

**TORYUM REAKTÖRLERİ VE
TÜRKİYE İÇİN ÖNEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Müh. Ümit YOLDAŞ

98134

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Haziran 2000

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Haziran 2000

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Şarman GENÇAY

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet BAYÜLKEN

Doç. Dr. Ahmet DURMAYAZ

[Signature] 29.06.2000
[Signature] 29.06.2000

HAZİRAN 2000

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSYON MERKEZİ**

ÖNSÖZ

Bu tezde toryum reaktörleri ve bu reaktörlerin Türkiye için önemi üzerinde durulmuştur. Bu tezin hazırlanmasında her türlü yardımını ve katkısını esirgemeyen Değerli Hocam Sayın Prof.Dr. Şarman GENÇAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Ümit YOLDAŞ



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM - 1 GİRİŞ	1
1.2 Nükleer Güç Üretiminde Toryumun Yeri	2
BÖLÜM - 2. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE TORYUM YATAKLARI	5
2.1 Dünyada Toryum Yatakları	6
2.2 Türkiye’de Toryum Yatakları	9
BÖLÜM – 3. TORYUM REAKTÖRLERİNİN BUGÜNKÜ DURUMU	10
BÖLÜM – 4 TORYUM REAKTÖRLERİ FİZİĞİ	14
BÖLÜM – 5 CANDU REAKTÖRLERİNDE TEK GEÇİŞLİ ÇEVİRİMLER	20
5.1 Giriş	20
5.2 Fiziksel Prensipler	23
5.3 Kaynak Maliyeti	29
5.4 Sonuç	34
BÖLÜM – 6 SONUÇ VE ÖNERİLER	38

KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	46



KISALTMALAR

FBR	Hızlı Üretken Reaktör
SEU	Az Zenginleştirilmiş Uranyum
CEA	Atom Enerji Komiserliği
PWR	Basınçlı Su Reaktörü
HTR	Yüksek Sıcaklıklı Reaktör
PHWR	Basınçlı Ağır Su Reaktörü
AVR	Araştırma-Test Reaktörü
HEU	Yüksek Zenginlikteki Uranyum
LEU	Düşük Oranda Zenginleştirilmiş Uranyum
MEU	Orta Zenginlikteki Uranyum
HTTR	Yüksek Sıcaklıklı Test Reaktörü
AHWR	Geliştirilmiş Ağır Su Reaktörü
HCLWR	Dönüştürme Oranı Yüksek Hafif Su Reaktörü
MSR	Ergimiş Tuz Reaktörleri
CANDU	Kanada Döteryum Uranyum
NU	Doğal Uranyum
OTTC	Tek Geçişli Toryum Çevrimi

TABLO LİSTESİ

TABLO 1 - 1	Dünya Toryum Rezervleri	8
TABLO 4 - 1	Fisyon Yapabilen Malzemelerin Özellikleri	16



SEKİL LİSTESİ

ŞEKİL – 4.1	Doğadaki Th-232 Radyoaktif Zinciri	15
ŞEKİL – 4.2	^{233}U ve ^{238}U İçin Nötron Enerjisi Fonksiyonu olarak η -1'in Değeri	16
ŞEKİL – 4.3	^{233}U Oluşum Şeması	19
ŞEKİL – 5.1	Toryum Işınlanmasına Karşılık ^{233}U Üremesi	24
ŞEKİL – 5.2	İntegral ve Anlık Çoğalma Çarpanı ile Yanmanın, ...	26
	ThO ₂ ve %1.8 Zenginleştirilmiş UO ₂ Yakıt Demetleri için Değişimi	
ŞEKİL – 5.3	İkili Bir Yakıt Çevrimi İçin Işınlanmaya Entegre Çoğalma Katsayısı	31
ŞEKİL – 5.4	Toryum Işınlanması ve Birleşik Yanma	33
ŞEKİL – 5.5	Tek Geçişli Çevrimde Yakıt Maliyeti	35
ŞEKİL – 5.6	Tek-Geçişli Toryum Çevrimlerinin Önemli Parametreleri	36

SEMBOL LİSTESİ

$A_T(w)$	:	Toplam Nötron Absorbsiyonu
B_c	:	Birleşik Yanma
B_T	:	Toryumun Yanması
B_U	:	Uranyumun Yanması
$k_C(w_U, w_T, y)$	:	Birleşik bir yaşam süresi çoğalma katsayısı
k_{et}	:	Etkin çoğaltma katsayısı
$k_T^I(w_T)$	:	Toryum içeren reaktör kalbi için çoğalma katsayısı
$k_U^I(w_U)$	:	Uranyum içeren reaktör kalbi için çoğalma katsayısı nötron kazancı
N_T	:	Toryum Demetleri Sayısı
N_U	:	Uranyum Demetleri Sayısı
R	:	Zenginleştirme Değeri
w_T	:	Toryum İçeren Hücrenin Işınlanma Fonksiyonu
w_U	:	Uranyum İçeren Hücrenin Işınlanma Fonksiyonu
y	:	Toryumla Uranyum Arasındaki Bağlı Besleme Oranı
$Y_T(w)$	:	Toryum İçeren Hücrenin Işınlanma Fonksiyonu Olarak

Yunan Harfleri

Φ	:	Işınlama Akısı
$\eta - 1$	:	Yeni fisil malzeme üretecek fazlalık nötronların sayısı
ν	:	Fisyon başına yayınlanan ortalama nötron sayısı
η	:	Yakıtta yutulan nötron başına üreyen nötron sayısı
σ_c	:	Yakalanma etkin tesir kesiti
σ_f	:	Fisyon etkin tesir kesiti
Φ_T	:	Toryumu Işınlama Akısı
Φ_U	:	Uranyumu Işınlama Akısı

Alt ve Üst İndisler

c	:	Yakalanma
f	:	Fisyon
et	:	Etkin
T	:	Toryum
U	:	Uranyum
C	:	Birleşik
I	:	İntegral

ÖZET

Bu çalışmanın amacı toryum reaktörleri ve bu reaktörlerin Türkiye için önemine yöneliktir.

Birinci bölümde, Dünya'daki elektrik enerjisi ihtiyacının giderek arttığını ve yeni kaynaklara ihtiyaç duyulduğu belirtilmekte olup, nükleer enerji ve bu enerjinin üretiminde toryumun önemine dikkat çekilmektedir. İkinci bölümde, toryum madeninin Dünya'daki ve Türkiye'deki rezerverine ilişkin bilgiler verilmiştir. Özellikle Türkiye'deki toryum yataklarının nükleer enerji üretiminde ihtiyaca ne kadar cevap verebileceği belirtilmiştir. Üçüncü bölümde, dünyanın gelişmiş ülkelerinde toryum yakıt çevrimli reaktörlerin gelişimi ile ilgili çalışmalar ve özellikle Hindistan'ın bu konudaki çalışmalarının etkinliği üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde, Toryum yakıt çevrimli reaktörlerin fiziği kısaca anlatılmış olup, özellikle toryum ile birlikte kullanılacak olan fisil madde (^{233}U veya ^{235}U) hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde, özellikle toryum yakıt çevrimi kullanımına uygun reaktör tipi olan CANDU ve bu reaktörlerdeki Tek-Geçişli Çevrimlerden bahsedilmiştir. Burada özellikle ^{233}U elde etmenin gerek fizik gerek ekonomik olarak uygun yolunun ne olduğu anlatılmıştır. Son bölümde ise, enerji üretiminde nükleer yakıt olarak kullanılacak toryumun, Türkiye'de mevcut yatlardan hangi işlemlerden sonra elde edilip reaktörlerde kullanılabileceğinden bahsedilmiştir.

Tezin ana amacı tek geçişli toryum çevriminin tanınması ve tanıtılmasıdır. Toryum madeninden yararlanmak isteyen ve uranyumu yeterli olmayan ülkeler için uygun görünen bu çevrim Kanada'da geliştirilmiş olup, bu ülkenin yeterince uranyumu bulunması nedeni ile şimdilik yaygın olarak uygulanmayan bir çevrimdir.

SUMMARY

This study is done for a better understanding of thorium reactors and the importance of those reactors for Turkey.

In the First Chapter of the study, the increasing demand for worldwide electricity energy and the need for new resources are mentioned. Also the nuclear energy and the importance of thorium in the world and in Turkey is given especially the thorium minerals in Turkey are explored to see whether how they meet the demand for nuclear energy production. In the third chapter, the studies about the advancement of thorium fuel cycled reactors in the developed countries and especially the efficiency of the studies done by India is emphasised. In the fourth chapter, a brief information about both the physics of thorium fuel cycled reactors and suitable fissile material (^{233}U or ^{235}U) are given. In the fifth chapter, CANDU reactor is known as suitable ones for thorium fuel cycle and once-through cycle which are used on these reactors are described. Here, both physically and economically, easy and simply ways of obtaining ^{233}U are told. And in the final chapter, thorium minerals, which will be used as a nuclear fuel in the production of electricity is entirely explored. The necessary processes for the thorium minerals present in Turkey to be prepared for the use in reactors are defined.

The main purpose of this thesis is to define and introduce once through thorium cycle. This cycle being developed in Canada seems to be suitable for the countries which have insufficient uranium reserves but want to use thorium mine. As this country has enough uranium, this cycle is not widely used at the moment.

BÖLÜM - 1

GİRİŞ

İçinde yaşadığımız yüzyılda, dünyanın en önemli sorunlarından biri enerji yetmezliği ve talebin karşılanamaması sorunudur. Dünyanın genel enerji talebi, nüfus artışından da etkilenerek artmaktadır. Yapılan tahminlere göre, dünyanın enerji talebi 2010 yılında, 1990 yılına oranla 1.5 kat daha fazla olacaktır. 1994 yılında 11.800 Milyar kW.h olan elektrik enerjisi talebinin 2010 yılında 20.600 Milyar kW.h değerine ulaşacağı tahmin edilmektedir [1].

Dünya enerji ihtiyacını karşılamada, bilinen konvansiyonel kaynakların kısıtlı olması nedeniyle, yakın bir gelecekte tükenmeye başlayacağı anlaşılmıştır. 1973 petrol krizinden sonra, başta gelişmiş ülkeler olmak üzere dünya ülkeleri enerji kaynaklarını en iyi şekilde değerlendirmek ve korumak için gerekli önlemleri almaya başlamışlardır. Bunun yanı sıra petrole alternatif olacak bol, ucuz ve güvenilir enerji kaynakları araştırılması da hız kazanmıştır.

Bütün bunların sonucunda, petrolden uzak ve yeni enerji kaynaklarına dönük bir enerji politikasının gerekli olduğu anlaşılmıştır. Mevcut enerji kaynakları içinde sadece nükleer enerji bu yüzyılın sonuna doğru gittikçe artan dünya nüfusu ve sanayileşmeye paralel olarak artan enerji açığını kapatabilecek kapasitededir.

Fosil yakıtlara dayanan enerji kaynaklarına kıyasla, nükleer enerjinin avantajları çok yönlüdür. Elektrik üretiminde güvenli ve çevre dostudur. Bugün nükleer enerji, dünya toplam elektrik üretiminin yaklaşık %17'sini karşılayan güvenilir bir teknoloji durumundadır.

Hızla sanayileşen ve nüfus artışı yılda ortalama %1.5 olan ülkemizde buna paralel olarak enerji talebinin de artacağı bilinmektedir. Dolayısıyla şu anda enerji sıkıntısı içinde olan ülkemiz 2010 yılında 30000 MW civarında kurulu güç açığı ile karşı karşıya kalacaktır.

Bu enerji açığının ve ilerleyen yıllarda artacak gereksinimin fosil yakıtlar ve hidrolik kaynaklar ile kapatılması mümkün olmadığı gibi, yenilenebilir kaynaklar olan rüzgar gücü, güneş enerjisi ve bio enerji ile de sağlanması olası değildir.

Enerji dar boğazında bulunan ve kalkınmakta olan ülkemizde en önemli sorunlardan biri bol, ucuz, güvenilir ve çevre dostu elektrik enerjisi teminidir. Konvansiyonel enerji kaynaklarının zamanla ve hızla tükenmesi sonunda meydana gelecek açık, enerji talebinin karşılanmasında zaten dış kaynaklara bağımlı ülkemiz için, nükleer enerjiyi cazip duruma getirmektedir.

1 - 1 NÜKLEER GÜÇ ÜRETİMİNDE TORYUMUN YERİ

Dünya enerji ihtiyacı nüfus artışına paralel olarak artmaya devam etmektedir. Bilinen fosil ve hidrolik enerji kaynaklarının sınırlı olması başka alternatif enerji kaynaklarının aranmasında en önemli etken olmaktadır Bu alternatif kaynakların içinde en fazla potansiyele sahip olan ise nükleer enerjidir.

Bugün nükleer enerjide uranyum yakıtlı termal reaktörler esas rolü oynamaktadır. Fakat artan enerji ihtiyacına karşılık dünya uranyum rezervinin bir zaman sonra azalıp biteceği analizler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu bakımdan yeni enerji kaynağı olabilecek hammaddelerin araştırılması gerekmektedir. Ayrıca mevcut uranyum kaynaklarından faydalanmayı arttıracak tipte reaktörler geliştirmek bir çözüm yolu olarak görülmüş fakat geliştirilen Hızlı Üretken Reaktörler (FBR) çok başarılı olamamıştır. Bunun gerek bilimsel gerek mali sebepleri vardır. Bunlar ;

- 1) Teknolojik olarak, çok yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 2500 °C) dayanacak malzeme üretilmesi oldukça zordur.
- 2) FBR'ler hızlı nötronlar ile çalıştığından moderatör kullanılamaz. Hızlı nötronlar için fisyon tesir kesitleri çok küçüktür. Bu yüzden reaksiyon sayısı az olur, bunu arttırmak için daha fazla fisil malzemeye ihtiyaç vardır.
- 3) Soğutucu akışkan olarak kullanılan sıvı sodyumun, soğutma devrelerinde suya karışma olasılığı vardır. Böyle bir durum çok büyük patlamalara sebep olabileceğinden, önemli problem yaratmaktadır.

4) Bu reaktörler üretim reaktörleri olarak tasarlanmıştır. Ancak, zamanla üretilen fisyon maddesinin (plutonyum) bomba yapımında kullanılmaya başlanacağı korkusu çalışmaların durmasında önemli bir sebep olmuştur.

5) Mali sebepler arasında ; Araştırma - geliştirme masraflarının çok fazla olması sayılabilir. Buna bir örnek verecek olursak, sodyumun sıvı tutulması için termal izolasyonun çok iyi olması gerekir ki bu çok masraflı bir işlem demektir. Ayrıca diğer reaktörlerde kullanılan mekanik pompalar yerine çok pahalı olan manyetik pompaların kullanılma zorunluluğu vardır. Bu sebeplerden dolayı Amerika'da Clinch - River reaktörü kapatılmıştır. Fransa'da hükümet kaynak bulma zorunluluğu yüzünden FBR'lerle ilgili çalışmalara ara vermiştir.

Toryum doğada oldukça bol bulunmaktadır, şimdiye kadar kullanılan nükleer malzemeye yeni bir alternatif kaynak olup olamayacağı konusu gündeme gelmiş ve araştırılmıştır. Toryum doğada yalnızca ^{232}Th izotopu olarak bulunur. Bu fertil element reaktörlerde nötron yutarak fisil ^{233}U 'e dönüşür . Toryumu hammadde olarak kullanan ve toryum çevrimi ile çalışacak reaktör tipleri üzerinde 1970'li yıllarda başlayan çalışmalar uzun bir zaman hızla devam etmiştir. Hafif ve ağır sulu basınçlı reaktörler; HTR ve FBR'ler için toryum kullanan yakıt çevrimleri geliştirilmiştir. Araştırma faaliyetleri çeşitli merkezlerde devam etmektedir.

Bu konuda çeşitli ülkelerde kapsamlı araştırmalar yapılmış ve gerek teorik gerekse deneysel çalışmalardan önemli sonuçlar elde edilmiştir. Ülkemizin bol toryum yataklarına sahip olması ve toryum reaktörlerinden yararlanma durumunun ortaya çıkması, nükleer enerji politikamız içine dahil edilerek konunun etraflı bir şekilde araştırılmasının gerekli olduğu düşüncesi çeşitli çevrelerde önem kazanmıştır.

