

**PWR-CANDU6 BİRLEŞİK YAKIT ÇEVİRİMİ VE CANDU6'DA
URANYUM + TORYUM KULLANIMI**

**PWR-CANDU6 COMBINED FUEL CYCLE AND USE OF
URANIUM + THORIUM IN CANDU6**

LEVENT ÖZDEMİR

PROF. DR. H. OKAN ZABUNOĞLU

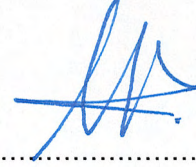
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nükleer Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

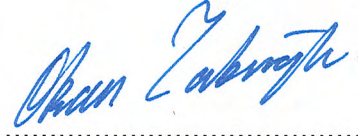
2017

LEVENT ÖZDEMİR' in hazırladığı "PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi ve CANDU6'da Uranyum + Toryum Kullanımı" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

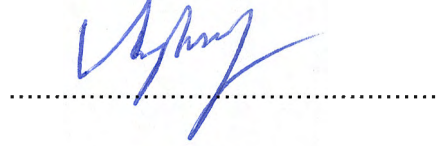
Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU
Başkan



Prof. Dr. H. Okan ZABUNOĞLU
Danışman



Prof. Dr. Ayhan YILMAZER
Üye



Prof. Dr. Haluk YÜCEL
Üye



Prof. Dr. S. Sinan KESKİN
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından DOKTORA TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

20/06/2017

d. Özdemir

LEVENT ÖZDEMİR

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/06/2017

d. Özdemir

LEVENT ÖZDEMİR

ÖZET

PWR-CANDU6 BİRLEŞİK YAKIT ÇEVİRİMİ VE CANDU6'DA URANYUM + TORYUM KULLANIMI

Levent ÖZDEMİR

Doktora, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. H. Okan ZABUNOĞLU

Haziran 2017, 98 sayfa

Bu çalışmada, PWR kullanılmış yakıtının CANDU6 reaktörlerinde yakıt olarak kullanımını esas alan PWR-CANDU6 birleşik yakıt çevrimi için yanma oranı analizleri yapılmıştır. Ayrıca, tek-geçişli (*once through*) yakıt çevrimi için, CANDU6'da uranyum+toryum (U+Th) kullanımının yanma oranı üzerine etkileri incelenmiş ve sonuçlar doğal U ve Hafif Zenginleştirilmiş U (HZU) yakıtlarınki ile karşılaştırılmıştır. Yakıt çevrimleri, Doğal U Gereksinimi (DUG) ve Nükleer Kaynak Değerlendirme Oranı (NKDO) açısından mukayese edilmiştir.

PWR-CANDU6 birleşik yakıt çevrimi için başlıca iki geri-dönüşüm seçeneği ele alınmıştır. İlk seçenek, kullanılmış yakıttan U ve Pu'yu geri kazanmanın en kolay ve en emniyetli yolu olan Tam Birlikte İşleme (TBİ) seçeneğidir. TBİ yoluyla kullanılmış yakıtın içerdiği tüm U ve Pu birlikte geri kazanılır ("standart yeniden işleme"de ise U ve Pu saf ve ayrı ayrı geri kazanılmaktadır). Sonuçta TBİ ürünü olarak toplam fisil içeriği %1,4 ile %1,5 arasında bir U+Pu karışımı elde edilir. Bu U+Pu'nun PWR'de yakıt olarak tekrar kullanılabilmesi için fisil madde ilavesi gerekir. Diğer yandan, %1,4-1,5 fisil U+Pu direkt olarak CANDU yakıtı olmaya uygundur. İkinci geri-dönüşüm seçeneği "kullanılmış PWR yakıtının direkt olarak CANDU'da kullanımı" olarak tanımlanır ve DUPIC (*Direct Use of PWR fuel In CANDU*) diye bilinir. DUPIC hiçbir ayırma işlemi içermediğinden, bu yolla elde

edilen CANDU yakıtı sadece U ve Pu'yu değil hemen hemen tüm fisyon ürünlerini ve minör aktinitleri de içerir.

Çalışmanın devamında, Th eklenmiş U yakıtların tek-geçişli CANDU6 çevriminde kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla, iki yakıt modeli düşünüldü. "Homojen-demet" denen ilk modelde, bir demetteki tüm yakıt elemanları çeşitli zenginlikteki HZU ile Th'un (kütlece %10, %30 ve %50 Th) karıştırılmasıyla elde edilen (U-Th)O₂ içermektedir. Diğer model olan "karışık-demet"te ise tüm demetlerin merkezindeki 4 ve 7 yakıt elemanı sadece ThO₂, kalan elemanlar ise sadece UO₂ ile yüklenmiştir. U+Th yakıtlar için elde edilen sonuçlar CANDU6'da Th kullanımının etkisinin gözlenmesine ve PWR-CANDU birleşik çevrimi ile mukayese edilebilmesine olanak sağlar.

CANDU6 reaktörünün yanma oranı hesapları tüm-kor geometri ve doğrusal olmayan reaktivite modelleri kullanılarak MCNP5 ve MONTEBURNS kodları ile yapılmıştır. Yanma oranı değerleri elde edildikten sonra, her yakıt çevrimi senaryosu için DUG ve NKDO (ve doğal U tasarrufu) değerleri hesaplanmıştır.

PWR-CANDU6 birleşik çevriminde; PWR kullanılmış yakıtının 33000, 40000 ve 50000 MW-gün/tU yanma oranı değerleri için; CANDU6'da, TBİ seçeneğinde sırasıyla 25981, 27021 ve 27919 MW-gün/tHM ve DUPIC'te sırasıyla 16717, 16195 ve 14926 MW-gün/tHM ilave yanma oranları elde edilmiştir. Hem TBİ hem de DUPIC, DUG ve NKDO değerlerini olumlu yönde etkilemektedir. Genel olarak, TBİ DUPIC'e kıyasla avantajlıdır; çünkü TBİ ile üretilen CANDU yakıtı fisyon ürünlerini ve minör aktinitleri içermez.

CANDU6'da Th kullanımı ile ilgili hesaplamalar, U+Th yakıttaki Th oranı arttıkça, aynı yanma oranına ulaşmak için gereken ²³⁵U oranının arttığını gösterir. Bu durum, DUG değerinde artışa, NKDO değerinde düşüşe neden olur. Çok yüksek yanma oranlarında eğilim tersine döner ve Th oranı arttıkça DUG değeri azalmaya, NKDO değeri ise yükselmeye başlar.

Anahtar Kelimeler: PWR-CANDU6, tam birlikte işleme, DUPIC, toryum, yanma oranı, doğal uranyum gereksinimi, nükleer kaynak değerlendirme oranı, MCNP/MONTEBURNS

ABSTRACT

PWR-CANDU6 COMBINED FUEL CYCLE AND USE OF URANIUM + THORIUM IN CANDU6

Levent ÖZDEMİR

Doctor of Philosophy, Nuclear Engineering Department

Supervisor: Prof. Dr. H. Okan ZABUNOĞLU

June 2017, 98 pages

In this study, burnup analyses were made for PWR-CANDU6 combined fuel cycles in which PWR spent fuel is used as fuel in CANDU6. Besides, for the once-through fuel cycle, use of uranium + thorium (U+Th) in CANDU6 were looked into and compared to natural U or Slightly Enriched U (SEU) cases. The fuel cycles were compared in terms of Natural U Requirement (NUR) and Nuclear Resource Utilization (NRU).

For the PWR-CANDU6 combined cycle, two primary recycling scenarios were focused on. The first scenario involves the Complete Coprocessing (CC), which is the easiest and most secure way to recover U and Pu content of spent fuel. In CC, all U and Pu in PWR spent fuel are recovered together (while in the standard reprocessing U and Pu are obtained as separate streams). Resultantly, the product of CC is a pure U+Pu mixture with a total fissile content of 1.4 to 1.5 wt%, and in order to reuse it in a PWR, it is necessary to blend it with a fissile makeup. However, a mixture of U+Pu with that fissile content can directly be used to fuel a CANDU. The other scenario is known as DUPIC (Direct Use of PWR spent fuel In CANDU). The DUPIC approach does not involve any element separation process; so, PWR spent fuel containing not only U and Pu but also almost all fission products and minor actinides is used as fuel in CANDU.

In addition, use of Th-added fresh U fuel in CANDU6 on a once-through cycle was investigated. For this purpose, two fuel models were considered. One is “homogenous-bundle” containing a homogenous mixture of (U-Th)O₂ formed by blending various slightly-enriched U fuels with Th (in Th mass ratios; 10%, 30% and 50%), used in all fuel elements of all bundles throughout the core. The other model is “mixed-bundle” which contains only ThO₂ in 4 or 7 fuel elements in the center of a bundle, while the other elements comprise UO₂ only. The results with U+Th fuels enable not only to observe the effect of Th use in CANDU6 but also to compare it to the results from the combined-cycle cases.

For burnup computations, CANDU6 full-core geometry and the non-linear reactivity model with MCNP5 and MONTEBURNS codes were used. With burnup values at hand, NUR and NRU (and natural U saving) were calculated for different fuel compositions in each case.

At the combined PWR-CANDU6 cycle; for PWR spent fuel with a discharge burnup of 33000, 40000 and 50000 MWd/tU; the additional burnups achieved in CANDU6 have been found to be 25981, 27021 and 27919 MWd/tHM, respectively for CC; and 16717, 16195 and 14926 MWd/tHM, respectively for DUPIC. Both the CC and DUPIC scenarios affect NUR and NRU positively. In general and with respect to NUR and NRU, the CC cycle is more advantageous than the DUPIC cycle since in that case CANDU fuel is free from fission products and minor actinides.

As for U+Th fuel in CANDU6 on the once-through cycle, the higher the Th fraction in U+Th fuel, the higher the ²³⁵U fraction required to obtain the same discharge burnup. As a result, an increase on NUR and a decrease on NRU are observed. At very high discharge burnups, as Th fraction goes up, NUR begins to decrease, and NRU begins to increase.

Keywords: PWR-CANDU6, complete coprocessing, DUPIC, thorium, burnup, natural uranium requirement, nuclear resource utilization, MCNP/MONTEBURNS

TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca değerli fikirleriyle desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. H. Okan ZABUNOĞLU'na; TİK toplantıları süresince değerli yorumları ile bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Mehmet TOMBAKOĞLU ve Sayın Prof. Dr. S. Sinan KESKİN'e; tezin son şeklini almasında önemli yorum ve değerlendirmeleri ile katkıda bulunan jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL ve Sayın Prof. Dr. Ayhan YILMAZER'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

TAEK Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinden mesai arkadaşlarım ve dostlarım Zeynep YÜKSEL, Ayhan YÜKSEL, Funda Barlas ŞİMŞEK, Volkan ŞİMŞEK, Adem ERDOĞAN, M. Yılmaz PEKER ve Senem ŞENTÜRK LÜLE'ye çalışmalarım sırasında beni sürekli olarak motive ettikleri için ayrıca teşekkür ederim.

Benim her zaman yanımda olan anneme, babama, ablama, sevgili eşim Şule ÖZDEMİR'e, ilk göz ağrım oğlum Atakan ÖZDEMİR'e ve evimizin en küçük üyesi oğlum Doğukan ÖZDEMİR'e ne kadar teşekkür etsem azdır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	ix
ŞEKİLLER.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. PWR ve CANDU REAKTÖRLERİNDE YAKIT ÇEVİRİMLERİ	5
2.1 Tek-Geçişli Yakıt Çevrimi	5
2.1.1 Hafif-sulu Reaktörler (LWR) için Tek-Geçişli Çevrim.....	5
2.1.2 Ağır-sulu Reaktörler (HWR) için Tek-Geçişli Çevrim	6
2.2 Standart Yeniden İşleme Yakıt Çevrimi.....	10
2.3 Tam Birlikte İşleme Yakıt Çevrimi.....	13
2.4 PWR-CANDU Birleşik Yakıt Çevrimi	15
2.4.1 Tam Birlikte İşleme (TBl) Seçeneği	15
2.4.2 DUPIC Seçeneği	17
3. HESAPLAMA GEREÇLERİ VE YÖNTEMLERİ.....	21
3.1 Hesaplama Gereçleri.....	21
3.1.1 MCNP5.....	21
3.1.2 MONTEBURNS2.....	23
3.1.3 MCNP/MONTEBURNS Kodlarıyla Modelleme	27
3.2 Hesaplama Yöntemleri	28
3.2.1 Yanma Hesapları	28
3.2.1.1 PWR Reaktörü	28
3.2.1.2 CANDU6 Reaktörü.....	31
3.2.2 Doğal Uranyum Gereksinimi (DUG) Hesapları	37
3.2.2.1 PWR ve CANDU6 Reaktörleri.....	37
3.2.2.2 PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi	37
3.2.2.3 U+Th Yakıtlı CANDU6 Reaktörü	38

3.2.3	Nükleer Kaynak Değerlendirme Oranı (NKDO) Hesapları.....	39
3.2.3.1	PWR ve CANDU6 Reaktörleri.....	39
3.2.3.2	PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi.....	39
3.2.3.3	U+Th Yakıtlı CANDU6 Reaktörü.....	39
3.2.4	Doğal Uranyum Tasarrufu (DUT) Hesapları.....	40
4.	CANDU6 REAKTÖRÜ SONUÇLARI.....	41
4.1	U Yakıtlı CANDU6 Reaktörü.....	41
4.1.1	Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları.....	46
4.1.2	DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları.....	49
4.2	U+Th Yakıtlı CANDU Reaktörü.....	50
4.2.1	Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları.....	50
4.2.1.1	Homojen-Demet.....	50
4.2.1.2	Karışık-Demet.....	55
4.2.2	DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları.....	61
4.2.2.1	Homojen-Demet.....	61
4.2.2.2	Karışık-demet.....	63
4.2.2.3	Kıyaslama.....	64
5.	PWR-CANDU6 BİRLEŞİK YAKIT ÇEVİRİMİ SONUÇLARI.....	66
5.1	PWR.....	66
5.2	PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi.....	68
5.2.1	Tam Birlikte İşleme (TBI) Seçeneği.....	68
5.2.1.1	Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları.....	69
5.2.1.2	DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları.....	71
5.2.2	DUPIC Seceneği.....	72
5.2.2.1	Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları.....	72
5.2.2.2	DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları.....	75
6.	SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	77
6.1	Türetilen Eşitliklerin Özeti.....	77
6.2	U ve U+Th Yakıtlı CANDU6 Yakıt Çevrimi.....	77
6.3	PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi.....	83
6.4	Gelecek Çalışmalar için Öneriler.....	87
	KAYNAKLAR.....	88
	EK A. CANDU6 REAKTÖRÜNÜN ÖZELLİKLERİ.....	92

EK B. CANDU6 REAKTÖRÜ İLAVE HESAP SONUÇLARI.....	94
ÖZGEÇMİŞ	97

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Üç temel fisil nüklidin bazı önemli karakteristikleri	7
Çizelge 3.1. Referans CANDU6 reaktörü temel özellikleri [24,39]	32
Çizelge 4.1. Doppler katsayısı için reaktivite değerleri	42
Çizelge 4.2. Soğutucu boşluk katsayısı için reaktivite değerleri	42
Çizelge 4.3. U vektörünün yanma süresince değişimi	43
Çizelge 4.4. Pu vektörünün yanma süresince değişimi	44
Çizelge 4.5. U yakıtlı CANDU6 reaktörü reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları	47
Çizelge 4.6. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için yanma oranı değerleri.....	48
Çizelge 4.7. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için DUG, DUT ve NKDO	49
Çizelge 4.8. Homojen-demet için reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları	52
Çizelge 4.9. Homojen-demet için yanma oranı değerleri	54
Çizelge 4.10. Homojen-demet için yanma oranı eğrisi uyarlama katsayıları	55
Çizelge 4.11. Karışık-demet için reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları	58
Çizelge 4.12. Karışık-demet için yanma oranı değerleri	59
Çizelge 4.14. Homojen-demet için DUG, DUT ve NKDO	61
Çizelge 4.15. Karışık-demet için DUG, DUT ve NKDO	63
Çizelge 5.1. 5 yıl soğutulmuş PWR-KY için U ve Pu izotopik bileşimi	68
Çizelge 5.2. PWR için DUG ve NKDO sonuçları	68
Çizelge 5.3. TBİ çevrimi için reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları	69
Çizelge 5.4. TBİ çevrimi için yanma oranı değerleri	70
Çizelge 5.5. TBİ çevrimi için DUG ve DUT	71
Çizelge 5.6. TBİ çevrimi için NKDO	72
Çizelge 5.7. DUPIC çevrimi için reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları	73
Çizelge 5.8. DUPIC yakıtların CANDU6 için yanma oranı değerleri	73
Çizelge 5.9. DUPIC çevrimi için DUG ve DUT	75
Çizelge 5.10. DUPIC çevrimi için NKDO	75
Çizelge 6.1. Eşitlik 6.2'deki katsayılar	77
Çizelge 6.2. U ve U+Th yakıtlar için karşılaştırmalı sonuçlar	79
Çizelge 6.3. TBİ ve DUPIC çevrimleri için karşılaştırmalı sonuçlar	83
Çizelge A.1. CANDU6 Kor Özellikleri	92
Çizelge A.2. CANDU6 Yakıt Özellikleri	92

Çizelge A.3. CANDU6 Soğutucu Özellikleri.....	93
Çizelge A.4. CANDU6 Yavaşlatıcı Özellikleri	93
Çizelge A.5. CANDU6 Malzeme Özellikleri	93
Çizelge B.1. U yakıtlı CANDU6 için Yakıt Gereksinimi (YG), DU Tasarrufu (%) ve KAYNAK/YÜK sonuçları.....	94
Çizelge B.2. Homojen-demet U+Th yakıtlar için Yakıt Gereksinimi (YG), DU Tasarrufu (%) ve KAYNAK/YÜK sonuçları	94
Çizelge B.3. Karışık-demet U+Th yakıtlar için Yakıt Gereksinimi (YG), DU Tasarrufu (%) ve KAYNAK/YÜK sonuçları	96

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. LWR tek-geçişli yakıt çevrimi.....	5
Şekil 2.2. CANDU tek-geçişli yakıt çevrimi	6
Şekil 2.3. CANDU tek-geçişli U+Th yakıt çevrimi	8
Şekil 2.4. SYİ akım şeması.....	11
Şekil 2.5. SYİ'ye dayalı LWR yakıt çevrimi	12
Şekil 2.6. TBİ akım şeması.....	14
Şekil 2.7. TBİ'ye dayalı LWR yakıt çevrimi	15
Şekil 2.8. TBİ'ye dayalı PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi.....	16
Şekil 2.9. DUPIC'e dayalı PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi	17
Şekil 2.10. DUPIC yakıt üretim prosesi [29].....	18
Şekil 3.1. MONTEBURNS programının işleyiş şeması.....	24
Şekil 3.2. PWR birim-hücre MCNP5 modeli (ön ve yan kesit görünüşü)	29
Şekil 3.3. PWR için hesaplama akış şeması	30
Şekil 3.4. CANDU reaktöründe yakıt çevrimleri [40]	33
Şekil 3.5. Referans CANDU6 reaktörü bütün-kor MCNP5 modeli	34
Şekil 3.6. Referans CANDU6 37 elemanlı yakıt demetinin MCNP5 modeli	34
Şekil 3.7. Referans CANDU6 reaktörü için hesaplama akış şeması	36
Şekil 3.8. U+Th yakıtlı kütle dengesi	40
Şekil 4.1. Doğal U yakıtlı referans CANDU6 reaktörü için reaktivite eğrisi	41
Şekil 4.2. Bir yakıt demetindeki U miktarının yanma süresince değişimi	45
Şekil 4.3. Bir yakıt demetindeki Pu miktarının yanma süresince değişimi	45
Şekil 4.4. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için reaktivite-yanma oranı eğrisi.....	46
Şekil 4.5. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için yanma oranı-zenginlik eğrisi	48
Şekil 4.6. Homojen-demet için reaktivite eğrisi (%10 Th)	51
Şekil 4.7. Homojen-demet için reaktivite eğrisi (%30 Th)	51
Şekil 4.8. Homojen-demet için reaktivite eğrisi (%50 Th)	52
Şekil 4.9. Homojen-demet için yanma oranı-zenginlik eğrileri	54
Şekil 4.10. Karışık-demet MCNP5 modeli	56
Şekil 4.11. Mix-4 Th için reaktivite eğrisi	57
Şekil 4.12. Mix-7 Th için reaktivite eğrisi	57

Şekil 4.13. Karışık-demet için yanma oranı-zenginlik eğrileri	60
Şekil 4.14. CANDU6 Yanma Oranı – DUG Eğrisi.....	65
Şekil 4.15. CANDU6 Yanma Oranı – NKDO Eğrisi	65
Şekil 5.1. Referans PWR için reaktivite-yanma oranı eğrisi.....	66
Şekil 5.2. PWR için nihai yanma oranı – taze U yakıt zenginliği eğrisi	67
Şekil 5.3. TBİ çevrimi için reaktivite-yanma oranı eğrisi	69
Şekil 5.4. TBİ çevrimi için yanma oranı-zenginlik eğrisi.....	71
Şekil 5.5. DUPIC çevrimi için reaktivite eğrisi	73
Şekil 5.6. DUPIC çevrimi için yanma oranı-zenginlik eğrisi	74
Şekil 6.1. CANDU6 Yanma Oranı- ²³⁵ U yüzdesi eğrisi	78
Şekil 6.2. CANDU6 Yanma Oranı – DUG Eğrisi (0-50000 MW-gün/tHM)	80
Şekil 6.3. CANDU6 Yanma Oranı – DUG Eğrisi (40000-90000 MW-gün/tHM)	81
Şekil 6.4. CANDU6 Yanma Oranı – DUT Eğrisi (0-50000 MW-gün/tHM).....	81
Şekil 6.5. CANDU6 Yanma Oranı - DUT Eğrisi (40000-90000 MW-gün/tHM).....	82
Şekil 6.6. CANDU6 Yanma Oranı – NKDO Eğrisi (0-60000 MW-gün/tHM).....	82
Şekil 6.7. CANDU6 Yanma Oranı - NKDO Eğrisi (50000-95000 MW-gün/tHM)...	83
Şekil 6.8. PWR yakıt zenginliği-yanma oranı eğrisi	85
Şekil 6.9. PWR yakıt zenginliği- DUG eğrisi	85
Şekil 6.10. PWR yakıt zenginliği- DUT eğrisi.....	86
Şekil 6.11. PWR yakıt zenginliği- NKDO eğrisi.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

B_D	Nihai Yanma Oranı (<i>Discharge Burnup</i>)
ϵ	Yakıt Zenginliği (Kütlece %)
ρ_L	Sızıntı Reaktivite (<i>Leakage Reactivity</i>)
ρ_{LC}	Sızıntı-Düzeltilme Reaktivite (<i>Leakage-Correction Reactivity</i>)
pcm	Yüzde birlik dilimin binde biri (<i>Per cent milli</i>)
R_U	U+Th yakıt içerisinde ^{235}U oranı (Kütlece %)
θ	U+Th yakıt içerisinde Th oranı (Kütlece %)

Kısaltmalar

ACR	Gelişmiş CANDU Reaktörü (<i>Advanced CANDU Reactor</i>)
AECL	Kanada Atom Enerjisi Şirketi (<i>Atomic Energy Canada Limited</i>)
AIROX	Atom Uluslararası İndirgeme Oksit Yakıtlar (<i>Atomics International Reduction OXide fuels</i>)
HM	Ağır Metal (<i>Heavy Metal</i>)
BWR	Kaynar-Su Reaktörü (<i>Boiling Water Reactor</i>)
CANDU	CANada Döteryum Uranyum (<i>CANadian Deuterium Uranium</i>)
DU	Doğal Uranyum (<i>Natural Uranium: NU</i>)
DUG	Doğal Uranyum Gereksinimi (<i>Natural Uranium Requirement: NUR</i>)
DUT	Doğal Uranyum Tasarrufu (<i>Natural Uranium Saving: NUS</i>)
DU PIC	PWR Kullanılmış Yakıtının CANDU'da Direkt Kullanımı (<i>Direct Use of PWR Spent Fuel In CANDU</i>)
FÜ	Fisyon Ürünü (<i>Fission Product: FP</i>)
HWR	Ağır-Su Reaktörü (<i>Heavy Water Reactor</i>)

HZU	Hafif Zenginleştirilmiş Uranyum (<i>Slightly Enriched Uranium: SEU</i>)
KAERI	Kore Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü (<i>Korea Atomic Energy Research Institute</i>)
KY	Kullanılmış Yakıt (<i>Spent Fuel: SF</i>)
LANL	Los Alamos Ulusal Laboratuvarı (<i>Los Alamos National Laboratory</i>)
LWR	Hafif-Su Reaktörü (<i>Light Water Reactor</i>)
MA	Minör Aktinitler (<i>Minor Actinides</i>)
MCNP	Monte Carlo N-Parçacık Taşınım Kodu (<i>Monte Carlo N-Particle Transport Code</i>)
MOX	Karışık Oksit Yakıt (<i>Mixed Oxide Fuel</i>)
NEA	Nükleer Enerji Ajansı (<i>Nuclear Energy Agency</i>)
NKDO	Nükleer Kaynak Değerlendirme Oranı (<i>Nuclear Resource Utilization Factor: NRU</i>)
OREOX	Oksit Yakıtların Oksidasyonu ve İndirgemesi (<i>Oxidation and REDuction of OXide fuels</i>)
PHWR	Basınçlı Ağır-Su Reaktörü (<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i>)
PUREX	Plütonyum ve Uranyum Ekstraksiyonu (<i>Plutonium and Uranium EXtraction</i>)
PWR	Basınçlı-Su Reaktörü (<i>Pressurized Water Reactor</i>)
SYİ	Standart Yeniden İşleme (<i>Standart Reprocessing: SR</i>)
TBİ	Tam Birlikte İşleme (<i>Complete Coprocessing: CC</i>)
UAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (<i>International Atomic Energy Agency: IAEA</i>)
YANA	Yüksek Aktiviteli Nükleer Atık (<i>High Level Waste: HLW</i>)

1. GİRİŞ

Bütün nükleer yakıtlar, termal nötronlarla bölünebilir (fisil) (^{233}U , ^{235}U ve ^{239}Pu) ve hızlı nötronlarla dönüştürülen doğurgan (*fertile*) (^{232}Th ve ^{238}U) izotopları içerir. Bir nükleer reaktörde, fisil izotoplar enerji üretmek için fisyon [n,f] tepkimesi yaparken, doğurgan izotoplar nötron yakalama (*capture*) tepkimesiyle [n, γ] fisil izotoplara dönüşerek enerji üretimine katkıda bulunur. Nükleer reaktörden çıkan kullanılmış yakıtta (KY) (*Spent Fuel: SF*), fisil izotoplar, doğurgan izotoplar, fisyon ürünleri (FÜ) (*Fission Product: FP*) ve minör aktinidler (*Minor Actinides: MA*) bulunmaktadır. Hafif-sulu reaktörler (*Light Water Reactor: LWR*) sınıfına giren tipik bir basınçlı-su reaktöründen (*Pressurized Water Reactor: PWR*) çıkan KY, yaklaşık olarak kütlece %96 uranyum (U), %1 plütonyum (Pu) ile FÜ ve MA içermektedir [1].

Nükleer güç reaktörlerinden çıkan KY'nin yeniden işlenmesi (*reprocess*) ile KY içerisindeki fisil ve doğurgan izotoplar geri kazanılabilir ve hâlihazırda kullanışsız yüksek aktif ve aktinit malzemeler ise Yüksek Aktiviteli Nükleer Atık (YANA) (*High Level Waste: HLW*) olarak sınıflandırılarak bertaraf edilebilir. Geri kazanılan malzemelerin bir nükleer reaktörde tekrar kullanılmasıyla, yani geri dönüşümü sağlanarak da tekrar enerji üretilebilir. Geri dönüşümün yapıldığı bu tür nükleer yakıt çevrimleri kapalı çevrim olarak adlandırılmaktadır. KY'nin yeniden işlenmesi yolunun benimsenmediği durum ise tek-geçişli (*once-through*) çevrim veya açık çevrim olarak adlandırılır ve KY içerdiği yüksek radyoaktivite nedeniyle YANA olarak nitelendirilir [2].

Yeniden işleme yoluyla KY'deki U ve Pu'nun geri kazanılması amaçlanmaktadır. Standart bir yeniden işleme tesisinde, U ve Pu ayrı ayrı ve saf halde elde olunur. Tipik bir PWR-KY'nin yeniden işlenmesi ile geri kazanılan yaklaşık %0,85 fisil içeriğe sahip U zenginleştirilerek, yaklaşık %70 fisil içeriğe sahip Pu ise doğurgan izotop ilavesi ile enerji üretimi için tekrar reaktörde kullanılabilir [3, 4, 5, 6].

Standart yeniden işlemeye alternatif olarak önerilen "birlikte işleme" (*coprocessing*) teknolojisinde ise "kısmi birlikte işleme" (*partial coprocessing*) ve "tam birlikte işleme" (TBİ) (*complete coprocessing*) seçenekleri mevcuttur [3].

Kısmi birlikte işlemede LWR için uygun bir fisil içeriğe sahip U+Pu karışımı ile U'nun fazlası ayrı ayrı elde edilir [7]. Standart yeniden işlemeye göre özellikle

nükleer güvence denetimi (*safeguard*) açısından ve ekonomik olarak avantajları olsa da kısmi birlikte işleme en kolay işleme seçeneği değildir.

TBİ, sadece iki aşamalı akım şeması içerdiğinden ve hiç bir aşamasında U ve Pu birbirinden ayrılmadığından en kolay, en ekonomik ve en emniyetli yeniden işleme seçeneğidir [3]. KY'nin tam birlikte işlenmesinde, U ve Pu birbirlerinden ayrılmaksızın işleme tabi tutularak, FÜ ve MA'dan temizlenmiş bir U+Pu karışımı geri kazanılır [8]. TBİ ilk defa 2003 yılında Özdemir tarafından detaylı olarak çalışılmış olup, akım şemaları ve maliyet analizleri Özdemir ve Zabunoğlu tarafından yayınlanmıştır [3, 4]. KY'nin nihai yanma oranına (*discharge burnup: B_D*) ve soğutma süresine göre değişen, yaklaşık olarak %1,4-%1,5 fisil içeriğe sahip U+Pu ürününü LWR'lerde tekrar kullanabilmek için fisil malzeme ilavesi (zenginleştirilmiş U ya da Pu) gerekmesi TBİ'nin tek önemli dezavantajı olarak gözükmektedir.

TBİ'nin yaklaşık olarak %1,4-%1,5 fisil içeriğe sahip U+Pu ürünü enerji üretimi için direkt olarak nasıl kullanılabilir? Bu sorunun bir cevabı TBİ ürününü CANDU (*CANadian Deuterium Uranium*) reaktöründe yakmak olabilir. LWR'den çıkan KY'nin tam birlikte işlenmesi ile elde edilen U+Pu karışımı herhangi bir fisil malzeme ilavesi yapılmadan ağır-sulu reaktör (*Heavy Water Reactor: HWR*) sınıfına giren CANDU reaktörlerinde yakılabilir. CANDU reaktörleri orijinal olarak doğal U yakıt kullanmak üzere tasarlanmıştır; ancak, daha fazla fisil içeriğe sahip ve aynı zamanda nötron yakalamayla oluşan ²³⁶U, ²⁴⁰Pu, ²⁴²Pu gibi parazitik U ve Pu izotoplarını içeren U+Pu yakıt karışımı da CANDU reaktörlerinde verimli bir şekilde kullanılabilir. PWR-KY'nin tam birlikte işlenmesi ve direkt olarak CANDU reaktöründe kullanılması ile oluşan PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi yanma analizleri ve DUG ve NKDO faktörlerine bakılarak, sonuçların DUPIC alternatifi ve Th (toryum) kullanımı ile mukayesesi bu çalışmanın özgün yanıdır.

PWR-KY'nin CANDU'da direkt kullanımı (*Direct Use of PWR Spent Fuel in CANDU: DUPIC*) anlamına gelen DUPIC senaryosunda herhangi bir ayırma prosesi yer almamaktadır. DUPIC yakıt üretimi sırasında, oksidasyon-redüksiyon işlemi kullanıldığından uçucu ve yarı-uçucu FÜ'nün çoğu gaz haline geçerek uzaklaşmakta ve geriye kalan kısım CANDU yakıtı olarak imal edilmektedir [9, 10, 11, 12]. DUPIC yakıtının CANDU reaktöründe kullanımı ilave bir yanma oranı

sağlamaktadır. DUPIC yakıtı %1,4-%1,5 fisil içeriğe sahip U+Pu karışımı ile birlikte parazitik etkileri bulunan FÜ ve MA'yı içerdiğinden CANDU reaktöründe TBİ ürüne göre daha düşük yanma oranı değerlerine ulaşması beklenmektedir.

U yakıtı Th eklemek suretiyle nükleer kaynaklardan daha verimli ve uzun süre yararlanmak mümkündür. Bu bağlamda, Th'nin günümüz reaktörlerinde değerlendirilmesi de önemli bir konudur. CANDU tipi (HWR sınıfı) reaktörler fisil içeriği nispeten düşük yakıtlar için daha uygun olduğundan Th kullanımı açısından ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada, PWR-CANDU6 birleşik yakıt çevrimi sisteminde bulunan iki geri dönüşüm seçeneği (TBİ ve DUPIC) ile CANDU6 tipi reaktörlerde kullanılan doğal U yakıt çevrimlerine alternatif olabilecek yakıt çevrimlerinden Hafif Zenginleştirilmiş Uranyum (HZU) (*Slightly Enriched Uranium: SEU*) ve Th yakıt çevrimlerinin yanma analizleri yapılmış ve yakıt çevrimleri Doğal U Gereksinimi (DUG) (*Natural U Requirement: NUR*), Doğal U Tasarrufu (DUT) (*Natural U Saving: NUS*) ve Nükleer Kaynak Değerlendirme Oranları (NKDO) (*Nuclear Resource Utilization Factor: NRU*) açısından karşılaştırılmıştır. MCNP5 ve MONTEBURNS kodları ile bütün-kor geometri ve doğrusal olmayan reaktivite modeli kullanarak alternatif yakıt çevrimleri için CANDU6 reaktöründe yanma oranı hesapları yapılmıştır. Yakıtların CANDU6'da ulaşılacakları yanma oranlarına bağlı olarak, farklı yakıt kompozisyonları için DUG, DUT ve NKDO hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve yakıt çevrimleri ile ilgili değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Bu tez, ilki giriş olmak üzere altı Bölümden oluşmaktadır:

İkinci Bölümde, PWR ve CANDU reaktörlerinde kullanılan nükleer yakıt çevrimlerinin anlatımı yapılmış, PWR-CANDU6 birleşik yakıt çevrimi ve CANDU reaktöründe U+Th yakıt çevrimi ile ilgili olarak literatürde daha önce gerçekleştirilen çalışmaların özeti verilmiştir. Üçüncü Bölümde, hesaplama gereçleri olarak kullanılan MCNP ve MONTEBURNS kodlarıyla ilgili bilgilere, PWR ve CANDU6 reaktöründe yanma oranı hesaplama yöntemi ve algoritmaları ile DUG, DUT ve NKDO hesaplarında kullanılan ifadeler yer verilmiştir. Dördüncü Bölümde, HZU ve U+Th yakıt çevrimleri için CANDU6 reaktörü sonuçları verilmiştir. Beşinci Bölümde, PWR-CANDU6 birleşik yakıt çevrimi sonuçları verilmiştir. Altıncı Bölümde, ele alınan bütün yakıt çevrimleri için yapılan

değerlendirmeler ile tezin araştırma problemine ilişkin çıktıları yorumlanmıştır. Bu teze ilişkin destekleyici bilgiler ise eklere konulmuştur.

2. PWR ve CANDU REAKTÖRLERİNDE YAKIT ÇEVİRİMLERİ

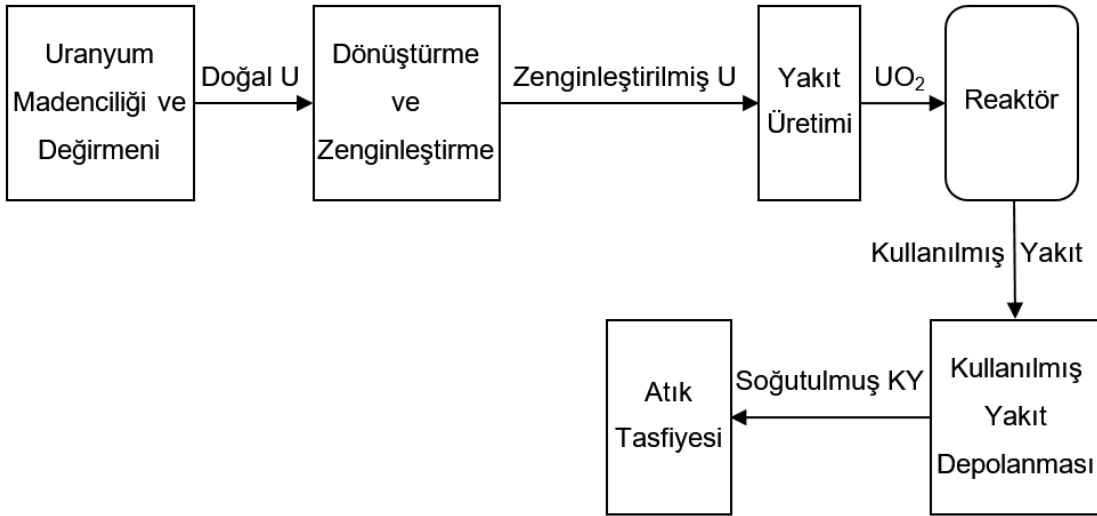
Bu bölümde, PWR ve CANDU reaktörlerinin tez çalışması kapsamında ele alınan nükleer yakıt çevrimleri özetlenmiştir. PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi ve CANDU reaktöründe U+Th yakıt çevrimi ile ilgili literatür çalışmaların özeti verilmiştir.

2.1 Tek-Geçişli Yakıt Çevrimi

Tek-geçişli yakıt çevrimi açık çevrim olarak tanımlanmaktadır. Bu çevrimde KY'nin içindeki U ve Pu'nun geri kazanıldığı yeniden işleme ya da geri dönüşüm yoktur, KY YANA olarak sınıflandırılmakta ve buna göre bertaraf edilmesi planlanmaktadır.

2.1.1 Hafif-sulu Reaktörler (LWR) için Tek-Geçişli Çevrim

Yavaşlatıcı (*moderator*) ve soğutucu (*coolant*) olarak hafif su kullanan reaktörler hafif-sulu reaktör (LWR) olarak adlandırılır. Başlıca LWR tasarımları basınçlı-su reaktörü (PWR) ve kaynar-su reaktörüdür (*Boiling Water Reactor: BWR*). LWR'ler için tek-geçişli nükleer yakıt çevrimi Şekil 2.1'de gösterilmektedir [2].



Şekil 2.1. LWR tek-geçişli yakıt çevrimi

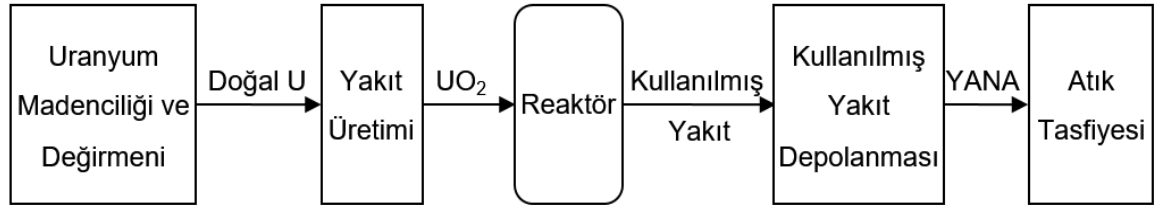
LWR'ler için tek-geçişli yakıt çevrimi, U madenciliği ve değirmeni ile başlar ve madenden elde edilen doğal U U_3O_8 haline getirilir. Zenginleştirme aşamasına girmeden önce hekzaflorüre (UF_6) dönüştürülen U'nun, kütlece yaklaşık %3'ü ^{235}U olacak şekilde zenginleştirilmesinden sonra UO_2 'ye dönüştürülür. Zenginleştirilmiş UO_2 'den LWR'lerde kullanılacak yakıt demetleri üretilir. Tipik bir LWR

reaktöründe yaklaşık üç yıl boyunca ışlandıktan sonra dışarı çıkartılan UO_2 yakıtlar, radyoaktivitesinin azalması ve soğuması için KY havuzlarında bekletilir. Belirli bir süre boyunca bekletilmiş olan KY'ler nihai tasfiyeden önce kuru depolama tesislerine gönderilebilir [2].

2.1.2 Ağır-sulu Reaktörler (HWR) için Tek-Geçişli Çevrim

U Yakıt Çevrimi:

Ağır-sulu reaktörler (HWR) soğutucu ve yavaşlatıcı olarak ağır su kullanır. HWR sınıfına giren doğal U yakıtlı CANDU reaktörü için tek-geçişli nükleer yakıt çevrimi Şekil 2.2'de sunulmuştur [2].

