

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**YEREL BİR KAYNAĞIMIZ OLARAK TORYUM MADENİNİN  
NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN  
İNCELENMESİ VE FİZİBİLİTE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali İhsan DEMİRBAĞ**

**Anabilim Dalı: Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Programı: Enerji Bilim ve Teknoloji**

**HAZİRAN 2013**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**YEREL BİR KAYNAĞIMIZ OLARAK TORYUM MADENİNİN  
NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN  
İNCELENMESİ VE FİZİBİLİTE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali İhsan DEMİRBAĞ  
(301101046)**

**Anabilim Dalı: Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Programı: Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bilge ÖZGENER**

**HAZİRAN 2013**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301101046 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ali İhsan DEMİRBAĞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YEREL BİR KAYNAĞIMIZ OLARAK TORYUM MADENİNİN NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE FİZİBİLİTE ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Bilge ÖZGENER**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Melih GEÇKİNLİ**      .....

Beykent Üniversitesi

**Doç. Dr. Nesrin ALTINSOY**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **02 Mayıs 2013**

**Savunma Tarihi :**      **03 Haziran 2013**



*Az zamanda çok ve büyük işler yapabilme kudretine sahip olan Büyük Milletimize,*





## ÖNSÖZ

Büyüyebilmesi, gelişebilmesi ve ilerleyebilmesi için Türkiye'ye ihtiyaç duyacağı enerjiyi lâıyıkı ile karşılayabilmek bizlerin en kutsal vazifesidir. Nitekim geçmişimizden emanet aldığımız cennet vatanımız ve cumhuriyetimiz, bilgi birikimimiz ve kültürümüz yarınlarımıza bırakacağımız en kutsal mirastır. Bu sebeple bu tez çalışmasında, kendi öz kaynağımız olan toryum madeninin, enerji ihtiyacımızı karşılayabilmek adına kullanılabilirlikleri incelenmiş ve kullanıma uygun olup olmadığına bir cevap bulabilmek amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanabilmesini danışmanlığı ile mümkün kılan ve doğru sonuca varabilmem için beni destekleyen ve cesaretlendiren, içinden çıkamadığım konularda engin bilgi ve tecrübeleri ile bana ışık tutan ve yolumu aydınlatan, üzerimde emeği bulunan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Bilge ÖZGENER'e minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Özellikle bu çalışmayı yapabileceğime güvendiği ve nükleer enerjiyi bana sabır ve itina ile öğrettiği için kendisine minnettirim.

Enerji Enstitüsü'nde danışman bulma problemi çektiğim günlerde bana danışman hocamı öneren, bir nevi enstitüde sahipsiz kalmamamı sağlayan, üzerimde emeği bulunan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Atilla ÖZGENER'e minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Yaşamım boyunca aldığım her karar için arkamda duran, düşüncelerime saygı gösteren, bana destek çıkan, birlikte büyüdüğüm ve bir parçası olmaktan gurur duyduğum aileme de minnet ve teşekkür borçluyum.

Mayıs 2013

Ali İhsan Demirbağ  
(Endüstri Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enerjinin Tarihsel Geçmişi, Nükleer Enerji ve Toryum .....	1
1.2 Nükleer Enerjinin Tanımı.....	7
1.3 Toryum Madeni.....	8
1.4 Toryum İçeren Nükleer Yakıtlar .....	10
<b>2. YEREL BİR KAYNAĞIMIZ OLARAK TORYUM MADENİ VE NÜKLEER YAKIT OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ.....</b>	<b>13</b>
2.1 Toryum Madeninin Türkiye Açısından Önemi .....	13
2.2 Türkiye'nin Toryum Rezervleri .....	18
2.3 Toryumun Nükleer Yakıt Olarak Kullanılabilirliği.....	21
2.3.1 Toryum İçeren Yakıt Çalışmalarının Tarihi Gelişimi.....	23
2.3.2 Toryum İçeren Yakıtların Reaktörlerde Kullanımları ve Tarihiçesi.....	24
2.3.3 Toryum İçeren Yakıtların Yanma Oranlarının Karşılaştırılması .....	27
2.3.4 Toryum İçeren Yakıtların Nötron Verimleri.....	35
2.3.5 Toryum Yakıt Atıklarının Ağır Metal Oranları ve Fisyon Ürünleri .....	36
2.3.5.1 Toryum Yakıtların Proliferasyon Direnci .....	40
2.3.6 Toryum Yakıt Atıklarının Yönetimi .....	46
<b>3. YEREL ENERJİ KAYNAĞI OLARAK TORYUM İLE NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNİN TÜRKİYE BAKIMINDAN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ VE EKONOMİK DEĞERLENDİRMESİ .....</b>	<b>51</b>
3.1 Toryum Madenciligi ve İşletme Maliyetlerinin Değerlendirilmesi .....	51
3.2 Toryum İçeren Yakıtların Üretimleri .....	56
3.3 Toryum İçeren Yakıtların Açık veya Kapalı Çevrime Göre Kullanımları.....	58
3.4 Türkiye'nin Toryum İçeren Yakıtlar ile Enerji Üretimine Geçiş Süreci.....	61
3.4.1 Toryum Yakıtlı Nükleer Güç Santrallerinin Enerji Dengelerine Muhtemel Etkileri.....	61
3.4.2 Toryum Yakıtlı Nükleer Güç Santrallerinin Türkiye'ye Bedeli .....	63
3.4.3 Toryum Yakıtlı Nükleer Enerji Birim Üretim Maliyeti ve Diğer Enerji Kaynakları ile Karşılaştırılması .....	72
3.5 Türkiye'de Toryum Yakıtlı Nükleer Santral Kurulabilecek Bölgeler.....	79
<b>4. TORYUM İLE NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNDE HİNDİSTAN ÖRNEĞİ VE TÜRKİYE'NİN NÜKLEER ENERJİ KONUSUNDA İZLEDİĞİ YOL .....</b>	<b>87</b>
4.1 Toryum ile Nükleer Enerji Üretiminde Hindistan Örneği.....	88
4.2 Türkiye'nin Nükleer Geçmişi ve Girişimleri .....	92

<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>97</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>103</b>

## KISALTMALAR

<b>AEK</b>	: Atom Enerjisi Komisyonu
<b>AZU</b>	: Az zenginleştirilmiş uranyum
<b>BWR</b>	: Boiling Water Reactors
<b>CANDU</b>	: Canadian Deuterium and Uranium Reactor
<b>HSR</b>	: Hafif Su Reaktörleri
<b>HTGR</b>	: High Temperature Gas Cooled Reactor
<b>IAEA</b>	: International Atomic Energy Agency
<b>İTÜ</b>	: İstanbul Teknik Üniversitesi
<b>LWR</b>	: Light Water Reactors
<b>MIT</b>	: Massachusetts Institute of Technology
<b>MOX</b>	: Mixed oxide fuels
<b>NPP</b>	: Nuclear Power Plant
<b>PWR</b>	: Pressurized Water Reactor
<b>RBMK</b>	: Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalniy
<b>TAEK</b>	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
<b>TEAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Üretim – İletim Anonim Şirketi
<b>TEİAŞ</b>	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
<b>USD</b>	: United States Dollars
<b>YTÜ</b>	: Yıldız Teknik Üniversitesi



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1 : Dünya Fosil Yakıt Rezervleri .....	4
Çizelge 2.1 : Dünya Toryum Rezervleri.....	13
Çizelge 2.2 : Toryum yakıt kullanan reaktörlerin tarihçesi. ....	25
Çizelge 2.3 : Simülasyon sonucu elde edilen yanma değerleri. ....	29
Çizelge 2.4 : Haileyesus Tsige–Tamirat’ın çalışmasında referans alınan koşullar ...	32
Çizelge 2.5 : Toryumun farklı fissil maddeler ile kullanıldığı örneklerinden oluşan ağır metal miktarları.....	41
Çizelge 3.1 : Madenlerden alınan örneklerin tenör oranları .....	52
Çizelge 3.2 : Madenlerden alınan örneklerin tenör oranları .....	53
Çizelge 3.3 : Türkiye’nin 2011 yılı toplam kurulu gücü .....	61
Çizelge 3.4 : Türkiye’nin 2011 yılı toplam elektrik üretimi.....	62
Çizelge 3.5 : Nükleer Santral Maliyet Tahminleri.....	66
Çizelge 3.6 : 1966 – 1977 arası ABD nükleer santral projelerindeki maliyet tahmini aşimları.....	67
Çizelge 3.7 : Nükleer enerji santrallerinin dünya çapındaki inşaat süreleri .....	68
Çizelge 3.8 : 2021 yılına kadar tahmin edilen kurulu güç (MW) ve kaynaklara göre dağılımı .....	70
Çizelge 3.9 : Nükleer Farklı tipteki santrallere ait birim kurulu güç başına maliyetleri ve birim yakıt maliyetleri.....	72
Çizelge 3.10 : Farklı enerji kaynaklarına ait ortalama kapasite faktörleri.....	73
Çizelge 3.11 : Farklı enerji üretim teknolojilerine ait ekonomik tahminler .....	75
Çizelge 3.12 : Farklı baz yük santralleri için seviyelendirilmiş maliyetler .....	77





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Bizans savunma silahı Grejuva'yı gösteren bir gravür .....	3
Şekil 1.2 : Atom bombası yıkımından sonra Nagasaki.....	5
Şekil 1.3 : Türkiye'de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı .....	7
Şekil 1.4 : Torit (Toryum Uranyum Silikat) minerali .....	9
Şekil 2.1 : Yıllara göre Türkiye'deki elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı.....	17
Şekil 2.2 : Türkiye'de muhtemel toryum ve uranyum bölgeleri .....	19
Şekil 2.3 : Türkiye maden yatakları haritası.....	20
Şekil 2.4 : Nükleer reaktör jenerasyonları .....	22
Şekil 2.5 : Simülasyon parametreleri.....	28
Şekil 2.6 : Çalışmada değerlendirilen yakıt demetlerinin üst görünüş kesit şeması..	32
Şekil 2.7 : Çalışmada incelenen değişik yakıtlara ait dönüşüm oranları .....	33
Şekil 2.8 : Çeşitli fissil ve fertil izotoplar için eta değerleri .....	35
Şekil 2.9 : 45 MW gün/kg yanma oranı ile 4 yıl kullanılan UO <sub>2</sub> yakıttaki uranyum oranları.....	38
Şekil 2.10 : 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70 ThO <sub>2</sub> - %30 UO <sub>2</sub> yakıttaki uranyum oranları.....	38
Şekil 2.11 : %65 ThO <sub>2</sub> - %35 UO <sub>2</sub> içeren ve 87 MW gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan yakıttaki uranyum içeriği.....	39
Şekil 2.12 : 45 MW gün/kg yanma oranı ile 4 yıl kullanılan UO <sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranları .....	42
Şekil 2.13 : 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan UO <sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranları .....	43
Şekil 2.14 : 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70 ThO <sub>2</sub> - %30 UO <sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum miktarı.....	43
Şekil 2.15 : 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70 ThO <sub>2</sub> - %30 UO <sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranı .....	44
Şekil 2.16 : 87 MW gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan %65 ThO <sub>2</sub> - %35 UO <sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum miktarı.....	45
Şekil 2.17 : 87 MW gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan %65 ThO <sub>2</sub> - %35 UO <sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranları .....	45
Şekil 2.18 : 45 GW gün/metrik ton yanma oranında kullanım sonunda soğutma zamanının bir fonksiyonu olarak yakıt atıklarının radyoaktivitesi.....	47
Şekil 2.19 : 45 GW gün/metrik ton yanma oranında kullanım sonunda soğutma zamanının bir fonksiyonu olarak yakıt atıklarının ürettiği ısı miktarı.....	48
Şekil 3.1 : Nükleer yakıt üretim şeması.....	57
Şekil 3.2 : Açık ve kapalı çevrim.....	59
Şekil 3.3 : Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası.....	80
Şekil 3.4 : Türkiye Elektrik İletim Şeması .....	82
Şekil 3.5 : Türkiye Nüfus Yoğunluğu Haritası.....	83



# **YEREL BİR KAYNAĞIMIZ OLARAK TORYUM MADENİNİN NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE FİZİBİLİTE ANALİZİ**

## **ÖZET**

Enerji ihtiyacı, yaşamımızı sürdürebilmek adına varoluşun gerektirdiği bir bedeldir. Türkiye, gün geçtikçe büyümekte ve gelişmektedir. Bu sebeple Türkiye'ye enerji her zamankinden daha da lazımdır. Bizlerin yegâne görevi ülkemizin ihtiyaç duyacağı bu enerjiyi en uygun şartlarda sağlayabilmektir.

Toryum madeninin nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilirlikleri, Türkiye gibi toryumca zengin ülkeler bakımından büyük bir avantajdır. Bu tez çalışmasında toryum minerallerin nükleer santrallerde yakıt olarak kullanılabilirlikleri, yapılmış olan çeşitli çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak açıklanmaya çalışılmış ve ülkemiz bakımından kullanılabilirlikleri tartışılmıştır.

Çalışmanın sonraki bölümlerinde, toryum içeren yakıtların, toryum yakıtlı nükleer santrallerin genel bağlamda çeşitli ekonomik değerlendirilmeleri yapıp ülkemiz tarafından kullanıma uygun olup olmayacakları incelenmiştir. Ardından toryum yakıtlı nükleer santral kurulabilecek bölgeler belli başlı genel ölçütlerin dâhilinde belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada ayrıca Türkiye ile zengin toryum rezervleri gibi birçok konuda benzerliklere sahip olan Hindistan'ın, toryum kaynaklarını değerlendirerek enerji ihtiyacını karşılama adına planları ve uygulamaları incelenip, Türkiye'nin nükleer serüveni ile karşılaştırılmıştır.

Tüm bunların sonucunda, Türkiye'nin enerjiye olan ihtiyacının giderek artacağı, ancak bu enerji ihtiyacını karşılayabilmek adına kendi öz kaynaklarını etkin ve verimli bir biçimde kullanmadığı görülmektedir. Bu sebeple dünya üzerinde hatırı sayılır zengin toryum rezervlerine sahip bir ülke olarak Türkiye'nin enerji konusunda kendine yetebilmesi için bu kaynaklarını muhakkak değerlendirmesi gerektiğinin önemi ortaya çıkmıştır.

Tez çalışmasında; Türkiye'nin zengin toryum rezervleri ve bu rezervlerin enerji üretim potansiyelleri hakkında okuyucuya farkındalık kazandırabilmek ve dikkatleri bu mühim konu üzerine yoğunlaştırabilmek hedeflenmektedir. Ne yazık ki nükleer enerjinin ülkemizdeki izlenimi, haksız ve cahil karalamalar yüzünden hak ettiğinden çok daha düşüktür. Bu sebeple bu tez çalışması ile okuyucuya bu konu hakkında tecrübe edilmiş sonuçlar tarafsız olarak aktarılmaya çalışılmıştır.



## **FEASIBILITY OF USING THORIUM FOR NUCLEAR ENERGY PRODUCTION AS A NATIONAL SOURCE IN TURKEY**

### **SUMMARY**

Energy is a vital need for sustaining our lives. Day by day, Turkey becomes a more developed and more modern country. In this development phase, Turkey would need more and more energy from its own natural resources. Our primary mission is hence to find ways which provide the country with energy resources that are both economical and sustainable.

The use of thorium as a fuel in nuclear reactors is an important advantage for the countries like Turkey, which own rich domestic thorium reserves. In this study, usability of thorium as a fuel in nuclear power plants, will be investigated by reviewing studies made by researchers who consider factors like burnup level, waste content, proliferation resistance, etc. Then factors specific to Turkey would be considered to assess possible use of thorium as a nuclear fuel in our country.

Our study continues with an economical assessment of thorium fuel and the thorium fuelled nuclear power plants. With this economical assessment, usability of thorium fuel and thorium fuelled nuclear power plants will be investigated. Conditions specific to Turkey's economic situation will also be considered in this context. Then the determination of guidelines for the selection of sites for thorium fuelled nuclear power plants in Turkey will be discussed.

This work continues with a comparison of the nuclear energy experiences of Turkey and India. India is similar to Turkey in having rich domestic thorium reserves. With a three-stage nuclear power programme, India aims using its national thorium resources to meet the future energy demands of country. For Turkey, India constitutes a good example due to its three-stage programme for the utilization of its domestic thorium resources as a national energy source.

This study indicates that; energy demand of Turkey will increase parallel to its economic development and increase in its population. Thus priority should be given to the utilization of domestic energy resources in the planning of meeting the national energy demand in future. If Turkey uses its national thorium resources as an energy source effectively, possible future energy problems might be mitigated. In the pursuit of making Turkey a self-sufficient country in energy sector, efficient utilization of the domestic thorium reserves may play a central role.

In short, possible utilization of the domestic thorium reserves in nuclear reactors in Turkey has been discussed quite thoroughly in this work. Due to the occurrence of nuclear accidents in other countries, the Turkish public opinion may be prejudiced against nuclear energy as in many other countries. In this work, we have tried to give an impartial view of nuclear energy and the use of thorium as a domestic nuclear fuel.



## 1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı, sürdürülebilirlik adına varoluşun gerektirdiği bir bedeldir. Nitekim kurulan devletlerin başlıca politikalarından biri de ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanabilmesidir. Bu sebeple enerji ihtiyacını karşılayabilmek adına uygulanan yöntemlerin, stratejilerin, teknolojilerin ve politikaların etkinliği ve verimliliği ülkelerin maddi ve manevi kaynaklarını verimli kullanabilmelerine ve refah seviyelerini yükseltebilme adına diğer alanlara daha fazla kaynak ayırabilmelerini sağlar. Enerji problemini uygun şekilde çözmenin başlıca unsuru yerel kaynakların verimli kullanımudur.

Türkiye’de rezerv olarak büyük oranlarda bulunan Toryum madeninin nükleer reaktörlerde fertil yakıt olarak kullanılabilirliği akıllara yeni bir soruyu getirmektedir: “Toryum bir öz kaynağımız olarak enerji ihtiyacımızı karşılamada rol alabilir mi?”

Bu tez çalışması, yapılmış önemli çalışmaların ülke şartları göz önünde tutularak, çeşitli yorumlarla değerlendirip bu sorunun akıllarda oluşturduğu merakı bir nebze bile olsa açıklığa kavuşturmayı amaçlamaktadır.

Tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde toryum madeni, reaktörlerde kullanımı, teknik olarak incelenip yorumlanacak, sonraki bölümde aynı şekilde Türkiye ekonomisi açısından toryum yakıtların nükleer santrallerde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi yapılacak ve ardından nükleer reaktörlerin çevre ve toplumsal açıdan Türkiye’deki yeri incelenip yorumlanmaya çalışılacaktır. Çalışmanın sonunda tüm bu konulardan çıkan sonuçlar incelenerek toryum madeninin Türkiye için bir yerel kaynak olabilirliği tartışılacak ve çeşitli bakımlardan sonuçlar değerlendirilecek ve okuyuculara sunulacaktır.

### 1.1 Enerjinin Tarihsel Geçmişi, Nükleer Enerji ve Toryum

Enerjiye olan bağımlılığı gün geçtikçe misliyle artmakta olan Dünya’da yaşamın uygun şartlar ve yüksek standartlarda sürdürülebilmesi için enerji üretimi, talep ile aynı oranda karşılanmalı ve arz-talep dengesi sağlanmalıdır. Enerjinin mevcut

teknoloji ve sistemler ile depolanmasının maliyet, bakım-onarım vb. çeşitli açılardan büyük oranlarda uygulanabilirliği zordur. Bu sebeple genel enerji talebini karşılamak adına etkin ve verimli bir planlama yapılırken ihtiyaç duyulan miktarın ihtiyaç duyulan zamanda karşılanması amaçlanır, doğal olarak günün farklı saatlerinde enerji ihtiyacının farklı olması genel enerji talebinin dalgalı olmasına sebep olur.

Genel enerji talebindeki bu ihtiyaçsal dalgalanmaları karşılayabilmek için kapasitesinin ihtiyaç oranında kullanımına imkân veren enerji üretim sistemlerinin tasarımı ve inşası biz mühendislerin en büyük sorumluluklarından biridir. Enerji felsefesinin açıkladığı üzere hiçbir enerji türü yoktan var edilemez yahut vardan yok edilemez. Yalnızca enerji türleri birbirlerine dönüşür.

Bu kavramdan yola çıkarak insanlığın enerji ihtiyacını ilk olarak odun, biyoatık vb. gibi biyolojik kütlelerden yanma reaksiyonu yardımı ile karşıladığı görülmektedir. Ardından dönemlerine göre nispeten gelişen maden işleme, metal döküm veya şekillendirme teknolojilerinin getirdiği enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına ilk olarak odun biyokütlesini karbonize ederek karbonca zengin odun kömürünü elde etmiş ve bu yeni yakıtın yanması sonucu açığa çıkan yüksek ısı enerjisi sayesinde erime noktası yeten belli metalleri şekillendirebilme imkânı bulmuştur.

Ancak ilerleyen teknolojinin getirdiği enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında odun kömürü insanlığın ihtiyaçlarını karşılayamaz duruma gelmiştir. Madencilikğin ilerlemesi insanlığın kıymetli ve mukavemetli metal malzemelerin yanında yeraltında binlerce yılın basıncı ile fosilleşmiş kömür, petrol, doğal gaz vb. fosil yakıtları da keşfetmelerini sağlamıştır. Bu yakıtlardan doğalgaz ve petrol buldukları çağın teknolojisi ile kontrollü ve etkin olarak kullanılmadıkları için ve yine döneminin teknolojisi ile kömür gibi kolay ve güvenli olarak depolanamadıkları için teknolojinin gelişimi ile kömürden sonra en az kömür kadar (veya bakış açısına göre kömürden daha fazla) değerlendirilmişlerdir. Bunun yanında tarih boyunca petrol ve doğalgaz'ın farklı amaçlarda kullanıldıkları görülmüştür. Tarihi kaynaklarda Bizans İmparatorluğu'nun en etkin silahlarından biri olan hatta İstanbul kuşatmasında Sultan II. Mehmet (Fatih unvanı kendisine fetihten sonra atfedilmiştir) komutasındaki Osmanlı ordusuna karşı da kullanılan Grejuva Silahı'nın yanan ham petrol veya yağ türevi sıvı yakıt fırlatan bir düzenek olduğu geçmektedir. Grejuva ateşi; kolay söndürülemeyen, yüksek ısı veren ve suda dahi yanabilen bir ateş olduğu belirtilmektedir ki bu da petrol yahut petrol türevi bir sıvı yakıtın bu silahta



kullanıldığı iddialarını sağlamlaştırmaktadır. Grejuva'nın resmedildiği bir gravür Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1:** Bizans savunma silahı Grejuva'yı gösteren bir gravür [1].

1800'lü yıllarda Sanayi Devrimi ile gelişimi büyük hız kazanan teknoloji enerjinin günümüzde en yaygın kullanıldığı biçimi olan elektrik enerjisinin kullanımına da imkân vermiştir. Elektrik enerjisi sayesinde enerjinin iletimi ve taşınması kolaylaşmış dolayısı ile teknolojik gelişimin büyük alanlara yayılımına olanak sağlanmıştır. Ancak önceki paragraflarda belirtildiği üzere elektrik enerjisinin depolanmasının zorluğu sebebiyle üretim için kullanılan kaynakların kontrolü ve bu kaynaklara sahip olmanın önemini ortaya çıkarmıştır.

Ne yazık ki İnsanlık, dönemi itibarı ile enerji üretmek adına büyük oranda kullanılan fosil yakıtların Dünya üzerine düzgün ve eşit dağılmaması sebebi ile bu kaynaklara hâkim olmak adına ittifaklar kurmuş, ayrılıklara girmiş, savaşlar atlatmış ve kayıplar vermek zorunda kalmıştır. Çizelge 1.1, Dünya fosil yakıt rezervlerinin bölgelere göre dağılımını göstermektedir. 1900'lü yıllarda fosil kaynakları kontrol eden ülkeler arası anlaşmazlıklar ve çıkar çatışmaları sonucu patlak veren enerji krizi sebebiyle enerji üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılabilmesi adına büyük çalışmalar yapılmıştır. Enerji üretiminde ve kaynaklarında yenilenebilir enerji, Yakıt Hücreleri vb. teknolojiler geliştirilmiş, yeni enerji kaynakları kullanılabilir hale gelmiş, ancak yine de fosil yakıtlara olan bağımlılık belli oranlarda azaltılabilmektedir.

**Çizelge 1.1:** Dünya Fosil Yakıt Rezervleri [2].

<b>Bölge</b>	<b>Petrol Milyar Ton</b>	<b>Doğalgaz Trilyon m<sup>3</sup></b>	<b>Kömür (Milyar Ton) Taşkömürü + Linyit</b>
Kuzey Amerika	7,8	7,46	115,7 + 138,8
Orta ve Güney Amerika	14,8	7,02	7,7 + 12,2
Avrupa ve Avrasya	19,2	64,01	112,3 + 174,8
Ortadoğu	101,2	72,13	0,4 + 0
Afrika	15,2	14,39	50,1 + 0,2
Asya Pasifik	5,4	14,84	192,6 + 104,3
<b>Toplam Dünya</b>	<b>163,6</b>	<b>179,85</b>	<b>909,1</b>

Aynı dönemde bilim dünyasında yaşanan önemli ilerlemelerin getirdiği gereksinimleri klasik fizik teorileri ile açıklamak zorlaşmaya ve tutarsızlaşmaya başlamıştır. İnsanlık tarihine adlarını yazdıran, buldukları çağdan ilerisini görebilen vizyoner ve ufku geniş bilim adamları fizik alanında çığır açarak insanlık tarihinin en büyük gizemlerinden biri olan maddeyi anlayabilmek adına büyük ilerleme kat edip madde yapısını oluşturan atomlardan enerji üretimine olanak sağlayan kayda değer çalışmalar yapmışlardır.

Atom enerjisi nispeten çok çok daha az yakıt ile geleneksel enerji üretim yöntemlerinden kat kat daha fazla enerji sağlayan, çağının ötesinde, temiz, güvenilir, ancak kontrolün kaybı ile aynı oranda tehlikeli ve telafisi zor hasarlara yol açabilecek bir teknoloji idi insanlık için. Nitekim elindeki her fırsatı tehdide çevirmekte usta olan insanlık bu muhteşem teknolojiyi muhteşem bir kitle imha silahına dönüştürmede beis göremedi. Ve ne yazık ki bu mükemmel silah kitleleri yok eden, şehirleri haritadan silen ve yıllar sonra bile gerek manen gerek madden verdiği hasarı telafi edilemeyen bitirmeyen bir kara leke olarak insanlık tarihinde yerini aldı. Şekil 1.2 Atom bombası yıkımından sonra Nagasaki'nin üzücü bir fotoğrafını göstermektedir.

Bu muhteşem teknoloji atom çekirdekleri arası etkileşim sonucu açığa çıktığı için çekirdek manasına gelen “nucleus” kelimesinden türetilen Nükleer Enerji adıyla anılır. Faydaları insanlığın enerji ihtiyacını yüksek oranlarda karşılayabilecekken, silah olarak kullanımından sonra oluşturduğu kötü imajı aynı insanları kendinden soğutmaya yetti.

Muhakkak ki nükleer enerjinin diğer enerji üretim türleri gibi popüler olamamasının önemli sebepleri; geçmiş nükleer kazaların oluşturduğu kötü imajın yanında, yakıt ve

ileri teknoloji sistemlerinin imalatının, kurulumunun ve bu alanda yapılan araştırmaların gereksinim duyduğu yüksek maliyettir. Maliyet kısıtı nükleer enerji kullanımı ve araştırmalarını ancak ekonomik olarak refaha erebilmiş ve btelerinden yüksek maliyet gerektiren bu projelere yeterli kaynak ayırabilen ülkeler arasında gelişmesine yol açmıştır. Nükleer enerjinin ülkelerin enerji açığını karşılama adına önemli ve verimli bir kaynak olduğu, yüksek maliyetine rağmen rağbet grebilmesinden anlaşılabilir.



