

$(^{239}\text{Pu}/\text{Th})\text{O}_2$ Yakıtlı Sabit Yataklı Bir Nükleer Reaktörde (FBNR) Nötronik Performansın İncelenmesi

Mahmut ALKAN^a, Adem ACIR^b

^aNiğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Niğde

^bGazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Teknikokullar - Ankara

ÖZET

Bu çalışmada; sabit yataklı bir nükleer reaktörde (FBNR) nötronik analiz yapılmıştır. $(^{239}\text{Pu}/\text{Th})\text{O}_2$ karışımlarının nötronik performansa etkisi incelenmiştir. Nötronik hesaplamalar SCALE5 nükleer kodu yardımıyla yapılmıştır. İlk olarak, 9 % zenginleştirilmiş UO_2 yakıtına karşılık gelen kritiklik (k_{eff}) değeri araştırılmıştır. Yakıt karışım oranları % 6 $^{239}\text{PuO}_2$ + % 94 ThO_2 olarak elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, $k_{\text{eff}} = 1.06$ sınır değerine karşılık gelen % 6 $^{239}\text{PuO}_2$ + % 94 ThO_2 yakıt karışımı için yakıt yanma seviyesi 32216 MW.D/MT elde edilirken; reaktör çalışma süresi 5 yıl olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sabit Yataklı Nükleer Reaktör (FBNR), Toryum, Fisil yakıtlar

Investigation of Neutronic Performance in Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) With Fuelled $(^{239}\text{Pu}/\text{Th})\text{O}_2$

ABSTRACT

In this study, the neutronic performance analysis in a fixed bed modular nuclear reactor (FBNR) was performed. The effect of the $(^{239}\text{Pu}/\text{Th})\text{O}_2$ mixture fuel of neutronic performance were investigated. Neutronic calculations were conducted by using SCALE5 code. Firstly, criticality (k_{eff}) value compared 9 % enrichment UO_2 was computed. The mixture fuel ratio was obtained as % 6 $^{239}\text{PuO}_2$ + % 94. As a result, the operation times passed until the k_{eff} value reached a level of 1.06 was computed as ~ 5 year whereas, the corresponding burnup value was obtained as ~ 33 000 MWD/T.

Keywords: Fixed bed nuclear reactor (FBNR), Thorium, Fissile fuel

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yeni nesil reaktör tasarımlarından biri olan yüksek sıcaklık reaktörlerinde (HTR), soğutucu akışkan olarak helyum gazı kullanılmaktadır. Bu tip reaktörlerin yakıt elemanları, TRISO olarak adlandırılan yaklaşık tenis topu büyüklüğünde küresel yapıdan teşekkül etmektedir. HTR yüksek sıcaklığa dayanıklı seramiklerden ve grafit yakıt elemanlarından oluşmasından dolayı geleneksel bir reaktörün kalbini tamamen eritecek kaza koşullarında bile radyoaktif salınımı izin vermemekte ve pahalı güvenlik sistemlerine de ihtiyaç duyulmamaktadır. HTR ekonomik ve çevre açısından daha güvenilir olmasından dolayı günümüzde hızla gelişmektedir. HTR'nin avantajlarına bağlı olarak, yeni tip bir sabit yataklı nükleer reaktör olan (FBNR) uluslar arası atom enerjisi kurumu (IAEA) kontrolü altında projelendirilmiştir [1,2]. FBNR, basınçlı su reaktörü teknolojisine sahip bir fisyon reaktörü olup, tamamen HTR yakıt elemanları kullanılmak üzere tasarlanmıştır [1-3]. Ayrıca HTR'den farklı olarak helyum gazı yerine H_2O soğutucu olarak kullanılmıştır. FBNR reaktör yapısında kullanılan küresel yakıt elemanları içerisinde ThC_2 , ThO_2 , PuO_2 , $(\text{Th,U})\text{O}_2$, UO_2 ve minor aktinit gibi fisil ve fertil yakıtları içeren yakıt tanecikleri yerleştirilebilmektedir.