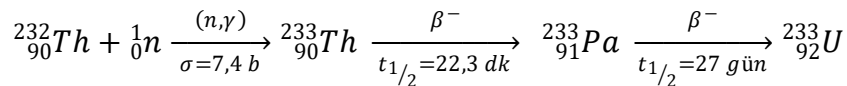


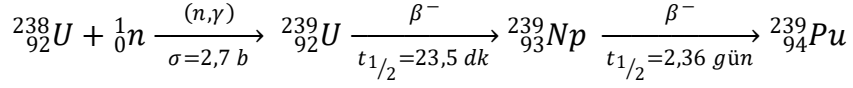
Şekil 2.2. CANDU tek-geçişli yakıt çevrimi

CANDU tek-geçişli yakıt çevriminde, LWR çevriminden farklı olarak zenginleştirme işlemi yer almaz.

U+Th Yakıt Çevrimi:

Th doğada hemen hemen %100 ^{232}Th olarak bulunur; U'ya kıyasla yer kabuğundaki oranı ve cevherlerdeki konsantrasyonu kayda değer ölçüde yüksektir [13]. Th fisil olmayıp doğurgan olduğu için, tek başına nükleer yakıt olarak kullanılamaz, muhakkak en az bir fisil izotopla (^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U) beraber kullanılması gerekir. Bu bağlamda gerçek yakıt değil, yakıtı doğurgan izotop katkısı olarak düşünülmelidir. ^{232}Th , mevcut nükleer yakıtlarda bulunan doğurgan ^{238}U yerine kullanılabilir. Aşağıda verilen reaksiyonlarda gösterildiği gibi, nasıl ki nükleer reaktörlerde ^{238}U fisil ^{239}Pu 'a dönüşüyorsa, ^{232}Th de aynı tepkimelerle fisil ^{233}U 'e dönüşür. ^{238}U yerine ^{232}Th kullanılabilmesi nükleer yakıt kaynaklarından çok daha uzun süre faydalanılmasına olanak sağlayabilir [14].





Üç temel fisil nüklid olan ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$ ve ${}^{239}\text{Pu}$ 'un 2200 m/sn'deki bazı önemli karakteristikleri Çizelge 2.1'de verilmektedir. Çizelgede görüldüğü üzere, ${}^{233}\text{U}$ termal nötronlar için en yüksek fisyon faktörüne ve iyi bir fisyon tesir-kesitine (*cross-section*) sahiptir. Nükleer yakıt olarak ${}^{233}\text{U}$ 'ün iyi bir fisil izotop, ${}^{232}\text{Th}$ 'nin iyi bir doğurgan izotop olduğu söylenebilir [15].

Çizelge 2.1. Üç temel fisil nüklidin bazı önemli karakteristikleri

Nüklid	Fisyon Tesir-Kesiti σ_f (b)*	Soğurma Tesir-Kesiti (σ_a) (b)*	Nötron verimi (ν)	Fisyon Faktörü (η)
${}^{233}\text{U}$	531,1	578,8	2,492	2,287
${}^{235}\text{U}$	582,2	680,8	2,418	2,068
${}^{239}\text{Pu}$	742,5	1011,3	2,871	2,108

*1 b= 10^{-24} cm²

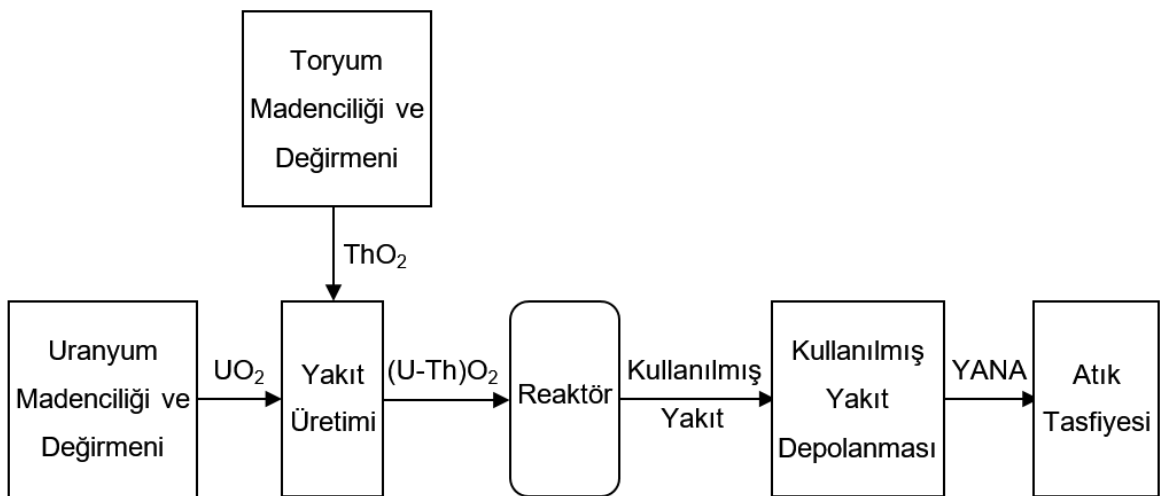
HWR; iyi nötron ekonomisi, işletim sırasında yakıt değiştirebilme olanağı ve farklı yakıt tiplerini kullanabilme potansiyeli gibi avantajlara sahiptir. HWR'lerde Th yakıt çevrimi ile ilgilenilmesi çeşitli stratejik nedenlere dayanmaktadır. Bu stratejik nedenler Uluslararası Atom Enerji Ajansı (IAEA) tarafından 2002 yılında HWR'lerin durumu ve gelişimi ile ilgili olarak yayınlanan bir teknik raporda açıklanmıştır [16];

- Th doğada U'nun yaklaşık üç katı bollukta bulunmaktadır. Bu yüzden Th yakıt çevrimi nükleer yakıt tedarikini uzun dönem boyunca sağlayabilir. Th kaynaklarının bol olduğu ülkelerde, Th yakıt çevrimi nükleer gücün sürdürülebilirliğine ve enerji bağımsızlık derecesinin artırılmasına katkıda bulunabilir [17].
- U+Th yakıtlarda ${}^{232}\text{Th}$ 'den oluşan fisil ${}^{233}\text{U}$ 'ün KY içindeki oranı doğal U yakıtlarda ${}^{238}\text{U}$ 'den oluşan fisil ${}^{239}\text{Pu}$ 'un KY'deki oranının yaklaşık beş katıdır [17].
- Th termal soğurma tesir-kesiti ${}^{238}\text{U}$ 'inkinden 2,75 kat fazla olmasına rağmen, U'dan daha iyi termal ve kimyasal özelliklere sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda, ThO_2 'nin termal iletkenliği UO_2 'ninkinden yaklaşık olarak %50

daha fazladır ve erime sıcaklığı UO_2 'den $340\text{ }^\circ\text{C}$ daha fazladır [18]. Bunun sonucu olarak, ThO_2 için yakıt işletme sıcaklıkları UO_2 'ye kıyasla daha düşük olacaktır. Ayrıca, deformasyon ve yakıttan FÜ gazların difüzyonu ve salınımı gibi termal tetiklenen bütün prosesler UO_2 'ye göre daha az olacaktır [19].

- ThO_2 kimyasal olarak çok karardır ve oksitlenmez, bu durumun normal işletme ve kabul edilen kaza koşulları ile atık yönetiminde faydası vardır [16].
- ^{232}Th , ^{238}U 'e göre daha az MA üretmektedir. Bunun sonucu olarak, Th içeren KY'nin daha düşük radyotoksik değerine sahip olması atık yönetimi açısından önemli olabilir. Ancak, Kanada jeolojik bertaraf kavramına göre, KY'deki aktinitlerin radyolojik riske anlamlı bir katkısı olmamaktadır, bu nedenle bu faydanın düşük olduğu değerlendirilmektedir [20].
- Th yakıt çevrimlerinin kullanılmasıyla U madenlerinden daha uzun süre faydalanılabilir ve çok sayıda Th çevrimi HWR'lerde uygulanabilir. HWR'lerin yüksek nötron ekonomisi Th yakıt çevrimini teorik olarak gerçekleştirilebilir yapmaktadır [21, 22]. Bunun için tek bir reaktör teknolojisi hem kısa hem de uzun dönem için yakıt tedarikini sağlayabilmektedir [16].

Doğal U yakıtlı CANDU reaktörü için tek-geçişli U+Th nükleer yakıt çevrimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. CANDU tek-geçişli U+Th yakıt çevrimi

CANDU reaktörlerinde Th kullanımı ilgili literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Gupta ve arkadaşları tarafından basınçlı ağır-sulu reaktörlerde (*Pressurized Heavy Water Reactor: PHWR*) gelişmiş yakıt çevrimleri incelemeleri kapsamında CANDU reaktörlerinde HZU ve Th kullanımı analiz edilmiştir. Farklı yakıt çevrimleri için birim-hücre yaklaşımı ve homojen kor modeli kullanarak CLUB kodu ile yanma oranı hesapları, yakıt gereksinimi, DUT ile avantaj faktörü hesapları gerçekleştirilmiştir. %1,2 zenginlikte HZU yakıtlarda yanma oranlarının 23300 MW-gün/tU ulaştığı, DUG'un ise %40 oranında azaldığı, toplam Pu üretiminin ise %50 oranında azaldığı; Th kullanımının yanma oranı açısından ^{235}U ve fisil içeriği yüksek Pu ilavesi ile sırasıyla %3 ve %4 zenginlik değerlerinden sonra avantajlı olduğu; etkin Pu yanma ve nükleer yayılma direnci çevrimlerinin PHWR reaktörlerinde Th-Pu beslemesi ile mümkün olabileceği belirtilmiştir [23].

Türkmen ve Zabunoğlu tarafından CANDU6 ve ACR-700 (Gelişmiş CANDU Reaktörü) reaktörlerinde tek-geçişli çevrim için Th kullanımı çalışması gerçekleştirilmiştir [24]. Bu çalışmada HZU ve U+Th karışık yakıtlar için birim-hücre yaklaşımı ile homojen-demet/kor modeli kullanarak MONTEBURNS kodu ile yanma oranı hesapları yapılmıştır. DUG, DUT ve NKDO hesapları gerçekleştirilmiştir. DUG, DUT ve NKDO açısından CANDU6'nın ACR-700'e göre daha avantajlı olduğu gösterilmiştir. CANDU6 reaktörünün düşük yanma oranı, ACR-700 reaktörünün ise daha yüksek yanma oranı uygulamaları için daha uygun olduğu; Th'nin tek-geçişli, homojen kullanımında CANDU6 ya da ACR-700 reaktöründe DUG'un arttığı, NKDO'nun ise azaldığı, tek-geçişli PHWR çevrimi için Th'nin ^{238}U yerine kullanım için uygun olmadığı belirtilmiştir [24].

UAEA tarafından 2002 yılında HWR'lerin durumu ve gelişimi ile ilgili olarak yayınlanan teknik raporda, HWR'lerde kullanılan HZU, DUPIC, TANDEM, MOX (PWR-KY'den geri kazanılan Pu ve HWR-KY'den geri kazanılan Pu ile) ve Th yakıt çevrimleri ile ilgili başta Kanada olmak üzere HWR'ye sahip olan diğer ülkelerdeki (Güney Kore, Hindistan, Arjantin, Romanya) uygulamalar ele alınmıştır [16].

OECD/Nükleer Enerji Ajansı (NEA) tarafından 2015 yılında "Nükleer Yakıt Çevrimlerinde Toryum'a Giriş" isimli bir teknik rapor yayınlanmıştır. Bu raporda, Th'nin nükleer enerjideki kısa ve uzun dönemdeki potansiyel rolü, reaktör teknolojilerindeki farklı seçenekleri, potansiyel kullanıcıları ve güncel uygulamaları

içermektedir. Söz konusu raporda, HWR'lerde Th kullanımı ile ilgili olarak çeşitli uygulamalara ve analizlere yer verilmektedir [15].

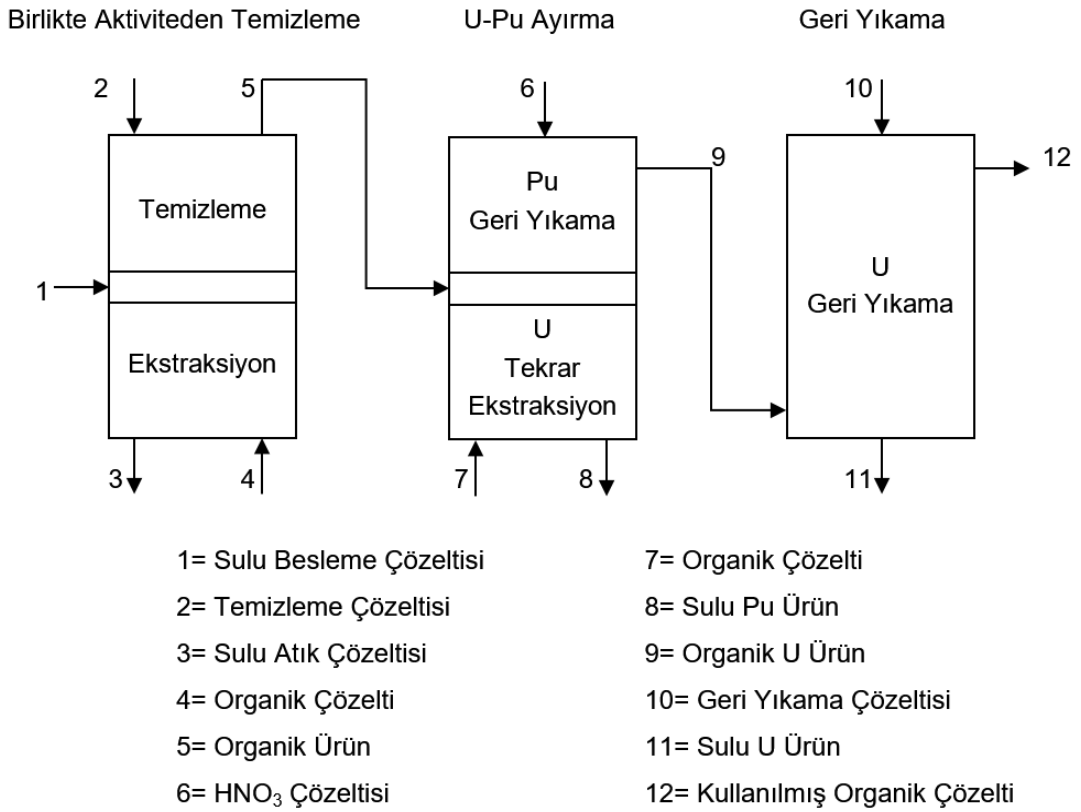
2.2 Standart Yeniden İşleme Yakıt Çevrimi

Nükleer güç reaktörlerinden çıkan KY kimyasal yollarla yeniden işlenerek içerdiği U ve Pu (varsa Th) geri kazanılabilir ve tekrar reaktör yakıtı olarak kullanılabilir. 2016 yılı itibariyle dünya çapında nükleer güç reaktörlerinden çıkan toplam 90 000 ton KY yeniden işlenmiştir [25].

KY'nin yeniden işlenmesi bir ayırma prosesini içermektedir. Ayırma işleminin üç temel hedefi Benedict ve arkadaşları tarafından şu şekilde tanımlanmaktadır: 1) U ve Pu'nun (varsa Th'nin) nükleer yakıt olarak tekrar kullanılması için geri kazanılması; 2) FÜ'nün uzaklaştırılması; 3) KY'deki radyoaktif bileşenlerin güvenli ve uzun dönem depolama için uygun formlara dönüştürülmesidir [1]. İlk yeniden işleme operasyonları 1944'te ABD Oak Ridge Ulusal Laboratuvarında askeri amaçlarla reaktörde sadece birkaç ay ışınlanmış düşük yanma oranlı KY'lerden Pu'nun geri kazanılması için bizmut-fosfat çöktürme prosesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [25]. Yeniden işleme için birçok metot önerilmiş olsa da en uygunu solvent ekstraksiyon olmuştur. KY'den U ve Pu'nun büyük ölçekli ayırımı için 1951 yılında ABD Argonne Ulusal Laboratuvarında "Redüksiyon ve Oksidasyon" (*Reduction and Oxidation: REDOX*) prosesi geliştirilmiştir. Hekson (*hexone*) solvent ile sulu fazda alüminyum nitrat içeren bu prosesin, bizmut fosfat prosesine göre daha az atık üretmesi ve daha iyi ekstraksiyon yapması gibi avantajları olmasına rağmen hekson solventin uçucu ve yanıcı olması dezavantajı olarak görülmüştür [1]. 1952 yılında ABD Oak Ridge Ulusal Laboratuvarında U ve Pu'yu çok verimli şekilde ayıran "Plütonyum ve Uranyum Ekstraksiyon" (*Plutonium and Uranium Extraction: PUREX*) prosesi geliştirilmiştir. Bugün dünyada işletme halinde olan bütün ticari yeniden nükleer yakıt işleme tesisleri kesin olarak kanıtlanmış solvent ekstraksiyon metodu olan PUREX kullanmaktadır. PUREX prosesi, derişik nitrik asit ile çözerek elde edilen KY (nitrat) çözeltisinin bir hidrokarbon seyreltici içinde hacimce %30 tri-bütil fosfat içeren organik çözelti ile teması yoluyla U ve Pu'nun organik faza ekstraksiyonu esasına dayanır. PUREX'te TBP kullanılması çok teknik ve ekonomik olmuştur, bu yüzden TBP yerine kullanılacak başka çözücü aranmasına gerek yoktur. 1999 yılında PUREX

prosesinin modifikasyonu ile sadece U'nun çıkartıldığı "U ekstraksiyon" (UREX) prosesi geliştirilmiştir. UREX prosesi Pu ve neptünyum (Np) ekstraksiyonunu azaltan acetohydroxamic asit (AHA) ilavesi içermektedir [26].

PUREX metoduna dayalı Standart Yeniden İşleme (SYİ) üç ana adımdan oluşur: (1) birlikte aktiviteden temizleme; U ve Pu, FÜ ve MA'dan birlikte temizlenir, (2) U-Pu ayırma; Pu U'dan ayrılır ve (3) geri yıkama; U yıkanarak sulu faza geri alınır. U ve Pu ürünleri FÜ'den yeterince temizlenmemiş ise ilave ekstraksiyon ve geri yıkama adımları kullanılır. SYİ'nin akım şeması Şekil 2.4'te verilmiştir [3].



Şekil 2.4. SYİ akım şeması

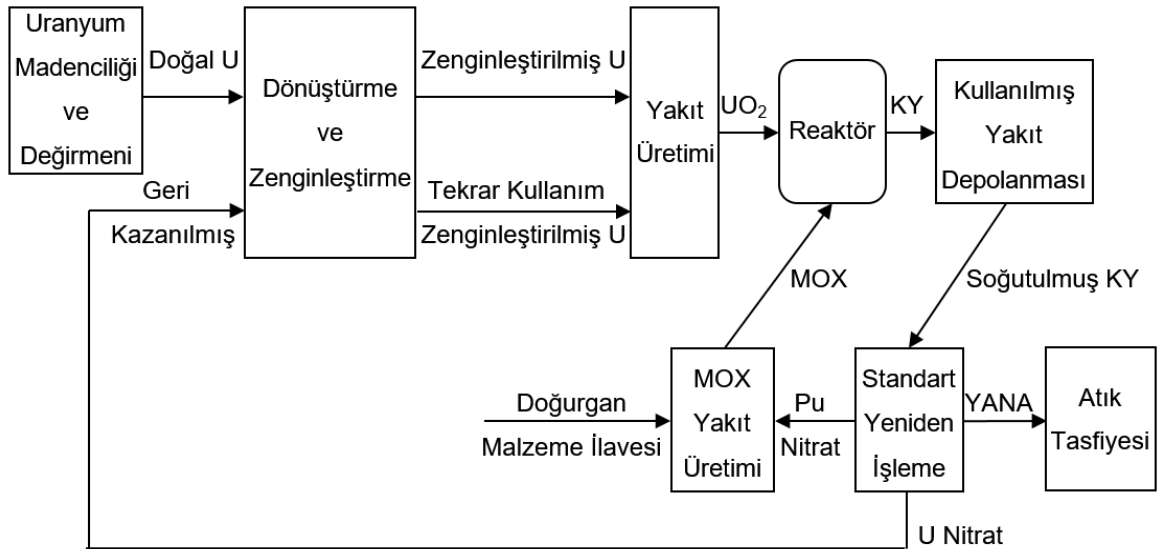
PUREX solvent ekstraksiyon yöntemindeki proseslerin detayları şu şekildedir [8]:

Ekstraksiyon: U, Pu ve FÜ'den oluşan sulu çözelti bir seyreltici içerisinde olan TBP ile temas ettiği zaman, U ve Pu'nun hemen hemen hepsi çözücünün olduğu organik faza geçmektedir. Dağılım katsayılarının farklılığından dolayı, FÜ sulu fazda kalmaktadır. Bu işleme "ekstraksiyon" denir ve istenilen/istenilmeyen ayrımı ilk olarak bu aşamada yapılır.

Temizleme (Scrubbing): Temizleme aşamasında; U ve Pu'un hemen hemen tamamını FÜ'nün ise çok azını içeren organik çözelti, HNO₃ çözeltisi ile yıkanır. Böylece, organik fazda tutunmuş FÜ'den ilave temizlik sağlanır.

Geri yıkama: U ve Pu ile yüklü olan çözücü faz seyreltik HNO₃ çözeltisi ile temas ettiğinde, HNO₃'ün düşük konsantrasyonlarında U ve Pu'nun dağılım katsayılarının küçük olmasından dolayı, U ve Pu'nun hemen hemen tamamı sulu faza geçer. Bu işlem "geri yıkama" olarak adlandırılır ve istenilen ürün daha sonraki aşamalar için en uygun form olan sulu faza (nitrat çözeltisi) alınmış olur.

SYİ'nin ürünü saf U ve saf Pu çözeltisidir. U ürün içerisindeki ²³⁶U'nun yakalama-fisil tesir-kesiti oranının yüksek olması yüzünden tekrar kullanım için taze yakıt fisil içeriğinden daha yüksek bir değere zenginleştirilir [5]. Pu ürün ise, fisil içeriği taze yakıtın fisil değerinden oldukça fazla olan karışık oksit (*Mixed Oxide: MOX*) yakıt elde etmek için doğurgan malzeme (doğal U, tüketilmiş U ya da geri kazanılmış U) ile karıştırılır [6]. MOX yakıt içerisinde bulunan Pu'nun bazı parazitik izotopları yüzünden, MOX yakıtı taze U yakıtı eşdeğer yapan toplam fisil içerik doğrusal olmayan reaktivite model kullanılarak yapılan yanma (*burnup*) hesapları ile bulunabilmektedir [6]. SYİ'ye dayalı LWR yakıt çevrimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. SYİ'ye dayalı LWR yakıt çevrimi

2.3 Tam Birlikte İşleme Yakıt Çevrimi

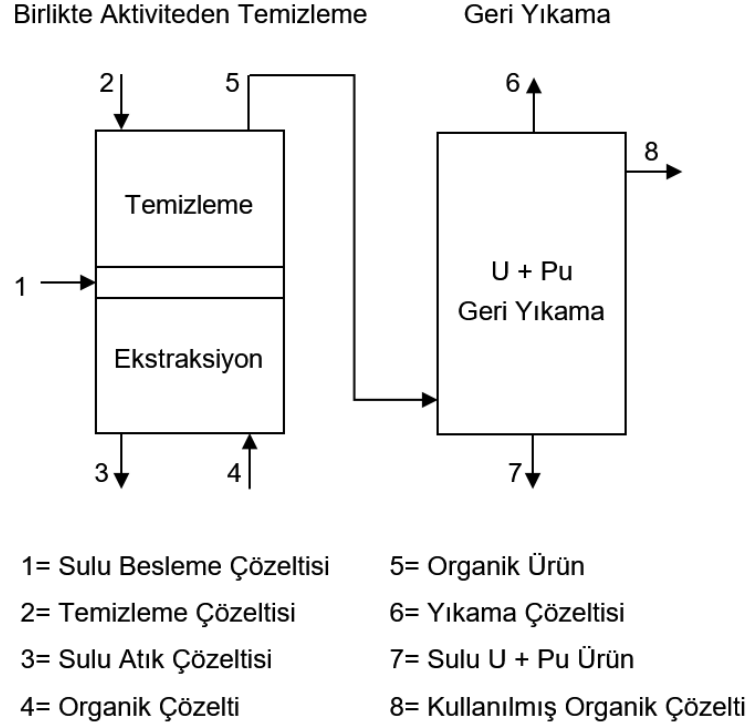
Tam Birlikte İşleme (TBI) yönteminde, KY'deki U ve Pu bütün işlemler boyunca FÜ'den birlikte temizlenir ve geri kazanılır. Hiç bir aşamada U ve Pu birbirinden ayrılmaz ve elde edilen tek ürün karışık U ve Pu çözeltilisidir. Kısmi birlikte işlemeden [7] ayırt etmek için, "tam birlikte işleme" olarak adlandırılır [8].

Kısmi birlikte işlemede ise, U ve Pu, FÜ'den birlikte temizlendikten sonra, saf bir U çözeltisi ve karışık bir U+Pu çözeltisi elde etmek için, kısmi ayırma prosesi uygulanır. Kısmi ayırma prosesinde akış hızlarının ayarlanmasıyla, direkt MOX yakıt olarak kullanıma uygun fisil içeriğe sahip bir U ve Pu çözeltisi elde olunur. Uzun süreli soğutulmuş KY'nin kısmi ayırma ile işlenmesine ait akım şemaları, tesis tasarımı ve maliyet analizi 25-30 sene önce çalışılmış ve ekstraksiyon şemaları yayınlanmıştır [7].

Şekil 2.6'da TBI'nin akım şeması gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, SYİ, ayırma kısmının atılmasıyla iki aşamalı, basit bir prosese dönüşmüştür [3]. TBI akım şeması ve karşılaştırmalı maliyet analizleri ilk defa Özdemir ve Zabunoğlu tarafından çalışılmış ve yayınlanmıştır [3, 4, 8]. TBI'nin detayları şu şekildedir;

Birlikte aktiviteden temizleme: U ve Pu'nun FÜ'den temizlendiği ilk adım, ekstraksiyon ve temizleme işlemlerinden oluşmaktadır. Bu iki işlem aynı kolonun alt ve üst kısmında yapılmaktadır. Besleme çözeltisi kolonun orta noktası yakınından girer. U ve Pu'nun hemen hepsi kolonun üstünden alınan organik faza taşınırken, FÜ ve MA'nın çok büyük kısmı alttan alınan sulu fazda kalır. Bu sulu faz YANA çözeltisi olarak tanımlanır.

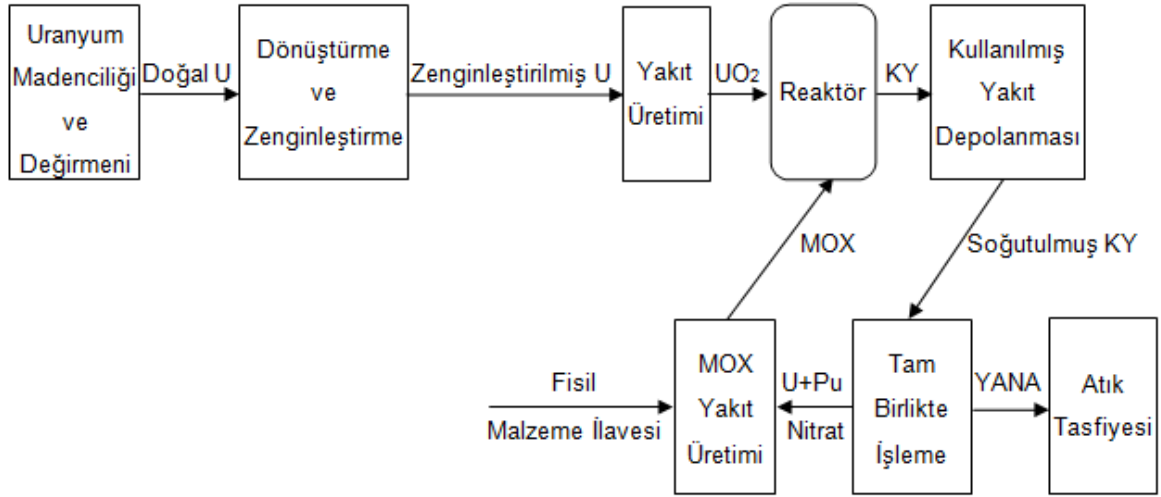
Geri yıkama: FÜ ve MA'dan temizlenmiş U ve Pu içeren organik faz, çok seyreltik nitrik asit çözeltisi ile yıkanarak U ve Pu (daha sonraki işlemler için uygun olması nedeniyle) sulu faza geri taşınır.



Şekil 2.6. TBİ akım şeması

İki nispeten kolay adımdan oluşan TBİ, SYİ'ye kıyasla teknolojik basitlik ve maliyet açısından avantaj getirmektedir. Ayrıca, TBİ'nin hiç bir aşamasında Pu saf olarak bulunmayacağından, geri kazanılan ürünün nükleer silah malzemesi olarak kullanılabilmesi (ileri teknoloji gerektirdiği için) SYİ'dekine göre çok daha zor olacaktır. Bu da prosesi nükleer güvence denetimi açısından avantajlı kılmaktadır [8].

TBİ ürünü yaklaşık %1,5'lik fisil içeriğine sahip U ve Pu çözeltisidir. Şekil 2.7'de TBİ'ye dayalı LWR yakıt çevrimi gösterilmiştir. KY'nin tam birlikte işlenmesi sonucunda ortaya çıkan U+Pu ürününden LWR'ye uygun MOX yakıt üretmek için fisil içeriği yeterince yüksek bir madde ile karıştırmak gerekir. Yüksek fisil içerikli madde olarak, zenginleştirilmiş U, SYİ tesisinden çıkan Pu veya silahlardan bozma Pu ya da U kullanılabilir [4].



Şekil 2.7. TBI'ye dayalı LWR yakıt çevrimi

Literatürde alternatif yeniden işleme şemalarının karşılaştırması ile ilgili bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Chandler tarafından LWR yakıtları için karmaşıklık, güvenlik, atıklar ve nükleer güvence denetimi gibi çeşitli özellikler üzerinden yeniden işleme metotları karşılaştırılmış ve bir karar analiz metodolojisi sunulmuştur. Buna göre, belirlenmiş çeşitli faktörlerin ağırlığı eşit alındığında en iyi tercih TBİ olmaktadır. İşletme sıcaklıkları ve nükleer güvence denetimi faktörleri ön plana çıkarıldığında da tercih aynı kalmaktadır [27].

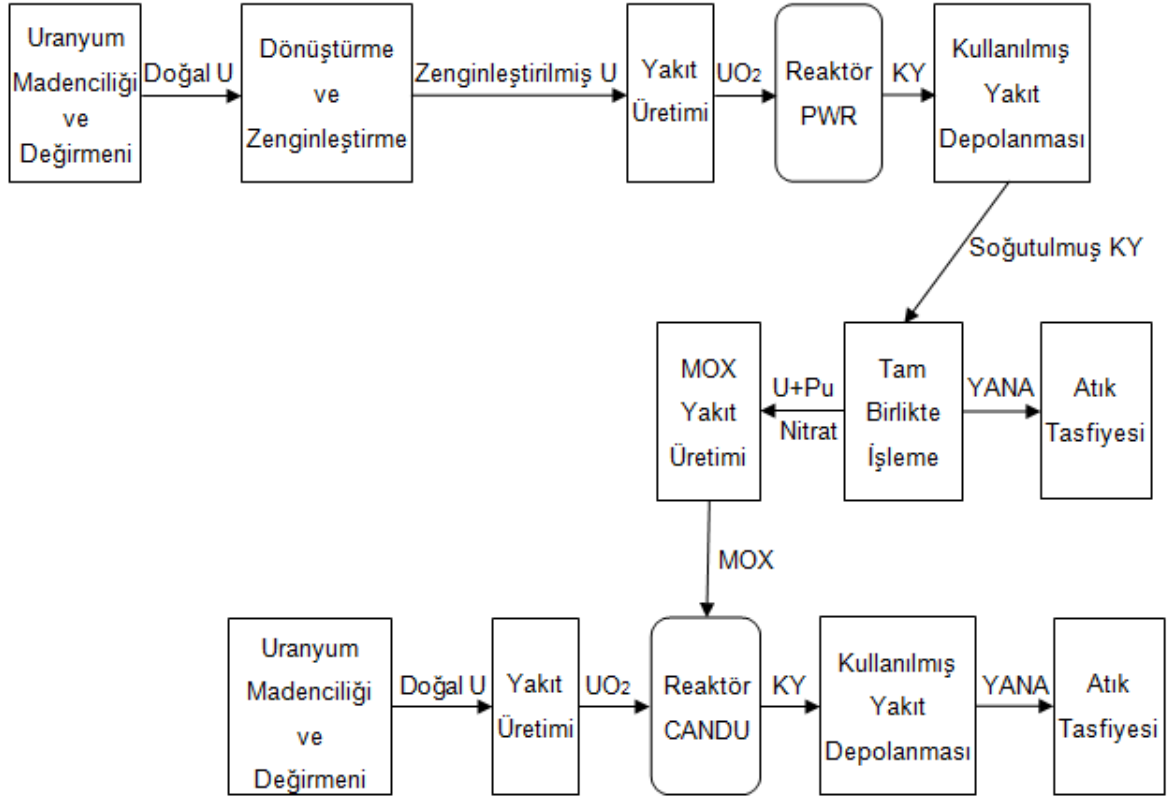
2.4 PWR-CANDU Birleşik Yakıt Çevrimi

PWR-CANDU birleşik yakıt çevriminde iki ana seçenek vardır: (1) TBİ ve (2) DUPIC.

2.4.1 Tam Birlikte İşleme (TBİ) Seçeneği

Literatürde TANDEM yakıt çevrimi olarak da adlandırılan TBİ seçeneğinde [16], PWR'den çıkan KY'den geri kazanılan, FÜ ve MA'dan, yaklaşık %1,4 ila %1,5 arasında fisil içeriğe sahip U+Pu karışımı CANDU reaktöründe yakıt olarak kullanılabilir. TBİ'ye dayalı PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi Şekil 2.8'de gösterilmektedir.

TBİ çevriminde bütün parazitik izotopların PWR-KY'den ayrılması, CANDU reaktöründe en yüksek yanma oranı değerine ulaşılmasını sağlamaktadır.



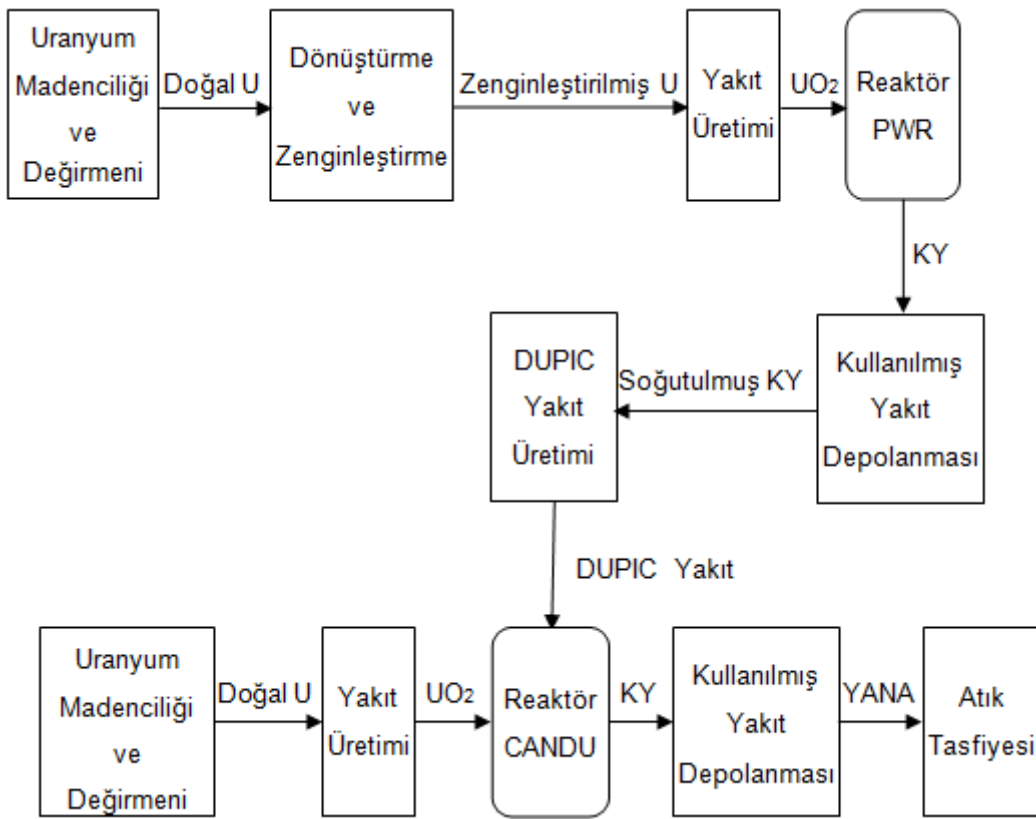
Şekil 2.8. TBİ'ye dayalı PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi

Orijinal TANDEM yakıt çevrimi kavramı U+Pu karışımından FÜ ve MA'nın ayrılmasını sağlayan bir "kimyasal temizleme" prosesini içermektedir. U ve Pu'nun birbirinden ayrılmaması teknolojik basitlik getirmekte, SYİ'ye göre ekonomik açıdan ve nükleer güvence denetimi açısından avantajlı kılmaktadır [16, 28].

TANDEM yakıt çevrimi Kanada Atom Enerjisi Şirketi (AECL) ve Kore Atom Enerjisi Araştırma Enstitüsü (KAERI) şirketleri tarafından 1980'lerin başlarında birlikte incelemiş ve bu çevrim ile ilgili olarak küçük çalışmalar yapılmış olsa da daha çok DUPIC çevrimine odaklanılmıştır. TANDEM çevrimi ve benzerleri gelişmiş geri dönüşüm seçeneği olarak düşünülmektedir. Hindistan'da ise nükleer güvence çalışmaları kapsamında Tarapur'da bulunan BWR sınıfına giren bir reaktörden çıkan KY'nin tam birlikte işlenmesi sonucunda elde edilen U ve Pu'nun 19 elemanlı yakıt demetine sahip HWR tipi reaktörde yakılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [16].

2.4.2 DUPIC Seçeneği

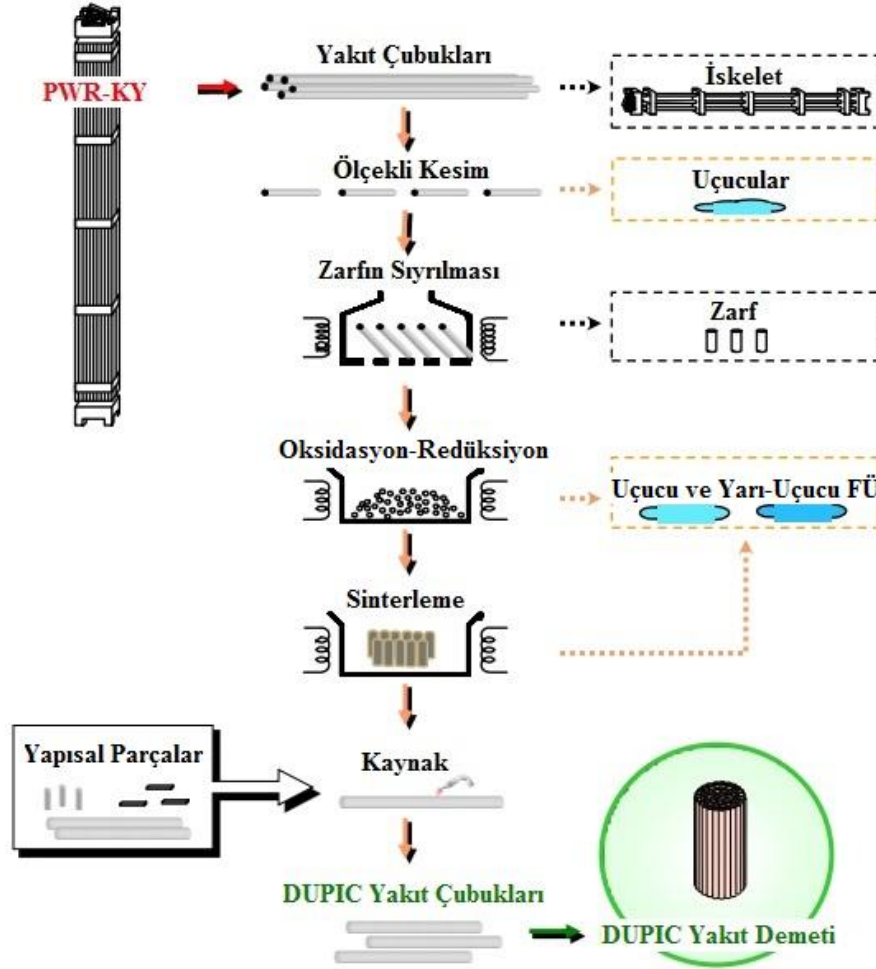
PWR-KY'nin CANDU reaktörlerinde direkt olarak kullanıldığı DUPIC seçeneğinde PWR'dan çıkan KY'den herhangi bir element ayırmaksızın, oksidasyon-redüksiyon yoluyla sadece uçucu ve yarı-uçucu FÜ'nün birçoğu uzaklaştırılmaktadır [9, 10, 11, 12]. Oksidasyon-redüksiyon için AIROX (*Atomics International Reduction OXide fuels*) ya da OREOX (*Oxidation and REduction of OXide fuels*) metotları kullanılmaktadır. Oksidasyon-redüksiyon prosesi sonrası, uçucu ve çoğu yarı-uçucu FÜ hariç PWR-KY (tüm içeriği ile) CANDU yakıtı olarak üretilmektedir [29]. DUPIC'e dayalı PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. DUPIC'e dayalı PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi

DUPIC modelinde PWR'den çıkan KY su dolu havuzlarda bir süre bekletilerek ısı üretiminin ve radyasyon seviyesinin düşmesi sağlanır. Soğutma aşamasından sonra, KY CANDU reaktöründe kullanılacak yakıt demetlerine dönüştürülmek üzere DUPIC yakıt üretim tesisine gönderilir. Bu tesiste yakıt çubukları yakıt demetinden ayrıldıktan sonra PWR-KY'nin CANDU yakıt çubuklarına uygun boyutlarda kesimi yapılmaktadır. Kesim aşamasında uçucu olan FÜ'nün bir kısmı

uzaklaşmaktadır [29]. Yakıtların etrafındaki zarfların sıyrılmasından sonra yakıt peletlerinin toz haline dönüşmesi için oksidasyon-redüksiyon prosesi kullanılmaktadır. Oksidasyon-redüksiyon prosesinde (AIROX ya da OREOX) peletler yüksek sıcaklıklara maruz kalmakta ve uçucu ve yarı-uçucu FÜ'nün birçoğu bu esnada uzaklaşmaktadır. Yakıt tozları sinterlendikten sonra yapısal parçalar ile kaynak yapılarak DUPIC yakıt çubukları ve CANDU'da kullanıma hazır yakıt demetleri üretilir [29]. DUPIC yakıt üretim prosesi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. DUPIC yakıt üretim prosesi [29]

PWR-KY'nin CANDU reaktörlerinde direkt olarak kullanılması olarak tanımlanan DUPIC çevrimi projesi ilk olarak Güney Kore tarafında önerilmiş ve ABD tarafından desteklenilmiştir. Güney Kore/KAERI, Kanada/AECL ve ABD/LANL (Los Alamos Ulusal Laboratuvarı) tarafından 1990'ların başında kuru geri dönüşüm seçeneklerinin değerlendirilmesi çalışmalarında işbirliği yapmışlardır. UAEA bu programa güvence kapsamında dâhil olmuştur [16]. 2000'li yılların başlarında

Güney Kore tarafından test amaçlı DUPIC peletleri ve yakıt çubukları üretilerek, Güney Kore'de bulunan HANARO araştırma reaktöründe yüksek-güç ışınlama, yüksek yanma ışınlama, enstrümantasyon ışınlama testlerine tabi tutulmuştur. 2005 yılında ise yüksek yanma oranına sahip PWR-KY'yi kullanarak DUPIC yakıt üretimi gerçekleştirilmiştir [30].