Toryum çevrimleri söz konusu olduğunda 1970-80'li yıllarda yapılan çalışmalar önemlidir. Büyük bir bölümü Kanada'da CANDU reaktörleri için yapılmıştır [2-7]. Ayrıca hybrid reaktörleri de içine alan çalışmalar aynı devrede gerçekleştirilmiştir [8-10]. Toryum reaktörleri ile ilgili çeşitli çalışmalara özellikle Japonya, Çin ve Hindistan'da devam edilmektedir [11-14].

Bu çalışmada amaç; özellikle Kanada'da CANDU reaktörleri için düşünülen ve uzun yıllar üzerinde çalışılan daha sonra alınan iyi sonuçlara rağmen ticari boyutlarda gerçekleştirilmesi ertelenen tek geçişli toryum çevrimini incelemektir. (Once Through Thorium Cycle). Çalışmanın 2. Bölümünde toryum yatakları ile ilgili bilgi verilmiştir. 3. Bölüm bazı ülkelerin toryum çevrimlerine olan ilgisini anlatmakla, 4. Bölüm'de toryum reaktörleri fiziği ile ilgili kısa bilgi verilmektedir. 5. Bölüm tek geçişli toryum çevrimine ayrılmıştır. 6. Bölüm sonuç bölümüdür.



BÖLÜM - 2

DÜNYA'DA VE TÜRKİYE'DE TORYUM YATAKLARI

Fiziksel Özellikleri ; Toryumun atom numarası 90, kütle numarası 232,038'dir. Metal halde gri renkte olup, asitlerden hemen hemen hiç etkilenmez. İyot, brom ve klorla reaksiyona girer. Özgül ağırlığı 11.75g/cm³'tür. Ergime sıcaklığı 1750 °C ' dir.

Doğal İzotopları; Toryumun fisil doğal izotopu yoktur. ²³²Th termal reaktörlerde, nötron bombardımanı altında fisil bir izotop olan ²³³U'e dönüştürülebilir. ²³²Th oldukça iyi bir α yayıcısıdır. Radyoaktiflik yarı ömrü 10¹⁰ yıldan fazla olduğu için Yerküre'nin oluşumundan beri varolan tek radyoaktif izotopudur.

Yerkabuğundaki Dağılımı; Toryumun değişik mineralojik bileşimler halinde, yerkabuğunda yaygın olduğu bilinmektedir. Magmanın kristalleşmesi sırasında artık sıvıda derişir, bu nedenle özellikle granitler gibi farklılaşmış kayalarda bol bulunur.

Kullanılışı ; Yukarıda belirtildiği gibi doğrudan fisil bir izotopu olmamasına rağmen nükleer enerji üretiminde, günümüze dek bazı reaktör tiplerinde fertil malzeme olarak (CANDU, HTR v.s.) denenmiştir.

Kimyasal Özellikleri ; Toryum, uranyuma nazaran korozyona daha dayanıklıdır. Parlatılan bir toryum yüzeyi çok uzun süre parlaklığını muhafaza eder. Nemli atmosferde ve su içinde normal sıcaklıkta toryum korozyona dayanıklıdır. Sıvı metallerle karşı toryum alaşımlarının (sodyum, lityum ve ötektik potasyumlu alaşımları) korozyona dayanıklılığı hayli yüksektir. Toryum metali 100 °C 'deki sudan bile etkilenmez. Oda sıcaklığında dengelidir ve toz halinde iken kolaylıkla yanarak ThO₂'e dönüşür. Toryum metali uranyum, demir, nikel, altın, gümüş, platin, bakır, volfram, molibden, çinko, magnezyum, sodyum, kurşun, berilyum, silikon, krom, bizmut, sezyum, zirkonyum ve kobalt ile önemli alaşımlar oluşturur.

Kullanıldığı Yerler ; Lüks lambaların gömleklerinin yapımı, toryumun en önemli kullanım alanlarından biridir. Belirli özelliklere sahip toryum - nitrat çözeltisi, pamuk veya suni ipek elyafından yapılmış gömleklere emdirilir. Bu gömlek gaz alevi ile aydınlatıldığında parlak ışık yayar. Son zamanlarda metalurji, kimya ve seramik endüstrilerinde toryum alaşımları (özellikle magnezyum ve nikel alaşımları) kullanılmaktadır. Toryum oksit ergime sıcaklığının yüksek ve dengeli bir yapıya sahip olması sebebiyle özel erime işlemlerinde pota malzemesi olarak kullanılır. %0,8 - 1,2 Th içeren tungsten alaşımları elektrik ampullerinde kullanılarak verim ve ömür artışı sağlanmıştır. Toryum kaynak malzemesi olarak, vakum aletlerinde eser gazların temizlenmesinde Vakum Alaşımı (Getter) olarak ve saf toryum, optik cam yapımında kullanılır. Toryum amonyağın nitrik aside, karbonmonoksidin su gazına, kükürt dioksidin sülfite dönüştürülmesinde katalizör olarak kullanılır. Önümüzdeki yıllarda, tahminen yılda 450-620 ton ThO₂ nükleer olmayan alanda kullanılacağı tahmin edilmektedir.

2 - 1 DÜNYADA TORYUM YATAKLARI

Toryumun değişik mineralojik bileşikler halinde yer kabuğunda yaygın olarak bulunduğu bilinmektedir. Toryumun, doğada uranyum'dan 3-4 kat daha fazla olduğu tahmin edilmektedir. Asit karakterli granit kayalarda, bazik kayalara nazaran daha boldur. Genellikle, asit derinlik kayalarının pegmatitlerinde (büyük kristalli magma kayacı), pnömatojen ve hidrotermal oluşumlarda konsantre olmuştur [15].

Toryum Yataklarının Sınıflandırılması ; Radyoaktif mineral yatakları, mineralojik bileşimlerine, oluşumlarına, bulundukları jeolojik ortama göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmışlardır.

- * 1950 yılında Bain
- * 1954 yılında Everhart (kökenine ve içinde bulundukları yan kayaca göre)
- * 1955 yılında Raubault (oluşum, petrografik ve mineralojik özelliklerine göre)
- * 1958 yılında Heinrich
- * 1970 yılında Bowie ve Finch (yapısal karakterlerine göre)
- * 1974 yılında Ziegler (içinde bulunduğu yapısal ortam, içerdiği mineraller ve yapılarına göre metalo teknik bir sınıflama)

Yukarıdaki sınıflandırmalardan en basiti olan Heinrich sınıflandırmasına göre Toryum yatakları:

1- Radyoaktif Pegmatitler ; Granit ve siyenitlere bağlı pegmatitler. Örnek: Kanada'daki Bancroft ve Central Lake yatakları.

2- Karbonatit (Kalsiyum Karbonat ve Magnezyum Karbonat) ve Karbonatitlerle ilgili Yataklar ; Yeryüzünde pek yaygın değildir. Önemli mineral piroklordur. Örnek: İsveç, Norveç, Kenya ve Kanada da bulunmaktadır.

3- Pirometazomatik Yataklar ; Bu tip yataklar yeryüzünde nadirdir. Önemli mineral Torianittir. Allanit'te yaygın olarak bulunur. Örnek: Güney Madagaskar'daki Mandrare ve Avustralya'daki Mary Kathleen yatağı.

4- Hidrotermal Yataklar ; Hidrotermal kökenli yataklar genellikle damarlar halindedir. Bu yataklar oluşum sıcaklıklarına göre 3'e ayrılır.

a) Hipotermal (300 °C - 400 °C) Yataklar ; Önemli mineraller Davidit ve Branerit'tir. Kuvars en yaygın gang mineralidir. Örnek : Radium Hill (Güney Avustralya), Chateau Lambert yatağı (Fransa).

b) Mezotermal (200 °C - 300 °C) Yataklar ; Dünyada en yaygın yatak tipidir. Örnek: Shinkolobwe (Kongo), Steen Kamps Kroal (Güney Afrika) ve Eskişehir - Beylikahır (Türkiye).

c) Epitermal (50 °C - 200 °C) Yataklar ; Oldukça yaygın bir yatak tipidir. Önemli mineraller torit ve torogummit'tir. Feldispat, kuvars, siderit, barit, hematit karakteristik minerallerdir. Örnek : Wet Mountains Yatağı (ABD).

5) Sedimanter Kayaçlardaki Toryum Yatakları ; Toryum tuzlarının ve bileşiklerinin suda erime özelliğinin çok az veya hiç olmaması dolayısıyla çökelme oluşumuna sahip toryum yatakları yoktur. Ancak taşınmaya ve aşınmaya dayanıklı toryum mineralleri (özellikle monazit) plaser toryum yataklarını oluştururlar.

Plaser (Alüvyon) Toryum Yatakları ; En önemli minerali Monazittir (Az miktarda toryum içeren fosfat). Uranotorit, torogummit ve zirkon da vardır. Ayrıca ilmenit, kasiterit, rutil, manyetit, wolfamit, hematit ve platin plaser toryum yataklarında en çok rastlanan minerallerdir.

Dünya'daki Önemli Toryum Plaserleri

- * Travancore Plaseri (Hindistan) %3 monazit tenörlüdür. 1 milyon ton monazit rezervine sahiptir.
- * Seylan Plaseri (Seylan) %2 - 14 monazit tenörlüdür. Ancak bu tenör yer yer %22 hatta %47'ye kadar yükselir.
- * Florida, Idaho ve Kaliforniya (ABD)'da önemli toryum plaser yatakları vardır.
- * Brezilya Plaser Yatakları (Brezilya) egemen mineral monazittir. Tenörü %6 ThO₂'dir.

Dünya ThO₂ rezervleri ve dağılımı aşağıdaki tabloda verilmiştir. ThO₂ kaynakları (kg başına elde etme maliyeti) 2 fiyat sınıfında 75\$ (ABD doları) altında ve üzerinde olmak üzere verilmiştir.

Tablo 1 - 1 Dünya ThO₂ Rezervleri (1000 Ton) [15]

	<u>Görünür Rezervler</u>		<u>Muhtemel Rezervler</u>	
	<75\$/kg	>75\$/kg	<75\$/kg	>75\$/kg
Avustralya	21	0	0	0
Brezilya	68	0	1.200	0
Kanada	0	0	293	0
Danimarka	0	54	0	32
Mısır	15	0	280	0
Finlandiya	0	0	60	0
Hindistan	319	0	0	0
Norveç	132	0	132	0
Güney Afrika	11	0	0	0
Türkiye	0	330	0	440
ABD	108	14	261	17
Toplam	674	398	2.226	489

2 - 2 TÜRKİYEDE TORYUM YATAKLARI

Türkiye'de bilinen tek toryum yatağı Eskişehir - Beylikahır bölgesinde yer almaktadır. Ayrıca Malatya - Hekimhan ve Kayseri-Felahiye-Çukurda bölgelerinde de toryum varlığı bilinmektedir.

Eskişehir - Beylikahır Toryum Yatağı : Eskişehir ilinin, Sivrihisar ilçesine bağlı olan Kızılcaören, Karkın ve Okçu köyleri arasında yer alan bu yatak, kısaca " **Beylikahır Toryum Yatağı**" olarak bilinir. Yalınlı tren istasyonuna 11 km. mesafede bulunan bu yatak Ankara'nın 125 km batısında, Eskişehir üzerinden Ankara'yı Bursa'ya bağlayan karayolunun tahminen 20 km kuzeyinde bulunmaktadır.

Bu yatak 1970'li yıllarda MTA Enstitüsü tarafından bulunmuştur. Daha sonra bu yataktaki cevherin değerlendirilmesi için aynı Enstitü'de çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar cevher içerisindeki toryum mineralini tesbit etmek ve cevhere uygulanacak zenginleştirme yöntemini belirlemek amacını taşımakta idi.

Cevher yatağın ortalama tenörü %0.2 ThO₂ olup düşük tenörlü bir cevher olarak tanımlanmakta ise de bu cevher yatağı rezervinin büyüklüğü, içerisinde bulunan Nadir Toprak Elementleri, Barit ve Flourit bakımından da ayrı bir önem taşımaktadır. Yatağın özellikleri göz önünde bulundurularak MTA Enstitüsü tarafından açılan yarmalardan %0.65 ThO₂ tenörlü yaklaşık 1000 kg'lık temsili bir numune alınmış ve deneysel çalışmalar bu numune üzerinden yürütülmüştür [16].

Bu çalışmalar sonunda :

- 1) %1.2 ThO₂ tenörlü, %73.1 verimle bir ön konsantre elde edilmiştir.
- 2) %99'luk bir toryum çözünme verimi sağlanmıştır.
- 3) Toryum ön konsantresini çözündürme işlemlerinde kullanılan asit miktarında, orjinal cevhere göre %30-40 oranında bir avantaj sağlanmıştır.

Sonuç olarak nükleer enerji üretiminde geleceğin ümit ışığı gibi görünen toryumu içeren önemli yataklardan biri ülkemizdedir. Tenörünün düşük olmasına karşın, rezervinin büyüklüğü ve içerdiği mineraller açısından da değer taşıyan bu cevher yatağı uygun yöntemler ile değerlendirildiğinde ülkemiz için önemli nükleer olanaklar yaratabilecek potansiyelde görünmektedir.

BÖLÜM - 3

TORYUM REAKTÖRLERİNİN BUGÜNKÜ DURUMU

Hindistan'ın ısrarla adım adım devam eden nükleer programı içerisinde yapılan çalışmalar dışında, toryum kullanımı çeşitli ülkelerde son yirmi yıl boyunca dikkate değer bir gelişme göstermemiştir. Çeşitli ülkelerin özel programlarının kısa açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Bu ülkeler, geçmiş ve gelecekteki nükleer programlarının farklı oluşları ve gelecekle ilgili kendilerine özgü umutlarının farklılığı nedeniyle seçilmişler [17].

KANADA

1985 yılına kadar CANDU Toryum yakıt çevrimine bir ilgi vardı. Bu ilgi öncelikle mevcut uranyum rezervinin korunması olanağını sağladığı içindi. Çevrimin tüm yönleri, farklı yakıt üretimi yollarını da içeren bir şekilde incelendi. Küçük ölçekte yeniden işleme, radyasyon testleri ve fiziksel deneyler yapıldı.

Çözümlemez problemler meydana gelmemesine rağmen yeniden işleme ve aktif yakıt üretimi gerektiren bu çevrimin ekonomisi çekici bir görünüm vermedi. Tek geçişli veya ikili yakıt çevrimi denilen ve yeniden işleme ile aktif yakıt üretimi gerektirmeyen çevrimlerin az zenginleştirilmiş uranyum (SEU) çevrimleri ile aynı ekonomiye ve kaynak kullanımına sahip olduğu görüldü. Sonuçta SEU çevrimleri tercih edildi.

Kanada'da toryum yakıt çevriminin kısa vadede kullanılması pek olası değildir.

FRANSA

Toryumun yakıt olarak kullanımı ile ilgili CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) Araştırma Geliştirme çalışmaları altmışlı yıllarda başladı ve 1979 yılında bu çalışmalara son verildi.

Bu çalışmalar aşağıdaki konular etrafında yoğunlaştırıldı:

- Önemli teorik ve deneysel çalışmaların incelenip anlaşılması.
- HTR ve PWR'ler için fizibilite çalışmaları.

Aşağıdaki sonuçlar çıkarıldı:

- 1) ^{233}U eldesi için yeniden işleme konulmayan çevrimlerin pratik bir değeri yoktur. Ancak ^{233}U yakıt çubukları üretimine ilişkin temel zorluklar, (^{233}U 'ün alt ürünlerinden dolayı açığa çıkan yüksek enerjili γ aktivitesi) toryum çevriminin gerçekleşmesinde büyük bir engel olarak karşımıza çıkmaktadır.
- 2) PWR'leri - HTR'leri, hatta Basınçlı Ağır Su Reaktörlerinde (PHWR) toryum çevriminin kullanılması sonucu gerçekleştirebilecek ekonomik kazanımlar, gelişmiş Fransız üretken reaktör kavramlarının gerçekleştirilmesi ile de sağlanabilir. Bu nedenle toryum çevrimi yakın gelecek için düşünülmemektedir.

