

UC, UC₂ ve U₂C₃ YAKITLARININ FÜZYON NÖTRON KAYNAKLI BİR HİBRİD REAKTÖRDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Hacı Mehmet ŞAHİN^a Kadir YILDIZ^a Taner ALTINOK^b

^aGazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Beşevler, Ankara

^bKara Kuvvetleri Komutanlığı, Anıttepe, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada (D,T) füzyon nötron kaynaklı ve yakıt olarak UC, UC₂ ve U₂C₃ kullanılan bir hibrid mantonun 48 aylık reaktör çalışma süresince fisil yakıt üretimi açısından nötronik performansı araştırılmıştır. Reaktör yakıt bölgesinde soğutucu olarak ötektoid lityum kullanılmıştır. Çalışmada ilk duvar füzyon nötron akısı 5 MW/m² ve tesis faktörü % 75 dir. Tüm yakıt modellerinde homojen güç için manto enerji çoğaltım faktörü (M), trityum üretimi (TBR), kümülatif fisil yakıt zenginleşmesi (CFFE), yanma oranı (BU), yakıt gençleştirme kabiliyeti (FOM) ve ısı ayrılması hesaplamaları yapılmıştır. Hibrid mantoda yakıt tipine bağlı olarak % 3-4 'lük zenginleştirme durumuna, yakıt çubuklarının UC₂ ihtiva ettiği durumda 18 ve 30, UC ve U₂C₃ yakıtlarda 20 ve 30 aylık çalışma süresinde ulaşıldı. En iyi trityum üretim oranı UC yakıtlı modelde elde edildi, bunu sırayla U₂C₃ ve UC₂ yakıtlar takip etmektedir.

Anahtar Kelimeler : Yakıt zenginleştirme, hibrid manto , LWR

EVALUATION OF UC, UC₂ ve U₂C₃ FUELS IN A HYBRID REACTOR WITH FUSION NEUTRON SOURCE

ABSTRACT

In this study from the point of fissile fuel breeding neutronic performance is investigated in a hybrid manto with fusion neutron source using UC, UC₂ and U₂C₃ as fuels during 48 month reactor operation time. Eutectic lithium was used as coolant in the reactors fuel zone. A first-wall fusion neutron current load 5 MW/m² and plant factor 75 % . For all fuel models neutronic calculations were done for cumulative fissile fuel enrichment (CFFE), energy multiplication factor (M), tritium breeding ratio (TBR), fuel burn-up , fuel regeneration ability (FOM) and heat release. At the end of operation time, according fuel the enrichments of the 3-4 % were achieved for operation time of 18 and 30 month in case of fuel rods containing UC₂, respectively and for operation time of the 20 and 30 month in case of fuel rods containing UC and U₂C₃. The best tritium breeding ratio is obtained in UC, and followed by U₂C₃ and UC₂.

Keywords : Fuel Enrichment, Hybrid Manto, LWR

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya enerji üretimi ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Sanayi ülkelerinde uygulanan enerji ekonomisi stratejileri bu artışı nisbeten kontrollü kılmakta ise de gelişmekte olan ülkelerin çoğunda çağdaş teknolojiyi yakalama ve bu teknolojinin sağladığı hayat standardına erişme çapaları, enerji ihtiyacını hızla arttırmaktadır. Klasik kaynakları bir kenara bırakırsak, yeni kaynaklar arasında en çok üzerinde durulan enerji kaynağı nükleer enerjidir.

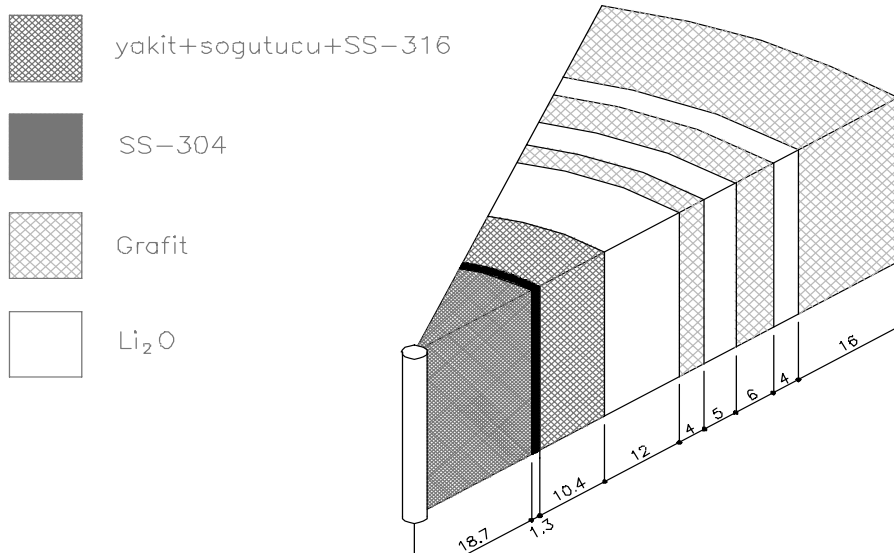
Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) tarafından Kasım 2001 tarihli en son verilere göre; Dünyadaki elektrik üretiminin %16'si faal olarak çalışmakta olan 438 adet nükleer santraldan sağlanmaktadır. Dünya nükleer santrallardan vazgeçmemiş olup, 14 ülkede, 35 adet nükleer santral da inşa halinde ve 32 adet

nükleer santral da inşaatı planlanmıştır. Nükleer santrallara sahip olan ülkeler elektrik enerjisi programlarını yaparken nükleer santrallara yer vermektedirler. Nükleer santralların ortalama 30-40 yıllık ömürleri vardır.