Choi ve arkadaşları tarafından DUPIC yakıtlarının CANDU reaktörlerine uyumluluğu ile ilgili fizik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada DUPIC yakıt tasarımının ve analizinin detayları verilmiştir. DUPIC korunun özellikleri, CANDU reaktörü işletme koşulları ve doğal U kor performansı ile karşılaştırılmıştır. Kanal ve yakıt demeti güçlerinin işletme limitlerinin altında kaldığı ve DUPIC korunun güvenlik performansının doğal U kuru ile karşılaştırılabilir olduğu ortaya konmuştur [9].

Literatürde DUPIC yakıt üretiminin, kullanımının ve yakıt çevriminin maliyeti ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Choi ve arkadaşları tarafından DUPIC yakıt üretimi birim maliyetinin 616 \$/kg olduğu tahmin edilmiştir. Tesisin üretim kapasitesinin birim maliyeti etkileyen en büyük faktör olduğu belirtilmiştir [31]. DUPIC yakıt kullanım ve ekstra depolama soğutma kapasitesinin her bir ünite CANDU reaktörü için 3 750 000 \$ (Aralık 1999) olduğu tahmin edilmiştir. Yakıt çevrimindeki diğer bileşenlerin birim maliyeti ile karşılaştırıldığında DUPIC yakıt kullanımının bütün yakıt çevrimi maliyetine küçük bir etkisi olacağı düşünülmektedir [32]. Ko ve arkadaşları ise DUPIC yakıt çevrim maliyetini Monte Carlo simülasyonları kullanarak analiz etmişler ve DUPIC yakıt seçenekleri için 0,621 ile 0,634 cent/kW.saat arasında olduğunu tahmin etmişlerdir. Bu değer tek-geçişli yakıt çevrim maliyetinden 0,007 ile 0,027 cent/kW.saat arasında daha küçük olduğunu belirtmişlerdir [33].

Yang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise DUPIC yakıt teknolojisinin durumu ve beklentileri ele alınmıştır. Çalışmada DUPIC yakıt çevriminin teknik uygunluğu ve ekonomisi ile DUPIC yakıtlarının pratik kullanımı için deneysel doğrulama planına yer verilmiştir. KAERI tarafından DUPIC yakıt elemanlarının laboratuvar ölçeğinde uzaktan kontrollü yakıt üretim tesisinde üretildiği, ticari boyutta DUPIC yakıt teknolojisi geliştirmek için teknik problemlerin olmamasının beklendiği ifade edilmiştir [12].

Bollmann tarafından DUPIC çevrimi çevresel ve ekonomik performansının optimizasyonu ile ilgili bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bollmann'ın çalışmasında U kullanımı ve KY üretim verimliliği göre PWR ve CANDU yakıt çevrimleri ile karşılaştırmalı çevrim performansı analizi yapılmış ve DUPIC çevrimi oldukça verimli bulunmuştur. DUPIC çevrimi yanma oranı hesapları için CASMO kodu kullanılmıştır. AIROX prosesi boyunca çıkartılan FÜ'nün oranlarıyla ilgili bir model ortaya konulmuştur [34].

DUPIC yakıt çevrimi hem PWR hem de CANDU teknolojisine sahip olan ülkelere çeşitli faydalar sunabilir, bunlar [16];

- Bütün yakıt çevrimleri boyunca nükleer silahların yayılmasının engellenmesi için yüksek dereceli önlem,
- Geleneksel yeniden işleme ve MOX yakıt üretim tesislerinden daha düşük yakıt dönüşüm ve üretim maliyetleri beklentisi,
- U kaynaklarının daha yüksek oranda kullanımı,
- Üretilen birim elektrik enerjisi başına düşen KY miktarında azalma,
- Jeolojik bertaraf maliyetinde azalma.

3. HESAPLAMA GEREÇLERİ VE YÖNTEMLERİ

3.1 Hesaplama Gereçleri

Çalışma süresince gerçekleştirilen hesaplamalarda kullanılan MCNP (*Monte Carlo N-Particle Transport Code*) kodunun 5. versiyonu (MCNP5) ile MONTEBURNS kodunun 2. versiyonu (MONTEBURNS2) ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda sunulmuştur.

3.1.1 MCNP5

MCNP, ABD Los Alamos Ulusal Laboratuvarı (LANL) tarafından yazılmış, genel amaçlı, sürekli enerjide hesap yapabilen, genelleştirilmiş geometrili, zamana bağımlı, nötron/foton/elektron modlarında çalışabilen, Monte Carlo tekniğini kullanan bir parçacık transport kodudur [35].

Monte Carlo tekniği bir sistem içerisindeki her bir parçacığın davranışını çoklu bilgisayar simülasyonları ile modelleyerek sistem karakteristiğini ortaya çıkartan istatistiksel bir metottur. Bir Monte Carlo kodu olasılık dağılımlarından gelen rastgele örneklerle dayanarak bir parçacık için istatistik geçmişi üretir. Bu dağılımlar parçacıkların yaşamları süresince yaptıkları etkileşimlerin tipinin, eğer parçacık saçılma yaparsa parçacığın enerjisinin, geometrik sınırlardan dolayı sistemden kaçan parçacıkların sayısının ve eğer nötron fisyon yaparsa açığa çıkan nötronların sayısının belirlenmesi için gereken hesaplamalarda kullanılır. Parçacığın belirli bir şekilde davranması (saçılma, soğurma, fisyon) olasılığı parçacığın etkileşeceği malzemenin tesir-kesiti değerlerinden sağlanabilir. Bu yüzden, bir Monte Carlo kodu bir sistem içindeki çeşitli bölgelerdeki farklı tipte parçacıkların akılarının belirlenebilmesi için parçacıkların büyük bir bölümünün yaşamları boyunca meydana gelen olaylar dizisini modelleyebilir. Hesaplanan parçacık akıları daha sonra sistemle ilgili çeşitli bilgilerin (reaksiyon oranı, ısınma oranı, dozlar gibi) listelenmesinde kullanılmaktadır [35].

Stokastik esasa dayalı Monte Carlo metotları ile deterministik esasa dayalı taşınım (*transport*) metotları oldukça farklıdır. Deterministik metotlar, ortalama parçacık davranışı için taşınım denklemini çözerken, Monte Carlo bireysel parçacıkların benzeşimlerini yaparak ve ortalama davranışa ait bazı bilgileri kaydederek çözüme

ulaşır. Deterministik metotlar tam bilgiler verirken, Monte Carlo sadece kullanıcı tarafından özel olarak istenilen bilgileri vermektedir.

Monte Carlo karmaşık üç-boyutlu, zamana bağlı problemleri çözmek için oldukça uygundur. Bunun nedeni Monte Carlo metotlarının faz konum kutularını kullanmamasıdır, konum, enerji ve zaman için ortalama yaklaşımlara gerek duymamasıdır. Bu durum özellikle fiziksel verilerin bütün yönleriyle detaylı bir şekilde sunulması bakımından önemlidir.

MCNP kullanıcısı tarafından oluşturulan girdi dosyası problem ile ilgili şu bilgileri içermektedir: geometri özelliği; tesir-kesitinin seçimi ve malzemelerin tanımı; nötron, foton veya elektron kaynağının karakteristiği ve lokasyonu; istenilen cevapların tipi ve problemin çözüm etkinliğini arttırmak için gereken varyans azaltma teknikleri.

MCNP'de nokta tabanlı tesir-kesiti verileri kullanılmıştır. Nötronlar için, ENDF/B-VI gibi belirli tesir-kesiti değerlendirmelerinde verilen bütün reaksiyonlar dikkate alınmıştır. Termal nötronlar hem serbest gaz hem de $S(\alpha,\beta)$ modeller ile tanımlanmıştır. Fotonlar için, koherent ve inkoherent saçılmaları, fotoelektrik soğurulma sonrası floresan yayılma olasılığını ve elektron-pozitron çift oluşumunda soğurulmayı hesaba katılmaktadır. Elektron-pozitron taşınım prosesi çoklu Coulomb saçılmayı, x-ışınlarını içeren ikincil parçacık üretimini, bremsstrahlung ve gama ışınlarının yok olmasını dikkate alınmaktadır [35].

Birçok önemli özellik MCNP'nin çok yönlü ve kullanımının kolay olmasını sağlamaktadır. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir; kaynak çeşitlerinin zenginliği (güçlü bir genel kaynak, kritiklik kaynak ve yüzey kaynak); geometri ve çıktı çizimlerinin olması; zengin varyans azaltma tekniklerini bulundurması; esnek bir sonuç yapısının olması ve geniş bir tesir-kesiti veri kütüphanesine sahip olması.

MCNP Hesaplamaları

MCNP kullanarak özel bir zamandaki sistem içerisindeki nötron sayısının bir önceki nesilde var olan nötron sayısına oranını belirten etkin çoğaltma faktörü (k_{eff}) değeri hesaplanabilir. MCNP tarafından gerçekleştirilen k_{eff} ve hücre akısı hesaplarının detayları aşağıda verilmiştir [35].

- **Etkin çoğaltma faktörü:** MCNP'de etkin çoğaltma faktörünün tanımı şu

şekildedir;

$$k_{eff} = \frac{i+1 \text{ neslindeki fisyon nötronları}}{i \text{ neslindeki fisyon nötronları}}$$

$$= \frac{\rho_a \int_V \int_0^\infty \int_E \int_\Omega v \sigma_f \phi \, dV \, dt \, dE \, d\Omega}{\int_V \int_0^\infty \int_E \int_\Omega \nabla \cdot \mathbf{J} \, dV \, dt \, dE \, d\Omega + \rho_a \int_V \int_0^\infty \int_E \int_\Omega (\sigma_c + \sigma_f + \sigma_m) \phi \, dV \, dt \, dE \, d\Omega}$$

Burada değişkenler; t, E ve Ω sırasıyla zaman, enerji ve yönü belirtmektedir. Payda terimi; sızıntı, yakalama ($n,0n$), fisyon ve çarpım (n,xn) terimlerinin toplamı olmak üzere kayıp hızını vermektedir. Parçacık dengesiyle, kayıp hızı aynı zamanda kaynak hızıdır. Eğer bir nesilde üretilen fisyon nötronlarının sayısı bir öncekinde üretilenlerin sayısına eşitse sistem kritiktir; eğer büyükse süper-kritik, küçükse alt-kritiktir.

- **Hücre Akısı:** Bir hücre üzerinden ortalama akı (F4) değerinin hesabı aşağıda verilmiştir;

$$F4 = \frac{1}{V} \int_{E_i} dE \int_{t_j} dt \int dV \phi(\vec{r}, E, t)$$

$$\bar{\phi}_V = \frac{1}{V} \int dE \int dt \int d\Omega \psi(\vec{r}, \Omega, E, t)$$

\vec{r}, Ω, E, t = parçacık pozisyon vektörü (cm), yön vektörü, enerji (MeV), zaman (s)

ψ = açısal akı, n:parçacık yoğunluğu, v:hız olmak üzere $\psi(\vec{r}, \Omega, E, t) = vn(\vec{r}, \Omega, E, t)$

V = hacim (cm³),

$\bar{\phi}_V$ = tek bir hücre üzerinden ortalama akı (hacimsel), (parçacık/cm²).

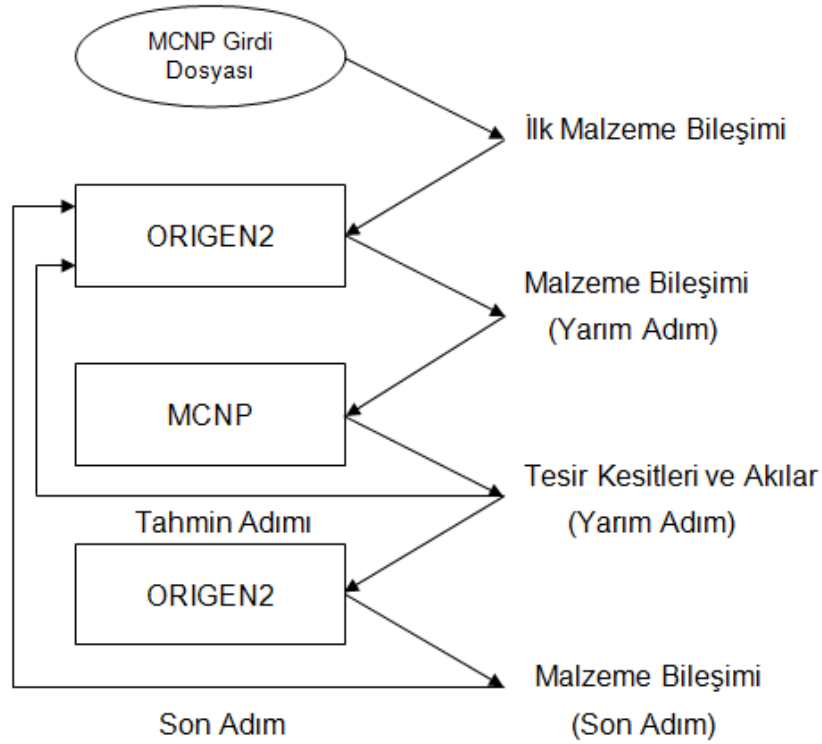
3.1.2 MONTEBURNS2

MONTEBURNS, Monte Carlo transport kodu MCNP ile radyoaktif bozunum (*decay*) ve yanma kodu ORIGEN2'nin bir arada çalışmasını sağlayan bir ara yüz programıdır. MONTEBURNS çeşitli malzeme ekleme/çıkarma özelliklerine, güce ve zaman aralıklarına bağlı olarak birçok sayıda kritiklik ve yanma sonuçları üretmektedir. Program; sistem geometrisi, ilk malzeme bileşimi, ekleme/çıkarma özellikleri ve koda özel diğer parametreleri içeren girdi dosyasını işlemektedir.

MCNP, ORIGEN2 ve diğer hesaplamalardan çıkan sonuçlar kodun çıktısıdır. MONTEBURNS kodunun temel fonksiyonu tek-grup tesir-kesiti ve akı değerlerini

MCNP'den ORIGEN2'ye transfer etmek ve daha sonra ışınlama (*irradiation*) ve bozunum sonrası oluşan malzeme bileşimini ORIGEN2'den MCNP'ye tekrar transfer ederek çevrim boyunca MCNP ve ORIGEN2 arasında gerçekleşen transferleri tekrarlamasıdır.

Kodun temel gereksinimi çalışan bir MCNP girdi dosyası ve ORIGEN2 için gereken diğer girdi parametreleridir. MCNP, ORIGEN2 ve diğer hesaplamalar MONTEBURNS tarafından gerçekleştirilmektedir. MONTEBURNS programının işleyişinde MCNP ve ORIGEN2 ile olan ilişkileri Şekil 3.1'de gösterilmektedir [36].



Şekil 3.1. MONTEBURNS programının işleyiş şeması

ORIGEN2 Hesaplamaları

ORIGEN2 matris exponansiyel metodunu kullanarak MONTEBURNS için yanma hesaplarını gerçekleştirmektedir. ORIGEN2 aynı anda zamana bağlı formülü, yıkımı (*destruction*) ve bozunumu dikkate almaktadır. Bu hesaplamalar için (1) malzemenin ilk bileşimi ve miktarı, (2) her bir izotop için tek-grup mikroskopik tesir-kesitleri, (3) eğer istenirse malzeme ekleme ve çıkarma oranları, (4) ışınlama süreleri ve (5) ışınlama gücü ya da akı değerleri gerekmektedir. ORIGEN2 için gerekli olan bu bilgiler kullanıcı tarafından girdi dosyasında verilmelidir.

ORIGEN2, sabit katsayılı ve doğrusal birinci-derece adi diferansiyel denklemleri çözmek için matris eksponansiyel metodu kullanmaktadır. Nüklid i'nin miktarının zamana bağlı olarak değişimi (dX_i/dt) homojen olmayan birinci derece adi diferansiyel denklem genel olarak aşağıdaki gibidir [37]:

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N I_{ij} \lambda_j X_j + \phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i + r_i) X_i + F_i \quad i = 1, \dots, N$$

X_i = nüklid i'nin atom yoğunluğu,

N = nüklid sayısı,

I_{ij} = nüklid i oluşumuna yol açan nüklid j'nin radyoaktif parçalanma fraksiyonu,

λ_j = radyoaktif bozunum sabiti,

ϕ = pozisyon ve enerji ortalamalı nötron akısı,

f_{ik} = nüklid i oluşumuna yol açan nüklid k'nın nötron soğurma fraksiyonu,

σ_k = spektrum ortalamalı nüklid k'nın nötron soğurma tesir-kesiti,

r_i = sistemden nüklid i'nin sürekli çıkarılma (removal) hızı,

F_i = nüklid i'nin sürekli besleme hızı.

N tane nüklid düşünüldüğü zaman, her nüklid için bir tane olmak üzere aynı genel formda N tane denklem vardır. Bu diferansiyel denklemler setinin ORIGEN2 tarafından çözümü her bir zaman adımının sonunda her nüklid için miktarları vermektedir.

Yukarıda verilen denklemden, teorik olarak her bir nüklid, sistemdeki diğer bütün $(N-1)$ nüklidten üretilecek olsada, gerçekte ortalama ebeveynlerinin sayısı 12'den azdır. Bu yüzden 1700 nüklidten oluşan bir durumda, yukarıdaki denklemin sağ tarafında bulunan X_j 'nin en az 1688 tane katsayısı sıfır olacaktır. Sonuç ise %99,8'i sıfır olan X_j katsayılarının son derece seyrek 1700×1700 'lik matrisi olacaktır. Matrisin sadece sıfırdan farklı elemanlarının yer aldığı indeksleme tekniği kullanılarak seyrek matris avantajlı bir şekilde kullanılabilir. Transformasyon hızının kayan-noktalı (*floating-point*) dizisi geçiş matrisi olarak adlandırılır ve verilen durum için kalıcı olarak saklanmaktadır [37].

Geçiş matrisi ve onunla ilişkili dizilerin oluşumundan sonra, ışınlama ve bozunum hesaplarına başlamak mümkündür. Işınlanacak malzemenin ilk bileşimi, akı/üretilecek güç ile zaman aralıklarının uzunluğu kullanıcı tarafından tanımlanır.

Işınlama adımlarının sonundaki malzeme bileşimi üç genel aşamada hesaplanmaktadır. Bunlar:

- (1) Zamana bağlı geçiş matris parametreleri oluşturulması,
- (2) Nötron akısının güçten hesaplanması ve geçiş matrisinin buna göre düzenlenmesi,
- (3) Zaman adımlarının sonunda nüklid bileşimlerinin tamamlayıcı matematik tekniklerin kullanılarak hesaplanması.

MONTEBURNS Hesaplamaları

MONTEBURNS tarafından bir dizi hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Bunlar altı farklı kategori altında incelenmiştir ve aşağıda detayları verilmiştir. Bu kategoriler; (1) fisyon başına enerji, (2) akı normalizasyonu, (3) reaktör fiziği katsayıları, (4) etkin çoğaltma faktörü, (5) güç ve (6) kısmi önem [36].

- **Fisyon Başına Enerji:** Her bir malzeme için fisyon başına enerji miktarının hesaplanması için MONTEBURNS tarafından aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

$$Q_{ave} = \frac{\sum_{j=1}^m (Q_{fis}^j * \varphi_n^j * \Sigma_f^j * V^j)}{\sum_{j=1}^m (\varphi_n^j * \Sigma_f^j * V^j)}$$

Q_{ave} = bütün malzemeler için fisyon başına ortalama kazanılan enerji,

Q_{fis}^j = malzeme j için fisyon başına ortalama enerji (MeV),

φ_n^j = malzeme j için MCNP ile elde edilen nötron akısı değeri,

Σ_f^j = malzeme j için makroskopik fisyon tesir-kesiti (cm^{-1}),

V^j = malzeme j içeren bütün hücrelerin toplam hacmi (cm^3),

M = analiz edilen malzemelerin sayısı.

- **Akı Normalizasyonu:** Her bir malzeme j için ORIGEN2 yanma hesapları için kullanılan akı değerleri MCNP tarafından çetelesi tutulmuş akılar ile hesaplanmaktadır.

$$\varphi = \varphi_n * C$$

φ = akının gerçek değeri (sistem gücüne normalize edilmiş),

C = sabit değer.

MCNP girdi dosyasında kritiklik hesapları için “kcode” kaynak tanımı kullanıldığı zaman, C değeri aşağıdaki gibi bulunur;

$$C = \frac{\nu * P * 10^6 \text{ W/MW}}{(1.602 * 10^{-13} \text{ J/MeV}) * k_{eff} * Q_{ave}}$$

ν = fisyon başına açığa çıkan ortalama nötron sayısı,

P = her malzeme için tanımlanan güç (MW),

k_{eff} = etkin çoğaltma faktörü (MCNP’den elde edilen).

- **Reaktör Fiziği Katsayıları:** ν değeri MCNP çıktı dosyasından hesaplanabilir. “kcode” kaynak tanımı için, ν değeri aşağıdaki formülde gösterildiği gibi bulunur;

$$\nu = k_{eff} * src/floss$$

src = kaynak nötronların ağırlık faktörü (yaklaşık olarak 1’e eşittir),

floss = fisyon için soğurulan nötronların ağırlık faktörü.

- **Etkin çoğaltma Faktörü :** Etkin çoğaltma faktörü “kcode” kaynak tanımı için MCNP çıktısından alınmaktadır.
- **Güç:** Her bir malzeme tarafından üretilen güç aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$P^j = \frac{(Q_{ave} * \phi_n^j * \Sigma_f^j * V^j * 1.60219 * 10^{-13} \text{ J/MeV})}{10^6 \text{ W/MW}}$$

P^j = malzeme j tarafından üretilen güç (MW),

ϕ^j = malzeme j nötron akısı (n/cm²/s).

- **Kısmi önem:** Kısmi önem hesapları, yanma oranı hesaplarında hangi izotopların önemli olup olmayacağını belirlemede yardımcı olmaktadır. Hesaplanan değerlerden (atom, ağırlık, soğurma ve fisyon oranları) herhangi birisi tanımlanan “kısmi önem” değerinden büyükse söz konusu izotop önemli sayılmaktadır ve ORIGEN2’den MCNP’ye yapılan bütün transferlerin içerisinde yer almaktadır.

3.1.3 MCNP/MONTEBURNS Kodlarıyla Modelleme

MCNP5 kodu ile yapılan hesaplamalarda ENDF/B VI tesir-kesiti kütüphanesi kullanılmıştır. Kütüphaneler farklı sıcaklıklar için değerlendirildiğinden, yakıt

demetindeki farklı malzemeler için uygun kütüphaneler seçilmiştir ve sıcaklık (TMP) kartı kullanarak nötron tesir-kesit verileri ayarlanmıştır.

MONTEBURNS kodu ile yapılan hesaplamalarda ise 72 izotop için malzeme bilgisi elde edilmiştir. ORIGEN2'de CANDU6 reaktörü için CANDUNAU ve CANDUSEU, PWR reaktörü için PWRU ve PWRPUPU kütüphaneleri seçilmiştir.

3.2 Hesaplama Yöntemleri

PWR ve CANDU reaktörleri için MCNP ve MONTEBURNS kodları kullanarak yapılan hesaplamaların yöntemleri ve ilgili ifadeler (yanma hesapları, DUG, DUT ve NKDO) aşağıda sunulmaktadır.

3.2.1 Yanma Hesapları

3.2.1.1 PWR Reaktörü

Referans PWR Reaktörü:

1000 MWe kurulu gücünde, kütlece %3,3 zenginleştirilmiş UO₂ yakıtlı, 33000 MW-gün/tU düzeyinde yanmış, 1000 günlük ışınlanma süresine sahip ve termal verimi %33 olan bir PWR referans reaktör olarak seçilmiştir [6].

Yanma hesapları gerçekleştirilirken birim-hücre (*unit-cell*) yaklaşımı, sızıntı reaktivite (*leakage reactivity: ρ_L*) ve nihai yanma oranı (B_D) hesabı için Doğrusal Olmayan Reaktivite Modeli (*Nonlinear Reactivity Model*) kullanılmıştır.

Referans PWR reaktörünün MCNP5 kodu ile oluşturulan birim-hücre modelinin ön ve yan kesit görünümü Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

Sızıntı Reaktivite (ρ_L) Hesabı:

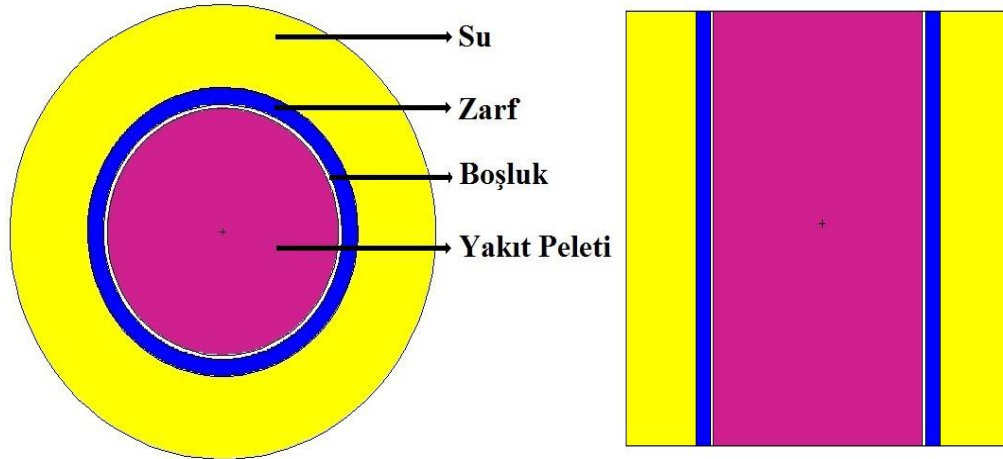
Yanma hesaplarında kullanılan birim-hücre modelinin bütün-kor (*full-core*) modelini yansıtabilmesi için sistemdeki nötron sızıntılarını (kayıplarını) ifade eden sızıntı reaktivite kullanılmaktadır. Sızıntı reaktivite hesabında aşağıda tanımlanan reaktivite modeli kullanılmıştır [38]. Hesaplarda eşit ölçüde üç grup (*batch*) ve her bir grup için eşit güç-paylaşım (*power-sharing*) faktörü olduğu varsayılmıştır.

$$\frac{\rho(B_1)+\rho(B_2)+\rho(B_3)}{3} - \rho_L = 0 \quad (3.1)$$

Burada ρ_L sistemin sızıntı reaktivitesini, $\rho(B)$, B yanma oranındaki reaktivite değerini ve B ise çevrim sonu yanma oranı değerini belirtmektedir. B_1 ilk grubun, B_2 ($=2B_1$ olmak üzere) ikinci grubun ve B_3 ($=3B_1$ olmak üzere) üçüncü grubun yanma oranı göstermektedir.

Kütlece %3,3 zenginleştirilmiş UO_2 yakıtlı, yanma oranı 33000 MW-gün/tU ve 1000 günlük ışınlanma süresi olan sahip referans PWR reaktörü için; $\rho(B_1)$, $\rho(B_2)$ ve $\rho(B_3)$, sırasıyla 333,3, 666,6 ve 1000 güne karşılık gelen reaktivite değerleridir [6]. MONTEBURNS kodu kullanarak elde edilen yanma oranına bağlı reaktivite verileriyle $\rho(B_1)$, $\rho(B_2)$ ve $\rho(B_3)$ 'e karşılık gelen reaktivite değerleri bulunur. Daha sonra Eşitlik 3.1 kullanılarak sızıntı reaktivite (ρ_L) hesaplanır.

Referans PWR reaktörü için sızıntı reaktivite (ρ_L) değeri 0,114 (11400 pcm¹) olarak bulunmuştur. Aslında, ρ_L yakıt yüklemeye ve yakıt yönetim örgüsüne (*pattern*) karşı duyarlıdır. Bu çalışmada gerçekleştirilen PWR yanma hesaplarında ρ_L 'in değişmeyeceği kabul edilmiştir [6].



Şekil 3.2. PWR birim-hücre MCNP5 modeli (ön ve yan kesit görünüşü)

Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesabı:

Referans PWR için sızıntı reaktivite değeri bir kez bulunduktan sonra, aşağıdaki prosedür uygulanarak, herhangi bir yakıt bileşimi için nihai yanma oranı (B_D) bulunabilir.

Reaktivite ile yanma oranı arasındaki bağıntı 2. derece fonksiyon ile ifade edilebilir:

¹ pcm (*per cent milli*): Reaktivite gösterimlerinde, yüzde birlik dilimin binde birini ifade eder.

$$\rho(B) = A_0 + A_1B + A_2B^2 \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2 kullanılarak;

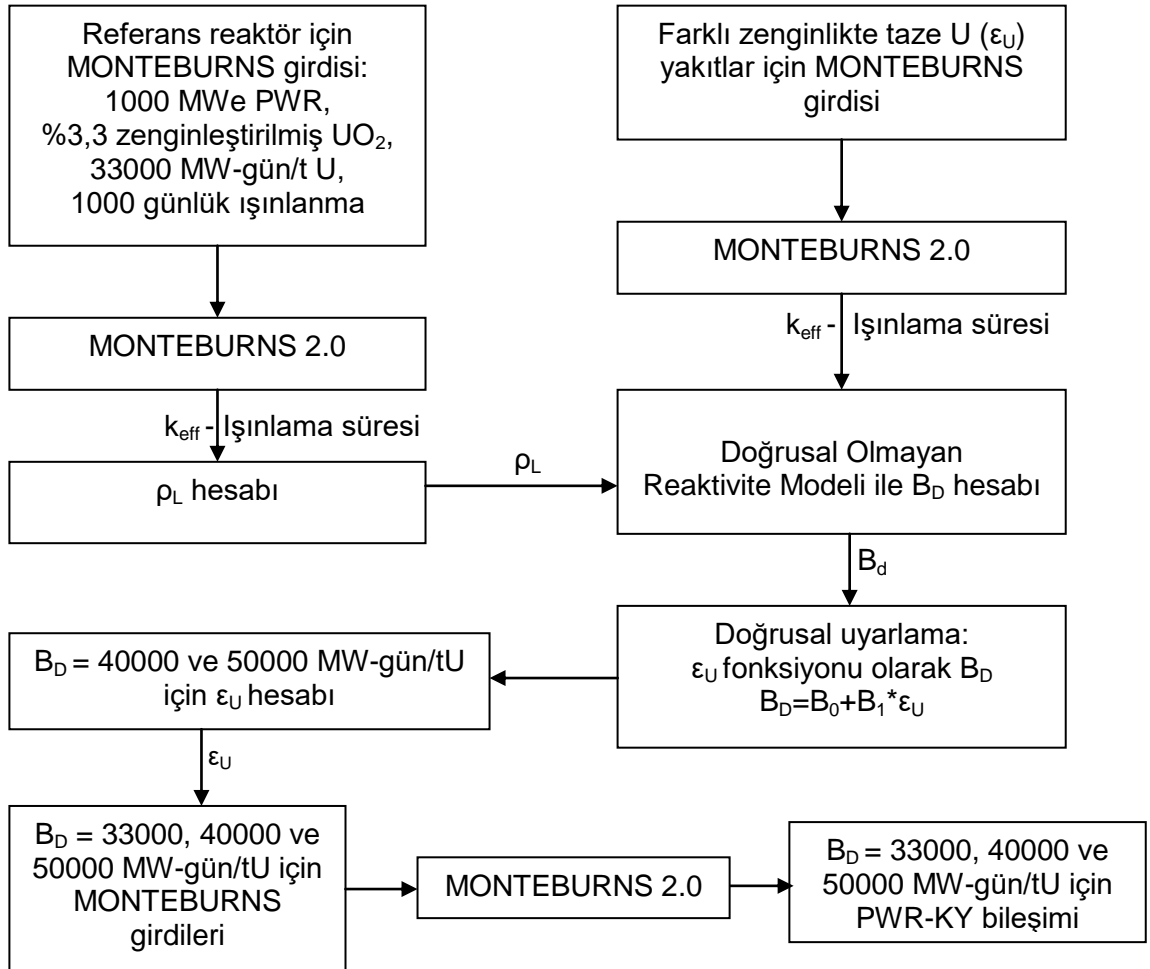
$$\rho(B_1) = A_0 + A_1B_1 + A_2B_1^2, \quad \rho(B_2) = A_0 + A_1(2B_1) + A_2(2B_1)^2$$

$$\rho(B_3) = A_0 + A_1(3B_1) + A_2(3B_1)^2 \text{ olmaktadır.}$$

$\rho(B_1)$, $\rho(B_2)$ ve $\rho(B_3)$ Eşitlik 3.1'e yerleştirilerek Eşitlik 3.3 elde edilir.

$$\frac{14}{3}A_2B_1^2 + 2A_1B_1 + (A_0 - \rho_L) = 0 \quad (3.3)$$

Herhangi bir yakıt bileşimi için MONTEBURNS kullanılarak, reaktivite-yanma oranı verileri elde edilir ve daha sonra veriler Eşitlik 3.2'ye göre uyarlanarak A_0 , A_1 ve A_2 katsayılar bulunur. Bulunan katsayılar ile Eşitlik 3.3 kullanılarak B_1 değeri çözülür ve $B_D=3B_1$ olduğundan, nihai yanma oranı hesaplanır. PWR için sızıntı reaktivite (ρ_L) ve nihai yanma oranı (B_D) hesaplama akış şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. PWR için hesaplama akış şeması

Kullanılmış Yakıt Bileşiminin Belirlenmesi:

40000 ve 50000 MW-gün/tU yanma oranlarında PWR-KY kompozisyonunun belirlenebilmesi için öncelikle 40000 ve 50000 MW-gün/tU yanma oranına karşılık gelen taze U yakıtın zenginliğinin (ϵ_U) bulunması gerekmektedir. Şekil 3.3'te hesaplama akış şemasında gösterildiği üzere, MONTEBURNS kodu kullanılarak farklı zenginlikte taze U (ϵ_U) yakıtlar için elde edilen B_D değerleri doğrusal bir fonksiyona ($B_D=B_0+B_1*\epsilon_U$) uyarlanarak B_0 ve B_1 katsayıları bulunur. Katsayıların elde edilmesiyle 40000 ve 50000 MW-gün/tU yanma oranına karşılık gelen taze U yakıtın zenginlikleri (ϵ_U) bulunur. MONTEBURNS kodu ile 33000, 40000 ve 50000 MW-gün/tU yanma oranları için PWR-KY kompozisyonları bulunur. PWR-KY kompozisyonu hesaplamaları için akış şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.

3.2.1.2 CANDU6 Reaktörü

Referans CANDU6 Reaktörü:

600 MWe kurulu gücünde, doğal U yakıtlı (kütlece %0,711 ^{235}U), 7154 MW-gün/tU düzeyinde yanmış, 308 günlük ışınlanma süresine sahip ve termal verimi %32 olan bir CANDU6 yanma hesapları için referans reaktör olarak seçilmiştir. Referans CANDU6 reaktörünün temel özellikleri Çizelge 3.1'de, tasarımın detayları ise Ek-A'da verilmiştir [24, 39].

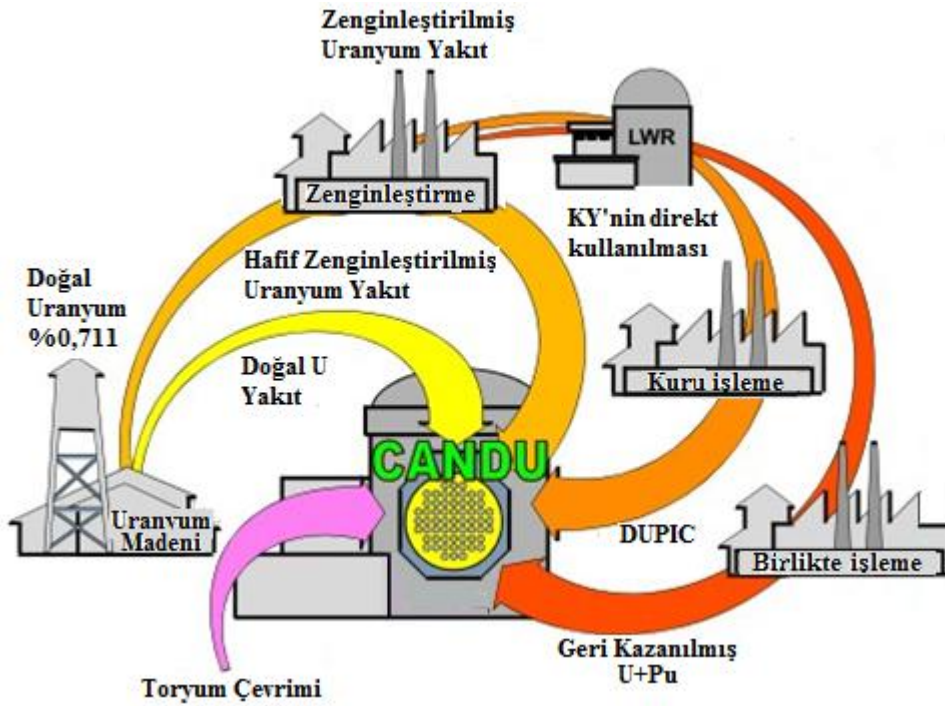
CANDU reaktörlerinde soğutucu ve yavaşlatıcı olarak hafif suya oranla çok daha düşük nötron soğurma tesir-kesitine sahip ağır su kullanıldığından, doğal U yakıt ile işletilebilmektedir. Reaktör tam güçte çalışırken anlık olarak yakıt değişimi (*online refuelling*) yapılabilmektedir. Yakıt, yatay yakıt kanallarına yerleştirilmiştir ve bir yakıt kanalında 12 adet yakıt demeti (*fuel bundle*) bulunmaktadır. Yüksek basınç altındaki soğutucu kanallardaki 37 elemanlı yakıt demetlerinden geçmektedir. Kanallar arasındaki boşluk ağır sulu yavaşlatıcı ile doldurulmaktadır. Kanallar, "calandria" adı verilen büyük yatay silindirik tankın içerisinde yer almaktadır. Bütün yapısal malzemeler düşük nötron soğurma tesir-kesitine sahip zirkonyum alaşımdan yapılmıştır. Bu tasarım özellikleri nötronların parazitik soğurulmasını minimize ettiği için CANDU reaktörüne yüksek nötron ekonomisi kazandırmaktadır.