**şekil 1.2:** Atom bombası yıkımından sonra Nagasaki [3].

Ülkelerin enerji bağımsızlıklarını sağlamak adına enerji politikalarını oluştururlarken mantık doğrultusunda ilk olarak yerel kaynak ve potansiyellerini kullanmaları, yetmez ise enerji ithal etmeleri aynı zamanda fazla üretim durumunda enerji ihraç etmeleri uygundur. Örneğin petrol zengini Ortadoğu lkeleri enerji ihtiyaçlarını büyük ölçüde bu kaynaklardan sağlamalıdır, aksi takdirde yanlış politikalar sonucu enerji açısından dışa bağımlı duruma gelebilirler.

Tüm bu koşullar altında ülkemiz Türkiye'yi yüksek medeniyetler seviyesine çıkarmak teknoloji, kültür, bilim, üretim alanında ilerletmek için gerek duyulacak enerjiyi öz kaynaklarımızı mümkün mertebe en etkin ve verimli biçimde kullanarak üretmek, ülkemizde enerjiye gönül vermiş bizlerin sorumluluğunu taşıdığımız yegâne görevimiz ve amacımız olmalıdır. Zıyan edilen ve değerdendiremediğimiz her kaynağımızı geleceğimizden çaldığımızın bilincine varmalıyız. Nitekim medeniyet olarak yükselmek yalnızca teknoloji ve bilim olarak ilerlemek değildir, aynı anda kültürel ve sosyal olarak da ilerlemek gerekir.

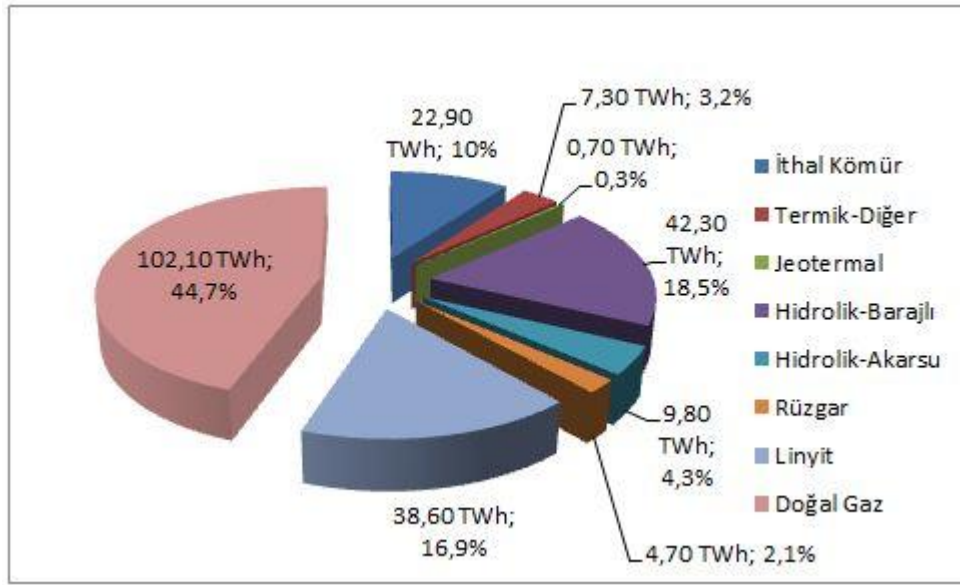
Ne yazık ki Türkiye, fosil yakıtlar bakımından Orta Doğu adı ile anılan petrol zengini coğrafyaya yakın konum sahibi olmasına rağmen fosil yakıtlar bakımından zengin bir ülke değildir. Ancak yinede Türkiye, enerji ihtiyacının kayda değer bir bölümünü fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Türkiye'nin enerji üretim kurulu güç profilinde hidroelektrik enerjinin yeri sahip olduğu önemli potansiyel sayesinde büyük bir paydayı kapsamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bir coğrafyada bulunan Türkiye'nin enerji profilinde bu kaynaklar yavaş yavaş yer edinmeye başlamışlardır. Lakin güneş enerjisi bakımından verimli bir konumda bulunan Türkiye'nin ne yazık ki bu öz potansiyelini verimli kullandığı pek söylenemez. Şekil 1.3, Türkiye'de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımını göstermektedir.

Türkiye'nin kullanmadığı ve belki de kullanmamasından dolayı enerji talebini karşılamada büyük ölçüde eksikliğini yaşadığı, Türkiye için mühim sayılabilecek bir kaynak olan nükleer enerji ilerleyen yıllarda enerji üretim profilimizde kendine yer bulacaktır. Atomstroyexport adlı Rus firmasına inşaat ihalesi verilen Akkuyu Nükleer Güç Santrali (Akkuyu NPP) inşaatı bitebilirse Türkiye'nin ilk nükleer santrali olma özelliğini taşıyacaktır.

Türkiye'de nükleer enerjiye karşı olumsuz bir önyargı bulunmaktadır. Türkiye'nin nükleer enerjiye olan bu olumsuz tavrını etkileyen önemli etmenlerden biri şüphesiz; Eski Sovyetler Birliği Çernobil Nükleer Güç Santralinde (Chernobyl NPP) yaşanan talihsiz kazadır. Bu kazanın, nükleer enerji konusunda Türk halkı üzerinde olumsuz bir imaj oluşturmaya sebep olduğu söylenilebilir. Bu kazanın ardından nükleer santral inşasının yeniden gündeme geldiği günümüzde Fukuşima-Japonya'da yaşanan talihsiz kaza, tabiri caizse nükleer enerji hakkındaki haksız önyargılara tuz biber olmuştur. Aynı şekilde Türk halkının nükleer enerjiye olan bu önyargısının,

nükleer santrallerin Türkiye’de kullanımını geciktirip enerji ihtiyacının farklı yollar ve büyük oranda yerel olmayan kaynaklar ile karşılanmasına sebep olduğu söylenilebilir.

Nükleer teknolojiadaki gelişmeler, Toryum madeninin nükleer reaktörlerde fertil yakıt olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu da Dünya Toryum rezervlerinin büyük bir kısmına sahip olan Türkiye için Toryum’un önemini açığa çıkaran önemli bir keşiftir.



**Şekil 1.3:** Türkiye’de elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı [4].

Toryum, Türkiye’de nükleer enerji üretiminde kullanılabilirse bir nevi özkaynak olarak adlandırılabilir, aynı anda Türkiye bu kaynağı; gerek işleyip satarak gerek santraller kurup kullanarak değerlendirebilir. Toryum belki de Türkiye’nin geleceğinde karşılamaya ihtiyaç duyacağı artan enerji talebini karşılamada kullanılabilir. Bu sebeple toryum, avantajları ve dezavantajları ile beraber değerlendirilmeli ve gelecekteki enerji politikamızı belirleyecek sonuçlara varılmalıdır.

Bir diğer ifade ile Toryum Türkiye’nin geleceği olabilir.

## 1.2 Nükleer Enerjinin Tanımı

Nükleer enerji, kararsız atom çekirdeklerine sahip izotopların daha kararlı hale geçmeleri ile açığa çıkan enerjidir. Nükleer enerji günümüzde çeşitli bilimsel

alışmalar ve mühendislik düzenlemeler ile kullanılıp kontrol edilebilecek bir enerji türü haline gelmiştir. Nükleer enerji çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

Avantajları:

- Emre amade, kapasite faktörü yüksek bir enerji kaynağıdır.
- Yakıt kullanan diğer enerji kaynaklarına nispeten miktarca daha az yakıtla daha fazla enerji üretilir.
- Yakıt kullanan diğer enerji kaynaklarına göre miktarca daha az atık oluşturur.
- Karbondioksit salınımı olmayan bir teknolojidir.
- Kullanım mr uzun bir teknolojidir.
- İleri teknoloji ürünü bir enerji kaynağıdır.

Dezavantajları ise:

- Yüksek maliyetle uygulanabilen bir teknolojidir.
- Uranyum gibi nükleer yakıt olabilecek izotoplar doğada diğer atomlara nispeten miktarca daha az bulunmaktadır.
- Yakıt atıkları yüksek seviye zehirlilik oranlarına sahip bir enerji kaynağıdır.
- Çalışma sürecinde itinayla kontrol edilmesi gereken, muhtemel bir hata veya kaza durumunda telafinin ağır olacağı bir enerji kaynağıdır.

### 1.3 Toryum Madeni

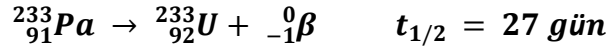
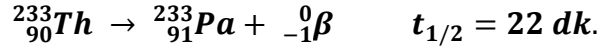
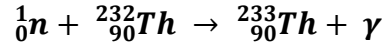
Toryum, atom numarası 90, atom ağırlığı yaklaşık 232 g/mol olan, 11,7 g/mL yoğunluğunda, 1700 °C de eriyen, kurşun rengine, havada bozulmaz, atom enerjisi kaynağı olarak kullanılan radyoaktif bir elementtir [5]. şekil 1.4'te torit (Toryum-uranyum silikat) mineralini gösteren bir resim verilmiştir.

Toryum  $^{232}_{90}\text{Th}$  simgesi ile gösterilir. Dünya üzerinde farklı bölgelerde bulunmaktadır. Doğada uranyumdan daha bol bulunan bir maddedir. Toryum fertil bir izotopdur, bir diğer ifade ile nötron absorbe ederek fissil izotoplara dönüşür.



**Şekil 1.4:** Torit (Toryum Uranyum Silikat) minerali [6].

Söz konusu dönüşüm,



şeklindedir [7]. Denklemlerde  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  simgesi ile ifade edilen toryum atomu nötron absorbe ederek kararsız olan ve yarılanma süresi 22 dakika olan  ${}_{90}^{233}\text{Th}$  izotopuna dönüşür ve bir gama ışınması yapar.  ${}_{90}^{233}\text{Th}$  kararsız toryum izotopu bozunup bir beta ışınması yaparak  ${}_{91}^{233}\text{Pa}$  simgesi ile gösterilen, yarılanma süresi 27 gün olan kararsız protaktinyum izotopuna dönüşür.  ${}_{91}^{233}\text{Pa}$  simgesi ile gösterilen protaktinyum izotopu bir beta ışınması daha yaparak fissil  ${}_{92}^{233}\text{U}$  izotopuna dönüşerek uranyum-233 izotopunu oluşturmaktadır.

Uranyum-233 izotopu, çok iyi fisyon kabiliyetine sahiptir. Bu sebeple uranyum-233 izotopu üretim imkânı toryum için dikkate alınması gereken bir diğer önemli avantajdır. Uranyum-233, uranyum-235 ve plutonyum-239 izotopları ile yaklaşık olarak aynı fisyon tesir kesitine sahiptir, ancak ışınımlı yakalama tesir kesiti konusunda bu izotoplara üstünlük sağlamaktadır. Dolayısıyla, uranyum-233, nötron ekonomisi bakımından diğer izotoplara göre daha üstün bir izotopdur.

Bu ve bunun gibi sebepler ile günümüzde toryuma olan ilgi yükselmektedir. Çeşitli akademik çevreler ve üniversiteler bu konu hakkında çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu davranışlar ve gayretler bir nevi toryumun gelecekte önem kazanacağını göstermektedir.

## 1.4 Toryum İçeren Nükleer Yakıtlar

Nükleer reaktör yakıtları, fissil ve fertil izotopların karışımı ile oluşturulur. Yapılan çalışmalar, toryum madeninin nükleer reaktörlerde fissil yakıtlar ile birlikte fertil yakıt olarak kullanılabilceğini ortaya çıkarmıştır. Toryum madeninin doğada uranyuma göre daha bol bulunması, araştırmacıları bu konu hakkında teşvik eden ve şevklendiren önemli bir etkidir. Fertil toryum-232 izotopu reaktör içerisinde büyük oranda fissil uranyum-233 izotopuna dönüşmektedir, bu da toryum adına bir diğer önemli avantajdır. Düşük minör aktinit üretimi, toryum yakıt atıklarını zehirlilik oranları bakımından uranyum yakıtlardan daha üstün kılmaktadır. Toryum yakıtların üstünlük sağlayan bir diğer önemli özellikleri ise proliferasyon direncidir. Proliferasyon direnci, toryum yakıtların kullanımları sonucu, plutonyum-239 gibi nükleer silah hammaddesi olarak kullanılacak malzemelerin eser miktarlarda üretilmesi sonucunda nükleer silah üretimine karşı oluşan engeli ifade etmektedir.

Toryum içeren yakıtların uranyum yakıtlara göre avantajları şunlardır:

- Toryum doğada uranyuma göre daha bol bulunan bir madendir.
- Toryum yakıtların yanma (burnout) oranları uranyum yakıtlarla rekabet edebilecek seviyededir.
- Toryum içeren yakıtlar daha az zenginleştirilmiş uranyum ile birlikte yakıt olarak kullanılabilirler.
- Toryum içeren yakıtların atıkları, uranyum yakıt atıklarına göre daha az zehirlidir ve daha az minör aktinit üretilir.
- Toryum içeren yakıtlar proliferasyon direnci gösterir.
- Toryum içeren yakıtlar kendi yakıtını kendi üreten breeder tipi reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilirler.
- Toryum oksit, düşük genleşme katsayısına sahip, yüksek sıcaklıklarda çalışmaya elverişli bir malzemedir.
- Toryum kimyasal olarak daha kararlı bir yapıdadır.



- Toryum yüksek erime sıcaklığına sahip bir malzemedir. Dolayısıyla reaktör içerisindeki yüksek sıcaklıklara mukavemet gösterebilir ve yüksek sıcaklıklarda katı halde bulunabilir.
- Toryum içeren yakıtlar tüm bu kıstaslar çerçevesinde incelendiğinde, uranyum yakıtlara göre daha az maliyetlidirler. Dolayısıyla kullanımları, üretimleri ve uygulamaları daha kârlı ve sürdürülebilir olabilir.
- Toryum içeren yakıtların popülaritesi gelecek yıllarda uranyum içeren yakıtlara göre daha fazla artma eğilimindedir, toryum içeren yakıtların yeni nesil reaktörlerde yaygın kullanımları sayesinde nükleer enerjinin dünyada daha etkin ve yaygın bir biçimde kullanımına olanak verebilirler.

Toryum yakıtların dezavantajları şöyle sıralanabilir:

- $\text{ThO}_2$  erime sıcaklığı  $\text{UO}_2$  göre daha yüksek olduğundan yüksek yoğunluklu yakıt lokumları elde etmek için daha yüksek sıcaklıkta sinterleme gerektirmektedir.
- $\text{ThO}_2$  asal olduğundan nitrik asit içinde çözülmesi  $\text{UO}_2$ 'ye göre daha zordur.
- Kullanılmış toryum yakıtlar içinde yarı ömrü 73.6 yıl olan çok yüksek gama ışınımı veren  $\text{U}^{232}$  bulunması, kullanılmış yakıtların uzaktan kumandasını gerektirmektedir.
- $\text{Th}^{232}$   $\text{U}^{233}$  dönüşümü ara ürünü olan  $\text{Pa}^{233}$ 'ün yarı ömrünün nispeten uzun olması (yaklaşık 27 gün) daha fazla soğutma süresi gerektirir.
- Toryum yakıt çevrimi için gerekli nükleer veriler ve deneyim uranyuma göre çok daha azdır.



## 2. YEREL BİR KAYNAĞIMIZ OLARAK TORYUM MADENİ VE NÜKLEER YAKIT OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ

### 2.1 Toryum Madeninin Türkiye Açısından Önemi

Toryum madeninin Türkiye açısından önemini kavrayabilmek için öncelikle dünya toryum rezervlerine ve Türkiye'nin sahip olduğu rezerv miktarlarına bakılmalıdır. Çizelge 2.1 toryum madeninin ülkelere göre dünya rezervlerini göstermektedir.

Çizelge 2.1: Dünya Toryum Rezervleri [8].

Bölge	Ülke	Toplam Toryum Rezervi (ton)
Avrupa	Türkiye	744.000 – 880.000
	Norveç	320.000
	Danimarka	86.000 – 93.000
	Finlandiya	60.000
	Rusya Federasyonu, Avrupa kısmı	55.000
	İsveç	50.000
	Fransa	1000
	<b>Toplam</b>	<b>1.316.000 – 1.459.000</b>
	Kuzey ve Güney Amerika	Brezilya
ABD		434.000
Venezüella		300.000
Kanada		172.000
Peru		20.000
Uruguay		3.000
Arjanjin		1.300
<b>Toplam</b>		<b>1.536.000 – 2.230.300</b>

**Çizelge 2.1(Devam): Dünya Toryum Rezervleri [8].**

<b>Bölge</b>	<b>Ülke</b>	<b>Toplam Toryum Rezervi (ton)</b>
<b>Afrika</b>	Mısır	380.000
	Güney Afrika	148.000
	Fas	30.000
	Nijerya	29.000
	Madagaskar	22.000
	Angola	10.000 – 20.000
	Mozambik	10.000
	Malavi	9.000
	Kenya	8.000
	DRC	2.500
	Diğer	1.000
	<b>Toplam</b>	<b>649.500 – 659.500</b>
<b>Asya</b>	CIS (Rusya Federasyonu'nun Avrupa'daki kısmı haricinde)	1.500.000
	➤ Kazakistan (Tahmini)	> 50.000
	➤ Rusya Federasyonu, Asya Kısmı (Tahmini)	> 100.000
	➤ Özbekistan (Tahmini)	5.000 – 10.000
	➤ Diğer	Bilinmiyor
	Hindistan	846.500
	Çin (Tahmini)	> 100.000
	İran	30.000
Malezya	18.000	
Bangladeş (Tahmini)	17.000	

**Çizelge 2.1(Devam):** Dünya Toryum Rezervleri [8].

<b>Bölge</b>	<b>Ülke</b>	<b>Toplam Toryum Rezervi (ton)</b>
<b>Asya</b>	Bangladeş (Tahmini)	17.000
	Tayland (Tahmini)	10.000
	Vietnam (Tahmini)	5.000 – 10.000
	Kore	4.500 – 7.500
	Sri Lanka (Tahmini)	4.000
	<b>Toplam</b>	<b>2.708.000 – 2.721.000</b>
<b>Avustralya</b>		521.000
<b>Dünya Toplam</b>		<b>6.730.000 – 7.590.800</b>

Dünya rezervlerinde de görülebileceği üzere; Türkiye önemli büyüklükte toryum rezervine sahiptir. Bu sebeple yapılmış olan bu tez çalışmasında zengin toryum kaynaklarının Türkiye için yerel bir enerji kaynağı olarak kullanılabilirliği çeşitli ölçütler doğrultusunda tartışılıp bir fikir belirtebilmek amaçlanmaktadır. Bakış açısı değiştirilip günümüzde Türkiye'nin kullanmış olduğu enerji kaynakları ve enerji üretim yöntemleri incelendiğinde ne yazık ki büyük ölçüde bir dışa bağımlılık söz konusudur.

Türkiye'nin enerji politikası; mevcut ülke kaynaklarının en etkin biçimde kullanılıp enerji talebini karşılayabilmek üzerinedir. Yıllardan beri bu konu görev olarak görülmüş, araştırılmış ve bu konu hakkında ilgili çevreler tarafından özveri ve itina ile önemli çalışmalar yapılmış, çeşitli projeler hayata geçirilmiştir. Ancak Türkiye; artan nüfusu, gelişen sanayisi ve refah seviyesi artan vatandaşlarının enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına giderek artan ve artışını sürdürecektir enerji ihtiyacını aynı hızda karşılamak zorundadır.

Türkiye çok iyi hidrolik potansiyele, rüzgar, güneş ve jeotermal gibi yenilenebilir potansiyellere ve belli miktarda fosil kaynaklara sahip olmasına rağmen gerek mevcut teknoloji, gerek uygulanan siyasi politikalar, gerekse halkın tepkisi gibi

çeşitli sınırlayıcı ve belirleyici etkiler karşısında mevcut kaynaklarını yüksek verimle kullanamamaktadır. Ancak, özverili vatandaşlarının yapmış oldukları çalışmalar ve girişimler ışığında Türkiye’de enerji konusunda aydınlık bir geleceğe gitmek amaçlanmakta ve bütün çabalar bu önemli amaç uğruna gösterilmektedir.

Günümüz Türkiyesi enerjisinin büyük bir kısmını, dünya genelindeki tüm ülkelerde olduğu gibi, fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Hızla artan enerji talebini, yapılan enerji planlamalarının ışığında, gelecekte uygulanacak enerji politikalarındaki kararsızlıkları sonucu aynı hızla karşılamakta zorluk çeken Türkiye, doğal olarak kısa sürede kurulup işletmeye alınabilen teknolojiler ve santraller kullanmak zorunda kalmıştır.

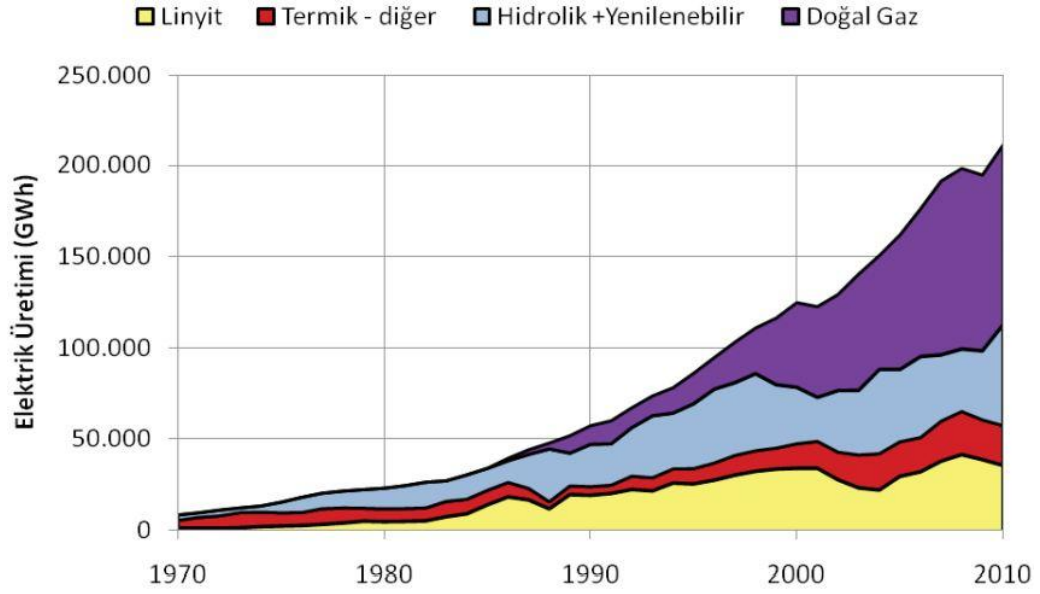
Kömür ve doğalgaz santralleri diğer santrallere nispeten, enerji talebini yüksek oranda karşılayabilecek güç kapasitelerine ve daha kısa kurulum sürelerine sahiptir. Şekil 1.3’te de görüldüğü üzere Türkiye, enerji ihtiyacının büyük bir kısmını doğalgaz ve termik santrallerden karşılamaktadır. Ancak ne yazık ki doğalgaz yerel olarak bolca bulunmayan ve ithal etmek zorunda olduğumuz bir enerji hammaddesidir. Kömürümüz ise düşük kalitededir.

Yenilenebilir potansiyelinden yararlanabilme adına yerli yenilenebilir enerji ve teknoloji üretim kabiliyeti ve sanayisini yeni yeni oluşturmaya başlayan Türkiye’de yenilenebilir enerji santrallerinde kullanılan parçaların büyük bir bölümü yurtdışında üretilmektedir. Bu cihazların bazı bileşenlerinin çeşitli üreticiler tarafından yurt içi üretimine yeni yeni başlanmaktadır. Türkiye artan girişimci sayısı ile rüzgar enerjisi potansiyelinden önemli ölçülerde faydalanmaya başlamıştır.

Ancak ne yazık ki önemli büyüklükteki güneş enerjisi potansiyelini kullanma adına günümüzde herhangi bir ticari girişim bulunmamaktadır. Şekil 1.3’te görülebildiği üzere üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık % 54,7 si dış kaynaklar kullanılarak üretilmektedir. Burada ayrıca güneş enerjisinden yararlanılmadığı da görülebilir. Şekil 2.1’de ise yıllara göre Türkiye’deki elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı gösterilmektedir.

Şekil 2.1’de ise önceki satırlarda bahsedilen hızla artan enerji talebinin hızlı tatmini adına son on yılda doğalgazdan enerji üretimine bir yığılma olduğu açıkça

görülebilmektedir. 2011 yılı verilerine göre yıllık toplam elektrik üretim miktarı ise mühim bir büyüklüğe sahip olup, toplam 228,4 TWh'tir [4].



**Şekil 2.1:** Yıllara göre Türkiye'deki elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı [4].

Türkiye'nin enerji konusundaki dışa bağımlılığı; cari açık problemleri, enerji fiyatlandırmalarında ekonomik istikrarsızlık ve muhtemel enerji krizleri ve riskleri gibi sorunları beraberinde getirmektedir. Bunların yanında Türkiye'nin hızla artan enerji talebini karşılayabilmek adına yerel enerji kaynaklarını verimli kullanmadığı da söylenebilir.

Bu yüksek enerji ihtiyacını karşılayabilmek için büyük rezervlerine sahip olduğu toryumun nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanımı, Türkiye'nin gelecekteki muhtemel enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bunun yanında nükleer santraller güç kapasiteleri, kapasite faktörleri ve kapasite kullanım oranları yüksek santrallerdir ve bu özellikler, gelişen Türkiye'nin gelecekteki enerji ihtiyacını karşılayabilmek adına önemli avantajlar olarak değerlendirilebilir.

Sahip olduğu büyük toryum rezervleri Türkiye'nin gelecekteki enerji kaynağı olarak kullanılabilir ise; enerji konusunda dışa bağımlılıktan kurtulan Türkiye'nin ekonomisi düzeliyor, enerji faturalandırma fiyatları azalarak ve halkın refah seviyesi artabilir.

