

Bir Hibrit Reaktörde TRISO Kaplamalı Candu Nükleer Yakıt Atıklarının Nötronik Analizi

Hakan TAŞKOLU^a, Adem ACIR^b

^aGazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, TURKEY

^bGazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Teknikokullar - Ankara – TURKEY

ÖZET

Bu çalışmada; bir füzyon fisyon hibrid reaktöründe TRISO kaplamalı CANDU harcanmış nükleer atıklarının yakılmasının nötronik performansa etkisi araştırılmıştır. Nötron transport hesaplamaları XSDRNPM/SCALE5 kodu yardımıyla yapılmıştır. Soğutucu olarak doğal Lityum, Flibe, Flinabe ve $Li_{20}Sn_{80}$ kullanılmıştır. TRISO kaplamalı CANDU harcanmış nükleer atıkların, trityum üretim oranı (TBR), enerji çoğaltım faktörü (M), fisil yakıt üretimi ve yanma oranlarına etkisi karşılaştırılmalı olarak araştırılmıştır. Zamana bağlı olarak elde edilen nötronik sonuçların yanma oranı açısından TRISO kaplamalı CANDU harcanmış nükleer atıklardan etkilendiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Füzyon, Fisyon, TRISO yakıt, CANDU harcanmış yakıtı

Neutronic Analysis of TRISO Coated Candu Spent Fuel in A Hybrid Reactor

ABSTRACT

In this study, time dependent performance of incineration of the TRISO fuel containing CANDU spent fuels in the Deuterium-Tritium (D-T) fusion driven hybrid reactor was investigated. Neutron transport calculations were performed by using XSDRNPM/SCALE 5 codes. In the reactor model, neutral lithium, flibe, flinabe and $Li_{20}Sn_{80}$ were used as coolants. In the calculations, the effect of TRISO fuel containing CANDU spent fuels on tritium breeding ratio (TBR), energy multiplication (M), fissile fuel breeding (FFB) and average burn up values were comparatively investigated. According to the time dependent calculations, it was observed that TRISO fuel containing CANDU spent fuels extends the burn-up.

Key words : Fusion, Fission, TRISO fuel, CANDU spent fuel

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde füzyon reaktörleri ekonomik olarak kullanıma henüz sokulamamıştır. Bundan dolayı nükleer enerji üretimi kullanılan fisyon reaktörlerinden karşılanmaktadır. Bu reaktörler genellikle, hafif su reaktörleri (LWR) ve Kanada'nın ağır sulu tabi Uranyumlu reaktörlerinden (CANDU) oluşmaktadır. Belirtilen LWR ve CANDU reaktörlerinin atıkları, önemli miktarda minör aktinidleri içermektedir. Bu reaktörlere ait atık yakıtların değerlendirilmesi için füzyon reaktörleri üzerinde çalışılmakta olup, bu çalışmalar nükleer enerji üretimi için gerekli olan yakıt üretimi ve nükleer atıkların dönüşümlerinin yapılması şeklinde iki farklı alandayapılmaktadır. Fisil yakıt üretmek ve atık nükleer yakıtların dönüştürülmesi için (D,T) veya (D,D) füzyon reaksiyonları üzerine kurulan reaktörler ele alınmaktadır [1-6].

Harcanmış yakıtların gençleştirilmesi ve üretken yakıtların fisil yakıtlara dönüşümü hibrid reaktör yardımıyla gerçekleşmektedir. Füzyon-Fisyon hibrid sistemi füzyon ve fisyon proseslerinin birleştirilmiş bir durumudur. Sistemin ana temeli, füzyon plazması etrafının üretken yakıtlardan (^{238}U veya ^{232}Th) oluşan