Çizelge 3.1. Referans CANDU6 reaktörü temel özellikleri [24,39]

Reaktör ve yakıt kanalı	CANDU6
Toplam reaktör gücü (MW_{th})	2061
Toplam yazılı güç (MW_e)	713
Reaktör basıncı (MPa)	11,1
Reaktör kor uzunluğu (mm)	5944
Yakıt kanallarının sayısı	380
Reaktör kor yarıçapı (mm)	3800
Ortalama yakıt yanma oranı (MW-gün/tU)	7154
Örüntü yüksekliği (<i>lattice pitch</i>) (mm)	286
Kanallardaki yakıt demeti sayısı	12
Basınç tüpü iç yarıçapı (mm)	51,689
Ortalama basınç tüpü duvar kalınlığı (mm)	4,343
Calandria tüpü iç yarıçapı (mm)	64,478
Ortalama calandria tüp duvar kalınlığı (mm)	1,397
<i>Malzeme</i>	
Pelet verisi	
Malzeme	Doğal UO_2
Yazılı yoğunluk (g/cm^3)	10,60
Kılıf malzemesi	
Yoğunluk (g/cm^3)	7,48
Calandria tüp malzemesi	
Yoğunluk (g/cm^3)	6,55
Basınç tüp malzemesi	
Yoğunluk (g/cm^3)	6,57
Soğutucu	
Yavaşlatıcı	
<i>Yakıt demeti ve elemanı</i>	
Yakıt demetindeki yakıt elemanı sayısı	37
Yakıt demetinde U kütlesi (kg)	19,10
Yakıt demetinde Zr kütlesi (kg)	2,206
Yakıt demeti ağırlık (kg)	21,67
Yakıt demeti uzunluk (mm)	482
Yakıt elemanı dış çap (mm)	13,10
Ortalama eleman duvar kalınlığı (mm)	0,4
Pelet dış çap (mm)	12,20

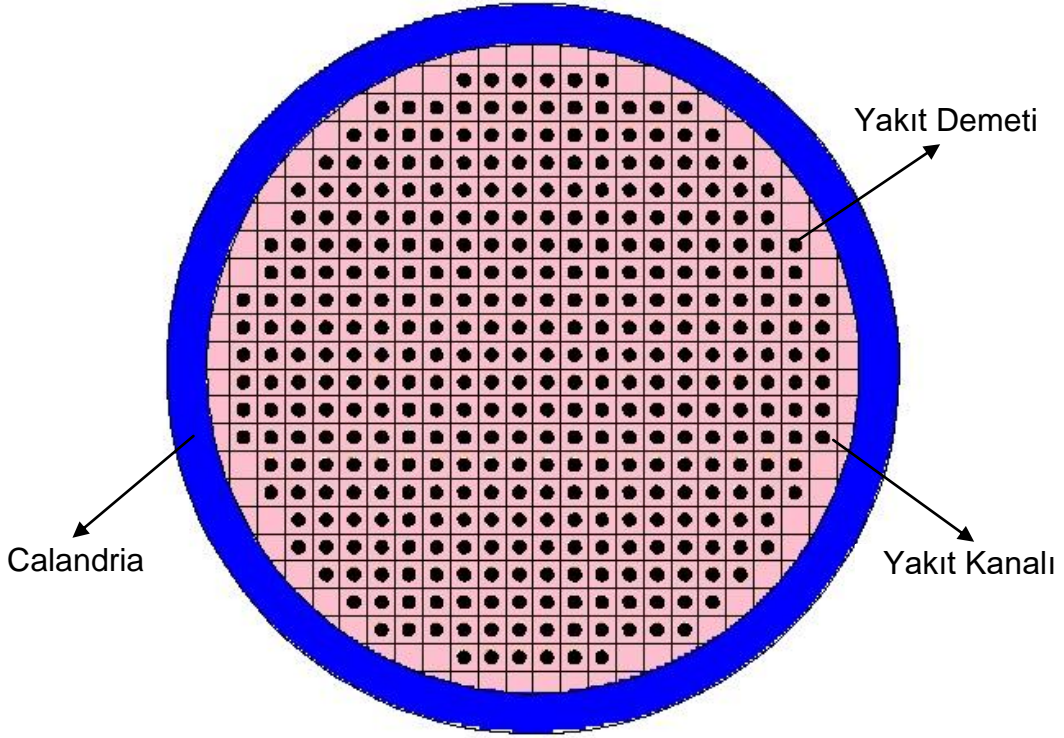
Bu çalışma kapsamında incelenen CANDU reaktörlerindeki yakıt çevrimleri aşağıda listelenmiş ve Şekil 3.4'te verilmiştir [40]:

- Doğal U yakıt çevrimi: Doğal U'nun yakıt olarak kullanıldığı standart yakıt çevrimi,
- Hafif zenginleştirilmiş U (HZU) yakıt çevrimi: U'nun hafifçe zenginleştirildiği yakıt çevrimi,
- U+Th yakıt çevrimi: Çeşitli zenginlikteki HZU yakıtların belirli oranlarda Th ile karıştırılmasıyla elde edilen (U-Th)O₂ yakıtlı çevrim,
- TBİ yakıt çevrimi: PWR-KY'den TBİ prosesi sonucunda elde edilen U+Pu ürünün direkt olarak CANDU reaktöründe kullanıldığı yakıt çevrimi,
- DUPIC yakıt çevrimi: PWR-KY'nin direkt olarak CANDU reaktöründe kullanıldığı yakıt çevrimi.

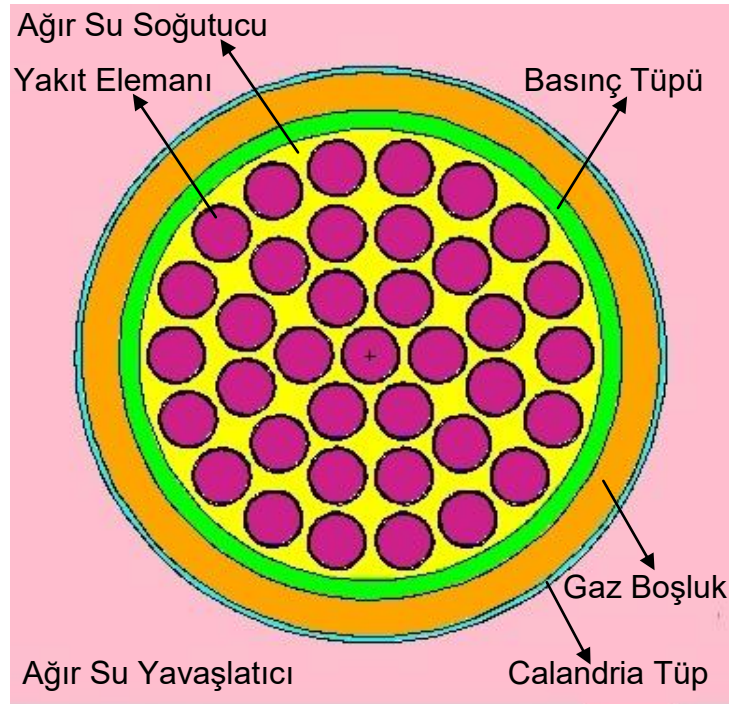


Şekil 3.4. CANDU reaktöründe yakıt çevrimleri [40]

Referans CANDU6 reaktörünün bütün-kor ve 37 elemanlı yakıt demeti MCNP5 modeli Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.5. Referans CANDU6 reaktörü bütün-kor MCNP5 modeli



Şekil 3.6. Referans CANDU6 37 elemanlı yakıt demetinin MCNP5 modeli

Sızıntı-Düzeltilme Reaktivite (ρ_{LC}) Hesabı:

Doğrusal olmayan reaktivite model kullanılarak referans CANDU6 reaktörü için sızıntı reaktivite hesapları yapılmıştır. Gerçek bir bütün-kor modelinde, MCNP5 ve MONTEBURNS kodu ile hesaplanan k_{eff} değerleri sistemdeki sızıntıları zaten dikkate alınmaktadır. Ancak bu çalışmada homojen bir kor yüklemesi yapıldığı ve bütün yakıt demetlerin nihai yanma oranı değerinin aynı olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca modellemede reaktivite kontrol mekanizmaları dikkate alınmamıştır. Bu yüzden elde edilen sonuçların gerçek bütün-kor modelini yansıtması için bazı düzeltmeler yapmak gerekmektedir. Doğrusal olmayan reaktivite modeli ile hesaplanan sızıntı reaktivite, sonuçların gerçek bütün-kalp modeline yaklaşmasını sağlayacaktır. Bu nedenle “sızıntı reaktivite” yerine “sızıntı-düzeltilme reaktivite” (ρ_{LC}) terimi kullanılmıştır [41].

Özetle, kontrol mekanizmaları içermeyen homojen ‘bütün-kor’dan, düzleştirilmiş güç dağılımlı denge koruna (*equilibrium core*) geçiş için ρ_{LC} bir düzeltme terimi olarak kullanılmaktadır. Homojen bütün-kor yaklaşımında ve denge korunda termal nötron göç alanı (*migration area*) aynı olacağından elde edilen sızıntı-düzeltilme reaktivite değeri yanma oranı hesaplamalarında kullanılabilir.

CANDU reaktörlerinde sızıntı reaktivite hesabında aşağıdaki tanımlanan doğrusal olmayan reaktivite modeli kullanılmıştır [38].

$$\int_0^{B_D} [\rho(B) - \rho_{LC}] dB = 0 \quad (3.4)$$

Burada B_D nihai yanma oranını, ρ_{LC} sistemin sızıntı-düzeltilme reaktivitesini, $\rho(B)$ B yanma oranındaki reaktivite değerini, B ise çevrim sonu yanma oranı değerini belirtmektedir.

Referans CANDU6 reaktörü için MONTEBURNS kodu kullanarak elde edilen k_{eff} değerlerinden türetilen yanma oranına bağlı reaktivite eğrisi çıkartılır. Bu eğri Eşitlik 3.5 ile verilen 4. derece bir fonksiyona uyarlanır.

$$\rho(B) = A_0 + A_1B + A_2B^2 + A_3B^3 + A_4B^4 \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5’i ve $B_D=7154$ MWgün/t değerini kullanılarak referans reaktör için ρ_{LC} değeri hesaplanır. Referans CANDU6 reaktörü için ρ_{LC} değeri 0,028034 (2803,4

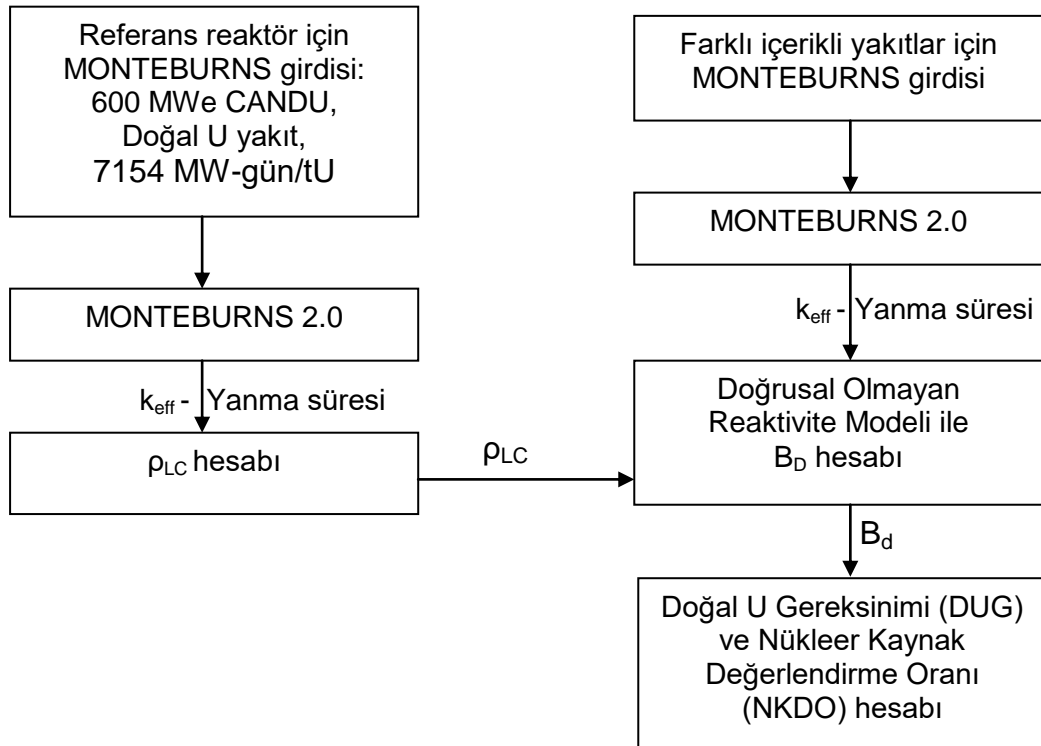
pcm) olarak bulunmuştur. Bu çalışma boyunca yapılan hesaplarda ρ_{LC} 'nin değişmeyeceği kabul edilmiştir [41].

Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesabı:

Referans CANDU6 reaktörü için sızıntı reaktivite değeri bir kez bulunduktan sonra, aşağıdaki prosedür uygulanarak, herhangi bir yakıt bileşimi için nihai yanma oranı (B_D) bulunabilir.

İncelenen bir yakıt karışımının izotopik bileşimi girdisi ile MONTEBURNS kodunu kullanarak elde edilen reaktivite-yanma oranı verilerinden bir eğri oluşturulur. Söz konusu eğri Eşitlik 3.5'te gösterildiği gibi 4. derece bir fonksiyona uyarlanarak katsayılar elde edilir. Daha önce hesaplanan referans reaktöre ait sızıntı-düzeltilme reaktivite (ρ_{LC}) değeri kullanılarak Eşitlik 3.4 çözülür ve B_D değeri elde edilir.

Referans CANDU6 reaktörü için sızıntı-düzeltilme reaktivite (ρ_{LC}) ve nihai yanma oranı (B_D) için hesaplama akış şeması Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Referans CANDU6 reaktörü için hesaplama akış şeması

3.2.2 Doğal Uranyum Gereksinimi (DUG) Hesapları

3.2.2.1 PWR ve CANDU6 Reaktörleri

UO₂ yakıtlı olan her iki reaktörde 1 yılda 1 GW_e elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan taze UO₂ yakıtın üretiminde gereken doğal U miktarı, Doğal U Gereksinimi (DUG) olarak tanımlanmakta ve Eşitlik 3.6'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [41].

$$DUG = \frac{\frac{x_P - x_T}{x_F - x_T} \times 365 \times 10^3}{B_D \times \eta_{th}} \quad (3.6)$$

DUG, tDU/GW_e-yıl cinsinden doğal U gereksinimini,

B_D, MW_{th}-gün/tU cinsinden nihai yanma oranını,

η_{th}, referans reaktörünün termal verimini,

$\frac{x_P - x_T}{x_F - x_T}$, birim kütle zenginleştirilmiş U elde etmek için gereken doğal U miktarı ($\frac{F}{P}$

oranı) ve bu ifade içindeki x_P, x_T ve x_F ise sırasıyla ürün (*product*), artık (*tail*) ve girdi (*feed*) malzemeleri için U zenginleştirme prosesinde ²³⁵U izotopunun kütlece yüzdelerini ifade etmektedir; 365x10³ ise B_D teriminden gelen MW-gün birimini GW-yıl'a dönüştürmek içindir.

PWR ve CANDU6 reaktörü için DUG hesaplarında η_{th,PWR}=0,33; η_{th,CANDU}=0,32; x_T=0,25 ve x_F=0,711 olarak alınmıştır [41].

3.2.2.2 PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi

PWR-CANDU6 birleşik yakıt çevrimi sisteminde bulunan TBİ ve DUPIC seçenekleri için DUG hesabı, 1 ton taze PWR yakıtı elde etmek için gereken doğal U miktarının, 1 ton PWR yakıtından her iki reaktörde üretilen toplam elektrik enerjisine (GWe-yıl) bölünmesi ile yapılmaktadır. DUG hesabı için Eşitlik 3.7'de verilen matematiksel ifade kullanılmaktadır.

$$DUG = \frac{\frac{x_P - x_T}{x_F - x_T} \times 365 \times 10^3}{B_{D,PWR} \times \eta_{th,PWR} + f \times B_{D,CANDU} \times \eta_{th,CANDU}} \quad (3.7)$$

Burada, DUG, tDU/GW_e-yıl cinsinden doğal U gereksinimini; B_{D,PWR} ve B_{D,CANDU}, PWR ve CANDU reaktörlerinde MW_{th}-gün/tHM (Ağır Metal) cinsinden nihai yanma

oranını; $\eta_{th,PWR}$ ve $\eta_{th,CANDU}$, referans PWR ve CANDU reaktörlerinin termal verimi; f ise CANDU yakıtına dönüşen PWR-KY oranını ifade etmektedir [41].

3.2.2.3 U+Th Yakıtlı CANDU6 Reaktörü

Farklı oranlarda Th ile HZU'nun karıştırılmasıyla oluşturulan (U-Th) O_2 yakıtı kullanan CANDU6 reaktöründe, yakıt gereksinimi (YG) ve DUG hesabı için gereken Eşitlikler aşağıda verilmiştir

R_U , yüklenen U+Th yakıttaki ^{235}U 'in kütle olarak yüzdesini ve θ , yüklenen U+Th yakıttaki Th'nin kütle olarak yüzdesini ifade etmektedir. R_U ve θ , Eşitlik 3.8 ve 3.9'da gösterilmektedir.

$$R_U(\%) = \frac{\text{Yüklenen (U-Th) yakıttaki U-235 miktarı}}{\text{Yüklenen (U-Th) yakıt miktarı}} \times 100 \quad (3.8)$$

$$\theta(\%) = \frac{\text{Yüklenen (U-Th) yakıttaki Th miktarı}}{\text{Yüklenen (U-Th) yakıt miktarı}} \times 100 \quad (3.9)$$

x_p 'nin R_U ve θ cinsinden ifadesi ise Eşitlik 3.10'da verilmektedir.

$$x_p(\%) = \frac{R_U}{(100-\theta)} \times 100 \quad (3.10)$$

YG, reaktörde 1 yılda 1 GW_e elektrik gücü elde etmek için gereken toplam U+Th yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır. Buna göre YG Eşitlik 3.11 ile hesaplanabilir.

$$YG = \frac{365 \times 10^3}{B_{D,CANDU} \times \eta_{th,CANDU}} \quad (3.11)$$

YG, tHM/ GW_e -yıl cinsinden toplam U+Th yakıt gereksinimini ifade etmektedir.

DUG, HZU yakıt gereksinimi (YG_{HZU}) ile birim kütle zenginleştirilmiş U elde etmek için gereken doğal U miktarı ($\frac{x_p - x_T}{x_F - x_T}$) ile çarpımına eşittir. x_p yerine Eşitlik 3.10'da verilen ifade kullanıldığında, DUG hesabı Eşitlik 3.12'de gösterildiği gibi olmaktadır.

$$DUG = YG_{HZU} \times \frac{x_p - x_T}{x_F - x_T} = \frac{365 \times 10^3}{B_{D,CANDU} \times \eta_{th,CANDU}} \times \frac{100 - \theta}{100} \times \frac{\frac{100 \times R_U}{100 - \theta} - x_T}{x_F - x_T} \quad (3.12)$$

Burada, $B_{D,CANDU}$, tDU/GW_e-yıl cinsinden doğal U gereksinimini ve $B_{D,CANDU}$ ise MW-gün/tHM cinsinden CANDU6 reaktörünün yanma oranını ifade etmektedir.

3.2.3 Nükleer Kaynak Değerlendirme Oranı (NKDO) Hesapları

Fisyona uğrayan yakıt miktarının, kaynak girdisine oranı olarak tanımlanan Nükleer Kaynak Değerlendirme Oranı (NKDO) hesaplarında yaklaşık 1 gram fisil maddenin fisyon yapmasının 1 MW-gün enerji çıkardığı dikkate alınmaktadır [2].

3.2.3.1 PWR ve CANDU6 Reaktörleri

Referans PWR ve CANDU6 reaktörlerinde, NKDO, yanma oranı ile Eşitlik 3.13'te gösterildiği gibi ilişkilendirilebilir:

$$NKD = \frac{B_D}{KAYNAK/YÜK} \quad (3.13)$$

Burada NKDO, MW_{th}-gün/kgDU cinsinden nükleer kaynak değerlendirme oranını; KAYNAK/YÜK, Eşitlik 3.14'te verildiği gibi birim kütle yakıt yüklemesi üretmek için gereken kaynak (doğal U ve varsa Th) miktarını ve B_D ise MW-gün/tHM cinsinden yanma oranını ifade etmektedir.

$$\frac{KAYNAK}{YÜK} = \frac{x_P - x_T}{x_F - x_T} \quad (3.14)$$

3.2.3.2 PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi

PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi sisteminde bulunan TBI ve DUPIC seçenekleri için NKDO hesabı Eşitlik 3.15'te verilmiştir [41].

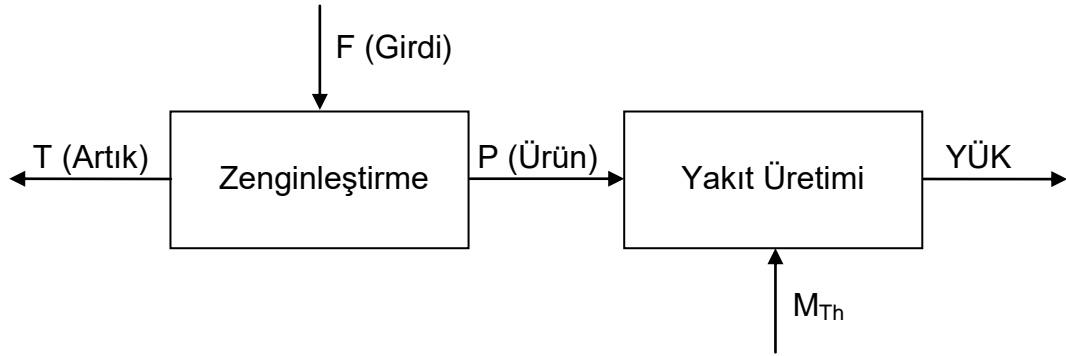
$$NKDO = \frac{B_{D,PWR} + f \times B_{D,CANDU}}{\frac{x_P - x_T}{x_F - x_T}} \times 10^{-3} \quad (3.15)$$

Burada, NKDO, MW_{th}-gün/kgDU cinsinden nükleer kaynak değerlendirme oranını; $B_{D,PWR}$ ve $B_{D,CANDU}$, PWR ve CANDU reaktörlerinde MW_{th}-gün/tHM cinsinden nihai yanma oranını; f, CANDU yakıtına dönüşen PWR-KY oranını ifade etmektedir; 10^{-3} ise B_D terimlerinden gelen ton birimini kg'a çevirmek içindir.

3.2.3.3 U+Th Yakıtlı CANDU6 Reaktörü

U+Th yakıtlı CANDU6 reaktörü için NKDO hesabında HZU ve Th'den oluşan reaktör girdisinin kaynağı doğal U ve Th olmaktadır. Şekil 3.8 ile gösterilen

zenginleştirme ve yakıt üretim prosesindeki kütle dengesi dikkate alınarak KAYNAK/YÜK elde edilir [14, 24].



Şekil 3.8. U+Th yakıtlı kütle dengesi

Şekil 3.8'ya göre, $YÜK = P + M_{Th}$ ve $KAYNAK = F + M_{Th}$ olmak üzere kütle dengesi kurulur. Burada; P, zenginleştirme ürünü (P: product); F, zenginleştirme girdisi (F: feed); M_{Th} , yakıt üretiminde kullanılan Th kütlelerini ifade etmektedir [14].

$$\frac{KAYNAK}{YÜK} = \frac{F}{YÜK} + \frac{M_{Th}}{YÜK} \quad (3.16)$$

Zenginleştirme kütle dengesinden $\frac{F}{P} = \frac{x_P - x_T}{x_F - x_T}$; yakıt üretimi kütle dengesinden $\frac{M_{Th}}{YÜK} = \frac{\theta}{100}$ ve $\frac{P}{YÜK} = 1 - \frac{\theta}{100}$ olmak üzere eşitlikler yazılır. Burada θ , yüklenen U+Th yakıttaki Th'nin kütle olarak yüzdesini ifade etmektedir.

$$\frac{KAYNAK}{YÜK} = \frac{\theta}{100} + \left(1 - \frac{\theta}{100}\right) \frac{x_P - x_T}{x_F - x_T} \quad (3.17)$$

Herhangi bir Th yüklemesi yapılmadığı zaman ($\theta=0$), Eşitlik 3.17 zenginleştirme prosesindeki F/P oranına dönüşmektedir [24].

U+Th yakıtlı CANDU6 reaktöründe NKDO, Eşitlik 3.17 ile verilen KAYNAK/YÜK Eşitlik 3.13'te kullanılarak hesaplanır.

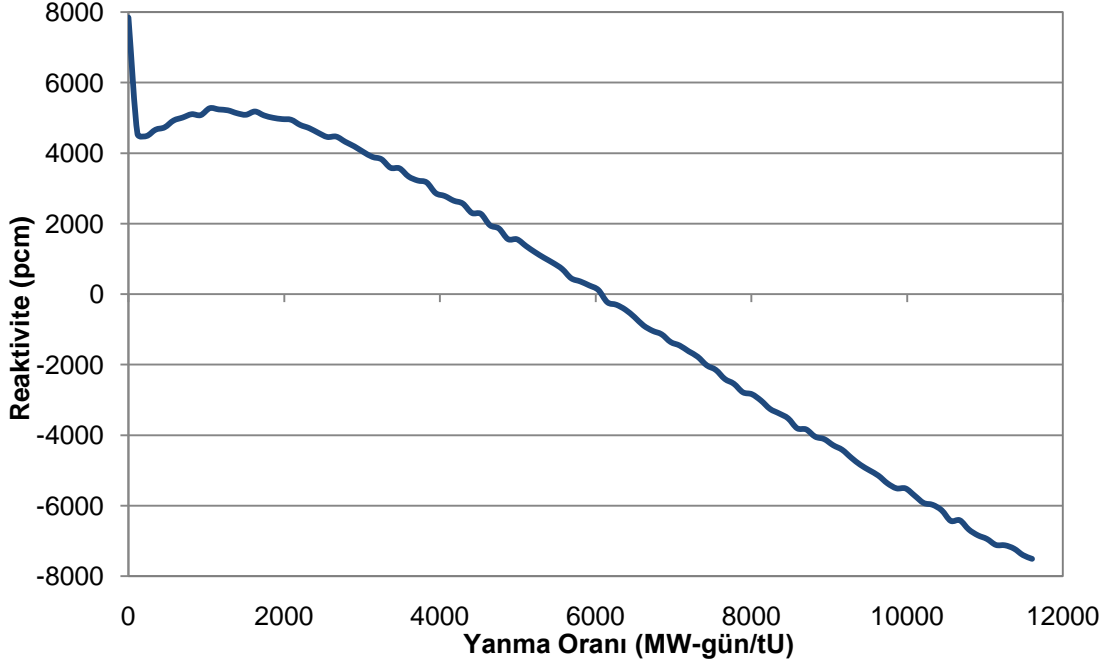
3.2.4 Doğal Uranyum Tasarrufu (DUT) Hesapları

Doğal U Tasarrufu (DUT), referans yakıt çevriminin DUG'u ile karşılaştırıldığında ilgilenilen yakıt çevrimi için DUG'daki azalmayı ifade etmektedir. Birimi tDU/GW_e -yıl'dır. DUT, ilgilenilen yakıt çevrimindeki DUG'daki azalmanın, referans reaktördeki DUG'a oranı olarak yüzdesel şekilde de ifade edilebilir [14]. DUT hesaplarında, Doğal U yakıtlı CANDU6 reaktörü referans olarak seçilmiştir.

4. CANDU6 REAKTÖRÜ SONUÇLARI

4.1 U Yakıtlı CANDU6 Reaktörü

Referans CANDU6 reaktörü için Bölüm 3.2.1.2'de anlatıldığı üzere, MONTEBURNS kodu kullanarak, doğal U yakıt için Şekil 4.1'de gösterilen yanma oranına bağlı reaktivite eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Doğal U yakıtlı referans CANDU6 reaktörü için reaktivite eğrisi

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, başlangıçtaki ksenon (Xe) yığılma (*buildup*) etkisi, ilk birkaç gün içerisinde hızlı bir reaktivite düşüşüne neden olmaktadır. CANDU6 reaktörlerinde kullanılan tipik doğal U yakıtlar için, yaklaşık olarak 50. günde reaktivite değerinde "Pu zirvesi" oluşmaktadır. ^{239}Pu 'un ^{235}U 'e göre daha yüksek olan fisyon tesir-kesitinden dolayı (Çizelge 2.1), ^{239}Pu katkısı geçici olarak reaktiviteyi ^{235}U 'den daha hızlı arttırmaktadır. Daha sonra, FÜ'nün zehir etkisinden, ^{235}U 'in tüketilmesinden ve CANDU6 termal spektrumunda ^{239}Pu 'un yeterli olmayan üretiminden dolayı reaktivite belli bir oranla azalmaktadır [42].

Reaktivite-yanma oranı eğrisi, yanma başlangıcındaki Xe yığılma etkisi ihmal edilerek, Eşitlik 3.5 ile verilen 4. derece fonksiyona uyarlanmıştır.

$$\rho(B) = 4455,41 + 1,11348B - 5,38796 \times 10^{-4}B^2 + 4,70826 \times 10^{-8}B^3 - 1,437 \times 10^{-12}B^4 \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1 ve $B_D=7154$ MW-gün/tU, Eşitlik 3.4 ile ifade edilen doğrusal olmayan reaktivite modelinde kullanılarak doğal U yakıtlı referans reaktör için sızıntı-düzeltilme reaktivite (ρ_{LC}) değeri 0,028034 (2803,4 pcm) olarak bulunmuştur [41].

Temel Reaktivite Etkilerinin Analizi:

Doğal U yakıtlı referans CANDU6 reaktörüne ait bazı temel reaktivite katsayıları MCNP5 ve MONTEBURNS kodları kullanılarak bulunmuştur. Burada iki önemli reaktivite parametresi incelenmiştir:

- Yakıt sıcaklığı için Doppler katsayısı $\left(\frac{\Delta\rho}{\Delta T}\right)_{fuel}$ (pcm/K) ve
- Soğutucu boşluk katsayısı $\Delta\rho_{void}$ (pcm).

Nominal yakıt sıcaklığındaki (1027 K) Doppler katsayısı değeri, çevrim başlangıcında (*Beginning Of Cycle: BOC*) -0,611 pcm/K, çevrim sonunda ise (*End Of Cycle: EOC*) 1,879 pcm/K olarak bulunmuştur. Doppler katsayısı için reaktivite değerleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Doppler katsayısı için reaktivite değerleri

Yakıt Sıcaklığı (K)	Çevrim Başlangıcı (BOC)		Çevrim Sonu (EOC)	
	k-eff	Reaktivite (pcm)	k-eff	Reaktivite (pcm)
1000	1,08669	7977	0,98323	-1706
1100	1,08525	7855	0,98505	-1518

Çizelge 4.2'de sunulan reaktivite değerleri kullanılarak bulunan soğutucu boşluk katsayısı çevrim başlangıcında (BOC) 1369 pcm (13,69 pcm/% soğutucu değişimi) çevrim sonunda ise (EOC) 1492 pcm (14,92 pcm/% soğutucu değişimi) olarak hesaplanmıştır. MCNP5 ile gerçekleştirilen reaktivite katsayıları hesaplamalarındaki hata payı $\pm\%0,035$ 'tir.

Çizelge 4.2. Soğutucu boşluk katsayısı için reaktivite değerleri

Boşluk Miktarı (%)	Çevrim Başlangıcı (BOC)		Çevrim Sonu (EOC)	
	k-eff	Reaktivite (pcm)	k-eff	Reaktivite (pcm)
0	1,08510	7843	0,98441	-1584
100	1,10146	9211	0,99908	-92

Kullanılmış Yakıt Bileşimi:

Referans CANDU6 reaktöründe 308 gün ışınlanmış, 7154 MW-gün/tU yanma oranına ulaşmış KY bileşimi MONTEBURNS kodu ile elde edilmiştir. Bir yakıt demetindeki U ve Pu vektörünün yanma zamanına göre değişimleri Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. U vektörünün yanma süresince değişimi

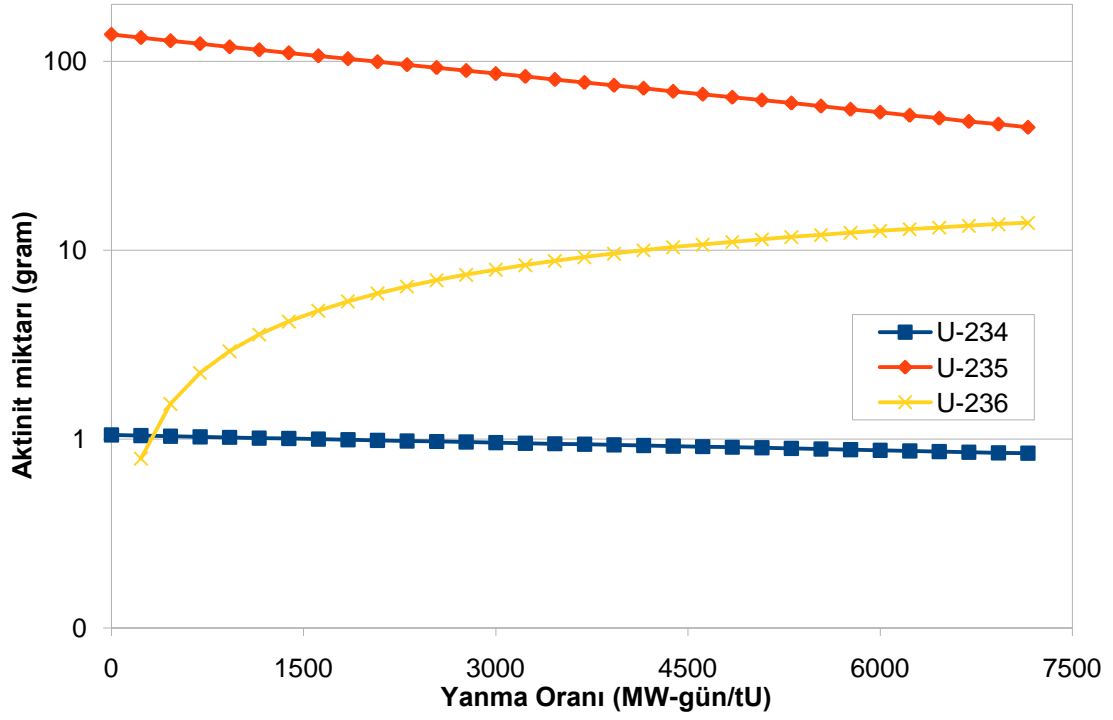
Yanma Süresi (gün)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	Aktinit Miktarı (gram)				U-toplam	U fisil Oranı (%)
		²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U		
0	0	1,05	138,60	0	19342	19482	0,711
9,9	231	1,04	133,33	0,79	19342	19477	0,685
19,9	462	1,04	128,29	1,54	19320	19451	0,660
29,8	692	1,03	123,68	2,24	19320	19447	0,636
39,8	923	1,02	119,08	2,92	19320	19443	0,612
49,7	1154	1,01	114,91	3,57	19320	19440	0,591
59,7	1385	1,01	110,75	4,19	19320	19436	0,570
69,6	1615	1,00	106,80	4,78	19298	19411	0,550
79,6	1846	0,99	103,07	5,35	19298	19408	0,531
89,5	2077	0,98	99,34	5,90	19298	19404	0,512
99,5	2308	0,98	95,83	6,43	19298	19401	0,494
109,4	2539	0,97	92,54	6,93	19298	19399	0,477
119,3	2769	0,96	89,25	7,41	19298	19396	0,460
129,3	3000	0,96	85,96	7,87	19276	19371	0,444
139,2	3231	0,95	83,11	8,33	19276	19369	0,429
149,2	3462	0,95	80,04	8,77	19276	19366	0,413
159,1	3692	0,94	77,19	9,19	19276	19364	0,399
169,1	3923	0,93	74,56	9,58	19254	19339	0,386
179,0	4154	0,93	71,93	9,98	19254	19337	0,372
189,0	4385	0,92	69,30	10,35	19254	19335	0,358
198,9	4615	0,91	66,89	10,70	19254	19333	0,346
208,8	4846	0,91	64,47	11,05	19254	19331	0,334
218,8	5077	0,90	62,28	11,40	19232	19307	0,323
228,7	5308	0,89	60,09	11,73	19232	19305	0,311
238,7	5539	0,89	57,89	12,04	19232	19303	0,300
248,6	5769	0,88	55,70	12,35	19232	19301	0,289
258,6	6000	0,87	53,73	12,63	19232	19300	0,278
268,5	6231	0,87	51,75	12,92	19211	19276	0,268
278,5	6462	0,86	50,00	13,18	19211	19275	0,259
288,4	6692	0,85	48,03	13,44	19211	19273	0,249
298,4	6923	0,85	46,49	13,71	19211	19272	0,241
308,3	7154	0,84	44,74	13,95	19189	19248	0,232

Buna göre, referans CANDU6 reaktöründen 308 gün sonra çıkan bir KY'nin içerisinde %0,23'ü fisil 19,2 kg U ve %74,6'sı fisil olan 74,3 gram Pu bulunmaktadır.

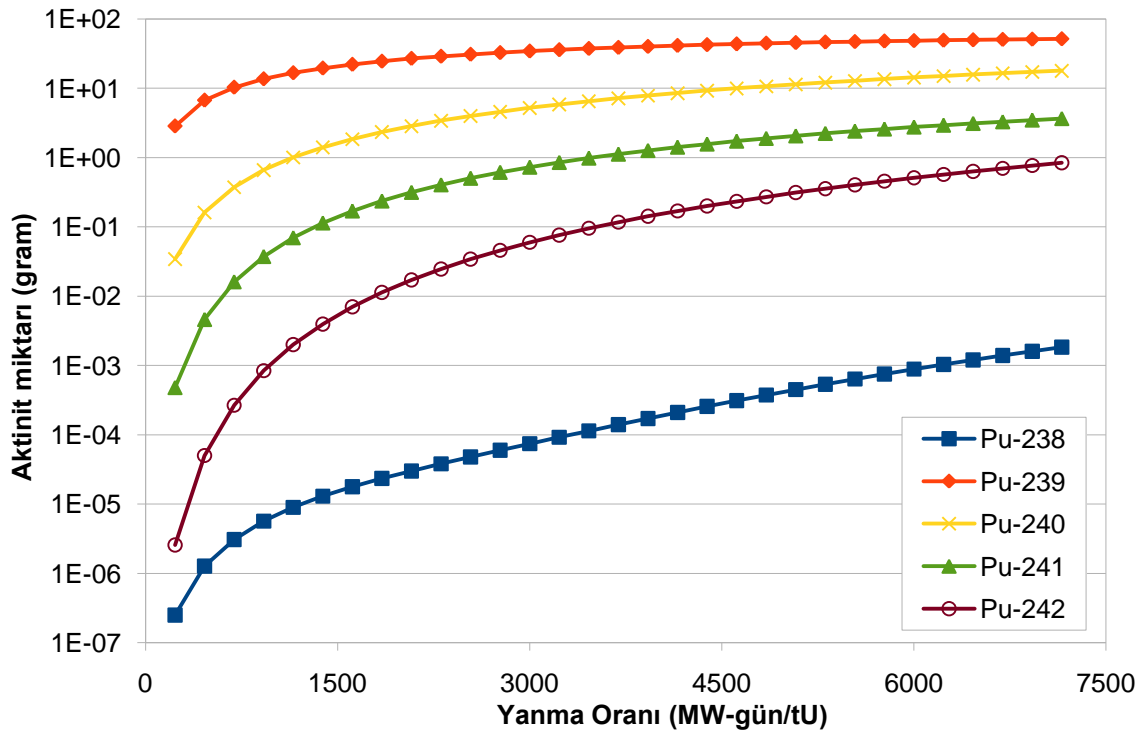
Çizelge 4.4. Pu vektörünün yanma süresince değişimi

Yanma Süresi (gün)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	Aktinit Miktarı (gram)					Pu Toplam	Pu fisil oranı (%)
		²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu		
0	0	0	0	0	0	0	0	-
9,9	231	2,50E-07	2,85	0,034	4,82E-04	2,57E-06	2,89	98,8
19,9	462	1,27E-06	6,73	0,162	4,63E-03	5,02E-05	6,90	97,7
29,8	692	3,09E-06	10,35	0,375	0,016	2,68E-04	10,74	96,5
39,8	923	5,68E-06	13,68	0,662	0,038	8,44E-04	14,38	95,4
49,7	1154	8,99E-06	16,73	1,009	0,070	2,00E-03	17,81	94,3
59,7	1385	1,30E-05	19,56	1,408	0,114	3,97E-03	21,09	93,3
69,6	1615	1,78E-05	22,15	1,853	0,170	7,02E-03	24,18	92,3
79,6	1846	2,35E-05	24,56	2,346	0,237	0,011	27,16	91,3
89,5	2077	3,00E-05	26,97	2,851	0,316	0,017	30,16	90,5
99,5	2308	3,82E-05	28,95	3,421	0,406	0,025	32,80	89,5
109,4	2539	4,80E-05	30,92	3,991	0,504	0,034	35,45	88,6
119,3	2769	6,01E-05	32,68	4,583	0,614	0,046	37,92	87,8
129,3	3000	7,46E-05	34,43	5,219	0,728	0,060	40,44	86,9
139,2	3231	9,23E-05	35,96	5,855	0,853	0,077	42,75	86,1
149,2	3462	1,14E-04	37,50	6,513	0,985	0,096	45,09	85,3
159,1	3692	1,40E-04	38,82	7,193	1,123	0,118	47,25	84,5
169,1	3923	1,72E-04	40,13	7,873	1,268	0,143	49,41	83,8
179,0	4154	2,11E-04	41,45	8,553	1,417	0,170	51,59	83,1
189,0	4385	2,57E-04	42,54	9,276	1,570	0,201	53,59	82,3
198,9	4615	3,11E-04	43,64	9,978	1,730	0,235	55,58	81,6
208,8	4846	3,75E-04	44,74	10,702	1,895	0,272	57,61	80,9
218,8	5077	4,50E-04	45,61	11,425	2,061	0,314	59,41	80,2
228,7	5308	5,37E-04	46,49	12,149	2,237	0,357	61,24	79,6
238,7	5539	6,38E-04	47,15	12,873	2,412	0,406	62,84	78,9
248,6	5769	7,54E-04	48,03	13,618	2,588	0,458	64,69	78,2
258,6	6000	8,88E-04	48,68	14,342	2,763	0,513	66,30	77,6
268,5	6231	1,04E-03	49,34	15,088	2,939	0,572	67,94	76,9
278,5	6462	1,21E-03	50,00	15,811	3,114	0,634	69,56	76,4
288,4	6692	1,40E-03	50,66	16,557	3,289	0,702	71,21	75,8
298,4	6923	1,61E-03	51,10	17,281	3,487	0,772	72,64	75,1
308,3	7154	1,84E-03	51,75	18,004	3,662	0,846	74,27	74,6

KY içerisindeki U ve Pu izotoplarının yanma süresine göre değişim grafikleri Şekil 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir.