ALMANYA

Yüksek sıcaklık reaktörlerinde fertil malzeme olarak toryum kullanımı, daha az uranyum cevher ihtiyacı gerektirmektedir. Tek geçişli çevrimler ve kapalı çevrim için bu geçerlidir. Bu nedenle, HTR'lerin gelişimi toryum çevrimine dayandırılmıştır. Hem HTR reaktörleri hemde AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuch Reactor) ve HTTR'nin her biri toryum çevrimi altında çalıştırıldı, çevrimin tamamlanmasına ait gelişime devam edilerek kapalı çevrime dönüştürülmesine çalışıldı. Yüksek zenginlikteki uranyum (HEU) kullanımına karşı ortaya çıkan engel sebebiyle toryum çevrimini geliştirme çalışmaları 1966 yılında durduruldu. Böylece, HTR'lerin çevrimi düşük oranda zenginleştirilmiş uranyum çevrimine dönüştürüldü. LEU çevriminin fizibilite çalışması AVR'de gerçekleştirildi.

Araştırmalar gösteriyor ki, orta zenginlikteki uranyum (MEU) ile olası toryum çevrimleri HEU yakıtta olduğu gibi uranyum tasarrufu sağlayabilir.

Son yıllarda elektrik üretimi dışında ve endüstriyel alanda mevcut potansiyel için kullanılan pasif güvenlik özellikleri HTR ile ilgili gelişimi, modüler HTR (modül) tip reaktörlere doğru yöneltti. Modülde toryum çevrimini kullanmak avantajlar sağlayabilir, ancak bu mülahazalar modül reaktörün ticari gelişimine kadar askıya alınmıştır.

HİNDİSTAN

Toryum kullanımı Hindistan Nükleer Enerji programının, başlangıcından itibaren programın uzun vadeli hedefi olarak seçilmiştir. Hindistan'ın az uranyum kaynakları ve çok büyük toryum yataklarına sahip olması bu hedefin seçilmesinde başlıca etkindir. Toryum yakıt çevrimi ile ilgili AR-GE çalışmaları toryum çevriminin tüm konularını kapsayacak şekilde yürütüldü ve çalışmaların hacmi sürekli arttırıldı.

Kritiklik deneylerinin yapıldığı PURNIMA-2 tesisinde uranil - nitrat çözeltisi kullanıldı. Son zamanlarda diğer kritiklik deneyi ^{233}U / Al alaşımlı yakıtın kullanıldığı PURNIMA-3'te gerçekleştirildi. ^{233}U / Al alaşımlı yakıtın kullanıldığı, Kalpakkamdaki 30 kW'lık (KAMİNİ) reaktör için yapılan çalışmalar ileri düzeylere ulaşmıştır.

ThO_2 ve $(\text{Th-Pu})\text{O}_2$ yakıt demetlerinin radyasyon altında denenmesi, Toryum/uranyum yakıt için ileri yakıt üretimi ve yeniden işleme tekniklerinin geliştirilmesi yolunda çalışmalar yapıldı. Mevcut PWR sisteminde akının düzleştirilmesi ve tek geçişli yakıt çevriminin anlaşılması hedefine yönelik çalışmalar yapıldı.

Toryumun yakıt olarak kullanıldığı yeni bir reaktör dizaynı; Geliştirilmiş Ağır Su Reaktörü (AHWR) çalışmalarına başlandı. Toryum-uranyum yakıt çevrimindeki aktinit ürünlerin oluşma sorunu detaylı olarak incelendi.

Günümüzde, dünya üzerinde toryum yakıt çevrimi sadece Hindistan tarafından, Geliştirilmiş Ağır Su Reaktörlerinde deneme safhasında kullanılmaktadır. Kullanılan yakıtın performansına, oluşabilecek problemlere, çevrimin ömrünün ne olacağına ve dönüşüm verimine bakılmakta olup bu bilgiler Hindistan hükümeti tarafından gizli tutulmaktadır.

JAPONYA

Toryumun yakıt olarak kullanımı üzerine temel çalışma yapmak için 1980-1986 yılları arasında Eğitim, Kültür ve Bilim Bakanlığı tarafından büyük bir çalışma grubu oluşturuldu ve desteklendi.

Bu proje bittikten sonra 21.yüzyılın enerji kaynağı olarak, toryum ile ilgili temel çalışma yapmak için hükümet tarafından yeni bir grup oluşturuldu ve desteklendi.

Japonya'daki üniversitelerde bu grubun devam eden faaliyetleri şunlardır;

1. Toryum yakıtlı reaktörler için dizayn çalışmaları içeriği :

- a) Nükleer data hesaplanması. (Asıl sonuçlar yeni hesaplanan JENDL-3 Data arşivinde toplandı.)
- b) Toryum ve ilgili çekirdekler için nötron tesir kesiti ölçümleri
- c) Toryum/uranyum yüklü yakıt kalbi dizaynı; Basınçlı Su Reaktörlerinde (PWR), Dönüştürme Oranı Yüksek Hafif Su Reaktöründe (HCLWR), Yüksek Akı Araştırma Reaktöründe ve Ergimiş Tuz Reaktörlerinde (MSR) geçerli olacak şekilde ayrı ayrı incelenmiştir.
- d) Toryum-uranyum yakıtı ile yüklenmiş reaktörlerde aktinit ürün analizleri
- e) Toryum yüklü yakıt kalbinin kritiklik deneyleri ve analizleri
- f) MSR için toryum ve diğer örneklerin reaktivite ölçümleri
- g) Cidar malzemesi bulunan ve bulunmayan metalik toryum pilinde nötron transport deneyleri

2. Toryum yakıtlı reaktörler için, ilgili malzemeler ve toryum yakıtı ile ilgili çalışmalar.

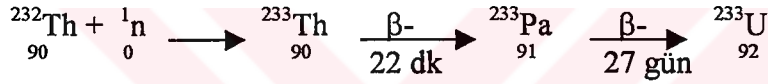
- a) Toryum-uranyum monokarbitleri ve toryum ile ilgili termokimyasal çalışma
- b) Toryum uranyum oksit karışımında oluşan elementlerin kimyasal difüzyonu
- c) Dondurma prosesi ile toz ($UO_2 - ThO_2$) hazırlanması
- d) Çok yüksek sıcaklıkta ($2000^{\circ}C$) Toryum-Uranyum oksit karışımı yakıt ile kaplanmış partiküllerden fisyon ürünü açığa çıkması
- e) Erimiş tuzlarda $LiF-BeF_2$ ve $NaBF_4-NaF$ oksitlerin çözümü
- f) Erimiş tuzlarda kütle transferi ile ilgili temel çalışma
- g) Nükleer yakıt çubukları ile ilgili yeni mikroskobik çalışmalar
- h) Toryumlu yakıt reprosesi temel incelemeleri.

İnşa halindeki Yüksek Sıcaklıklı Test Reaktörü çalıştığında (HTTR), toryum yakıt örnekleri ışınlanarak denenecektir.

BÖLÜM - 4

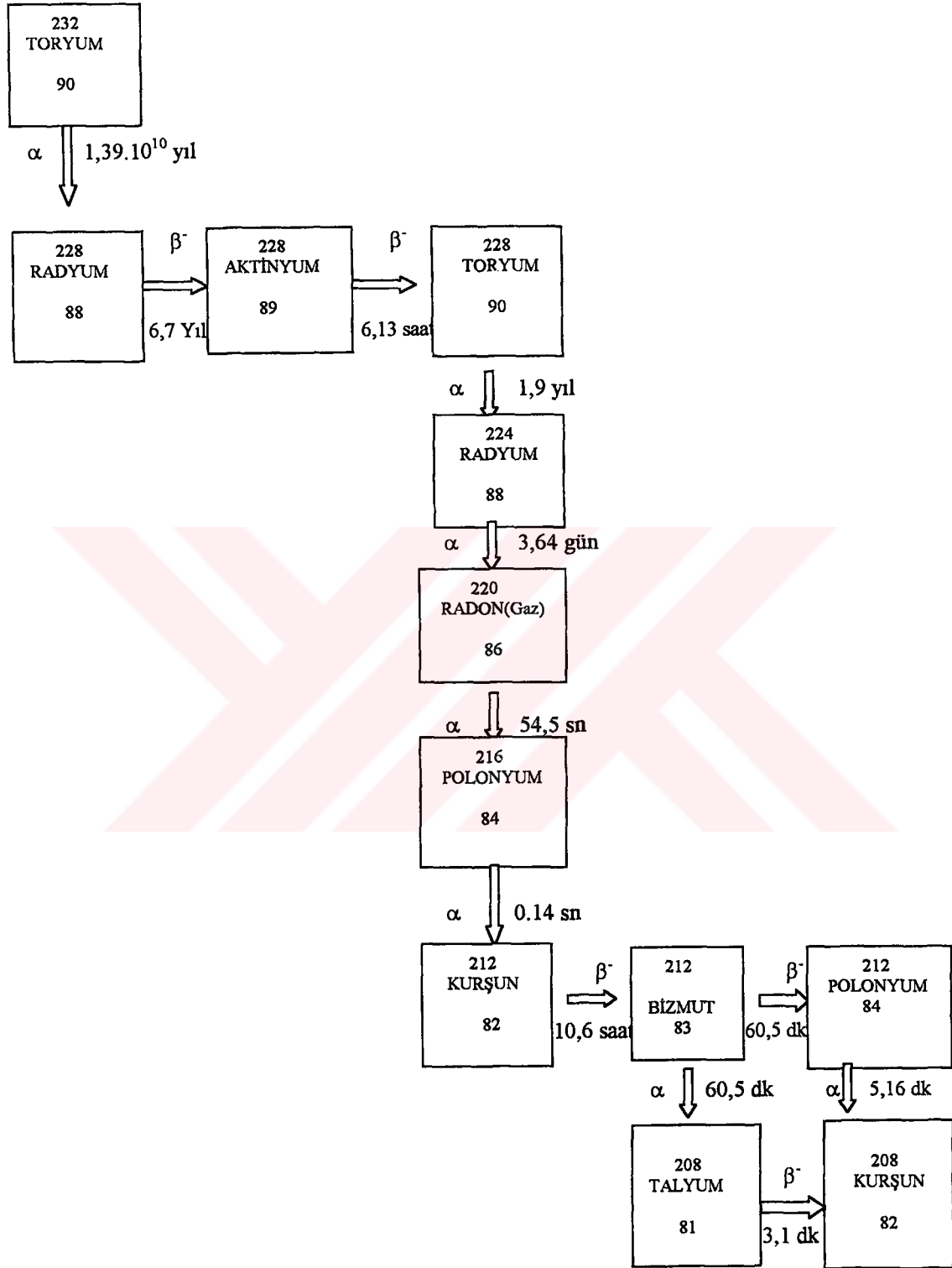
TORYUM REAKTÖRLERİ FİZİĞİ

Tabiatta bulunan ^{232}Th fisil (fisyon yapabilen) bir element değildir. Ancak termal nötronlarla ışınlandığında nükleer değişimler sonucu uzun yarıömürlü bir fisil izotop olan ^{233}U 'e dönüşür.



Bu reaksiyondan anlaşılacağı gibi, Toryum potansiyel bir nükleer yakıt kaynağıdır. Nükleer yakıt olarak toryumun dezavantajı, reaktör kalbine zenginleştirilmiş fisil madde (^{235}U veya ^{239}Pu) ilavesine ihtiyacı olmasıdır. Fakat fiziksel özellikleri gözönüne alınırsa, ^{232}Th , Şekil-4.1'de görüldüğü gibi, doğadaki toryum, doğal radyoaktivite zincirinin ilk elementidir. Bu zincir zaman içinde oluşan elementleri ile çevremizde bulunmaktadır. Son element olan ^{208}Pb kararlı bir çekirdektir.

Termal reaktörlerde kullanılabilecek en uygun fisil malzemenin ^{233}U olduğu bir gerçektir. Bu durum reaktör fiziği çalışmalarının ilk günlerinden beri bilinmektedir. Şekil-4.2 bunun doğruluğunu gözler önüne sermektedir. Şekilde $\eta - 1$ 'in nötron enerjisine bağlı değişimi ^{233}U ve ^{235}U için verilmiştir. Bilindiği gibi η yakıtta yutulan nötron başına üreyen fisyon nötronları sayısıdır. $\eta - 1$ ise yeni fisil malzeme üretecek fazladan (excess) nötronların bulunmasının bir ölçüsü olmaktadır. Burada, kaçınılmaz fazladan yutulmalar ve kaçaklar dikkate alınmamıştır. Şekil 4.2'de gösterildiği üzere termal bölgede ^{233}U %20 daha fazla fazladan nötrona sahiptir. Tablo 4.1'de fisyon yapabilen malzemelerin özellikleri, termal nötronlar için verilmiştir.



ŞEKİL 4.1 Doğadaki ^{232}Th Radyoaktif Zinciri [15]

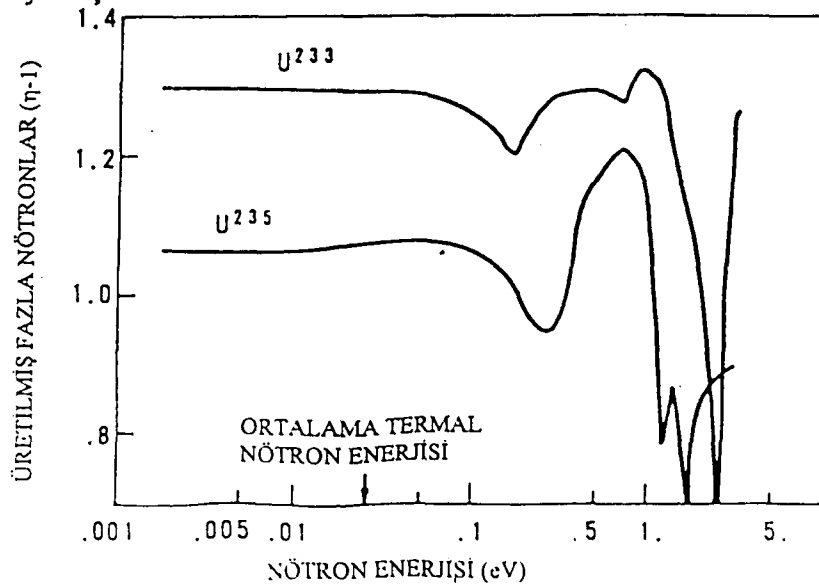
TABLO 4.1 Fisyon Yapabilen Malzemelerin Özellikleri * [18]

	σ_c	σ_f	ν	η
^{233}U	57	533	2.50	2.29
^{235}U	101	582	2.41	2.07
U (Doğal)	3.50	4.18	2.47	1.34
^{239}Pu	286	742	2.87	2.11

* Etkin kesitler barn cinsinden verilmiştir.

Pratik bir örnekle; yukarıda konu edilen ^{233}U 'ün ^{235}U 'e üstünlüğü şu şekilde de açıklanabilir [2] : Doğal uranyumlu ve $k_{et} = 1.040$ olan bir CANDU reaktöründe, yanma oranı (burn-up) 7500 MWd/t civarındadır. Aynı reaktör yakıtında ^{235}U çekirdeklerinin ^{233}U çekirdekleri ile değiştirildiğini farzedelim. Bu durumda yanma oranı değeri 13500 MWd/t değerine yükselir.

Bu üstün özelliğine rağmen, ^{233}U yazık ki doğada bulunmamaktadır. Ancak bol bulunan ^{232}Th 'den elde edilmektedir. Toryum, uranyumda olduğu gibi; termal reaktörler için iyi bir fisil malzeme olan ^{235}U ile fertil ^{238}U 'in karışımı benzeri bir malzeme değildir. Toryum ancak termal reaktörlerde fisil ^{233}U maddesini üretebilir. Bu nedenle Toryum kullanan reaktörler zenginleştirilmiş ^{235}U veya ^{239}Pu ilavesi olmadan çalışmaya başlamazlar.