bir manto ile çevrenmesi esasına dayanır. Füzyon plazmasından çıkan yüksek enerjili nötronlar bu mantoda tutulmakta ve üretken yakıtları ^{233}U ve ^{239}Pu gibi yüksek kaliteli yakıtlara dönüştürmektedir. Ayrıca bu yüksek enerjili nötronlar üretken yakıtlara da fisyon yaptırabilmektedir [1-3]. Burada üretilen yeni tip kaliteli fisyon olabilen yakıtlar mevcut LWR'lerde nükleer yakıt olarak kullanılabilir. Hibrid reaktörlerde LWR ve CANDU harcanmış yakıtlarının değerlendirilmesi için bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, nükleer reaksiyonları düzgülendirme ve nükleer atıkların kaliteli fisil yakıtlara dönüştürülmesi için farklı soğutucu ve farklı nötronik parametrelerde değerlendirilmiştir. LWR ve CANDU nükleer atıkların geri dönüşümünde D-D ve D-T füzyon nötron kaynaklı manto geometrileri dikkate alınmış ve toryum yakıtı ile karıştırılarak ülkemizde bulunan toryum rezervlerinin de değerlendirilmesinde çığır açacak yaklaşımlar sunulmuştur [7-14]. CANDU nükleer atıkların değerlendirilmesinde farklı nötronik parametreler kullanılarak helyum soğutucu, doğal lityum ve Flibe soğutucular yardımıyla nötronik analizi yapılmıştır [14-16]. Öte yandan, nötronik performansı artırmak amacıyla ilk duvarda (W-5Re) tungsten yapı kullanılarak yüksek güç yoğunluklu hibrid reaktör tasarlanmış ve doğal lityum, flibe, flinabe ve $Li_{20}Sn_{80}$

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: adema@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2013.16.4 129-133

soğutucu için CANDU harcanmış yakıtlarında nötronik analiz yapılmıştır [17]. Ayrıca, hibrid reaktörlerde minor aktinit, plutonyum, toryum ve uranyumun kullanılarak nötronik analiz çalışması yapılan bir seri çalışmalar mevcuttur [18-21]. Buna ilaveten, hibrid reaktörlerde 3 boyutlu model kullanılarak radyasyon hasar analizleri de yapılmıştır [22-23].

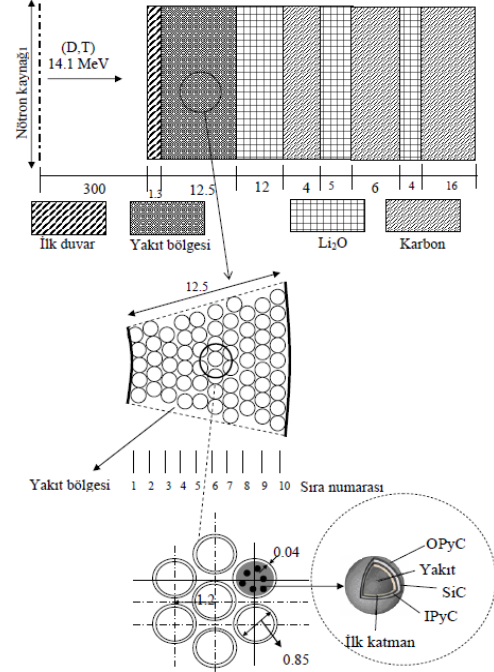
Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, hibrid reaktörlerde alternatif bir yaklaşım olarak yakıt çubukları içine yerleştirilerek, yüksek oranda yanma derecesi elde edebilmek ve nükleer atıkları en aza indirmek amacıyla yüksek sıcaklık reaktörü (HTR) fisyon reaktörlerinde kullanılan TRISO yakıt taneciklerinden faydalanılmıştır. TRISO yakıtlar, geçirgen karbon tabaka yakıtın ömrü boyunca uranyum dioksit parçacığının maruz kalabileceği mekanik deformasyon ve aynı zamanda parçacıklardan çıkan fisyon gazları için yataklık yapar. Pirolitik karbon ve silikon karpit tabakaları parçacıklarda meydana gelen fisyon ürünleri ve yakıtı içerecek delinmez bir engel olarak tasarlanmıştır.

Bu çalışmada yüksek performans elde etmek için (D,T) kaynaklı, atalet çevrimli bir füzyon-fisyon hibrit reaktör tasarlanmıştır. Bu tasarım için yakıt çubuğuna grafit matris yapıda TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtı yerleştirilmiştir. Farklı nötron duvar yükleri (2-6-10 MW/m²) ve farklı soğutucular (doğal lityum, Flibe, Flinabe, Li₂₀Sn₈₀) kullanılarak TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtının reaktör performansına etkisi incelenmiştir. Modellerin zamana bağlı nötronik değerleri hesaplanarak karşılaştırılmış ve en uygun model belirlenmiştir.