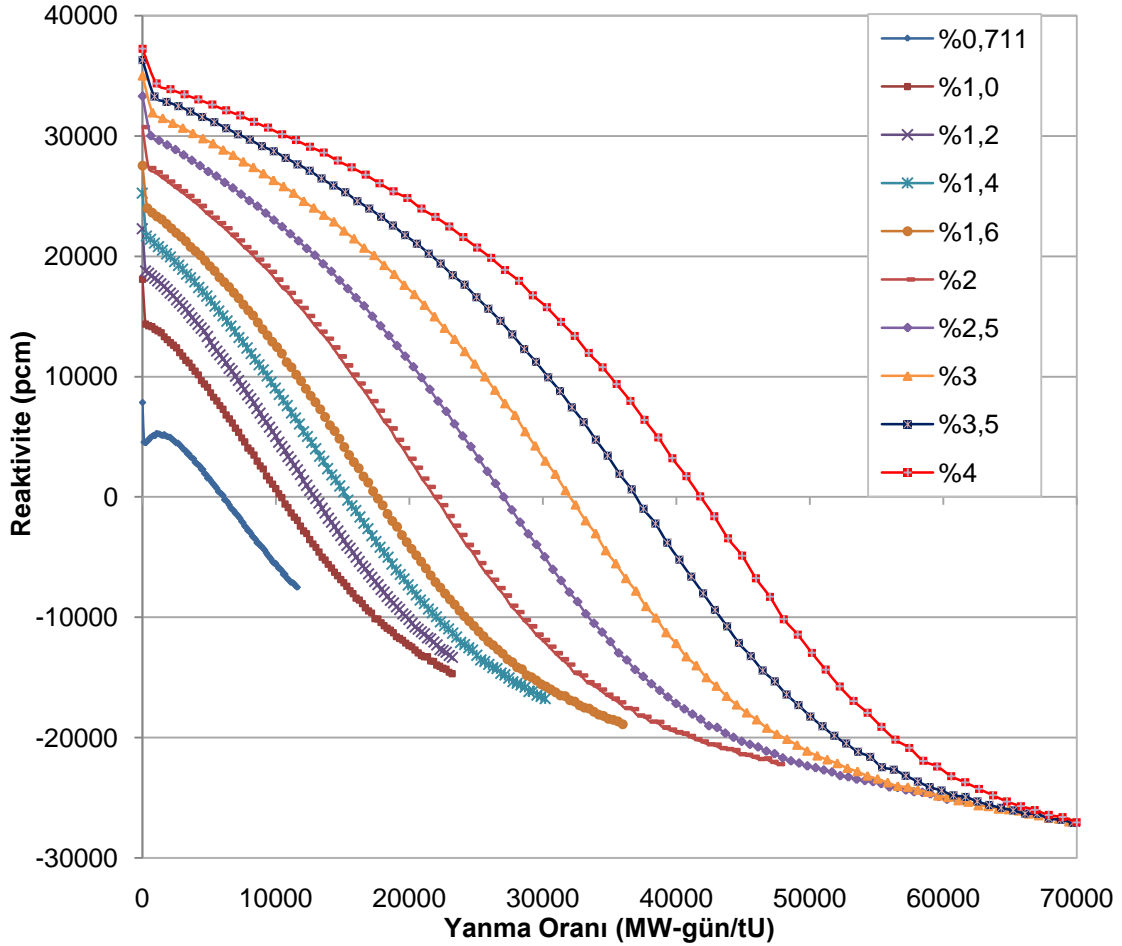
Şekil 4.2. Bir yakıt demetindeki U miktarının yanma süresince değişimi



Şekil 4.3. Bir yakıt demetindeki Pu miktarının yanma süresince değişimi

4.1.1 Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları

U yakıtlı CANDU6 reaktöründe HZU yakıtların yanması ile ilgili hesaplar yapılmıştır. Kütlece %0,9 ile %4 arasında değişen zenginlikteki HZU yakıtların, MONTEBURNS kodu kullanılarak, referans CANDU6 reaktöründe yakılmasıyla elde edilen reaktivite-yanma oranı eğrileri Şekil 4.4 ile verilmiştir.



Şekil 4.4. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için reaktivite-yanma oranı eğrisi

Şekil 4.4 ile verilen reaktivite-yanma oranı eğrileri, yanma başlangıcındaki Xe yığılma etkisi ihmal edilerek, Eşitlik 3.5 ile verilen 4. derece fonksiyona uyarlanmış ve elde edilen katsayılar Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5'te verilen katsayılar ve sızıntı-düzeltilme reaktivite değeri, Eşitlik 3.4'te kullanılarak, kütlece HZU yakıt zenginliğine karşılık gelen nihai yanma oranı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.5. U yakıtlı CANDU6 reaktörü reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları

U Yakıt Zenginliği (% ²³⁵ U)	Katsayılar				
	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
0,9	11889,8	-0,4286	-1,7696E-04	1,0091E-08	-1,6558E-13
1,0	14577,5	-0,5699	-1,5011E-04	7,8536E-09	-1,1485E-13
1,1	16812,3	-0,6617	-1,2516E-04	5,7881E-09	-7,0425E-14
1,2	18977,7	-0,7775	-9,7129E-05	3,7332E-09	-2,9560E-14
1,4	21659,3	-0,6296	-9,2995E-05	3,0442E-09	-2,1886E-14
1,6	23731,3	-0,4524	-9,2978E-05	2,6934E-09	-1,8502E-14
1,8	25253,5	-0,2559	-9,5268E-05	2,5238E-09	-1,7196E-14
2,0	26407,3	-0,0741	-9,5805E-05	2,3306E-09	-1,5324E-14
2,2	27250,1	0,0954	-9,5293E-05	2,1276E-09	-1,3183E-14
2,5	28085,6	0,3332	-9,4690E-05	1,9022E-09	-1,1000E-14
2,8	28648,4	0,5213	-9,2015E-05	1,6751E-09	-8,9511E-15
3,0	28904,8	0,6200	-8,9249E-05	1,5277E-09	-7,7477E-15
3,2	29630,4	0,6315	-8,2511E-05	1,3186E-09	-6,2238E-15
3,5	29288,6	0,8075	-8,1351E-05	1,2066E-09	-5,3775E-15
3,8	29388,5	0,8934	-7,6992E-05	1,0599E-09	-4,4123E-15
4,0	29433,7	0,9337	-7,3677E-05	9,6507E-10	-3,8319E-15

HZU yakıt zenginliği ile nihai yanma oranı arasında bir bağıntı ortaya koyabilmek için, Şekil 4.5 ile gösterilen yanma oranı - HZU yakıt zenginlik eğrisinin 2. derece bir fonksiyona uyarlanması ile Eşitlik 4.2 elde edilmiştir.²

$$B_D = -1981,9\varepsilon_U^2 + 29848 \varepsilon_U - 11027 \quad (4.2)$$

Burada B_D, HZU yakıtın nihai yanma oranını MW-gün/tU cinsinden; ε_U , ise HZU yakıtın zenginlik değerini (kütlece %) belirtmektedir. Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi, Eşitlik 4.2, 4,0'e kadar olan ε_U değerleri kullanılarak türetilmiştir; ancak daha yüksek ε_U değerleri için de yaklaşık doğru sonuç vermesi beklenir.

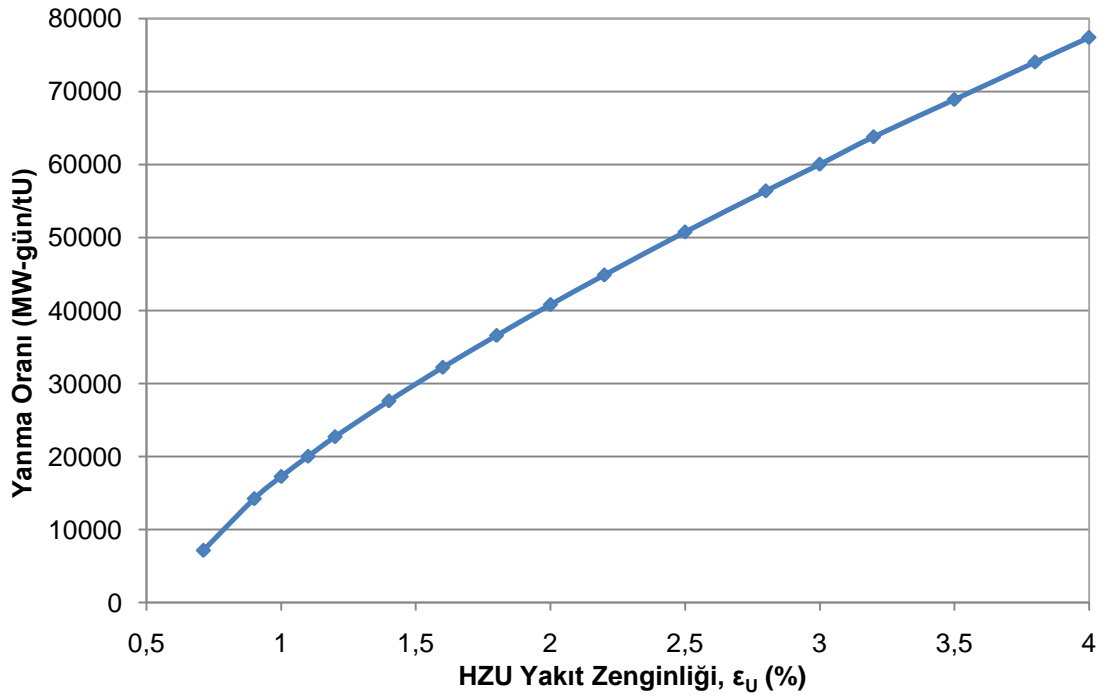
Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, U yakıt zenginliği arttıkça ulaşılan nihai yanma oranı da artmaktadır³.

² Uyarlamanın başarısını ölçen belirleme katsayısı (R^2) değeri 0,996 ile 0,999 arasındadır.

³ U yakıtlar için bulunan sonuçlar Driscoll ve arkadaşları [38] tarafından sunulan "Combustion Engineering (CE)" grafik verileri ve Türkmen'in [14] çalışmasında elde edilen sonuçlar ile uyumludur.

Çizelge 4.6. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için yanma oranı değerleri

U Yakıt Zenginliği, ϵ_U (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	Yanma Süresi (gün)
0,711	7154	308,3
0,9	14235	613,4
1,0	17269	744,1
1,1	20038	863,5
1,2	22719	979,0
1,4	27622	1190
1,6	32221	1388
1,8	36587	1577
2,0	40818	1759
2,2	44869	1933
2,5	50766	2187
2,8	56390	2430
3,0	60040	2564
3,2	63803	2749
3,5	68906	2969
3,8	74035	3190
4,0	77409	3335



Şekil 4.5. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için yanma oranı-zenginlik eğrisi

4.1.2 DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları

U yakıtlı CANDU6 reaktörü için doğal U gereksinimi (DUG) ve nükleer kaynak değerlendirme oranı (NKDO) hesapları Eşitlik 3.6, 3.13 ve 3.14'te verilen ifadeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DUT hesaplarında, doğal U yakıtlı CANDU6 reaktörü referans olarak seçilmiştir. Referans doğal U yakıt çevrimindeki DUG değeri ile U yakıtlı diğer çevrimlerdeki DUG değerleri karşılaştırılarak, DUG değerindeki değişime bakılmıştır.

U yakıtlı CANDU6 reaktörü için DUG, DUT ve NKDO hesap sonuçları Çizelge 4.7'de sunulmuştur⁴. DUG, DUT ve NKDO hesaplarında $\eta_{th,CANDU}=0,32$; $x_T=0,25$ ve $x_F=0,711$ olarak alınmıştır. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için YG, DUT (%) ve KAYNAK/YÜK sonuçları EK B'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için DUG, DUT ve NKDO

²³⁵ U oranı, x_p (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	DUG (tDU/GW _e -yıl)	DUT (tDU/GW _e -yıl)	NKDO (MW _{th} -gün/kgDU)
0,711	7154	159,4	0	7,154
0,9	14235	113,0	46,46	10,10
1,0	17269	107,5	51,98	10,61
1,1	20038	105,0	54,48	10,87
1,2	22719	103,5	55,98	11,02
1,4	27622	103,0	56,43	11,07
1,6	32221	103,7	55,77	11,00
1,8	36587	104,8	54,62	10,88
2,0	40818	106,1	53,36	10,75
2,2	44869	107,5	51,91	10,61
2,5	50766	109,7	49,78	10,40
2,8	56390	111,9	47,55	10,19
3,0	60040	113,3	46,11	10,06
3,2	63803	114,4	45,04	9,97
3,5	68906	116,7	42,74	9,77
3,8	74035	118,6	40,80	9,61
4,0	77409	119,9	39,58	9,52

⁴ Doğal U ve %1,2'lik HZU için bu çalışmada bulunan DUG değerleri, UAEA'nın HWR'lerle ilgili 407 nolu teknik raporunda [16] sırasıyla 157 ve 116 tDU/GW_e-yıl; Gupta ve arkadaşlarının [23] çalışmasında sırasıyla 168 ve 104 tDU/GW_e-yıl; Türkmen ve Zabunoğlu'nun [24] çalışmasında ise sırasıyla 159,4 ve 106,8 tDU/GW_e-yıl olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.7'de görüldüğü üzere, yanma oranı arttıkça DUG değeri önce hızlıca azalmakta ve en düşük değere ulaştıktan sonra hafifçe artmaktadır. DUT değerleri DUG değerleri ile ters orantılıdır. DUG için gözlemlenenlerin tam tersi DUT için görülmektedir. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için en düşük DUG değeri 103 tU/GW_e-yıl ile %1,4'lük HZU'da gerçekleşmektedir.

NKDO ise yanma oranı arttıkça önce hızlıca artmakta ve en yüksek değere ulaştıktan sonra hafifçe azalmaktadır. U yakıtlı CANDU6 reaktörü için NKDO 11,07 MW_{th}-gün/kgDU ile %1,4'lük HZU'da gerçekleşmektedir.

4.2 U+Th Yakıtlı CANDU Reaktörü

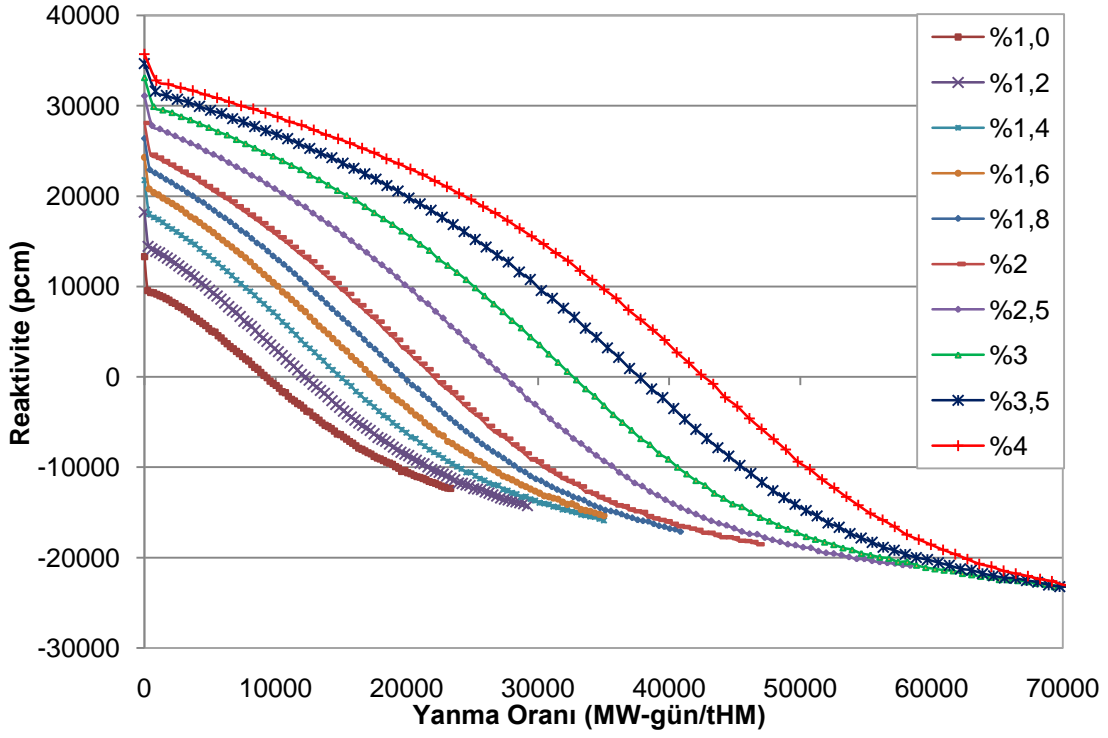
CANDU6 korundaki bütün yakıt kanallarının aynı yakıt demetleri ile yüklenildiği bütün-kor yanma hesaplarında “homojen-demet” ve “karışık-demet” olmak üzere iki farklı yaklaşım ele alınmıştır. “Homojen demet”in tüm yakıt elemanları aynı miktar ve kompozisyonda (U-Th)O₂ içermektedir. “Karışık demet”te bazı yakıt elemanları sadece hafif zenginleştirilmiş UO₂, bazıları ise sadece ThO₂ içerir.

4.2.1 Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları

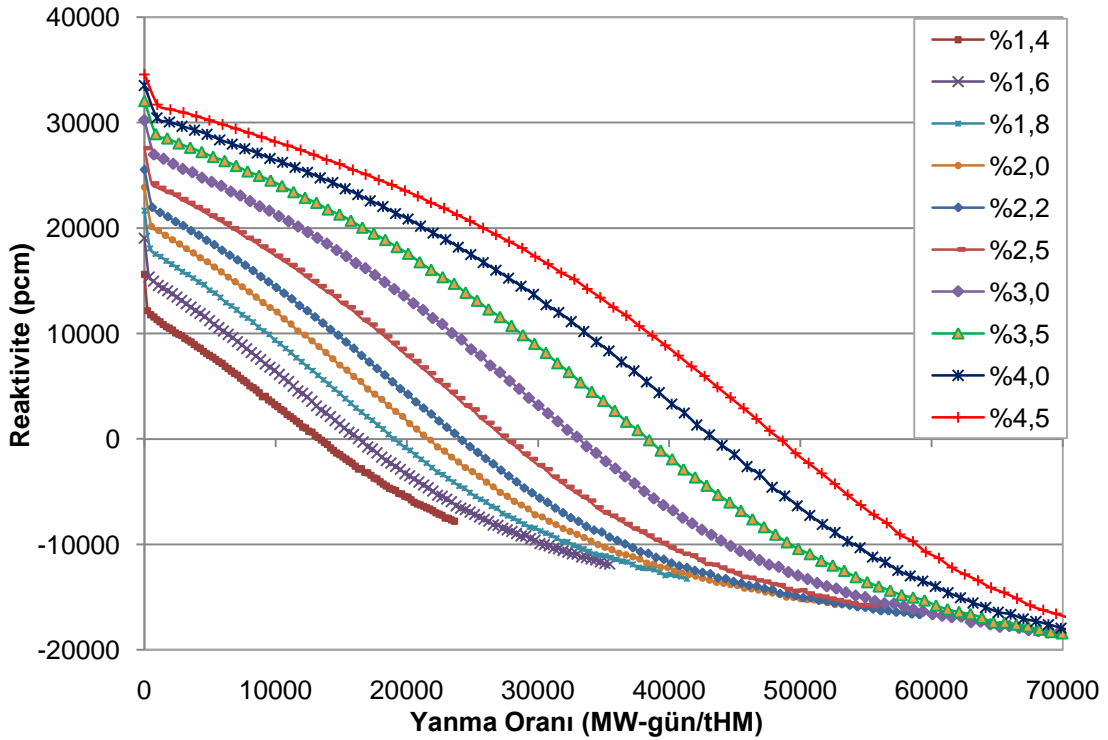
4.2.1.1 Homojen-Demet

Çeşitli zenginlikteki HZU yakıtların belirli oranlarda Th (kütlece %10, %30, %50) ile karıştırılmasıyla elde edilen homojen-demetin CANDU6 reaktör korundaki bütün yakıt demetlerinde yanması ile ilgili hesaplar yapılmıştır.

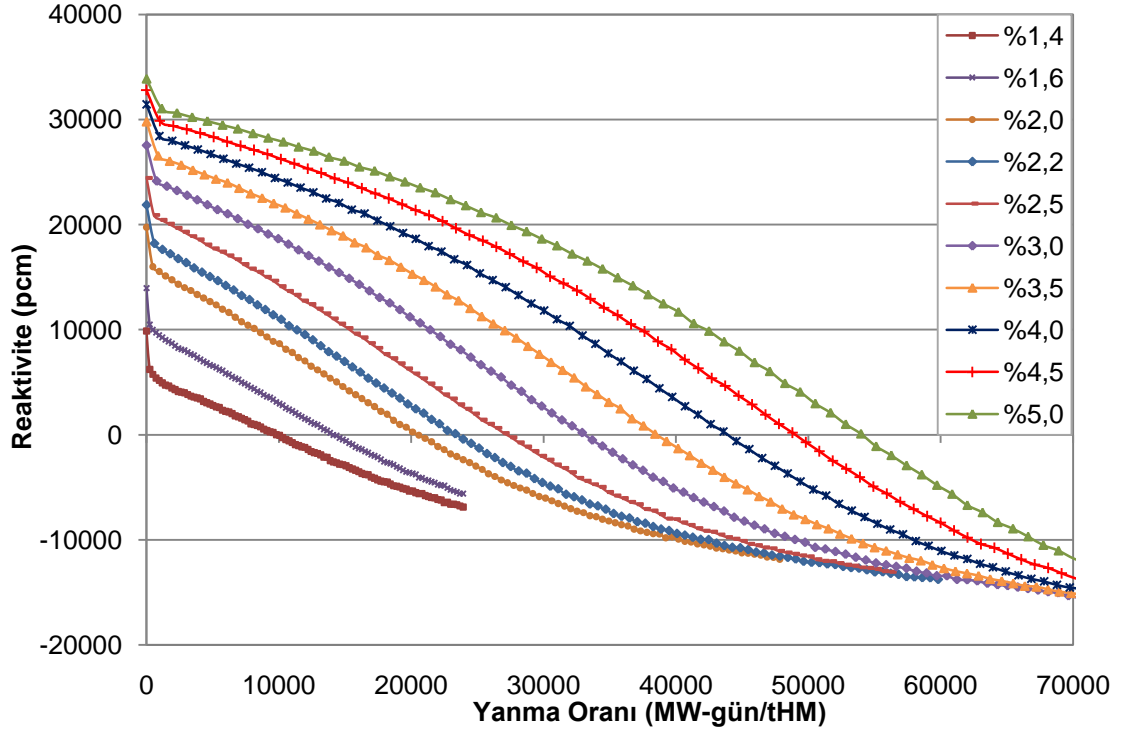
U+Th yakıt içerisinde kütlece %0,9 ile %5 arasında değişen oranlarda ²³⁵U ve kütlece %10, %30 ve %50 oranında Th içeren yakıtların, MONTEBURNS kodu kullanılarak, CANDU6 reaktöründe yakılmasıyla elde edilen reaktivite-yanma oranı eğrileri sırasıyla Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8 ile verilmiştir.



Şekil 4.6. Homojen-demet için reaktivite eğrisi (%10 Th)



Şekil 4.7. Homojen-demet için reaktivite eğrisi (%30 Th)



Şekil 4.8. Homojen-demet için reaktivite eğrisi (%50 Th)

Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de sunulan reaktivite eğrileri, yanma başlangıcındaki Xe yığılma etkisi ihmal edilerek, Eşitlik 3.5 ile verilen 4. derece fonksiyona uyarlanmasıyla elde edilen katsayılar Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Homojen-demet için reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları

Th Oranı, θ (%)	^{235}U Oranı, R_u (%) ^a	Katsayılar				
		A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
10	0,9	6494,6	-0,0922	-1,7161E-04	1,1041E-08	-2,2732E-13
	1,0	9670,2	-0,4720	-1,0899E-04	5,9416E-09	-9,1763E-14
	1,2	14562,0	-0,6541	-8,4923E-05	3,9796E-09	-4,9964E-14
	1,4	18033,8	-0,6156	-7,9462E-05	3,1504E-09	-3,3289E-14
	1,6	20725,9	-0,5973	-6,5451E-05	2,0836E-09	-1,6072E-14
	1,8	22700,5	-0,4632	-6,6595E-05	1,8776E-09	-1,3429E-14
	2,0	24157,1	-0,3012	-6,8873E-05	1,7415E-09	-1,1632E-14
	2,2	25444,1	-0,2255	-6,3046E-05	1,3831E-09	-7,7051E-15
	2,5	26793,7	-0,0372	-6,3657E-05	1,2480E-09	-6,5629E-15
	2,8	27795,8	0,0977	-6,0504E-05	1,0488E-09	-4,9315E-15
3,0	28284,6	0,1893	-5,9548E-05	9,6937E-10	-4,3526E-15	
3,2	28682,3	0,2679	-5,8013E-05	8,8541E-10	-3,7574E-15	
3,5	28943,2	0,4231	-5,9052E-05	8,5422E-10	-3,5911E-15	
3,8	28943,2	0,4231	-5,9052E-05	8,5422E-10	-3,5911E-15	
4,0	29776,2	0,4743	-5,0026E-05	6,1073E-10	-2,1100E-15	

30	1,2	7342,79	-0,5179	-4,6707E-05	2,528E-09	-3,66E-14
	1,4	12062,6	-0,7427	-2,089E-05	5,833E-10	5,5272E-15
	1,6	15328,5	-0,6563	-3,8137E-05	1,511E-09	-1,474E-14
	1,8	17988,2	-0,5893	-4,0287E-05	1,361E-09	-1,167E-14
	2,0	20089,5	-0,4855	-4,3665E-05	1,29E-09	-1,007E-14
	2,2	21723,3	-0,3747	-4,5807E-05	1,195E-09	-8,441E-15
	2,5	23864,6	-0,3095	-3,9872E-05	8,398E-10	-4,533E-15
	2,8	25226,6	-0,1401	-4,3368E-05	8,29E-10	-4,371E-15
	3,0	25923	-0,0351	-4,4896E-05	8,058E-10	-4,093E-15
	3,2	26601,9	0,03021	-4,3784E-05	7,284E-10	-3,447E-15
	3,5	27306	0,14656	-4,3801E-05	6,682E-10	-2,954E-15
	3,8	28117,4	0,17911	-3,9577E-05	5,4E-10	-2,106E-15
	4,0	28373	0,25147	-3,9953E-05	5,234E-10	-1,99E-15
	4,2	29054,6	0,20254	-3,412E-05	3,989E-10	-1,271E-15
	4,5	29614,2	0,2216	-3,0948E-05	3,253E-10	-8,912E-16
50	1,4	5823,5	-0,6418	8,8390E-06	-6,1436E-10	1,8636E-14
	1,6	10261,8	-0,7911	1,3083E-05	-9,5249E-10	2,6468E-14
	1,8	13355,2	-0,6590	-1,6082E-05	6,8584E-10	-5,9779E-15
	2,0	15976,5	-0,5811	-2,3535E-05	8,2535E-10	-6,9640E-15
	2,2	18212,7	-0,5359	-2,4698E-05	7,3997E-10	-5,4727E-15
	2,5	20745,8	-0,4286	-2,7346E-05	6,6808E-10	-4,1891E-15
	2,8	22616,1	-0,2906	-3,1046E-05	6,5511E-10	-3,7470E-15
	3,0	23646,8	-0,2159	-3,1922E-05	6,1830E-10	-3,3080E-15
	3,2	24604,6	-0,1678	-3,1007E-05	5,4893E-10	-2,6868E-15
	3,5	25641,2	-0,0582	-3,2241E-05	5,1877E-10	-2,3674E-15
	3,8	26575,5	0,0101	-3,1138E-05	4,5243E-10	-1,8726E-15
	4,0	27047,0	0,0635	-3,0983E-05	4,2581E-10	-1,6824E-15
	4,2	27471,5	0,1014	-2,9384E-05	3,6963E-10	-1,3142E-15
	4,5	28274,2	0,1116	-2,7004E-05	3,1387E-10	-1,0223E-15
	4,8	28770,1	0,1555	-2,5840E-05	2,7766E-10	-8,3377E-16
5,0	28905,2	0,2189	-2,6792E-05	2,8279E-10	-8,5922E-16	

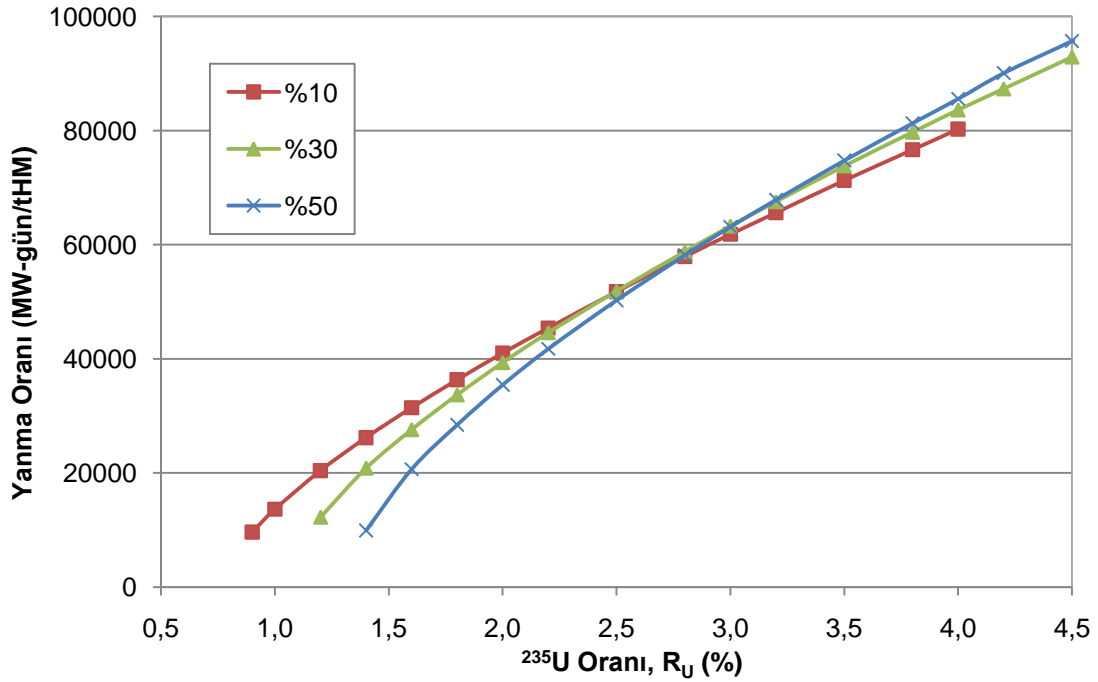
^a R_U (Ratio of ²³⁵U) homojen-demetteki U+Th yakıt içerisindeki toplam ²³⁵U oranını simgeler.

Çizelge 4.8'de verilen katsayılar ve sızıntı-düzeltilme reaktivite değeri, Eşitlik 3.4'te kullanılarak, kütlece %10, %30 ve %50 Th içeriğine sahip U+Th yakıtlar için nihai yanma oranı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Homojen-demet için yanma oranı - ²³⁵U oranı eğrileri Şekil 4.9 ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Homojen-demet için yanma oranı değerleri

²³⁵ U Oranı, R _U (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tHM)			Yanma Süresi (gün)		
	%10 Th	%30 Th	%50 Th	%10 Th	%30 Th	%50 Th
0,9	9661			413,8		
1,0	13678			585,9		
1,2	20438	12318		875,4	521,3	
1,4	26221	20898	9963	1123,1	884,4	416,5
1,6	31468	27644	20697	1347,9	1169,9	865,3
1,8	36357	33742	28463	1557,3	1428,0	1190,0
2,0	41042	39389	35472	1758,0	1666,9	1483,0
2,2	45433	44620	41777	1946,0	1888,3	1746,6
2,5	51812	51903	50272	2219,3	2196,5	2101,7
2,8	57948	58816	58172	2482,1	2489,1	2432,0
3,0	61862	63284	63140	2649,7	2678,1	2639,7
3,2	65650	67557	67864	2812,0	2859,0	2837,2
3,5	71303	73818	74748	3054,1	3123,9	3124,9
3,8	76685	79726	81287	3284,6	3373,9	3398,3
4,0	80304	83625	85553	3439,6	3538,9	3576,6
4,2		87323	90063		3695,4	3765,2
4,5		92892	95682		3931,1	4000,0
4,8			101537			4244,8
5,0			105386			4405,7



Şekil 4.9. Homojen-demet için yanma oranı-zenginlik eğrileri

%10, %30 ve %50 Th içeriğe sahip U+Th yakıtlar içerisindeki değişen oranlardaki ^{235}U ile nihai yanma oranı arasında bir bağıntı ortaya koyabilmek için, Şekil 4.9 ile gösterilen yanma oranı - ^{235}U oranı eğrileri Eşitlik 4.3'te sunulan 2. derece fonksiyona uyarlanmıştır.

$$B_D(R_U) = A_0 + A_1 R_U + A_2 R_U^2 \quad (4.3)$$

Burada B_D , nihai yanma oranını MW-gün/tHM cinsinden; R_U , yüklenen U+Th yakıttaki ^{235}U 'in kütle olarak yüzdesini belirtmektedir. U+Th yakıtlar için katsayılar Çizelge 4.10'da verilmektedir. Yüklenen U+Th yakıttaki Th'nin kütle olarak yüzdesi θ olmak üzere, x_P 'nin, R_U ve θ cinsinden ifadesi Eşitlik 3.10 ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Homojen-demet için yanma oranı eğrisi uyarlama katsayıları

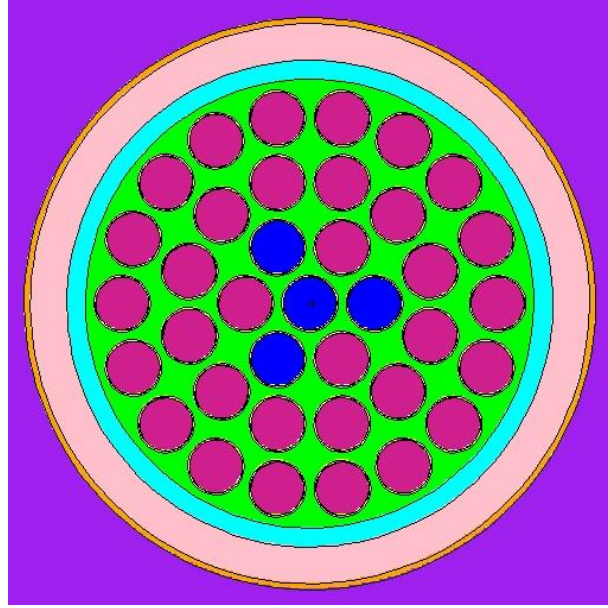
Th Oranı (%)	Katsayılar		
	A_0	A_1	A_2
10	-17372	33850	-2408,8
30	-28075	38531	-2637,9
50	-42836	44312	-2987,6

Şekil 4.9 ve Çizelge 4.9'dan görüldüğü üzere, U+Th yakıt içerisindeki Th oranı arttıkça aynı nihai yanma oranına ulaşmak için gereken ^{235}U oranı da artmaktadır. Fakat, yüksek yanma oranı değerlerinde (60000 MW-gün/tHM yanma oranından sonra) tam tersi bir durum gözlenmektedir. Bunun nedeni, U+Th yakıt CANDU6 reaktöründe uzun süre kaldıkça enerji üretimindeki (^{232}Th 'nin ^{233}U 'e dönüşümünden kaynaklanan) Th katkısının artması ile açıklanabilir.

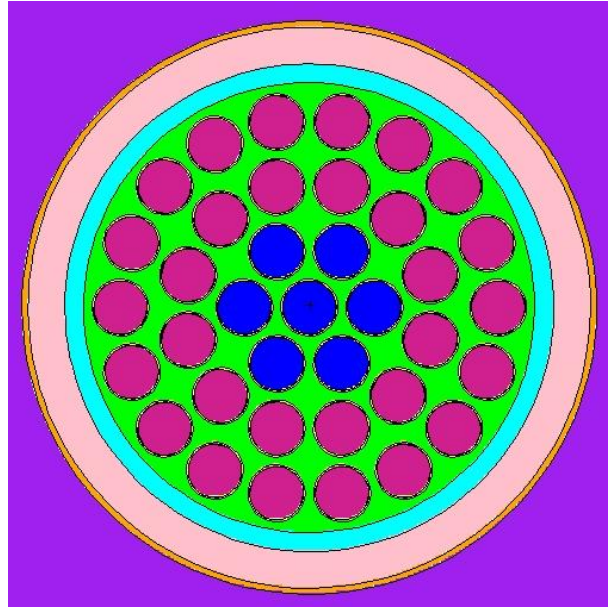
4.2.1.2 Karışık-Demet

CANDU6 korundaki bütün yakıt kanalları aynı karışık-demet ile yüklenerek yanma hesapları yapılmıştır. ThO_2 ve UO_2 'nin yakıt elemanlarına ayrı olarak yüklendiği "karışık-demet" yaklaşımında, Th miktarları farklı iki model ile ele alınmıştır.

Şekil 4.10'da gösterildiği gibi yakıt demeti merkezinde bulunan 4 ve 7 adet yakıt elemanına ThO_2 'nin, geriye kalan 33 ve 30 yakıt elemanlarına ise farklı oranlarda HZU'nun konulduğu "Mix-4 Th" ve "Mix-7 Th" karışık-demet yakıt çevrimleri incelenmiştir. Th yakıt çubuklarında daha yüksek yanma sağlayabilmek için bu çubuklar demet merkezine konmuştur.



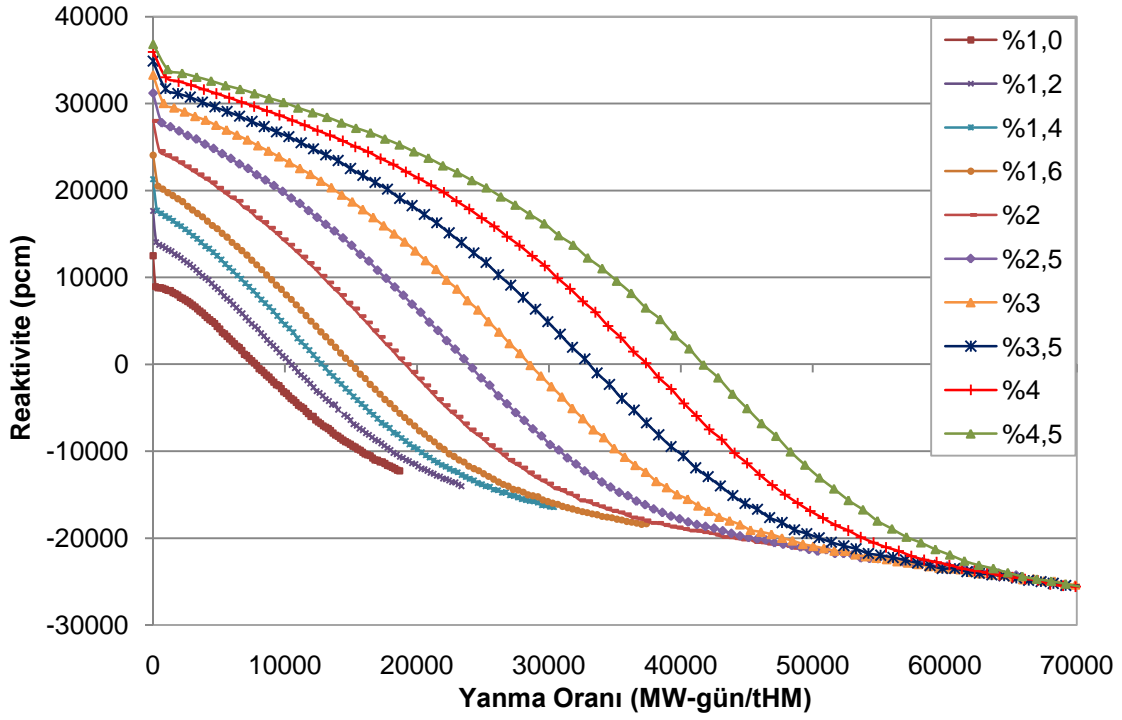
a) Mix-4 Th



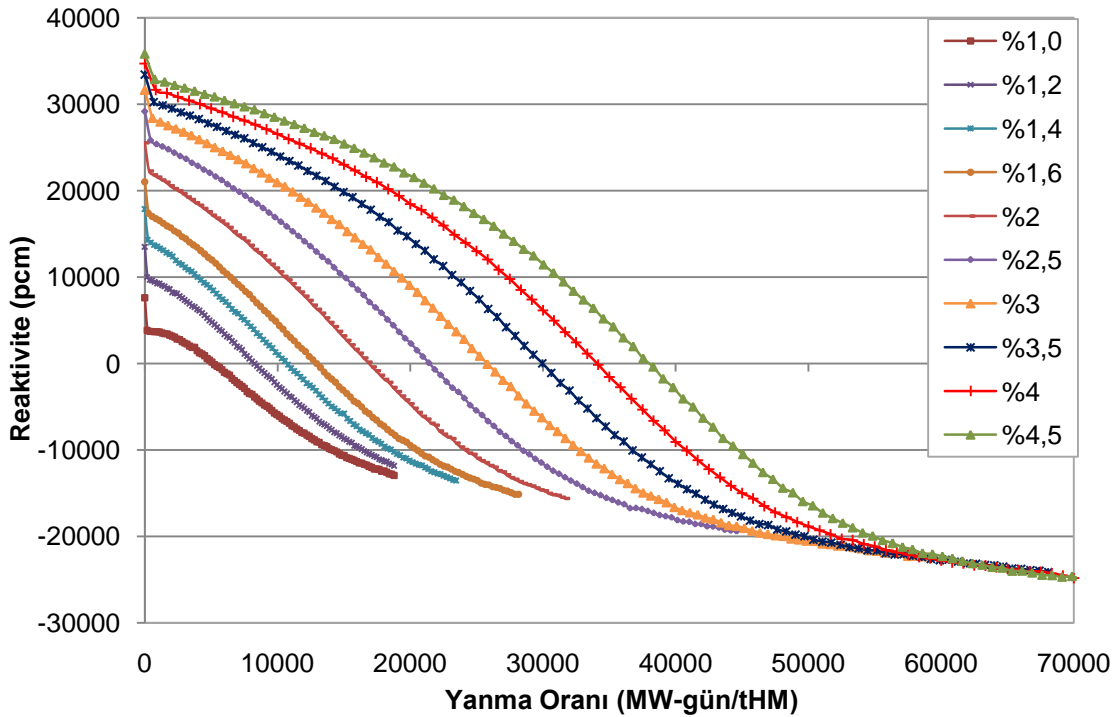
b) Mix-7 Th

Şekil 4.10. Karışık-demet MCNP5 modeli

Mix-4 Th modeli U+Th yakıtta kütlece %10,2 oranında Th içerirken, Mix-7 Th modeli kütlece %18 oranında Th içermektedir. Mix-4 Th ve Mix-7 Th için yanma oranı - reaktivite eğrileri Şekil 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Mix-4 Th için reaktivite eğrisi



Şekil 4.12. Mix-7 Th için reaktivite eğrisi

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 ile verilen reaktivite eğrileri 4. derece fonksiyona uyarlanmış ve katsayılar Çizelge 4.11'te verilmiştir.