Füzyon-fisyon (hibrid) manto genel olarak füzyon ve fisyon proseslerinin birleştirilmiş halidir. Hibrid balanket fikri füzyon plazmasının etrafını ²³⁸U veya ²³²Th (fertil yakıtlar) ile sararak onları füzyon nötronları sayesinde fisil yakıtlar olan ²³⁹Pu veya ²³³U'a ile dönüştürme olayıdır. Fertil yakıtlar yüksek enerjili 14.1 MeV (D,T) füzyon nötronları altında fisyon yapabilirler. Hibrid reaktörü ise düşük enerjili de olsa en azından fisyon reaktörlerine yakıt temin edebilecek şekilde ticari olarak kurulabilirler. Hibrid reaktörün başka bir avantajı yüksek bir verimle aktinitlerle yakılmasıdır. Aktinitler (radyoaktif atık malzeme) LWR 'lerde önemli miktarda atık malzeme olarak çıkmaktadır. Yüksek enerjili füzyon nötronları bu aktinitleri yakılabilir veya yüksek kalitede fisil yakıtla dönüştürebilir. Hızlı reaktör için başlangıçta plutonyum malzemesine ihtiyaç vardır. Halbuki hibrid reaktöründe tabii veya harcanmış uranyum ve toryum kullanılabilir. Bir hibrid reaktörün diğer avantajı kullanılmış yakıtı gençleştirir. Hibrid mantoda yakıt bölgesinde seramik yakıtlar, füzyon nötronlarının ışımasını altında ²³⁸U 'de hızlı fisyon prosesleri boyunca enerji üretmeye devam eder. Aynı zamanda plutonyum izotoplarının üretilmeside devam eder. Böylece belirli bir ışıma periyodundan sonra fisil yakıt, LWR için taze bir yakıt olacak şekilde zenginleştirilir. Malzeme tahrip oluncaya kadar bu çevrimler tekrar edilebilir. Daha önceki çalışmalarda, hibrid reaktörlerde kullanılmış yakıtların gençleştirilmesi üzerine araştırmalar yapılmıştır [2-4].

2. MANTO GEOMETRİSİ

Bu çalışmada füzyon reaktörleri ve klasik fisyon reaktörlerinin birleştirildiği hibrid reaktör modeli incelenmiştir. Yani fisyon reaktörlerinin hacim merkezine füzyon reaktörünün yerleştirildiği kabul edilecektir. Bu suretle füzyondan çıkan nötronlar yeni fisyon reaksiyonlarında değerlendirilecektir. Çalışmada nötronik analiz yapıldığı füzyon-fisyon hibrid manto şekil 1 'de verilmiştir. Araştırılan manto yapısı esas itibariyle dört ana bölgeden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla (D,T) füzyonunun olduğu plazmayı çevreleyen ilk duvar, yakıt bölgesi, trityum üretim ve reflektör bölgesidir. Trityum üretim bölgesi ve reflektör bölgesi yakıt bölgesinden sonra üç sıra halindedir.



Şekil 1 Çalışmada kullanılan hibrid manto

Tablo 1'de çalışmada kullanılan uranyum bileşiklerinin bazı kimyasal karakteristikleri, tablo 2'de hibrid balankette bölgelerdeki malzeme kompozisyonu ve geometrik boyutlarını ve tablo-3 'de nötronik analizde kullanılan araştırılan mantodaki farklı izotopların atomik yoğunlukları gösterilmektedir. Hibrid mantoda füzyon odası 1.3 cm. kalınlığında SS-304 çeliği ile çevrelenmiştir. SS-304 çeliği % 0.08 C, % 18-20 Cr ve % 8-11 Ni 'den oluşan krom-nikel bileşiğidir. Füzyon odasından sonra yakıt bölgesi gelmektedir. Yakıt bölgesi % 45.5 yakıt, % 45.5 soğutucu ve % 9 oranında yakıt zarfından oluşmaktadır. Yakıt olarak yüksek erime noktasına sahip uranyumun seramik bileşikleri seçilmiştir. Bu üç seramik yakıt sırasıyla UC, UC₂ ve U₂C₃ 'dir.

Tablo 1. Uranyum bileşiklerinin bazı kimyasal karakteristikleri

Uranyum Bileşiği	Yoğunluk (gr/cm ³)	Erime noktası (°C)
UC	13.63	2350
UC ₂	11.68	2475
U ₂ C ₃	12.88	1775

Hibrid reaktörde yakıt bölgesinde hegzagonal yapıda dizilmiş yakıt çubukları kullanılmaktadır. Hekzagonal geometride olan yakıt, dış çapı 0.425 cm ve kalınlığı 0.04 cm olan SS-304 çelik malzeme ile kaplıdır. Reaktörlere bu şekilde yerleştirilen yakıt bölgesinin kalınlığı 10-20 cm arasındadır [10]. Bu çalışma için yakıt bölgesi 10.4 cm seçilmiştir. Yakıt çubuklarının içine konulduğu zarf malzemesi ısı geçişine engel olmayacak şekilde ince yapılmıştır.

Tablo 2. Hibrid balankette bölgelerdeki malzeme kompozisyonu ve uzunlukları

Bölge	Malzeme	Ölçüler (cm)
Boşluk	Hava	0.0 - 18.7
Birinci bölge	SS-304	18.7 - 20.0
Yakıt	Yakıt + Soğutucu + SS-304	20.0 - 30.4
Trityum Üretimi	Li ₂ O	30.4 - 42.4
Reflektör	Grafit	42.4 - 46.4
Trityum Üretimi	Li ₂ O	46.4 - 51.4
Reflektör	Grafit	51.4 - 57.4
Trityum Üretimi	Li ₂ O	57.4 - 61.4
Reflektör	Grafit	61.4 - 77.4

Tablo 3. Nötronik analizde kullanılan malzemelerin yoğunluk değerleri

Bölge	Malzeme	İçerdiği İzotoplar	Atomik yoğunluk*10 ²⁴ (Atom/cm ³)
İlk Duvar	SS-304	C	7.87300*10 ⁻⁴
		Si	6.73400*10 ⁻⁴
		Cr	1.72800*10 ⁻²
		Fe	5.92600*10 ⁻²
		Ni	8.05500*10 ⁻³
Yakıt Bölgesi	UC	²³⁵ U	9.95227*10 ⁻⁵
		²³⁸ U	1.41175*10 ⁻²
		C	1.42170*10 ⁻²
	UC ₂	²³⁵ U	8.42255*10 ⁻⁵
		²³⁸ U	1.17113*10 ⁻²
		C	2.35926*10 ⁻²
	U ₂ C ₃	²³⁵ U	9.64903*10 ⁻⁵
		²³⁸ U	1.36850*10 ⁻²
		C	2.06764*10 ⁻³
	Ötektoid Lityum Li ₁₇ Pb ₈₃	⁶ Li	1.90196*10 ⁻⁴
⁷ Li		2.33901*10 ⁻³	
Pb		1.23484*10 ⁻²	
SS-304	Yukarı ile aynı	Yukarı ile aynı	
Trityum Üretimi	Li ₂ O+Al	⁶ Li	4.63800*10 ⁻³
		⁷ Li	5.70400*10 ⁻²
		O	3.08400*10 ⁻²
		Al	3.01400*10 ⁻³
Reflektör	C	C	1.28000*10 ⁻¹

