliteli fisyon yakıtı olan ²³³U izotopunun üretilmesidir. ²³²Th izotopu orta enerjili

nötronları yutmak suretiyle $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ reaksiyonları ile ^{233}U izotopuna dönüşebilmektedir. ^{233}U izotopunun dönüşüm formu şu şekildedir:



Burada ^{232}Th izotopu bir nötron yutarak bileşik çekirdek formu olan ^{233}Th 'a dönüşmektedir. ^{233}Th izotopu 22 dakika içinde bir β^- ışınması yaparak ^{233}Pa 'a dönüşür. ^{233}Pa izotopu 27 dakika içinde β^- ışınması yaparak ^{233}U izotopuna dönüşür (Choppin et. al., 1980). Şekil 4'de 48 aylık reaktör işlem zamanı boyunca mantoda üretilen ^{233}U izotopunun kütlelesel değişimi görülmektedir. Bütün hesaplama modlarında işlem zamanı boyunca mantoda ^{232}Th izotopu tarafından sürekli olarak nötron yutulması neticesinde ^{233}U izotopunun üretiminde artış görülmektedir.

ron yükü için fisyon enerji üretimi aşağıdaki ifadeye bağlı olarak hesaplanır:

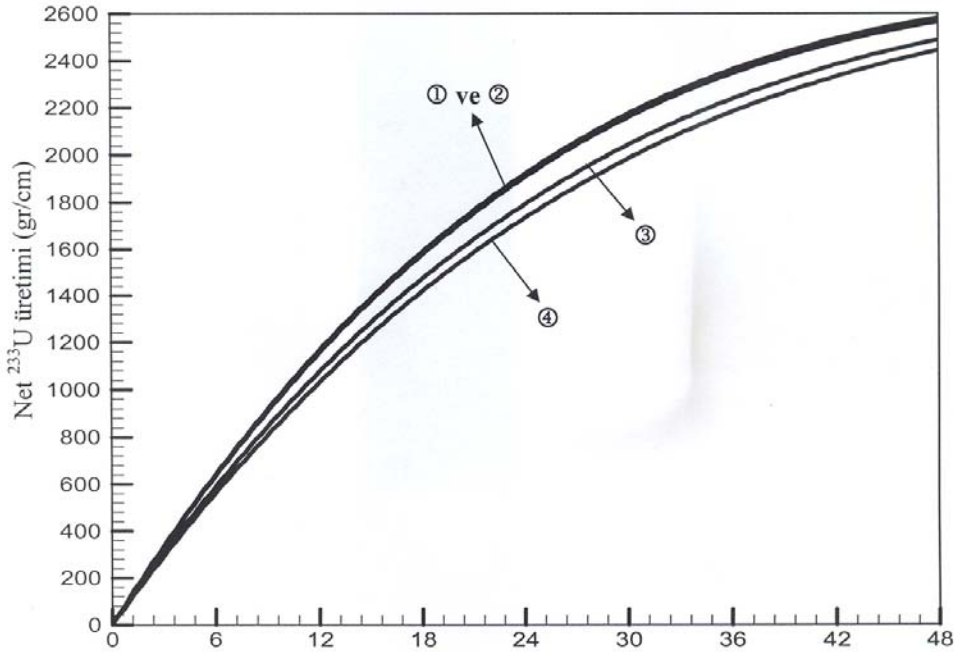
$$E = \Phi_s * F_w * \langle \phi \cdot \Sigma_f \rangle * 2.10^8 (\text{eV/fis}) * 1.602.10^{-19} (\text{j/eV}) \quad (5)$$

$\langle \phi \cdot \Sigma_f \rangle$: Toplam fisyon miktarı (fisyon/cm)

Φ_s : D-T füzyon nötronu akısı ($2.2 \cdot 10^{14}$ nötron/cm²sn)

F_w : İlk duvar yüzey alanı (cm²)

Şekil 4'de görüldüğü üzere, mantoda, ^{232}Th izotopunun dönüşüm reaksiyonları sonucu ^{233}U izotopu üretiminin artmasının aksine ^{232}Th izotopu kütlelesinde meydana gelen azalma işlem zamanı boyunca devam ettiğinden $^{232}\text{Th}(n,f)$ reaksiyon miktarı sürekli olarak azalmaktadır. $^{232}\text{Th}(n,f)$ reaksiyon miktarları Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④'de işlem zamanı başlangı-



Şekil 4. Hesaplama modları için işlem zamanı boyunca ^{233}U miktarındaki değişim.