Çizelge 4.11. Karışık-demet için reaktivite eğrisi uyarılma katsayıları

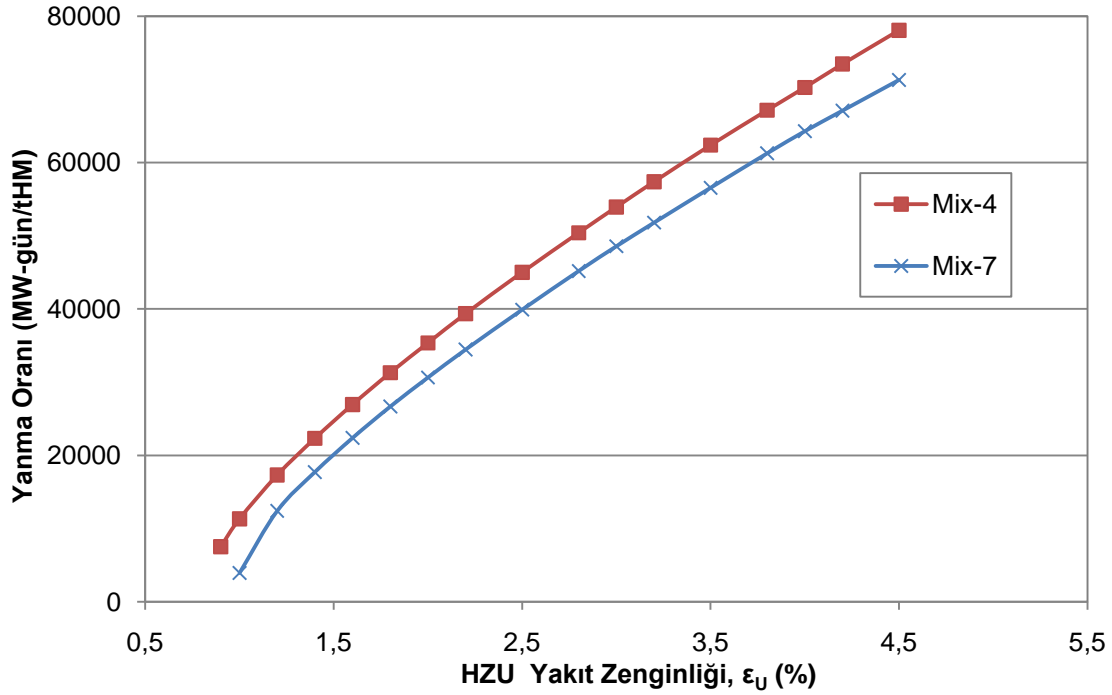
Th Oranı	²³⁵ U Oranı, $\epsilon_U(\%)$	Katsayılar				
		A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Mix-4 Th(%10,2)	0,9	5334,8	0,2621	-2,7870E-04	1,8590E-08	-3,8776E-13
	1,0	9049,1	-0,2966	-1,9254E-04	1,2151E-08	-2,2864E-13
	1,2	14177,0	-0,7286	-1,0957E-04	5,5523E-09	-7,4205E-14
	1,4	17637,7	-0,5979	-1,1749E-04	5,1951E-09	-6,2359E-14
	1,6	20316,0	-0,4902	-1,1233E-04	4,2992E-09	-4,5074E-14
	1,8	22299,2	-0,3209	-1,1252E-04	3,7995E-09	-3,5774E-14
	2,0	23807,0	-0,1559	-1,1127E-04	3,3514E-09	-2,8529E-14
	2,2	25194,3	-0,0786	-1,0202E-04	2,7466E-09	-2,0909E-14
	2,5	26515,8	0,1293	-9,8964E-05	2,3323E-09	-1,5797E-14
	2,8	27397,2	0,3263	-9,6607E-05	2,0328E-09	-1,2463E-14
	3,0	28172,6	0,3374	-8,7778E-05	1,7085E-09	-9,6785E-15
	3,2	28742,9	0,3751	-8,1757E-05	1,4819E-09	-7,8258E-15
	3,5	29254,7	0,4831	-7,7580E-05	1,2864E-09	-6,2605E-15
	3,8	29604,3	0,5946	-7,8729E-05	1,2460E-09	-5,8258E-15
	4,0	29106,4	0,7819	-7,9059E-05	1,1748E-09	-5,2425E-15
	4,2	29467,5	0,7683	-7,3011E-05	1,0245E-09	-4,3078E-15
4,5	29470,5	0,8559	-7,0436E-05	9,2831E-10	-3,6900E-15	
Mix-7 Th (%18)	1,0	3806,5	-0,0545	-2,1529E-04	1,3951E-08	-2,7561E-13
	1,2	9882,1	-0,4359	-1,5733E-04	9,2781E-09	-1,5664E-13
	1,4	14296,4	-0,7422	-1,0004E-04	4,7783E-09	-5,6126E-14
	1,6	17306,6	-0,6358	-1,0206E-04	4,2474E-09	-4,5091E-14
	1,8	19772,4	-0,5384	-9,9588E-05	3,6519E-09	-3,4698E-14
	2,0	22096,8	-0,6666	-6,0899E-05	1,3068E-09	-3,2374E-15
	2,2	23379,5	-0,4011	-8,0313E-05	2,0845E-09	-1,1377E-14
	2,5	25085,7	-0,1780	-8,3950E-05	1,9988E-09	-1,1694E-14
	2,8	26071,0	0,1332	-9,5654E-05	2,1991E-09	-1,4273E-14
	3,0	26696,7	0,2515	-9,4956E-05	2,0567E-09	-1,2804E-14
	3,2	27265,7	0,3328	-9,1362E-05	1,8436E-09	-1,0716E-14
	3,5	27890,1	0,4617	-8,7956E-05	1,6264E-09	-8,7558E-15
	3,8	28184,6	0,6202	-8,7582E-05	1,5162E-09	-7,7970E-15
	4,0	28355,4	0,6990	-8,5905E-05	1,4189E-09	-7,0031E-15
4,2	29240,0	0,5627	-7,1285E-05	1,0547E-09	-4,4370E-15	
4,5	30796,0	0,2696	-4,4512E-05	4,1926E-10	-3,2574E-17	

Çizelge 4.11 verilen katsayılar ve sızıntı-düzeltilme reaktivite değeri, Eşitlik 3.4'te kullanılarak, karışık-demet yakıtlar için nihai yanma oranı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.12'de sunulmuştur.

Çizelge 4.12. Karışık-demet için yanma oranı değerleri

Th Oranı	²³⁵ U Oranı, ϵ_U (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tHM)	Yanma Süresi (gün)
Mix-4 Th (%10,2)	0,9	7506	321,4
	1,0	11318	484,6
	1,2	17297	740,5
	1,4	22317	955,5
	1,6	26941	1153,4
	1,8	31280	1339,2
	2,0	35349	1513,4
	2,2	39353	1684,8
	2,5	44998	1926,5
	2,8	50393	2157,5
	3,0	53908	2307,9
	3,2	57371	2456,2
	3,5	62369	2670,2
	3,8	67131	2782,2
	4,0	70243	3007,2
	4,2	73448	3144,4
4,5	78052	3341,5	
Mix-7 Th (%18)	1,0	3899	166,1
	1,2	12391	527,9
	1,4	17699	754,1
	1,6	22364	952,8
	1,8	26647	1135,3
	2,0	30620	1239,3
	2,2	34444	1467,5
	2,5	39893	1699,6
	2,8	45179	1924,9
	3,0	48563	2069,0
	3,2	51791	2206,5
	3,5	56557	2409,6
	3,8	61262	2610,0
	4,0	64283	2738,7
	4,2	67099	2858,7
	4,2	67099	2858,7
4,5	71298	3037,6	

Karışık-demette kullanılan HZU yakıt içerisindeki ^{235}U oranı (ϵ_U) ile nihai yanma oranı arasında bir bağıntı ortaya koyabilmek için Şekil 4.13 ile gösterilen yanma oranı - ^{235}U oranı eğrisi Eşitlik 4.4 ile gösterilen 2. derece fonksiyona uyarlanmış ve Eşitlik 4.4 elde edilmiştir.



Şekil 4.13. Karışık-demet için yanma oranı-zenginlik eğrileri

$$B_D(\epsilon_U) = A_0 + A_1 \epsilon_U + A_2 \epsilon_U^2 \quad (4.4)$$

Burada B_D , MW-gün/tHM cinsinden nihai yanma oranını; ϵ_U ise karışık-demette kullanılan HZU'nun zenginliğini belirtmektedir. Çizelge 4.11'de görüldüğü gibi, Eşitlik 4.4, 4,5'e kadar olan ϵ_U değerleri kullanılarak türetilmiştir; ancak daha yüksek ϵ_U değerleri için de yaklaşık doğru sonuç vermesi beklenir.

Karışık-demet (Mix-4 Th ve Mix-7 Th) için Eşitlik 4.4'te gösterilen yanma oranı eğrisi uyarlama katsayıları Çizelge 4.13'te verilmektedir.

Çizelge 4.13. Karışık-demet için yanma oranı eğrisi uyarlama katsayıları

Th Oranı	Katsayılar		
	A_0	A_1	A_2
Mix-4	-14931	28464	-1778,8
Mix-7	-20510	29293	-2020,8

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.13'te görüldüğü üzere, belirli bir Th oranı için U yakıt zenginliği arttıkça nihai yanma oranı artmaktadır. Ayrıca, karışık yakıt demetinde Th oranı arttıkça aynı nihai yanma oranına ulaşmak için daha yüksek ^{235}U oranına ihtiyaç duyulmaktadır.

4.2.2 DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları

Homojen ve karışık U+Th yakıt demeti ile yüklenmiş CANDU6 reaktörü için DUG, DUT ve NKDO hesapları Eşitlik 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 ve 3.17'de verilen ifadeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. U+Th yakıtlı CANDU6 reaktörü için DUG, DUT ve NKDO hesaplarında $\eta_{\text{th,CANDU}}=0,32$; $x_{\text{T}}=0,25$ ve $x_{\text{F}}=0,711$ olarak alınmıştır [24]. Homojen ve karışık U+Th yakıt demeti ile yüklenmiş CANDU6 reaktörü için YG, DUT (%) ve KAYNAK/YÜK oranı gibi ilave hesaplama sonuçları EK B'de verilmiştir.

4.2.2.1 Homojen-Demet

Kütlece %10, %30 ve %50 Th oranına sahip homojen-demet CANDU6 reaktörü için DUG, DUT ve NKDO hesap sonuçları Çizelge 4.14'te sunulmuştur.

Çizelge 4.14. Homojen-demet için DUG, DUT ve NKDO

Th oranı, θ (%)	^{235}U oranı, R_{U} (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tHM)	DUG (tDU/GW _e -yıl)	DUT (tDU/GW _e -yıl)	NKDO (MW _{th} -gün/kgDU)
	0,9	9661	172,9	0	6,18
	1,0	13678	140,2	19,25	7,68
	1,2	20438	118,0	41,40	9,23
	1,4	26221	110,9	48,56	9,90
	1,6	31468	108,1	51,33	10,21
	1,8	36357	107,2	52,25	10,34
	2,0	41042	107,0	52,43	10,39
10	2,2	45433	107,6	51,88	10,36
	2,5	51812	108,6	50,80	10,29
	2,8	57948	109,9	49,49	10,19
	3,0	61862	111,0	48,45	10,11
	3,2	65650	112,1	47,32	10,02
	3,5	71303	113,6	45,80	9,90
	3,8	76685	115,3	44,09	9,76
	4,0	80304	116,3	43,13	9,69

	1,2	12318	205,9	0	4,88
	1,4	20898	145,0	14,40	7,07
	1,6	27644	127,5	31,90	8,15
	1,8	33742	119,2	40,28	8,82
	2,0	39389	114,6	44,80	9,25
	2,2	44620	112,3	47,15	9,51
	2,5	51903	110,8	48,60	9,71
30	2,8	58816	110,4	49,01	9,81
	3,0	63284	110,5	48,99	9,85
	3,2	67557	110,8	48,65	9,85
	3,5	73818	111,4	47,99	9,83
	3,8	79726	112,5	46,94	9,77
	4,0	83625	113,2	46,27	9,73
	4,2	87323	114,0	45,39	9,67
	4,5	92892	115,2	44,24	9,59
	1,4	9963	316,6	0	3,05
	1,6	20697	176,3	0	5,59
	1,8	28463	145,6	13,83	6,89
	2,0	35472	130,8	28,65	7,77
	2,2	41777	122,9	36,55	8,35
	2,5	50272	116,9	42,55	8,89
	2,8	58172	113,8	45,66	9,23
50	3,0	63140	112,7	46,78	9,37
	3,2	67864	112,1	47,33	9,46
	3,5	74748	111,7	47,72	9,56
	3,8	81287	111,9	47,58	9,60
	4,0	85553	112,1	47,37	9,61
	4,2	90063	111,9	47,49	9,64
	4,5	95682	113,1	46,31	9,58
	4,8	101537	113,9	45,52	9,54
	5,0	105386	114,5	44,98	9,52

Çizelge 4.14'ten görüldüğü üzere, homojen-demet için:

- Yanma oranı arttıkça DUG değerlerinin önce hızlıca azaldığı ve en düşük değere ulaştıktan sonra hafifçe arttığı görülmektedir. DUT değerleri DUG değerleri ile ters orantılıdır. DUG için gözlenenlerin tam tersi DUT için görülmektedir.
- Homojen-demet U+Th yakıtlarda en düşük DUG değeri (aynı zamanda en yüksek DUT değeri) %10 Th oranı için 107 tU/GWe-yıl ile %2 ²³⁵U oranında, %30 Th oranı için 110,4 tU/GWe-yıl ile %2,8 ²³⁵U oranında ve %50 Th oranı için 111,7 tU/GWe-yıl ile %3,5 ²³⁵U oranında gerçekleşmektedir.

- Yanma oranı arttıkça, DUG'un tersine, NKDO önce hızlıca artmakta ve en yüksek değere ulaştıktan sonra hafifçe azalmaktadır.
- Homojen-demet U+Th yakıtlarda en yüksek NKDO değeri %10 Th oranı için 10,39 MW_{th}-gün/kgDU ile %2 ²³⁵U oranında, %30 Th oranı için 9,85 MW_{th}-gün/kgDU ile %3,2 ²³⁵U oranında ve %50 Th oranı için 9,64 MW_{th}-gün/kgDU ile %4,2 ²³⁵U oranında gerçekleşmektedir.

4.2.2.2 Karışık-demet

Karışık-demet U+Th yakıtlı CANDU6 reaktörü için DUG, DUT ve NKDO hesap sonuçları Çizelge 4.15'te sunulmuştur

Çizelge 4.15'te görüldüğü üzere, homojen-demete benzer şekilde, karışık-demette, yanma oranı arttıkça DUG değerlerinin önce hızlıca azaldığı ve en düşük değere ulaştıktan sonra hafifçe arttığı görülmektedir. DUG için gözlenenlerin tam tersi DUT için görülmektedir. Yanma oranı arttıkça NKDO'nun önce arttığı ve en yüksek değere ulaştıktan sonra hafifçe azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.15. Karışık-demet için DUG, DUT ve NKDO

Th Oranı	²³⁵ U oranı, ε _U (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tHM)	DUG (tDU/GW _e -yıl)	DUT (tDU/GW _e -yıl)	NKDO (MW _{th} -gün/kgDU)
	0,9	7506	192,3	0	5,49
	1,0	11318	147,2	12,25	7,24
	1,2	17297	122,0	37,45	8,86
	1,4	22317	114,5	44,98	9,53
	1,6	26941	111,3	48,14	9,86
	1,8	31280	110,1	49,38	10,02
	2,0	35349	110,0	49,48	10,07
	2,2	39353	110,1	49,38	10,09
Mix4 (%10,2)	2,5	44998	111,1	48,38	10,04
	2,8	50393	112,4	47,04	9,94
	3,0	53908	113,3	46,13	9,88
	3,2	57371	114,2	45,23	9,81
	3,5	62369	115,7	43,70	9,70
	3,8	67131	117,5	41,98	9,57
	4,0	70243	118,6	40,86	9,49
	4,2	73448	119,5	39,99	9,42
	4,5	78052	120,9	38	9,32

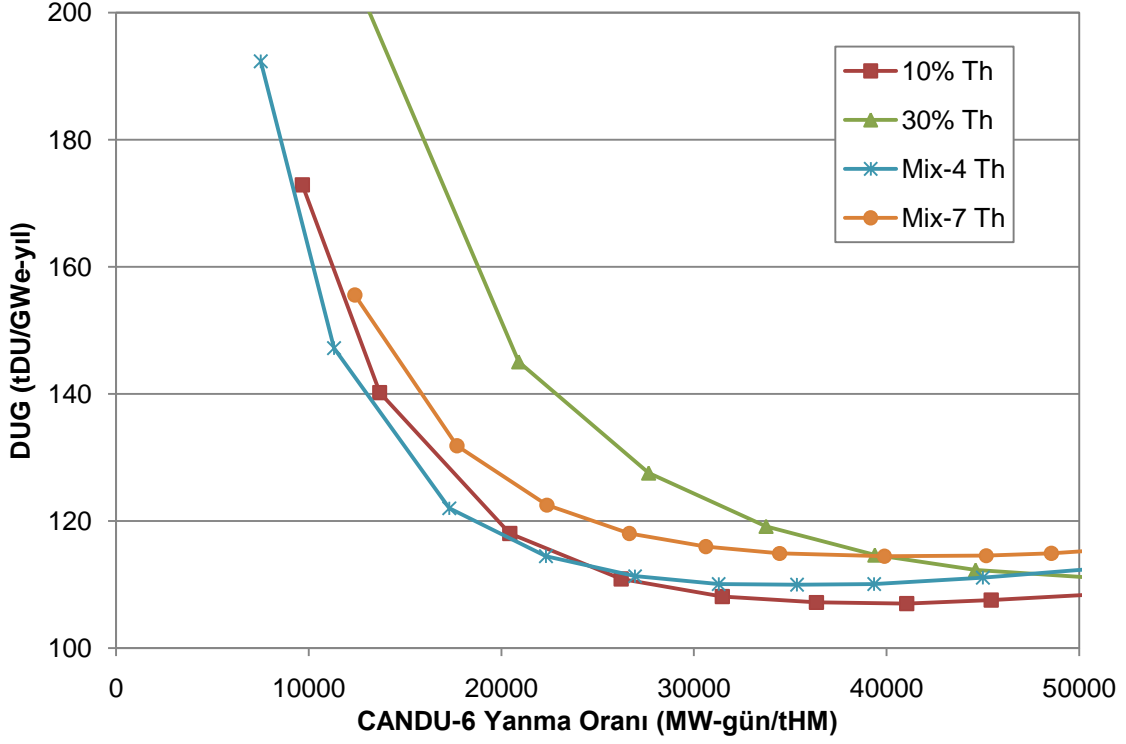
	1,0	3899	390,3	0	2,58
	1,2	12391	155,6	3,89	6,63
	1,4	17699	131,8	27,61	7,95
	1,6	22364	122,5	36,97	8,66
	1,8	26647	118,0	41,42	9,07
	2,0	30620	116,0	43,48	9,30
	2,2	34444	114,9	44,58	9,44
Mix7⁵.	2,5	39893	114,4	45,01	9,54
(%18,2)	2,8	45179	114,5	44,92	9,58
	3,0	48563	114,9	44,55	9,58
	3,2	51791	115,6	43,87	9,54
	3,5	56557	116,6	42,85	9,49
	3,8	61262	117,6	41,87	9,43
	4,0	64283	118,4	41,08	9,38
	4,2	67099	119,4	40,00	9,31
	4,5	71298	120,9	38,50	9,21

4.2.2.3 Kıyaslama

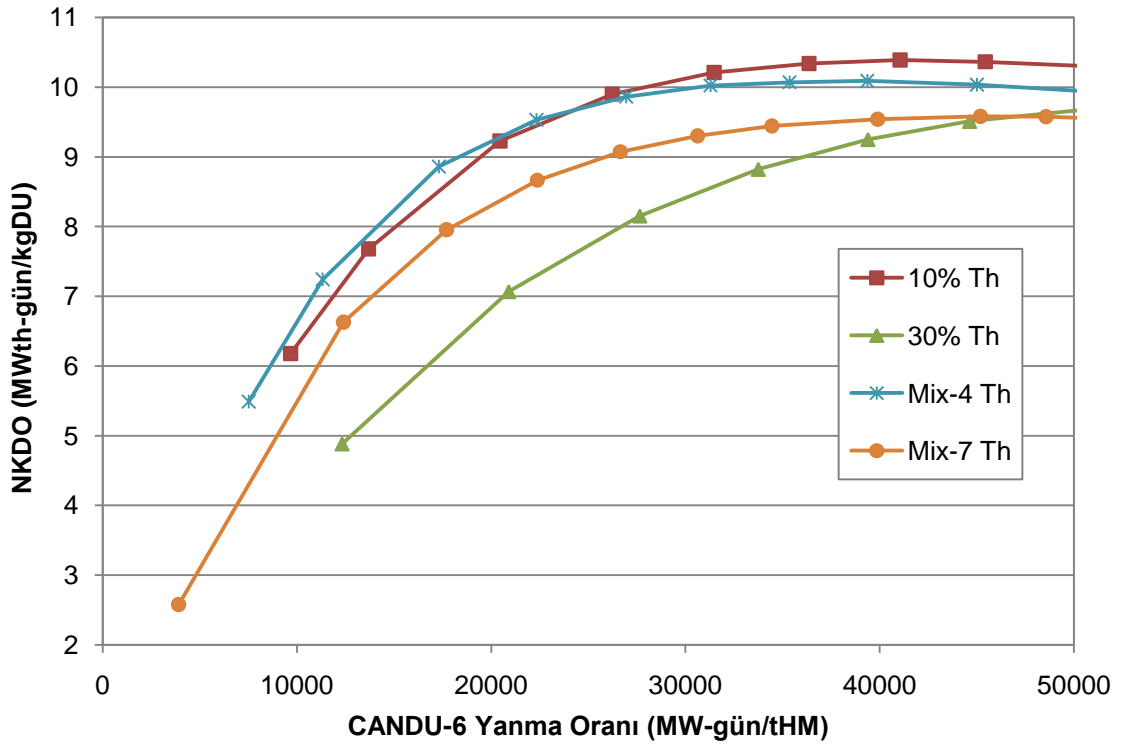
Mix-4 Th %10,23, Mix-7 Th ise % 18 kadar Th içermektedir. Homojen ve karışık demet kıyaslaması açısından en anlamlısı Mix-4 Th ile %10 Th'li homojen-demeti karşılaştırmaktır. Yanı sıra, Mix-7 Th ve %30 Th'li homojen-demet sonuçları da aynı grafiğe konarak hem karışık-demetlerin birbiri ile mukayesesi hem de daha yüksek homojen Th oranının etkisi görülebilir. Bu dört yakıt modeli için DUG ve NKDO değerlerinin yanma oranı ile değişimi Şekil 4.14 ve 4.15'te gösterilmektedir.

25000 MW-gün/tHM'ye kadar olan yanma oranlarında, Mix-4 Th, %10'luk homojen-demetten (az da olsa) avantajlıdır, 25000 MW-gün/tHM üzerinde ise eğilim değişmekte ve homojen-demet avantajlı olmaktadır.

⁵ Karışık-demet (Mix-7 Th) için, Gupta ve arkadaşlarının çalışmasında %1,3'lük HZU için yanma oranı 13800 MW-gün/tHM ve DUG değeri ise 157,2 tDU/GW_e-yıl olarak bulunmuştur [23]. Bu çalışmada ise bu değerler sırasıyla 14155 MW-gün/tHM ve 150,5 tDU/GW_e-yıl olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.14. CANDU6 Yanma Oranı – DUG Eğrisi

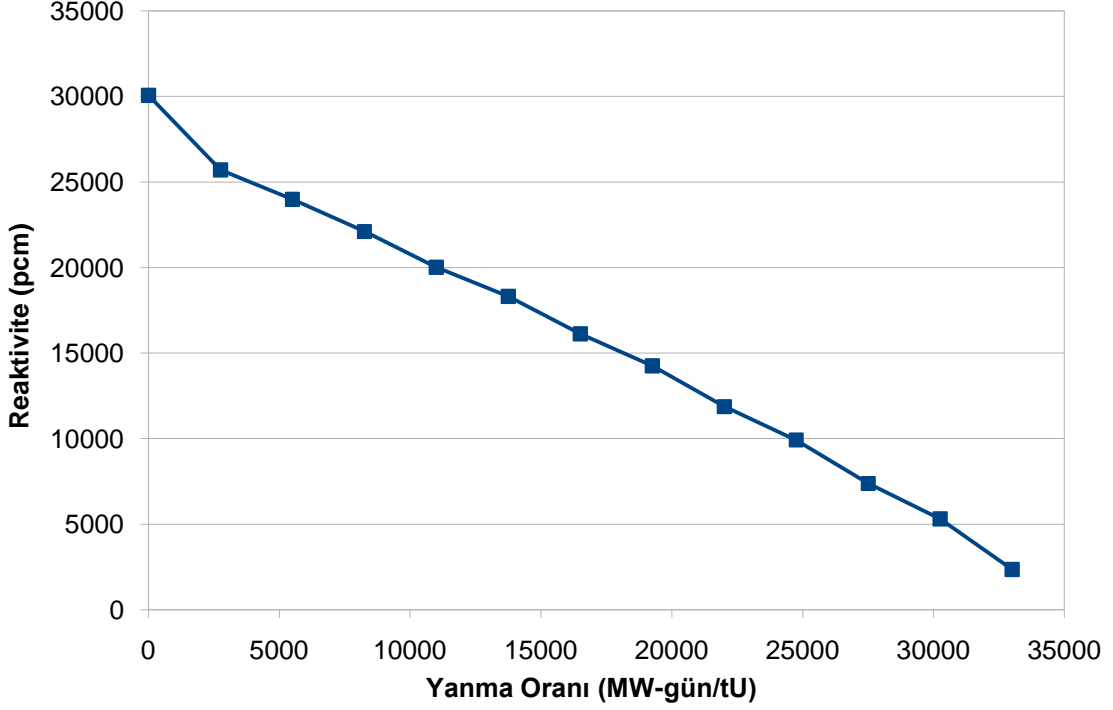


Şekil 4.15. CANDU6 Yanma Oranı – NKDO Eğrisi

5. PWR-CANDU6 BİRLEŞİK YAKIT ÇEVİRİMİ SONUÇLARI

5.1 PWR

%3,3 zengin taze UO_2 yakıtlı, 33000 MW-gün/tU nihai yanma oranına ve 1000 gün işinlanma süresine sahip referans PWR için Bölüm 3.2.1.1'de anlatıldığı üzere MONTEBURNS kodu kullanarak Şekil 5.1'de gösterilen yanma oranına bağlı reaktivite eğrisi çıkartılmıştır.



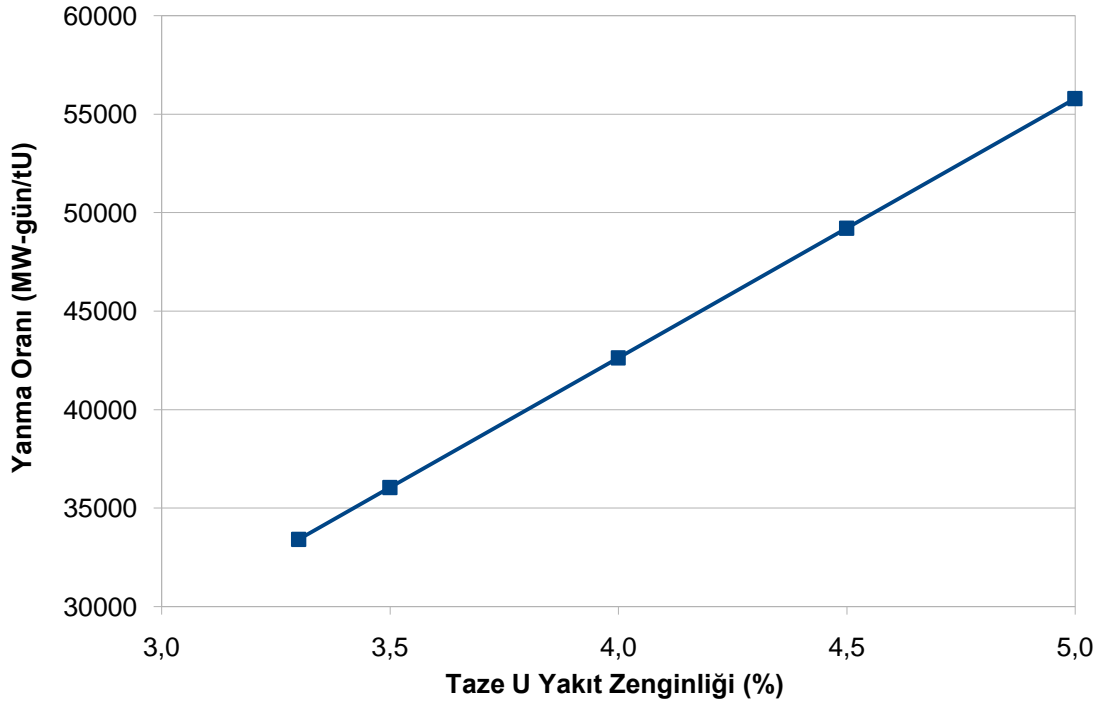
Şekil 5.1. Referans PWR için reaktivite-yanma oranı eğrisi

Şekil 5.1'deki reaktivite verilerinden, 11000, 22000 ve 33000 MW-gün/tU yanma oranına karşılık gelen reaktivite değerleri bulunmuş ve Eşitlik 3.1 kullanılarak ρ_L hesaplanmıştır. Referans PWR için sızıntı reaktivite (ρ_L) değeri 0,11414 (11414 pcm) olarak bulunmuştur [6].

Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesapları:

Şekil 3.3 ile verilen hesaplama akış şemasında belirtildiği gibi, farklı zenginlikteki taze U yakıtlar kullanılarak, MONTEBURNS kodu ile Şekil 5.2 ile gösterilen yanma oranı (B_D) - taze U yakıt zenginliği (ϵ_U) sonuçlarından Eşitlik 5.1 ile elde edilmiştir.

Eşitlik 5.1, 3,3'den 5'e kadar olan ϵ_U değerleri kullanılarak türetilmiştir; ancak daha yüksek ϵ_U değerleri için de yaklaşık doğru sonuç vermesi beklenir.



Şekil 5.2. PWR için nihai yanma oranı – taze U yakıt zenginliği eğrisi

$$B_D = 13160\epsilon_U - 10010 \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1'e göre; referans PWR'de 40000 MW-gün/tU nihai yanma oranına ulaşmak için gereken ϵ_U değeri %3,80; 50000 MW-gün/tU için ise %4,56 olarak bulunmuştur [6].

Kullanılmış Yakıt (PWR-KY) Bileşiminin Belirlenmesi:

33000, 40000 ve 50000 MW-gün/tU için yukarıda belirlenen ϵ_U değerleri MONTEBURNS koduna girdi olarak verilmiş ve PWR-KY kompozisyonları belirlenmiştir. 5 yıl soğutulmuş PWR-KY için U ve Pu bileşimi Çizelge 5.1'de sunulmaktadır [6].

Çizelge 5.1. 5 yıl soğutulmuş PWR-KY için U ve Pu izotopik bileşimi

	KY Nihai Yanma Oranı (MW-gün/tU)		
	33000	40000	50000
²³⁴ U	1,52460E+02 ^a	1,67141E+02	1,85210E+02
²³⁵ U	8,19894E+03	8,27800E+03	8,26670E+03
²³⁶ U	4,04300E+03	4,90130E+03	6,15485E+03
²³⁸ U	9,45250E+05	9,36215E+05	9,23793E+05
Toplam U	9,57644E+05	9,49562E+05	9,38399E+05
²³⁸ Pu	1,19709E+02	1,72788E+02	2,64263E+02
²³⁹ Pu	4,67543E+03	4,89000E+03	5,09328E+03
²⁴⁰ Pu	2,15702E+03	2,39418E+03	2,66522E+03
²⁴¹ Pu	7,53264E+02	8,60550E+02	9,89294E+02
²⁴² Pu	3,90749E+02	5,01423E+02	6,60659E+02
Toplam Pu	8,09617E+03	8,81895E+03	9,67272E+03
Fisil U (U içerisinde)	0,8562 ^b	0,8718	0,8809
Fisil Pu (Pu içerisinde)	67,05	65,21	62,88
Fisil U+Pu (U+Pu içerisinde)	1,4111	1,4638	1,5135

^a Miktarlar ton KY başına gram cinsindedir.

^b Fisil izotop oranı kütlece yüzde cinsindedir.

PWR için DUG hesabı Eşitlik 3.6; NKDO hesabı Eşitlik 3.13 ve KAYNAK/YÜK hesabı Eşitlik 3.14 kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.2'de sunulmuştur [41].

Çizelge 5.2. PWR için DUG ve NKDO sonuçları

Zenginlik (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	DUG ^a (tDU/GW _e -yıl)	NKDO (MW _{th} -gün/kgDU)	KAYNAK/YÜK
3,30	33000	221,8	4,99	6,62
3,80	40000	212,9	5,19	7,70
4,56	50000	206,8	5,35	9,35

^a Hesaplarda $\eta_{th}=0,33$; $x_T=0,25$ ve $x_F=0,711$ olarak alınmıştır.

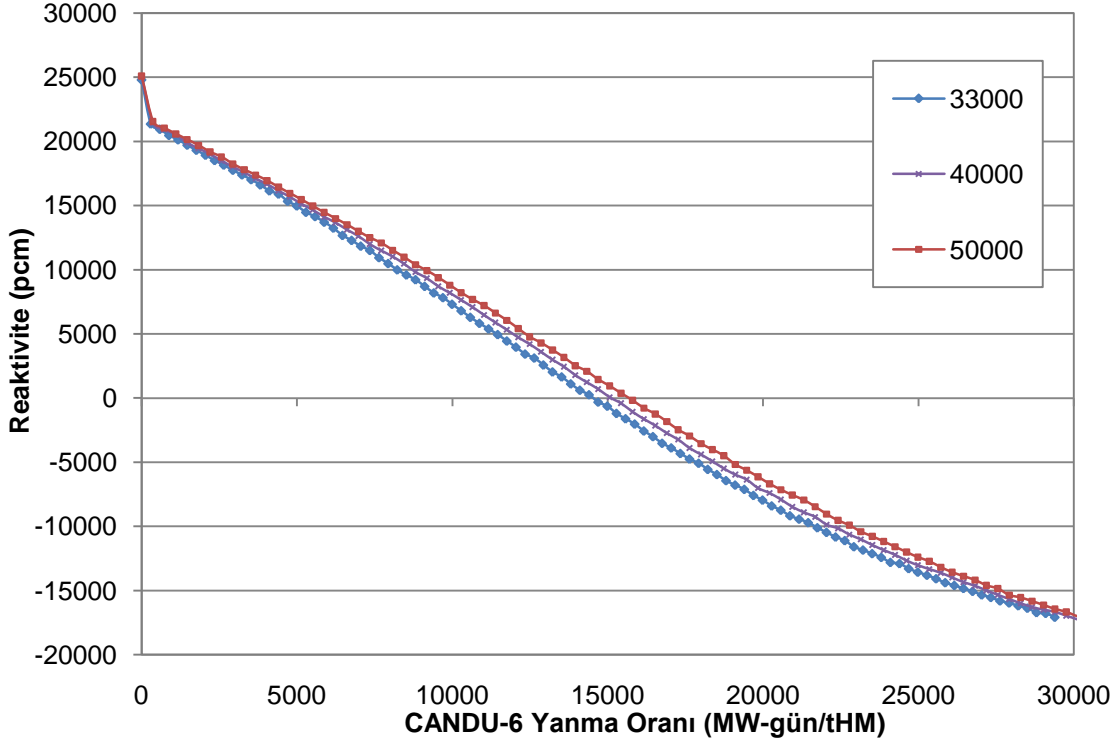
5.2 PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi

5.2.1 Tam Birlikte İşleme (TBİ) Seçeneği

TBİ seçeneğinde PWR-KY içerisinde bütün FÜ ve en önemlileri Np, Am, Cm olmak üzere tüm MA çıkartılmaktadır. Geriye kalan U + Pu izotop karışımı, herhangi bir madde ilavesi yapılmadan CANDU6 yakıtı olarak üretilir. TBİ için CANDU6 girdisi olarak, Çizelge 5.1 ile verilen U ve Pu bileşimleri kullanılmaktadır.

5.2.1.1 Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları

33000, 40000 ve 50000 MW-gün/tU yanma oranına ulaşmış ve 5 yıl soğutulmuş PWR-KY içerisindeki U+Pu ile oluşturulan yakıtların MONTEBURNS kodu ile referans CANDU6'da yakılmasıyla elde edilen reaktivite-yanma oranı eğrileri Şekil 5.3 ile verilmiştir.



Şekil 5.3. TBİ çevrimi için reaktivite-yanma oranı eğrisi

Şekil 5.3 ile verilen reaktivite-yanma oranı eğrileri, yanma başlangıcındaki Xe yığılma etkisi ihmal edilerek, Eşitlik 3.5 ile verilen 4. derece fonksiyona uyarlanmış ve elde edilen katsayılar Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. TBİ çevrimi için reaktivite eğrisi uyarlama katsayıları

PWR Yanma Oranı (MW-gün/tU)	Katsayılar				
	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
33000	21442,1	-1,0863	-5,0435E-05	1,7792E-09	-1,0760E-14
40000	21372,3	-0,8984	-6,6785E-05	2,4998E-09	-2,3520E-14
50000	21510,2	-0,8931	-5,8580E-05	2,0342E-09	-1,7168E-14

Çizelge 5.3'te verilen katsayılar ve CANDU6 için sızıntı-düzeltilme reaktivite değeri, Eşitlik 3.4'te kullanılarak CANDU6 için nihai yanma oranı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 5.4'te sunulmuştur [41].