FBNR tasarımlarında ilk olarak TRISO yakıt elemanları düşünülmüş, daha sonra yüksek sıcaklıklara aşırı direnci, sertlik vb avantajlarından dolayı CERMET yakıt elemanları reaktör koruna yapılandırılmıştır [4]. Şahin ve Sefidvash tarafından yapılan çalışmada, FBNR de TRISO yakıt elemanı kullanılarak % 9 zenginleştirilmiş UO_2 yakıtının nötronik performansa etkisi araştırılmıştır [5]. Ayrıca; Şahin ve vd. tarafından yapılan çalışmada; CERMET yakıt elementi içeren FBNR yakıtında, hafif su reaktörlerinde zehirli ve zararlı bir atık olarak ortaya çıkan ve hâlâ yaklaşık 1.700 ton olduğu tahmin edilen "Reactor grade plütonium (RG-Pu), soğuk savaş sonunda barışçıl amaçlarla kullanılması düşünülen çok pahalı temiz plütonyumun, nükleer silah tipi, "Weapon grade plütonium (WG-Pu) ve "Minor actinide (MA)" diye isimlendirilen ve yarılanma ömürleri çok uzun olan bütün zararlı nükleer atıkların yeni bir yakıt türü olarak kullanılabilceği ortaya çıkarılmıştır[6-7]. İlaveten, Alkan tarafından yapılan çalışmada nükleer atıklarla beraber doğal uranyum kullanımının nötronik performansa etkisi incelenmiştir [8].

Bu çalışmada, $(^{239}\text{Pu}/\text{Th})\text{O}_2$ yakıt karışımlarını içeren CERMET yakıt elementi kullanılarak sabit yataklı nükleer reaktörde (FBNR) nötronik performans araştırılmıştır. Ayrıca zamana bağlı olarak kritiklik, yakıt yanma değerleri ve fisil yakıt izotop yoğunluk değişimleri irdelenmiştir.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: adema@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2013.16.4, 135-138

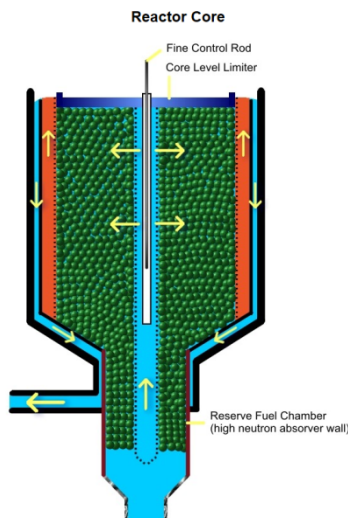
2. REAKTÖR GEOMETRİSİ ve HESAPLAMA YÖNTEMİ (REACTOR GEOMETRY AND CALCULATION METHOD)

Bu çalışmada sabit yataklı nükleer reaktör (FBNR) incelenmiştir. FBNR reaktör yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Reaktörün teknik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

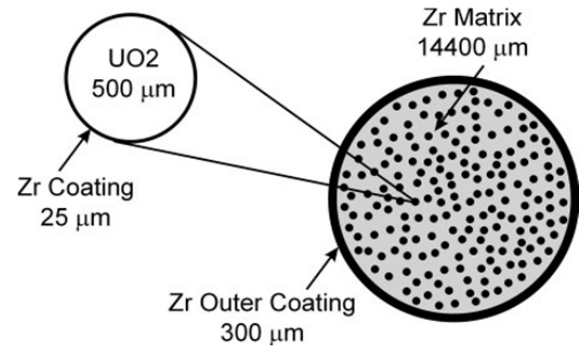
Tablo 1. Sabit yataklı Nükleer Reaktörün (FBNR) teknik özellikleri