Miktar olarak incelendiğinde 48 aylık işlem zamanı sonunda Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④'de sırasıyla 2564.08, 2581.84, 2487.64 ve 2443.54 gr/cm ^{233}U izotopu üretilmiştir. Şekilden görüleceği üzere ^{233}U izotopu üretiminde en yüksek değer işlem zamanı boyunca Mod ②'de, en düşük değer Mod ④'de elde edilmiştir.

3.4. Fisyon Enerjisi Üretimi

Füzyon-fisyon hibrid reaktörlerinde esas amaç füzyon yakıtı üretimi ve fisyon olabilen yakıt üretimi olduğu için bu tip reaktörler kritikaltı çalışırlar. Ancak üretken yakıtların yüksek enerjili nötronlarla fisyon reaksiyonları yapmasının yanında, üretilen yeni izotoplarında reaktör çalışma periyodu boyunca sürekli fisyon reaksiyonları yapmaları sonucu reaktörde fisyon enerji üretimi gerçekleşir. Mantonun 5 MW/m² ilk duvar nö-

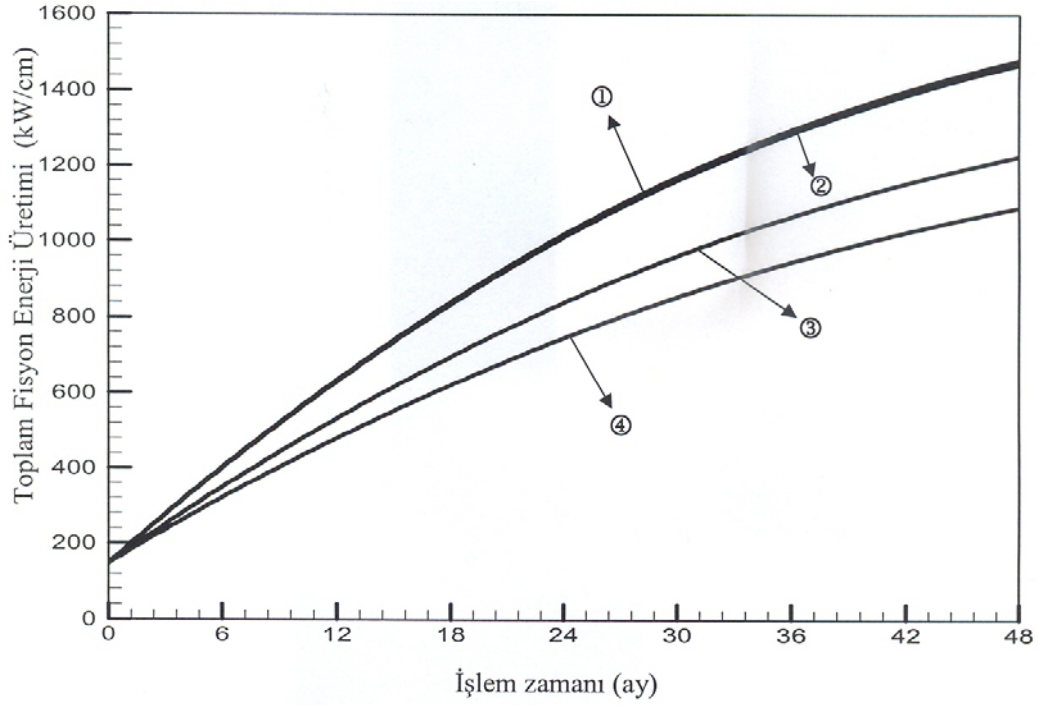
tronda sırasıyla 0.02063, 0.02069, 0.02064 ve 0.02062 iken işlem zamanı sonunda 0.01861, 0.01864, 0.01857 ve 0.01860 olarak hesaplanmıştır.