2. MANTO YAPISI HESAPLAMA METODU (BLANKET GEOMETRI AND CALCULATION METHOD)

Tasarımı modifiye edilen füzyon fisyon reaktörüne ait [5,6] silindirik hibrid manto kesit görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir. TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtının reaktördeki nötronik ve radyasyon hasar performanslarını incelemek ve karşılaştırmak için üç farklı nötron yükü (2,6,10 MW/m²) ve doğal lityum, flibe, flinabe ve Li₂₀Sn₈₀ olmak üzere dört farklı soğutucu kullanılmıştır. Bu tasarımda önceki çalışmalardan farklı olarak [5,6, 15-17], Şekil 1'de görüldüğü gibi sadece yakıt çubuğu içine TRISO yakıt yerleştirilmiş olup diğer tüm bileşenler aynı tutulmuştur. İlk duvarda (1.3 cm kalınlığında) SS-304 yapı malzemesi kullanılmıştır. İlk duvarın hemen arkasındaki 12,5 cm kalınlığındaki yakıt bölgesinde ise, TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtı, yakıt zırlıklı olarak ilk duvarda kullanılan yapı malzemesinin aynı ve soğutucu olarak doğal lityum, flibe, flinabe ve Li₂₀Sn₈₀ seçilmiştir. Soğutucu hacminin yakıt hacmine oranı, $V_m/V_f = 2$ olarak alınmıştır. Yakıt bölgesine silindirik yakıt çubukları 10 sıra halinde ve hegzagonal olarak yerleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtının geliştirilmesi, fisyon reaktörlerinde kullanılmak üzere

yeniden kaliteli fisil yakıt elde edilmesi ve fisyon reaktörü için gerekli pahalı yakıt zenginleştirme işlemi ortadan kaldırmanın mümkün olup olmadığının araştırılmasıdır. Nötronik hesaplamalar, SCALES/XSDRNPM [24] kod sistemi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 1. Hesaplamalarda kullanılan manto yapısı (Ölçüler cm verilmiştir) [25]

3. NÜMERİK SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (NUMERICAL ANALYSIS)

Bu çalışmada; D-T kaynaklı bir fisyon füzyon reaktöründe, TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtının trityum üretimi, enerji çoğaltımı, fisil yakıt üretimi, yanma etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

3.1. Trityum Üretimi (TBR) (Tritium Breeding Ratio)

Kendi kendine yeterli bir füzyon reaktörü için toplam trityum üretiminin $TBR > 1.05$ olması gereklidir [1-5]. Çizelge 1'de ⁶Li'den elde edilen trityum değeri (T₆) ile ⁷Li'den elde edilen trityum değerinin (T₇) ve mantodaki toplam TBR değerleri reaktör çalışma başlangıcı ve 24 aylık bitiş süresi için hesaplanmıştır. T₆ düşük enerjili nötronlarla reaksiyon yaparak trityum üretiminde en büyük katkıya sahip olduğu her bir parametre için Çizelge 1'de görülmektedir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi elde edilen sayısal sonuçlar farklı nötron duvar yükleri ve farklı soğutucular için elde edilmiştir. Bütün bu nötron duvar yükleri ve soğutucular için Çizelge 1 incelendiğinde TBR değeri başlangıçta doğal lityum ve flibe soğutucu için 1.05'den büyüktür ve çalışma süresince artarak devam etmektedir. Flinabe ve Li₂₀Sn₈₀ soğutucuları ancak 5'inci aydan itibaren 1.05 değerini geçmekte ve 24 aylık periyot boyunca 1.05 değerinin üzerinde seyretmektedir.

Çizelge 1. Farklı soğutucu ve nötron duvar yükleri için trityum üretimi
(a:işlem başlangıcı; b: 24 ay sonra)[25]