Şekil – 4.2 ^{233}U ve ^{235}U için nötron enerjisi fonksiyonu olarak $\eta-1$ 'in değeri [2]

Toryumun termal nötron yutma etkin tesir kesiti ^{238}U 'in termal nötron yutma etkin tesir kesitinden yaklaşık 3 defa büyüktür. (^{238}U ve ^{232}Th için sırası ile 2.75 ve 7.45 barn). Dolayısı ile, eşdeğer güç üreten ve aynı yanma oranına sahip uranyumlu bir yakıt çevriminden daha fazla fisil malzemeye gereksinimi vardır. Fakat, sistem çalışmaya başladıktan sonra sarfedilen ^{235}U , toryumlu reaktörlerde daha azdır. Mahsurlu olan Th yanında uranyuma ihtiyaç olmasıdır. Her ilave reaktör ünitesi için zengin uranyuma gerek duyulacaktır. Sistemin dengeye ulaşması ile, üreyen ^{233}U bütün bu mahsurları ortadan kaldırabilir. Buna karşılık üreyen ^{233}U 'ün geri kazanılması için yeniden işlemenin istenmeyen bazı etkileri olacaktır. Bu konu ileride incelenecektir.

Burada, toryum kullanılması nedeni ile ortaya çıkan bazı farklılıklara dikkat çekmekle yetinilecektir.

Protaktinyum - 233 Etkisi; ^{233}Pa 'den ^{233}U üreme mekanizması Şekil 4-3'de verilmiştir. ^{233}Pa ara ürünü 27 günlük bir yarı ömürle ^{233}U 'e dönüşmekte ve bu nedenle iki önemli yan etkisi ortaya çıkmaktadır [2].

- 1) 27 günlük yarı ömür, nötron absorpsiyonu ile ^{233}Pa 'ten belirli bir miktar ^{234}U üremesine neden olur. ^{234}U termal reaktörler için fisil bir malzeme değildir. Dolayısıyla reaktör içinde fisil malzeme oluşumunu azaltan ve nötron absorpsiyonunu arttıran bir olaydır. (bak. Şekil 4-3) ^{233}U kaybı;

- i) ^{233}Pa bozunarak ^{233}U oluşması hızına ve
- ii) Yakıt içerisinde birikmiş olan ^{233}Pa 'ün nötron yutma hızına bağlıdır. Konu edilen bu etki akı seviyesi ve yakıtın radyasyona maruz kalma ile ilgili geçmişine bağlıdır.

Bilindiği gibi reaktör kalbi merkezinde akı en yüksektir. Dolayısı ile ^{233}U sarfiyatı fazla olur. Oluşması ise 27-günlük bir yarı ömürle ^{233}Pa 'ün bozunmasına bağlıdır. Ayrıca yüksek akı (n, γ) reaksiyonu ile ^{233}Pa 'ün nötron yutmasını artırır ve sonuçta nötron kaybı ve daha kısa bir yarı ömürle fisil bir madde olmayan ^{234}U 'ün oluşmasına neden olur. Bu olaylar reaktör içerisinde akının yüksek olduğu merkezde onu azaltan bir etki yapar. Bunun tersi etki akının düşük olduğu reaktör kalbi kenarlarına doğru artarak görülür. Böylece akı dağılımı sadece uranyum yakıt kullanan reaktörlere nazaran daha basık olur, daha düzleşmiştir. Diğer bir deyişle ortalama akının,

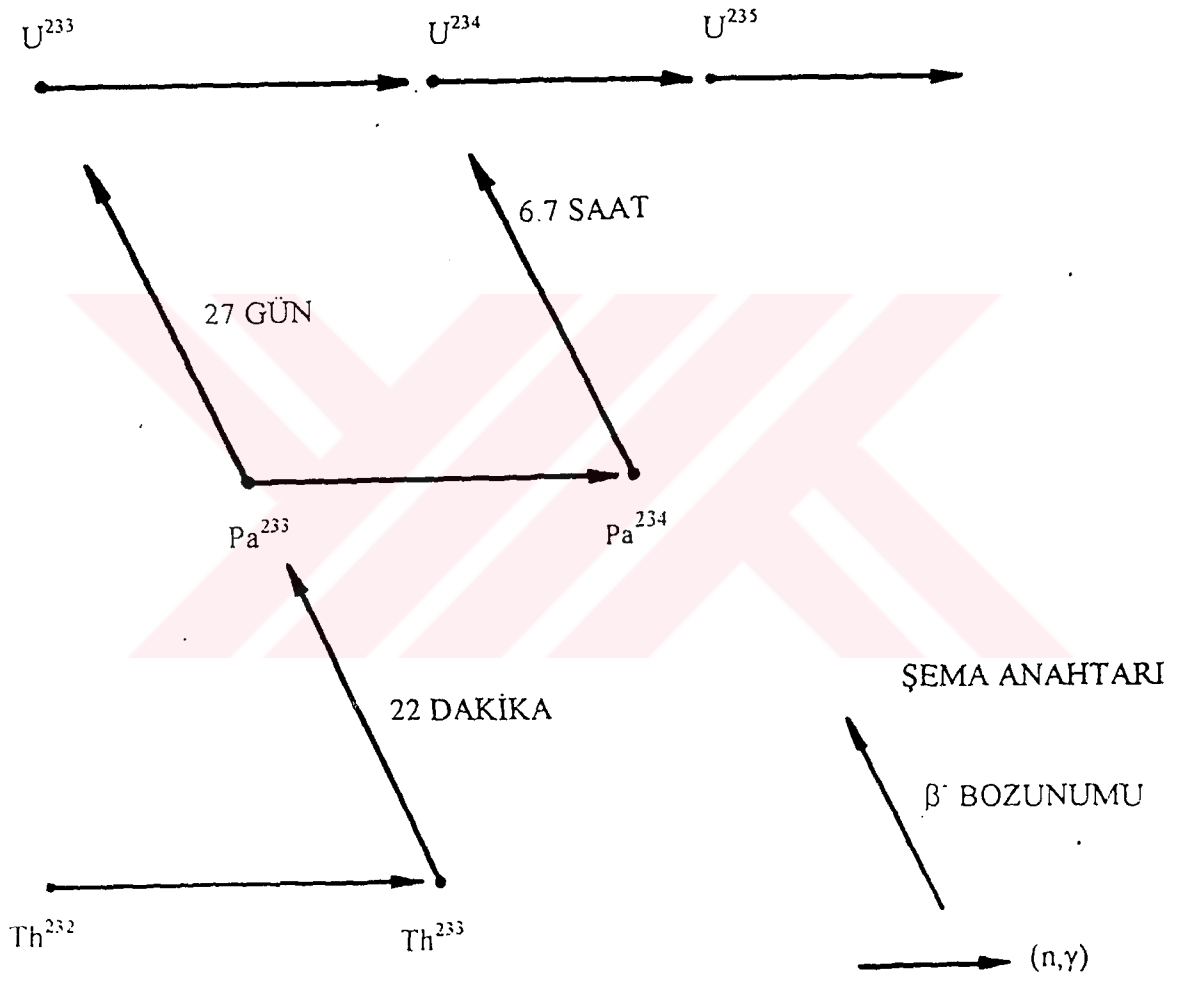
maksimum akıya oranı büyüktür. Bu oran “form çarpanı” adını alır ve karakteristik “kosinüs” dağılımında değeri 0.64 civarında iken toryumlu reaktörlerde 0.79 civarına kadar yükselebileceği hesaplanmaktadır. Sonuç olarak, yüksek akılı reaktörlerde daha fazla nötron yutularak daha az ^{233}U üreyecektir. Optimum değer aranırsa; CANDU örneğinde 3.3×10^{13} [n/cm²s] akı değeri için yanma oranı’nın 25000 [MWd/t] değerinde olduğu, aynı reaktör yapısında 6.6×10^{13} [n/cm²s] akı değeri için bu değer 8000 [MWd/t]’a düştüğü görülmektedir [2].

2) ^{233}Pa ’ün uzunca olan yarı ömrü reaktörün durdurulmasından sonra ^{233}U birikimine neden olarak reaktörün kritik olması tehlikesini yaratır. Bu nedenle kontrol çubukları tarafından yaratılan negatif reaktivite, reaktörü durduraktan öte bu etkiyi de giderecek kadar büyük olmalıdır. Benzer durum hızlı reaktörler için de söz konusudur, fakat ^{239}Pu üremesine neden olan ^{239}Np ’un yarı ömrü 2.3 gündür. ^{239}Np yoğunluğu, benzer durum karşılaştırılmasında ^{233}Pa ’ün 1/10’u kadardır. Bu nedenle toryumlu reaktörlerde büyük negatif reaktivite hazır durumda bulundurulmalıdır.

Xenon Zehirlenmesi: ^{233}U fisyonundan üreyen ^{135}I ’in verimi ^{235}U fisyonuna oranla oldukça azdır. Toryum reaktörlerinde, aynı güç seviyesi için, nötron akısı da yarı yarıya az olduğundan ^{135}Xe üretimi az olacaktır. Bu nedenle, reaktör durdurulduktan sonra tekrar başlama süresi ile orantılı, gerekli pozitif reaktivite daha azdır. Bu, reaktörün çalışması sırasında ^{135}Xe etkisini yenmek için kalbin içerisinde bulundurulmuş absorban miktarını azaltmak anlamına gelir. Diğer bir deyişle; ^{135}Xe etkisini yenmek için gereken pozitif reaktivite yarıyariya daha azdır. Toryum çubukları absorban olarak kullanılabileceğinden ^{233}U üretimine yardımcı olunabilir [4].

Fisyon Ürünleri Zehir Etkisi; Toryum yanmasının saptanmasında çoğalma katsayısı etkisi yüksektir. Yapılacak $\pm \%0.1$ oranındaki hata yanmada ± 500 MWd/t farklılığa neden olur. Dolayısı ile ölçümlerin ve hesapların hassas yapılması, gerekli kodların kullanılması önemlidir [4].

Nükleer Data: Toryumla ilgili datalar eski olup bazı hatalar sonucu farklı merkezlerde farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu eksikliğin giderilmesi gereklidir. [17].



Şekil-4.3 ^{233}U Oluşum Şeması [2]

BÖLÜM 5

CANDU REAKTÖRLERİNDE TEK GECİŞLİ ÇEVİRİMLER

5.1 GİRİŞ

^{232}Th 'den üretilmiş ^{233}U 'ün üstün fisil özelliklerinden dolayı, CANDU reaktörlerinde toryumun uzun zamandan beri yakıt olarak kullanılması amaçlanmıştır.

Doğadaki toryum fisil izotoplar içermez, toryum kullanımı ile ilgili eski çalışmalar homojen toryum-zenginleştirilmiş uranyum ve toryum – plutonyum karışımlarını içeren yakıtlar şeklinde ortaya konmuştur. Bu çevrimleri gerçekleştirmek için iki önemli engeli aşmak gerekmektedir.

- 1) ^{233}U elde etmek için yakıtın yeniden işlenmesi,
 - 2) Uzaktan kumandalı imalat yöntemleri ile radyoaktif ^{233}U içeren yeni yakıt imali.
- Fisil ve fertil malzemelerin ayrı ayrı radyasyona maruz bırakılarak, homojen yakıtın kullanımına gerek bırakmayan çalışma “Valubreeder” kavramını ortaya çıkarmıştır; böylece fisil ve fertil besleme hızının aynı olması gerekmez. Bu kavramda önemli oranda enerji reaktör içinde oluşan ^{233}U 'ün yanması sonucu sağlanabilir.

Çevrimin ekonomisi geri kazanılan ^{233}U 'e dayanır. Dolayısıyla yeniden işlenme altyapısı ve ^{233}U pazarı çevrim ekonomisinde önemli bir yere sahiptir.

Yakıt içerisinde oluşan ve yeniden işleme yapılmaksızın kalan ^{233}U 'ü dikkate almadan gerçekleştirilecek ve rekabet edebilen bir çevrimin olabilirliği düşünülmüştür. Böylece yeniden işleme adımlarından tamamiyle kurtulunmuş olur. Fakat, kullanılmış yakıtlar ileride yararlanılmak üzere depolanabilir. Bu çevrim Tek-Geçişli Çevrim olarak adlandırılmıştır.

Toryumun reaktörlerde doğrudan kullanılmamasının nedeni, doğal olarak varolan toryumun (%100 ^{232}Th) fisil izotopunun olmamasıdır. Böylece çevrimi başlatmak için; toryumun fisil bir maddeyle oluşturulan reaktörde nötronlarla ışınlaması gerekir. Bunu yapmanın en kolay yolu toryum ve plutonyum veya zenginleştirilmiş uranyumdan oluşan homojen bir karışımdan ya da her ikisinin birleşiminden oluşan bir yakıt hazırlamaktır. Daha önce CANDU reaktörlerinde toryum kullanılmasıyla ilgili yürütülen çalışmalarda odak nokta bu tür yakıtlardı. Fakat toryum çevrimi başlatmakta kullanılan bu yöntemin bazı zorlukları mevcuttur.

Plutonyum kullanılıyorsa bu plutonyumu üretmek için gerekli bütün endüstriyel yeniden işlemenin altyapısı, toryum çevrimi gerçekleştirilmeden önce hazır olmalıdır. Zenginleştirilmiş uranyum kullanılıyorsa (büyük olasılıkla zenginleştirilmiş madde satın alınacaktır) önceden yeniden işleme alt yapısı gerekmez. Bu durumda uranyum; ^{235}U bakımından yüksek zenginliktedir ki bu tercih edilmeyen bir durumdur ya da orta veya düşük zenginliktedir ($<20\%^{235}\text{U}$). Her iki durumda, bu tür bir yakıt oldukça pahalı olur ve oluşturulan ^{233}U hemen yeniden işlenmedikçe ve yeniden kullanılmadıkça bu çevrimin ekonomik olacağından söz edilemez. Dolayısı ile, toryum yeniden işleme alt yapısının, uranyum zenginleştirme tesisi ile veya onsuз oluşturulması gerekir. Ayrıca, yakıt elemanında ^{238}U 'in varlığı ^{233}U elde edilmesini zorlaştıran bir unsurdur.

İkinci olarak; ^{233}U içeren kullanılmış yakıt, bir γ -aktif çekirdek ailesinin öncüsü olan ^{232}U elementini de az miktarda içerir (10-50 ppm). Bu nedenle, ^{233}U içeren bir yakıtın yeniden üretiminde uzaktan kontrol gerekli olmaktadır. Bu husus toryumun ekonomik kullanımı için gerekli alt yapının daha da karmaşık olmasına neden olur.

Son olarak şu söylenebilir: ^{233}U plutonyuma göre termal reaktör spektrumunda daha üstün nükleer özelliklere sahip olduğundan, üretilmesi yakıt çevrimi tasarımının doğrudan hedefi olmalıdır. ^{233}U üretmede yardımcı olarak Plutonyum kullanılması hiç de pratik ve kullanışlı bir yöntem değildir. Örneğin, bir CANDU reaktöründe doğal uranyumdan üretilen plutonyumun kullanılmış yakıt içerisindeki miktarı, tek geçişli yakıt çevrimi ile çalışan aynı reaktör yakıt elemanında oluşan ^{233}U 'den beş defa azdır. Dolayısı ile ^{233}U 'ün doğrudan elde edilmesi sonuçta, elde edilen birim fisil madde başına yapılan yeniden işleme masraflarını çok azaltabilir.

Bu durumda ana sorun, ^{233}U elde etmenin ekonomik bir yolunu bulmaktır. Bunun anlamı; yeniden işleme ve uzaktan kontrollü yakıt üretimi endüstri altyapısının önceden var olması koşulunu ve dolayısı ile plütonyum elde etme işlemini ortadan kaldırmaktır. Seçilen çevrim, elde edilen ^{233}U 'ün kullanılmama olasılığını dikkate alarak günümüz yakıt çevrimleriyle rekabet edebilir olmalıdır.

Bu, bizi zorunlu olarak zenginleştirilmiş uranyum ve toryumdan oluşan yakıt çevrimini, böyle bir çevrimde yakıt masraflarının, doğal uranyum yakıt çevrim masraflarıyla eşdeğerde olması şartıyla değerlendirmeye götürür. Dolayısı ile kullanılmış yakıtta üremiş olan ^{233}U 'ün herhangi bir ekonomik yararı dikkate alınmaz. Bu ikinci nokta tezin ana noktasıdır, ^{233}U 'ün sonunda kullanılması talep edilmeden, ^{233}U 'ü üretmenin artık ekonomik açıdan doğruluğu savunulabilir. Eğer gelecekteki koşullar, gelişmiş yakıt kullanımını mümkün kılarsa, ^{233}U önceki kullanılmış yakıt içinde var olacaktır. Eğer gelişmiş yakıt çevrimleri hiçbir zaman gerçekleştirilemezse bundan zarar görülmeyecektir.