Bununla birlikte üretilen ^{233}U izotopunun bir kısmının işlem zamanı boyunca termal enerjili nötronlarla fisyon reaksiyonları ($^{233}\text{U}(n,f)$) yapması nedeniyle toplam fisyon miktarında da sürekli artış olmaktadır. Bu nedenle de mantodaki fisyon enerji üretimi zamana bağlı olarak artış gösterir. Toplam fisyon/cm³ miktarları Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④'de işlem zamanı başlangıcında sırasıyla 0.02063, 0.02069, 0.02064 ve 0.02062 iken işlem zamanı sonunda 0.20795, 0.20629, 0.17212 ve 0.15308 olarak hesaplanmıştır. Buradan da görüleceği üzere işlem zamanı başlangıcında reaktörde yakıt olarak sadece ^{232}Th izotopu olduğundan toplam fisyon miktarı $^{232}\text{Th}(n,f)$ miktarına eşittir. İşlem zamanı boyunca üretilen ^{233}U izotopları da fisyon reaksiyonları

yapmakta ve işlem zamanı sonunda toplam fisyon miktarının %~90'lık bir kısmını ²³³U(n,f) reaksiyonu oluşturmaktadır.

Şekil 5'de 48 aylık reaktör işlem zamanı boyunca fisyon enerjisinin değişimi farklı işlem modlarına göre verilmiştir. Şekilde de görülebileceği üzere işlem zamanı sonunda toplam fisyon enerji üretim miktarında en yüksek değere Mod ① ve Mod ②'de ulaşılmış iken en düşük değer Mod ④'de elde edilmiştir.

yönde meydana gelen düşüş, füzyon nötron kaynağından uzaklaştıkça ²³²Th izotopunun fisyon reaksiyonlarının azalmasından dolayıdır. Bu azalma ortalama olarak bütün modlar için aynı yapıda ve aynı miktardadır. İşlem zamanı boyunca bütün hesaplama modları için ²³³U(n,f) reaksiyonları arttığından ve toplam fisyon reaksiyonlarının önemli bir miktarını oluşturduğundan, toplam fisyon reaksiyonları miktarında belirgin bir artış vardır, bu nedenle fisyon