Parametre	Değerler
Güç	
Reaktör gücü (MW _e)	70
Termal güç üretimi (MW _{th})	218
Soğutucu hacmi (m ³)	10
Termal	
Soğutucu giriş sıcaklığı (°C)	290
Soğutucu çıkış sıcaklığı (°C)	326
Soğutucu ortalama sıcaklığı (°C)	308
Yakıt işlem sıcaklığı (°C)	354
Kor Boyutları	
Kor yüksekliği (cm)	200
Kor iç çapı (cm)	31
Kor dış çapı (cm)	171
Kor hacmi (m ³)	4.78
Korda yakıt elementi (Ton)	23.2
UO ₂ (Ton)	11.5

Reaktörde CERMET nükleer yakıt elemanı kullanılmıştır. CERMET nükleer yakıt elemanı Şekil 2'de gösterilmiştir. CERMET yakıt elemanı içerisinde nano boyutlarda UO₂ nükleer yakıtlar Zr matriks içerisine homojonize olmaksızın dağıtılmıştır. Nötronik hesaplamalar SCALES/XSDRNPM yardımıyla yapılmıştır [9]. Yakıt bölgesi için önce 238 Grup ENDF/B-V kütüphanesi kullanılarak CSAS [10] kontrol modülü ile hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri tesir kesitleri elde edilmiştir. Bu modül hücre geometrisi için rezonans işlemcisi olarak ilk önce BONAMI [11] kodu kullanılmış ve buradan alınan veriler NITAWL-II kodu kullanılarak hücre ağırlıklı ve rezonans işlemleri tesir kesitleri elde edilmiştir.



Şekil 1. FBNR reaktör koru kesit görünüşü.

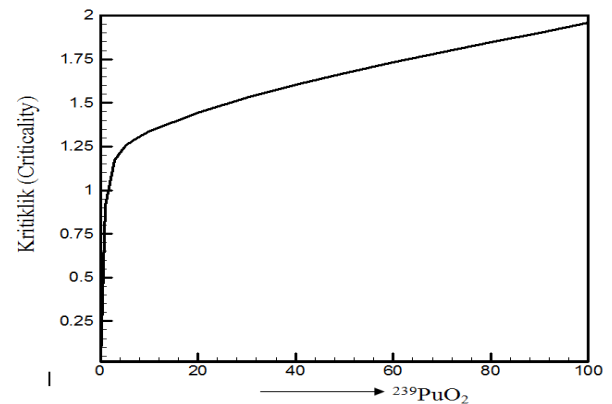


Şekil 2. CERMET Yakıt Elemanı (15 mm) [5]

Hesaplamalar, XSDRNPM nötron transport hesaplama kodu kullanılarak, Boltzman transport denkleminin çözülmesi yoluyla yapılmıştır. Bu kod, hücre ağırlıklı kütüphaneden aldığı verileri yakıt bölgesinde işleyerek Boltzman transport denkleminin nümerik çözümünü gerçekleştirmek suretiyle nötron akı dağılımlarını hesaplayarak nötron reaksiyonlarını veren bir işlemcidir. XSDRNPM kodu ile yapılmış bütün transport hesaplamalarında, açılmalı nötron akısının entegrasyonu S_g-P₃ yaklaşımıyla yapılmıştır.