Amacımız, yukarıda verilen kriterlere uyan tek geçişli toryum yakıt çevrimini ana hatlarıyla ortaya koymaktır.

THROWAWAY Çevrimleri : Bu çevrimlerde toryum kullanımı ekonomik açıdan diğer çevrimlere göre göreceli olarak kârlı olup, üreyen ^{233}U dikkate alınmaksızın çevrimin uygulanmasına karar verilebilir.

STOWAWAY Çevrimleri : Bu çevrimlerde, toryumun kullanımı, öteki çevrimlere oranla aynı ekonomik değere sahiptir. ^{233}U 'ün üretilmesi bu uygulamayı avantajlı kılar. ^{233}U , gerekli durumlarda yeniden kullanım için depolanır, fakat bunun yapılması konusunda ekonomik bir zorunluluk yoktur.

LAYAWAY Çevrimleri: Bu çevrimler, diğer çevrimlere oranla biraz daha pahalıya gelebilir. Fakat bu zarar yeterince küçük olup üretilen ^{233}U kullanılmaz ise de önemli görülmez. Üretilen malzemenin ileride kullanılması ise büyük kâr sağlayabilir.

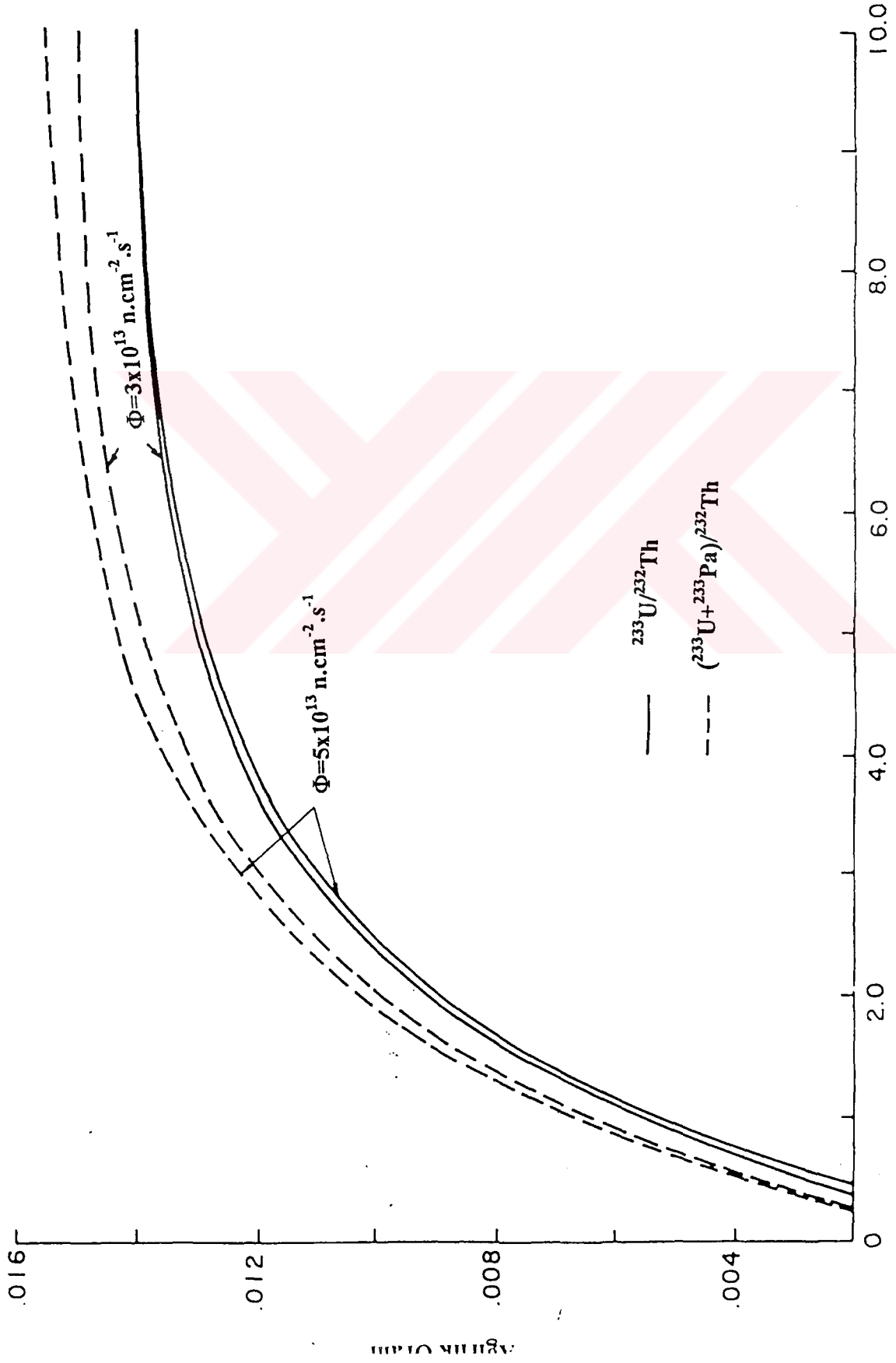
Ayrıca “ekonomik maliyet” kavramını parasal bir ölçü ve “kaynak maliyeti” kavramını kaynak kullanım birimi olarak ayırmak gereklidir. Birinci kavram enerji üretmek için gereken parasal yükü belirtmekte kullanılır ve mills/(kW.h) olarak ölçülür. Öteki kavram göreceli kaynak kullanım ölçüsüdür ve belli bir miktarda enerji üretmek için gereken doğal uranyum miktarı olarak verilir. Geçerli birimler; “kaynak maliyeti” = 1/Yanma (Yanma (Burn up) = MW.d/t NU).

“Kaynak maliyeti”ni arttırarak “ekonomik maliyet” en aza indirmek mümkün olsa da, böyle bir kombinasyona dayandırılan gelişmiş yakıt çevirimi kullanımı, gelişmiş yakıt çevriminin ana hedeflerinden birini ihlal eder: “kaynak maliyeti”ni, dolayısı ile kaynak sarfını en aza indirmek. Ters durumda, “kaynak maliyeti”ni kısan fakat “ekonomik maliyeti” arttıran gelişmiş yakıt çevirimini kullanmak, enerji fiyatını arttıracığı için toplumun bütün fertlerini ilgilendiren bir sorun yaratır. Gelişmiş bir yakıt çevriminin kullanılmasında, ideal bir çözüm, ne “ekonomik maliyet”de ne de “kaynak maliyeti”nde bir artışın olmamasıdır. Tek geçişli çevrimler üzerinde odaklanarak CANDU teknolojisi ve varolan endüstriyel altyapı dahilinde böyle kombinasyonların kurulup kurulamayacağına saptanmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır [6].

Burada incelenen çalışmada, “maliyet” kelimesi, ayrıca bir niteleme olmadığında hem “ekonomik maliyet” hem de “kaynak maliyeti” anlamında kullanılacaktır. “kâr” kelimesi de “azaltılmış maliyet” ve “harcama” kelimesi, ayrıca nitelenmedikçe hem “ekonomik” hem de “kaynak” harcamaları anlamında kullanılacaktır.

5 – 2 FİZİKSEL PRENSİPLER

Daha önce anlatıldığı gibi, amaç; toryum kullanılmasının, düşünülen yakıt çevrimde diğer seçeneklere göre daha kârlı, biraz daha pahalı ya da diğerleriyle aynı ekonomik maliyette olduğunu göstermektir. Fiziksel prensip, ^{232}Th ’den ^{233}U oluşturulduğunda, ^{233}U ’ün ^{232}Th ’ye oranla (Şekil 5-1) ağırlıkça %1.3’lük oranda bir dinamik denge düzeyine ulaşması gözlemine dayanır. Bir denge düzeyinin varlığı; nötron yutulması yoluyla ^{232}Th ’den üreyen ^{233}U ’ün aynı yolla yok edildiği anlamını taşır ki, ^{233}U ’ün nötron yutması fisyon ve nötron yakalanması demektir (fission and capture).



ŞEKİL 5.1 Toryum Işınlanmasına Karşılık ^{233}U Üremesi [6]

^{233}U 'ün özelliklerinden dolayı ve reaktördeki nötron spektrumuna da bağlı olarak, ^{233}U 'ün büyük bölümünün "yok edilmesi", yakalama işleminden çok fisyon işleminden kaynaklanır. Dolayısı ile bu fisyon başına açığa çıkan nötronlar ^{233}U elde etme aşamasında kullanılan nötronlar için kısmi bir dengeleme olmakta, ayrıca fisyon olayı ısı enerjisi vermektedir.

^{233}U üretmek için sarfedilen nötronların tümü ile geri kazanılması mümkün olmaz. Bunun neden böyle olduğunu anlamak için toplam ışınlamanın fonksiyonu olarak toryum içeren reaktör kalbi için tanımlanmış çoğalma katsayısını yazalım (I üst indisi integral simgesidir).

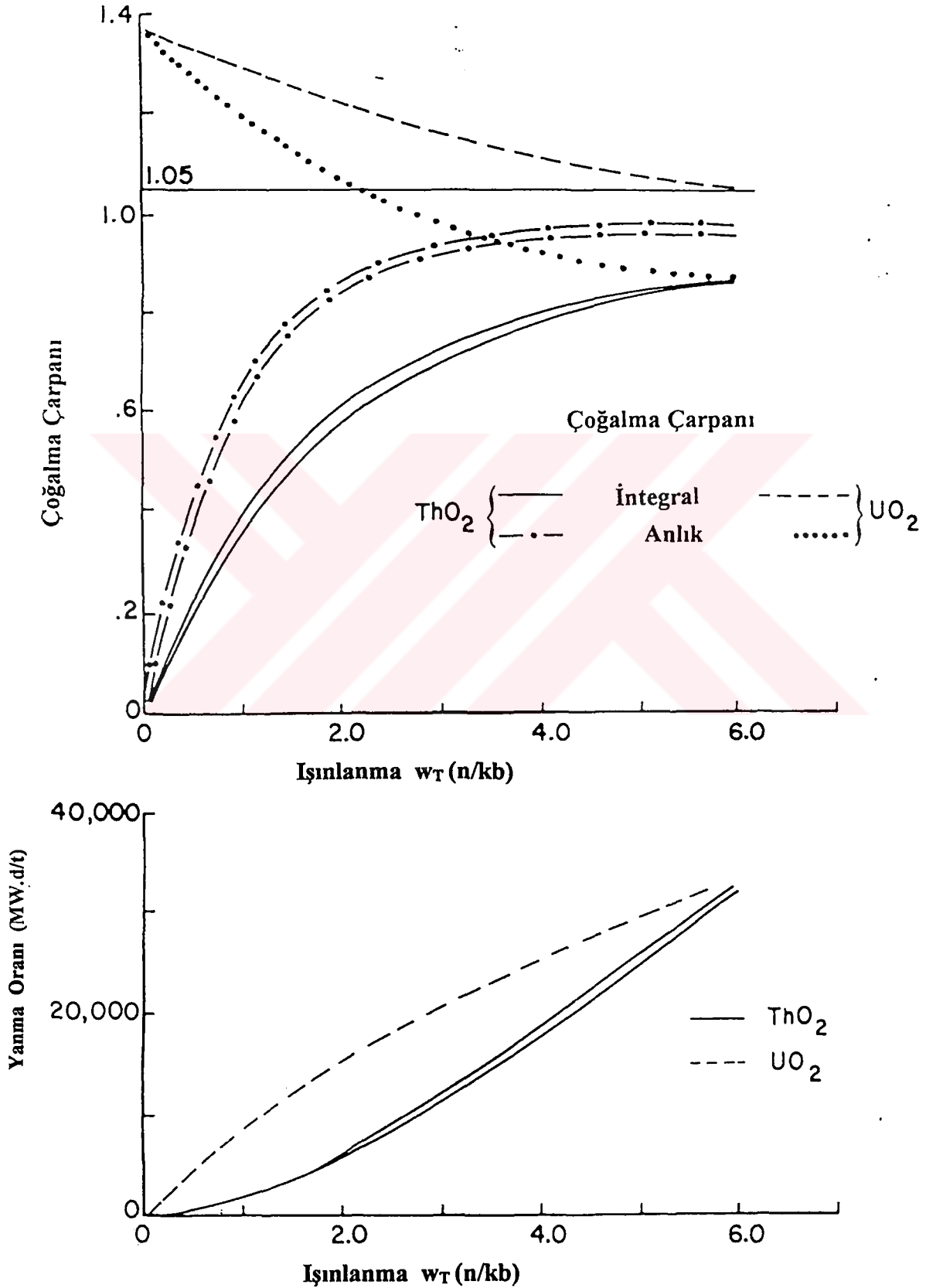
$$k^I_T(w_T) = \int_0^{w_T} Y_T(w') dw' / \int_0^{w_T} A_T(w') dw' \quad (5-1)$$

Burada, $Y_T(w)$, ^{233}U toryum içeren hücrenin w , ışınlama fonksiyonu olarak nötron kazancıdır ve $A_T(w)$, aynı maddede, (ışınlanmaya bağımlı) toplam nötron absorpsiyonudur. Bu oran tüm ışınlama süresince ve toryum ışınlanmasının integral (w_T) fonksiyonu olarak meydana gelen nötron üretim fazlasını (>1 ise) veya eksikliğini (<1 ise), vermektedir. Ayrıca $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ değişim zincirinde Pa'un bulunması, söz konusu oranın reaktördeki Φ nötron akısına bağımlı olması sonucunu doğurur. Bu çalışmada verilen sonuçlar, CANDU tipi bir reaktörün 37 eleman bulunan yakıt demeti için yapılmıştır [6].

Şekil 5-2'de, $k^I_T(w_T)$ ve ani değeri toryum yakıtının genellikle ışınladığı iki akı seviyesinde toryum ışınlanmasının fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Ayrıca, bu şekilde, karşılaştırma amacıyla, %1.8 oranında ^{235}U bakımından zenginleştirilmiş uranyum için benzer büyüklük olan $k_u^I(w_u)$ 'nin ışınlama ile değişimi de verilmiştir.

İki önemli özellik dikkati çekmektedir.

- 1) $k^I_T(w_T)$ 'nin değeri hiçbir zaman 1.0'ı geçmez, bundan dolayı ^{232}Th tarafından yutulan nötronların, tamamen geri kazanılması söz konusu değildir. Bunun nedeni, ^{233}U üremesine ve fisyon yapmasına rağmen, biriken fisyon ürünlerinin zehir etkisi nedeniyle yutulan nötronlardır.



ŞEKİL 5.2 İntegral ve Anlık Çoğalma Çarpanı ile Yanmanın, ThO_2 ve % 1.8 Zenginleştirilmiş UO_2 Yakıt Demetleri için değişimi Görülmektedir. Toryum Demetleri İçin Üst Eğri ile Alt Eğri Sırası ile $3.ve 5 \times 10^{13}$ Nötron Akısına Karşılıktır. [$n/cm^2.s$] [6]

2) 20.000 MW.d/t'dan büyük yanma değerleri oranları için (burn-up) k_T^I değerinin, ^{233}U 'ün toryum yakıt çubukları içindeki denge değerine yaklaşması nedeni ile 0.8'e ulaştığı görülmektedir. Buradan, üreyen yakıtın kritik kütle sağlamamakla birlikte aktif katkısı olduğu anlaşılmaktadır. Tersine, kalpte kalma süresinin sonuna doğru, zenginleştirilmiş uranyum demeti, fisil madde bakımından o kadar fakirleşmiştir ki, azalan çoğalma çarpanı, dolayısı ile sağladığı reaktivite bakımından toryum demeti onu geride bırakabilir.

Tek geçişli toryum çevrimlerinin dayandığı ana prensip, bu iki gözlem üzerine oturtulmuştur.