## 2.2 Türkiye'nin Toryum Rezervleri

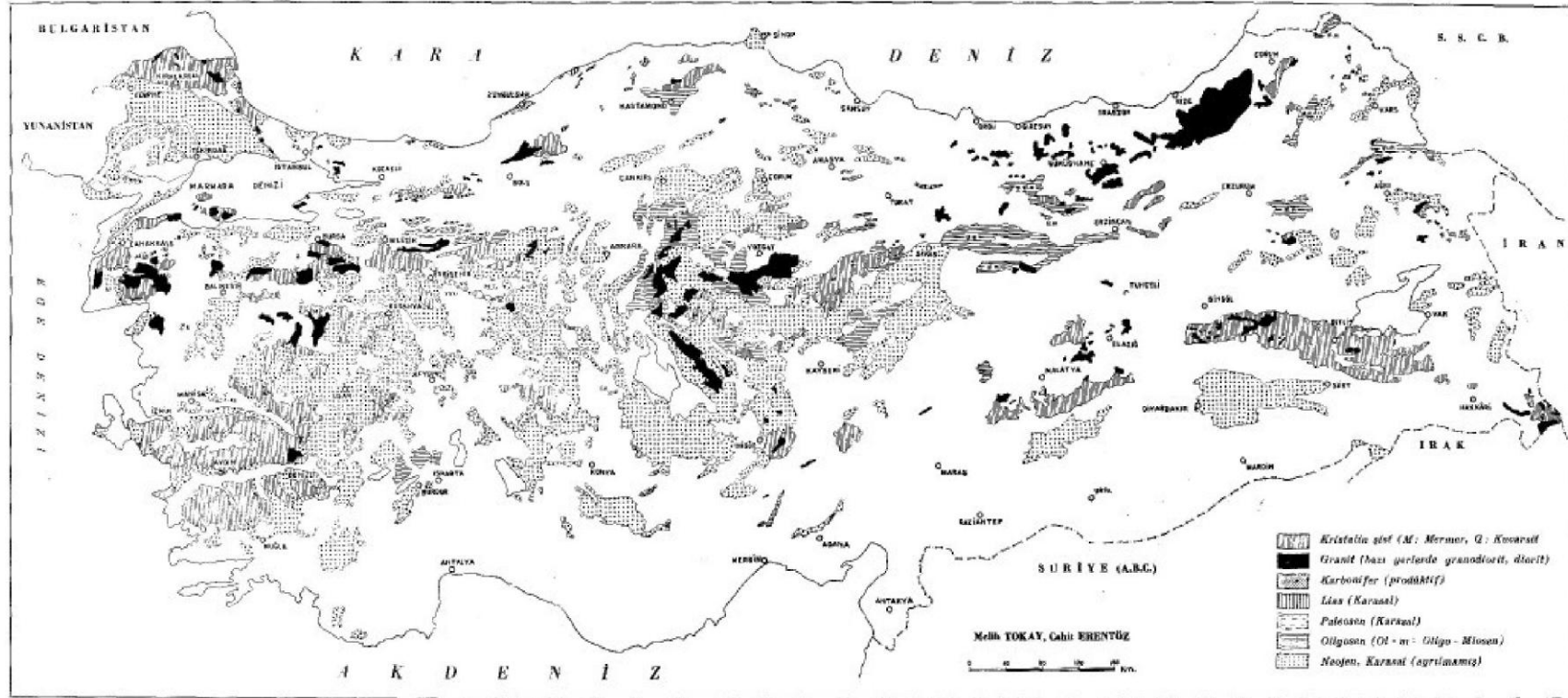
Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü internet sitesinden alınan ve son güncelleme tarihi 2010 yılı olan verilere göre Türkiye; %0,21'i ThO<sub>2</sub> olmak üzere toplam 380.000 ton görünür ve muhtemel toryum rezervlerine sahiptir. Bu rakam önceki paragraflarda verilen OECD Nükleer Enerji Ajansı ve Uluslar arası Atom Enerjisi Ajansı'nın yapmış olduğu 2011 yılına ait çalışmada 744.000 ile 880.000 ton arası verilmiştir. Rakamlar arasında tutarsızlıklar görülebilse de fikir birliğine varılan tek bir nokta bulunmaktadır ki o da Türkiye'de önemli büyüklüklerde toryum rezervlerinin mevcudiyetidir. Konu hakkında Metin Tokay ve Cahit Erentöz'ün yapmış oldukları çalışmaya göre, toryum ve uranyum Anadolu'nun çeşitli bölgelerinde görülebilmektedir [9]. Metin Tokay ve Cahit Erentöz tarafından hazırlanan, Türkiye'de muhtemel toryum ve uranyum bölgelerini gösteren harita, Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

Şekil 2.2'deki kaynağın eski bir kaynak olması sebebiyle harita olabilecek en net çözünürlükte aktarılmıştır. Haritanın sol alt köşesindeki bilgilendirme tabelasında yukarıdan aşağıya sırasıyla kristalin sist, granit, karbonifer, lias, paleosen, oligosen ve neosen yazmaktadır. Haritadan da görülebileceği üzere yapılan bu çalışmada Türkiye'nin oldukça büyük bir kısmında muhtemel uranyum ve toryum yatakları bulunabileceği iddia edilmektedir. Elbette bu kaynakların mevcudiyetinin uzman kişiler tarafından yerinde ve ayrıntılı incelenmeleri ülkemiz için önemlidir.

Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü'nün yayınladığı daha güncel bir kaynak olan Türkiye Maden Yatakları haritası Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Bu haritadan görülebileceği üzere Ege Bölgesi'nde uranyum, İç Anadolu Bölgesi'nde toryum ve uranyum yataklarına rastlanmıştır. Şekil 2.3'e göre Türkiye'nin toryum yatakları genellikle Eskişehir ili civarındadır.



TÜRKİYE'DE MUHTEMEL URANYUM VE TORYUM BÖLGELERİ



Şekil 2.2: Türkiye’de muhtemel toryum ve uranyum bölgeleri [9].

## TÜRKİYE MADEN YATAKLARI



Şekil 2.3: Türkiye maden yatakları haritası [10].

### 2.3 Toryumun Nükleer Yakıt Olarak Kullanılabilirliği

Toryum nükleer reaktörlerde fertil yakıt olarak kullanılabilirliğe sahiptir. Nötron yutması sonucu fissil uranyum-233 izotopuna dönüşür. Dünyada toryumun nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılması konusunda yapılan çalışma ve girişimleri şevklendiren önemli etkilerlerden biri; toryumun doğada uranyuma göre daha bol bulunmasıdır.

Her ne kadar günümüzde yaygın olarak kullanılmaları bile nükleer teknolojinin gelişimi ile birlikte yeni nesil nükleer reaktörlerde toryum yakıtlar yaygın olarak kullanılacaktır. Özellikle uzun yakıt ömrü ve az zenginleştirilmiş uranyum ile çalışabilme imkanı ve proliferasyon direnci, ekonomik ve güvenli reaktörlerin oluşturulacağı 4. nesil nükleer reaktörlerde kullanım imkanı bulacaktır.

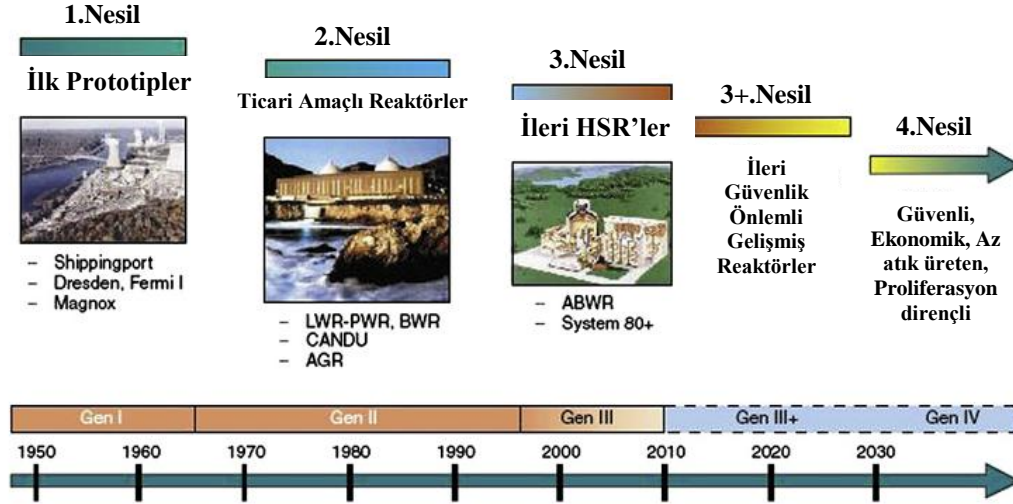
Nükleer teknolojinin gelişim sürecini incelemek gerekirse, 1. nesil olarak adlandırılan reaktörler nükleer teknolojinin ilk reaktörleridir ve bu reaktörler düşük güç kapasitelerine ve düşük kapasite faktörlerine sahiptirler.

2. nesil nükleer reaktörler eski teknolojiye nazaran daha gelişmiş teknolojiye sahiptirler ve kapasite faktörleri ile güç kapasiteleri yükseltilmiştir. Hafif su reaktörleri, basınçlı su reaktörleri, kaynar su reaktörleri, basınçlı ağır su reaktörleri (CANDU), 2. nesil nükleer reaktörlerdir.

3. nesil nükleer reaktör teknolojisinde ise güvenlik konusuna önem verilip ileri pasif güvenlik sistemlerine sahip daha güvenli reaktörler imal edilmeye çalışılmıştır. Günümüzde kullanılan gelişmiş kaynar su reaktörleri (Advanced Boiling Water Reactors), gelişmiş hafif su reaktörleri (Advanced Light Water Reactors) ve diğerleridir. 3. nesil reaktörlerin sonraki aşamasında ise daha gelişmiş tasarımlar ve daha ekonomik ve sürdürülebilir reaktörler üzerinde çalışılmaktadır.

4. nesil reaktörlerde ise önceki jenerasyonlardaki bütün özelliklere ek olarak maliyetleri daha makul seviyelere getirilmiş, güvenli, minimal, kolay kurulumu ve uygulanabilirliğe sahip daha az atık üreten ve yakıtlarının kullanım süresi daha uzun reaktörler hayata geçirilecektir. Şekil 2.4 nükleer reaktör jenerasyonlarını ve gelişim süreçlerini göstermektedir.

4. nesil teknolojide özellikle üzerinde durulan ekonomik ve uzun süre kullanılabilen yakıtlara sahip reaktörleri mümkün kılacak olan şey; yakıtlarındaki fertil kısımdan türeyen fisil izotoplarında enerji üretiminde kullanıma dahil edilebilmeleri olacaktır. Bu özellik aynı anda tükenmiş yakıttaki radyoaktif atık oranını dahada azaltacaktır.



Şekil 2.4: Nükleer reaktör jenerasyonları [11].

Toryumun reaktör içerisinde uranyum-233'e dönüşümü ve uranyum-233 izotopunun reaktörde kullanım için ideal bir fisil atom oluşu yüksek ihtimalle toryumu yeni nesil nükleer reaktörlerin vazgeçilmez bir bileşeni yapacaktır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında bu konu daha ayrıntılı olarak irdelenecektir.

Toryumun bir diğer avantajı ise günümüzde kullanılan diğer yakıtlara kıyasla yüksek yanma (burnup) değerlerine sahip olmasıdır. Hatta bu değerdeki üstünlüğü toryum ile kullanılacak uranyum yakıttan daha az zenginleştirme ile yüksek performans sağlanabilmesine imkan vermektedir. Bu da yakıt maliyetinin düşmesine sebebiyet verir. İlerleyen sayfalarda bu konuya değinilecektir.

Yapılan Çalışmalar, toryum kullanılan reaktörlerde açığa çıkan atıkların uranyum kullanan reaktörlerdeki atıklara göre daha az radyo-toksit olduklarını göstermektedir. Buna sebebiyet veren en önemli etken toryum kullanılan yakıtların, yakıtın ömrünü tamamlamasından sonra minör aktinit olarak adlandırılan periyodik tablonun aktinitler kısmında bulunan neptünyum (Np), amerikyum (Am), küriyum (Cm) izotopları gibi ağır radyoaktif atomları düşük oranlarda içermesidir. Bu konu ilerleyen sayfalarda açıklanacaktır.

Bunun yanında plutonyum-239 üretiminin az olması bilindiği üzere toryum içeren yakıtların, nükleer silah yapımını azaltıcı bir etkiye, bir diğer ifade ile proliferasyon direnci göstermelerine sebep olmaktadır. İlerleyen sayfalarda proliferasyon direnci daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

Söz konusu tüm bu avantajları, gelecekte toryumun nükleer kullanılabilirliğini arttıracak ve işlenmesini, üretimi önemli hale getirecektir. Tez çalışmasının bu bölümünde tüm bu konular, yapılmış çalışmalar incelenip göz önünde bulundurularak tek tek ve daha ayrıntılı olarak irdelenecektir. Bu çalışmalar ülkemiz için büyük önem arz etmektedirler, zira kömür ve fosil kaynak fakiri bir ülke olarak değerlendirilebileceğimiz için, gelecek yıllarda artan enerji talebini dengeleyebilmek adına mevcut kaynağımız toryumu etkin kullanabilmeye yönelik çalışmalar ve girişimler sürdürülmelidir.

### **2.3.1 Toryum İçeren Yakıt Çalışmalarının Tarihi Gelişimi**

Dünya uranyum rezervlerinin azlığı, toryum yakıtlara olan ilginin artmasına sebep olmuştur. Toryum konusundaki çalışmalar 1950'li yıllarda başlamıştır. 1964 yılında ABD'de Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda toryum yakıt ile çalışan, kendi yakıtını üretebilen erimiş-tuz reaktörü tecrübe edilmiştir. Bu reaktör fissil yakıt olarak uranyum-233 izotopunu kullanmıştır. Bu programı destekleyen fon, 1976 yılında kesilerek program sonlandırılmıştır [12].

2006 yılında Carlo Rubbia tarafından, toryumun başka nükleer yakıtların atıkları ile beraber tüketildiği, kritik altı çalışan hızlandırıcı destekli reaktör konsepti hakkında fikir ortaya atılmıştır ve deneysel bazda çalışmalar yürütülmüştür. Bu reaktörler tükenmiş uranyum yakıtların atıklarının tekrar değerlendirilebilmeleri ve radyoaktif ürünlerin minimize edilebilmesi olanağıyla çevre duyarlılığı konusunda nükleer teknoloji bakımından büyük öneme sahiptirler [12].

2011 yılında toryum yakıtlara olan ilginin artışı dolayısıyla MIT üniversitesi tarafından yapılan çalışmada, potansiyel üstünlüklerine rağmen toryum yakıtların, enerji pazarında uranyum yakıtlar ile rekabet edebilmelerine engel olacak küçük de olsa ekonomik problemler ile karşılaşılabilir. Bunun yanında yeni reaktör dizaynları ve geliştirme çalışmaları ile birlikte her ne kadar küçük engeller ile karşılaşılacaktır

olsa bile en az aynı oranda teşvikler görülecektir ve toryum yakıtların ekonomik gelecekleri parlaktır [12].

### **2.3.2 Toryum İçeren Yakıtların Reaktörlerde Kullanımları ve Tarihçesi**

Toryum yakıtlar, hafif su reaktörleri, ağır su reaktörleri, yüksek sıcaklık gaz reaktörleri, sodyum soğutmalı hızlı reaktörler, erimiş tuz reaktörleri gibi farklı reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilirler [12].

Çizelge 2.2, toryum yakıt kullanan reaktörlerin tarihçesini göstermektedir. Buradan görülmektedir ki kullanılan çoğu reaktör henüz deneysel aşamadadır. Çoğu ülke çeşitli nedenlerden dolayı toryum kullanan reaktörlerini kapatmıştır. Ancak Hindistan'da bulunan reaktörler halen faaliyet göstermektedir. Hindistan, toryum kaynaklarını nükleer teknoloji ile değerlendirebilmek adına izleyeceği yol bakımından Türkiye için iyi bir örnektir. Hindistan, aynı Türkiye gibi önemli büyüklükte toryum rezervlerine sahiptir ve rezervlerini etkin biçimde değerlendirebilmek için çeşitli faaliyetler yürütmektedir. İlerleyen bölümlerde bu konuya tekrar değinilecektir.

Toryum içeren yakıtlar günümüzde yalnızca birkaç ticari amaçlı kullanılan reaktörde yakıt olarak kullanılmaktadırlar. Ancak yapılan çalışmalar ve geçmiş tecrübelerin sonuçları, ilerleyen yıllarda kullanımın artabileceğini göstermektedir. Toryum içeren yakıtlar teorik olarak hızlı ve termal reaktörlerde uranyum yakıtlar gibi uyumlu çalışabilirler.

Toryum içeren yakıtların kendi yakıtını üretebilen yeni nesil reaktörlerde kullanılabilmesi büyük bir avantajdır. Aynı zamanda bir önceki konuda da bahsedilen kritik altı çalışan hızlandırıcı destekli reaktörlerde (Accelerator driven reactors) kullanılabilmesi toryum içeren yakıtların gelecek vaadettiklerinin bir göstergesidir.

Ayrıca Tsige – Tamirat, H., tarafından yapılmış olan çalışmada; teorik olarak toryum içeren yakıtların basınçlı hafif su reaktörlerinde (PWR) kullanılabileceğinden bahsetmektedir[14].

Bunun yanında Herring, J., S. ve diğerleri tarafından yapılmış olan çalışmada; hafif su reaktörlerinde (LWR), bir diğer ifade ile kaynar su reaktörleri (BWR) ve basınçlı

**Çizelge 2.2:** Toryum yakıt kullanan reaktörlerin tarihçesi [12].

İsim	Ülke	Reaktör Tipi	Güç	Yakıt	Çalışma Zamanı	Çalışma Amacı	Kapatılma Sebebi
AVR	Almanya	Yüksek sıcaklıklı gaz reaktörü (Çakıl taşı yataklı)	15 MWe	Th+ <sup>235</sup> U	1967-1988	Araştırma ve test	Çalışma amacının tamamlanması
THTR-300	Almanya	Yüksek sıcaklıklı gaz reaktörü (Çakıl taşı yataklı)	300 MWe	Th+ <sup>235</sup> U	1985-1989	Enerji üretimi	Maliyet aşımı
Lingen	Almanya	Kaynar su reaktörü, ışınlama testi	60 MWe	Test yakıtı (Th,Pu)O <sub>2</sub>	1968-1973	Araştırma ve test	Çalışma amacının tamamlanması
Dragon (OECD-Euratom)	İngiltere, İsveç, Norveç, İsviçre	Yüksek sıcaklıklı gaz reaktörü, Deneysel	20 MWt	Th+ <sup>235</sup> U	1966-1973	Araştırma ve test	Çalışma amacının tamamlanması
Peach Bottom	Amerika Birleşik Devletleri	Yüksek sıcaklık gaz reaktörü, Deneysel (Prizmatik yapı)	40 MWe	Th+ <sup>235</sup> U	1966-1972	Araştırma ve test	Çalışma amacının tamamlanması
Fort St Vrain	Amerika Birleşik Devletleri	Yüksek sıcaklıklı gaz reaktörü, Deneysel (Prizmatik yapı)	330 MWe	Th+ <sup>235</sup> U	1976-1989	Enerji üretimi	Dizayn problemleri & Düşük performans
MSRE ORNL	Amerika Birleşik Devletleri	Yakıt beslemeli erimiş tuz reaktörü	7,5 MWt	Th+ <sup>233</sup> U	1964-1969	Araştırma ve test	Finansal fonun sonlandırılması

**Çizelge 2.2(Devam):** Toryum yakıt kullanan reaktörlerin tarihçesi [12].

İsim	Ülke	Reaktör Tipi	Güç	Yakıt	Çalışma Zamanı	Çalışma Amacı	Kapatılma Sebebi
BORAX-IV & Elk River Station	Amerika Birleşik Devletleri	Kaynar su reaktörü	2,4 MWe; 24 MWe	Th+ <sup>235</sup> U	1963-1968	Araştırma ve test	Sızıntı problemi
Shippingport	Amerika Birleşik Devletleri	Hafif su moderatörlü üretken reaktör	100 MWe	Th+ <sup>233</sup> U	1977-1982	Araştırma ve test	Çalışma amacının tamamlanması
Indian Point 1	Amerika Birleşik Devletleri	Basınçlı su reaktörü	285 MWe	Th+ <sup>233</sup> U	1962-1980	Enerji üretimi	Acil durum sistemlerinin mevzuata uymaması
SUSPOP/KSTR KEMA	Hollanda	Sulu Homojen Reaktör	1 MWt	Th+Çok zenginleştirilmiş uranyum	1974-1977	Araştırma ve test	Açıklanmamış
NRX & NRU	Kanada	Malzeme deneme reaktörü	20 MW; 200MW	Th+ <sup>235</sup> U, Test yakıtı	1947 (NRX) 1957 (NRU)	Araştırma ve test	Her iki reaktör halen faal
CIRUS; DHRUVA & KAMINI	Hindistan	Malzeme deneme reaktörü (Termal)	40 MWt; 100 MWt; 30 kWt (düşük güçteki araştırmalar)	Al+ <sup>233</sup> U+ThO <sub>2</sub>	1960-2010 (CIRUS) Diğerleri halen faal	Araştırma ve test	Çalışma Amacının Tamamlanması
KAPS 1 & 2; KGS 1 & 2; RAPS 2,3 & 4	Hindistan	Basınçlı ağır su reaktörü	220 MWe	ThO <sub>2</sub> +Fissil yakıt	1980; Halen faal	Enerji üretimi	Her iki reaktör halen faal
FBTR	Hindistan	Sıvı metal soğutuculu reaktör	40 MWt	ThO <sub>2</sub> +Fissil yakıt	1985; Halen faal	Araştırma ve test	Her iki reaktör halen faal



su reaktörlerinde (PWR) toryum içeren yakıtların uygun kullanılacakları görülmüştür [13].

Nuttin, A. ve diğerleri tarafından yapılmış olan çalışmada ise basınçlı ağır su reaktörlerinde (CANDU) toryum içeren yakıtların etkin bir biçimde kullanılacaklarından bahsedilmektedir [16].

Ayrıca Jiyang, Y. ve diğerleri tarafından yapılmış olan “Toryum Destekli İleri Nükleer Enerji Sistemi” isimli çalışmada ise araştırmacıların kendi ülkeleri Çin gibi toryumca zengin bölgeler tarafından etkin kullanılacak toryum yakıtlı bir nükleer enerji sistemi tasarlanmış ve toryum içeren yakıtlar ile etkin çalışabileceğine değinmiştir. Çalışmada dizayn edilen bu reaktör tipi, basınçlı ağır su reaktörleri (CANDU) ve hafif su grafit reaktörlerine (RBMK) benzerlikler taşımaktadır. Ayrıca bu çalışmada toryum içeren yakıtların yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktörlerde (HTGR) de etkin çalışabilirliğinden bahsedilmektedir [15].

### **2.3.3 Toryum İçeren Yakıtların Yanma (Burnup) Oranlarının Karşılaştırılması**

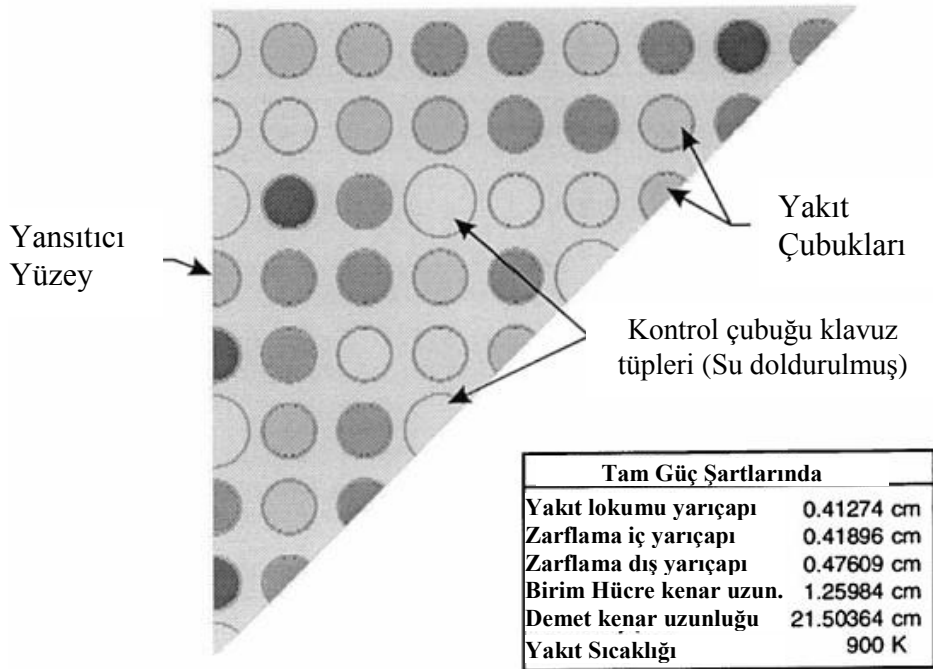
Yanma oranı, nükleer yakıtın fisyonu sonucu birim kütesinden açığa çıkan enerji miktarıdır.

Toryum içeren nükleer yakıtların yanma oranlarının uranyum yakıtlar ile rekabet edebilecek seviyede oldukları düşünülmektedir. J. Stephen Herring ve diğer araştırmacıların 2000 yılında yapmış oldukları çalışmada maliyeti ve plutonyum üretimi düşük uranyum – toryum dioksit yakıtların hafif su reaktörlerinde kullanımları simüle edilmiştir [13]. Bu çalışmada mevcut hafif su reaktörlerinde yaygın kullanılan uranyum dioksit yakıtlardan daha ucuz, daha uzun yakıt ömrüne sahip ve kapasite faktörü yüksek, proliferasyon direnci gösteren, ve daha az radyoaktif atık üreten yakıt geliştirimi amaçlanmıştır.

Çalışmaya göre nükleer enerjinin kullanımı, günümüzde zararlarını belli eden sera gazı salınımlarını kontrol etmede anahtar etmendir. Nükleer reaktörlerin çalışma prensibinde önceki paragraflarda incelendiği üzere hiçbir şekilde sera gazı salınımı bulunmamaktadır. Yalnızca reaktör güvenliğini sağlayan sistemler gerekli durumlarda devreye girebilmek için enerji ihtiyaçlarını stoklanmış fosil yakıtlardan

karşılıyabilirler ve dolayısıyla nadir görülecek bu koşullar altında çok az miktarda bir karbondioksit salınımı gerçekleşebilir.

Çalışmada incelenen toryum – uranyum yakıtların karışım oranı; ağırlıkça %75 ThO<sub>2</sub> - %25 UO<sub>2</sub> ve %65 ThO<sub>2</sub> - %35 UO<sub>2</sub> oranındadır. Bu karışımlardaki uranyum kullanımdan önce ağırlıkça %19,5 uranyum-235 ve %80,5 uranyum-238 içermektedir; toryum ise %100 toryum-232 izotopundan oluşmaktadır. Toplam olarak yakıtı bakıldığında ise zenginleştirme oranı ağırlıkça %6-7 civarındadır. Yakıt, Westinghouse tipi bir reaktörde 17 × 17'lik yakıt demeti koşullarına göre simüle edilmiştir. Simülasyon parametreleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Simülasyon parametreleri [13].

Şekil 2.5'te belirtildiği üzere tam güç çalışmada değerlendirme parametreleri olarak, yakıt lokumu çapı 0,41274 cm, zarflama iç yarıçapı 0,41896 cm; dış yarıçapı 0,47609 cm, birim hücre kenar uzunluğu 1,25984 cm, demet kenar uzunluğu 21,50364 cm ve yakıt sıcaklığı 900 K alınmıştır.

Simülasyon sonucu elde edilen yanma oranları Çizelge 2.3'te gösterilmektedir. Çizelge 2.3'te toryum – uranyum yakıt karışımları için değerler reaktör içerisinde kontrol çubukları ihmal edilerek hesaplanmıştır. Uranyum yakıtlar için verilen veriler

**Çizelge 2.3:** Simülasyon sonucu elde edilen yanma oranları [13].

<b>Yakıt</b>	<b>Uranyum Zenginleşmesi (Ağırlıkça %)</b>	<b>UO<sub>2</sub> – Yakıt Oranı (Ağırlıkça %)</b>	<b>Kapasite Faktörü (%)</b>	<b>Yakıt Çevrim Süresi (Gün)</b>	<b>Yanma Oranı (MW gün / kg yakıt)</b>
UO <sub>2</sub>	4,5	100	87,1	454	45
UO <sub>2</sub>	7,2	100	90,6	698	72
ThO <sub>2</sub> – UO <sub>2</sub>	19,5	25	90,6	524	54
ThO <sub>2</sub> – UO <sub>2</sub>	19,5	30	90,6	698	72
ThO <sub>2</sub> – UO <sub>2</sub>	19,5	35	86,9	880	87

gözlemlenmiş verilerdir. %7,2 zenginleştirilmiş uranyum yakıtın yanma oranının %30 uranyum içeren toryum – uranyum karışımı yakıtla aynı olduğu hesaplanmıştır.