Çizelge 5.4. TBİ çevrimi için yanma oranı değerleri

PWR Yanma Oranı, (MW-gün/tU)	PWR Yakıt Zenginliği, (%)	CANDU6 yakıt fisil içerik, (%)	CANDU6 Yanma Oranı (MW-gün/tHM)	Yanma Süresi (gün)
33000	3,30	1,411	25981	1061,0
40000	3,80	1,464	27021	1103,5
50000	4,56	1,514	27919	1140,1

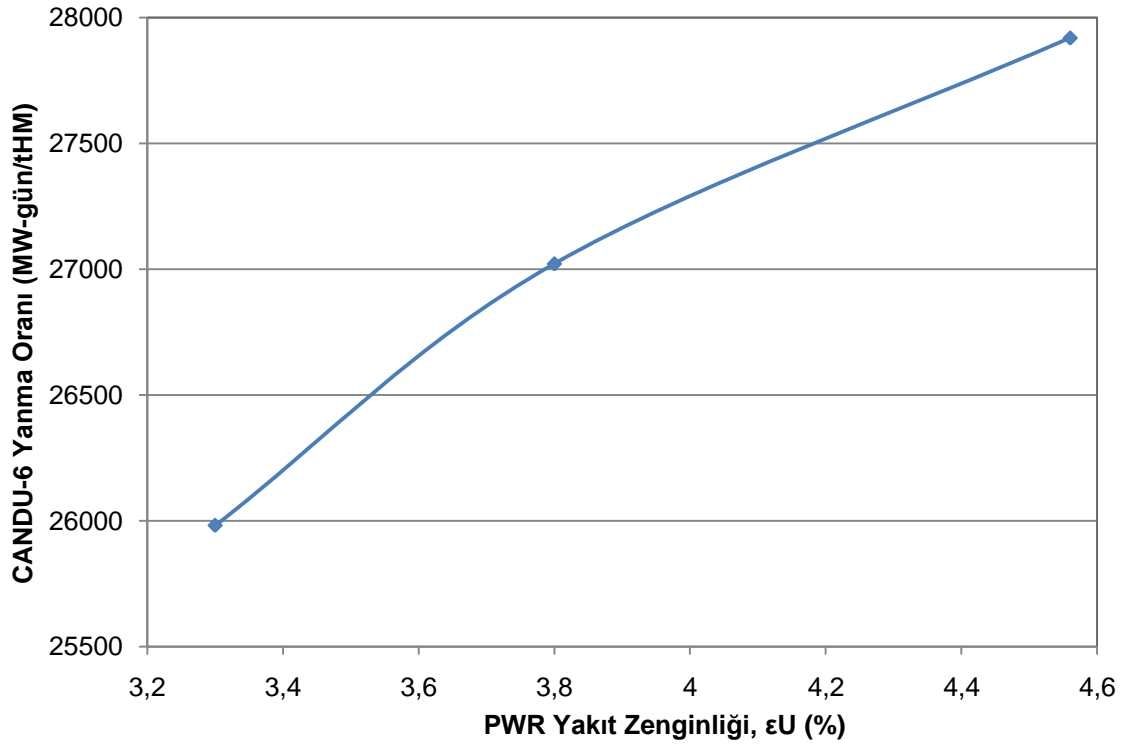
PWR taze yakıt zenginliği ile CANDU6 nihai yanma oranı arasında bir bağıntı ortaya koyabilmek için, Şekil 5.4 ile gösterilen CANDU6 yanma oranı-PWR yakıt zenginlik eğrisinin 2. derece fonksiyona uyarlanması ile Eşitlik 5.2 ile elde edilmiştir.

$$B_{D_TBİ} = -713,03\varepsilon_{U_PWR}^2 + 7142,5 \varepsilon_{U_PWR} + 10176 \quad (5.2)$$

Burada $B_{D_TBİ}$, TBİ ürünü yakıtın CANDU6 nihai yanma oranını MW-gün/tU cinsinden; ε_{U_PWR} ise PWR taze yakıt zenginlik değerini (%) belirtmektedir. Eşitlik 5.2, 3,3'den 4,56'ya kadar olan ε_{U_PWR} değerleri kullanılarak türetilmiştir; ancak daha yüksek ε_{U_PWR} değerleri için de yaklaşık doğru sonuç vermesi beklenir.

Çizelge 5.4'te gösterildiği üzere, 33000 MW-gün/tU'ya yanmış PWR-KY'den TBİ ile elde edilen %1,41'lik U+Pu, CANDU6'da 25981 MW-gün/tHM yanma oranına ulaşmaktadır. Eğer CANDU6 %1,41 zengin taze U ile yüklenseydi, nihai yanma oranı 27854 MW-gün/tHM olacaktı. Yanma oranları arasındaki fark, TBİ yakıtındaki U ve Pu'nun içerdiği parazitik izotoplardan (^{236}U , ^{240}Pu ve ^{242}Pu) kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere, PWR yakıt zenginliği arttıkça CANDU yakıtının yanma oranı hafifçe artmaktadır. TBİ çevrimindeki CANDU yakıtında FÜ ve MA olmadığından, yanma oranı üzerinde etkili olan iki faktör fisil oran ve PWR-KY'nin U+Pu parazitik izotop içeriğidir. Sonuçlar fisil orandaki artışın en azından 50000 MW-gün/tU yanma oranına kadar baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. TBİ çevrimi için yanma oranı-zenginlik eğrisi

5.2.1.2 DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları

PWR-CANDU6 birleşik çevriminde TBİ için DUG ve NKDO hesapları Eşitlik 3.7 ve 3.15 kullanılarak yapılmıştır. DUT hesabı için doğal U yakıtlı referans CANDU6'nın DUG değeri (159,4 tDU/GW_e-yıl) dikkate alınmıştır.

TBİ çevrimi DUG ve NKDO hesaplarında $\eta_{th,PWR}=0,33$; $\eta_{th,CANDU}=0,32$; $x_T=0,25$ ve $x_F=0,711$ olarak alınmıştır. TBİ için DUG ve DUT sonuçları Çizelge 5.5'te, NKDO sonuçları ise Çizelge 5.6'da verilmiştir [41].

Çizelge 5.5. TBİ çevrimi için DUG ve DUT

PWR Yanma Oranı, (MW-gün/tU)	PWR Yakıt Zenginliği, (%)	f değeri ^a	CANDU6 Yanma Oranı, (MW-gün/tHM)	DUG, (tDU/GW _e -yıl)	DUT (tDU/GW _e -yıl)
33000	3,30	0,966	25981	127,6	31,81
40000	3,80	0,958	27021	130,8	28,61
50000	4,56	0,948	27919	136,7	22,77

^a f, CANDU yakıtına dönüşen PWR-KY oranını ifade etmektedir.

Çizelge 5.6. TBİ çevrimi için NKDO

PWR Yanma Oranı, (MW-gün/tU)	PWR Yakıt Zenginliği, (%)	CANDU6 Yanma Oranı, (MW-gün/tHM)	NKDO (MW_{th}-gün/kgDU)	KAYNAK/YÜK
33000	3,30	25981	8,78	6,62
40000	3,80	27021	8,56	7,70
50000	4,56	27919	8,18	9,35

Çizelge 5.5 ve 5.6'da görüldüğü üzere, TBİ çevrimi için, 33000 MW-gün/tU yanma oranına sahip PWR-KY'de 127,6 tU/GW_e-yıl ile en düşük DUG, 31,81 tU/GW_e-yıl ile en yüksek DUT değeri ve 8,78 MW_{th}-gün/kgDU ile en yüksek NKDO gerçekleşmektedir. En yüksek DUG, en düşük DUT ve en düşük NKDO değeri ise 50000 MW-gün/tU yanma oranına sahip PWR-KY için elde edilmiştir.

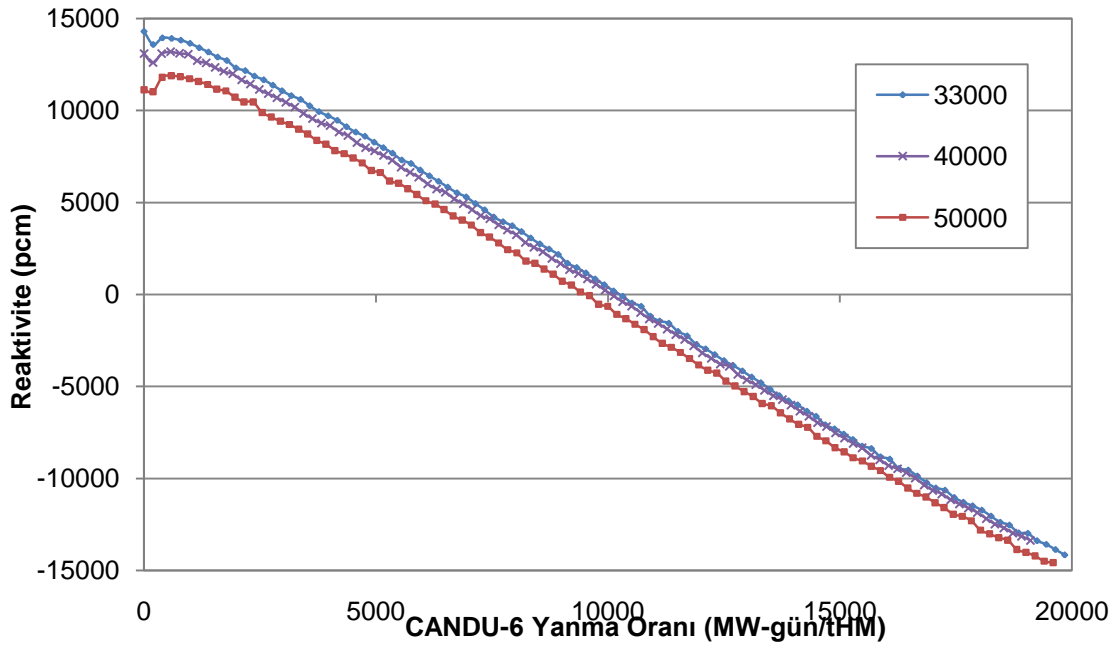
5.2.2 DUPIC Seceneği

DUPIC seçeneğinde, AIROX ya da OREOX prosesi ile PWR-KY'den uçucu ve yarı-uçucu FÜ'nün birçoğu uzaklaşmaktadır. Önemli FÜ arasından trityum (³H), kripton (⁸³Kr), iyot (¹²⁷I), ksenon (¹³¹Xe ve ¹³⁴Xe), sezyumun (¹³³Cs ve ¹³⁵Cs) neredeyse tamamı; molibden (⁹⁵Mo), rutenyum (¹⁰¹Ru ve ¹⁰³Ru) ve kadmiyumun (¹¹²Cd) %80'i ve indiyumun (¹¹⁴In) %75'i çıkartılmıştır [32, 41]. Diğer bütün FÜ, MA ve Çizelge 4.1 ile verilen U ve Pu izotopik bileşimi CANDU6 yakıtının girdisi olarak kullanılmıştır.

5.2.2.1 Nihai Yanma Oranı (B_D) Hesaplamaları

Hemen yukarıda anlatıldığı şekilde oluşturulan DUPIC yakıtının MONTEBURNS kodu ile referans CANDU6'da yakılmasıyla elde edilen reaktivite-yanma oranı eğrileri Şekil 5.5 ile verilmiştir.

Şekil 5.5 ile verilen reaktivite-yanma oranı eğrilerinin, yanma başlangıcındaki Xe yığılma etkisi ihmal edilerek, Eşitlik 3.5 ile verilen 4. derece fonksiyona uyarlanmış ve elde edilen katsayılar Çizelge 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.5. DUPIC çevrimi için reaktivite eğrisi

Çizelge 5.7. DUPIC çevrimi için reaktivite eğrisi uyarılma katsayıları

PWR Yanma Oranı (MW-gün/tU)	Katsayılar				
	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
33000	14418,5	-0,9002	-8,6061E-05	4,1765E-09	-6,0939E-14
40000	13581,6	-0,7748	-1,0058E-04	5,1635E-09	-8,6829E-14
50000	12237,4	-0,6582	-1,1430E-04	6,0483E-09	-1,0696E-13

Çizelge 5.7’de verilen katsayılar ve CANDU6 için sızıntı-düzeltilme reaktivite değeri, Eşitlik 3.4’te kullanılarak CANDU6 için nihai yanma oranı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 5.8’de sunulmuştur [41].

Çizelge 5.8. DUPIC yakıtların CANDU6 için yanma oranı değerleri

PWR Yanma Oranı, (MW-gün/tU)	PWR Yakıt Zenginliği, (%)	CANDU6 yakıt fisil içerik ^a , (%)	CANDU6 Yanma Oranı (MW-gün/tU)	Yanma Süresi (gün)
33000	3,30	1,363	16717 ⁶	682,5
40000	3,80	1,403	16195	661,1
50000	4,56	1,435	14926	609,3

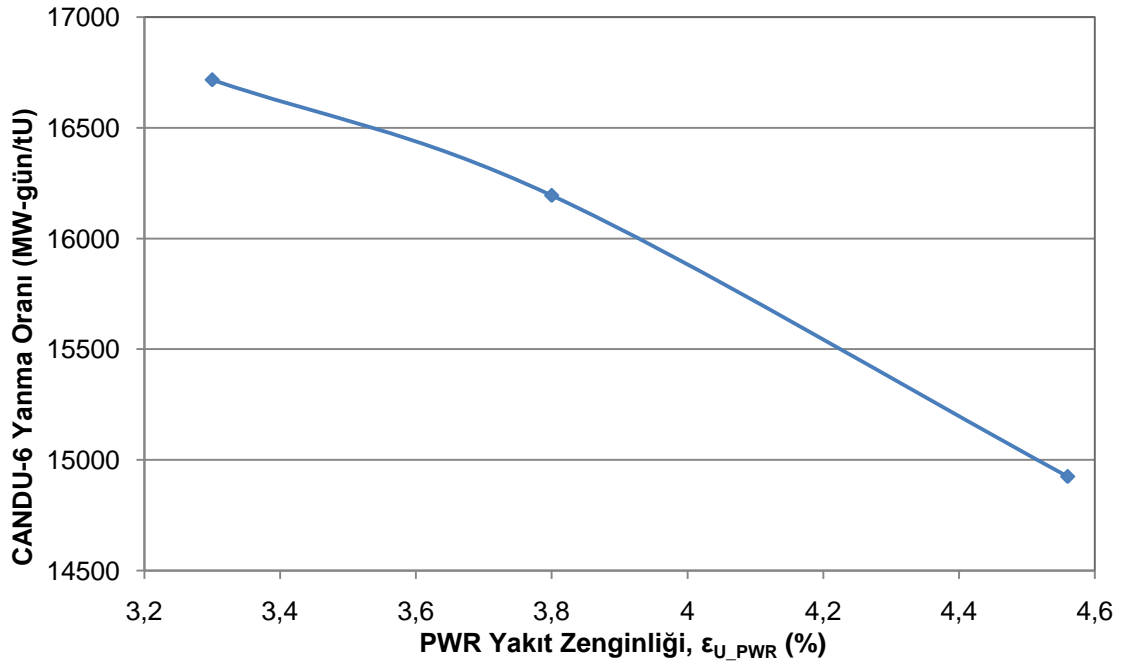
^a DUPIC yakıtı FÜ ve MA içerdiğinden, DUPIC çevriminde CANDU6 yakıtının fisil içeriği, TBI çevriminin fisil içeriğinin f değeri ile çarpımına eşittir.

⁶ Bu değer Driscoll ve arkadaşları [38] 176. sayfada ve UAEA’nın HWR’lerle ilgili 407 nolu teknik raporu 342. sayfada [16] sunulan değerler (sırasıyla 16670 ve 15000 MW-gün/tHM) ile uyumludur.

PWR taze yakıt zenginliği ile CANDU6 nihai yanma oranı arasında bir bağıntı ortaya koyabilmek için, Şekil 5.6 ile gösterilen CANDU6 yanma oranı-PWR yakıt zenginlik eğrisinin 2. derece fonksiyona uyarlanması ile Eşitlik 5.3 ile verilen ifade çıkarılmıştır.

$$B_{D_DUPIC} = -496,62\varepsilon_{U_PWR}^2 + 2482 \varepsilon_{U_PWR} + 13935 \quad (5.3)$$

Burada B_{D_DUPIC} , DUPIC yakıtının CANDU6 nihai yanma oranını MW-gün/tU cinsinden; ε_{U_PWR} ise PWR taze yakıt zenginlik değerini (%) belirtmektedir. Eşitlik 5.3, 3,3'den 4,56'ya kadar olan ε_{U_PWR} değerleri kullanılarak türetilmiştir; ancak daha yüksek ε_{U_PWR} değerleri için de yaklaşık doğru sonuç vermesi beklenir.



Şekil 5.6. DUPIC çevrimi için yanma oranı-zenginlik eğrisi

Çizelge 5.8'de görüldüğü üzere, DUPIC çevriminde PWR-KY ile CANDU6'da elde edilen yanma oranları doğal U yakıtlı referans CANDU6'nın yanma oranı olan 7154 MW-gün/tU'dan fazladır. Bunun nedeni PWR-KY içerisindeki U+Pu karışımının fisil içeriğinin yüksek (%1,4'ten daha büyük) olmasıdır. Yüksek fisil içeriğin birazı FÜ ve MA tarafından dengelense bile anlamlı bir ilave yanma oranına erişilmektedir. 33000 MW-gün/tU PWR yanma oranı için CANDU6 reaktöründe 16717 MW-gün/tHM yanma oranına ulaşılmaktadır. Bu yanma oranı

Çizelge 4.6'da gösterildiği üzere yaklaşık olarak %1 zenginleştirilmiş taze U'nun CANDU6 reaktöründe yanmasına eşdeğerdir.

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, PWR yakıt zenginliği arttıkça CANDU6 yanma oranı hafifçe azalmaktadır. Bu durum TBİ çevriminde gözlenenin tam tersidir. Yanma oranı üzerinde etkili iki faktör, fisil oran ve PWR-KY'nin FÜ ve MA içeriğidir. PWR yanma oranı arttıkça her iki faktör de artmaktadır; ancak, CANDU6 yanma oranı DUPIC için azalırken TBİ için artar. Bu durum, iki faktörden, FÜ ve MA içeriğinin baskın geldiğini göstermektedir.

5.2.2.2 DUG, DUT ve NKDO Hesaplamaları

PWR-CANDU6 birleşik çevrimi DUPIC seçeneği için, DUG ve NKDO hesapları Eşitlik 3.7 ve 3.15 kullanılarak yapılmıştır. DUT hesabı için doğal U yakıtlı referans CANDU6'nın DUG değeri (159,4 tDU/GW_e-yıl) dikkate alınmıştır.

DUPIC çevrimi DUG ve NKDO hesaplarında $\eta_{th,PWR}=0,33$; $\eta_{th,CANDU}=0,32$; $x_T=0,25$ ve $x_F=0,711$ olarak alınmıştır. DUPIC çevrimi için DUG ve DUT sonuçları Çizelge 5.9'da, NKDO sonuçları ise Çizelge 5.10'da verilmiştir [41].

Çizelge 5.9. DUPIC çevrimi için DUG ve DUT

PWR Yanma Oranı, (MW-gün/tU)	PWR Yakıt Zenginliği, (%)	f değeri ^a	CANDU6 Yanma Oranı, (MW-gün/tHM)	DUG, (tDU/GW _e -yıl)	DUT (tDU/GW _e -yıl)
33000	3,30	0,996	16717	148,9	10,54
40000	3,80	0,995	16195	153,1	6,32
50000	4,56	0,993	14926	160,6	0

^a f, CANDU yakıtına dönüşen PWR-KY oranını ifade etmektedir. DUPIC çevriminde sadece uçucu FÜ'nün çoğu PWR-KY'den çıkartıldığından, yanma oranının f üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Çizelge 5.10. DUPIC çevrimi için NKDO

PWR Yanma Oranı, (MW-gün/tU)	PWR Yakıt Zenginliği, (%)	CANDU6 Yanma Oranı, (MW-gün/tHM)	NKDO (MW _{th} -gün/kgDU)	KAYNAK/YÜK
33000	3,30	16717	7,50	6,62
40000	3,80	16195	7,29	7,70
50000	4,56	14926	6,93	9,35

Çizelge 5.9 ve 4.10'da görüldüğü üzere, DUPIC çevrimi için, 33000 MW-gün/tU'ya yanmış PWR-KY'de en düşük DUG değeri 148,9 tU/GW_e-yıl, en yüksek DUT

değeri 10,59 tU/GW_e-yıl ve en yüksek NKDO değeri 7,50 MW_{th}-gün/kgDU ile gerçekleşmektedir⁷. 50000 MW-gün/tU yanma oranına sahip PWR-KY'de en yüksek DUG değeri, referans doğal U çevrimindeki DUG değerinden yüksek olduğu için doğal U tasarrufu söz konusu değildir, yani DUT değeri yoktur.

⁷ DUPIC çevriminde 33000 MW-gün/tU PWR yanma oranı için hesaplanan DUG ve NKDO değerleri UAEA'nın HWR'lerle ilgili 407 nolu teknik raporu 341. sayfada [16] sunulan değerler (sırasıyla 154 tDU/GW_e-yıl ve 7,4 MW_{th}-gün/kgDU) ile uyumludur.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

6.1 Türetilen Eşitliklerin Özeti

U yakıtlar için nihai yanma oranı ile zenginlik değeri arasında ilişki Eşitlik 6.1 ile ifade edilir:

$$B_D = -1981,9\varepsilon_U^2 + 29848 \varepsilon_U - 11027 \quad (6.1)$$

Burada B_D , U yakıtın nihai yanma oranını MW-gün/tU cinsinden; ε_U ise U yakıtın zenginlik değerini (%) belirtmektedir. Eşitlik 6.1, 4,0'e kadar olan ε_U değerleri kullanılarak türetilmiştir; ancak daha yüksek ε_U değerleri için de yaklaşık doğru sonuç vermesi beklenir.

U+Th homojen-demet için nihai yanma oranı ile ^{235}U ve Th oranı arasında ilişki Eşitlik 6.2 ile gösterilir:

$$B_D(R_U, \theta) = (A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)R_U^2 + (B_0 + B_1\theta + B_2\theta^2)R_U + (C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2) \quad (6.2)$$

Burada R_U , yüklenen U+Th yakıttaki ^{235}U 'ün kütle olarak yüzdesini, θ , yüklenen U+Th yakıttaki Th'nin kütle olarak yüzdesini, $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2, C_0, C_1$ ve C_2 MW-gün/t cinsinden sabitleri belirtmektedir. Eşitlik 6.2'de gösterilen katsayılar Çizelge 6.1'de sunulmuştur. Eşitlik 6.2, 0,9'dan 5,0'e kadar olan R_U değerleri ve 10'dan 50'ye kadar olan θ değerleri kullanılarak türetilmiştir.

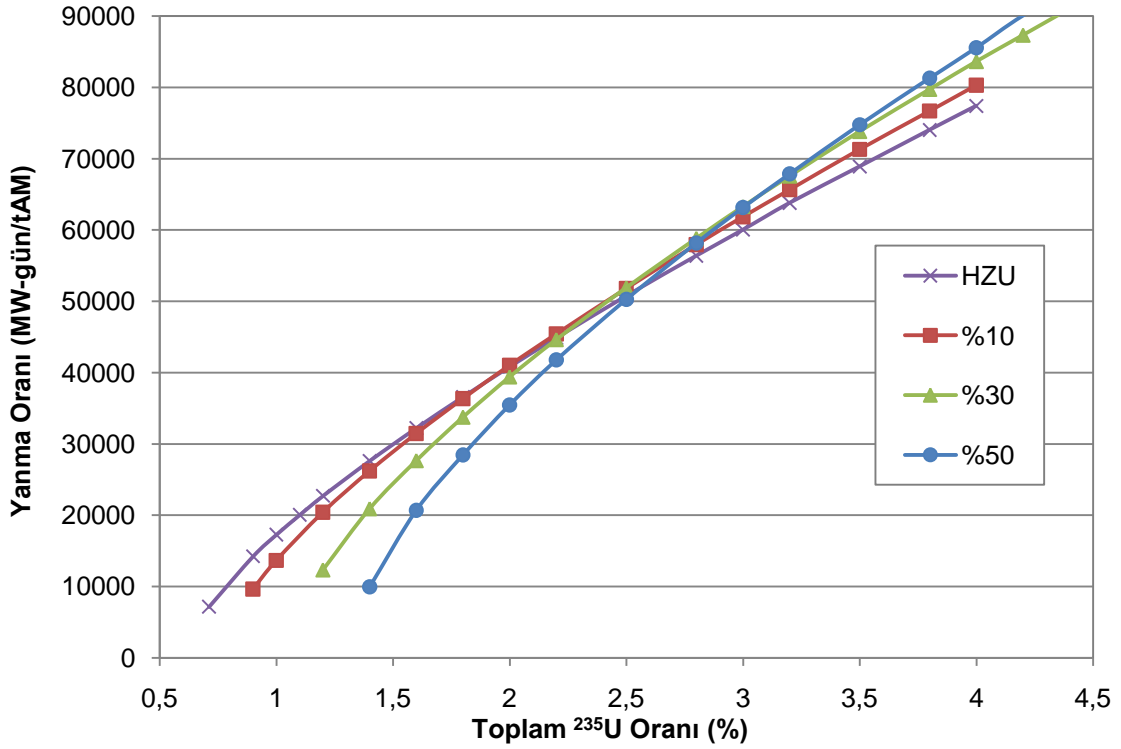
Çizelge 6.1. Eşitlik 6.2'deki katsayılar

Sabit	A_0	A_1	A_2	B_0	B_1	B_2	C_0	C_1	C_2
Katsayı	-2339,5	-5,425	-0,1508	31922	179,05	1,375	-13542	-332,25	-5,0725

6.2 U ve U+Th Yakıtlı CANDU6 Yakıt Çevrimi

CANDU6 reaktöründe istenilen nihai yanma oranına ulaşmak için U veya U+Th yakıtın içermesi gereken toplam ^{235}U yüzdesi Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Yakıtın içerdiği Th yüzdesi arttıkça aynı yanma oranına ulaşmak için gereken ^{235}U yüzdesi

de artmaktadır. Bunun nedenlerinden biri ^{232}Th 'nin termal soğurma tesir-kesitinin ^{238}U 'in soğurma tesir-kesitinin 2,75 katı olmasıdır [24].



Şekil 6.1. CANDU6 Yanma Oranı- ^{235}U yüzdesi eğrisi

CANDU6'da U ve U+Th yakıtlar için Eşitlik 6.1 ve 6.2 kullanılarak 10000, 17500, 25000, 50000, 62500 ve 75000 MW-gün/tHM yanma oranında DUG ve NKDO değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Düşük ve orta düzey yanma oranlarında (10000, 17500 ve 25000 MW-gün/tHM), U+Th yakıt içerisindeki Th oranı (θ) arttıkça, aynı yanma oranı değerine ulaşabilmek için daha yüksek ^{235}U oranı (R_U) gerekmektedir. Th oranı arttıkça HZU gereksinimi azalmasına rağmen DUG artmaktadır; çünkü HZU'nun zenginliği artmakta ve bu, birim kütle YÜK için gereken KAYNAK (doğal U) miktarını oransal olarak daha fazla artırmaktadır. Aynı sebeple (yani KAYNAK/YÜK, HZU miktarındaki azalmaya kıyasla daha fazla arttığı için), NKDO da düşer.

Yüksek düzey yanma oranlarında (50000, 62500 ve 75000 MW-gün/tHM) ise tam tersi bir durum gözlenmektedir. Buna göre, aynı yanma oranı değerine ulaşabilmek için, U+Th yakıt içerisindeki Th oranı arttıkça DUG değeri azalmakta

ve NKDO değeri artmaktadır. Bu durum Th'nin reaktörde uzun süre kaldıkça enerji üretimine katkısının artmasıyla açıklanabilir.

Çizelge 6.2. U ve U+Th yakıtlar için karşılaştırmalı sonuçlar

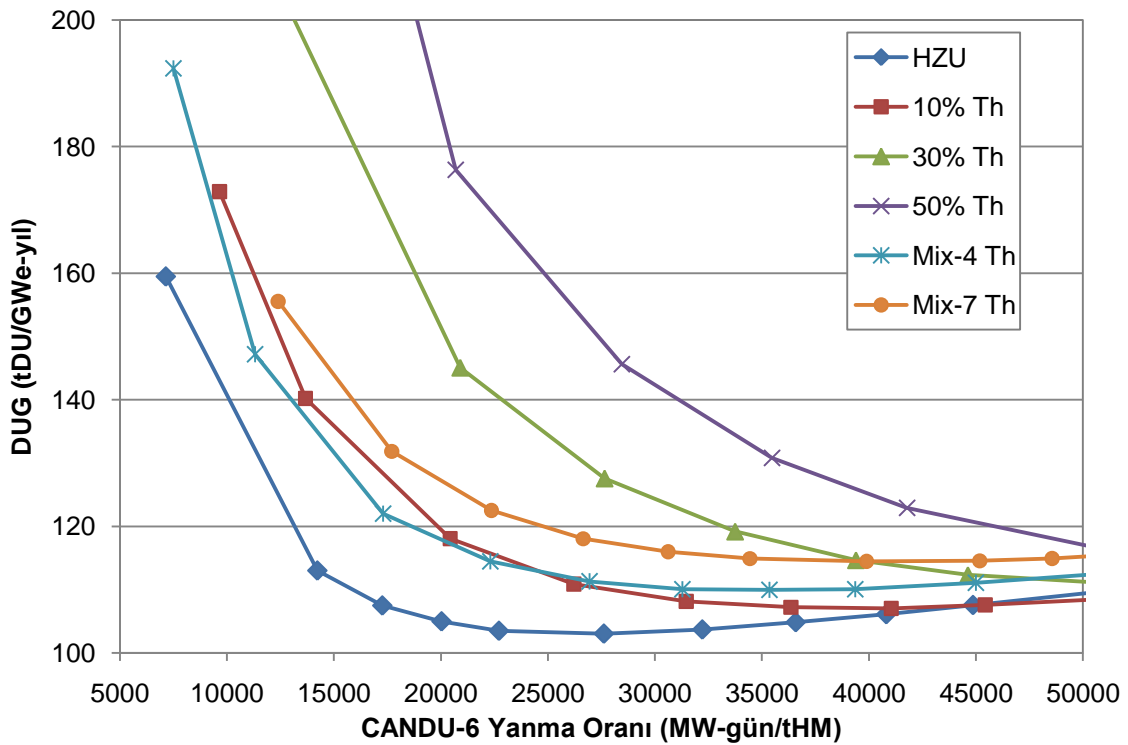
Yanma Oranı (MW-gün/tU)	CANDU6 Yakıtı	x_p (%) ^a	R_U (%) ^a	DUG (tDU/GW _e -yıl)	NKDO (MW _{th} -gün/kgDU)
10000	HZU	0,74	0,74	121,5	9,39
	%10 Th	0,96	0,86	157,5	6,75
	%30 Th	1,52	1,07	220,4	4,48
	%50 Th	2,62	1,31	292,6	3,26
17500	HZU	1,03	1,03	109,7	10,40
	%10 Th	1,24	1,12	126,4	8,58
	%30 Th	1,86	1,30	158,8	6,40
	%50 Th	3,03	1,52	196,8	4,97
25000	HZU	1,32	1,32	106,2	10,74
	%10 Th	1,54	1,39	115,2	9,52
	%30 Th	2,20	1,54	135,1	7,67
	%50 Th	3,47	1,73	159,2	6,27
50000	HZU	2,44	2,44	108,4	10,53
	%10 Th	2,67	2,40	107,6	10,38
	%30 Th	3,47	2,43	111,6	9,63
	%50 Th	5,05	2,53	118,8	8,76
62500	HZU	3,10	3,10	112,9	10,10
	%10 Th	3,33	3,00	109,9	10,21
	%30 Th	4,21	2,94	109,6	9,91
	%50 Th	5,95	2,97	112,8	9,36
75000	HZU	3,88	3,88	119,9	9,52
	%10 Th	4,12	3,71	114,9	9,80
	%30 Th	5,04	3,53	110,6	9,91
	%50 Th	6,94	3,47	110,4	9,67

^a x_p : HZU yakıtındaki ²³⁵U yüzdesini, R_U , U+Th yakıtındaki ²³⁵U yüzdesini ve θ , U+Th yakıtındaki Th yüzdesini ifade etmektedir. x_p , R_U ve θ arasında $x_p(\%) = \frac{R_U}{(100-\theta)} \times 100$ şeklinde bir bağıntı bulunmaktadır.

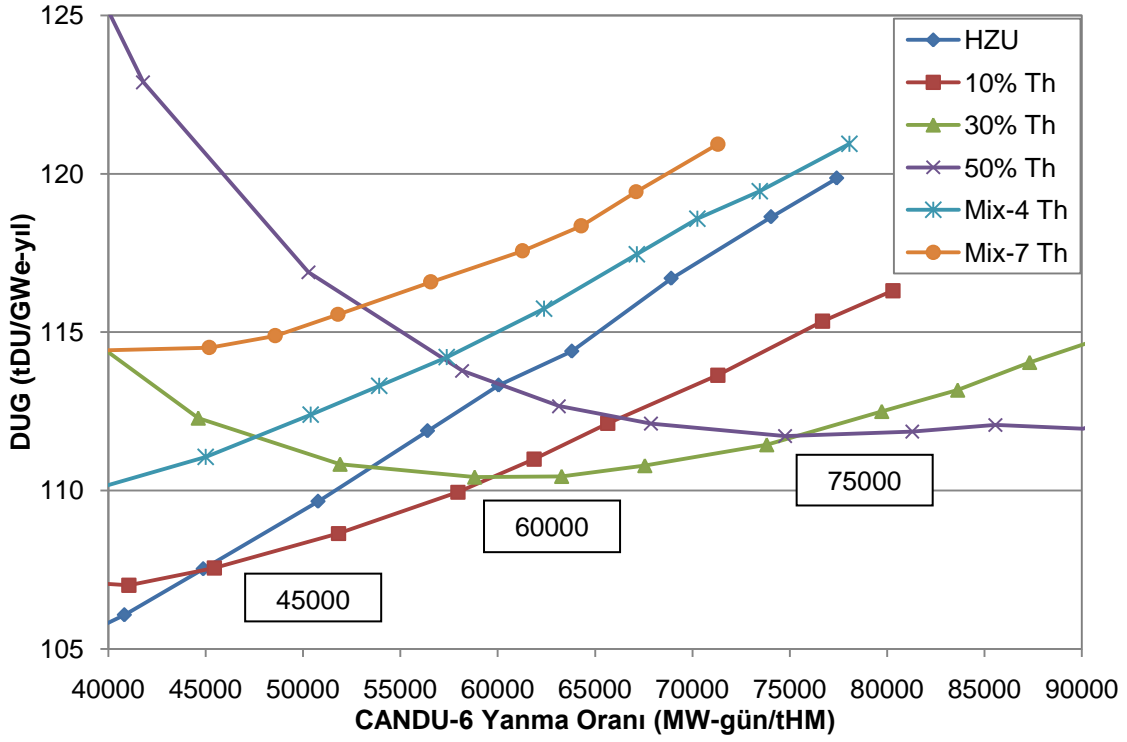
Şekil 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5 ile sunulan CANDU6 yanma oranı-DUG ve DUT eğrileri dikkate alındığında;

- CANDU6 yanma oranı arttıkça DUG değerlerinin önce hızlıca azaldığı ve en düşük değere ulaştıktan sonra hafifçe arttığı görülmektedir. DUT değerleri DUG değerleri ile ters orantılıdır. DUG için gözlenenlerin tam tersi DUT için söylenebilir.

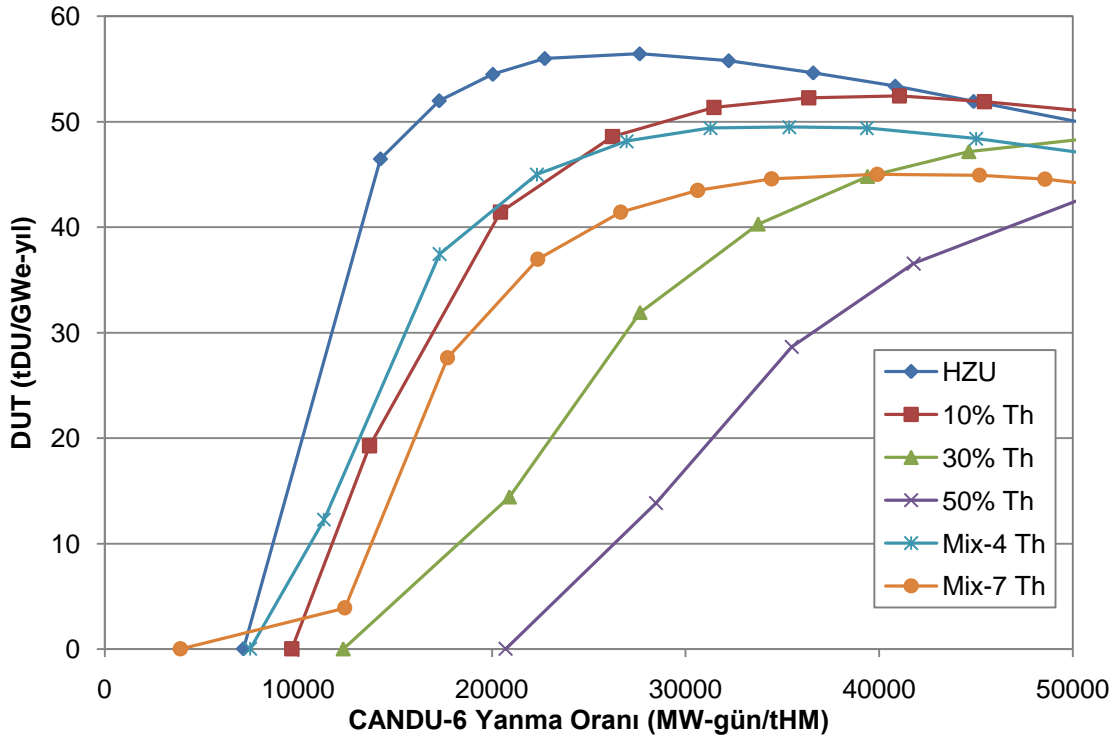
- 45000 MW-gün/tHM'ye kadar U yakıtlı CANDU6, U+Th yakıt çevrimlerinin tümünden daha düşük DUG değerine sahip olduğu görülmektedir.
- 45000 ile 60000 MW-gün/tHM aralığında %10 Th'lu çevrimin, 60000 ile 75000 MW-gün/tHM aralığında %30Th'lu çevrimin ve 75000 MW-gün/tHM'den sonra %50 Th'lu çevrimin avantajlı olduğu görülmektedir Bu durumun ana nedeni, U+Th yakıtın CANDU6 reaktöründe uzun süre kaldıkça enerji üretimindeki (^{232}Th 'nin ^{233}U 'e dönüşümünden kaynaklanan) Th katkısı artmasıdır.
- 25000 MW-gün/tHM'ye kadar, karışık-demet Mix-4 Th %10'luk homojen demete göre az da olsa avantajlıdır.
- Şekil 6.6 ve 6.7 ile sunulan CANDU6 yanma oranı – NKDO eğrileri (düşük DUG ve yüksek NKDO'nun avantaj sunduğu dikkate alınarak) incelenirse, DUG ve NKDO için avantajlı durumlar arasındaki paralellik görülebilir.