Amaç, özellikle, zenginleştirilmiş uranyumdaki yanmayı biraz azaltarak integral $k_U^I(w_U)$ değerinin küçük bir marjla 1.05'i aşmasını sağlamaktır. (Pratikte 1.05 değeri; sızıntıları, kontrol ve ölçüm cihazlarının neden olduğu kayıpları karşılayan ve doğal uranyumlu 37 elemanlı CANDU reaktöründe 7630 MW.d/t yanma değeri oranını sağlayan değerdir.) Zenginleştirilmiş uranyumdaki fazla nötronlar toryumu ışınlamada kullanılır ve ^{233}U üretir. Reaktör içinde yakılarak enerji ve nötron veren ^{233}U , üretilmesi için yapılan nötron yatırımını kısmen geri ödemektedir. Genel olarak, toryum ışınlanmasının daha erken safhalarındaki nötron kayıplarının karşılanması için, toryumun 20.000 MW.d/t'dan daha yüksek yanma değerine kadar kullanılması gerektiğine hükmedilebilir. Çünkü, Şekil 5-2'ye göre toryumun yüksek yanma değerinde kullanılması, toryum demetlerinde ulaşılan yüksek çoğalma katsayısı nedeni ile bu elemandan elde edilen enerji oranını arttıracaktır.

Dolayısı ile, zenginleştirilmiş uranyum ve toryum yakıtlı reaktörlerde üreyen ^{233}U 'ün reaktör içerisinde yakılmasının sağladığı olanakların dengelenerek yarar sağlaması, yeni dizayn parametresinin hesaba katılmasını gerektirmiştir. Bu parametre toryumla uranyum arasındaki besleme oranı "y"dir. Yani, yakıt çevrimi, toryumun reaktöre eklenme miktarı ile uranyumun eklenme miktarı arasındaki oranda esneklik payına sahip olmalı, toryumun, uranyumdakinden farklı ışınlanmasına olanak sağlanmalıdır. Bu, öteki çalışmalarda toryum ve uranyumun homojen bir karışım olarak hazırlanmasının tersine, bu ikisinin fiziksel olarak ayrılması ve farklı demetlerde ışınlanmaları gerektiği anlamına gelmektedir. Bundan heterojen yüklemekten "ikili yakıt" (dual-fuel) diye söz edeceğiz.

İkili yakıtın işin içine girmesi bizi bir dizi sonuca götürür.

TC. YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İlki, bazı ekonomik koşullar altında, böyle ikili yakıt çevirimlerini kullanmaya başlamanın haklılığını gösteren optimum y değerlerinin bulunmasıdır. Bu doğal olarak bu konudaki çalışmaların temelini oluşturmaktadır.

İkincisi, y oranı seçmedeki esnekliktir (gün başına yüklenen toryum demetleri sayısı) / (gün başına yüklenen uranyum demetleri sayısı) şeklinde tanımlanır. Alternatif olarak, yükleme oranı N_T / N_U , (toryum demetlerinin sayısı) / (aynı süre ışınlamaya maruz kalacak uranyum demetlerinin sayısı), y 'nin seçilmesiyle belirir. y seçimi tek başına, "maliyet" kaygıları göz önünde bulundurularak yapılabilir. Bundan sonraki bölümlerde y 'nin, daha önce tanımlanan üç farklı yakıt çevrimi kategorisini en iyi şekilde optimize etmek için nasıl seçilebileceğini göreceğiz. İkili yakıtın bu esnekliğinden dolayı, reaktör işletimi ekonomik değişikliklere daha iyi uyum sağlayabilir. Örneğin, zenginleştirilmiş uranyumun fiyatı, eğer yeni bir y değerini gerektirir ise, homojen yakıt kullanan yakıt çevrimlerinde meydana gelen yeniden yakıt tasarımı problemleriyle karşılaşmadan sadece yakıtların oranını değiştirmek yeterli olabilir.

Üçüncüsü, ikili yakıtın kullanılmaya başlanmasıyla, reaktör yakıt yönetiminde yeni bir teknik değişken işin içine giriyor. İki çeşit yakıtın kullanılması, CANDU reaktörlerinde düşük oranda zenginleştirilmiş (LEU) yakıtın kullanılması konusunda olası teknik gelişmelerin kapısını aralıyor. Teknik olarak, LEU'nun kullanılması, ısı transferi ve kritik güç oranı problemleri tarafından engellenmiştir. Yakıt yönetimine getirilen yeni değişken, bu tür güçlüklerin üstesinden gelinmesini sağlayabilir. Öte yandan, işleri kötüleştirebilir. Bu konuya sonraki bir bölümde değinilecektir.

Fizik açısından, ikili yakıt yoluyla üretilen uranyum, homojen demetlerin ışınlamaları sonucu üretilenden daha üstündür; çünkü ^{233}U 'ün özellikleri homojen yakıtın fisil bileşeni olarak zenginleştirilmiş uranyumun kullanılması durumunda olacağı gibi, ^{238}U 'in varlığından dolayı bozulmaz. İleride gelişmiş bir yakıt çeviriminde kullanılırsa ^{233}U 'ün değerini düşürmez, çünkü ^{238}U parazit bir yutucu gibi davranmaktadır.

5.3 KAYNAK MALİYETİ

Bu bölümde, ikili yakıt çevriminin “kaynak maliyetleri” nin diğer rakip çevrimlerinki ile karşılaştırılması yapılmaktadır. (rakip çevrimler; doğal uranyumlu CANDU-PHWR çeşitleri ile LEU yakıt kullanan CANDU reaktörleri için Stowaway ve Throwaway çevrim olanaklarıdır.) Daha sonra yapılması gereken, ekonomik maliyet yönünden de ikili çevrimin avantajlı olup olmadığını araştırılmasıdır.

MW.d/t olarak birleşik yanma B_C , yakıt bileşenlerinin her birinin yanması (B_U (MW.d/t uranyum) ve B_T (MW.d/t toryum))cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır :

$$B_C(w_U, w_T, y) = B_U(w_U) + 0.92 y B_T(w_T) \quad (5-2)$$

B_C , daha önce tanımlanan bağıl besleme oranı y ve uranyum (toryum) yakıtının w_U ve w_T ışınlamalarının açık bir fonksiyonudur. Toryumun, uranyuma göre düşük yoğunluğu 0.92 faktörü hesaba ile katılır. Aynı şekilde, yakıt çevrimi için integral birleşik bir yaşam süresi çoğalma çarpanı;

$$k_C^I(w_U, w_T, y) = \frac{\int_0^{w_U} Y_U(w)dw + y \int_0^{w_T} Y_T(w)dw}{\int_0^{w_U} A_U(w)dw + y \int_0^{w_T} A_T(w)dw} \quad (5-3)$$

olarak tanımlanır. U ve T , sırayla uranyum ve toryum yakıtlarını temsil ederken, Y nötron kazancı ve A nötronların yutulması yerine kullanılır. Daha önce belirtilen değişkenlere olan açık bağıllığı yanında, k_C ve B_C 'nin, toryum yakıtının ışınladığı Φ akısı ve uranyum yakıtının zenginleştirme düzeyi olan R 'ye bağıllığı söz konusudur. Üç tür olduğu belirtilmiş olan ikili yakıt çevrimleri ile tutarlı olmak üzere w_U , w_T , y ve R 'nin optimum değerine ulaşmak bu çalışmaların hedefidir. Hesaplamalar, radyasyona maruz kalan toryumun reaktörde ışınlanmasında ortalama akı düzeyinin 3×10^{13} ile 5×10^{13} n.cm⁻².s⁻¹ arasında olması gerektiğini göstermiştir [6].

Bu iki değer, hesaplamalarda, alt ve üst sınırlar olarak kullanılmıştır. Akı seviyesinin tam olarak tespiti, çevrimin gerçek durumuna ait ayrıntılı yakıt yönetim hesaplamalarına bağlı olacaktır.

Şekil 5.3’de bir örnek hesabın sonucu verilmiştir [6]. Akı değeri $\Phi = 5 \times 10^{13}$ [n.cm⁻².s⁻¹], $y=0.15$, $w_T=9.9$ n/kb $R = \%1.81$ alınmıştır. Bu koşullarla yapılan hesaplarda w_U ’nun fonksiyonu olarak k_C^I değeri bulunmuştur. $w_U \approx 2$ n/kb için k_C^I maksimum değeri olan 1.08’e ulaşmış ve ışınlamanın devam etmesi durumunda değerinde düşme başlamıştır. 1.05 değerine $w_U = 4.05$ n/kb için ulaşılmıştır.

$k_C^I = 1.05$ önceki açıklamalardan görüleceği gibi reaktör kalbi için yaşam boyu integral çoğalma katsayısı için uygun değer olarak seçilmiştir. Dolayısı ile ışınlamanın daha uzun sürerek bu değerin düşmesi uygun değildir. Benzer şekilde $w_U = 4.05$ n/kb’den daha alçak değerlerde ışınlamanın, diğer bir deyişle kalbin ömrünün erken sona ermesi yanmanın düşük değerlerde kalmasına neden olur. Bu husus evvelce açıklanmıştır. Konu edilen elverişli nokta şekil 5.3’de X ile gösterilmiştir. Bu nokta uygulanabilir bir ikili yakıt sisteminin varlığını göstermektedir. X noktası için:

$$B_U (w_U=4.05)=25.000 \text{ MW.d/t U}, \quad B_T (w_T=9.9)=63.700 \text{ MW.d/t Th ve}$$

$$B_C = 34.000 \text{ MW.d/t U}$$

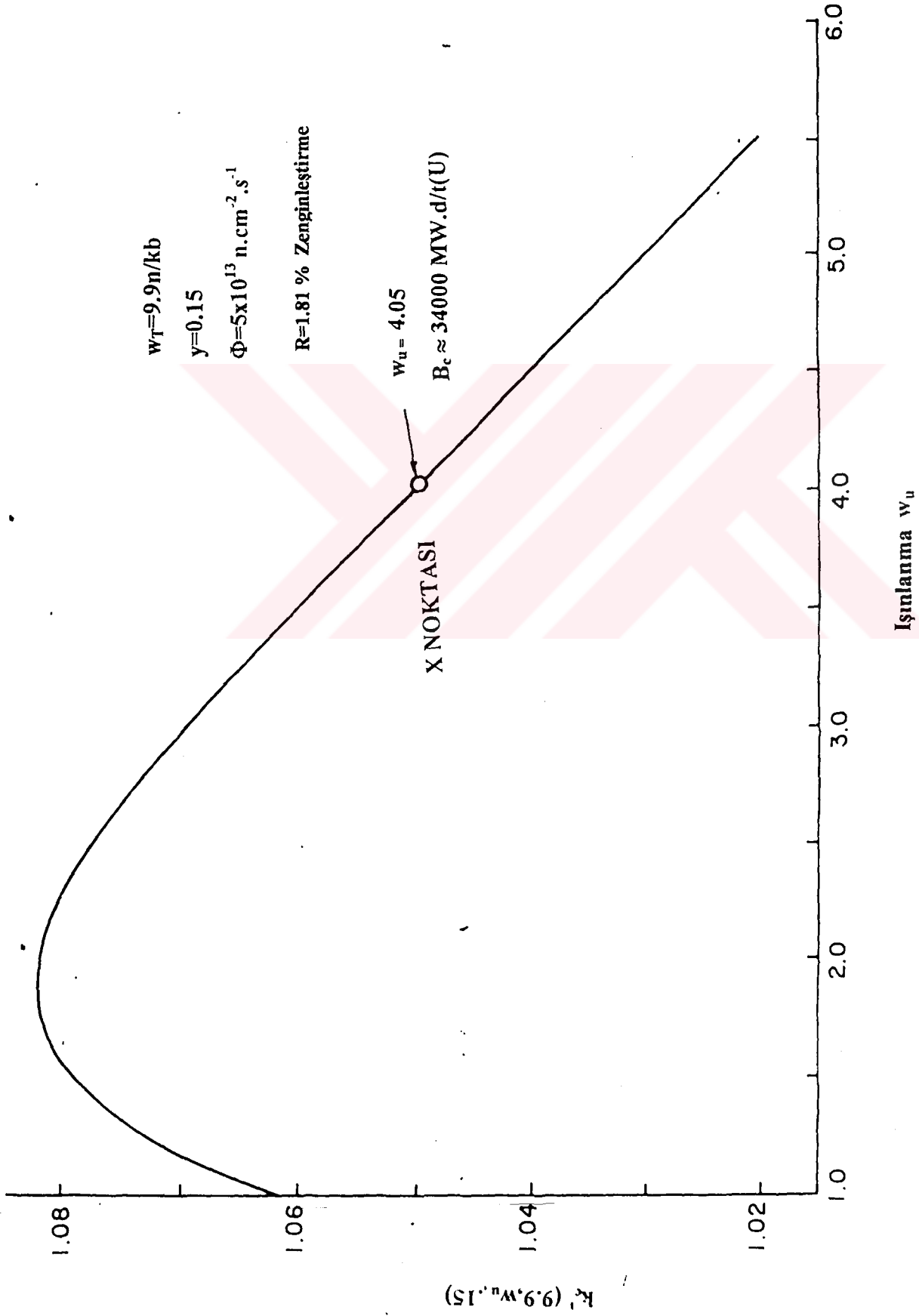
yanma değerleri geçerlidir.

Yanmaları, zenginleştirme oranından bağımsız olarak karşılaştırmak için, %1.81 zenginleştirilmiş uranyumdan hareketle,

$$B_C = 10.900 \text{ MW.d/t (NU)}$$

bulunur. Dolayısı ile w_T , w_y , y , Φ ve R arasındaki bu belirli kombinasyon için, eldeki belirli miktar uranyumu kullanarak, CANDU doğal uranyum tek geçişli çevrimine oranla ($10900/7630=1.43$) %43 daha fazla enerji elde etmek ve “kaynak maliyeti”ni azaltmak mümkündür.

NOT : Işınlama birimi n/kb (nötron/kilobarn) ; $w = \Phi.t$ olarak tanımlanmış olup tüm zaman boyunca meydana gelen nötron aktivasyonudur.