J. Stephen Herring ve diğer araştırmacıların 2000 yılında yapmış oldukları çalışmadan çıkan bu sonuçlar yorumlandıklarında, toryum içeren yakıtların yüksek yanma oranlarına sahip oldukları görülmektedir. Burada dikkate alınması gereken önemli bir faktör toryum-uranyum yakıtların zenginleştirme oranlarının yakıtların uranyum kısımları içerisindeki oranlar olduklarıdır. Örnek olarak %25 UO<sub>2</sub> içeren toryum–uranyum yakıtın toplam zenginleştirme oranı ağırlıkça % 19,5 değil; %6 civarındadır. %35 UO<sub>2</sub> içeren toryum–uranyum yakıtında ise bu oran %7’dir [13].

Sonuçlarda açıkça görülebildiği üzere %7,2 zenginleştirilmiş UO<sub>2</sub> yakıt ile karşılaştırma için özel olarak hesaplanan %6–7 arası zenginleştirilmiş %30 UO<sub>2</sub> içeren ThO<sub>2</sub> – UO<sub>2</sub> yakıtın yanma oranları aynı değerdedir. Dolayısıyla yapılmış olan hesaplardan yola çıkılarak, toryum içeren yakıtlar daha az zenginleştirme ve dolayısıyla daha az yakıt işleme maliyeti gerektireceği düşünülebilir. Bu sonuç toryumun nükleer yakıtlarda kullanılabilirliği adına büyük bir avantajdır.

Yakıtın kullanım ömrünün toryum içeren yakıtlarda nispeten daha uzun olduğu görülmektedir. İncelenen yakıtlardan ağırlık olarak % 25 UO<sub>2</sub> içeren ThO<sub>2</sub> – UO<sub>2</sub> yakıtın yakıt çevrim süresinin 524 gün ile %7,2 zenginleştirilmiş uranyum yakıtın çevrim süresinin gerisinde kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla toryum içeren yakıtların uzun yakıt çevrim sürelerine sahip oldukları söylenebilir.

Yakıt çevrim süresi nükleer santral ekonomisi bakımından önem taşımaktadır. Yakıt değişiminde santral, yakıt değişimi yapılmıncaya kadar atıl durumda kalmaktadır. İkincil önemli kısım ise yakıt değişimi sırasında çalışanlar az da olsa, bir miktar radyasyona maruz kalmaktadırlar ve bu durumun tekrarlandıkça çalışanların maruz kaldığı radyasyon miktarı da doğru orantılı olarak artmaktadır.

Yakıt çevrim süresinin uzun olması nükleer santrallerin çalışma ömürleri içerisinde yakıt değişim sayısını azaltacak, dolayısıyla santral daha az süre atılacak ve kapasite faktörü iyileşecektir. Bunun yanında santralde çalışan işçilerin radyasyona maruz kalma süreleri iyileştirilecektir. Amerika’da bulunan ve uranyum yakıt kullanan santrallerin yaklaşık %80’inde yakıt değişim süreleri 18 ay veya daha az bir

süredir. Toryum–uranyum içeren geliştirilmiş yakıtlar bu süreyi 24 – 36 ay civarına yükseltebilir [13].

Kapasite faktörlerine bakıldığında ise, en düşük oranın %35 UO<sub>2</sub> içeren ThO<sub>2</sub> – UO<sub>2</sub> yakıtta olduğu görülmektedir. %7,2 zenginleştirilmiş uranyum yakıtın ve %25 ve %30 UO<sub>2</sub> içeren ThO<sub>2</sub> – UO<sub>2</sub> yakıtların kapasite faktörlerinin %90,6 ile en yüksek değere sahip oldukları söylenebilir. Aynı anda burada toryum – uranyum yakıt karışımlarındaki toryum miktarının azalmasının kapasite faktörünü düşürebileceği çıkarımı da yapılabilir. Bu durumda belirlenen santral ihtiyaçları dahilinde uygun kapasite faktöründe çalışmayı sürdürebilmek için yakıttaki toryum oranının hesabının önemli olduğu vurgulanabilir.

Bu çalışmanın sonucunda görülmektedir ki; toryum içeren yakıtlar yanma oranlarına göre uranyum yakıtlarla rekabet edebilecek seviyelerdedir. Hatta toryum içeren yakıtlar daha az zenginleştirme ile yüksek performans gösterebilmektedirler.

Haileyesus Tsige–Tamirat tarafından yapılmış olan, “Basınçlı su reaktörlerinde toryum yakıtların kullanılması durumunda nötronik değerlendirme” adlı bir diğer çalışmada ise toryum içeren çeşitli yakıtlar incelenmiştir [14].

Bu çalışmada incelenen yakıtlar;

- Toryum–az zenginleştirilmiş uranyum (zenginleştirme miktarı %20’ den az)
- Toryum–plutonyum
- Toryum – uranyum-233
- Toryum – uranyum-235
- Ve uranyum (UO<sub>2</sub>)’dur.

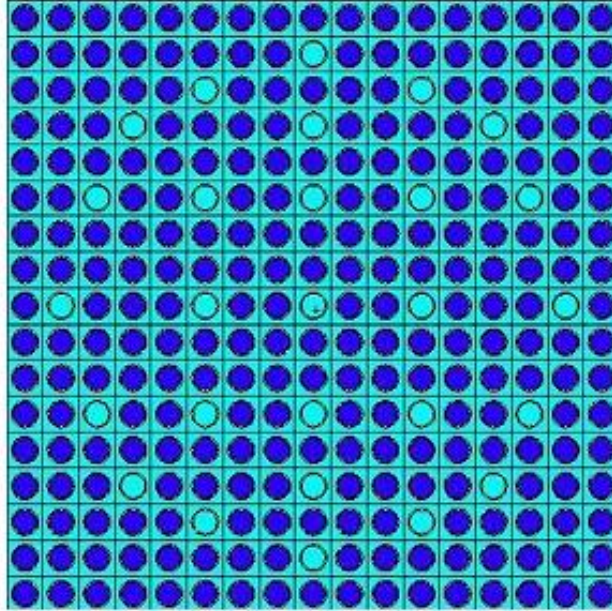
Yakıtlar açık çevrime (Once Through) göre incelenmiş ve referans şartlar kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Çizelge 2.4’te çalışmada referans alınan değerler verilmektedir.

**Çizelge 2.4:** Haileyesus Tsige–Tamirat’ın çalışmasında referans alınan koşullar [14].

**Referans Alınan Basıncılı Su Reaktörüne ait Karakteristik Veriler:**

Aktif uzunluk (cm)	365,8
Yakıt demeti kenar uzunluğu (cm)	21,5
Birim hücre kenar uzunluğu (cm)	1,26
Yakıt lokumu yarıçapı (cm)	0,41
Zarf iç yarıçapı (cm)	0,418
Zarf dış yarıçapı (cm)	0,475
Bir demetteki yakıt çubuğu sayısı	262

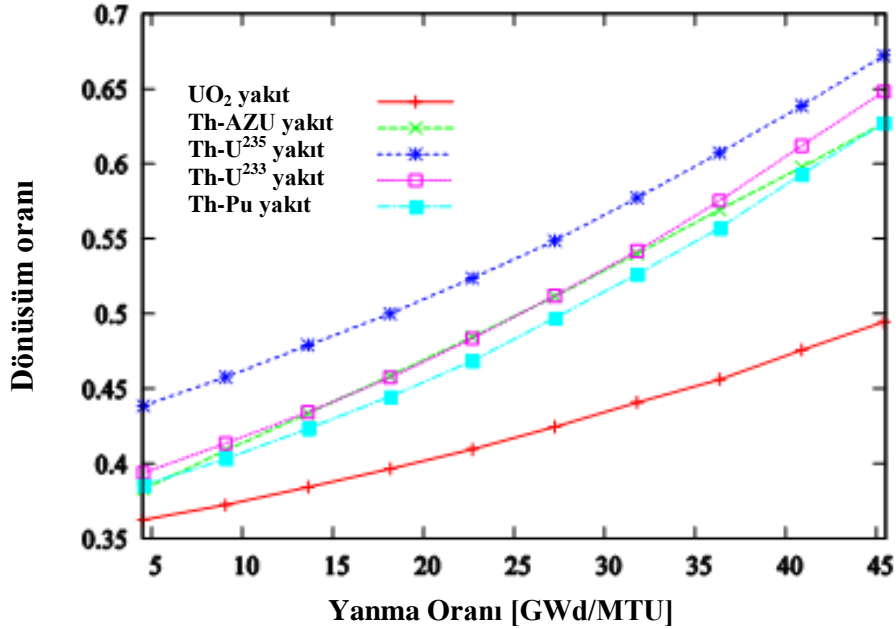
Çalışmada değerlendirilen yakıt demetinin üstten görünüş kesit şeması ise Şekil 2.6’da gösterilmektedir.



**Şekil 2.6:** Çalışmada değerlendirilen yakıt demetinin üst görünüş kesit şeması [14].

Şekil 2.6’da koyu mavi ile gösterilen alanlar yakıt çubuklarını temsil etmektedir. Aradaki boşluklar soğutucu akışkan için tasarlanmıştır. Çalışmada hesaplama yapılırken Monte Carlo metodundan yararlanılmıştır [14]. Çalışmada reaktörde tek geçişli açık çevrim ile (Once Through Cycle) yakıt ikmali yapılmaksızın kullanım esas alınmış; ortalama 45 GWgün/metrik ton yakıt büyüklüğündeki yanma oranlarına ulaşıldığında yakıtın tükenmiş olduğu kabul edilip, çıkarımlara varılmıştır. Bu referans yanma oranına kadar görülen yakıt dönüşüm oranları Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

Dönüşüm oranı, yakıtta harcanan birim mevcut fissil çekirdek başına oluşan fissil çekirdek oranını ifade etmektedir. Burada referans yanma oranına ulaşıldığında uranyum yakıtın yaklaşık yarısının dönüştüğü görülür. Toryum içeren yakıtlarda ise referans yanma oranına ulaşıldığında ise 0,7 – 0,6 oranında bir dönüşüm görülmektedir. Burada dönüşüm oranının büyük olması toryum yakıtlardan fissil uranyum-233 izotopu üretim miktarlarının yüksek olduğunu ifade etmektedir. Bu yüksek dönüşüm oranları toryum yakıtların uzun çevrim süreleri ile kullanılabilmelerine ya da kendi yakıtını üretebilen reaktörlerde yakıt olarak kullanılabilmelerine olanak sağlamaktadır. Bunun yanında yüksek dönüşüm oranları



Şekil 2.7: Çalışmada incelenen değişik yakıtlara ait dönüşüm oranları [14].

sayesinde toryum yakıtlar daha az zenginleştirilmiş uranyum yakıtlar ile beraber verimli bir şekilde kullanılabilir [14].

Ayrıca yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, toryum – uranyum-235 ve toryum – uranyum-233 yakıtların dönüşüm oranlarının, toryum içeren diğer yakıtlara nazaran daha iyi oldukları görülmektedir. Yapılan nötronik incelemeler, bugünkü PWR'ların yakıt demetleri ve kalplerinde herhangi bir değişikliğe gidilmeden Th-yakıt çevriminin U-Pu yakıt çevrimine göre işletme performansını arttırdığı ve güvenlik parametrelerinin de günümüz PWR'ları ile aynı düzeyde olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada tasarımılanan TANNES reaktörü için CANDU6 reaktörleri baz olarak alınmakta, toryum-az zengin uranyum yakıt, alçak basıncı ağır su moderatör ve yansıtıcı olarak, yüksek basıncı hafif su ise soğutucu olarak kullanılmaktadır. Yeni sistemde yakıt-su oranı ayarlanarak CANDU reaktörlerindeki pozitif boşluk katsayısı dezavantajı ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır.

Yu Jiyang ve diğerleri tarafından yapılmış olan “Toryum Destekli İleri Nükleer Enerji Sistemi” isimli çalışmada ise; Çin gibi toryumca zengin bölgelerde etkinlik ve verimlilikle kullanılacak bir toryum yakıtlı nükleer enerji sistemi tasarlanmış ve değerlendirilmiştir[15].

Bu çalışmada toryum yakıtlar kullanılırken, soğutucu boşluk reaktivite katsayısı (coolant void reactivity) hesabının önemi vurgulanmaktadır. Diğer çalışmalarda da görüldüğü üzere toryum içeren nükleer yakıtlar yüksek yanma oranlarına sahiptirler. Dolayısıyla toryum içeren yakıtların kullanımları sonucu açığa çıkan yüksek enerji, soğutucu akışkan ile güvenli ve kontrollü bir çevrim dahilinde reaktör dışına taşınmazsa soğutucu akışkanın hacminin artmasına veya soğutucu akışkanın fiziksel hal değiştirmesine sebep olabilir.

Bilindiği üzere hacmi artan maddelerin birim hacimdeki atom çekirdeği sayıları düşer ve bu maddelerin yavaşlatma veya nötron yutma gibi özellikleri azalır [17].

Reaktör tasarımında soğutucu boşluk katsayısının (Coolant void reactivity) hesaplanması ve kontrolü nükleer reaktör açısından büyük önem arz etmektedir. Çernobil kazasının önemli sebeplerinden biri de meydana gelen acil durumda

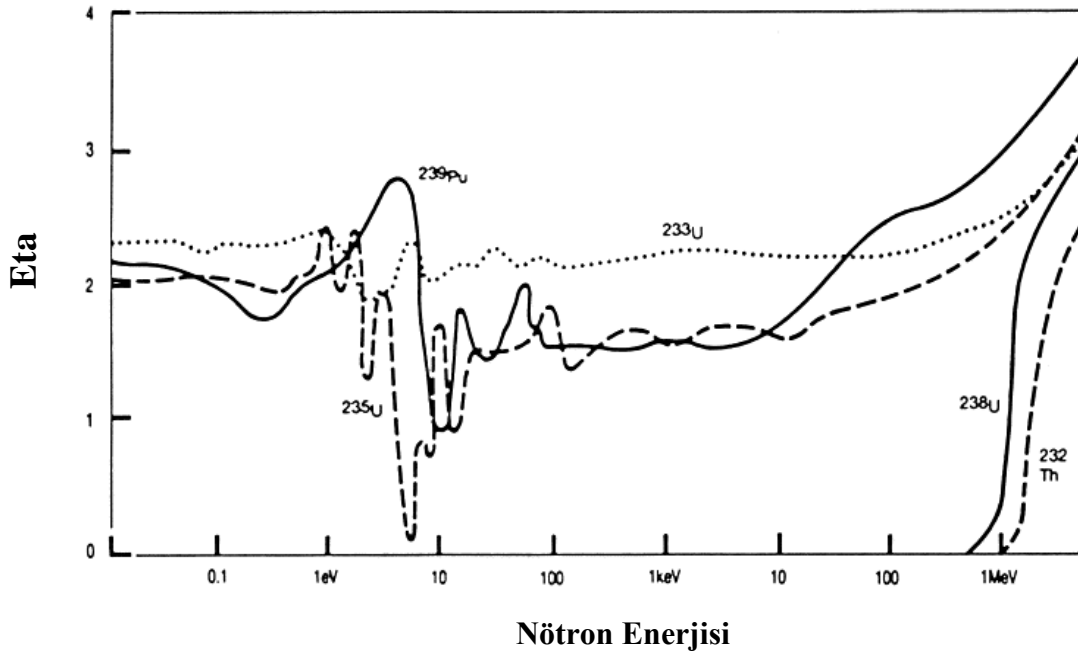


reaktörün soğutucu boşluk katsayısının kontrol dışına çıkarak pozitif hale gelmesidir [18]. Nükleer reaktörlerde sıcaklık artınca, doppler genişlemesi nedeniyle nötron yutulmaları artar ve bunun sonucunda çoğalma katsayısı ve reaktör gücü düşer. Bu olgu reaktörlerde pasif bir güvenlik önlemidir. Ancak tüm bunlara rağmen, açık kapsül tipli bir reaktör tasarımına sahip olan Çernobil RBMK reaktörü kazasında ise ne yazık ki pozitif soğutucu boşluk katsayısı, reaktörün kontrolden çıkmasına ve kazaya sebep olmuştur [18].

Sonuç olarak tasarlanan reaktörlerde güvenlik önemli bir etmendir ve güvenli reaktör tasarımlarında soğutucu boşluk katsayısı negatif olmalıdır ve toryum içeren nükleer reaktörler negatif soğutucu boşluk katsayısı davranışı gösterebilen yakıtlardır.

### 2.3.4 Toryum İçeren Yakıtların Nötron Verimleri

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere toryum içeren yakıtların kullanımıyla uranyum-233 izotopunun üretimi, toryum yakıtların diğer yakıtlarla rekabetleri açısından önemli bir avantajdır. Uranyum-233 izotopu muadillerine göre çok iyi eta (bir nesilde üretilen toplam nötron sayısının harcanan nötron sayısına oranı) değerine sahiptir. Dolayısıyla uranyum-233 zincirleme fisyon reaksiyonu yapabilme kabiliyeti yüksek bir fissil izotopdur. Şekil 2.8, çeşitli fissil ve fertil izotoplar için eta değerlerini göstermektedir.



Şekil 2.8: Çeşitli fissil ve fertil izotoplar için eta değerleri [19].

Şekil 2.8’de görülebileceği üzere, diğer fissil izotoplara göre, uranyum-233 izotopunun eta değeri farklı enerji seviyelerindeki nötronların çoğunda 2 ve üzeri değerler almaktadır.

Nötronların %100 verimle aktarıldığı bir zincirleme reaksiyonda, fisyon reaksiyonlarının devamlılıklarını sağlayabilmeleri için eta değeri teorik olarak 1 olmalıdır. Ancak %100 verim ancak teorik koşullarda varsayılabileninden dolayı reaktörün çalışmasını sürdürebilmesi için kullanılan yakıtta ait eta değerinin 1’den büyük olması gerekir.

Şekil 2.8’de ayrıca toryum-232 izotopu için eta değerinin yüksek enerji seviyelerinde 2’ye yaklaştığı görülmektedir. Ancak toryum-232 izotopundan oluşan fissil uranyum-233 izotopunun yüksek eta değeri, yakıt için nötron sayısını artırıcı bir etki gösterecektir.

Toryum-232 izotopunun fissil uranyum-233 izotopuna dönüşme kabiliyeti, bir önceki konuda değinildiği üzere, oldukça yüksektir. Bu sebeple toryum içeren yakıtlar nötron verimleri bakımından iyi birer nükleer reaktör yakıtları olabilirler. Eta değerinin yüksek olması aynı anda toryum içeren yakıtların daha az zenginleştirilmiş uranyum yakıtları ile birlikte çalışabilmesine imkân sağlayabilir.

### **2.3.5 Toryum Yakıt Atıklarının Ağır Metal Oranları ve Fisyon Ürünleri**

Nükleer yakıtlar ele alındığında en az yakıt performansları kadar önemli olan ve üzerinde durulması gereken bir diğer konu; yakıtların kullanımları sonucu oluşan ağır metal miktarları (aktinitler vb.) ve fisyon ürünleridir. Fisyon reaksiyonu sonucu bir reaktörde alt reaksiyonlardan oluşanlar ile birlikte 200’den fazla radyoaktif ürün oluşur [17]. Radyoaktif ürünlerin her biri karakteristik yarılanma ömürlerine sahiplerdir. Dolayısıyla nükleer reaktör içerisinde kullanılan yakıtın atık kontrolünün kolay olması amacıyla, oluşan fisyon ürünlerinin yarı ömürlerinin az olması istenir. Böylelikle radyoaktif ürünler içeren yakıt atıkları daha kolay kontrol edilebilir.

Uranyum’un fisyonu sonucu oluşan fisyon ürünlerinin yanında reaktör içerisindeki fertil veya fissil yakıtların nötron yutmaları sonucu radyoaktif ağır metallerin oluşumu görülebilir. Ağır metallerin depolanması ve kontrolü önemli ve zahmetli bir işdir. Örnek verilmesi gerekirse ağır metaller grubu içerisinde bulunan aktinit fissil

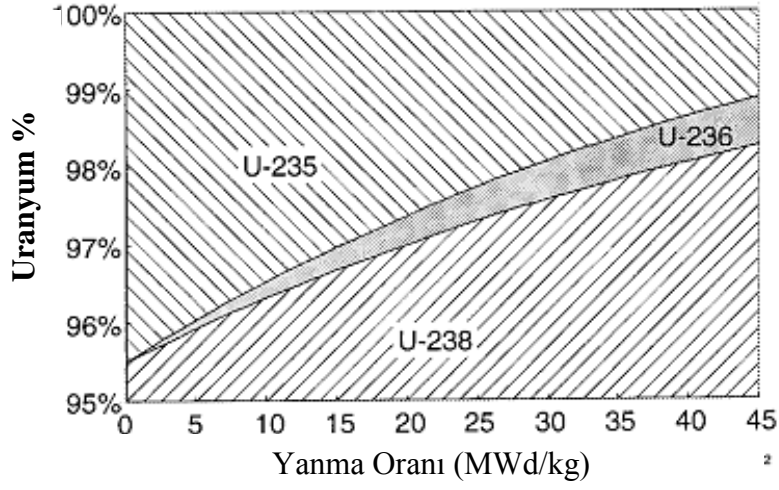
plutonyum 239 izotopunun yarılanma ömrü oldukça uzundur ve uzun süre depolanması ve korunması çevreyi koruma adına büyük önem taşır.

Toryum içeren yakıtlarda başlangıçta bulunan fissil yakıt ve reaktör içerisinde oluşan ve fisyon yapan fissil izotoplar; fisyon verimlerine göre kendilerinden daha düşük kütleli çekirdeklere bölünerek yakıt atıklarının bir kısmı olan fisyon ürünlerini oluştururlar. Burada önemli olan ve üzerinde durulması gereken yakıt içerisindeki fissil maddenin miktarıdır. Doğal olarak nükleer reaktördeki fisyon reaksiyonu sonucu fisyon yapabilen fissil atom çekirdekleri bölünerek kütlelerinin bir kısmı enerjiye dönüşecek ve diğer kısmı da fisyon ürünlerini meydana getirecektir, dolayısıyla tükenmiş yakıtta bulunacak bütün fisyon ürünlerinin kütleleri toplamı, kütle korunumu yasasına göre başlangıçtaki toplam fissil madde kütleleri ile doğru orantılı bir büyüklükte olacaktır. Bu sebeple bir nükleer yakıttan oluşacak fisyon ürünlerinin miktarı; fisyon ürünlerinin yaptıkları ışımların ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\frac{1}{0}n$  gibi) kütleleri haricinde başlangıçtaki fissil madde miktarı ile doğru orantılı olacaktır. Bir diğer ifade ile; bir nükleer yakıtı, oluşturacağı fisyon ürünlerinin miktarı bakımından bir diğeri ile kıyaslarken yakıtların zenginleştirme oranlarına ve yakıtların buldukları fissil madde miktarına göre kaba bir karşılaştırma yapılabilir.

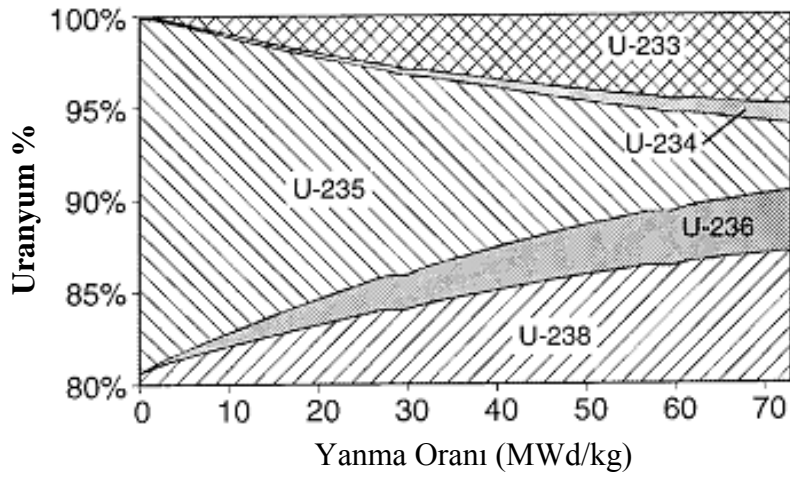
Toryum yakıtların daha az zenginleştirme ile kullanılabilme imkanlarından dolayı atıklarında uranyum yakıtlara göre daha az fisyon ürününün bulunacağı söylenebilir. Ancak yakıtın uzun süreli kullanımı dahilinde toryum-232'den oluşan uranyum-233 izotopunun fisyonu sonucu oluşacak fisyon ürünlerinin miktarı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Kontrolleri ve depolanmaları fisyon ürünlerine göre daha zahmetli olan ağır metaller, nükleer atık yönetiminde oldukça önemli konuma sahip bir diğer sorundur. Ağır metaller nükleer reaktörlerde ağır fertil maddelerin nötron yutmaları sonucu oluşmaktadır. Ağır metallerin işe yarayabilecek kısımları, kullanılmış yakıttan ayrılarak tekrar değerlendirilebilir ya da yarılanma ömürleri sürelerince uygun şartlarda muhafaza edilerek kontrol edilip depolanabilirler.

Toryum içeren yakıtlarda; ağır metaller grubunda bulunan minör aktinit üretimi uranyum yakıtlara göre daha azdır [13]. Dolayısıyla az minör aktinit



**Şekil 2.9:** 45 MW gün / kg yanma oranı ile 4 yıl kullanılan UO<sub>2</sub> yakıttaki uranyum oranları [13].

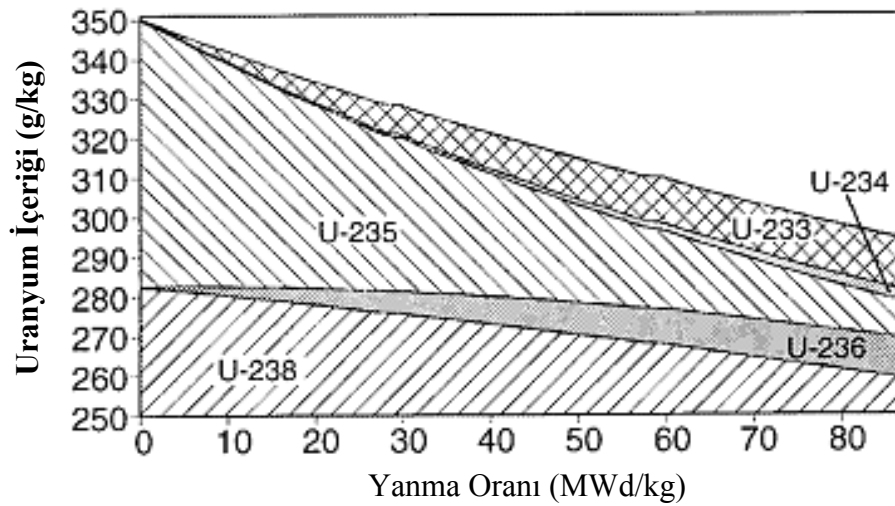


**Şekil 2.10:** 72 MW gün / kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70 ThO<sub>2</sub> - %30 UO<sub>2</sub> yakıttaki uranyum oranları [13].

üretimlerinden dolayı toryum içeren yakıtlar, atıklarının kontrolü konusunda uranyum yakıtlara göre daha üstündürler. Toryum içeren yakıtlarda daha az ağır metal üretimi aynı zamanda toryum yakıtlara proliferasyon direnci de kazandırmaktadır.