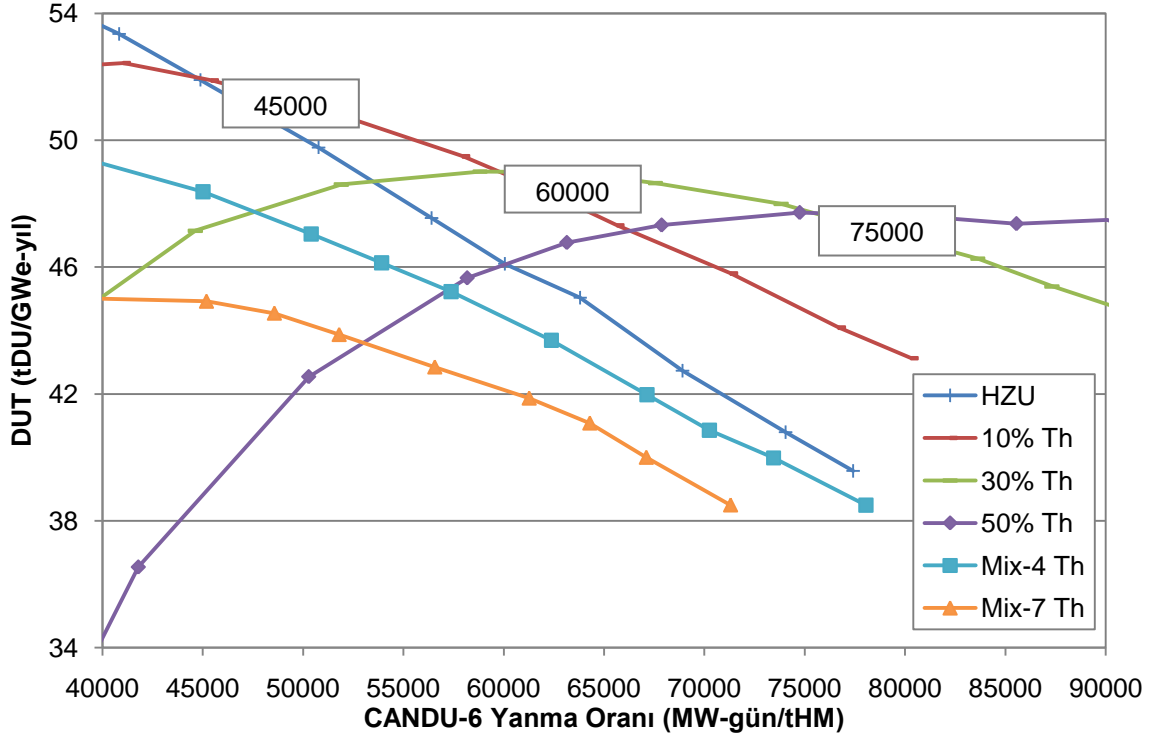
Şekil 6.2. CANDU6 Yanma Oranı – DUG Eğrisi (0-50000 MW-gün/tHM)



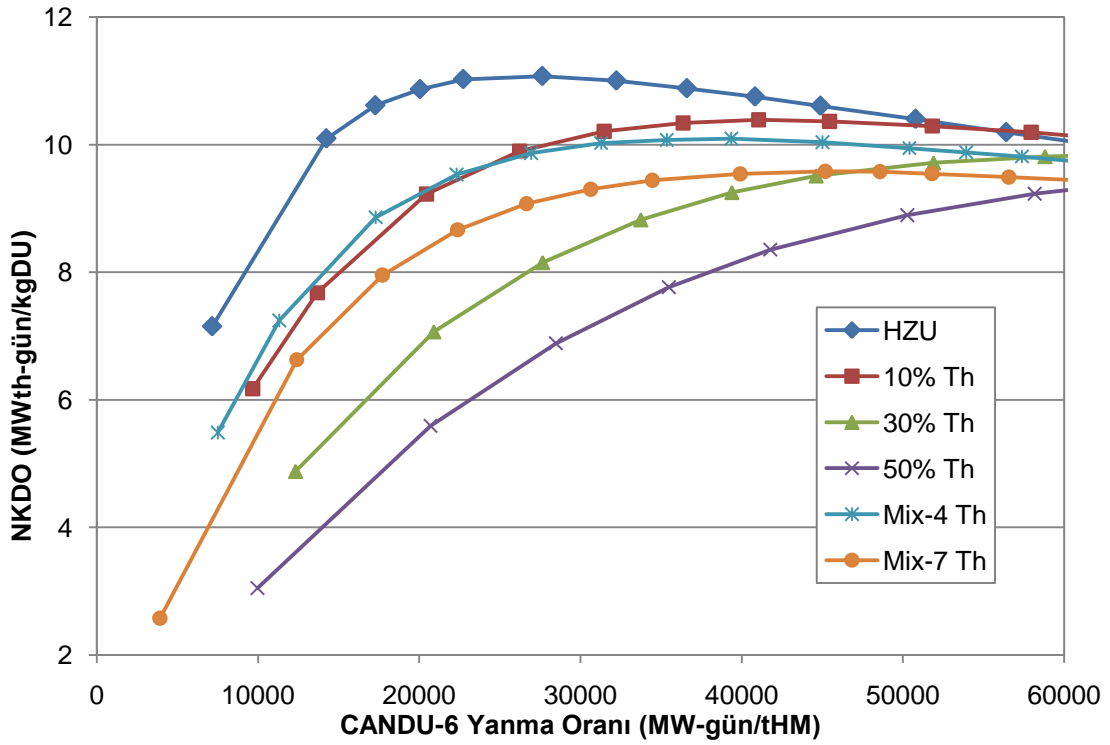
Şekil 6.3. CANDU6 Yanma Oranı – DUG Eğrisi (40000-90000 MW-gün/tHM)



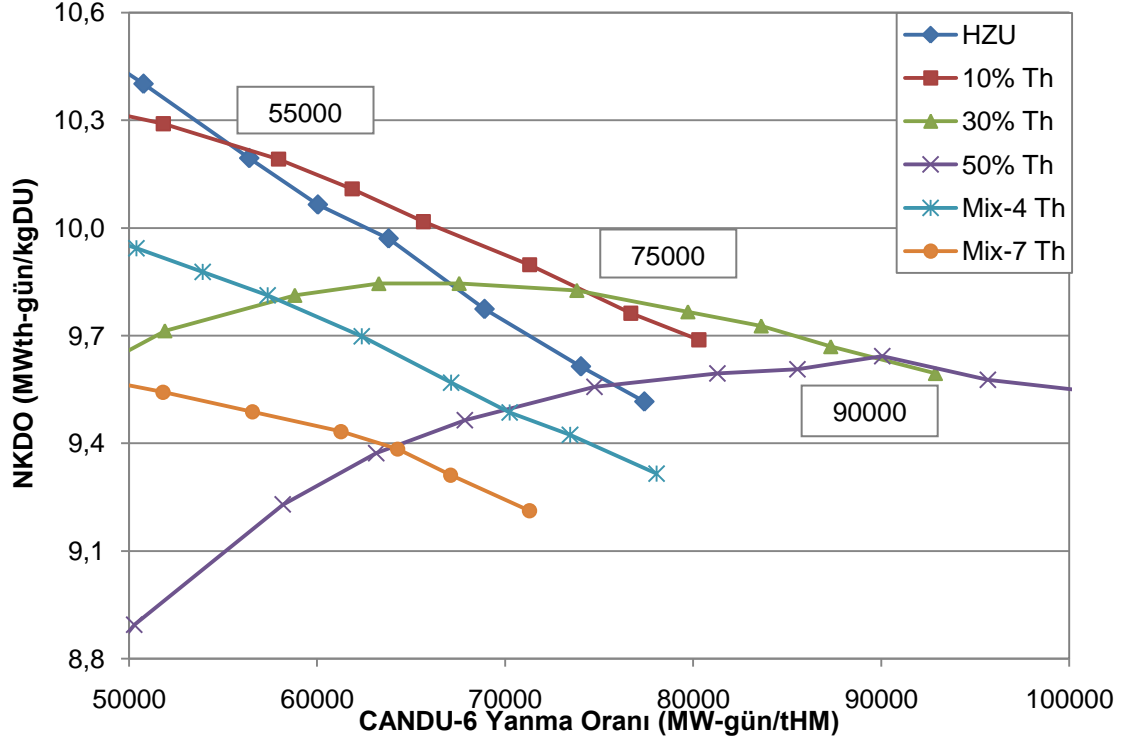
Şekil 6.4. CANDU6 Yanma Oranı – DUT Eğrisi (0-50000 MW-gün/tHM)



Şekil 6.5. CANDU6 Yanma Oranı - DUT Eğrisi (40000-90000 MW-gün/tHM)



Şekil 6.6. CANDU6 Yanma Oranı – NKDO Eğrisi (0-60000 MW-gün/tHM)



Şekil 6.7. CANDU6 Yanma Oranı - NKDO Eğrisi (50000-95000 MW-gün/tHM)

6.3 PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi

Çizelge 6.3, Şekil 6.8, 6.9, 6.10 ve 6.11'de gösterildiği üzere, TBİ ve DUPIC çevrimlerinin her ikisi için de, CANDU6'da ilave yanma oranları elde edilmiş ve DUG'da azalma, NKDO'da artış gözlemlenmiştir. DUG ve NKDO değerlerinin PWR yanma oranından olumsuz etkilendiği görülmüştür. Bunun sebebi, PWR reaktöründe yüksek yanma oranına ulaşabilmek için gereken KAYNAK/YÜK ($\frac{x_P - x_T}{x_F - x_T}$) oranının artışı, toplam yanma oranındaki artıştan daha fazla olmasıdır.

Çizelge 6.3. TBİ ve DUPIC çevrimleri için karşılaştırmalı sonuçlar

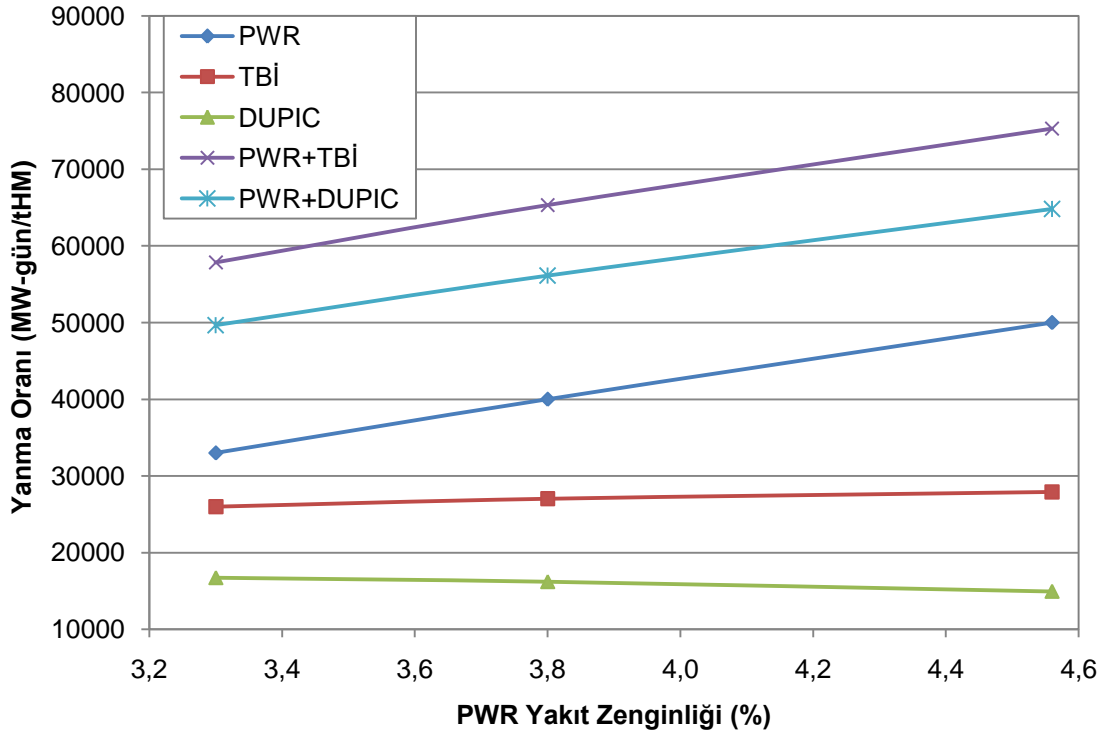
PWR Yanma Oranı, (MW-gün/tU)	PWR Yakıt Zenginliği, (%)	CANDU6 Çevrimi	CANDU6 Yanma Oranı, (MW-gün/tHM)	DUG (tDU/GW _e -yıl)	NKDO (MW _{th} -gün/kgDU)
33000	3,30	TBİ	25981	127,6	8,78
		DUPIC	16717	148,9	7,50
40000	3,80	TBİ	27021	130,8	8,56
		DUPIC	16195	153,1	7,29
50000	4,56	TBİ	27919	136,7	8,18
		DUPIC	14926	160,6	6,93

DUPIC'e nazaran TBİ yakıtı ile CANDU6'da daha yüksek yanma oranları elde edilmekte ve bu nedenle irdelenen tüm faktörler açısından TBİ çevriminin avantajlı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, TBİ ile elde edilen CANDU6 yakıtının FÜ ve MA içermeyip sadece U+Pu izotoplarından oluşuyor olmasıdır. Aynı nedenle, PWR için yanma oranı arttıkça TBİ-CANDU6 yanma oranı artar, ama DUPIC-CANDU6 yanma oranı azalır.

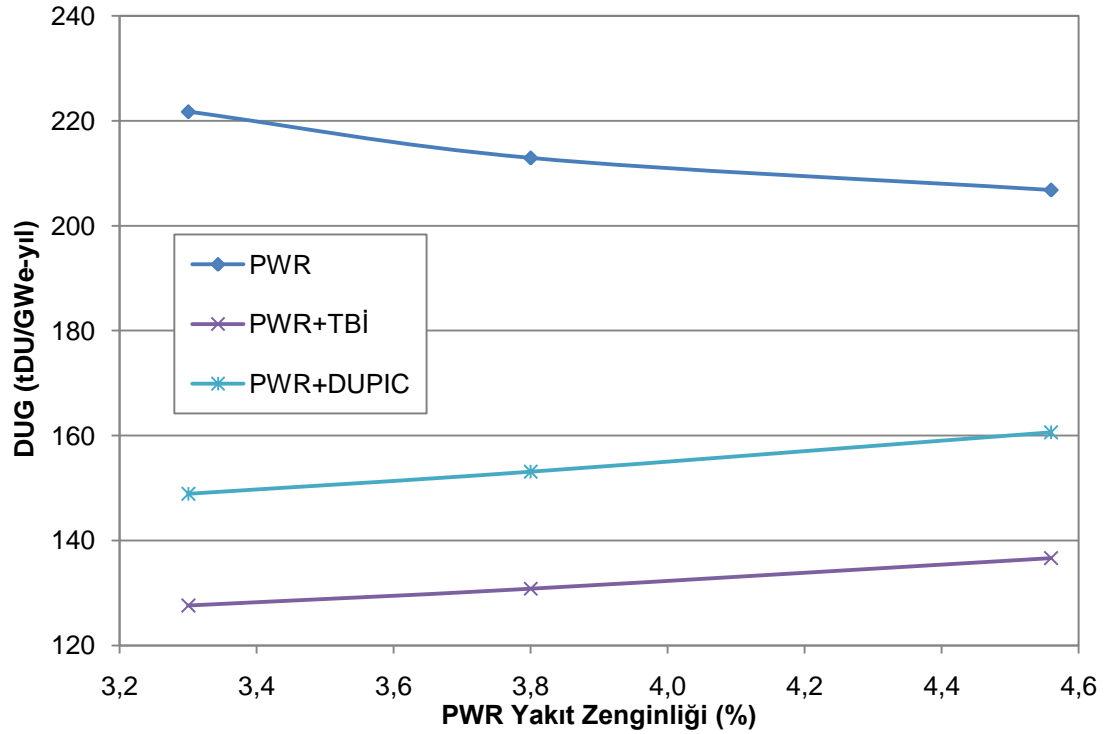
KY'deki U+Pu'yu geri kazanmanın en kolay ve ekonomik yolu TBİ'dir; ancak, TBİ çevriminde maliyeti en olumsuz yönde etkileyecek olan da bu ayırma prosesidir. Taze U yakıtla kıyaslandığında, TBİ'deki U+Pu yakıtının içerdiği parazitik U ve Pu izotoplarından kaynaklanan ilave aktivite de bir başka olumsuz unsurdur.

DUPIC, herhangi bir ayırma prosesi içermediğinden, TBİ'ye kıyasla daha kolay ve ucuz olmalıdır. Ancak, CANDU yakıtındaki FÜ ve MA varlığının yakıtların işlenmesi, üretimi ve taşınması sırasında olumsuz etkileri olacaktır. Sonuç olarak, DUPIC yakıtından üretilen enerjin maliyeti yalnızca ulaşılabilir yanma oranına bağlı olmayıp aynı zamanda tüm ilgili proseslerdeki ekstra maliyetlerden de etkilenecektir. DUPIC ile ilgili teknik zorluklar ve ilave maliyetler bazı kaynaklarda detaylı olarak irdelenmiştir [11, 12, 31, 32, 33, 43].

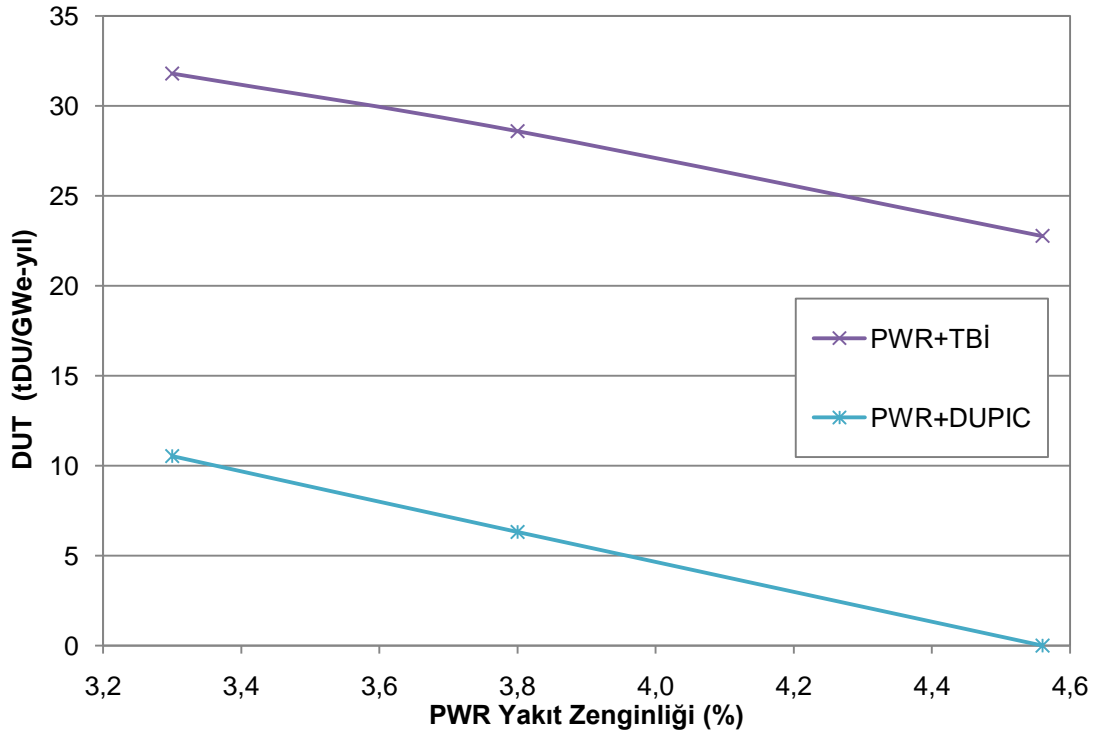
PWR-CANDU birleşik yakıt çevrimi sisteminin verimli ve sürdürülebilir bir biçimde işletilmesi için hem PWR hem de CANDU reaktör teknolojilerinde uzmanlık ve deneyim gerekmektedir. Bu durum, DUPIC ve TBİ seçeneklerinin en önemli zorluğu olabilir.



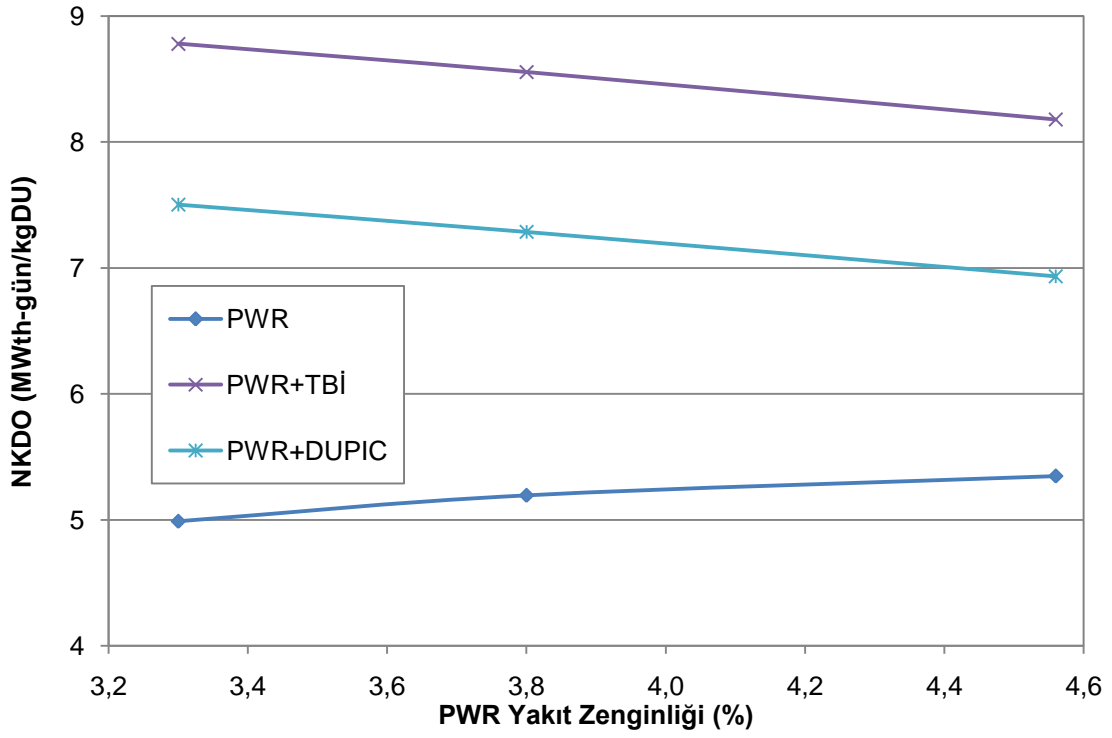
Şekil 6.8. PWR yakıt zenginliği-yanma oranı eğrisi



Şekil 6.9. PWR yakıt zenginliği- DUG eğrisi



Şekil 6.10. PWR yakıt zenginliği- DUT eğrisi



Şekil 6.11. PWR yakıt zenginliği- NKDO eğrisi

6.4 Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu çalışmada, PWR-CANDU6 birleşik yakıt çevrimi sistemine ait iki geri dönüşüm seçeneği olan Tam Birlikte İşleme (TBİ) ve DUPIC çevrimlerinin yanma oranı analizleri yapılarak, DU gereksinimi (DUG) ve nükleer kaynak değerlendirme oranlarına (NKDO) göre karşılaştırmaları yapılmıştır. TBİ çevriminin DUPIC çevriminden daha avantajlı olduğu görülmüştür. DUG ve NKDO'daki TBİ lehine olan avantajların, TBİ ve DUPIC çevrimlerinde üretilen birim enerjinin maliyetini nasıl etkileyeceği bir başka araştırma konusu olabilir. Ana yakıt çevrimi proseslerinin ve girdilerinin yanı sıra, Bölüm 6.3'te değinilen ekstra zorlukları ve bunlarla ilgili maliyetleri de ayrıca hesaba katmak bu tür bir ekonomik analizi daha da değerli kılar.

Bu çalışmada, CANDU6 U yakıtına Th eklenmesinin DUG ve NKDO açısından dezavantaj getirdiği sonucuna varılmıştır. Şunu da eklemek gerekir ki bu sonuç sadece tek-geçişli CANDU çevrimi için geçerlidir. CANDU-KY'nin içerdiği U+Pu'nun (ve belki Th'nin de) geri kazanıldığı ve farklı fisil+doğurgan madde karışımlarının kullanıldığı kapalı çevrimlerin incelenmesi de anlamlıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Benedict, M., Pigford, T.H., Levi H.W., *Nuclear Chemical Engineering*, McGraw-Hill Book Company, **1983**.
- [2] Lamarsh, J.R., Baratta, A.J., *Introduction to Nuclear Engineering*, Third Edition. Prentice- Hall, Inc., New Jersey, 190-191, **2001**.
- [3] Zabunoğlu, O. H., Özdemir, L., Purex co-processing of spent LWR fuels: flow sheet, *Annals of Nuclear Energy*, 32, 151–162, **2005**.
- [4] Zabunoğlu, O. H., Özdemir, L., Purex co-processing of spent LWR fuels: comparative fuel cycle cost analyses, *Annals of Nuclear Energy*, 32, 137–149, **2005**.
- [5] Zabunoğlu, O. H., Determination of enrichment of recycle uranium fuels for different burnup values, *Annals of Nuclear Energy*, 35, 285–290, **2008**.
- [6] Özdemir, L., Bulut Acar, B., Zabunoğlu, O.H., Determination of fissile fraction in MOX (mixed U + Pu oxides) fuels for different burnup values, *Annals of Nuclear Energy*, 38, 540–546, **2011**.
- [7] Zabunoğlu, O.H., Spinrad, B.I., Purex processing of 10-year light water reactor fuel: Flow sheet, *Nuclear Technology*, 93, 376-381, **1991**.
- [8] Özdemir, L., *A Nuclear Fuel Cycle with Complete Coprocessing of Uranium and Plutonium in Spent Nuclear Fuel: Flow Sheet and Cost Analysis*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2003**.
- [9] Choi, H., Rhee, B.W., Park, H., Physics study on direct use of spent pressurized water reactor fuel in CANDU (DUPIC), *Nuclear Science and Engineering*, 126, 80-93, **1997**.
- [10] Kang, J. and Suzuki, A., Analysis on DUPIC fuel cycle in aspect of overall radioactive waste management, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Environment*, 4, 19-27, **1997**.
- [11] Ryu, H.J., Moon, J.S., Kang, K.H., Song, K.C., Yang, M.S., *Materials properties and fuel performance of the DUPIC fuel*, Workshop on Advanced Reactors with Innovative Fuels (ARWIF-2005), Oak Ridge, Tennessee, **2005**.
- [12] Yang, M.S., Choi, H., Jeong, C.J., Song, K.C., Lee, J.W., Park, G.I., Kim, H.D., Ko, W.I., Park, J.J., Kim, K.H., Lee, H.H., Park, J.H., The status and prospect of DUPIC fuel technology, *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 38, no. 4, 359-374, **2006**.
- [13] World Nuclear Association (WNA), <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>, (Mart **2017**).
- [14] Türkmen, M., *Thorium Utilization in ACR (Advanced CANDU Reactor) and CANDU-6*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2009**.

- [15] OECD/NEA, *Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle*, OECD, **2015**.
- [16] IAEA, *Heavy Water Reactors – Status and Projected Development*, IAEA Technical Reports Series No:407, **2002**.
- [17] Boczar, P.G., et al., A fresh look at thorium fuel cycles in CANDU reactors, *International Co-operation in the Pacific Rim for the 21st Century (Proc. 11th Pacific Basin Nuclear Conf. Banff, 1998)*, Canadian Nuclear Society, Toronto, **1998**.
- [18] Belle, J., Berman, R.M., *The High-temperature Ex-reactor Thermal Conductivity of Thoria and Thoria–urania Solid Solutions (LWBR/AWBA Development Program)*, Rep. WAPD-TM-1530, Bettis Atomic Power Lab., Pittsburgh, **1982**.
- [19] Fink, J.M., Chasanov, M.G., Leibowitz, L., Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Solid UO₂, Rep. ANL-CEN-RSD-81-3, Argonne Natl Lab., IL, **1981**.
- [20] Goodwin, B.W., ve ark., *The Disposal of Canada’s Nuclear Fuel Waste: Postclosure Assessment of a Reference System*, Rep. AECL-10717 (COG-93-7), Atomic Energy of Canada, Toronto, **1994**.
- [21] Chritoph, E., ve ark., *Prospects for Self-sufficient Equilibrium Thorium Cycles in CANDU Reactors*, Rep. AECL-5501, Atomic Energy of Canada, Toronto, **1975**.
- [22] Milgram, M.S., *Thorium Fuel Cycles in CANDU Reactors: A Review*, Rep. AECL- 8326, Atomic Energy of Canada, Toronto, **1984**.
- [23] Gupta H.P., Menon S.V.G., Banerjee S., Advanced fuel cycles for use in PHWRs, *Journal of Nuclear Materials*, 383, 54–62, **2008**.
- [24] Türkmen, M., Zabunoğlu, O. H., Use of Th and U in CANDU-6 and ACR-700 on the once-through cycle: Burnup analyses, natural U requirement/saving and nuclear resource utilization, *Journal of Nuclear Materials*, 429, 263-269, **2012**.
- [25] World Nuclear Association (WNA), <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx>, (Ekim **2016**).
- [26] Karraker, D., *Radiation Chemistry of Acetohydroxamic Acid in the Urex Process*, Technical Report, Westinghouse Savannah River Company, **2002**.
- [27] Chandler, S.J., *Comparison of Reprocessing Methods for LWR Fuel*, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, U.S.A, **2006**.
- [28] Boczar, P.G., Hastings, I.J., Cell, A., *Recycling in CANDU of Uranium and/or Plutonium from Spent LWR Fuel*, Rep. AECL-10018, Atomic Energy of Canada, Toronto, **1989**.
- [29] Yang, M.S., Status of DUPIC Fuel Development, 2001 http://www.inmm-kc.or.kr/data/file/m41/2469103959_BmW5hsT7_5._EC9691EBAA85EC8AB9-

DUPIC_ED95B5EC97B0EBA38CECA3BCEAB8B0EAB8B0EC88A0EC9D98_EAB09CEBB09C_ED9884ED99A9.pdf , (Mart **2016**).

- [30] Kim, E. H., Current Status on Development of P&T in Korea, 9th IEMPT, Nimes, France, 25-29 Eylül 2006, http://www.oecd-nea.org/pt/iempt9/Nimes_Presentations/KIM.pdf, (Haziran **2016**).
- [31] Choi, H., Ko, W.I., Yang M.S., Economic analysis on direct use of spent pressurized water reactor fuel in CANDU reactors - I: DUPIC fuel fabrication cost, *Nuclear Technology*, 134, 110-129. **2001**.
- [32] Choi, H., Ko, W.I., Yang, M.S., Namgung, I., Na B.-G., Economic analysis on direct use of spent pressurized water reactor fuel in CANDU reactors - II: DUPIC fuel-handling Cost, *Nuclear Technology*, 134, 130-148, **2001**.
- [33] Ko, W.I., Choi, H., Yang, M.S., Economic analysis on direct use of spent pressurized water reactor fuel in CANDU reactors - IV: DUPIC fuel cycle cost, *Nuclear Technology*, 134, 167-186, **2001**.
- [34] Bollmann, C.A., *Optimization of DUPIC Cycle Environmental and Economic Performance*, M.Sc. Thesis, U. S. Naval Academy, **1996**.
- [35] X-5 Monte Carlo Team, *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*, LA-CP-03-0245, LANL, **2003**.
- [36] Poston, D. L., Trelue H. R., *User's Manual, Version 2.0 for MONTEBURNS Version 1.0*, LA-UR-99-4999, **1999**.
- [37] MIT Open Course Ware, Systems Analysis of the Nuclear Fuel Cycle, https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-251-systems-analysis-of-the-nuclear-fuel-cycle-fall-2009/labs/MIT22_251F09_ORIGEN.pdf, (Nisan **2017**).
- [38] Driscoll, M.J., Downar, T.J., Pilat, E.E., *Linear Reactivity Model for Nuclear Fuel Management*, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, USA, **1990**.
- [39] AECL, ACR-700 Technical Description, 10810-01371-TED-001 Revision 0, 2003 June, pp. 1–6, 1-7. <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0320/ML032030391.pdf> , (Nisan 2016).
- [40] Inch, W. W. R., Thompson P. and Suk, H. C., CANFLEX: From Development Concept to a Proven Fuel, *Proceedings of the KAIF/KNS Annual Conference*, Seoul, Korea, April 15–16, **1998**.
- [41] Özdemir, L., Çağlak, E., Tezbaşaran, A., Zabunoğlu, O.H., Burnup analysis, natural U requirement and nuclear resource utilization in a combined PWR-CANDU system: Complete coprocessing and DUPIC scenarios, *Progress in Nuclear Energy*, 91, 140-146, **2016**.
- [42] Nuttin A., Guillemin P., Courau T., Marleau G., M'éplan O., Study of CANDU thoriumbased fuel cycles by deterministic and Monte Carlo methods, *PHYSOR-2006 Topical Meeting on Advances in Nuclear Analysis and Simulation*, Sep 2006, Vancouver B.C., Canada. American Nuclear Society, C111 (10 p.), **2006**.

- [43] Ko W.I. and Gao F., Economic analysis of different fuel cycle options, *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2012, article ID 293467, **2012**.

EK A. CANDU6 REAKTÖRÜNÜN ÖZELLİKLERİ

Çizelge A.1. CANDU6 Kor Özellikleri

Parametreler	Değer
Tip	PTR
Termal Güç (MW)	2061,4
İşletme Basıncı (MPa)	11,1
Kor Uzunluğu (cm)	594,4
Yakıt Kanalı Başına Demet Sayısı	12
Yakıt Kanalı Sayısı	380
Basınç-Tüpü (Zr-2.5% Nb) İç Çap (cm)	10,3378
Ortalama Basınç Tüpü Duvar Kalınlığı (cm)	0,4343
"Calandria" Tüp (Zr-2) İç Çap (cm)	12.8956
Ortalama "Calandria" Tüpü Duvar Kalınlığı (cm)	0,1397
"Calandria" Çapı (cm)	760
Reflektör Kalınlığı (cm)	65,6
Reaktör Kor Yarıçapı	314,3
Ana 'Calandria'nın İç Yarıçapı (cm)	379,7
Alt-calandria'nın İç Yarıçapı (cm)	337,8
'Calandria' Uzunluğu (cm)	96,5
Yanma Süresi (gün)	308
Yakıt Kanalının 'Extrapole' Uzunluğu (cm)	606,0
'Extrapole' Reaktör Yarıçapı (cm)	384,7

Çizelge A.2. CANDU6 Yakıt Özellikleri

Parametreler	Değer
Kafes Aralığı (<i>Lattice Pitch</i>) (cm)	28,6 (kare)
Yakıt	Doğal UO ₂ Sinterlenmiş Peletleri
Yakıt Yoğunluğu (g/cm ³)	10,6
Zenginleştirme Seviyesi (Başlangıç)	Doğal U
²³⁴ U	0,0054
²³⁵ U	0,7110
²³⁸ U	99,2836
Yakıt Yanma Oranı (MW-gün/tU)	7154,1
Yakıt Pini Dış Çapı (cm)	1,310
Yakıt Pelet Çapı (cm)	1,220
Yakıt Demeti	37-eleman
Yakıt Demeti Uzunluğu (cm)	48,20
UO ₂ Kütlesi (kg/yakıt demeti)	21,67
U Kütlesi (kg/yakıt demeti)	19,10
Zr Kütlesi (kg/yakıt demeti)	2,206
Ortalama Çıkış ²³⁵ U/U	0,213
Yakıt Sıcaklığı (K)	1155

Çizelge A.3. CANDU6 Soğutucu Özellikleri

Parametreler	Değer
Soğutucu	D ₂ O
Atom Saflığı (nominal)	99,10 %
Yoğunluk (g/cm ³)	1,8360
Soğutucu Giriş Sıcaklığı (°C)	266
Soğutucu Çıkış Sıcaklığı (°C)	310
Ortalama Sıcaklık (°C)	288

Çizelge A.4. CANDU6 Yavaşlatıcı Özellikleri

Parametreler	Değer
Yavaşlatıcı (ve reflektör)	D ₂ O
Atom Saflığı (nominal)	99,85 %
Yoğunluk (g/cm ³)	1,0829
Ortalama Sıcaklık (°C)	69

Çizelge A.5. CANDU6 Malzeme Özellikleri

Parametreler	Değer
<i>Annulus</i> Gaz	CO ₂
Yakıt Kanalları	Yatay Zr-2.5% Nb alaşım
Zr-2.5Nb (%)	Zr (97,5%) & Nb (2,5%)
Zircaloy-2 (%)	Zr (98,225%) & Sn (1,5%) & Fe (0,175%) & Cr (0,10%)
Zircaloy-4 (%)	Zr (98,23%) & Sn (1,45%) & Fe (0,21%) & Cr (0,11%) & Hf (0,01%)

EK B. CANDU6 REAKTÖRÜ İLAVE HESAP SONUÇLARI

Çizelge B.1. U yakıtlı CANDU6 için Yakıt Gereksinimi (YG), DU Tasarrufu (%) ve KAYNAK/YÜK sonuçları

²³⁵ U oranı, x _P (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	YG (tU/GWe-yıl)	DU Tasarrufu (%)	KAYNAK/YÜK
0,711	7154	159,4	0	1,00
0,9	14235	80,1	29,14	1,41
1,0	17269	66,1	32,60	1,63
1,1	20038	56,9	34,17	1,84
1,2	22719	50,2	35,11	2,06
1,4	27622	41,3	35,39	2,49
1,6	32221	35,4	34,98	2,93
1,8	36587	31,2	34,26	3,36
2,0	40818	27,9	33,47	3,80
2,2	44869	25,4	32,56	4,23
2,5	50766	22,5	31,22	4,88
2,8	56390	20,2	29,82	5,53
3,0	60040	19,0	28,92	5,97
3,2	63803	17,9	28,25	6,40
3,5	68906	16,6	26,81	7,05
3,8	74035	15,4	25,59	7,70
4,0	77409	14,7	24,82	8,13

Çizelge B.2. Homojen-demet U+Th yakıtlar için Yakıt Gereksinimi (YG), DU Tasarrufu (%) ve KAYNAK/YÜK sonuçları

Th Oranı (%)	²³⁵ U oranı, x _P (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	YG (tHM/GWe-yıl)	DUT (%)	KAYNAK/YÜK
	0,9	9661	118,1	0	1,56
	1,0	13678	83,39	12,1	1,78
	1,2	20438	55,81	26,0	2,21
	1,4	26221	43,50	30,5	2,65
	1,6	31468	36,25	32,2	3,08
	1,8	36357	31,37	32,8	3,52
10	2,0	41042	27,79	32,9	3,95
	2,2	45433	25,11	32,5	4,38
	2,5	51812	22,01	31,9	5,03
	2,8	57948	19,68	31,0	5,69
	3,0	61862	18,44	30,4	6,12
	3,2	65650	17,37	29,7	6,55
	3,5	71303	16,00	28,7	7,20

	3,8	76685	14,87	27,7	7,85
	4,0	80304	14,20	27,0	8,29
	1,2	12318	92,6	0	2,52
	1,4	20898	54,58	9,0	2,96
	1,6	27644	41,26	20,0	3,39
	1,8	33742	33,80	25,3	3,82
	2,0	39389	28,96	28,1	4,26
	2,2	44620	25,56	29,6	4,69
	2,5	51903	21,98	30,5	5,34
30	2,8	58816	19,39	30,7	5,99
	3,0	63284	18,02	30,7	6,43
	3,2	67557	16,88	30,5	6,86
	3,5	73818	15,45	30,1	7,51
	3,8	79726	14,31	29,4	8,16
	4,0	83625	13,64	29,0	8,60
	4,2	87323	13,06	28,5	9,03
	4,5	92892	12,28	27,7	9,68
	1,4	9963	114,5	0	3,27
	1,6	20697	55,11	0	3,70
	1,8	28463	40,07	8,7	4,13
	2,0	35472	32,16	18,0	4,57
	2,2	41777	27,30	22,9	5,00
	2,5	50272	22,69	26,7	5,65
	2,8	58172	19,61	28,6	6,30
	3,0	63140	18,07	29,3	6,74
50	3,2	67864	16,81	29,7	7,17
	3,5	74748	15,26	29,9	7,82
	3,8	81287	14,03	29,8	8,47
	4,0	85553	13,33	29,7	8,91
	4,2	90063	12,66	29,8	9,34
	4,5	95682	11,92	29,0	9,99
	4,8	101537	11,23	28,5	10,64
	5,0	105386	10,82	28,2	11,07

Çizelge B.3. Karışık-demet U+Th yakıtlar için Yakıt Gereksinimi (YG), DU Tasarrufu (%) ve KAYNAK/YÜK sonuçları

Th Oranı (%)	²³⁵ U oranı, x _P (%)	Yanma Oranı (MW-gün/tU)	YG (tHM/GWe-yıl)	DUT (%)	KAYNAK/YÜK
Mix4	0,9	7506	152,0	0	1,37
	1,0	11318	100,78	7,69	1,56
	1,2	17297	65,94	23,5	1,95
	1,4	22317	51,11	28,2	2,34
	1,6	26941	42,34	30,2	2,73
	1,8	31280	36,46	31,0	3,12
	2,0	35349	32,27	31,0	3,51
	2,2	39353	28,98	31,0	3,90
	2,5	44998	25,35	30,3	4,48
	2,8	50393	22,63	29,5	5,07
	3,0	53908	21,16	28,9	5,46
	3,2	57371	19,88	28,4	5,85
	3,5	62369	18,29	27,4	6,43
	3,8	67131	16,99	26,3	7,02
	4,0	70243	16,24	25,6	7,40
	4,2	73448	15,53	25,1	7,79
4,5	78052	14,60	24,1	8,38	
Mix7	1,0	3899	292,5	0	1,51
	1,2	12391	92,05	2,44	1,87
	1,4	17699	64,45	17,3	2,23
	1,6	22364	51,00	23,2	2,58
	1,8	26647	42,81	26,0	2,94
	2,0	30620	37,25	27,3	3,29
	2,2	34444	33,12	28,0	3,65
	2,5	39893	28,59	28,2	4,18
	2,8	45179	25,25	28,2	4,72
	3,0	48563	23,49	27,9	5,07
	3,2	51791	22,02	27,5	5,43
	3,5	56557	20,17	26,9	5,96
	3,8	61262	18,62	26,3	6,49
	4,0	64283	17,74	25,8	6,85
4,2	67099	17,00	25,1	7,21	
4,5	71298	16,00	24,1	7,74	

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Levent ÖZDEMİR

Doğum Yeri : Anamur

Medeni Hali : Evli

E-posta : leventoz_2000@yahoo.com

Adresi : Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Yarımburgaz mah.,
Küçükçekmece-İstanbul

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, 2000

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, 2003

Doktora : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, 2017

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce - İyi

İş Deneyimi

2006 - Bugün : Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Çekmece Nükleer Araştırma ve
Eğitim Merkezi, İstanbul, Mühendis

2000- 2006 : Hacettepe Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Araştırma Görevlisi

Deneyim Alanları

Nükleer Yakıt Çevrimi, Nötronik Analizler, Monte-Carlo, MCNP, MONTEBURNS,
Güvenlik Analizleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçeleri

Tezden Üretilmiş Yayınlar

- Özdemir, L., Bulut Acar, B., Zabunoğlu, O.H., Determination of fissile fraction in MOX (mixed U + Pu oxides) fuels for different burnup values, *Annals of Nuclear Energy*, 38, 540–546, **2011**.
- Özdemir, L., Çağlak, E., Tezbaşaran, A., Zabunoğlu, O.H., Burnup analysis, natural U requirement and nuclear resource utilization in a combined PWR-CANDU system: Complete coprocessing and DUPIC scenarios, *Progress in Nuclear Energy*, 91, 140-146, **2016**.

Tezden Üretilmiş Tebliđ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 20/06/2017

Tez Başlığı / Konusu: PWR-CANDU6 Birleşik Yakıt Çevrimi ve CANDU6'da Uranyum + Toryum Kullanımı

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 87 sayfalık kısmına ilişkin, 20/06/2017 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %1'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

d. Oğuz

20/06/2017

Adı Soyadı: Levent ÖZDEMİR
Öğrenci No: N10240842
Anabilim Dalı: Nükleer Enerji Mühendisliği
Programı: Nükleer Enerji Mühendisliği - Doktora
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Okan Zabunoglu

Prof. Dr. H. Okan ZABUNOĞLU

(Unvan, Ad Soyad, İmza)