3. NÜMERİK SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

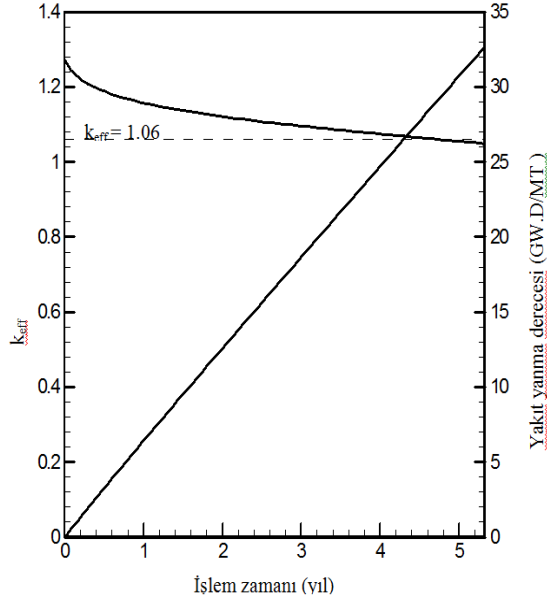
Bu çalışmada, (²³⁹Pu/Th)O₂ yakıt karışımlarını içeren CERMET yakıt elemanı kullanılarak sabit yataklı nükleer reaktörde (FBNR) nötronik performans incelenmiştir. Günümüzde, füzyon fisyon hibrid reaktörlerinde fisil yakıt ²³⁹Pu üretimi ön plana çıkmaktadır. Plütonyum yakıtı doğada bulunmayıp, UO₂ nükleer yakıtının (n,γ) reaksiyonları sonucu elde edilen yüksek kalitede bir nükleer yakıttır. Toryum fisyon reaktörlerinde yalnız başına kullanılabilen bir nükleer yakıt değildir. Bu yüzden, uranyuma göre dünyada üç kat daha fazla bulunan toryum yakıtından faydalanabilmek ve fisyon reaksiyonunun başlatılabilmesi için yüksek kalitede fisil yakıt içeren ²³⁹Pu, ²³³U, nükleer yakıt atıklarına ihtiyaç vardır.



Şekil 3: (²³⁹Pu/Th)O₂ karışım oranları için kritiklik analizi

Bu çalışmada, ilk olarak orijinal yakıt 9 % zenginleştirilmiş uranyum yakıtına karşılık gelen kritiklik değeri ($k_{eff} = 1.2744$), (²³⁹Pu/Th)O₂ yakıt

karışımı için 1%'den %100'e kadar ²³⁹Pu izotopu artırılmak suretiyle araştırılmıştır. Şekil 3'te gösterildiği gibi, % 6 ²³⁹PuO₂ + % 94 ThO₂ yakıt karışımı için, 9 % zenginleştirilmiş uranyum yakıtına karşılık gelen kritiklik değeri 1.27117 elde edilmiştir.

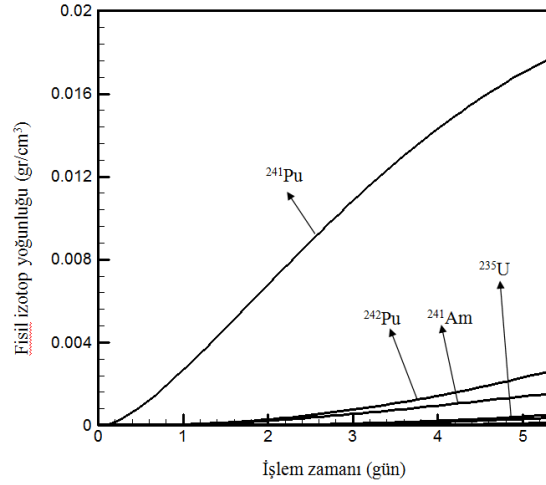
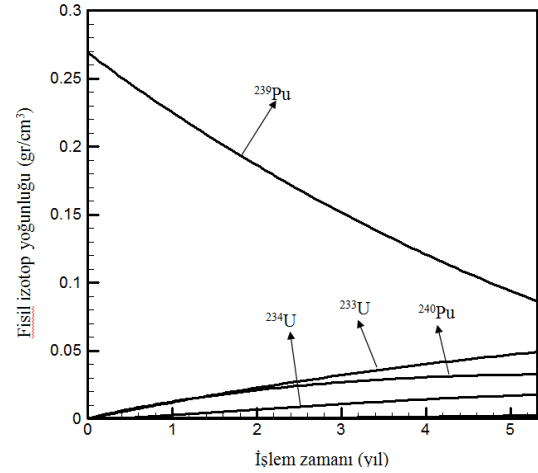