Herring, J., S. ve diğerleri tarafından yapılmış olan bir çalışmada günümüz hafif su reaktörlerinde kullanılmak üzere bir UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub> karışık yakıt çevrimi geliştirilmiştir. Bu çalışmada UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub> karışık yakıtlar ile geleneksel UO<sub>2</sub> yakıtlarda belirli bir

yanma oranı sonucundaki toplam uranyum içindeki farklı uranyum izotoplarının oranları da karşılaştırılmıştır [13]. Şekil 2.9'da 45 MW gün / kg yanma oranı ile 4 yıl kullanılan %4.5 zenginlikteki  $UO_2$  yakıtlardaki uranyum izotoplarının derişimleri gösterilmektedir. Şekil 1.10'da ise 72 MW-gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %19.5 zenginlikte %30  $UO_2$  içeren karışık  $UO_2$ - $ThO_2$  yakıtlardaki uranyum izotop derişimleri gösterilmektedir. Bu grafiklerde bir izotopun yakıt içindeki yüzdesi iki eğri arasında kalan uzunluk olmaktadır. Örneğin Şekil 2.10'den görüleceği gibi 20 MW-gün/kg yanma oranında uranyum derişimleri ağırlıkça %97 U-238, %0.3 U-236 ve %2.7 U-235 şeklindedir.  $UO_2$ - $ThO_2$  karışık yakıtta U-235 derişimi azalırken U-233 derişiminin arttığı gözlenmektedir. Başlangıçta yakıt içinde ağırlıkça %1.6 oranında ağır metal varken 72MW-gün/kg yanma oranı sonucunda çoğunluğu U-233 olmak üzere toplam uranyum içinde %7.7 oranında fisil çekirdek bulunmaktadır. 45 MW-gün/ton yanma oranına sahip klasik  $UO_2$  yakıtta çevrim sonunda U-236 derişimi %3.4 iken  $UO_2$ - $ThO_2$  karışık yakıtta sadece %0.61'dir. Nükleer atık açısından büyük öneme sahip 23 milyon yıl yarı ömürlü U-236 izotopunun  $UO_2$ - $ThO_2$  karışık yakıtta bu denli az üremesi bu tür yakıtların klasik  $UO_2$  yakıtlara göre daha avantajlı kılmaktadır.



**Şekil 2.11:** %65  $ThO_2$  - %35  $UO_2$  içeren ve 87 MW gün / kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan yakıttaki uranyum içeriği [13].

Yine bu çalışmada %19.5 zenginlikte %35  $UO_2$  ve %65  $ThO_2$  içeren karışık yakıtlar da ele alınmıştır. Bu yakıtların 87 MW-gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanıldıkları

dikkate alınarak toplam uranyum içindeki farklı uranyum izotoplarının miktarları hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şekil 2.11’de gösterilmektedir.

Şekil 2.11’de toplam uranyum miktarındaki fissil uranyum-235 izotopunun giderek azaldığı açıkça görülmektedir. Bu grafik incelendiğinde çevrim sonundaki U-233 miktarının U-235 miktarını geçtiği açıkça görülebilir.

Tsige – Tamirat, H. tarafından yapılmış olan bir çalışmada; toryum yakıt çevriminin basıçlı su reaktörlerinde kullanılmasının bir başka avantajı yani kullanılmış yakıtta üreyen minör aktinitlerin daha az olması konusu ele alınmıştır. Toryum yakıt çevrimi değişik fissil maddeler ile kullanıldığı yakıtlardan oluşan ağır metal miktarları iki farklı koşulda hesaplanmıştır. Bu koşullardan ilki 17 GW-gün/ton yanma oranı ve 450 etkin çalışma günü kullanımı ikincisi ise 45 GW-gün / ton yanma oranı ve 1200 etkin çalışma günü kullanımındır [14]. Bu hesaplamaların sonucu Çizelge 2.5’de sunulmuştur.

Çizelge 2.5 incelenirse toryum içeren yakıtlarda üreyen minör aktinitlerin klasik UO<sub>2</sub> yakıtlardan daha az olduğu görülebilir. Burada toryum ile birlikte kullanılacak fissil yakıtın kullanım sonrası oluşacak ağır metal çeşitliliğine olan etkisi dikkat çekmektedir. Bunun yanında reaktörde oluşan ağır metal miktarlarının bütün örneklerde miktarda az oldukları görülebilir.

En az ağır metal çeşitliliği toryum – uranyum-233 ve toryum – uranyum-235 yakıtlarında görülmektedir. Bunun yanında geleneksel uranyum yakıtlarda da ağır metal çeşitliliği oldukça fazladır.

Ancak ağır metal çeşitliliği konusunda toryum – düşük zenginleştirilmiş uranyum ve toryum – plutonyum yakıtların diğerlerine göre daha çok çeşitlilik gösterdikleri görülebilir.

### **2.3.5.1 Toryum Yakıtların Proliferasyon Direnci**

Proliferasyon, nükleer silah hammaddesi olarak kullanılabilen ağır metallerin nükleer teknoloji ile silahlanma amacıyla üretim ve çoğaltım faaliyetleridir. Giriş kısmında da değinildiği üzere dünya üzerinde bulunan her teknoloji gibi ne yazık ki nükleer

**Çizelge 2.5:** Toryumun farklı fissil maddeler ile kullanıldığı örneklerinden oluşan ağır metal miktarları [14].

Fissil Madde (kg)	Th – Az Zeng. Uranyum		Th – Pu		Th – U <sup>233</sup>		Th – U <sup>235</sup>		UO <sub>2</sub>						
	1. Koşul	2. Koşul	1. Koşul	2. Koşul	1. Koşul	2. Koşul	1. Koşul	2. Koşul	1. Koşul	2. Koşul					
Th – 232	346,4	342,4	334,9	441,1	436,4	427	442,4	438,4	429,9	442,3	437,6	427,9	-	-	-
Pa – 233	-	0,34	0,39	-	0,40	0,50	-	0,35	0,47	-	0,41	0,53	-	-	-
U – 233	-	2,67	5,23	-	3,26	6,61	24,25	18,53	11,6	-	3,17	6,122	23,54	15,16	5,82
U – 235	23,51	14,9	6,12	-	0,03	0,25	-	0,10	0,58	24,28	15,17	5,46	-	1,52	2,96
U – 236	-	1,58	2,97	-	-	0,02	-	-	0,06	-	1,68	3,21	-	-	-
U – 238	97,04	95,35	92,22	-	3,67	0,0	-	-	-	-	-	-	444,5	440,2	431,6
Pu – 238	-	-	0,08	0,26	0,22	0,26	-	-	-	-	-	0,08	-	-	0,09
Pu – 239	-	0,89	1,15	15,13	7,11	0,97	-	-	-	-	-	0,01	-	2,24	3,07
Pu – 240	-	0,13	0,31	5,89	5,62	2,89	-	-	-	-	-	-	-	0,32	1,01
Pu – 241	-	0,08	0,31	3,08	3,30	2,20	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,67
Pu – 242	-	-	0,11	1,28	1,59	2,32	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,24
<b>Toplam</b>	466,9	458,4	444,1	466,8	458,5	444,3	466,6	457,4	442,7	466,6	458,1	443,6	468	459,7	445,8

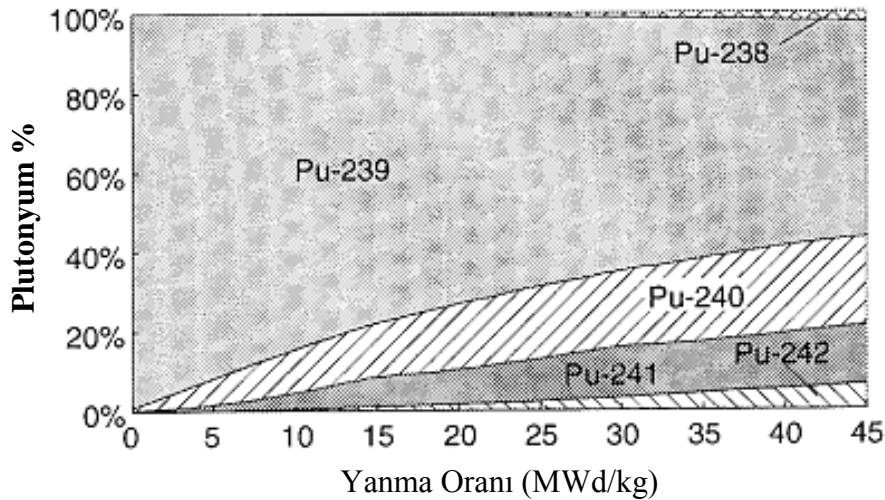
teknoloji de silah üretimi amaçlı kullanılmış ve uygulamaları insanlık tarihinde ağır sonuçlara mal olmuştur.

Hammadde üretme amaçlı reaktör kurmanın yanında, nükleer yakıtların atıklarında eser miktarda da olsa bulunabilen plutonyum-239 izotopu gibi fissil maddeler de ayrıştırılıp silah üretimi amaçlı kullanılabilir.

Toryum içeren yakıtlar muadillerine nazaran daha az ağır metal üretirler, dolayısıyla nükleer silah üretimine karşı proliferasyon direnci gösterirler. Toryum yakıtların bu özellikleri ve özellikle fissil plutonyum izotoplarının daha az üretimi; nükleer silah üretimi, çoğaltımı ve yaygınlaştırılmasına engel olur.

Plutonyum'un fissil izotopları nükleer silah üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel uranyum yakıtlı reaktörlerde enerji üretilirken fertil yakıtın nötron yutması sonucunda bir miktar plutonyum da üretilir.

Her ne kadar silah yapımında kullanılmayacak olsa bile nükleer santral atıklarında bulunan plutonyum veya silah yapımında kullanılabilen herhangi bir izotopun varlığı bile insanlığı şüpheye düşürmeye ve tedirgin etmeye yetmektedir. Zira bu malzemenin herhangi bir şekilde kötü niyetli çevrelerin eline geçmesi, gelecekte muhtemel bir felaketin yaşanmasına ve acı kayıplara sebebiyet verebilir. Dolayısıyla bu malzemelerin kontrolü ve yönetimi insanlığa karşı alınmış büyük bir sorumluluktur.

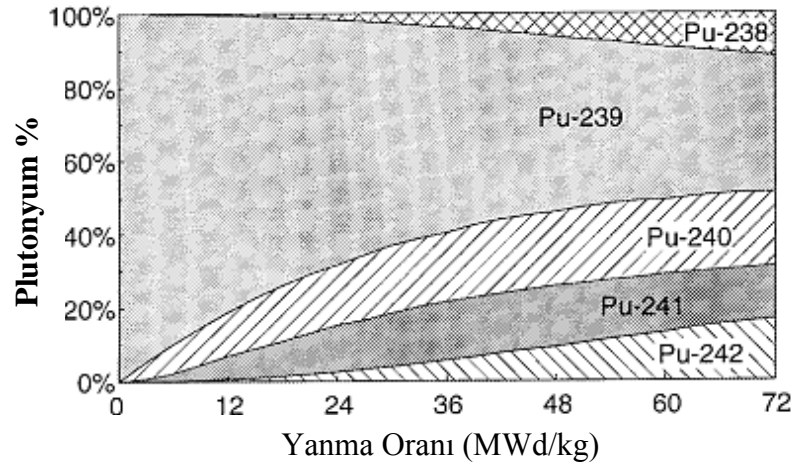


Şekil 2.12: 45 MW gün / kg yanma oranı ile 4 yıl kullanılan UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranları [13].

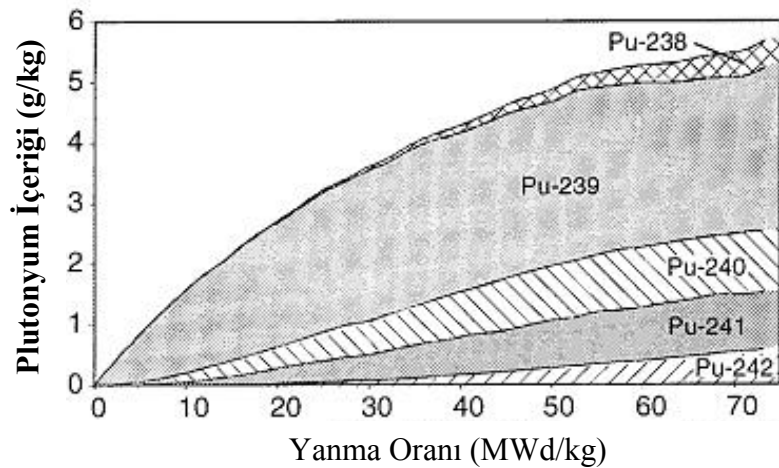


Herring, J. S. ve diğeri tarafından yapılmış olan çalışmada; toryum içeren yakıtlarda üreyen plutonyum miktarları ve toplam plutonyum içerisindeki derişimleri çeşitli hesaplanmış ve geleneksel uranyum yakıtlar ile karşılaştırılmıştır [13]. Şekil 2.12, 45 MW gün / kg yanma oranı ile 4 yıl kullanılan UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum izotoplarının toplam plutonyum içerisindeki oranlarını göstermektedir.

Şekil üzerinde de görülebileceği üzere nükleer silah yapımında kullanılabilir fişil plutonyum-239 ve plutonyum-241 izotoplarının oranı toplam plutonyum içerisinde %50'den fazladır. Buradan uranyum yakıtlarının proliferasyon dirençlerinin zayıf oldukları çıkarımı yapılabilir. Şekil 2.13, 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranlarını göstermektedir.



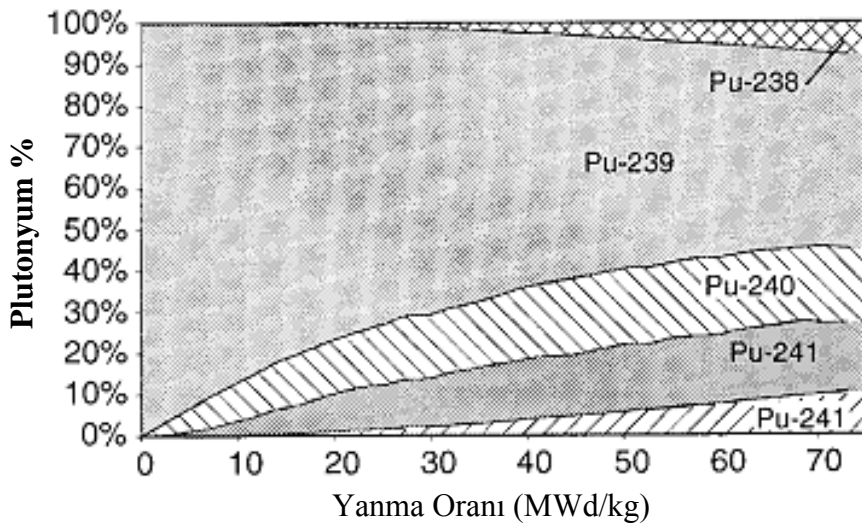
**Şekil 2.13:** 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranları [13].



**Şekil 2.14:** 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70 ThO<sub>2</sub> - %30 UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum miktarı [13].

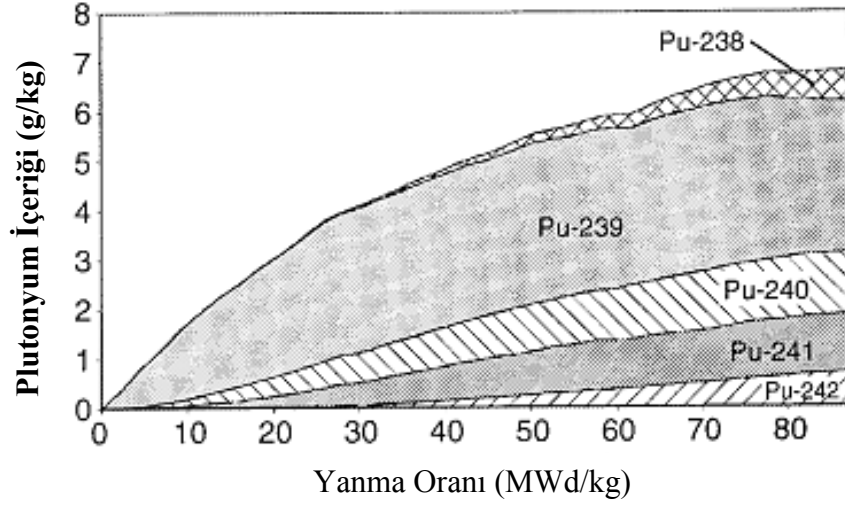
Şekil 2.13'te de görülebileceği üzere daha uzun ve daha yüksek yanma oranı ile kullanılan  $UO_2$  yakıtta fissil plutonyum oranı toplam plutonyum içerisinde yaklaşık %50 civarındadır. Ancak Şekil 2.12'te verilen grafiğe göre fissil plutonyum yüzdesi, Şekil 2.13'te verilen grafikteki plutonyum yüzdesinden daha büyüktür.  $UO_2$  yakıtın daha uzun ve daha yüksek yanma oranında kullanımını sonucunda toplam plutonyum kompozisyonu içerisinde fissil izotopların yüzdesi azalmaktadır.

Şekil 2.14, 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70  $ThO_2$  - %30  $UO_2$  yakıtta oluşan plutonyum miktarını göstermektedir. Burada bir kilogram %70  $ThO_2$  - %30  $UO_2$  yakıtın kullanılması ile yaklaşık 5–6 gram plutonyum üretileceği hesaplanmıştır. Bu plutonyumun üretiminde önemli bir kaynak olarak %70  $ThO_2$  - %30  $UO_2$  yakıttaki fertil uranyum-238 izotopu gösterilebilir. Fertil uranyum-238 izotopu nötron yutup iki beta ışınını yaparak fissil plutonyum-239 izotopuna dönüşebilir. Şekil 2.14'te oluşan plutonyumun büyük bir kısmının uranyum-238 izotopundan oluştuğundan yola çıkılarak; nükleer reaksiyon zinciri sonucu yakıttan üretilen plutonyum miktarının yakıt içerisindeki uranyum-238 izotopunun miktarı ile kabaca doğru orantılı olacağı söylenebilir. Dolayısıyla %70  $ThO_2$  - %30  $UO_2$  yakıt kompozisyonundan oluşan plutonyum miktarının düşük uranyum 238 izotopu miktarı sebebiyle az olacağı düşünülebilir. Şekil 2.15, 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70  $ThO_2$  - %30  $UO_2$  yakıtta oluşan plutonyum oranlarını göstermektedir.

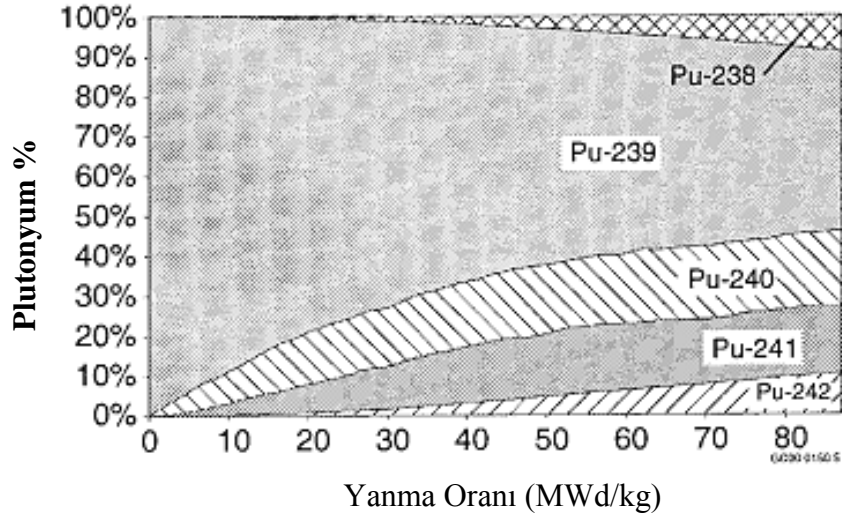


**Şekil 2.15:** 72 MW gün/kg yanma oranı ile 6 yıl kullanılan %70  $ThO_2$  - %30  $UO_2$  yakıtta oluşan plutonyum oranı [13].

Şekil 2.15' te de görüleceği üzere %70 ThO<sub>2</sub> - %30 UO<sub>2</sub> yakıttaki plutonyum oluşum oranı ile %100 UO<sub>2</sub> yakıttaki plutonyum oluşum oranı grafikleri benzerlik göstermektedirler. %70 ThO<sub>2</sub> - %30 UO<sub>2</sub> yakıttaki toplam plutonyum miktarının yaklaşık %50'sini fissil plutonyum izotopları oluşturmaktadır. Şekil 2.16, 87 MW gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan %65 ThO<sub>2</sub> - %35 UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum miktarını göstermektedir.



Şekil 2.16: 87 MW gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan %65 ThO<sub>2</sub> - %35 UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum miktarı [13].



Şekil 2.17: 87 MW gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan %65 ThO<sub>2</sub> - %35 UO<sub>2</sub> yakıtta oluşan plutonyum oranları [13].

Şekil 2.16'da görüldüğü üzere daha yüksek yanma oranında ve daha uzun süre kullanılan %65 ThO<sub>2</sub> - %35 UO<sub>2</sub> yakıtın bir kilogramının tüketilmesi sonucu

yaklaşık olarak 6–7 gr plutonyum oluşmaktadır. Oluşan plutonyumun büyük bir bölümünü yine fissil izotoplar oluşturmaktadır.

Bir önceki paragrafta değinildiği üzere yakıttaki  $UO_2$  miktarının artması, dolayısıyla uranyum-238 izotopunun miktarca artması, üretilen plutonyum miktarını arttırmıştır. Şekil 2.17, 87 MW gün/kg yanma oranı ile 7,5 yıl kullanılan %65  $ThO_2$  - %35  $UO_2$  yakıtta oluşan plutonyum oranlarını göstermektedir.

Şekil 2.17’de görülebileceği üzere fissil plutonyum izotopları toplam plutonyum miktarının yaklaşık %60’ını oluşturmaktadır. Burada yakıt içerisindeki  $UO_2$  yüzdesinin daha fazla olması fissil plutonyum yüzdesinin fazla olmasına sebebiyet vermiştir.

İncelenen çalışmada toryum içeren yakıtların proliferasyon dirençleri açıkça görülmektedir. Birim kilogramında yaklaşık 5–6 gram plutonyum üretimi, toryum içeren yakıtların proliferasyon direncinin üstünlüğünün açık bir göstergesidir.

Ayrıca bu çalışmada  $UO_2$ - $ThO_2$  karışık yakıtlarda üreyen toplam plutonyum miktarının 3.2 kat, Pu-239 miktarının ise 4 kat daha az olduğu sonucuna varılmıştır [13].

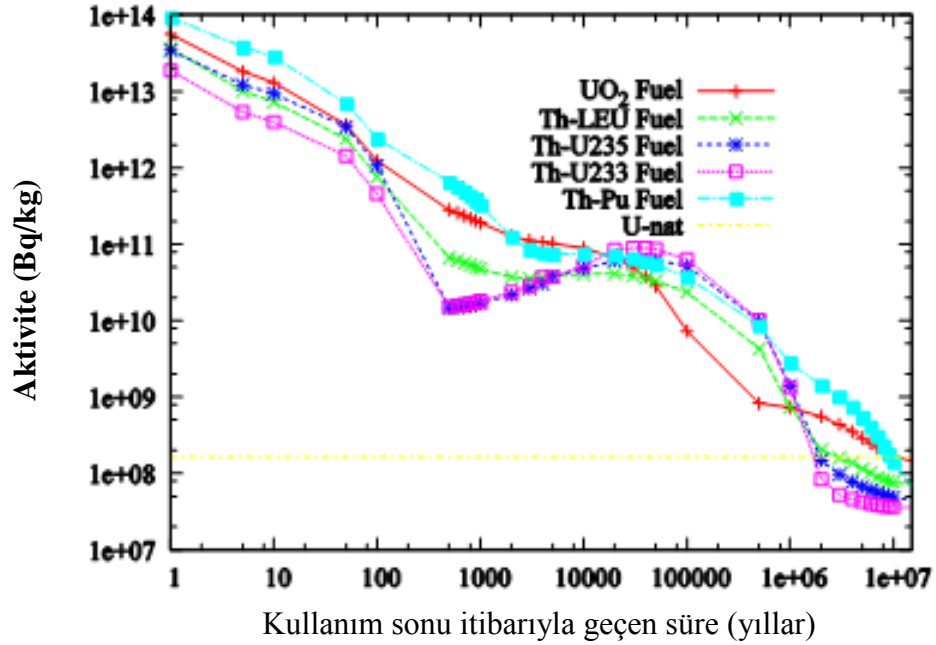
### **2.3.6 Toryum Yakıt Atıklarının Yönetimi**

Toryum yakıtlar, tüm nükleer yakıtlar gibi kullanım ömürleri sonunda içerdikleri radyoaktif atıkların yarılanma süreleri boyunca, uygun şartlarda, güvenle muhafaza edilmelidir. Uranyum yakıtlara göre atıklarında daha az minör aktinit oluşumu, toryum yakıtları radyoaktif zehirlilik konusunda uranyum yakıtlardan daha az zehirli yapmaktadır. Ayrıca toryum-232 izotopunun yakıtın kullanımı esnasında nötron yutarak uranyum-233 izotopuna dönüşümü, yakıtın kapalı çevrime göre kullanılması durumunda atıklarının değerlendirilebilmesi ve yeniden kullanılabilmesi bakımından toryum içeren yakıtlar için önemli bir avantajdır.

Tsige–Tamirat, H., tarafından yapılmış olan çalışmada; toryumun farklı fissil maddeler ile kullanıldığı örneklerinin açık çevrim (once through) sonucunda yakıt atıklarının davranışları; 45 GW gün/metrik ton yanma oranında kullanım sonunda soğutma zamanının bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır [14].

Şekil 2.18, incelenen yakıt tiplerine ait, yakıt kullanımının sonunda atıklarda görülen radyoaktiviteyi becquerel (Bq)/kilogram cinsinden ifade etmektedir. Burada  $UO_2$  yakıt atığındaki radyoaktivitenin düzenli olarak azaldığı gözlenmektedir. 1000 yıla kadar soğutulmada  $UO_2$  ve Th–Pu yakıtlardaki radyasyon salınımının diğer yakıtların oldukça üzerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca 1000 yıla kadar soğutulma süresince Th–az zenginleştirilmiş uranyum, Th –  $U^{235}$ , Th –  $U^{233}$  yakıtlarının atıklarının radyoaktivite seviyelerinde ciddi bir azalma görülmektedir.

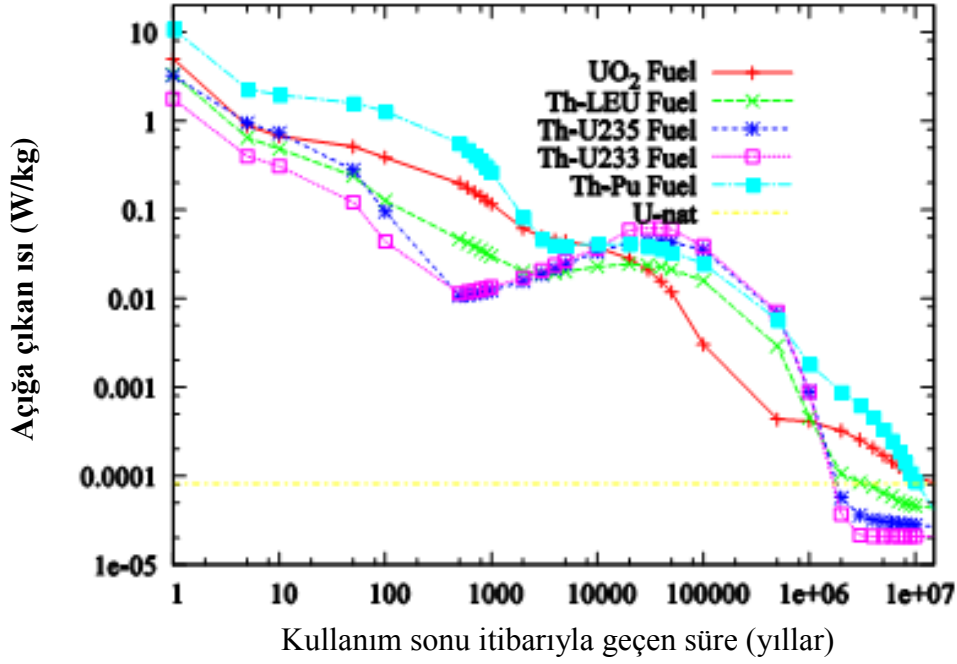
1000 soğutma yılı sonrasında ise Th–az zenginleştirilmiş uranyum, Th –  $U^{235}$ , Th –  $U^{233}$  ve Th–Pu yakıtlarının, bir başka ifade ile toryum içeren yakıtların atıklarının radyoaktivite seviyelerinde kaydadeğer bir artış görülmektedir. Bu artışın sebebi olarak bu yakıtların içeriğindeki fertil toryum-232 izotoplarının, fissil uranyum-233 izotopuna dönüşümü söylenilebilir. Bu çalışma yakıtları, atık değerlendirmesi ve kullanımı olmayan, yakıtların kullanımından sonra atıklarının depolanarak kontrol edildikleri, açık çevrime göre değerlendirdiği için toryum içeren yakıtlarda oluşan fissil uranyum-233 izotopunun radyoaktiviteye etkisi de görülmektedir. Şekil 2.18, çalışmanın grafik sonuçlarını göstermektedir.