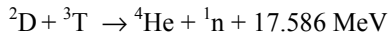
Manto geometrisinde (D,T) füzyon nötron kaynağından gelen 14.1 MeV 'lik nötronların daha iyi etkileşimi için yakıt bölgesi kendi arasında 10 ayrı yakıt bölgesine ayrılmıştır. Kaynak yönüne göre her yakıt çubuğundaki dönüşüm birbirine göre farklı olmaktadır. Bu şekilde alt bölgelere ayırarak yapılan çalışma ile her yakıt çubuğundaki atomik yoğunlukların değişimini, fisil ve fertil izotopların üretim ve tüketimini takip etmek mümkün olmaktadır. Nötronik analizde yakıt bölgesinin soğutulması için flibe, tabii lityum ve gaz soğutucu kullanılmıştır. Yakıt bölgesinden sonra radyal yönde reflektör olarak sandviç yapıda Li₂O ve grafit kullanılmıştır. Grafit kaçakları önleyerek nötron ekonomisi sağlar. Aynı zamanda karbon yerleştirilmesiyle nötron enerjisinin çarpışma yoluyla düşürülmesi sağlanmıştır.

3. NÜMERİK SONUÇLAR

3.1. HESAPLAMA YÖNTEMİ

Nötronik analizin önemli noktalarından birisi, ortam içindeki nötron akı dağılımının tesbit edilmesidir. Akı dağılımının özellikle bilinmesinin nedeni açığa çıkan enerjinin ve trityum üretimi gibi reaksiyon ürünlerinin nötronların başlattığı çekirdek reaksiyonlarından meydana gelmesidir. Bu oluşumlar nötron enerjisinin fonksiyonu olduğundan, nötron akı dağılımının nötron enerjisine bağlı olarak da ifade edilmesi gereklidir. Nötron akı dağılımını etkileyen faktörler, nötron ve çekirdek arasındaki reaksiyonlar, ortam malzemesinin atomik yoğunluğu ve ortam geometrisidir. Nötronlarla malzeme arasındaki reaksiyonlar tesir kesitleri yardımıyla matematiksel olarak ifade edilebilir. Tesir kesit değerleri ortam atomlarının geometrik kesitinden farklı olup, nötron ile atom arasındaki reaksiyon ihtimalini ve reaksiyon türünü ifade eder. Ortam malzemesinin yapısı ve geometrisinin nötron akı dağılımına etkisi, tesir kesitleri yardımıyla diffüzyon teorisi kullanılarak hassas olarak Boltzman Transport denklemi ile ifade edilebilir.

Boltzman Transport Denklemi'nin nümerik çözümü için ANISN nötron transport kodu seçilmiştir. Bu kod tek boyutlu hesaplamalar için idealdir. Nötronik analiz ANISN nötron transport denklemi kullanılarak S₈P₃ yaklaşımı ile yapılmıştır [8]. Malzeme-nötron ilişkisini nötron enerjisine bağlı olarak veren kütüphane olarak CLAW-IV tesir kesitleri kullanılmıştır [9]. Bu data grubu Los Alamos National Laboratory tarafından yayınlanmıştır. Bu kütüphanede tesir kesitleri nötron enerjisi 30 gruba ayrılarak belirlenmiştir. Bu enerjilerin 12 tanesi MeV, 9 tanesi KeV ve 9 tanesi ise eV mertebesindedir. Bu gruplar fisyon, füzyon, 1/E ve termal bölgeye göre düzenlenmiştir. Ortam 300 °K den daha yüksek sıcaklığa sahiptir. Bunun yanında hareket etmedikleri için Doppler etki ihmal edilmiştir. Araştırılan mantoda birinci duvar nötron yükü 5 MW/m² ve tesis faktörü % 75 olarak alınmıştır. Araştırılan mantoda füzyon nötron kaynağı olarak döteryum-trityum (D,T) füzyon nötron kaynağı seçilmiştir. Trityum döteryum ile reaksiyona girerek yüksek enerji çıktısı meydana getirilebilir. (D,T) reaksiyonunda gelen parçacıklar ihmal edilebilir küçüklükte kinetik enerjilere sahiptirler. ⁴He ve nötron lineer momentum korunumu ile 17.586 MeV 'u paylaşırlar ve bu reaksiyon sonucunda 14.1 MeV 'lik, tek enerjili bir nötron açığa çıkar. (D,T) reaksiyonu aşağıdaki şekilde meydana gelmektedir.



Yakıt bölgesinde 3 farklı modelde nötronik analiz yapılmıştır.

- 1- (D,T) füzyon nötron kaynaklı hibrid mantoda UC yakıt ile ötektoid lityum
- 2- (D,T) füzyon nötron kaynaklı hibrid mantoda UC₂ yakıt ile ötektoid lityum
- 3- (D,T) füzyon nötron kaynaklı hibrid mantoda U₂C₃ yakıt ile ötektoid lityum

3.2. MANTO PERFORMANSI

Tablo 4, 48 aylık operasyon süresince UC, UC₂ ve U₂C₃ yakıtlı mantolarda nötronik dataların değerini vermektedir. Tabloda “T6” ⁶Li 'dan trityum üretimini, “T7” ⁷Li 'den trityum üretimini, “TBR” toplam trityum üretimini, “²³⁸U (n,γ)” ²³⁹Pu üretim miktarını, “ $\nu\Sigma_f$ ” Fisyon nötronları üretimini, “T” yakıt bölgesindeki ortalama fisyon güç yoğunluğunu “ Σ_f ” Toplam fisyon miktarı, “M” manto enerji çoğalım faktörünü ve “L” ise mantodaki radyal yöndeki nötron kaçaklarını göstermektedir 48 aylık periyot süresince nötronik verilerdeki değişim lineer olarak arttığı için tabloda sadece 0, 24, 36 ve 48. aylardaki nötronik verilere yer verilmiştir.