Nötron Duvar Yükü	2 MW/m ²			
	Lityum	Flibe	Flinabe	Li ₂₀ Sn ₈₀
T ₆	0.99937 ^{a)}	0.95729	0.90866	0.88326
	1.00846 ^{b)}	0.97982	0.94029	0.89923
T ₇	0.26814	0.14289	0.11349	0.08100
	0.26882	0.14348	0.11407	0.08130
TBR (T ₆ + T ₇)	1.26750	1.10343	1.02505	0.96426
	1.27728	1.12655	1.05725	0.98053
Nötron Duvar Yükü	6 MW/m ²			
	Lityum	Flibe	Flinabe	Li ₂₀ Sn ₈₀
T ₆	0.99937	0.95729	0.90866	0.88326
	1.02309	1.01132	0.97962	0.92331
T ₇	0.26814	0.14289	0.11349	0.08100
	0.27004	0.14445	0.11502	0.08183
TBR (T ₆ + T ₇)	1.26750	1.10343	1.02505	0.96426
	1.29313	1.15903	1.09754	1.00514
Nötron Duvar Yükü	10 MW/m ²			
	Lityum	Flibe	Flinabe	Li ₂₀ Sn ₈₀
T ₆	0.99937	0.95729	0.90866	0.88326
	1.03363	1.03168	1.00241	0.94021
T ₇	0.26814	0.14289	0.11349	0.08100
	0.27124	0.14536	0.11590	0.08233
TBR (T ₆ + T ₇)	1.26750	1.10343	1.02505	0.96426
	1.30487	1.18031	1.12122	1.02254

3.2. Enerji Çoğaltım Faktörü (M) (Energy Multiplication Factor)

Enerji çoğaltım faktörü (M), mantoda açığa çıkan enerjinin füzyon nötron enerjisine oranıdır. M değeri, mantodaki nükleer yakıtın fisyon değerleri ile direkt olarak ilişkilidir. M değerinin yüksek elde edilebilmesi ve TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtından nötronik performansının artırılması için, yakıt bölgesi füzyon nötron kaynağına mümkün olduğunca yakın olacak şekilde yerleştirilmeli ve yakıt kompozisyonundaki fisil yakıt oranının yüksek olmasına özen gösterilmelidir. Farklı nötron duvar yükleri ve soğutucular için elde edilen M değerinin çalışma süresine göre değişimi Çizelge 2’de verilmiştir. M değeri incelenen tüm modeller için çalışma süresince artarak devam etmektedir. Başlangıçta farklı nötron duvar yükleri için soğutucular arasında en yüksek M değerini, Çizelge 2’de görüldüğü gibi, doğal lityum soğutucu sağlarken, en düşük M değeri Li₂₀Sn₈₀ soğutucu kullanılan modelde elde edilmiştir. İşlem sonunda ise, en yüksek M değerini Flinabe sağlarken, en düşük M değerine doğa lityumda ulaşılmıştır. 24 aylık işlem periyodu sonunda, en düşük M değerinin doğal lityum içeren modelde elde edilmesi, işlem zamanına bağlı olarak daha düşük oranda fisyon gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Flinabe soğutuculu modelde ise en yüksek M değerine sahip olmasının temel nedeni, nötron yutma tesir kesitinin diğer soğutuculara orana daha düşük olması ve bir sonraki bölümde de görülebileceği gibi daha fazla fisyon açığa çıkarmasıdır. Farklı modeller için elde edilen bu M değerleri doğrudan yakıt bölgesinde oluşan

fisyon reaksiyon oranına bağlı olduğu için farklı değişimler gözlenmektedir.

Çizelge 2. Farklı soğutucu ve nötron duvar yükleri için enerji çoğaltımı

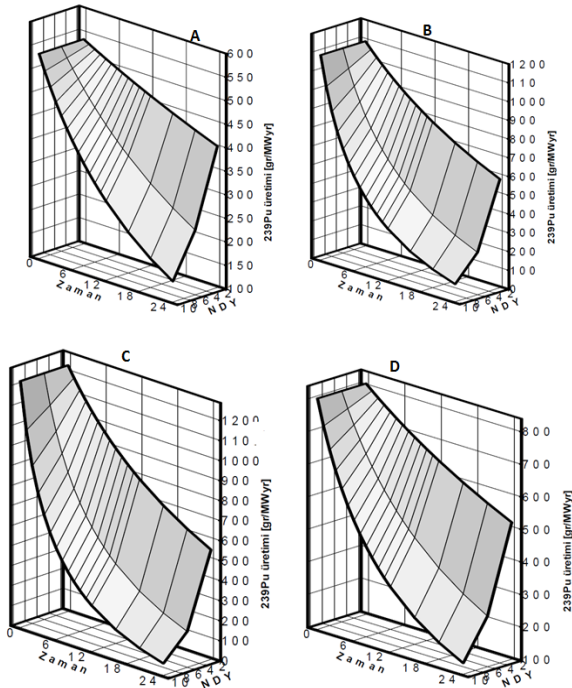
(a:işlem başlangıcı; b: 24 ay sonra) [25]