**Şekil 2.18:** 45 GW gün / metrik ton yanma oranında kullanım sonunda soğutma zamanının bir fonksiyonu olarak yakıt atıklarının radyoaktivitesi [14].

Şekil 2.19 ise, incelenen yakıt tiplerine ait kullanım sonu itibarıyla yıllara göre atıkların ürettiği ısıyı watt / kilogram cinsinden ifade etmektedir. Doğal olarak, Şekil

2.19'deki üretilen ısı miktarı grafiği ile Şekil 2.18'deki radyoaktivite miktarı grafiği benzerlik göstermektedir. Atıkların radyoaktivite ve üretilen ısı miktarları arasında doğru orantılı bir ilişki gözlemlenmektedir. Yine aynı şekilde Th–Pu yakıt hariç toryum içeren yakıt atıklarında, 1000 soğutma yılına kadar aktivitede düşüş ve 1000 soğutma yılından sonra ise aktivitede yükseliş görülmektedir.



**Şekil 2.19:** 45 GW gün / metrik ton yanma oranında kullanım sonunda soğutma zamanının bir fonksiyonu olarak yakıt atıklarının ürettiği ısı miktarı [14].

Şekil 2.18 ve 2.19'da toryum yakıt artıklarındaki radyoaktivite ve üretilen ısı miktarlarında, 1000 soğutma yılı öncesine kadar görülen düşüş ve 1000 soğutma yılı sonrasında görülen ani yükseliş, toryum içeren yakıtların sahip oldukları güç potansiyellerinin ve nükleer reaktörlerde uzun ömürlü yakıtlar olarak kullanılacaklarının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Ayrıca uranyum-233 üretimi sayesinde toryum içeren yakıtların, kapalı çevrime göre kullanımları; yeniden değerlendirilmeleri ve geri dönüşümleri mümkündür ve daha mantıklıdır. Aksi takdirde toryum içeren nükleer yakıtların atık yönetimleri, bir diğer ifade ile özel koşullarda saklanmaları ve depolanmaları maliyetli olacaktır.

Toryum içeren yakıt atıklarında bulunabilen fertil uranyum-232 izotopu çok yüksek enerjili gama ışınları yayan bir çekirdektir. Bu durum, toryum içeren yakıtların atıklarına doğrudan insan eli ile müdahale edilmesini imkansız kılmaktadır. Toryum

içeren yakıt atıkları yalnızca robot teknolojisi ve vinç sistemleri ile uzaktan taşınıp, depolanabilir ve kontrol edilebilir. Bu durum herhangi bir hırsızlık durumunu neredeyse olanaksız kılıp zorlaştırarak, toryum içeren yakıtların proliferasyon dirençlerine katkıda bulunmaktadır.

Tüm bu değerlendirmeler sonucunda toryum içeren yakıtların açık çevrime göre kullanılacakları, ancak kapalı çevrime göre kullanıma ve atıklarının yeniden değerlendirilmeye uygun olduğu açıkça görülmektedir. Mantıklı olan, toryum içeren yakıtları kapalı çevrime göre kullanmak ve bu yakıtlardan daha etkin ve verimli olarak, daha uzun süreler faydalanabilmektir.





### **3. YEREL ENERJİ KAYNAĞI OLARAK TORYUM İLE NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNİN TÜRKİYE BAKIMINDAN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ VE EKONOMİK DEĞERLENDİRMESİ**

Bir nükleer yakıtın maliyeti incelenirken, yakıtın bileşenlerinin madenden çıkarıldığı andan itibaren atıklarının tamamıyla kontrolünün sağlanmasına kadar geçen süreç bir bütün olarak incelenmeli ve göz önünde bulundurulmalıdır. Nükleer yakıtlar fissil ve fertil yakıtların karışımları ile oluşturulurlar. Toryum içeren yakıtlar ise fertil toryum izotopları ve fissil izotopların karışımı ile oluşturulur.

Dolayısıyla her iki madenin de temini, kullanımı ve sonrasına ait atık yönetimi işlemleri, toryum içeren yakıtların toplam maliyetine etki eder. Tez çalışmasının bu bölümünde tüm bu konular incelenecek ve değerlendirilecektir.

#### **3.1 Toryum Madenciliği ve İşleme Maliyetlerinin Değerlendirilmesi**

Doğada bulunan her maden, yer altında yüksek basınç ve çeşitli çevresel etkilere maruz kalarak uzun yıllar içerisinde çeşitli tipte kayaçlar halinde bulunmaktadır. Çeşitli madenlerin karışımlarından oluşan kayaçlar cevher olarak adlandırılırlar. Dolayısıyla çoğu maden doğada %100 saflıkta bulunamaz. Bu sebeple madenlerden çıkarılan cevherler işlenerek ve ayrıştırılarak daha yüksek saflıklara ulaşmaları amaçlanır.

Tüm bu saflaştırma işlemleri madenin çıkarımından kullanımına kadar olan maliyetlerini etkilemektedir. Saflığı daha yüksek minerallere sahip bir cevheri çıkarmak ve işlemek, daha düşük saflıktaki bir cevherin çıkarımı ve işlenmesinden daha ucuzdur ve daha kârlıdır.

Bu sebeple Türkiye'nin toryum rezervlerinin kullanımında karlılık ve verimlilik incelenirken; mevcut madenlerden çıkarılan cevherlerin tenör oranları dikkate alınmalıdır. Tenör oranı bir cevherin içerisinde bulunan farklı minerallerin miktarda

oranlarını belirtir. Tenör hesaplamaları, madenlerin keşfi ve topraktaki nadir elementlerin araştırımı, ülkelerin yer altı zenginliklerini tanıyabilmeleri adına büyük önem taşır.

Türkiye’de yapılan çalışmalar, Eskişehir ve civarındaki madenlerde 380.000 ton toryum oksit rezervleri bulunduğunu belirtmektedir [20]. Bu çalışmalarda bazı toryum madenlerinin işletimlerinin kaba hesapla kârlı olduğu, bazılarının ise maliyetlerini karşılayamayacakları görülür. Ancak kârlı olan madenlerde, kârlılığın devamını sağlayabilmek için, toryum ile birlikte diğer nadir elementlerin de çıkartılması ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

İncelenen toryum rezervlerinde bulunan nadir elementlerin toplam rezerv ağırlığına oranları %3 civarındadır. Cevherlerin içerdiği ve nükleer yakıt çubuğu zırlamasında da kullanılabilen Yttria elementinin miktarı kaydadeğer büyüklüklerde [20]. Eskişehir’deki bazı rezervlerde nadir element miktarları % 8 – 9’lara ulaşmakta ve bunların %0,12 – 0,02’sini toryum oluşturmaktadır [20]. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de Eskişehir madenlerinden alınan örneklerin tenör oranlarını göstermektedir [20].

**Çizelge 3.1:** Madenlerden alınan örneklerin tenör oranları [20].

<b>Element</b>	<b>KTS -1</b>	<b>KTS – 2</b>	<b>KTS – 3</b>	<b>KTS – 4</b>
<b>Na (g/kg)</b>	-	7,2	7,8	8,3
<b>Fe (g/kg)</b>	26,7	96,5	26,0	18,8
<b>Sr (g/kg)</b>	-	2,50	1,3	18,8
<b>Y (g/kg)</b>	-	-	-	42,3
<b>Ba (g/kg)</b>	111	132	36	145
<b>La (g/kg)</b>	3,84	9,42	4,35	12,5
<b>Ce (g/kg)</b>	15,3	13,6	4,8	12,0
<b>Nd (g/kg)</b>	14,8	3,4	1,3	2,5
<b>Sm (g/kg)</b>	3,00	0,63	0,15	0,35

**Çizelge 3.1(Devam):** Madenlerden alınan örneklerin tenör oranları [20].

<b>Element</b>	<b>KTS -1</b>	<b>KTS – 2</b>	<b>KTS – 3</b>	<b>KTS – 4</b>
<b>Th (g/kg)</b>	5,3	2,9	2,9	1,5
<b>Sc (mg/kg)</b>	18,0	14,6	10,6	8,4
<b>Cr (mg/kg)</b>	500	39,1	30,1	168
<b>Co (mg/kg)</b>	25,8	1,8	1,4	1,0
<b>Zn (mg/kg)</b>	-	-	360	210
<b>As (mg/kg)</b>	200	-	160	-
<b>Zr (mg/kg)</b>	143	87	94	104
<b>Nb (mg/kg)</b>	3,0	1,2	1,6	7,0
<b>Sb (mg/kg)</b>	5,6	2,9	3,8	10,7
<b>Cs (mg/kg)</b>	10,3	1,0	1,8	5,0
<b>Eu (mg/kg)</b>	370	71,1	27,4	41,3
<b>Gd (mg/kg)</b>	540	420	520	150
<b>Tb (mg/kg)</b>	54	12,5	8,2	11,3
<b>Yb (mg/kg)</b>	62,6	28,4	21,9	37,4
<b>Lu (mg/kg)</b>	-	-	36,2	-
<b>Hf (mg/kg)</b>	4,2	10,6	30,1	4,4
<b>U (mg/kg)</b>	9,4	181	8,0	8,61

**Çizelge 3.2:** Madenlerden alınan örneklerin tenör oranları [20].

<b>Element</b>	<b>Dolamit – 2</b>	<b>Dolamit – 4</b>	<b>K. Höyükü</b>	<b>K. Devebağrtan</b>
<b>Na (g/kg)</b>	-	16,0	-	-
<b>Fe (g/kg)</b>	4,30	5,18	2,69	3,19
<b>Sr (g/kg)</b>	-	1,55	2,34	-
<b>Ba (g/kg)</b>	0,44	0,45	109	72,6

**Çizelge 3.2(Devam): Madenlerden alınan örneklerin tenör oranları [20].**

<b>Element</b>	<b>Dolamit – 2</b>	<b>Dolamit – 4</b>	<b>K. Höyükü</b>	<b>K. Devebağırta</b>
<b>La (g/kg)</b>	5,0	-	10,3	12,4
<b>Ce (g/kg)</b>	6,2	5,0	21,3	22,0
<b>Nd (g/kg)</b>	-	-	3,9	-
<b>Gd (g/kg)</b>	1,13	0,41	0,19	0,41
<b>Th (g/kg)</b>	11,5	4,0	2,4	3,0
<b>Sc (mg/kg)</b>	35,2	32,2	14,0	42,5
<b>Cr (mg/kg)</b>	27,7	82,8	74,4	66,6
<b>Co (mg/kg)</b>	27,2	22,2	5,3	-
<b>Zn (mg/kg)</b>	210	-	200	95
<b>As (mg/kg)</b>	-	-	-	1,27
<b>Y (mg/kg)</b>	-	-	840	-
<b>Zr (mg/kg)</b>	144	165	97	95
<b>Nb (mg/kg)</b>	6,08	4,20	1,05	1,27
<b>Mo (mg/kg)</b>	-	-	46,7	-
<b>Sb (mg/kg)</b>	20,5	23,8	11,4	4,0
<b>Cs (mg/kg)</b>	11,5	4,8	9,2	8,4
<b>Eu (mg/kg)</b>	20,6	11,8	46,0	67,8
<b>Tb (mg/kg)</b>	17,4	6,6	8,0	18,5
<b>Yb (mg/kg)</b>	69,0	50,6	19,2	28,7
<b>Lu (mg/kg)</b>	-	-	2,15	-
<b>Hf (mg/kg)</b>	4,22	3,37	1,38	9,71
<b>Ta (mg/kg)</b>	1,0	0,95	-	1,46
<b>U (mg/kg)</b>	-	996	24	45

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'deki verilerden açıkça görülebileceği üzere Eskişehir'de zengin toryum içeriklerine sahip madenler mevcuttur. Ancak bu cevherlerde yalnızca toryumun çıkarılması ve işlenmesi maliyetli olacaktır. Bu sebeple kârlılık bakımından bu madenler işletilirken birçok madenin birlikte çıkarılıp değerlendirilmesi daha verimli ve ekonomik bakımdan cazip olacaktır.

Toryumu yerel kaynak olarak etkin ve verimli kullanabilmek için; üretim maliyetini makul seviyelere taşıyabilmek ve diğer enerji kaynakları ile rekabet edebilecek fiyatlarda hizmete sunabilmek gerekir. Aksi takdirde yüksek maliyetin getireceği yüksek fiyat dolayısıyla hiçbir yatırımcı veya maden işletmesi, toryum kaynaklarının değerlendirilmesi fikrini mantıklı ve kârlı bulmayacaktır. Dolayısıyla makul maliyetinin yatırımcıyı madeni işletmeye ve kullanmaya teşvik etmesi, toryum kaynaklarımızın etkin ve verimli kullanımını için büyük önem taşımaktadır.

Tenör oranları verilen toryum rezervleri  $\text{ThO}_2$  (toryum oksit) formundadır. Tenör verileri göz önünde bulundurularak hayali bir santral için %80  $\text{ThO}_2$  içeren yakıttan 1 ton gerekmesi durumunda 800 kg  $\text{ThO}_2$ 'ye ihtiyaç duyulacaktır. Bu miktarın temini için tenör oranları verilmiş örneklerden iyimser durumda (en yüksek toryum oranında); yaklaşık 69,5 ton cevher işlenmesi gerekmektedir. Kötümser durumda ise (en düşük toryum oranında) bu miktar yaklaşık 533 tona çıkmaktadır. Buradan da açıkça görülmektedir ki, %80  $\text{ThO}_2$  içeren 1 ton yakıtın toryum miktarını karşılayabilmek için 69,5 ton ila 533 ton arası cevher işlenmelidir.

1 ton cevherin maden işletmecisine olan çıkarım maliyeti, üretim ve kapasite planlaması yapılarak, teknolojik imkânlar daha etkin kullanılarak vb. yöntemlerle ne kadar azaltılabilirse, toryum içeren yakıtların hammadde maliyeti buna doğru orantılı olarak azalacaktır. Ancak yinede tek bir madenin cevherden çıkartılmasının yerine cevherin içerdiği farklı madenlerin birlikte çıkartılması ve değerlendirilmesi daha verimli bir faaliyet olacaktır. Böylelikle farklı minerallerin ortak cevherden çıkarılmaları, bu madenlerin üretim maliyetlerini düşürecektir.

Nitekim toryum içeren yakıt üretilirken yalnızca toryuma bağlı kalınmamaktadır. Toryum ile beraber kullanılan fissil madde (genellikle ticari amaçlı reaktörlerde fissil

yakıt olarak uranyum izotopları kullanılmaktadır) miktarı da önemlidir. Fisil yakıtın toplam yakıt içerisindeki miktarı zenginleştirme oranı ile belirlenir.

Yakıt zenginleştirimi ve üretimi, oldukça maliyetli bir işlemdir. Yakıt zenginleştirimi için yakıt işleme ve zenginleştirme tesisi kurmak gerekmektedir. Bu tesisleri kurmak oldukça zahmetli ve yüksek maliyetlidir. Dolayısıyla Türkiye'nin toryum madenlerini nükleer teknoloji ile verimli kullanmasının önündeki en büyük engellerden biri, kendi yakıt zenginleştirme tesislerine sahip olmaması ve dolayısıyla yakıtın bu kısmını dışarıdan ithal etmek zorunda kalmasıdır. Bunun yanında yakıt zenginleştirme tesisine sahip olmaması, Türkiye'nin ileride muhtemel nükleer yakıt temin problemleri ile karşılaşabileceğinin bir işaretidir.

Bir ülkenin kendi uranyum zenginleştirme tesisini kurması, nükleer enerji santrallerine ilişkin yeterli yakıt arzının garantiye alınmasını sağlar. Böylesi bir altyapı, ülkenin enerji bağımsızlığına ve ulusal enerji güvenliğine katkıda bulunacaktır [21].

Yakıt zenginleştirme tesisi kurmanın yanında Türkiye, toryum rezervlerini nükleer enerji ile etkin ve verimli kullanabilmek adına, kendi yakıt zenginleştirme tesisine sahip ülkeler ile kendi çıkarlarını göz önünde bulundurarak uranyum ticaretinin devamlılığını sağlayacak çeşitli politik anlaşmalar yapabilir.

Bunun yanı sıra Türkiye toryum içeren nükleer yakıt üretebilmek için fisil yakıt stoğu yapabilir. Böylelikle yakıt tedariği konusunda sıkıntı yaşamayıp, yakıtları düşük fiyattan alabilme imkânına da sahip olabilir. Özellikle yakıt işleme ve zenginleştirme tesislerinin yüksek kurulum maliyetleri düşünüldüğünde, Türkiye toryum içeren yakıtları kullanabilmek adına ilk aşamada stok stratejisi izleyebilir. Böylelikle ülkenin nükleer enerjideki gelişimi ve toryum içeren yakıtların kullanımı politikasını istikrarla sürdürebilir.

### **3.2 Toryum İçeren Yakıtların Üretimleri**

Nükleer yakıt çubuklarının üretim süreçleri esas olarak üç aşamadan meydana gelmektedir [22];

- $UF_6$ ,  $UO_3$ 'ten saf  $UO_2$  üretimi ve ihtiyaca göre zenginleştirme işlemi.

- Fissil ve fertil yakıtların homojen karışımlar halinde sıkıştırılıp, yoğunlaştırılması ve kullanılacak reaktör şartlarına göre seramik forma sokulup şekillendirilerek yakıt lokumlarının üretimi.
- Genellikle Zirkonyum ile oluşturulan rijit yakıt zarfının üretilmesi ve yakıt lokumlarının zarf içerisine yerleştirmeleri, üretilen yakıt çubuğu için sızdırmazlığın sağlanması ve yakıt çubuklarının birleştirilerek yakıt demetinin üretimi.

Çakıl taşı yataklı reaktörlerin (Pebble bed reactors) yakıtları, çubuk formundan daha farklıdır ve üretimi için saflaştırma ve zenginleştirme işleminden sonra homojen yakıt karışımı bilye biçiminde yoğunlaştırılarak dış yüzeyi sızdırmaz malzeme ile zarflanır. Şekil 3.1, Nükleer yakıt üretimini şema halinde göstermektedir.



**Şekil 3.1:** Nükleer Yakıt Üretim Şeması

Toryum içeren yakıtların kullanıma uygun kalitede üretilmelerini için yüksek sıcaklıkta sinterlenmeleri gerekmektedir. Bu durum toryum içeren yakıtların üretim süreçlerini zorlaştıran ve maliyetleri arttıran bir dezavantajdır. Erimiş tuz reaktörlerinde toryum, toryum tetraflorit olarak kullanılarak, yakıt hazırlamadaki zahmet azaltılmak istenmiştir [12].

Burada açığa çıkan önemli bir sonuç, toryum kaynaklarımızı nükleer yakıtlar halinde etkin ve verimli bir biçimde kullanabilmek için mutlaka kendi yakıt işleme tesisimizi kurmamız gerektiğidir. Yakıt işleme ve üretim tesisi kurmak, nükleer enerjiden yararlanabilmek için başlangıç aşamasında elzem bir şart değildir. Böyle bir tesisin kurulum maliyetinin yüksek olması, ülkenin nükleer enerjiye bütçeden önemli meblağlarda fon ve kaynak ayırmasını gerektirecektir.

Ancak Türkiye'nin kendi öz kaynağı olan toryum madenini nükleer yakıt olarak etkin ve verimli biçimde kullanabilmesi için mutlaka kendi yakıt işleme ve üretim tesisini kurmalıdır. Aksi takdirde Türkiye toryumu hammadde olarak yurtdışına ihraç edecek ve yurtdışından toryum içeren yakıtları ithal edecektir ve bu ticarete satıcılar ile araçların aldığı kârı ödemek mecburiyetinde kalacaktır.

Japonya, Belçika, Brezilya, Çin, Fransa, Almanya, Hindistan, Kazakistan, Kore, Rusya, İspanya, İsveç, İngiltere, Amerika Birleşik Devletleri, Arjantin, Kanada, Pakistan ve Romanya kendi nükleer yakıt işleme ve üretim tesislerine sahip olan ülkelerdir [22]. Dolayısıyla Türkiye, nükleer enerji kullanımında kendi yakıt işleme tesisini kurana kadar bu ülkelerin potansiyel müşterisi konumundadır.

Görülmektedir ki enerji üretim profillerinde nükleer enerjinin yerine önem veren ülkeler kendi yakıt işleme tesislerine sahiptirler. Türkiye'nin öz kaynağı olan toryum minerallerini nükleer yakıt olarak etkin ve verimli biçimde kullanması, enerji üretim profilinde nükleer enerjinin yerinin önem kazanacağı anlamına gelir. Bu sebeple yakıtların, yerli üretim, yerli insan kaynakları, yerli işgücü ve yerli teknoloji ile üretimi, toryum içeren yakıtların maliyetlerini azaltmasının yanında, ülkenin nükleer yakıt üretimi konusunda tecrübe kazanmasına sebep olacak ve ülkedeki iş gücünün yetişmesini, teknolojinin gelişmesini sağlayacaktır. Türkiye böylelikle toryum içeren yakıt üretimi ve nükleer santraller konusunda tecrübesi ve bilgi birikimi ile kendi kendine yetebilen bir ülke olabilir.

### **3.3 Toryum İçeren Yakıtların Açık veya Kapalı Çevrime Göre Kullanımları**

Toryum içeren yakıtların nükleer reaktörlerde kullanımı ve kullanım sonrası incelendiğinde; yakıtların açık veya kapalı çevrim esaslarına göre kullanımlarının kullanım ve sonrası maliyetlerine etki edeceği görülür. Özellikle toryum içeren yakıtlar söz konusu olduğunda kullanılan çevrimin türü ve izlenen stratejiler oldukça önemlidir.

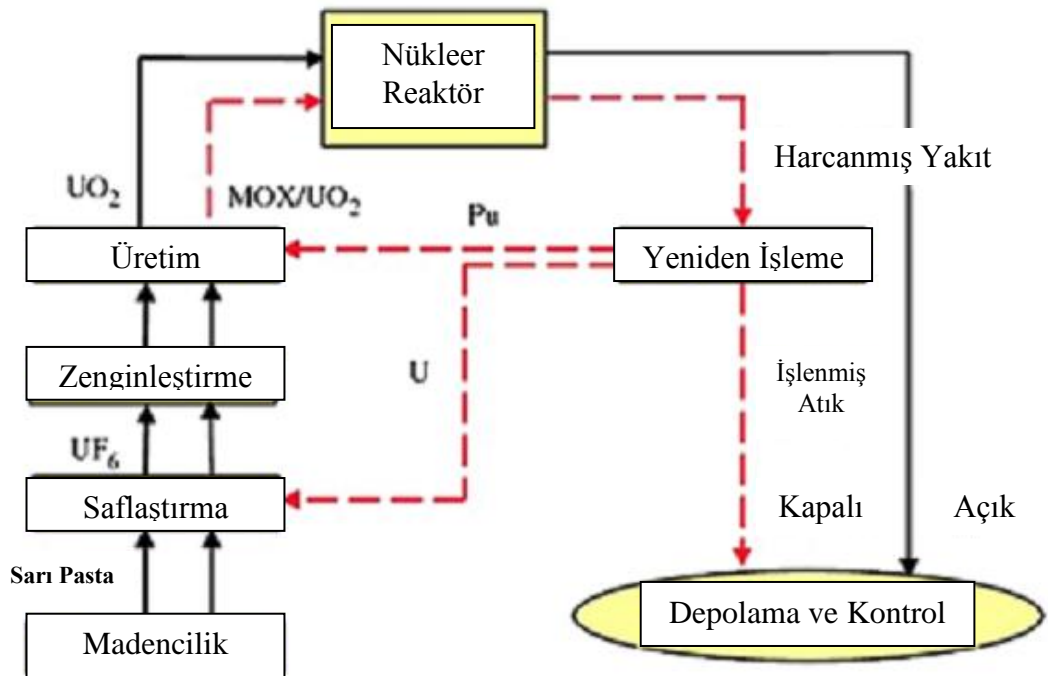
Açık çevrim, yakıtların kullanım sonunda depolanarak kontrol edildikleri yakıt çevrim türüdür. Kapalı çevrim ise yakıtların kullanıldıktan sonra atıklarında bulunan fissil izotopların ayrıştırılarak yeniden değerlendirildikleri ve kullanıldıkları çevrim türüdür. Şekil 3.2, şema olarak açık ve kapalı çevrimi göstermektedir.



Burada saflaştırma (purification), zenginleştirme (enrichment) ve yeniden işleme (reprocessing) işlemleri için yakıt işleme ve zenginleştirme tesisi gerekmektedir. Kesikli kırmızı çizgi kapalı çevrimi, düz siyah çizgi ise açık çevrimi ifade etmektedir.

Toryum içeren yakıtların açık çevrime göre kullanımı, toryum-232 gibi çok iyi bir fissil uranyum-233 üretici bir kaynaktan daha az verimlilikle yararlanma anlamına gelmektedir. Ancak Türkiye açısından düşünüldüğünde ise başlangıç olarak açık çevrim kullanmak, nükleer enerji adına izlenebilecek daha mantıklı bir stratejidir.

Toryum içeren yakıtların kapalı çevrime göre kullanımı şüphesiz toryum kaynaklarımızdan daha etkin biçimde faydalanabilmeye imkân tanır. Özellikle nükleer yakıt atıklarının işlenmesi ve değerlendirilmesi ile üretilen karışık oksit yakıtlarla (MOX) birlikte kullanılabilme, uranyum-233 üretimi gibi avantajları, toryumun kapalı çevrim ile etkin biçimde kullanılabileceğini desteklemektedir. Ancak Türkiye'nin hâlihazırda yakıt işleme ve zenginleştirme tesislerine sahip olmaması, bu tesislerin kurulmasının oldukça pahalı ve zahmetli olması sebebiyle Türkiye, yakıt işleme ve üretim tesisinin yokluğunda toryum içeren yakıtlardan enerji üretimi bakımından tam olarak yararlanamayacaktır.



Şekil 3.2: Açık ve kapalı çevrim [21].

Toryum içeren yakıtların dış kaynaklardan tedarikini daha ekonomik hale getirebilmek için; yakıt talep tahmini, tedarik planı ve stoklama politikası izlenebilir. Ancak ilerleyen yıllarda uygun şartlar sağlanıp, milli yakıt işleme ve zenginleştirme tesisinin kurulması ile birlikte kapalı çevrim stratejisi Türkiye bakımından; hem ekonomik olarak sürdürülebilir bir seçenek olacaktır hem de kaynağın daha iyi değerlendirilebilmesini ve atıkların azaltılmasını sağlayacaktır.