Şekil 5. Hesaplama modları için işlem zamanı boyunca fisyon enerjisinin değişimi

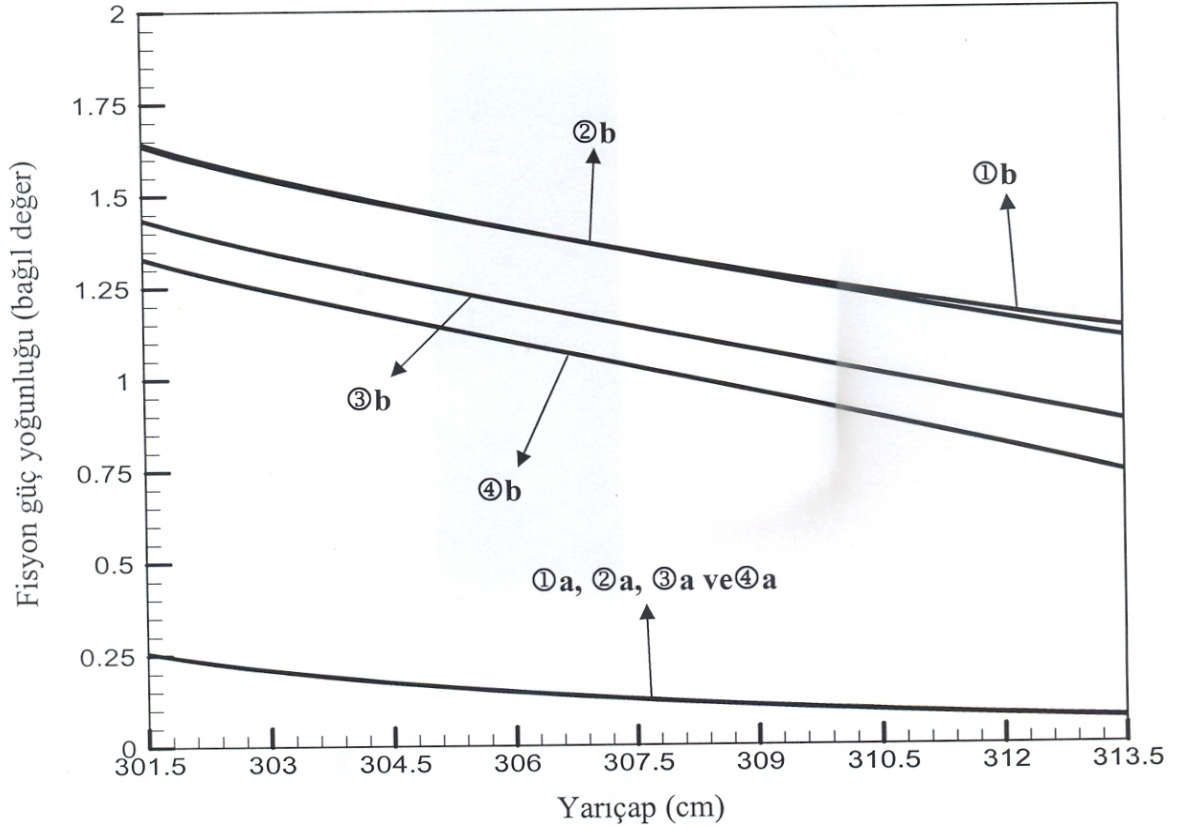
3.5. Fisyon Güç Yoğunluğu

Fisyon güç yoğunluğu mantonun yakıt bölgesinde üretilen fisyon enerji miktarının radyal yöndeki değişimidir. Mühendislik uygulamaları açısından fisyon enerjisi değişiminde ani ve keskin değişimler reaktörün yapı malzemelerinde önemli hasarlar meydana getireceğinden bu tip düşüşler arzu edilmez.

Diferansiyel/integral miktar olarak fisyon güç yoğunluğu tüm hesaplama modları için Şekil 6'da görülmektedir. Geometrik şekil olarak her dört hesaplama modu için fisyon güç yoğunluğu benzer bir yapıda değişmektedir. Şekilde mantonun işlem zamanı başlangıcı (a) ve sonunda (b) toplam fisyon miktarındaki değişim görülebilmektedir. İşlem zamanı başlangıcında (a) fisyon güç yoğunluğunda radyal

güç yoğunluğu da artmıştır. İşlem zamanı sonunda (b) reaktör merkezinden uzaklaştıkça nötron yutulmalarının artması nedeniyle fisyon reaksiyonlarının miktarında meydana gelen azalmalar, radyal yönde fisyon güç yoğunluğunda düşüşe neden olmaktadır. Bu düşüş, bütün işlem modlarında, işlem zamanı başlangıcı ile kıyaslandığında reaktör çalışma periyodu sonunda daha hızlı gerçekleşmektedir. Buda korun merkeze yakın noktalarında kenarlara nazaran zamanla daha fazla fisyon gerçekleştiğini gösterir.

Şekil 6 incelendiğinde, işlem zamanı boyunca fisyon güç yoğunluğunda meydana gelen en yüksek artış Mod ① ve Mod ②'de, en düşük artış ise Mod ④'de meydana gelmektedir.