Trityum üretimi her üç yakıt modeli içinde reaktör operasyon süresince artmaktadır. Operasyon süresince ⁶Li'dan üretilen trityum ⁷Li'da üretilen miktardan oldukça yüksektir. Yeterli trityum üretimi, kendi füzyon nötron kaynakları için yeterli trityum oranı TBR>1.05 sağlaması önemlidir. Trityum üretimi her üç

yakıt içinde reaktör operasyon süresince artmaktadır. Çalışmada trityum üretimi incelendiğinde UC yakıtlı mantoda trityum üretimi 48 ay sonunda 1.6064 olarak en yüksek değerdedir. Bunu 1.5547 ile U_2C_3 yakıt ve 1.4916 ile UC_2 yakıt takip etmiştir. Trityum üretimi açısından ötektoid soğutuculu ortamda UC yakıt en iyi performansı göstermiştir. Tüm yakıt modellerinde üretilen trityum miktarı operasyon süresince >1.05 olmaktadır. Bundan dolayı tüm modeller kendi füzyon üreticileri için yeterli trityum sağlayabilir. Tesis çalışma zamanının artması, mantodaki fisil yakıtın birikmesinden dolayı nötron populasyonunun artmasına sebep olur ve 6Li izotopundaki trityum üretimi hemen hemen lineer olarak artmaktadır. Çalışma süresi boyunca TBR, kullanılmış yakıt gençleştirilmesi boyunca yüksek nötron çoğalma oranı bakımından düzgün olarak artmaktadır. ${}^{238}U$ (n,γ) termal nötronlarla parçalanamayan ${}^{238}U$ izotopunun hibrid reaktörde ortaya çıkan yüksek enerjili nötronlarla yaptığı reaksiyon miktarını göstermektedir. ${}^{238}U$ (n,γ), ${}^{238}U$ nötronun etkileşimi sonucu oluşan ${}^{239}Pu$ oranını göstermektedir. Her üç yakıtlı mantolarda da ${}^{238}U$ (n,γ) değeri operasyon sonuna doğru artmaktadır. ${}^{238}U$ (n,γ), U_2C_3 , UC ve UC_2 yakıt için sırasıyla 0.5712, 0.5543 ve 0.4965 değerine ulaşmaktadır.

Tablo 4. Araştırılan mantodaki nötronik datalar

Soğutucu Tipi	UC			
	0	24	36	48
Zaman (Ay)				
T_6	1.2397	1.3823	1.4524	1.5204
T_7	0.0818	0.0837	0.0849	0.0861
TBR	1.3215	1.4660	1.5373	1.6064
$\nu\Sigma_f$	0.6875	1.0049	1.1588	1.3065
Σ_f	0.2112	0.316	0.367	0.416
M	4.1521	5.5640	6.2514	6.9131
${}^{238}U$ (n,γ)	0.5281	0.5433	0.5494	0.5543
Γ	2.2047	1.9564	1.8671	1.7906
L	0.0845	0.0937	0.0983	0.1027
	UC_2			
T_6	1.1611	1.2870	1.3471	1.4046
T_7	0.0833	0.0851	0.086	0.087
TBR	1.2444	1.3720	1.4331	1.4916
$\nu\Sigma_f$	0.572	0.8479	0.9782	1.1020
Σ_f	0.1755	0.2664	0.3095	0.3505
M	3.6783	4.9059	5.4878	6.0415
${}^{238}U$ (n,γ)	0.4869	0.4931	0.4951	0.4965
Γ	2.2041	1.9541	1.8627	1.7854
L	0.0792	0.0871	0.091	0.0946
	U_2C_3			
T_6	1.1875	1.3318	1.4027	1.4715
T_7	0.079	0.0809	0.082	0.0832
TBR	1.2665	1.4128	1.4848	1.5547
$\nu\Sigma_f$	0.6576	0.9823	1.1399	1.2912
Σ_f	0.2022	0.3095	0.3617	0.412
M	4.0163	5.4620	6.1663	6.8444
${}^{238}U$ (n,γ)	0.5455	0.5601	0.5662	0.5712
Γ	2.2400	1.9885	1.8980	1.8202
L	0.0796	0.0887	0.0932	0.0977

Mantodaki toplam enerji üretimi, enerji çoğaltma faktörü M 'in yardımıyla ifade edilebilir. Hibrid mantonun en önemli fonksiyonlarından birisi manto enerji çoğaltımıdır. 48 aylık çalışma süresinin sonunda tesis çalışma süresince mantodaki fisil yakıtın birikmesi üzerinden fisyon olayının bir miktar artmasına sebep olur. Bu artış bir hibrid reaktörü için nisbeten düşük olarak gözönüne alınabilir. Zenginleştirme işlemi sırasında fisil izotopların miktarı ve atomik yoğunlukları artmaya başlar, bu ise mantonun nötronik performansını artırır. 48 aylık operasyon sonunda her üç soğutucu modelinde de enerji çoğaltımı artmıştır. Bu artış 48 ay sonunda U₂C₃ yakıt için % 70 mertebesinde iken UC₂ ve UC yakıt için gaz ve tabii lityum soğutucu için sırasıyla % 64 ve % 60 mertebesinde kalmıştır. Her fisyon reaksiyonunda 200 MeV 'luk açığa çıkan bir fisyon enerjisi mevcuttur. Nötron ısıtması yapı malzemelerinde meydana gelmekle birlikte bu durum asıl olarak trityum üretimi esnasında lityumda meydana gelir.