Toryum içeren yakıtların atıkları depolanıp kontrol edilirken izlenen yöntemler ve metotlar, yakıt maliyetinin arka uç olarak isimlendirilen kısmını ifade etmektedir. Yakıtlar tüketildikten sonra atıkları reaktör dışına alınır ve reaktör binasından uzaklaştırılmadan belirli bir müddet reaktör binasındaki havuzlarda bekletilir. Radyoaktivite seviyeleri, yaydıkları ısı miktarı vb. taşımaya uygun koşullara ulaştıktan sonra atıklar nihai depolama alanlarına taşınıp istiflenerek kontrol altına alınırlar. Nükleer enerjiyi kullanan ülkelerin çoğu tarafından açık çevrim stratejisi tercih edilmektedir. Ancak bu ülkelerin yakıt atıkları halen havuzlarda bekletilme sürecindedir ve kullanılmış yakıtlar için nihai bir depolama alanı henüz hiçbir ülkede kurulmamıştır [21].

Bu sebeple başlangıç olarak Türkiye için nihai bir nükleer atık depolama alanı gerekmeyecek olsa bile nükleer enerjiden yararlanılacak sonraki yıllarda bu tesise muhakkak ihtiyaç duyulacaktır.

Bu sebeple Türkiye için toryum içeren yakıtların nükleer enerji üretimindeki geleceği planlanırken açık çevrim esaslarına, ya da kapalı çevrim esaslarına göre yol izleneceği belirlenmelidir.

Açık çevrimin seçilmesi durumunda; toryum içeren nükleer yakıt atıklarının depolanıp kontrol edilebilecekleri, stok politikası izlenecekse kullanılmamış toryum içeren yakıtların güvenlikle depolanabilecekleri yerlerin seçimi ve tesislerin inşası planlanmalı ve zamanı gelince uygulanmalıdır.

Kapalı çevrimin seçilmesi durumunda; yakıt işleme ve üretim tesisinin kurulabilmesi için etkin bir strateji izlenmeli ve gereken çeşitli finansal kaynaklar geç olmadan temin edilip planlanmalı ve gereken uluslar arası bağlayıcı politik ve siyasi anlaşmalar zamanında yapılmalıdır.

### 3.4 Türkiye'nin Toryum İçeren Yakıtlar ile Enerji Üretimine Geçiş Süreci

#### 3.4.1 Toryum Yakıtlı Nükleer Güç Santrallerinin Enerji Dengelerine Muhtemel Etkileri

Tez çalışmasının bu kısmında henüz elektrik üretimi amaçlı herhangi bir nükleer santrale sahip olmayan Türkiye'nin enerji dengelerinin, toryum içeren yakıtla çalışacak nükleer güç santrallerinin kurulması ve yaygınlaşması durumunda nasıl değişeceği tartışılıp yorumlanacaktır.

Bilindiği üzere nükleer güç santralleri yüksek kapasite faktörlerine ve kapasite kullanım oranlarına sahip emre amade güç santralleridir. Nükleer güç santrallerinin yüksek kurulu güç kapasiteleri nükleer santralleri buldukları enerji arz talep dengeleri içerisinde önemli hale getirmektedir.

Günlük enerji talebini karşılamak için tahmin edilen toplam enerji talebinin büyük bir kısmı baz yük santralleri olarak adlandırılan, yüksek kurulu güç kapasitelerine sahip ve kolaylıkla çalıştırılıp kapatılmayan santraller yardımıyla karşılanır. Enerji talebinin baz yük santralleri ile karşılanamayan ve net olarak tahmin edilemeyen kısmı ise kolay devreye alınıp, devre dışı bırakılabilen, hidrolik santraller vb. gibi denge yük santrallerinden karşılanır. Bunun haricinde enerji ihtiyacı halen karşılanamıyorsa, elektrik ithal edilir ve fazla üretimin söz konusu olduğu durumlarda ise elektrik ihraç edilerek ülkenin elektrik enerjisi ihtiyacı karşılanır.

Türkiye'de üretim lisansına sahip üreticiler enerji üretimini; hidroelektrik santraller, rüzgâr santralleri, jeotermal santraller, biyokütle santralleri ve termik santraller vasıtasıyla gerçekleştirmektedirler [24]. Çizelge 3.3, Türkiye'nin 2011 yılı toplam kurulu gücünü termik, hidrolik, jeotermal ve rüzgâr kaynaklarına ayırarak göstermektedir. Çizelge 3.4, Türkiye'nin 2011 yılı toplam elektrik üretimini termik, hidrolik, jeotermal ve rüzgâr kaynaklarına ayırarak göstermektedir.

**Çizelge 3.3:** Türkiye'nin 2011 yılı toplam kurulu gücü [25].

<b>Termik</b>	<b>Hidrolik</b>	<b>Jeotermal + Rüzgar</b>	<b>Toplam</b>
33.901,1 MW	17.137,1 MW	1.842,9 MW	52.911,1 MW

**Çizelge 3.4:** Türkiye'nin 2011 yılı toplam elektrik üretimi [25].

<b>Termik</b>	<b>Hidrolik</b>	<b>Jeotermal + Rüzgar</b>	<b>Toplam</b>
171.608,3 GWh	52.338,6 GWh	5.418,2 GWh	229.395,1 GWh

Çizelge 3,3'te elektrik üretim değerleri verilen her bir enerji kaynağı için %100 kapasite faktöründe ve 365 gün 24 saat çalışıldığı kabul edilirse yıllık toplam 463.501,2 GWh enerji üretilbileceği hesaplanır.

Ancak reelde toplam 229.395,1 GWh enerji üretildiği görülmektedir. Dolayısıyla 2011 yılı için Türkiye elektrik üretim potansiyelinin yaklaşık yarısının kullanıldığı söylenebilir. Bir diğer ifade ile 2011 yılı için kapasite faktörü ve kapasite kullanım oranı çarpımı yıllık ortalaması yaklaşık 0,49'dur.

Termik santraller için aynı işlem yapıldığında, kapasite faktörü ve kapasite kullanım oranı çarpımı yıllık ortalaması yaklaşık 0,58'dir. Hidroelektrik santraller için, kapasite faktörü ve kapasite kullanım oranı çarpımı yıllık ortalaması yaklaşık 0,35; jeotermal ve rüzgâr santralleri için yaklaşık 0,34'tür.

Dolayısıyla yüksek kurulu güce, kapasite faktörüne, kapasite kullanım oranına sahip olacak toryum yakıtlı nükleer santrallerin enerji dengelerinde yerini alması, kapasite faktörü ve kapasite kullanım oranı çarpımını önemli ölçüde etkileyecektir ve ilerleyen yıllarda enerji dengeleri üzerinde istenmeyen sonuçlara sebebiyet verebilir.

Bir diğer ifade ile Türkiye'nin ilerleyen yıllarda artan nüfusuna ve artan enerji talebine rağmen kapasite faktörü ve kapasite kullanım oranı çarpımı yıllık ortalamasının sabit kalması veya yeteri kadar artış göstermemesi durumu yaşanabilir. Bu durumda toryum yakıtlı nükleer santraller gibi yüksek kapasite faktörü ve kapasite kullanım oranlarına sahip santrallerin sayılarının artması, düşük kapasite faktörü ve kapasite kullanım oranlarına sahip santrallerin daha az çalışmak zorunda kalmasına ve kazançlarının azalmasına sebep olabilir.

Elbette ki bu husus fazla enerji üretiminin ihraç edildiği durumlarda geçersiz kalacaktır. Ancak kötümser senaryo düşünüldüğünde bu durum ülke enerji pazarındaki üreticiler arası adaletsizlik oluşturarak bir kısım yatırımcının zarar etmesine sebep olabilir. Zarar gören yatırımcılar Türkiye enerji pazarından çekilebilir ve pazarın büyümesi, gelişimi tehlikeye girebilir, ülkede enerji krizi yaşanabilir. Bu

sebeple farklı enerji kaynaklarının kullanımları iyi planlanmalıdır ve devlet, enerji piyasasını oluşturan santrallerin sahibi yatırımcılar arası rekabet şartlarında adaleti gözetmeli ve güvence sağlamalıdır.

Bu sebeple gelişmekte olan bir ülke durumundaki Türkiye’de toryum yakıtlı nükleer santrallerin enerji pazarına girmesi, pazar payı, uygulanacak teşvikler vb. olgular, ekonomik istikrarın sağlanabilmesi ve enerji piyasasında dengelerin korunabilmesi amacıyla, ülkenin büyüme hızı göz önünde bulundurularak planlanmalı ve uygulanmalıdır. Aksi takdirde plansızlığın bedeli oldukça ağır olabilir ve ciddi sorunlara yol açabilir.

### **3.4.2 Toryum Yakıtlı Nükleer Güç Santrallerinin Türkiye’ye Bedeli**

Nükleer santrallerin maliyetinin tahmini oldukça zor ve gerçekleşen maliyetin öngörülen maliyetten sapma olasılığı yüksek bir işlemdir. Bir nükleer santralin maliyetini;

- Kurulum ve inşaat maliyetleri,
- İşletme ve bakım maliyetleri,
- Yakıt maliyetleri,

oluşturmaktadır.

Kurulum ve inşaat maliyetleri; nükleer santralin fikir ve tasarım aşamasından, devreye alınıncaya kadar ortaya çıkan bütün maliyetleri kapsamaktadır. İşletme ve Bakım maliyetleri; santralin ticari ömrü boyunca karşılanması gereken işçilik maliyetleri, yardımcı elemanların bakım ve onarımları gibi maliyet kalemlerini içermektedir. Yakıt maliyetleri ise önceki konularda bahsedildiği üzere yakıtın hammadde halinin topraktan çıkarılıp işlenmesinden başlayarak, kullanılıp atıklarının depolanması ve kontrolü dâhil meydana gelen bütün maliyetleri kapsamaktadır.

Nükleer santral kurulum projeleri uzun süren ve yoğun ilgi ve dikkatle çalışmayı gerektiren faaliyetlerdir. Nükleer santrallerin kurulum ve devreye alınma sürelerinin uzun olmasına bir sebep olarak; hammadde ve bileşen parçaları üreten tedarikçilerin azlığı ve dolayısıyla bu tedarikçilerin talep yığılması sonucu siparişleri zamanında yetiştirememeleri gösterilebilir. Örneğin, dünyada nükleer reaktörlerin büyük parçalarının üretilebileceği sadece birkaç tesis mevcuttur. Bunlardan bazıları; Japan Steel Works ve Creusot Forge France işletmeleridir [26].

Bunun gibi atıl zamanların mevcudiyeti, nükleer santral projelerinde projenin gereksiz yere uzamasına ve proje maliyetlerinin gereksiz yere artmasına sebep olur. Bu yüzden nükleer santrallerin inşa projelerinde esnek ve dinamik bir planlama yapılması daha uygundur. Böylelikle birçok değişkenin ve kısıtın bir arada bulunduğu nükleer santral inşa projeleri etkin bir biçimde ve verimlilikle bitirilebilir.

Nükleer santrallerde maliyetin ve proje süresinin kesin olarak tahmin edilememesi sebebiyle, inşa ve kurulum yapan firmalar sabit fiyat belirlemekten ve net proje teslim tarihi içeren kontratlar yapmaktan genellikle kaçınırlar [26].

Düşünce aşamasında fikir edinebilmek için nükleer santrallerin maliyetleri tahmin edilirken birim kW kurulu güç başına düşen maliyet tutarı göz önünde bulundurulur ve kıyaslama imkânı sağlanır. Overnight Cost adı verilen değerlendirmelerde, uzun zaman alan projeler sonunda kurulan nükleer santral projelerinin finansman ve faiz giderleri maliyet hesabına katılmaz. Diğer değerlendirmelerde ise nükleer santralin toplam maliyeti, finansman ve faiz giderlerini de içerir.

Projelerin uzun vadeli olması ve maliyetlerinin yüksek olması; bir veya birden fazla yatırımcının özsermayelerini birleştirerek nükleer santral kurabilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple nükleer santral inşası ya da herhangi bir güç santralinin inşası sırasında banka kredisi gibi finansman kaynaklarından yararlanmak kaçınılmazdır.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, piyasa koşullarının değişken olması ve güven vermemesi sebebiyle bankalar kredilendirme faizlerini yüksek tutmaktadırlar. Bu durum santral kurulum maliyetlerini yükseltici bir etki gösterir. Bu sebeple gelişmekte olan ülkelerde, yatırımcıları nükleer santral kurmaya yöneltebilecek ve cesaretlendirebilecek finansal avantajlar azdır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde yatırımcı devlet tarafından, çeşitli teşvikler ve satın alma güvenceleri ile desteklenmelidir.

Synapse Energy Economics Inc.'in yapmış olduğu çalışma sonucu; birim kurulu güç başına maliyetler Amerika Birleşik Devletleri piyasa şartları göz önünde bulundurularak 5.500\$/kW – 8.100\$/kW arası öngörülmüştür ve 1100 MW kapasiteli reaktör başına toplam maliyet, 6–9 milyar dolar arası değişmektedir [26].

Nükleer Santrallerin maliyet tahminleri yıllara göre artış göstermektedir. Örneğin 2000 – 2002 yılları itibariyle kurulacak nükleer tesisler için; faiz ve finansman

giderleri hariç 1.200\$/kW – 1.500\$/kW arası bir tutar öngörülmüştür ve bir nükleer reaktör biriminin fiyatı 2–4 milyar dolar arası olarak tahmin edilmiştir [26]. MIT üniversitesinin 2003 yılında yapmış olduğu “Nükleer Enerjinin Geleceği” adlı çalışmada; nükleer santraller için finansman ve faiz giderleri hariç 2.000\$/kW bir maliyet öngörülmektedir [32].

2007 yılında Keystone Center tarafından yayınlamış olan raporda ise; faiz ve finansman giderleri hariç maliyetler 2.950\$/kW olarak öngörülmüştür. Faiz ve finansman giderleri de göz önünde bulundurulduğunda ise bu rakam 3.600\$/kW – 4.000\$/kW arası değişmektedir [27].

2007 yılında Moody’s Inverstor Services tarafından yapılan çalışmada ise; finansman ve faiz giderleri dâhil 5.000\$/kW – 6.000\$/kW arası bir maliyet öngörülmüştür ve araştırmacı firma, bu maliyet tahmininin aynı yılda yapılan diğer tahminlere göre daha iyi olduğunu savunmuştur [28].

2007 yılına ait bir başka çalışmada ise Florida Power & Light, toplamda 2200 MW kurulu güce sahip iki nükleer santrale ait faiz ve finansman giderleri hariç maliyeti 3.108\$/kW – 4.540\$/kW olarak öngörmüştür. Buna ek olarak bu iki santrale ait faiz ve finansman giderleri dâhil maliyetler; 5.492\$/kW – 8.081\$/kW olarak öngörülmüştür. Bu tahminler toplam proje maliyetine dönüştürüldüklerinde; 1100 MW Kurulu güce sahip iki reaktör için toplamda 12.1-17.8 milyar dolar arası bir toplam maliyet öngörülmüştür [26].

Çizelge 3.5, öngörülen bu maliyetleri bir tablo üzerinde karşılaştırmaktadır.

Çizelge 3.5’te de açıkça görülebileceği üzere nükleer santraller için maliyet tahminleri yıllara göre artmıştır. Overnight Cost olarak adlandırılan faiz ve finansman giderleri hariç maliyetler ile faiz ve finansman giderleri dâhil maliyetler arasında ciddi bir fark bulunmaktadır. Özellikle bu çalışmaların Amerika Birleşik Şirketleri şartlarında yapıldıkları düşünülürse, Türkiye için faiz ve finansman giderleri daha da yüksek olacak ve maliyeti önemli ölçüde etkileyecektir.

**Çizelge 3.5: Nükleer Santral Maliyet Tahminleri [26].**

<b>Tahmin</b>	<b>Faiz ve Finansman Giderleri Hariç (\$/kW)</b>	<b>Toplam Maliyet (\$/kW)</b>	<b>Toplam Proje Maliyeti (Milyar \$)</b>
ABD Enerji Bölümü (2002)	1.200 \$ - 1.500 \$		
MIT (2003)	2.000 \$		
Keystone Center (2007)	2.950 \$	3.600 \$ - 4000 \$	
Moody's (2007)		5.000 \$ - 6.000 \$	
Florida Power & Light (2007)	3.108 \$ - 4.540 \$	5.492 \$ - 8.081 \$	12.1 – 17.8
Progress Energy (2008)			14.0

Nükleer santraller için maliyet tahminlerinin hassaslıkla, net olarak belirlenebilmesi konunun başında da belirtildiği üzere oldukça zordur. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde 1966 – 1977 yılları arası inşa edilen santrallerin maliyet tahminlerinde % 200'lere maliyet aşmaları görülmüştür. Nükleer santral gibi büyük projelerin inşalarındaki bu maliyet aşımı; yatırımcıları iflas ettirebilecek kadar büyük finansal açıklara sebep olabilir.

Bu sebeple rahatlıkla söylenebilir ki; esnek ve dinamik bir planlama, doğru zamanlarda doğru kararların alınmasını sağlayarak projelerin hayatını kurtarabilir, kârlılık ve verimliliği arttırabilir.

Çizelge 3.6, ABD'de 1966–1977 yılları arası nükleer santral projelerindeki maliyet tahminlerindeki aşımalarını göstermektedir. Çizelge 3.6'da da açıkça görülebileceği üzere nükleer santrallerin maliyet tahminleri, tahminde tutarlılık adına hatalara oldukça müsaittir. Her ne kadar titizlikle hazırlanmış bir tahmin hata yüzdesini azaltabilecekse de yüksek maliyetli projeler olmaları sebebiyle nükleer santral



**Çizelge 3.6:** 1966 – 1977 arası ABD nükleer santral projelerindeki maliyet tahmini aşimleri [26].

Yıllar	Santral Sayısı	Tahmin edilen Maliyet (1.000\$/MW)	Gerçekleşen Maliyet (1.000\$/MW)	Aşım (%)
1966 – 1967	11	612 \$	1.279 \$	109
1968 – 1969	26	741 \$	2.180 \$	194
1970 – 1971	12	829 \$	2.889 \$	248
1972 – 1973	7	1.220 \$	3.882 \$	218
1974 – 1975	14	1.263 \$	4.817 \$	281
1976 – 1977	5	1.630 \$	4.377 \$	169
<b>Genel Ortalama</b>	<b>13</b>	<b>938 \$</b>	<b>2.959 \$</b>	<b>207</b>

projelerinde görünüşte çok küçük sayılabilecek bir hatanın bedelinin parasal tutarı büyük olabilir.

Nükleer Santrallerin uzun inşa süreleri, maliyetlerinin bu denli yüksek olmalarına sebep olan bir diğer önemli etkidir. Uzun inşa süresi aynı zamanda proje sürecindeki hata yapma olasılığını ve riskini arttırarak; iş kazaları, inşa hataları ya da inşa süresinde aksamaya sebep olabilecek olayların gerçekleşme olasılıklarını da arttıracaktır. Çizelge 3.7, nükleer enerji santrallerinin dünya çapındaki inşaat sürelerini göstermektedir.

Bu sebeple nükleer santral projelerinde maliyet tahmin edilirken olaylara kötümser senaryo ile yaklaşmak daha mantıklı olacaktır. Nitekim etkin ve verimli planlama nükleer santral projelerinin vazgeçilmezi olmalıdır.

Türkiye’de kurulması planlanan Akkuyu Nükleer Güç Santrali’nin maliyeti incelenerek, Türkiye piyasa şartlarında kurulacak olan bir nükleer güç santralinin yaklaşık olarak maliyeti tahmin edilebilir ve buradan yola çıkılarak toryum yakıtlı

**Çizelge 3.7:** Nükleer enerji santrallerinin dünya çapındaki inşaat süreleri [29].

Referans Periyodu	Reaktör Sayısı	Ortalama İnşaat Süresi (ay)
1965 – 1970	48	60
1971 – 1986	112	66
1977 – 1982	109	80
1983 – 1988	151	98
1995 – 2000	28	116
2001 – 2005	18	82

nükleer santrallerin Türkiye'ye mal olacağı değerler hakkında fikir yürütülebilir.

Türkiye'de Cumhuriyetin 100. yılı olan 2023 yılına kadar, nükleer enerjinin toplam kurulu gücün %5'i olması hedeflenmektedir [29]. Çizelge 3.8'de, 2021 yılına kadar tahmin edilen kurulu güç ve kaynaklara göre dağılımları MW cinsinden gösterilmiştir. 2023 yılında toplam kurulu güç miktarının yaklaşık olarak 85000 MW olacağı tahmin edilmektedir. Dolayısıyla bu tahmini kurulu güç miktarının 4250 MW'lık kısmının nükleer santralden karşılanması hedeflenmektedir ki 2023 yılında devreye alınmış olması planlanan Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin kurulu güç kapasitesi 4800 MW olacaktır.

Akkuyu santralının Türkiye'ye olan maliyetinden yola çıkılarak, bir nükleer santralin Türkiye'ye bedelini tahmin edebilmek için hesaplar; santrali inşa edecek olan Rus tarafı ile Türk tarafı arasındaki anlaşmada kabul edilen şartlar üzerinden yapılmalıdır.

Türkiye, Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin 1200 MW kurulu güç kapasiteli dört reaktöründen 1. ve 2. Reaktörün ürettiği toplam elektriğin %70'ini; 3. ve 4. Reaktörünün ürettiği toplam elektriğin ise %30'unu, her bir reaktör için 15 yıl boyunca 12,35 US ¢ / kWh fiyattan almayı taahhüt etmiştir [31].

Türkiye adına olası en pahalı durumu tahmin edebilmek için; Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin %90 kapasite faktörü ve %90 kapasite kullanım oranı ile çalışacağı varsayılırsa; santralde 15 yıl boyunca toplam yaklaşık 511 TWh elektrik enerjisi üretilecektir.

Santraldeki dört reaktörün de eşit miktarlarda çalışacakları kabul edilirse; Türkiye, 15 sene boyunca santralde üretilen toplam elektriğin yarısını 12,35 US ¢ / kWh fiyattan almayı taahhüt etmiş olacaktır. Bu kabullere göre taahhüt süresi bitiminde anlaşılan tarafa en kötü ihtimalle yaklaşık 31.550.000.000 USD ödenmiş olacaktır. Bu rakam bir diğer ifade ile Türkiye için Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin tahmin edilen olası pahalı fiyatlarından biridir.

Bu tutar, reaktör sayısına bölüldüğünde reaktör başına maliyet; yaklaşık 7.887.500.000 USD olarak tahmin edilir. Tahmin edilen toplam tutar, birim kurulu güce oranlandığında ise kW başına maliyet; 6.572,9 USD olarak tahmin edilir. Türk tarafı ödemeyi peşin yapmayı, yıllar boyunca satın alınan elektrik tutarı kadar ücreti taksitler halinde ödeyerek, ödemeyi 15 senede tamamlayacağından dolayı tahmin edilen bu rakamlar Türkiye için faiz ve finansman giderleri dahil maliyet gibi düşünülebilir.

Akkuyu Nükleer Güç Santrali için tahmin edilen maliyetler, konunun başında incelenen Synapse Energy Economics Inc.'in çalışmasında verilen alt ve üst değer arasındadır. Ayrıca Akkuyu Nükleer Güç Santrali için tahmin edilen bu maliyetler; 2007 yılında Florida Power & Light kuruluşunun hesapladığı, faiz ve finansman giderleri dahil maliyet tahmini aralığındadır. Birim reaktör maliyeti olarak bakıldığında ise olası pahalı fiyatlardan biri olarak tahmin edilen bu miktar, yine çalışmada verilen alt ve üst değerler arasındadır.

Dolayısıyla Türkiye, olası pahalı fiyatların tahmin edilmesi söz konusu olduğunda bile, Akkuyu Nükleer Güç Santrali için toplamda yaklaşık dünya çapında tahmin edilen maliyetler aralığında bir bedel ödeyecektir. Bu sebeple Akkuyu Nükleer Güç Santrali için tahmin edilen maliyetin ekonomik açıdan tutarlı olduğu düşünülebilir.

**Çizelge 3.8:** 2021 yılına kadar tahmin edilen kurulu güç (MW) ve kaynaklara göre dağılımı [30].

<b>Yıllar</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>
Linyit	8274	8281	8319	8375	9857	9857	9857	9857	9857	9857	9857
Taş Kömürü + Asfaltit	690	690	690	690	960	960	960	960	960	960	960
İthal Kömür	3881	3881	3881	3881	5081	5681	5681	5681	5681	5681	5681
Doğal Gaz	19324	20575	20806	22376	23417	24042	24042	24042	24042	24042	24042
Jeotermal	114	114	148	197	197	197	197	197	197	197	197
Fuel Oil	1706	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406
Motorin	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Nükleer	0	0	0	0	0	0	0	0	1200	2400	3600
Diğer	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215
Termik Toplam	34230	35188	35492	37166	41159	42384	42384	42384	43584	44784	45984
Biyogaz + Atık	115	168	175	185	185	185	185	185	185	185	185
Hidrolik	17137	20470	21461	24291	28003	31606	33394	33815	33815	33815	33815
Rüzgar	1729	1881	2165	2646	2646	2646	2646	2646	2646	2646	2646
<b>Toplam</b>	<b>53211</b>	<b>57706</b>	<b>59292</b>	<b>64288</b>	<b>71993</b>	<b>76821</b>	<b>78609</b>	<b>79030</b>	<b>80230</b>	<b>81430</b>	<b>82630</b>

Nükleer santral projesini yükleniciye verdiği halde nispeten riskin çoğunu üzerinden devreden Türkiye'nin ödeyeceği, olası pahalı fiyatlardan biri olarak tahmin edilen maliyetin makul seviyelerde olması; yalnızca maddi boyutu düşünüldüğünde Akkuyu Nükleer Güç Santrali anlaşmasında Türkiye'nin zararda olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Nitekim nükleer teknolojiyi kullanma kararı alan Türkiye gibi ülkelerin çoğu ilk santrallerini yabancı ülkelere kurdurmuştur.

Ancak projede; nükleer teknoloji bakımından yerli üretimin ve teknolojinin gelişiminin sağlanamaması, yerli kaynakların kullanılmaması, yerli işgücü ve beyin gücünün, araştırma ve geliştirme olanaklarının etkin kullanılmaması, Türkiye'nin bu anlaşmadaki manevi zararlarıdır. Lakin bundan sonra hedeflenmesi gereken; kurulan bu santralin ve teknolojinin incelenip tecrübe edilmesi ve sonraki santralimizi yerel imkanlarımız ve kaynaklarımız dahilinde yerel teknolojimizden faydalanarak kurabilmek olmalıdır.

Bir diğer açıdan bakıldığında ise Türkiye açısından pahalı senaryo göz önünde bulundurularak tahmin edilen tutar; aynı zamanda anlaşmanın karşı tarafı için kârını maksimize edebileceği en yüksek fiyatlardan biridir. Bu tutar satış fiyatı olarak düşünülürse, santral inşa maliyetine ek olarak yüklenici tarafın kârını da içermektedir.

Önceki paragraflarda Akkuyu Nükleer Güç Santrali bir meta olarak düşünülüp, olası pahalı fiyatlarından biri tahmin edilmişti. Dolayısıyla tahmin edilen olası pahalı "fiyat" ile incelenen çalışmalarda tahmin edilen olası pahalı fiyattan düşük "maliyet" tutarı arasındaki fark; tahmini olarak yüklenici tarafın kâr edebileceği tutarı ifade eder. Yüklenici taraf, maliyetlerini, incelenen çalışmalarda tahmin edilen alt maliyet değerlerine ne kadar yaklaştırabilirse kâr oranını o kadar arttırabilecektir.