Şekil 6. Hesaplama modları için fisyon güç yoğunluğunun radyal yöndeki değişimi. (a: işlem zamanı başlangıcı; b: işlem zamanı sonu)

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, ThSi_2 yakıtlı-flibe soğutuculu bir füzyon-fisyon hibrid reaktörün de trityum üretim bölgesinde farklı Li bileşiklerini kullanılması için fusil ve fisil yakıtı üretimi ve fisyon enerjisi üretimi üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmayla ilgili aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

1. Fusil yakıt olarak trityumun üretilmesinde bütün işlem modlarında, işlem zamanı başlangıcında trityum üretim oranı 1.05'in altındadır. 1.05 değerine Mod ①, Mod ②, Mod ③ ve Mod ④'te sırasıyla 650, 910, 490 ve 180. işlem gününde ulaşılmış ve reaktör kendi kendine yeterli hale gelebilmiştir. Bu süreç zarfında füzyon kaynağı için gerekli trityumun harici olarak temin edilmesi gerekmektedir. Reaktör işlem zamanı sonunda en yüksek trityum üretim miktarına 1.1863 değeri ile trityum üretim bölgelerinde Li_2O bileşiğinin kullanıldığı Mod ④'te ulaşılmıştır.

2. Çok kaliteli fisil bir izotop olan ^{233}U izotopu üretiminde reaktör işlem zamanı sonunda 2581.84 gr/cm^3 ile en iyi sonuç, trityum üretim bölgelerinde Li_2ZrO_3 bileşiğinin kullanıldığı Mod ②'de elde edilmiştir.

3. Gerek reaktörün fisyon enerjisi üretiminde ve gerekse de fisyon güç yoğunluğunun değişiminde işlem zamanı sonunda en yüksek değere Li_2TiO_3 ve Li_2ZrO_3

bileşiklerinin kullanıldığı Mod ① ve Mod ②'de ulaşılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler; hibrid reaktörlerde fusil ve fisil yakıtı üretimi ve fisyon enerjisi üretimi açısından dikkate alınmalı ve farklı Li bileşiklerini belirtilen avantajlarına göre hibrid reaktörlerde kullanılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