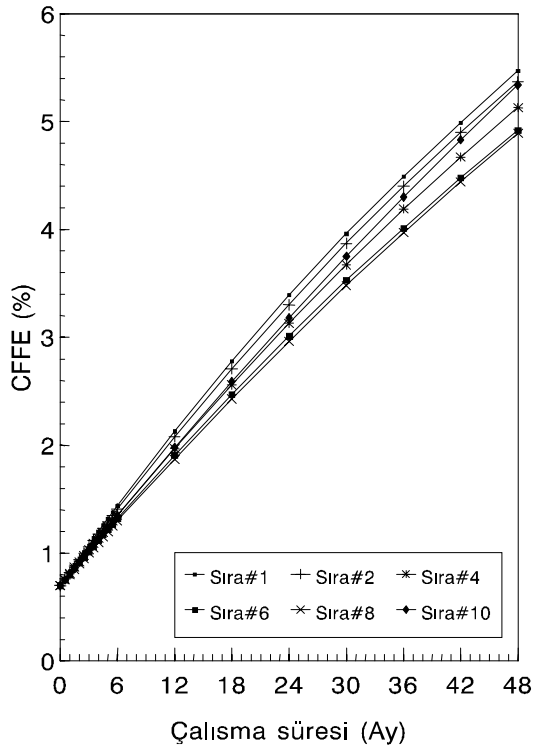
Fisyon enerji yoğunluğunun uzaysal benzersizliğinin zamanla değişimi "T" ile tanımlanır. Mantodaki fisyon nötronlarının yüksek oranından dolayı düzenli bir şekilde düşer. Bu durumda fisil bölgede daha düzenli güç üretimini sağlar, Bu mantodaki fisil yakıt bölgesinin üniformluğunu dikkate almak için bu önemli bir parametredir. Hibrid mantoda enerji çoğaltım faktörü M 48 aylık çalışma süresi içerisinde artarken aynı zamanda "T" biraz azalma olur. "T" değeri başlangıçta U₂C₃, UC ve UC₂ yakıtta 2.2400, 2.2047 ve 2.2041 değerinde iken 48 aylık operasyon sonucunda 1.8202, 1.7906 ve 1.7854 değerine düşmüştür. Bu değerler incelendiğinde fisyon güç yoğunluğu açısından U₂C₃ yakıtlı mantonun en iyi performans gösterdiği görülmektedir. Fisyon nötronları üretimi $v\Sigma_f$, mantodan elde edilmek istenen enerjiyi (M) doğrudan etkileyen faktördür. Yakıt içerisindeki fisil yakıt oranının artmasıyla da fisyon nötronları üretimi artmaktadır. Çalışma süresi başlangıcından çalışma süresi sonuna kadar en yüksek fisyon nötronları artışı gaz soğutuculu mantolarda gerçekleşmiştir. Çalışma süresince UC, U₂C₃ ve UC₂ yakıtlarındaki $v\Sigma_f$ değeri 1.3065, 1.2912 ve 1.1020 değerindedir. Mantodaki radyal nötron kaçağı hafifçe artmış ve bu da mantodaki nötron çoğaltımının artmasına sebep olmuştur. 48 aylık çalışma süresince maksimum nötron kaçağı UC₂, U₂C₃ ve UC yakıtta sırasıyla % 9.46, % 9.77 ve % 10.27 değerindedir. Trityum üretim bölgesi ve grafit reflektörünün sandviç katmanlı yapısı radyal yöndeki nötron kaçağını düşürmektedir.

3.3 FİSİL YAKIT ÜRETİMİ

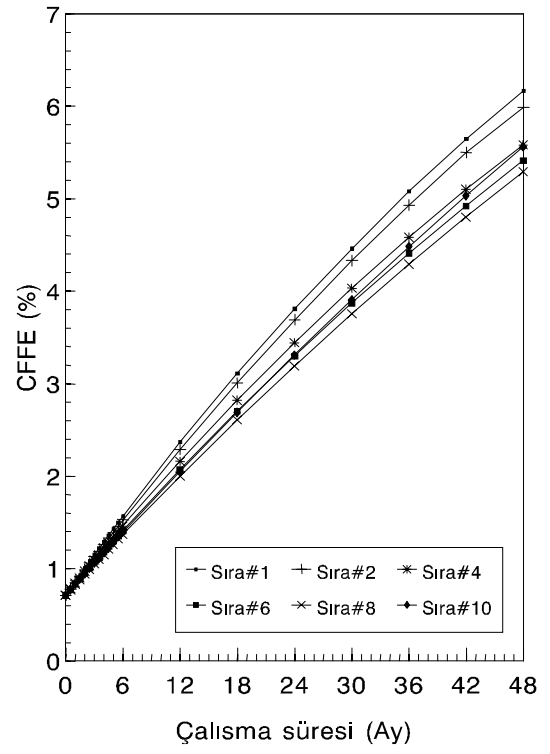
Nükleer Reaktör yakıtı esas itibari ile iki tür malzemedan oluşmaktadır. Bunlar fisil malzeme (²³³U, ²³⁵U, ²³⁹Pu) ve fertil malzeme (²³²Th ve ²³⁸U). Nötron bombardımanı altında fisil çekirdekler bölünürler enerji üretirler. Çalışan her nükleer reaktörün yakıtı içinde plutonyum kendiliğinden oluşur. Uranyumun nötronla etkileşimi sonucunda plutonyuma dönüşen izotopu ²³⁸U 'dır. Dönüşüm çok yavaş bir şekilde oluşur. Bu arada oluşan plutonyumun bir bölümüde yanar. Çünkü bu malzemenin kendisinde iyi bir fisyon yakıtıdır. Hatta reaktörde üretilen enerjinin üçte biri plutonyumdan gelir. Reaktöre konulan uranyum içinde ²³⁸U izotopu miktarını tamamen yetersiz düşünmek doğru değildir. Dolaylı yoldan yanmakta ve esas yakıt maddesi ²³⁵U izotopuna hiç de küçümsenmeyecek ölçüde katkıda bulunmaktadır. Aslında ²³⁸U izotopu doğrudan da yanabilmektedir. Hızlı nötronlarla çok düşük oranda fisyon yapabilmektedirler. Fakat enerjisinin sadece % 2 'sini oluşturan bu katkı genellikle ihmal edilir.

Reaktörlerde oluşan plutonyum yanan plutonyum miktarından biraz fazladır. Dolayısıyla yakıt içerisinde zamanla plutonyum birikir. Fisyon reaktörlerinde fisyon eşik enerjisi 0.8 MeV olduğu ve bu değer kritik reaktörlerde birçok füzyon nötron enerjisinden daha yüksek olduğu için ²³⁸U hibrid mantoda nükleer enerji üretimine katkıda bulunmaktadır. Hibrid mantoda tabii uranyumun ²³⁸U bileşeninde birincil ve ikincil füzyon nötronlarıyla ²³⁹Pu üretilmektedir. Reaktör ortamında ²³⁸U fertil yakıtının yakılmasıyla ²³⁹Pu fisil yakıt oluşumu fertil-fisil dönüşümü olarak bilinir. Füzyon reaktörlerinde de faydalı amaçlar için nükleer yakıtın kalitesini ifade etmek kümülatif fisil yakıt zenginleştirilmesi (CFFE) fisil izotopların izotopik yüzdesinin toplamı olarak tarif edilebilmektedir.