Şekil 4: % 6 ²³⁹PuO₂ + % 94 ThO₂ karışım oran için kritiklik ve yakıt yanma analizi

Ancak, ²³⁹PuO₂ % oranı arttıkça kritiklik değeri yükselmektedir. %100 ²³⁹PuO₂ kullanıldığında kritiklik değeri 1,96066 olmaktadır. Buradaki asıl hedef ThO₂ yakıtından en yüksek derecede faydalanabilmek olduğundan, orijinal yakıt kritiklik değerine karşılık gelen en uygun yakıt karışımı ele alınmıştır. Daha sonra, elde edilen % 6 ²³⁹PuO₂ + % 94 ThO₂ yakıt karışımı için zamana bağlı nötronik performans analizi yapılmıştır. Reaktör işlem zamanı boyunca ²³²Th fertil yakıtının nötronlarla reaksiyona girmesi sonucunda, düşük enerjili nötronlarla çok iyi fisyon yapabilen ²³³U fisil izotopu üretilecektir. ²³⁹Pu izotopu ve reaksiyon esnasında oluşan ²³³U fisil izotopu reaktörün performansının düzgünleşmesinde katkıda bulunacaktır. Şekil 4'te zamana bağlı kritiklik ve yakıt yanma değerleri gösterilmiştir. Nötronik hesaplamalar sonucunda, $k_{eff} = 1.06$ sınır değeri için reaktör yaklaşık 5 yıl boyunca çalışmakta olup ve bu sürenin sonunda yakıt yanma derecesi ~33.000 MW.D/ MT olarak elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmada kullanılan nükleer

yakıtı ile literatürde daha önce yapılan farklı nükleer yakıt yanma performansları karşılaştırılmış ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde, bu çalışmada kullanılan nükleer yakıt karışımının herhangi bir zenginleştirme olmaksızın orijinal yakıtı göre iyi derecede performans gösterdiği anlaşılmıştır. Şekil 5'de reaktör korunda zamana bağlı olarak değişen fisil izotopların yoğunluk değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5: % 6 ²³⁹PuO₂ + % 94 ThO₂ karışım oran için zamana bağlı fisil izotop yoğunluk değişimi

Fisil izotoplardaki yoğunluk değişimleri reaktör

Tablo 2. Nükleer yakıt performanslarının karşılaştırılması

Yakıt Tipi	Reaktör çalışma süresi	Kritiklik değeri	Yanma Derecesi
% 6 ²³⁹ PuO ₂ + % 94 ThO ₂	5	1.27117	33.000 MWD/t
Orijinal yakıt (% 6 Zenginleştirilmiş UO ₂ [7])	8	1.2744	54 000 MWD/t
20 % WG- PuO ₂ + 80 % ThO ₂ [7]	20	1.2864	136 000 MWD/t
35 % RG-PuO ₂ + 65 % ThO ₂ [7]	20	1.2670	123 000 MWD/t
50 % MAO ₂ + 50 % ThO ₂ [7]	15	1.2673	86 000 MWD/t
9 % ²³³ UO ₂ + 91 % ThO ₂ [12]	12	1.25	105 000 MWD/t