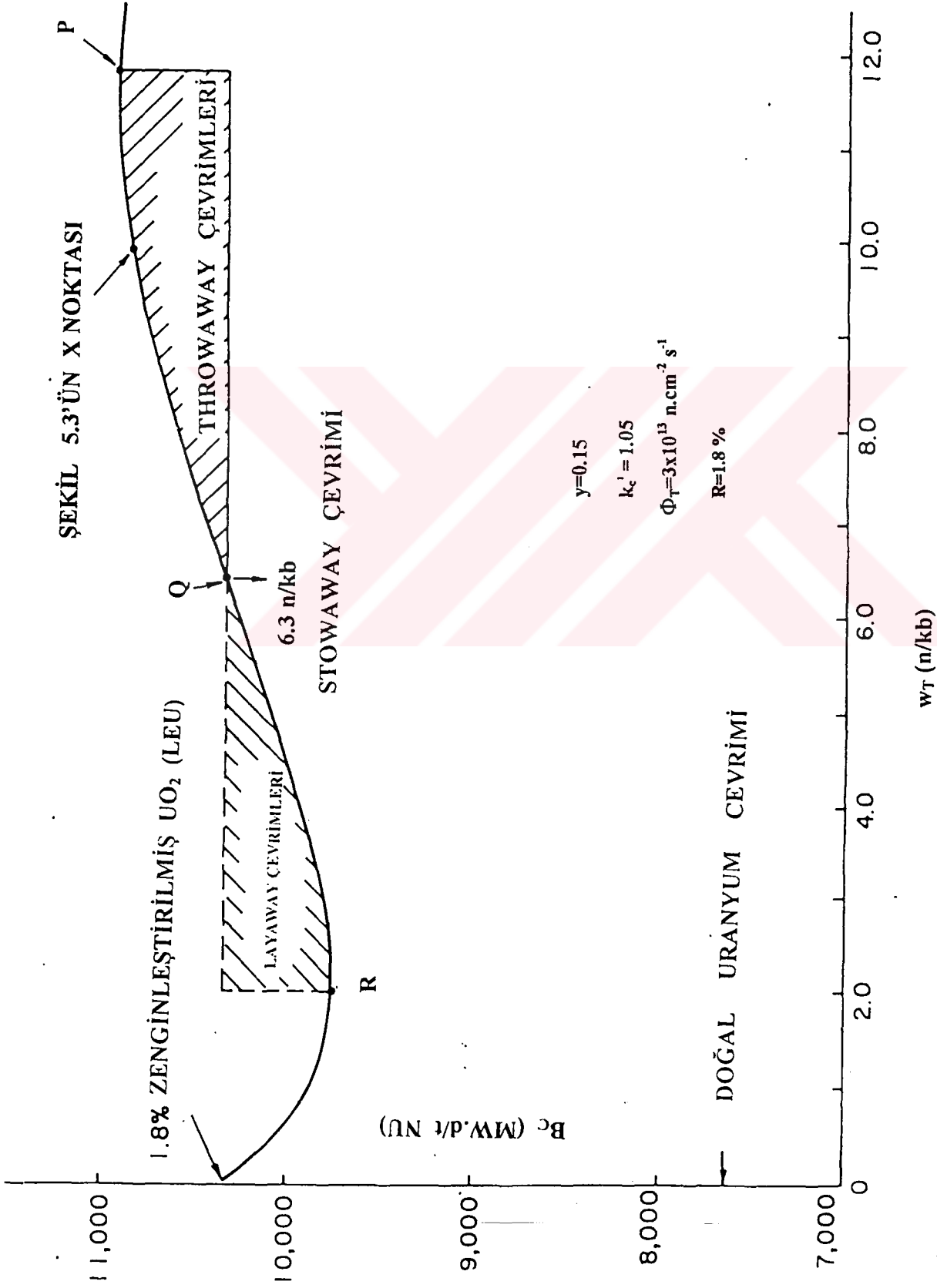


ŞEKİL 5.3 İkili Bir Yakıt Çevrimi İçin Işınlamaya Entegre Çoğalma Katsayısı [6]

Baştan saptanmış olan w_T ve y değerlerinin optimumlarını bulmak için çalışmalar yapılabilir. Burada, sadece w_T değiştirilerek “Layaway, Stowaway ve Throwaway” çevrimlerinin gerçekleştiği w_T değerlerini veren bir çalışmanın sonuçları Şekil 5.4’de verilmiştir [6]. $w_T=0$ toryum kullanılmaksızın gerçekleştirilen az zenginleştirilmiş yakıt çevrimini belirtmektedir (LEU cycle). Yatay eksen üzerinde w_T artması sürecinde, toryumlu reaktörün birleşik yanma değeri önce azalmaktadır. Çünkü, henüz yeterli ^{233}U ürememiştir ve enerji üretimi (in-situ), toryumun varlığının neden olduğu kaybı karşılayacak seviyede değildir. Bu durum $w_T=6.3$ [n/kb] noktasına kadar devam etmektedir. Daha yüksek ışınlama için durum değişmekte B_C artmakta ve $w_T = 11.8$ [n/kb] civarına kadar artış devam etmektedir.

Şekil 5.4’teki Q noktası (diğer parametrelerin verilen değeri için) $y=0.15$ oranında toryum kullanılarak LEU çevrimi ile aynı sonucun alındığı noktayı göstermektedir. Hatırlanacağı gibi bu durum stowaway çevrim olarak tanımlanmış ve görünür ekonomik bir kazanç sağlamasa da üreyen ^{233}U ’den ileride yararlanılması durumunda kazanç getireceği belirtilmiştir. R noktasından Q’ya kadar olan bölge B_C ’nin düşük olması nedeni ile ekonomik yarar ve kaynak ekonomisi sağlamamakla birlikte yakıtlarda üreyen ^{233}U ’ün ileride kullanılması durumunda zararı karşılayabilir. Bu bölge layaway çevrimini belirtmektedir. Fakat, $6.3 < w_T < 11.8$ arası kaynak ekonomisi sağlayan bölgedir. Nitekim X noktasının %43 kaynak tasarrufu sağladığı yukarıda belirtilmiştir. İkili yakıt çevriminde uranyum yanmasının, LEU çevrimindeki yanmadan büyük olması durumunda ekonomik yarar da sağlayacağı kesindir. Doğal olarak kullanılmış yakıtlardaki ^{233}U ’ün daha sonra bu tip çevrimlerde kullanılması büyük ekonomik yarar sağlayabilir.

Şekil 5.4’te görülen R, Q, P noktaları belirli bir y değeri için bulunmuştur. Bu değer için bir optimizasyon çalışmasına gerek olduğu açıktır. Söz konusu noktaların y parametresine bağlı izi Şekil 5.5 a ve b’de verilmiştir. Şekil 5.5 (a)’da P^* noktası maksimum B_C (yanma) değerini ve Q^* ise kabul edilebilir toryum yanması için (Şekil 5.5 (b)) diğer bir maksimumu göstermektedir. B_T için 50.000 MW.d/t uygun bir sınır değer olarak kabul edilmiştir. Yüksek değerlere çıkılması durumunda avantaj sağlayacaktır.



Şekil 5.4 Toryum Işınlanması w_T ve Birleşik Yanma B_c [6]

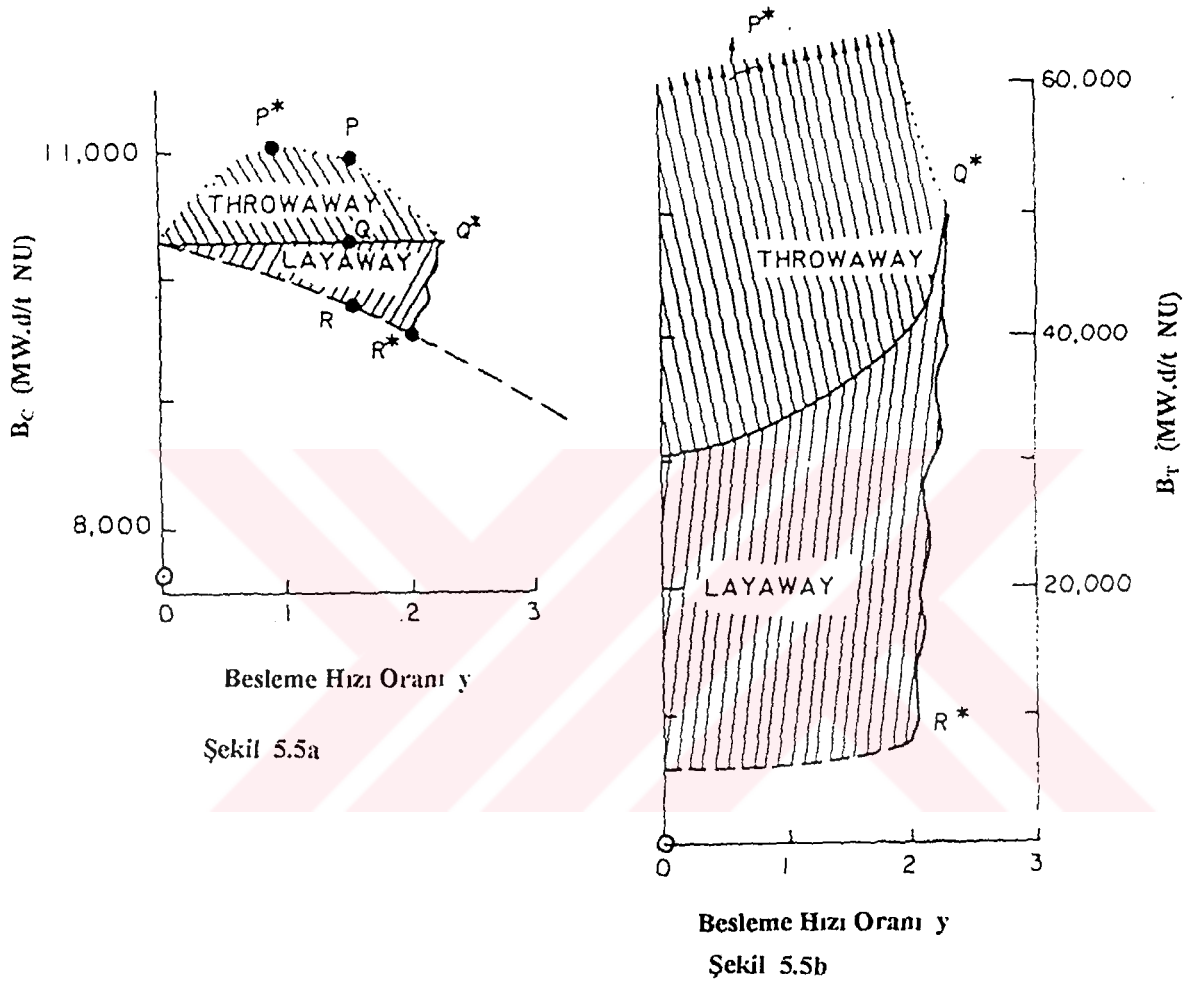
Throwaway çevrimi en yararlı çevrim olarak tanıtılmıştı ancak P^* veya örnekteki P noktalarına ulaşmak B_T sınırlarını aşmaktadır. Bu durumda mümkün olduğu kadar fazla ^{233}U üreten Q^* noktası (stowaway çevrimi) veya aynı zamanda ekonomik yarar da sağlaması söz konusu olan, throwaway bölgesi içerisinde ve 5.5(b) şeklinde örneğin Q^* ile aynı yatay üzerindeki bir nokta seçilebilir. Bu konuda kesin karar ekonomik analiz sonucu verilebilir ki konumuzun dışındadır. R^* noktasını her iki şekilde de dikkate alarak; Layaway bölgesi içinde bir noktada kalınması durumunda doğal uranyum çevriminden daima daha büyük bir yanma elde edilmektedir. Dolayısı ile kaynak maliyeti düşmektedir.

Ancak, bu bölgede yanan uranyum, toryumdan üreyen fisil ^{233}U tarafından karşılanamadığından ekonomik maliyet artacaktır. Karar verme; ekonomik analiz ve ileride yararlanılacak olan, kullanılmış yakıtlarda üremiş bulunan ^{233}U 'e verilen öneme bağlıdır.

Sonuçların, uranyum zenginliği ve akı değerinin fonksiyonu olarak incelenmesi de gerekmektedir. Şekil 5.6'da böyle bir incelemenin sonuçları da verilmiştir. Şekil 5.6(a)'da birleşik yanma B_C 'nin zenginlik ile değişimi görülmektedir. Bu şekillerde P^* , Q^* ve R^* noktalarının değişimleri verilmektedir. Akı değeri parametre olarak alınmıştır. Şekil 5.6 (b)'de görülen toryum yanma değeri B_T 'nin değişimidir. Stowaway çevrimi, artan zenginlikle birlikte yanma için sınır değer olan 50 000 MW.d/t değerine inmektedir. Bu Q^* noktasının izlediği eğriden görülmektedir. Fakat throwaway çevrimi için her zenginlikte gerekli yanmanın pratik değerin çok üstünde olduğu görülmektedir. Şekil 5.6 (c) besleme oranı y 'nin zenginlik ile değişimini vermektedir.

5.4 SONUÇ

Eldeki sonuçlara göre; ikili yakıt sistemi ve tek geçişli çevrim kullanılması durumunda ^{235}U zenginliğinin $1.5\% < R < 1.8\%$ değerleri arasında bulunması tercih edilmelidir. Toryumun ışınlaması için gerekli akı değeri 3×10^{13} ve $5 \times 10^{13} [\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}]$ değerleri arasında olup düşük değere yakın olması tercih edilmelidir. Throwaway, Stowaway ve Layaway çevrimlerinin gerçekleştirilmesi için çeşitli olanaklar bulunmaktadır.



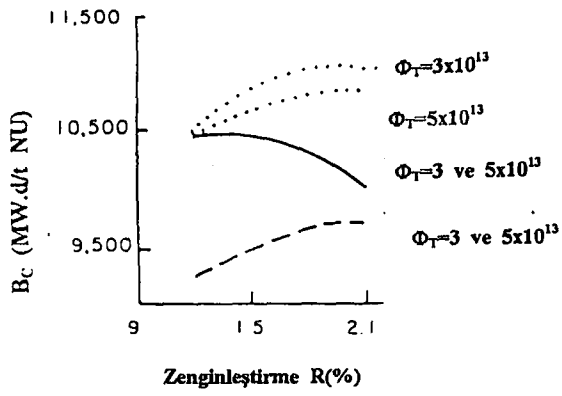
$$\Phi = 5 \times 10^{13} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$R = 1.81 \%$$

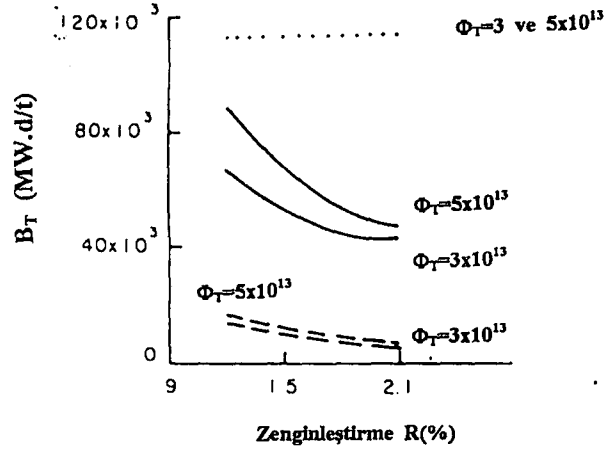
- P NOKTASI (THROWAWAY)
- Q NOKTASI (STOWAWAY)
- R NOKTASI (LAYAWAY)
- DOĞAL URANYUM ÇEVİRİMİ

Şekil 5.4'e Ait P,Q,R Noktaları

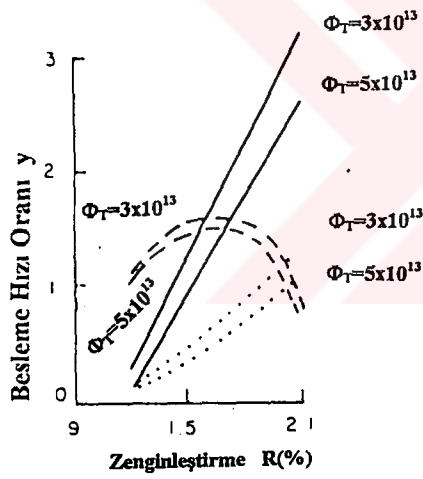
Şekil 5.5 Tek Geçişli Çevrimde Yakıt Maliyeti [6]



Şekil 5.6a



Şekil 5.6b



Şekil 5.6c

- P* NOKTASI (THROWAWAY)
- Q* NOKTASI (STOWAWAY)
- R* NOKTASI (LAYAWAY)

Şekil 5.6 Tek Geçişli Toryum Çevrimlerinin Önemli Parametreleri [6]

Ancak, en fazla tercih edilen “Throwaway” çevriminden yüksek yarar sağlanabilmesi toryum yanma değeri B_T ’nin 100.000 MW.d/t değerine doğru yükselmesi ile mümkün olabilecektir.

Besleme hızları oranı $y=0.2$ değeri civarında bulunması uygun görülmektedir. Bu durumda kalbe yüklenmiş ve birlikte ısınlanan toryum, uranyum yükleri oranı, yakıt demetleri sayısı cinsinden,

$$\frac{N_T}{N_u} = y \frac{w_T}{w_U} \frac{\Phi_U}{\Phi_T} \quad (5-4)$$

bağlantısı ile verilir. $\Phi_U=7 \times 10^{13} [\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}]$ alınmaktadır. Söz konusu oran 0.7 civarında değerler alabilmektedir. Sayıların kesin olmayışları yukarıda da sözü edildiği gibi geniş bir seçenek bandının varlığından kaynaklanmaktadır.

BÖLÜM VI

SONUÇ VE ÖNERİLER

Toryum reaktörlerinin gerçekleştirilmesi salt kaynak ekonomisi yönünden bakıldığında faydalı görülmektedir. Çünkü; gerçekleştirilen çevrim “Layaway” dahi olsa ilerisi için biriktirilen ^{233}U için çok az bir bedel ödeneceği anlaşılmaktadır. Kaldı ki, geniş yakıt idaresi olanakları nedeni ile “Throwaway ve Stowaway” koşullarını sağlayan çevrimler gerçekleştirilebilir. Gelecek için ^{233}U biriktirme söz konusu olduğunda ve hızlı üretken reaktörlerin bekleneni uzun çalışmalara rağmen vermemiş olduğu da dikkate alınarak toryum reaktörlerinin çok yararlı olduğu düşünülebilir.