1. Berwald, D.H. 1982. *Fission Suppressed Hybrid Reactor-the Fusion Breeder*, UCID-19638, Lawrence Livermore Laboratory.
2. Bondarenko, I. I. (Ed.) 1964. *Group Constants For Nuclear Reactor Calculations*, Consultants Bureau, New York.
3. Chopin, G. R. and Rydberg, J. 1980. *Nuclear Chemistry Theory and Applications*, Pergamon Press Inc., New York, USA.
4. Dolan, T. J. 1982. *Fusion Research*, Pergamon Press Inc., New York, USA.
5. Futamura, Y., Kawamura, H. and Tsuchiya, K. 1999. Tritium Breeding Materials Data Base For Fusion reactor Blankets (4), Hydrogen Isotope Research Center (HRC) Annual Report, vol. 19, Toyama University.
6. Grene, N. M., Petrie, L. M. and Westfall, R. M. 2000a. 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, ORNL.
7. Grene, N. M. 2000b. BONAMI, Resonance Self-Shielding by the Bondarenko Method, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 2, section F1, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6, ORNL.
 8. Grene, N. M. and Petrie, L. M. 2000c. 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, ORNL.
 9. Jordan, W. C. and Bowman, S. M. 2000. Scale Cross-Section Libraries, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 3, section M4, ORNL/NUREG/CSD-2/V3/R6, ORNL.
 10. Landers, N. F. and 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, ORNL.
 11. Lee, D.J. 1994. Waste Disposal Assessment of HYLIFE-II Structure, Fusion Tech., 26, p. 74.
 12. Petrie, L. M. 2000. SCALE System Driver, NUREG/CR-0200, Revision 6, vol. 3, Section M1, ORNL/NUREG/CSD-2/R6, ORNL.
 13. Şahin, S., Al-Kusayer, T., Al-Samair, M. and Raof, M. A. 1984. Neutronic Investigations of Experimental AYMAN Hybrid Blankets, Transactions of the American Nuclear Society, 47, 151.
 14. Şahin, S. and Al-Kusayer, T. 1986a. “²⁴⁴Cm as Multiplier and Breeder in a ThO₂ Hybrid Blanket Driven by a (Deuterium-Tritium) Source”, Fusion Tech., 10, p. 1297.
 15. Şahin, S., Al-Kusayer, T. and Raof M. A. 1986b. Preliminary Design Studies of a Cylindrical Experimental Hybrid Blanket With Deuterium-Tritium Driver, Fusion Tech., 10, p. 84.
 16. Şahin, S. 1991a. Radiation Shielding Calculations For Fast Reactors (in Turkish), Gazi University, Publication # 169, Faculty of Science and Literature, Publication number 22, Ankara, Turkey.
 17. Şahin, S., Yapıcı, H. and Ünalın, S. 1991b. ERDEMLİ, A Computer Program to Process ANISN Output Data, Gazi University, Ankara, Turkey.
 18. Şahin, S., Moir, R. W. and Ünalın, S. 1994. Neutronic Investigation of a Power Plant Using Peaceful Nuclear Explosives, Fusion Tech., 26, p. 1311.
 19. Şahin, S. and Yapıcı, H. 1998. Rejuvenation of Light Water Reactor Spent Fuel in Fusion Blankets, Annals of Nuclear Energy, 25, p. 1317.
 20. Şahin, S. and Yapıcı, H. 1999. Neutronic Analysis of a Thorium Fusion Breeder with Enhanced Protection Against Nuclear Weapon Proliferation, Annals of Nuclear Energy, 26, p.13.
 21. Şahin, S., Yapıcı, H. and Şahin, N. 2000. Neutronic Performance of Proliferation Hardened Thorium Fusion Breeders, Fusion Engineering and Design, 54, no. 1, p. 63.
 22. Şahin, S., Şahin, H. M., Sözen, A. and Bayrak, M. 2002. Power Flattening and Minor Actinide Burning in a Thorium Fusion Breeder, Energy Conversion and Management, 43, p. 799.
 23. Şahin, S., Yalçın, Ş. and Yıldız, K. 2003. Fissile Fuel Breeding with Peaceful Nuclear Explosives, Fusion Engineering and Design, vol. 65, p. 643.
 24. Ünak, T. 2000. What is the Potential Use of Thorium in the Future Energy Production Technology?, Progress in Nuclear Energy, 37, p. 137.
 25. Yapıcı, H., Şahin, N. and 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
 26. Yapıcı, H., İpek, O. 2003. Neutronic performance of coupled hybrid blanket fueled with ThO₂ and UO₂, Energy Conversion and Management, 44, p. 1853.
 27. Yapıcı, H. 2003. Power Flattening Of An Inertial Fusion Energy Breeder with Mixed ThO₂-UO₂ Fuel, Fusion Engineering And Design, 65, p. 89.
 28. Yapıcı, H., Bayrak, M. 2005. Neutronic analysis of denaturing plutonium in a thorium fusion breeder and power flattening, Energy Conversion and Management, 46, p. 1209.
 29. Yıldız, K. 2004. ThC₂ Yakıtlı ve Li₁₇Pb₈₃ Soğutuculu Bir Füzyon-Fisyon Reaktöründe Tritiyum Üretim Bölgesinde Farklı Li Bileşikleri Kullanılmasının Reaktör Performansına Etkilerinin Değerlendirilmesi, Journal of Polytechnic, 7, p. 141.
 30. Yıldız, K. 2005. An investigation of the Effects of Neutron Energy-Group Structures and Resonance Treatment in a Fusion-Fission Hybrid Reactor Fuelling with ThO₂, Annals of Nuclear Energy, 32/1, p. 101.
 31. İpek, O., Analysis Of The Neutronic Data İn İnfinite Medium Using Fusion Neutron Source For Various Material Compositions, Energy Conversion and Management 44 (2003) 439–458
 32. 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