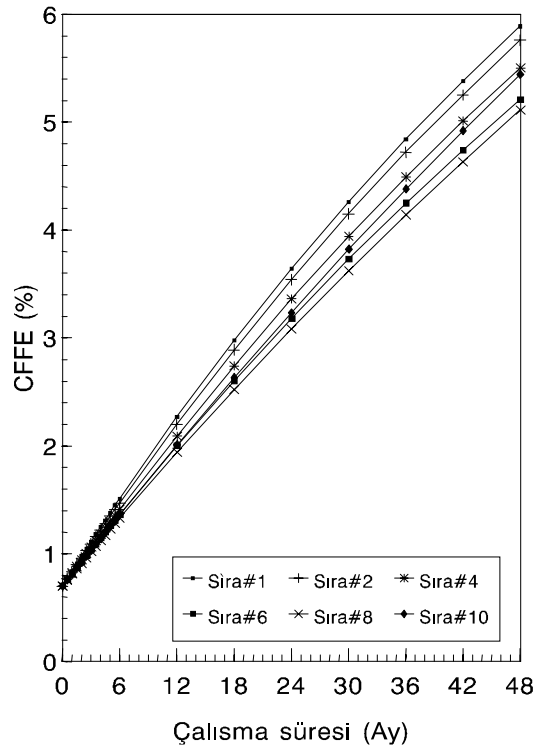
Şekil 2 a,b,c, sırayla (D,T) füzyon nötron kaynaklı hibrid reaktörde UC, UC₂ ve U₂C₃ yakıtlar için 48 aylık çalışma boyunca toplam CFFE değerindeki değişimi göstermektedir.



(a)



(b)



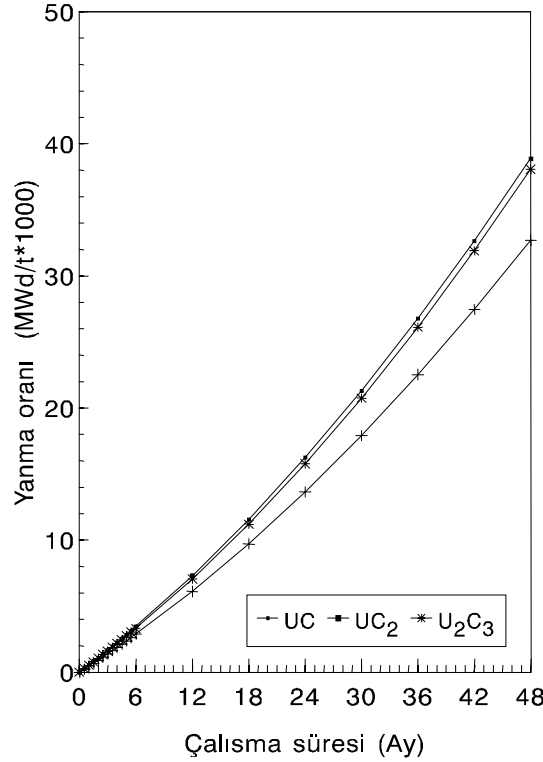
(c)

Şekil 2. Araştırılan mantoda fisil yakıt oranının zamanla artışı
a-) UC b-) UC₂ c-) U₂C₃

48 aylık operasyon süresince CFFE değişiminin yakıt bölgesinde üniform olmadığı ve bölgeler arasında düzensiz bir artış sergilediği gözlenmektedir. Yakıt bölgesinin ayrıldığı 10 bölge ayrı ayrı incelendiğinde 48 ay sonra her üç yakıtta CFFE değeri yakıt bölgesinin ilk bölümünde (sıra 1) en büyük değere

ulaşmaktadır. CFFE 'nin en düşük değerleri UC yakıt için yakıt bölgesinin 7. bölümünde (sıra 7), UC₂ ve U₂C₃ yakıtları için yakıt bölgesinin 8. bölümünde (sıra 8) ulaştığı görülmektedir. CFFE değerinde her üç yakıt grubunda da ilk 6 aydan sonra bir yükselme meydana gelmiş ve 48. ayda her üç soğutucuda da en yüksek noktaya ulaşmıştır. CFFE 'nin en yüksek değeri sıra ile UC₂, U₂C₃ ve UC yakıtlarda elde edilmiştir. 48 aylık operasyon periyodu sonunda CFFE değeri hibrid mantoda yakıt tipine bağlı olarak UC₂, U₂C₃ ve UC yakıt için sırasıyla 6.17, 5.89 ve 5.47 değerine ulaşmıştır.

3.4 YAKIT YANMA ORANI



Şekil 3. Araştırılan mantoda fisil yakıt yanma oranının zamanla artışı

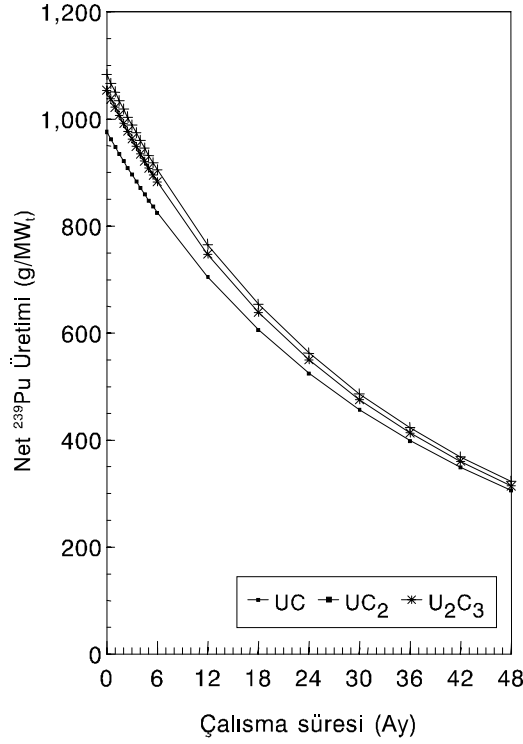
Operasyon süresi boyunca hibrid mantodaki fisil yakıt derecesi, fisil yakıt yanması yardımıyla (BU) kolayca hesaplanabilir.

$$BU = PF \cdot \Delta t \cdot E_f \cdot \phi_n \cdot F_w \cdot C_f$$

- ϕ_n : Füzyon nötron akısı, 2.22×10^{14} n/cm²-sn
- C_f : Dönüşüm faktörü, 1.6021×10^{-19} MWs/1 MeV
- PF : Tesis faktörü, 0.75
- F_w : İlk Duvar alanı
- m_{fi} : Nükleer yakıt yükleme
- E_f : Fisyon başına enerji, 200 MeV

Şekil 3 hibrid mantoda kullanılmış yakıtın ortalama yanmasının tesis operasyon süresiyle değişimini göstermektedir. Yanma oranı UC, UC₂ ve U₂C₃ yakıtları için sırasıyla 38.8742, 32.7135 ve 38.0658 değerlerindedir. Yanma değeri, UC yakıt kullanıldığında diğer iki yakıttan daha iyi neticeler vermiştir. Her üç yakıt modunda da ilk 6 aydan sonra yanma değerindeki artış ilk 6 aydan daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

3.5 YAKIT GENÇLEŞTİRME KABİLİYETİ



Şekil 4. Araştırılan mantoda MW_{th} başına fisyon enerjisinde üretilen net ²³⁹Pu üretiminin zamanla değişimi