Nötron Duvar Yükü	2 MW/m ²	6 MW/m ²	10 MW/m ²
Lityum	2.04241 ^{a)}	2.04241	2.04241
	2.14299 ^{b)}	2.30539	2.42355
Flibe	1.96679	1.96679	1.96679
	2.24561	2.62288	2.85110
Flinabe	1.98195	1.98195	1.98195
	2.37269	2.84488	3.10319
Li ₂₀ Sn ₈₀	1.95400	1.95400	1.95400
	2.13056	2.39728	2.57668

3.3. Fisil Yakıt Üretimi (Fissile Fuel Breeding)

Öte yandan, Şekil 2’de 3 boyutlu olarak farklı soğutuculu yapıya sahip manto geometrisi için ²³⁹Pu fisil yakıt üretim miktarı (gr/MWyr) cinsinden gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi her bir soğutucu için nötron duvar yükü için ²³⁹Pu fisil yakıt miktarı (gr/MWyr) artmakta ve zamana bağlı olarak logaritmik azalmaktadır. Şekil 2’den de görüldüğü gibi 2-6-10 MW/m² nötron duvar yükleri için doğal lityum, flibe, flinabe ve Li₂₀Sn₈₀ soğutucular için elde edilen kaliteli nükleer yakıt ²³⁹Pu miktarı (gr/MWyr) çalışma periyodu başlangıcında sırasıyla 535, 1092, 1229 ve 805 olarak elde edilmiştir. İşlem zamanı başlangıcında en

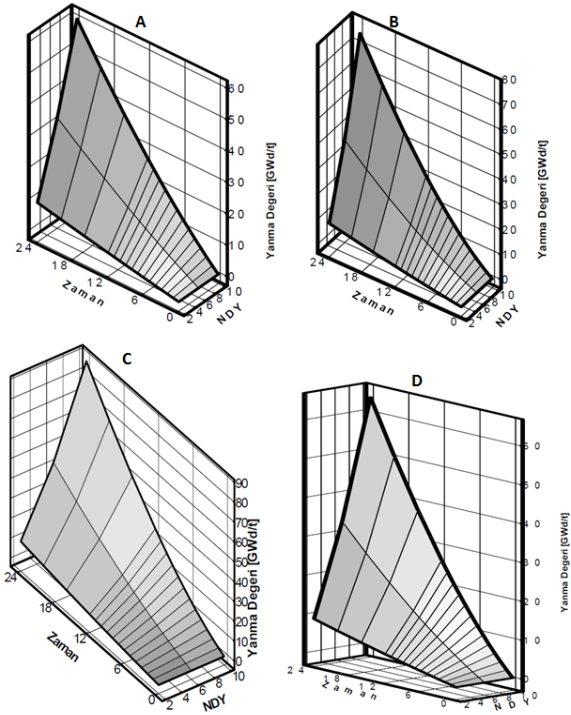
yüksek ^{239}Pu fisil yakıt miktarı (gr/MWyr) flinabe soğutuculu modelde elde edilmiştir. Öte yandan, 24 aylık çalışma süresi sonunda 10 MW/m^2 nötron duvar yükü için ^{239}Pu fisil yakıt miktarı (gr/MWyr) doğal lityum, flibe, flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucular için sırasıyla 143, 93, 58 ve 130 (gr/MWyr) olarak elde edilirken, 2 MW/m^2 nötron duvar yükü için ^{239}Pu fisil yakıt miktarı 400, 579, 547 ve 517 (gr/MWyr) elde edilmiştir.