Pratik ve uygun yakıt idaresi stratejisi tayin ederek stowaway ve throwaway çevrimlerinin gerçekleştirilebileceği anlaşılmaktadır. Bu durumda, toryum demetlerinde üreyen ve geri devrettirme işlemleri zor olan ^{233}U geri kazanma hedefinden vazgeçilebilir. Kullanılmış toryum demetlerinde ^{233}U ’ün yanında ^{232}U izotopu da üremektedir [5]. Kendisinin ve bozunumdan üreyen izotopların yüksek gama aktivitesi yeniden işleme işlemlerini çok zor kılmaktadır. Yeniden işleme ve bakım işlemlerinin uzaktan kontrollü yapılması gerekmektedir. Yeniden işlemeden vazgeçilmesi durumunda dahi yukarıda sözü edilen throwaway çevrimi kaynak ekonomisi sağlamak ve ekonomik maliyeti düşürmektedir. Oldukça düşük oranlarda gerçekleşen bu yararlar toryum yanmasının CANDU yakıtında 100.000 MW.d/t değerine yükselmesi ile önemli oranda artabilir. Ancak, bugün için 50.000 MW.d/t değeri kabul edilebilir ve değer çok düşük kalmaktadır.

Küçük yararına rağmen tek geçişli toryum çevrimi kısa vadede en uygun çözüm görülmektedir. Uygun bir kaynak idaresi stratejisi ile böyle projeler yürütülebilir.

Toryum reaktörlerinin yaygınlaşması bazı koşulların gerçekleşmesine bağlı görülmektedir [17]. Bu koşullar;

- a) Nükleer gücü kullanan gelişmiş ülkelerin hızlı reaktörlerle ilgili beklentilerini kaybetmesi (Bu kısmen gerçekleşmiştir.),
- b) Uranyum ekonomisi fikrinin önem kazanması ve daha önemlisi uranyum fiyatlarının artması, kararlı durumunu kaybetmesi,
- c) Kalp hesaplarında bugün dahi görülen farklılıkların giderilmesi amacı ile toryumla ilgili datalardaki hataların giderilmesi ve böylece bazı zorlukların üstesinden gelinmesi olanağının doğması,
- d) Nükleer programa yeni girmiş toryum rezervine sahip olan ülkelerde enerji bağımsızlığına hizmet etmesi nedeni ile toryum reaktörleri tercih edilebilir. Böyle ülkelerde tek geçişli çevrim kullanılması uygun olabilir. İleride yeniden işleme tesisleri kurulması durumunda, birikmiş olan ^{233}U 'ün ekonomik yararı çok büyük olacaktır. Ülkelerin bu durumu dikkate alması, olarak sıralanabilir.

Toryum reaktörlerinin nükleer enerjiyi kullanan ülkeler tarafından benimsenmesi 1980'li yıllardaki uranyum fiyatlarının iki üç katına katlanması ile mümkün olabilir. [7]. Bu henüz gerçekleşmemiştir. Bunun gerçekleşmesi durumunda gelişmiş ülkelerin alabileceği diğer önlem hızlı reaktörlerdir.

Hızlı reaktörler konusu henüz çalışılmakla birlikte önemini oldukça yitirmiştir. ^{233}U için yeniden işleme tesislerinin uzaktan kontrol ve bakım istemesi caydırıcı bir unsur olmaktadır. Bu nedenle tek geçişli çevrimler üzerinde durulmaktadır. Ancak, uranyum fiyatları ve tek geçişli çevrimin sağladığı kaynak ve ekonomik maliyet yararının çok az olması, gelişmiş ülkeleri toryum sistemlerine geçmekten bu gün için alıkoymaktadır.

Türkiye gibi, toryum rezervi bol fakat nükleer güç üretimine çok geç başlamakta olan bir ülke için tek geçişli toryum çevrimi önemli bir seçenek olarak görülmektedir. Türkiye toryum rezervi yönünden zengindir. İyi seçilmiş bir "throwaway" çevrimi idaresi stratejisi, toryum kullanımını az da olsa sağlayabilir. İlerisi için ^{233}U biriktirilmesi de küçümsememesi gereken bir husus olup, ülkenin enerji bağımsızlığı ve ileriki yıllarda dünyada başlayabilecek kaynak sıkıntısına karşı alınabilecek önemli ağırlığı bulunan bir önlem olarak düşünülmelidir.

21. yüzyılın getirebileceği jeopolitik rahatsızlıklar enerji kaynakları temini ile ilgili politikalarda ani değişikliklere veya planlanan hedeflerin gerçekleştirilmesini

engellemelere neden olabilir. Bunlara karşı getirilen bir toryum enerji programı ülkemiz için önemli bir garanti niteliğinde görülebilir. Bu hedefe ulaşmayı sağlayacak teorik ve uygulamalı çalışmalara başlanmalıdır.

Türkiye’de toryum konusunda yapılması gerekenler iki grupta incelenebilir :[19]

- A) Eskişehir yöresindeki toryumlu kompleks cevher konusunda yapılması gerekenler ve,
- B) Nükleer enerji üretimine dönük olarak toryumla yapılması gereken çalışmalar.

A) Eskişehir toryumlu kompleks cevher hakkındaki görüşler :

Yapılması gerekenlere geçmeden önce bu cevher yatağı hakkında bazı tespitleri sıralamak gerekmektedir.

- 1) Eskişehir toryumlu kompleks cevher yatağında rezerv çalışmaları öncelikle toryum, fluorit ve barit bakımından yapılmış ve tamamlanmıştır. Bu çalışmaların sonucuna göre bulunan yaklaşık 120 milyon ton kompleks cevher yatağı içinde %0.212 tenörlü 380.000 ton ThO₂ rezervinin mevcut olduğu hesaplanmıştır. Üstelik sahanın birçok yerinde çalışmalar toryum açısından tamamlanmış değildir. Dolayısıyla verilen bu değerin düşmesi değil, rezerv çalışmaları sürdürüldüğü takdirde artması beklenmektedir.
- 2) Buna karşılık, önemli bir kaynak olarak kabul edilen nadir toprak oksitleri (NTO) rezerv çalışmaları ise henüz tam olarak tamamlanmamıştır. Burada dikkati çeken husus, benzer mineralleşme göstermelerine karşı, toryum ile NTO’nin cevher yapısında bir korelasyon göstermemeleridir. Diğer bir deyişle, NTO ve toryum tenörlerindeki değişim doğru orantılı değildir; içlerinden birinin tenöründen hareketle diğerinin tenörünü belirlemek mümkün gözükmemektedir.
- 3) Bugüne kadar bilinen metodlarla yapılan çalışmalarla toryumlu kompleks cevher, toryum hedef alınarak kimyasal çözündürmeye sokulduğu takdirde toryum yüksek verimle kazanılmakta, ancak maliyet yüksek olmaktadır.

- 4) Sınai işleme açısından Eskişehir kompleks cevherinin dünya piyasalarında önemli yeri olan diğer mineraller (NTO, barit, flourit) hedef alınarak değerlendirilmesi, toryumun hep yan ürün olarak değerlendirilebileceği düşünülmelidir.

Bu tespitler ışığında Eskişehir kompleks cevheri üzerinde yapılması gerekenler şu şekilde özetlenebilir :

- a. ETİBANK'ın işletme ruhsatını elinde bulundurduğu bu kompleks cevher yatağının ekonomik (NTO, barit, flourit, toryum vb.) rezerv tespiti yapılmalıdır.
- b. Rezerv tesbitinden sonra NTO ve diğer ürünlerin işletilmesi için, ETİBANK'ın kendisi veya yerli ve/veya yabancı ortaklıklar oluşturarak üretim için yatırıma girmesi halinde cevher içindeki toryum içeriği yabancı kuruluşlarla bu tür ortaklığı engelleyici olmaktan çıkarılmalı; bu hususta TAEK, ETİBANK'a yasal mevzuatı düzenlenmesinde yardımcı olmalıdır.
- c. Bu cevher yatağının toryum içermesi NTO ürünlerinde toryum bulunması, bu ürünlerin pazarlanması bakımından bir sakınca teşkil ettiğinden, işletmenin kimyasal prosesinde toryum ayrılması bir zorunluluk olarak ortaya çıktığında NTO ve diğer ürünlerden toryum ayrılması ile ilgili kimyasal işlem geliştirilmesinde TAEK'nun ilgili birimleri araştırma ve mühendislik hizmeti verebilir.
- d. Bu kompleks cevherin her kim tarafından olursa olsun toryum dışında değerlendirilmesi durumunda bile; içerdiği toryum radyoaktivitesinden dolayı, değerlendirmenin her aşamasında (maden çıkarma, taşıma, fiziksel ve kimyasal işlemler, vb.) radyasyon güvenliği kuralları uygulanmak zorunda olacağından yasa gereği TAEK'nun denetimi söz konusu olacaktır.
- e. NTO ve diğer ürünlerin üretiminden yan ürün olarak toryum bileşikleri üretilmesi söz konusu ise TAEK'nun bu toryum bileşiklerini satın alma, muhafaza etme, kullanma, vb. hususlarında gerekli yasal düzenlemeleri yapması zorunlu ve yararlı görülmektedir.

- f. Beylikahır dışındaki diğer yerler için de toryum rezervlerinin tespitine yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Nadir topraklar için 4.500.000 ve 950.000 ton Nadir Toprak Oksitleri olarak ortaya konan farklı rezerv konusundaki çelişkinin giderilmesi gerekmektedir.
- g. Türkiye'deki diğer toryum anomali sahalarıyla ilgili etüdler de yapılmalıdır. İlk aşamada, bunlardan Malatya-Kuluncak-Başören köyündeki ilginç torit ve britolit-bastnaesit cevherleşmelerinin ayrıntılı etüdlerinin yapılmasında yarar vardır.
- h. Sözü edilen bir çok sahanın ruhsatlarının bulunmadığı tesbit edilmiştir. Bu konuda gereğinin yapılması ve özellikle çevre yönünden radyasyon değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Açıklanan tesbitler ışığında toryumun nükleer enerji üretiminde kullanımına ilişkin TAEK bünyesinde yapılabilecek çalışmalar kuramsal ve uygulamalı çalışmalar olarak iki grupta toplanabilir.

- 1) **Kuramsal Çalışmalar :** Toryumlu yakıt çevrimleri üzerinde dünyada yapılan çalışmalar izlenmeli, ilgili literatür toplanmalı, Türkiye gerçeklerine uygun yakıt çevrimleri ve yakıt ekonomisi hesapları yapılmalıdır.
- 2) **Uygulamalı Çalışmalar :** Toryumlu yakıt yapımına ilişkin olarak, toryum saflaştırılması, toryum dioksit hazırlanması, (Th/U)O₂ karışık oksit peletlerinin hazırlanması, sinterlenmesi, kalite kontrolü, vb. çalışmalar sürdürülmelidir. Daha ileri aşamada, kurulacak bir model reaktörde toryumlu yakıtların ısıtılması, performans testleri, laboratuvar çapında kimyasal olarak U-Th ayrılmasına ilişkin çalışmalar planlanmalıdır.

Bu çalışmada özellikle CANDU reaktörlerinde kullanılması düşünülen tek geçişli toryum çevrimi üzerinde durulmuştur. Çevrim ana hatları ile incelenmiş ve herhangi bir hesap yapılmamış olmakla birlikte, kaynaklarda verilmiş örnekler üzerinde durulmuştur. Çalışmanın bir amacı, pek iyi bilinmeyen CANDU tek geçişli toryum çevriminin çalışma esaslarını ortaya koymak, diğer bir amacı ise Türkiye'ye uygun olabileceğini belirtmektir. Kullanılmış kaynakların yeniden işlenmesi konusunda deneyimin bulunmadığı ülkemizde bu yol ile toryum rezervlerimizden yararlanmak mümkün olabilir. İleride, yeniden işleme ile ^{233}U eldesi konusunda bazı adımlar atılırsa bu bir ek kâr kaynağı olacaktır.

Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı (HTGR) reaktörlerde aynı şekilde incelenmelidir. Çalışmada vurgulandığı üzere tek geçişli ikili yakıtlı toryum çevriminde yarar, toryum yanması (burn-up) ile artmaktadır. HTGR'lerde yanma çok yüksek olduğundan incelenmelerinde büyük fayda vardır.

KAYNAKLAR

- [1] **TUSİAD Enerji Raporu**, 1994, Enerji sektöründe Geleceğe Bakış.
- [2] **Milgram, M.S.**, 1976, The Physics of Thorium-Fuelled CANDU'S, AECL - 5558.
- [3] **Critoph, E., Banejee, S., Barclay, F.W., Hamel, D., Milgram, M.S. and Veeder, J.T.**, 1976, Prospects for self-Sufficient Equilibrium Thorium Cycles in CANDU Reactors, AECL-5501.
- [4] **Veeder, J.**, 1978, Thorium Fuel in CANDU, AECL-6254.
- [5] **Rodriguez, P. and Sundaram, C.V.**, 1981, Nuclear and Materials Aspects of the Thorium Fuel Cycle, Journal of Nuclear Materials, 100, 227-249.
- [6] **Milgram, M.S.**, 1982, Once Through Thorium Cycle in CANDU Reactors, AECL-7516.
- [7] **Milgram, M.S.**, 1984, Thorium Fuel Cycles in CANDU Reactors, AECL-8326
- [8] **Cheng, E.T., Wong C.P.C. , Credon, R.L. and Shultz, K.R.**, 1983, A New Fusion Breeder Blanket Design Approach Utilizing a Thorium Multiplier, Trans. ANS V.44, Annual Meeting, Detroit-June 1983.
- [9] **Lanning, D.D.**, 1989, Modular High Temperature Gas-Cooled Systems, Nuclear Technology, V.88, 139-156.
- [10] **Ganguly, C., Zimmer, E. and Merz, E.**, 1986, SGMP Process for High Density UO₂ and ThO₂ Based Fuels, Trans. ANS V.52, Annual Meeting, Reno, Nevada – June 1986.
- [11] **Bultman, J.H. and Wichers, V.A.**, 1995, Actinide Waste for the Once-Through Thorium-Fuelled Heavy Water Reactor, Trans. ANS V.72, ANS V.72, Annual Meeting, Philadelphia-June 1995.
- [12] **Jiahua, Z.**, 1994, Physics Concept on the Constellation Type Fissile Fuels and its Application on the Prospective Th-²³³U Reactor, Australian Nuclear Association, 9 th Pasific Basin Nuclear Conference, Sydney-May 1994.

- [13] **Jiahua, Z. and Borong, B.**, 1994, Basic Research on Utilization Thorium Fuel in Nuclear Reactors, Australian Nuclear Association, 9 th Pasific Basin Nuclear Conferance, Sydney-May 1994.
- [14] **Confort, C., Ferguson, C., Klima, S., Lilly, D.E. and Rahnema, F.**, 1996, Thorium Plutonium (TREX) Fuel for Weapons-Grade Plutonium Disposition in Pressurized Water Reactor, Trans. ANS V.72,Annual Meeting, Washington D.C. November 1996.
- [15] **İpekoğlu, B.**,1983, Eskişehir-Beylikahır Toryum Cevherinin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi Aralık 1983.
- [16] **Nakoman, E.**, 1979, Radyoaktif Hammaddeler Jeolojisi, M.T.A. Yayınlarından Eğitim Serisi No:20, Ankara 1979
- [17] **Expert Report**, 1992, A Fresh Look at the Thorium Cycle, IAEA. 13.30.
- [18] **Özgener, H.A.**, 1987, Reaktör Teorisi Ders Notları, İ.T.Ü. Nükleer Enerji Enstitüsü; Kasım 1987.
- [19] **Toryum Araştırmaları Etüdü Projesi**, 1993-95, DPT Kod No.93K120050, Sonuç Raporu, TAEK.

ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında İstanbul’da doğdu. 1989 yılında Pertevniyal Lisesi’ni bitirdi. Aynı yıl İ.T.Ü. Fizik Mühendisliği Bölümü’ne girdi. 1993 yılında mezun oldu. 1995 yılında İ.T.Ü. Nükleer Enerji Enstitüsü’nde Lisansüstü öğrenime başladı.