Hibrid reaktörlerdeki yakıt gençleştirme kabiliyeti (FOM-Figure of Merit) net ²³⁹Pu üretiminin hibrid mantodaki füzyon güç çıktısına oranı olarak tarif edilmiştir. FOM matematiksel olarak net ²³⁹Pu 'da [gr/(MW_{th}.yıl)] veya [kg/(GW_{th}.yıl)] olarak tarif edilebilir.

$$m_{pu} = PF \cdot \Delta t \cdot F_w \cdot \phi_n \cdot C_{Pu} \iint \left[\sum_{\gamma, U238} (E) - \sum_{dep, Pu239} (E) \right] \Phi(E) \cdot dE \cdot dV$$

$$C_{pu} = 3.968 \times 10^{-22} \text{ gr } (^{239}\text{Pu} \text{ atomu başına})$$

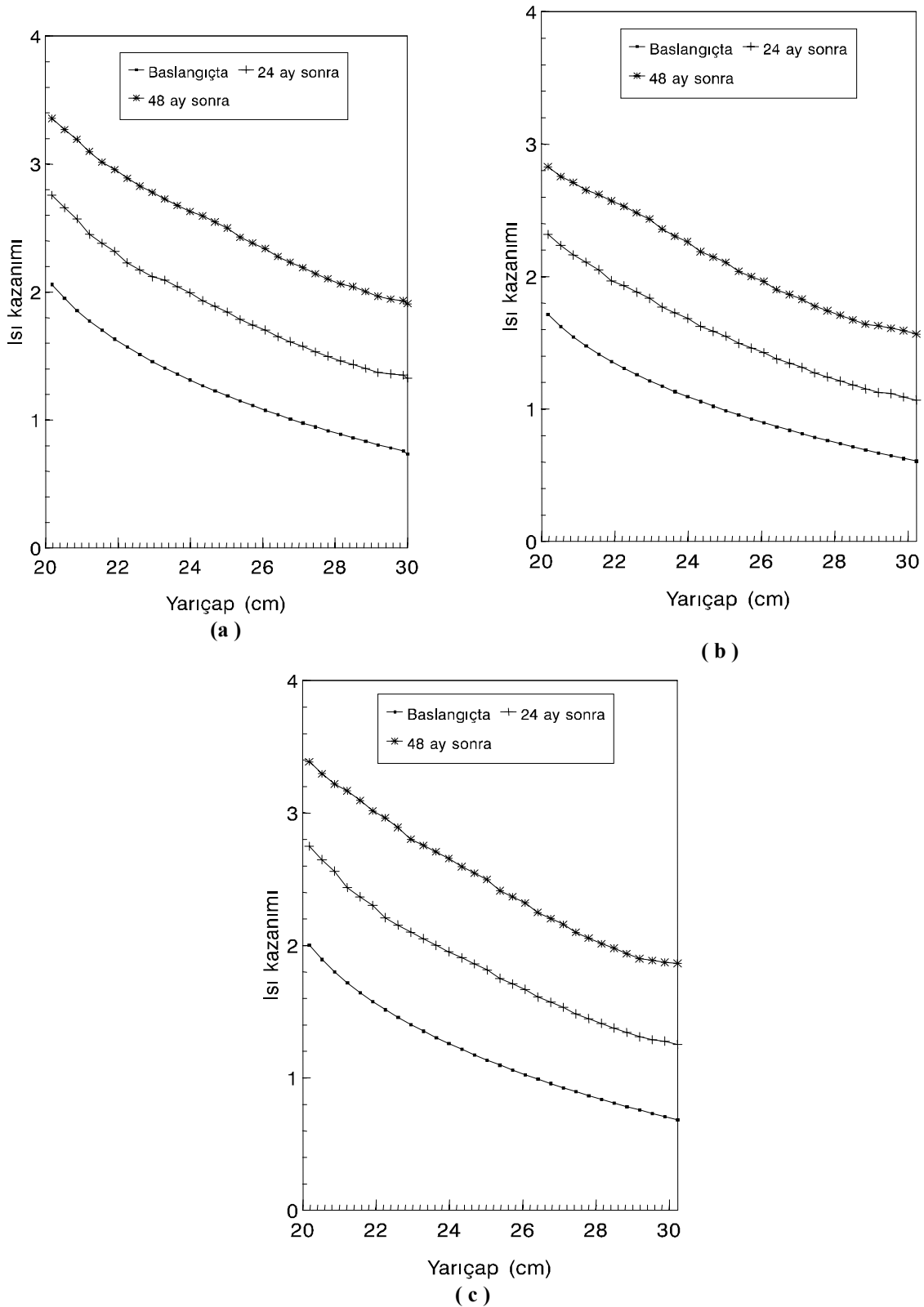
$$FOM = \frac{m_{Pu}}{P_{th}}$$

P_{th} : Mantoda termal güç üretimi

Şekil 4, araştırılan manto için FOM değerlerini göstermektedir. Başlangıçta FOM değeri çok yüksektir. Bu nedenle hibrid mantoda füzyon güç üretimi, ²³⁹Pu fisil yakıt bileşeninin daha hızlı birikmesinden dolayı daha fazladır. Diğer yandan füzyon nötron kaynağı fisil yakıtı daha verimli olarak üretmekte ve yakmaktadır. İlk aylarda üç yakıt için en yüksek değerdedir. FOM değeri UC, UC₂ ve U₂C₃ yakıtlar için sırasıyla ilk ayda 976.28, 1083.66 ve 1053.76 olarak gerçekleşmiştir. Bütün durumlarda FOM değerleri operasyon sırasında füzyon olayları arttıkça azalmaktadır.