Şekil 2. Mantoda MWth başına fisyon enerjisinde üretilen net ^{239}Pu üretiminin çalışma süresinin zamanla değişimi a) Doğal lityum soğutucu b) Flibe c) Flinabe soğutucu d) $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu [25]

3.4. Yakıt Yanma Derecesi (Fuel Burnup Value)

TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtının yanma oranları Şekil 3'de 3 boyutlu olarak GWgün/ton cinsinden gösterilmiştir. Şekil 3'de görüldüğü gibi her bir soğutucu manto geometrisi için nötron duvar yüküne bağlı olarak yanma oranı zamana bağlı olarak logaritmik olarak artmaktadır. $2\text{-}6\text{-}10 \text{ MW/m}^2$ nötron duvar yükleri için doğal lityum, flibe, flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu manto geometrileri için yanma oranları, 24 aylık çalışma periyodu sonunda sırasıyla 59, 74, 87 ve 63 GWgün/ton olarak elde edilirken, 6 MW/m^2 nötron duvar yükleri için doğal lityum, flibe, flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu manto geometrileri için yanma oranları, 24 aylık çalışma periyodu sonunda sırasıyla 32, 37, 43 ve 33 GWgün/ton olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, 24 aylık çalışma süresi sonunda 2 MW/m^2 nötron duvar yükleri için doğal lityum, flibe, flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu manto geometrileri için yanma oranları 9.5, 9.6, 10.7 ve 9 GWgün/ton olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Mantoda fisil yakıt yanma oranının zamanla artışı a) Doğal lityum soğutucu b) Flibe c) Flinabe soğutucu d) $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu [25]

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (RESULT AND SUGGESTION)

Bu çalışmada bir füzyon-fisyon reaktörünün-nötronik hesaplamalarında TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtının reaktör performansı üzerine etkileri incelenmiş, farklı nötron duvar yükleri ile soğutucular kullanılması durumunda yakıt elemanı üzerindeki etkileri hesaplamalarla ortaya konmuştur. TBR değerinin başlangıçta doğal lityum ve flibe soğutucu için 1.05'den büyük olduğu ve çalışma süresince artarak devam ettiği görülmüştür. Flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucularının ancak 5'inci aydan itibaren 1.05 değerini geçtiği ve 24 aylık dönem boyunca 1.05 değerinin üzerinde seyrettiği anlaşılmıştır. En yüksek M değerini doğal lityum soğutucu sağlarken, en düşük M değeri $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucu kullanılan modelde elde edilmiştir. İşlem sonunda ise, en yüksek M değerini Flinabe sağlarken, en düşük M değerinenatural lityumda ulaşılmıştır. 10 MW/m^2 nötron duvar yükü için doğal lityum, flibe, flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu manto geometrileri için yanma oranları, 24 aylık çalışma periyodu sonunda sırasıyla 59, 74, 87 ve 63 GWgün/ton olarak elde edilirken, 2 MW/m^2 nötron duvar yükleri için doğal lityum, flibe, flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutuculu manto geometrileri için yanma oranları 9.5, 9.6, 10.7 ve 9 GWgün/ton olarak elde edilmiştir. İşlem zamanı başlangıcında en yüksek ^{239}Pu fisil yakıt miktarı (gr/MWyr) flinabe soğutuculu modelde elde edilmiştir. Öte yandan, 24 aylık çalışma süresi sonunda 10 MW/m^2 nötron duvar yükü için ^{239}Pu fisil yakıt miktarı (gr/MWyr) doğal lityum, flibe, flinabe ve $\text{Li}_{20}\text{Sn}_{80}$ soğutucular için sırasıyla 143, 93, 58 ve 130 (gr/MWyr)