kritikliği açısından önemlidir. Çünkü fisyonla uğrayabilen izotopların işlem zamanı boyunca nötronları absorbe ederek etkileşimi sonucunda yeni izotoplar meydana gelecek ve reaktörün kritik üstü olması sağlanacaktır. Şekil 5’de görüldüğü gibi ^{239}Pu izotopu zamana bağlı olarak azalmıştır. Başlangıçta 0.27 gr/cm^3 olan ^{239}Pu izotopu, işlem sonunda 0.1 gr/cm^3 azalmıştır. $^{239}\text{Pu}(n,\gamma)$ ve $\text{Th}(n,\gamma)$ reaksiyonları ile fisil izotoplar üretilmektedir. Nükleer reaksiyonlar sonucunda ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu ve ^{241}Am izotoplarında artış gözlenmiştir. Bu izotoplardaki artış reaktör kritikliği ve performansın düzleştirilmesinde katkıda bulunmaktadır.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada; CERMET yakıt elemanı kullanılarak sabit yataklı nükleer reaktörde (FBNR) ($^{239}\text{Pu}/\text{Th}$) O_2 yakıt karışımının nötronik performansa etkisi incelenmiştir. Optimum ($^{239}\text{Pu}/\text{Th}$) O_2 yakıt karışımı hesaplanmıştır. % 9 zenginleştirilmiş uranyum yakıtında elde edilen kritiklik değerine karşılık gelen en uygun karışım oranı % 6 $^{239}\text{PuO}_2$ + % 94 ThO_2 olarak bulunmuştur. Elde edilen yakıt karışımı için yapılan hesaplamalar sonucunda, $k_{\text{eff}} = 1.06$ sınır değeri için yakıt yanma derecesi $\sim 33.000 \text{ MW.D/ MT}$ olarak elde edilirken reaktör çalışma süresi yaklaşık 5 yıl olarak hesaplanmıştır. Reaktörün çalışma süresi boyunca ^{239}Pu üretim-tüketim dengesi kendiliğinden oluşmaktadır. Reaktörün enerji üretimine en önemli katkısı ^{239}Pu ve yeni üretilen ^{233}U izotopunun yaptığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, düşük oranda ^{239}Pu izotopu yardımıyla, toryumun FBNR’de yakıt olarak kullanılabileceğini ve reaktör performansı açısından çok iyi sonuçlar vereceğini göstermektedir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sefidvash F., R. S. da Silva, “Neutronics Design of the FBNR”, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, IAEA Report 2008 Contract No. 12960/R3 (2007).
2. Sefidvash F., R. S. da Silva, “Neutronics Design and Evaluation of the FBNR”, IAEA Report 2008, Contract No. 12960/R3 (2008).
3. Sefidvash, F., “Fixed Bed Suspended Core Nuclear Reactor Concept”, *Kerntechnik*, Vol. 68, pp. 56 - 59 (February 2003).
4. Solomon A. A., S. M. McDeavitt, V. Chandramouli, S. Anthonysamy, S. Kuchibhotla, T. J. Downar, “Thoria-Based Cermet Nuclear Fuel: Sintered Microsphere Fabrication by Spray Drying”, *Proceedings of ICONE10: 10th International Conference on Nuclear Engineering*, Arlington, VA, (April 14-18, 2002)
5. Şahin S., F. Sefidvash, “The Fixed Bed Nuclear Reactor Concept”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, no. 7, pp. 1902-1909 (2008).
6. Şahin S., H. M. Şahin, A. Acir, T. A. Al-Kusayer, “Criticality Investigations for the Fixed Bed Nuclear Reactor Using Thorium Fuel Mixed with Plutonium or Minor Actinides”, *Annals of Nuclear Energy* Vol. 36, no. 8, pp. 1032 - 1038 (2009).
7. Şahin S, Sahin HM, Acir A., Criticality and Burn Up Evolutions of the Fixed Bed Nuclear Reactor With Alternative Fuels, *Energy Conversion and Management*, 51(9), 2010, 1781-1787.
8. Alkan, M., Burnup extension of the Fixed Bed Nuclear Reactor using alternative fuels, *Energy Conversion and Management*, 72, 2013, 45-50.
9. Petrie L. M., SCALE5-Scale System Driver, NUREG/CR-0200, Revision 7, Volume III, Section M1, ORNL/NUREG/CSD-2/V3/R7, Oak Ridge National Laboratory (2004).
10. 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.
11. 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.
12. Şahin S., Acir A., Sahin H. M., Performance analysis of U-233 for fixed bed nuclear reactors, *Kerntechnik* Vol. 75 (5), (2010), 243-247.