3.6. FİSİL BÖLGEDE HOMOJEN GÜÇ

(D,T) füzyon nötron kaynaklı bir hibrid reaktörde seramik yakıtların ötektoid soğutuculu ortamda fisyon gücü incelendiğinde tüm modeller için fisil bölgedeki fisyon güç profili azalan bir eğilim göstermiştir. Fisyon güç profili (FFP) yakıt bölgesinin ilk bölümünden başlayıp yakıt bölgesinin son bölümüne doğru gidildikçe azalmaktadır. Şekil 5 a,b,c, sırayla (D,T) füzyon nötron kaynaklı hibrid reaktörde UC, UC₂ ve U₂C₃ yakıtlar için 48 aylık çalışma süresi esnasındaki ısı kazanımının zamana bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 5. Araştırılan mantoda ısı kazanımının zamana bağlı değişimi (a- UC b- UC₂ c- U₂C₃)

En yüksekten en düşüğe doğru ısı üretimi azalması U₂C₃, UC ve UC₂ yakıtlı mantolarda görülmektedir. Çalışma süresi başlangıcında her üç yakıt modeli için de ısı kazanımı yakıt bölgesi boyunca üniform olmaktadır ve yaklaşık >1.5 MeV 'luk bir ısı üretimi söz konusudur. Çalışma süresi sonunda tüm modellerde 3 MeV 'un üzerinde olmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada değişik seramik yakıtları ötektoid soğutuculu ortamda bir füzyon-fisyon hibrid mantoda fisil yakıt üretimi araştırılmıştır. Çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1. CFFE değerleri 48 aylık yakıt gençleştirme süresince UC_2 , U_2C_3 ve UC için % 6.17, % 5.89 ve % 5.47 olarak elde edilmiştir. Bu gençleştirme ile bir yandan elektrik üretimi yapılırken diğer yandan suni fisil yakıt olan ^{239}Pu üretilmektedir. %3 den daha fazla zenginleştirilen yakıt, konvansiyonel LWR'de tekrar kullanılabilir. Bu değerlere 48 aylık operasyon süresinde UC, UC_2 ve U_2C_3 yakıtta 24, 18 ve 20. aylardan sonra ulaşılmıştır. 48 aylık operasyon süresi sonunda bütün yakıt tiplerinde, yakıt bölgelerindeki yakıt yeniden LWR 'lerde kullanılabilir hale gelmiştir.
2. Manto enerji çoğalımı M, bu tür hibrid güç tesisince üretilen elektrik göz önüne alındığında oldukça yüksektir. M'in bu relatif artışı hibrid reaktör için oldukça yumuşaktır. Yakıt bölgesindeki çok düşük nötron enerjisinin haricinde nötron spektrumundaki değişim çok küçüktür. Bu durum, kordaki (yakıt üretimi, tüketimi ve fisyonundaki gibi) üniform nötron reaksiyon oranlarına yardımcı olur ve çok uzun işlem periyodu esnasında nötronsal tüm tesis parametrelerinin sabit ve düzgün davranışlarını açıklar. Yüksek nötron enerjileri, fisyonable izotoplardan oluşan fisil izotopların fisyon tesir kesitlerini de azaltmış olmaktadır. Bundan dolayı, artan kümülatif fisil yakıt zenginliği (CFFE) fisyon güç üretimindeki ^{238}U 'in katkısının azalması ile izah edilebilmektedir. Doğal uranyum yakıtlı bu çalışmada M nin 6' a kadar çıktığı görülmektedir. Manto enerji üretimi 48 aylık operasyon süresi sonunda UC yakıtlı model en iyi performansı göstermiştir.
3. Çalışma süresi boyunca TBR, kullanılmış yakıt gençlestirmesi boyunca yüksek nötron çoğalım oranı bakımından düzgün olarak artmaktadır. Tritiyum üretimi açısından UC yakıtlı model en iyi performansı gösterirken bunu sırasıyla U_2C_3 ve UC_2 yakıtlı modeller takip etmiştir. Kendi füzyon nötron kaynağı için yeterli tritiyum oranı $TBR > 1.05$ değerine tüm yakıt modellerinde ulaşılmıştır. Tritiyum üretimi açısından 48 aylık çalışma süresince UC yakıtlı model 1.6064 ile en iyi performansı göstermiştir. Her üç yakıt türü operasyon süresince kendi füzyon nötron kaynağı için gerekli tritiyumu üretmektedir.
4. Fisyon güç yoğunluğu açısından U_2C_3 yakıtlı model en iyi performans gösterdiği görülmektedir. U_2C_3 'ü sırasıyla UC ve UC_2 yakıtlar takip etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Hafele, W. "Technical safety Measures and Rules in the Nuclear Field" .Atomwirtschaft, Atomtechnik, October 1989
2. Şahin, S., Yapıcı, H., "Rejuvenation of CANDU Spent Fuel in a Hybrid Manto", Trans. Am. Nucl. Soc. 59 (1989) 105.
3. Şahin, S., Yapıcı, H., "Investigation of the Neutronic Potential of Moderated and Fast (D, T) Hybrid Blankets for Rejuvenation of CANDU Spent Fuel". Fusion Technology 16 (1989) . 331.
4. Şahin, S., Yapıcı, H., Baltacıoğlu, E., "Heavy Water Reactor Spent Fuel Regeneration with Fusion Neutrons". Trans. Am. Nucl. Soc. 60 (1989) 176.
5. Şahin, S., Baltacıoğlu, E., Yapıcı, H., "Potential of a Catalyzed Fusion Driven Hybrid Reactor for the Regeneration of CANDU Spent Fuel". Fusion Technology 20 (1991) 26.
6. Şahin, S., Yapıcı, H., Baltacıoğlu, E., "Regeneration of LWR Spent Fuel in Hybrid Reactors". Kerntechnik. 59, No. 6, (Nov. 1994) 270.
7. Teller, E., Fusion, **Magnetic Confinement**. vol .1, part B, Academic Press (1981).
8. Engle, W.W., Jr, ANISN, "A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", K1693, OAK Ridge National Laboatory, 1970
9. Al-Kusayer, T.A., Şahin, S., Drira, A., "CLAW-IV Coupled 30 Neutrons 12 Gamma- Ray Group Section with Retrival Programs for Radiation Transport Calculations", Radiation Shielding Information Center, OAK Ridge National Laboatory, RSIC-Newletter, pp.4, May.1988
10. Şahin, S., Yapıcı, H., Baltacıoğlu, E., "Fusion Breeder with Enhanced Safeguarding Capabilities Against Nuclear Weapon Proliferation", Energy Convers.Mgmt Vol.00.No.0.pp.1-11, 1998
11. Şahin, S., Al-Kusayer, T.A., Raooff, M.A., "Preliminary Design Studies of a Cylindrical Experimental Hybrid Blanket with Deuterium-Tritium Driver". Fusion Technology, 10, 84(1986)
12. S.Şahin, **Physics of FusionFission (Hybrid) Reactors**. 8th International Summer College on Physics and Contemporary Needs, Islamabad, Pakistan, 23, 124 July11 August 1983.
13. S.Şahin, **Mainline FusionFission (hybrid) Reactor Concepts**, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Institut de Genie Atomique PHBEcublens, Switzerland.