olarak elde edilirken, 2 MW/m² nötron duvar yükü için ²³⁹Pu fisil yakıt miktarı 400, 579, 547 ve 517 (gr/MWyr) elde edilmiştir. Sonuç olarak füzyon sürücülü Füzyon-Fisyon (hibrid) mantolar nükleer güvenlik özellikleri ile beraber nükleer yakıt üretimi için tasarlanması uygundur. Böylece hibrid mantoda TRISO kaplamalı CANDU harcanmış yakıtları kullanılarak elde edilen zenginleştirilmiş yakıt performansı ve yanma oranları daha önce yapılan çalışmalara göre [15-17] daha iyi performans sergilemiş olup, elde edilen zengin yakıt direkt olarak LWR 'lerde kullanılabilir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Moir, R.W., "The fusion breeder, submitted to the National Science Foundation Policy workshop", Washington DC, March 4-5, *Lawrence Livermore Laboratory*, CA, UCRL-87290 (1982).
- Berwald, D.H., "Fission suppressed hybrid reactor fusion breeder," *Lawrence Livermore National Laboratory*, UCID-19327 (1982).
- Greenspan, E., "Fusion-fission hybrid reactors, Advances in Science and Technology", *Plenum Press*, 16: 289-295 (1984).
- Şahin, S., Al-Kusayer, T., "244Cm as multiplier and breeder in a ThO₂ hybrid blanket driven by a (Deuterium-Tritium) source", *Fusion Technology*, 10:1297-1302 (1986).
- Şahin S., Al-Kusayer, T., Al-Samair, M., Raof, M. A., "Neutronic investigations of experimental AYMAN hybrid blankets", *Transactions of the American Nuclear Society 1984 International Conference*, 47:151-156 (1984).
- Şahin S., Al-Kusayer, T., Raof, M. A., "Preliminary design studies of a cylindrical experimental hybrid blanket with Deuterium-Tritium driver", *Fusion Technology*, 10:84-99 (1986).
- Şahin, S., "Power flattening in a catalyzed (D,D) fusion driven hybrid blanket using nuclear waste actinides", *Nuclear Technology*, 92: 93-105 (1990).
- Şahin, S., Yapıcı, H., Baltacıoğlu, E., "Regeneration of LWR spent fuel in hybrid reactors," *Kerntechnik*, 59: 270-277 (1994).
- 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: 799-815 (2002).
- Şahin, S., Yapıcı, H., Bayrak, M., "Spent mixed oxide fuel rejuvenation in fusion breeders", *Fusion Engineering and Design*, 47: 9-23 (1999).
- Şahin S., Yapıcı, H., "Rejuvenation of light water reactor spent fuel in fusion blankets", *Annals of Nuclear Energy*, 25:1317-1339 (1998).
- Şahin S., Yapıcı, H., "Neutronic analysis of a Thorium fusion breeder with enhanced protection against nuclear weapon proliferation", *Annals of Nuclear Energy*, 26:13-27 (1999).
- S. Şahin, M. Übeyli, "LWR spent fuel transmutation in a high power density fusion reactor", *Annals of Nuclear Energy* 31 (8):871-890 (2004).
- S.Ünal "Rejuvenation of LWR spent fuel in (D,T) driven hybrids reactors", *Fusion Engineering and Design*, 38:393-416 (1998).
- Şahin, S., Baltacıoğlu, E., Yapıcı, H., "Potential of a catalyzed fusion driven hybrid reactor for the regeneration of CANDU spent fuel," *Fusion Technology*, 20:26-39 1991
- Ünal S., "Rejuvenation of CANDU Spent Fuel in (D,T) Driven Hybrids Reactors", *Fusion Technology*, 33(4):398-417, 1998.
- Übeyli, M., Neutronic performance of new coolants in a fusion-fission (hybrid) reactor, *Fusion Engineering and Design*, 70(4):319-328 (2004).
- Übeyli, M., Acır A., "Utilization of Thorium in a high power density hybrid reactor with innovative coolants" *Energy Conversion and Management*, 48(2):576-582 (2007).
- Übeyli, M., Acır A., "Incineration of weapon grade plutonium in a (DT) fusion driven hybrid reactor using various coolants" *Kerntechnik*, 72(1-2): 27-32 (2007).
- Acır A., Übeyli, M., "Burning of reactor grade plutonium mixed with thorium in a hybrid reactor" *Journal of Fusion Energy*, 26(3):293-298 (2007).
- Acır A., "Impact of resonance treatment on minor actinide incineration in a D-T Thorium fusion concept" *Journal of Fusion Energy*; 28(4):364-370 (2009).
- Şahin HM, Acır A, Altınok T, Yalçın S., "Monte Carlo calculation for various enrichment lithium coolant using different data libraries in a hybrid reactor" *Energy Conversion and Management*, 49(7):1960-1965 (2008).
- Şahin, H.M., "Monte Carlo calculation of radiation damage in first wall of an experimental hybrid reactor", *Ann. Nucl. Energy* 34:861-870 (2007).
- Petrie L. M., "SCALE/XSDRNPM system driver", NUREG/CR-0200, Revision 5, 3, Section M1, ORNL/NUREG/CSD-2/R5, *Oak Ridge National Laboratory*, 1-10 (2000).
- Taşkolu, H., Bir füzyon-fisyon reaktöründe TRISO kaplamalı CANDU nükleer yakıt atıklarının nötronik analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, (Danışman: Doç. Dr. Adem Acır), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ocak 2010, Ankara.