Reaktör başına tahmin edilen pahalı fiyat olan; 7.887.500.000 USD tutar göz önünde bulundurulduğunda yapılan çalışmalarda tahmin edilen 6.000.000.000 USD maliyet ile arasındaki fark olan 1.887.500.000 USD yüklenicinin tek bir reaktörün inşasından elde edebileceği kâr miktarının bir tahminidir. Birim kurulu güç olarak düşünüldüğünde ise tahmin edilen 6.572,9 \$/kW olası pahalı fiyat ile incelenen çalışmalarda tahmin edilen 5.500\$/kW maliyet arasındaki fark olan 1.072,9 \$/kW tutar ise yüklenici tarafın, bu projeden elde edebileceği birim kilowatt başına kâr miktarının bir tahminidir. Bu miktarlar yüklenicinin muhtemel kâr miktarlarını ifade

ettiği gibi aynı zamanda Türkiye'nin kendi özkaynaklarını ve teknolojisini kullanmamasından dolayı ödeyeceği fazla miktar, bir diğer tabir ile ceza maliyeti olarak da düşünülebilir.

Buradan yola çıkılarak bir toryum yakıtlı nükleer santralin maliyetinin kW başına kabaca; 5.500 \$/kW ile 6.572,9 \$/kW arasında değişeceği düşünülebilir.

Nükleer enerji santrallerinin dünya çapındaki inşaat sürelerinden yola çıkılarak, toryum yakıtlı nükleer güç santralının kabaca 7 yıl gibi bir zaman zarfında kurulup devreye alınabilecekleri düşünülebilir.

### **3.4.3 Toryum Yakıtlı Nükleer Enerji Birim Üretim Maliyeti ve Diğer Enerji Kaynakları ile Karşılaştırılması**

Toryum yakıtlı nükleer enerjinin ülke ekonomisi için uygunluğu incelenirken, birim elektrik üretim maliyeti belirlenmeli ve diğer enerji kaynaklarının birim elektrik üretim maliyetleri ile mukayese edilmelidir. Güç santrallerinin birim elektrik üretim maliyetleri halka sunulan elektrik enerjisi birim fiyatlarını doğrudan etkilemektedir.

Nükleer santrallerin en önemli özelliklerinden biri, sabit maliyetlerinin çok yüksek buna karşılık değişken maliyetlerinin daha düşük seviyelerde olmasıdır. Çizelge 3.9, farklı tipteki santrallere ait birim kurulu güç başına faiz ve finansman giderleri hariç inşa maliyetleri ve birim enerji başına yakıt maliyetlerini karşılaştırmaktadır.

**Çizelge 3.9:** Farklı tipteki santrallere ait birim kurulu güç başına maliyetleri ve birim yakıt maliyetleri [29].

	<b>Faiz ve Finansman Giderleri Hariç Maliyet (\$/kW)</b>	<b>Yakıt Maliyeti (\$/MMBtu)</b>
Nükleer	4.000	0,67
Kömür (Düşük)	2.300	1,60
Kömür (Orta)	2.300	2,60
Kömür (Yüksek)	2.300	3,60
Gaz (Düşük)	850	4,00
Gaz (Orta)	850	7,00
Gaz (Yüksek)	850	10,00

Çizelge 3.9’da görülebileceği üzere nükleer santraller, beklenildikleri gibi, birim kurulu güç başına faiz ve finansman giderleri hariç kurulum maliyetlerin sıralamasında lider konumdadır. Nükleer santrallerin kurulum maliyetlerini sırasıyla; kömür ve gaz santralleri izlemektedir. Düşük, orta ve yüksek kelimeleri ile ifade edilen; yakıt fiyatlarının düşük, orta ve yüksek fiyat senaryolarına göre değerlendirilmeleri sonucu hesaplanan birim yakıt maliyetleridir.

Bir güç santralının kullanım ömrü boyunca üretilen toplam enerji miktarı ne kadar fazla ise o santralin aynı oranda etkin kullanıldığı söylenilebilir. Dolayısıyla kısa sürelerde devreye alınan ve nükleer santrallere nispeten çok daha düşük maliyetli kömür ve gaz santralleri, aslında uzun vadede yakıt maliyetleri daha yüksek olan santrallerdir ve eşit miktarda elektrik üretmeleri durumunda yakıt maliyetleri nükleer santrallere göre çok daha pahalı olacaktır.

Güç santrallerinin etkin kullanılabilmesi için kapasite faktörlerinin yüksek olması gerekir. Çizelge 3.10, Amerika Birleşik Devletleri’nde kullanılan farklı enerji kaynaklarına ait ortalama kapasite faktörlerini listelemektedir.

**Çizelge 3.10:** Farklı enerji kaynaklarına ait ortalama kapasite faktörleri [11].

<b>Enerji Kaynağı</b>	<b>Ortalama Kapasite Faktörü (%)</b>
Nükleer	91,2
Biyokütle	85,5
Jeotermal	71,6
Kömür ( Buhar Türbini )	65,4
Gaz ( Kombine Çevrim )	45,8
Hidroelektrik	29,4
Rüzgar	29,1
Güneş	17,7
Gaz ( Buhar Türbini )	12,9
Petrol ( Buhar Türbini )	8,9

Çizelge 3.10'da görülebildiği üzere nükleer enerji kapasite faktöründe lider konumdadır. Yaygın kullanılan ve fosil yakıtlar ile çalışan santrallerin kapasite faktörleri ise nükleer enerjiye nispeten oldukça düşüktür.

Görülmektedir ki nükleer santraller her ne kadar yüksek ilk yatırım maliyetlerine sahip olsalar bile, ürettikleri enerji miktarı, düşük yakıt maliyetleri, yüksek kapasite faktörleri ve kullanım ömürleri göz önünde bulundurulduklarında uzun vadede daha hesaplı ve kârlı santrallerdir.

Nükleer enerji her ne kadar uygulanması pahalı olan bir enerji kaynağı olarak düşünülse bile, enerji üretim teknolojileri içerisinde nükleer enerjide çok daha pahalı teknolojiler bulunmaktadır. Çizelge 3.11, farklı enerji üretim teknolojilerine ait kurulu gücü belli uygulamaların, kapasite faktörü, inşa maliyeti, sabit işletme ve yönetim giderleri ile değişken işletme ve yönetim giderlerinin ekonomik tahminleri göstermektedir.

Çizelge 3.11'de görülebildiği üzere nükleer enerji teknolojisi enerji türleri içerisinde en pahalı enerji türü değildir. Yakıt hücresi ve biyokütle teknolojilerin uygulamaları nükleer enerjiden daha pahalıdır. Hatta bazı uygulamalarda rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına ait inşa maliyetlerinin, nükleer enerjinin inşa maliyetine yaklaştığı görülebilir.

Ancak nükleer enerji kurulu güç ve kapasite faktöründe tüm enerji kaynakları ve uygulamaları arasında liderliğini korumaktadır. Dolayısıyla diğer enerji kaynaklarına ekonomiklik ve etkinlikte üstünlük sağlamaktadır.

Değişken işletme ve yönetim giderlerine bakıldığında ise; yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan teknolojilerin bu kalemde üstünlükleri görülmektedir. En düşük değişken işletme ve yönetim giderlerine sahip teknolojiler olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan teknolojileri, nükleer enerji takip etmektedir.

Sabit işletme ve yönetim giderleri incelendiğinde ise yakıt hücresi teknolojisi en pahalı teknolojidir. Nükleer enerjiye ait sabit giderlerin, diğer enerji türleri ile ekonomik olarak rekabet edebilecek seviyelerde olduğu görülebilir. Her ne kadar nükleer enerjinin pahalı bir teknoloji olduğu düşünülse bile bu tablo en pahalı enerji üretim teknolojisinin nükleer enerji olmadığını bariz bir şekilde göstermektedir.



**Çizelge 3.11:** Farklı enerji üretim teknolojilerine ait ekonomik tahminler [11].

<b>Teknoloji</b>	<b>Enerji Kaynağı</b>	<b>Kurulu Güç (MW)</b>	<b>Kapasite Faktörü (%)</b>	<b>İnşa Maliyeti (\$/kW)</b>	<b>Sabit İşl. Ve Yön. Giderleri (\$/kW –yıl)</b>	<b>Değişken İşl. Ve Yön. Giderleri (\$/kW –yıl)</b>
Çift Ünite İleri Pulvarize Kömür Sant.	Kömür	1.300	85	2.844 \$	29,67 \$	4,25 \$
Çift Ünite İleri Pulv. Kömür Sant. (Karbon yakalama ve ayırma teknolojili)	Kömür	1.300	85	4.579 \$	63,61 \$	9,05 \$
Tek Ünite İleri Pulv. Kömür Sant. (Karbon yakalama ve ayırma teknolojili)	Kömür	650	85	5.099 \$	76,62 \$	9,05 \$
Tek Ünite Gazifikasyon Entegreli Karbon Yakalama ve Ayırma Teknolojili Kömür Sant.	Kömür	520	85	5.343 \$	69,30 \$	8,04 \$
Konvansiyonel Doğal Gaz Kombine Çevrim Sant.	Doğal Gaz	540	87	978 \$	14,39 \$	3,43 \$
İleri Doğal Gaz Kombine Çevrim Sant.	Doğal Gaz	400	87	1.003 \$	14,62 \$	3,11 \$
İleri Doğal Gaz Kombine Çevrim Sant. (Karbon yakalama ve ayırma teknolojili)	Doğal Gaz	340	87	2.063 \$	30,25 \$	6,45 \$
Yakıt Hücresi	Hidrojen	10	60	6.835 \$	350,00 \$	0
Çift Ünite Nükleer Güç Sant.	Uranyum	2.236	90	5.339 \$	88,75 \$	2,04 \$

**Çizelge 3.11(Devam):** Farklı enerji üretim teknolojilerine ait ekonomik tahminler [11].

<b>Teknoloji</b>	<b>Enerji Kaynağı</b>	<b>Kurulu Güç (MW)</b>	<b>Kapasite Faktörü (%)</b>	<b>İnşa Maliyeti (\$/kW)</b>	<b>Sabit İşl. Ve Yön. Giderleri (\$/kW –yıl)</b>	<b>Değişken İşl. Ve Yön. Giderleri (\$/kW –yıl)</b>
Biyokütle Kombine Çevrim Sant.	Biyokütle	20	83	7.894 \$	338,79 \$	16,64 \$
Biyokütle Akışkan Yataklı Sant.	Biyokütle	50	83	3.860 \$	100,50 \$	5,00 \$
Çift Flaş Jeotermal Sant.	Jeotermal	50	92	5.578 \$	84,27 \$	9,64 \$
Hidroelektrik Sant.	Su	500	52	3.076 \$	13,44 \$	0
Hidroelektrik – Pompalı Sant.	Su	250	-	5.595 \$	13,03 \$	0
Kara Rüzgar Sant.	Rüzgar	100	25	2.438 \$	28,07 \$	0
Deniz Rüzgar Sant.	Rüzgar	400	34	5.975 \$	53,33 \$	0
Solar Termal	Güneş	100	18	4.692 \$	64,00 \$	0
Fotovoltaik	Güneş	7	24	6.050 \$	26,04 \$	0

Nükleer santrallerin birim elektrik üretim maliyeti diğer santraller ile mukayese edilecek olduğunda; nükleer santrallerde henüz kömür ve doğalgaz santralleri ile rekabet edebilecek birim maliyette üretimin yapılamadığı görülür. Ancak karbon salınımının ve küresel ısınmanın zararları düşünüldüğünde, kömür ve gaz santrallerinde elektrik üretiminin, ucuz olmasına rağmen, çevre ve geleceğimiz açısından sürdürülebilir bir yol olmadığı açıkça görülebilir.

Küresel ısınmanın çevreye olan etkileri gün geçtikçe daha hissedilir hale gelmektedir. Atıkları her ne kadar radyoaktif kirlilik oluştursa da nükleer enerjiden elektrik üretiminin karbon salınımı olmayan bir teknoloji olması ve nükleer santrallerin, fosil yakıt santralleri ile karşılaştırıldıklarında miktarca çok daha az atık oluşturması; uzun vadeli etkilerinin karşılaştırmalarında nükleer enerjiyi daha temiz bir enerji kaynağı yapmaktadır. Çevre bilinci konusunda farkındalığı sağlayabilmiş ülkelerde, küresel ısınmanın etkilerini azaltabilmeye yönelik karbon salınımına sebep olan kuruluşlardan, karbon salınım vergileri alınmaktadır.

MIT'nin 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada nükleer enerjinin birim elektrik üretim maliyeti, kömür ve doğalgaz santralleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.12, farklı baz yük santralleri için seviyelendirilmiş maliyetleri göstermektedir.

**Çizelge 3.12:** Farklı baz yük santralleri için seviyelendirilmiş maliyetler [32].

<b>Enerji Kaynağı</b>	<b>Nükleer (Risk Primi Dahil)</b>	<b>Nükleer (Risk Primi Hariç)</b>	<b>Kömür</b>	<b>Doğalgaz</b>
Kurulum Maliyeti (\$ / kW)	4.000	4.000	2.300	850
Yakıt Maliyeti (\$ / MMBtu)	0,67	0,67	2,60	7,00
Seviyelendirilmiş Maliyet (Cent / kWh)	8,4	6,6	6,2	6,5
Karbon Vergisi Dahil Seviyelendirilmiş Maliyet (Cent / kWh + 25\$ / ton CO <sub>2</sub> )	-	-	8,3	7,5

Burada risk primi ile kastedilen, nükleer santral inşa projesinin barındırdığı ekonomik risklerin üretim maliyetine yansıtılmasıdır. Bir diğer ifade ile iyi ve kötü durumlarda karşılaşılabilecek maliyetlerin ekonomik analizidir. Çizelge 3.12'de risk

primi hariç nükleer enerji birim kWh maliyetinin kömür ve doğalgaz santrallerinin birim kWh maliyet değerleri ile rekabet edebileceği görülmektedir.

Ancak risk primi işin içine girdiğinde nükleer enerji birim kWh seviyelendirilmiş maliyeti ile kömür ve doğalgaz santrallerinin birim kWh seviyelendirilmiş maliyetleri arasında bir fiyat uçurumu görülmektedir. Fakat karbon salınımları ve birim ton CO<sub>2</sub> üretimi başına 25 dolar karbon vergisi, birim kWh seviyelendirilmiş maliyete dâhil edildiğinde fiyatların tekrar birbirleri ile rekabet edebilecek seviyelere geldikleri görülebilir.

Feretic, D. ve Tomsic, Z. tarafından yapılan çalışmada da nükleer enerjinin diğer enerji kaynakları ile rekabet edecek seviyelerde birim elektrik üretim maliyetlere sahip oldukları tahmin edilmiştir. Çalışmada kombine çevrim doğal gaz santraline ait birim üretim maliyetinin 4,5 – 6,3 sent /kWh aralığında, en yüksek ihtimalle 5,8 sent /kWh olduğu; kömür termik santrallerine ait birim üretim maliyetinin 4,5 – 6,3 sent /kWh aralığında, en yüksek ihtimalle 5,2 sent / kWh olduğu; nükleer santrallere ait birim üretim maliyetinin 4,2 – 5,8 sent / kWh aralığında ve en yüksek ihtimalle 4,8 sent / kWh olduğu tahmin edilmiştir [33]. Çalışmanın ilgi uyandıran sonucu nükleer enerjinin en uygun birim maliyete sahip teknoloji olarak tahmin edilmesidir.

Çalışmada ayrıca enerji kaynaklarının birim elektrik üretim maliyetleri arasındaki muhtemel fark tahmin edilmiştir. Kömür ve doğalgaz kaynakları arası en olası maliyet farkı (- 0,5) sent / kWh; kömür ve nükleer arası en olası maliyet farkı ise (+ 0,4) sent / kWh olarak tahmin edilmiştir [33].

Görüldüğü üzere birim elektrik üretim maliyeti olarak karşılaştırıldığında, nükleer enerji teknolojisi diğer enerji üretim teknolojileri ile rekabet edebilecek fiyatlarda bulunabilmektedir. İncelenen çalışmalarda hesaplar geleneksel uranyum yakıtlar dikkate alınarak yapılmıştır. Önceki konularda değinildiği üzere toryum yakıtların maliyetleri, uranyum yakıtların maliyetlerine göre daha düşük olacağından dolayı, toryum yakıtlı nükleer santrallerin birim elektrik üretim maliyetleri, uranyum yakıtlı nükleer santrallerin birim elektrik üretim maliyetlerinden bir miktar daha düşük olabilecektir. Dolayısıyla birim maliyet konusunda uranyum yakıtların rekabet edebildiği her alanda toryum yakıtlar da aynı rekabeti sürdürebilirler. Hatta toryum yakıtlar öngörülen daha düşük birim elektrik üretim maliyetleri sebebiyle rekabette uranyum yakıtlara göre daha avantajlı olabilirler.

### 3.5 Türkiye’de Toryum Yakıtlı Nükleer Santral Kurulabilecek Bölgeler

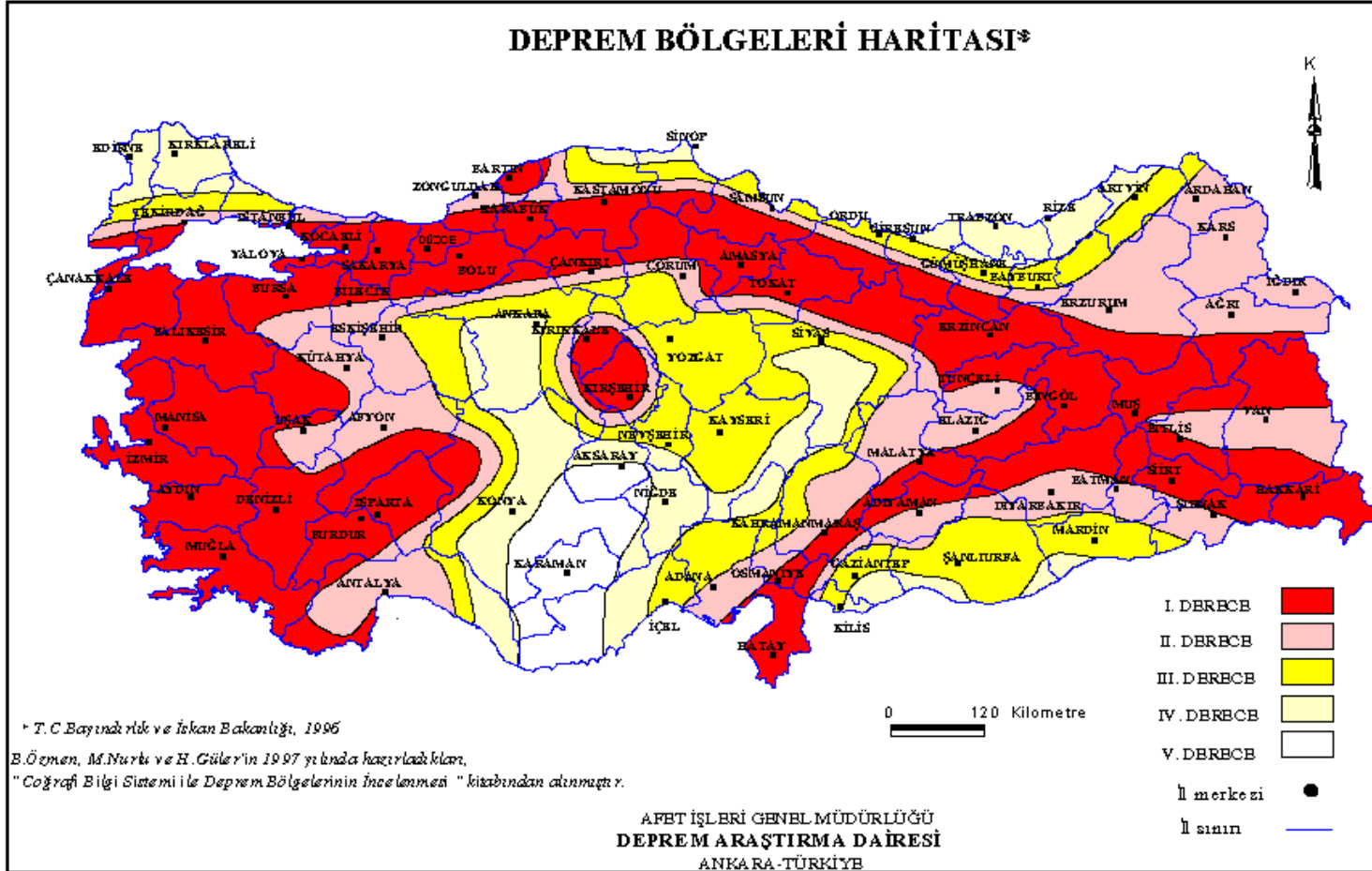
Tez çalışmasının bu kısmında çeşitli belirleyici kriterler dahilinde toryum yakıtlı nükleer santrallerin inşası için Türkiye’de hangi bölgelerin uygun olacağı kabaca belirlenmeye çalışılacaktır. Bir nükleer santral, diğer enerji santrallerinden daha farklı ve ileri bir teknolojiye sahiptir. Bu sebeple nükleer santrallerin yer seçimini etkileyen faktörler, diğer enerji kaynaklarını kullanarak üretim yapan santrallere göre çok daha farklıdır. Örneğin nükleer santral, fosil yakıt santralleri gibi sık yakıt beslemesine ihtiyaç duymaz, dolayısıyla yakıt kaynağından uzağa konumlandırılabilir. Ancak fosil yakıt santrallerinin yer seçiminde enerji kaynağına olan yakınlık büyük önem taşır [34].

Bir nükleer santralin yer seçiminde önem taşıyan belirleyici faktörler genel olarak şunlardır;

- Deprem riskinin az olduğu bir bölge olmalıdır,
- Enerji nakil hatlarına kolay ulaşılabilir bir bölge olmalıdır,
- Çevre uyumluluğu, Kaza ihtimali gibi durumlara karşı nüfus yoğunluğunun az olduğu bir bölge olmalıdır,
- Enerji ihtiyacının yüksek olduğu merkezlere yakın bir bölge olmalıdır,
- Santralin soğutma ihtiyacının etkin bir biçimde karşılanabileceği bir bölge olmalıdır.

Bunların dışında nükleer santrallerin yer seçimi yapılırken çeşitli ihtiyaç ve durumlara göre daha birçok politik, siyasi, askeri, çevresel, endüstriyel vb. ölçüt dikkate alınır.

Türkiye deprem riski yüksek bir ülkedir. Her ne kadar nükleer santraller yüksek şiddetlerde depremlere dayanabilecek biçimde tasarlansalar ve inşa edilseler bile, Fukuşima kazası gibi durumları engelleyebilmek ve riski azaltabilmek adına santral kurulumu için düşük deprem riski olan bölgeler seçilmelidir. Şekil 3.3, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasını göstermektedir.



Şekil 3.3: Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası [35].

Şekil 3.3'te de görülebileceği üzere Akkuyu Nükleer Güç Santrali, ülkede deprem riskinin en az olduğu bölgelerden birine inşa edilecektir. Dolayısıyla yalnızca deprem riski göz önünde bulundurulduğunda, Antalya'nın doğusu ve Mersin, Karaman, Sinop, Trabzon–Rize–Artvin kıyıları, Kırklareli ve Edirne'nin kuzeyi Türkiye'nin en düşük deprem riskine sahip bölgeleridir.

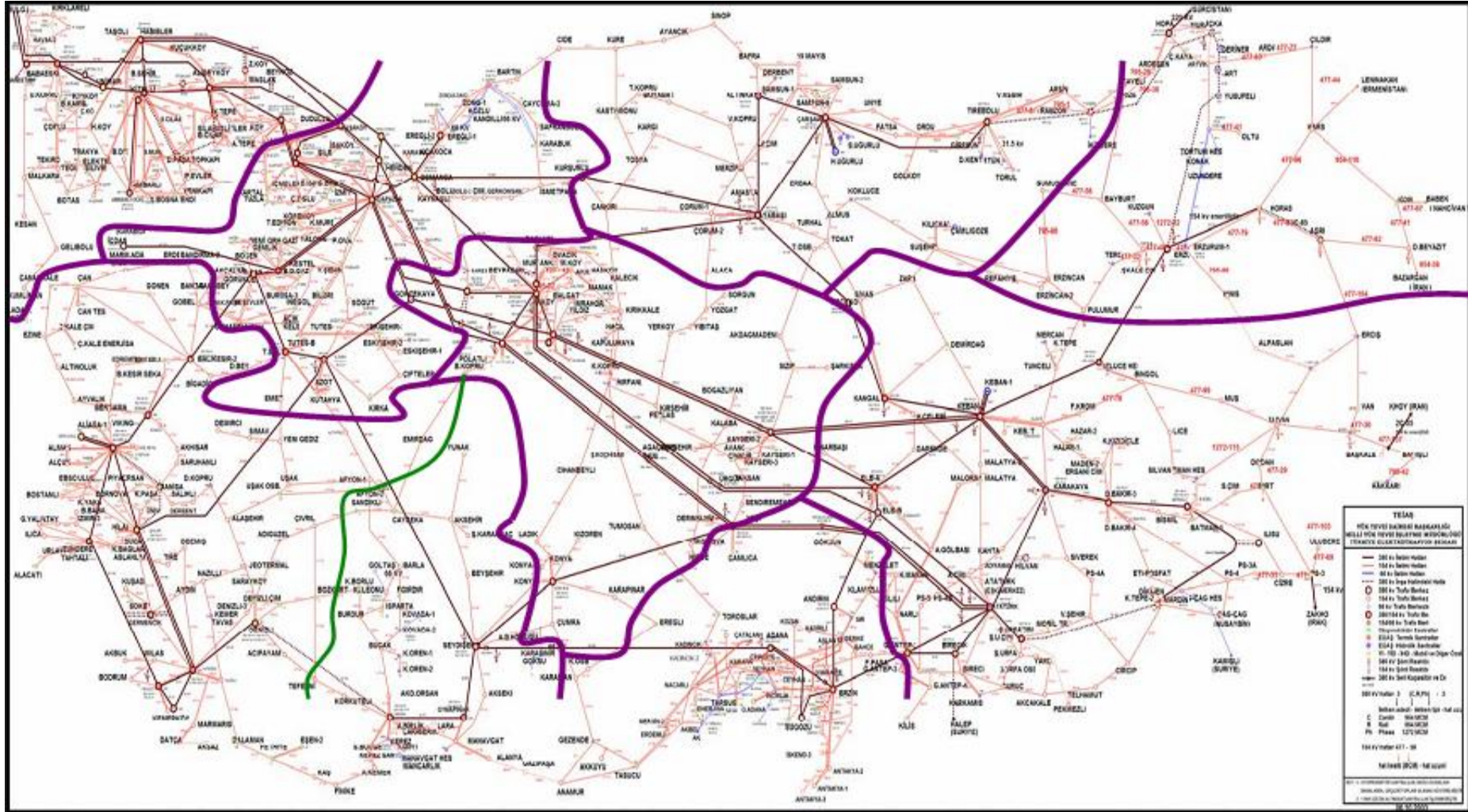
Enerji nakil hatlarına yakınlık, bütün enerji santrallerinin yer seçimlerini etkileyen önemli bir faktördür [34]. Enerji nakil hatlarından uzağa konumlandırılmış santrallerin şebekeye bağlanabilmeleri için ayrıca bağlantı hattı çekilmesi gerekir. Bu hizmet devlet tarafından karşılanmamakta olup, dolayısıyla santral yatırımcısına fazladan maliyet oluşturmaktadır.

Dolayısıyla şebekeye bağlanımın en uygun maliyette gerçekleştirilebileceği bölgelerin seçimi, hem daha mantıklı hem de daha kârlıdır. Şekil 3.4, Türkiye elektrik iletim şemasını göstermektedir. Görüldüğü üzere deprem riski az olan alanlara 154 kV ve 380 kV şebeke ulaşmaktadır. Akkuyu bölgesine ise 154 kV şebeke ulaşmaktadır.

Nüfus yoğunluğuna bakıldığında; Türkiye'de nüfusun büyükşehirler ve civarındaki iller çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Batıda doğuya nazaran daha yoğun bir yerleşim gözlenmektedir. Şekil 3.5, Türkiye nüfus yoğunluğu haritasını göstermektedir.

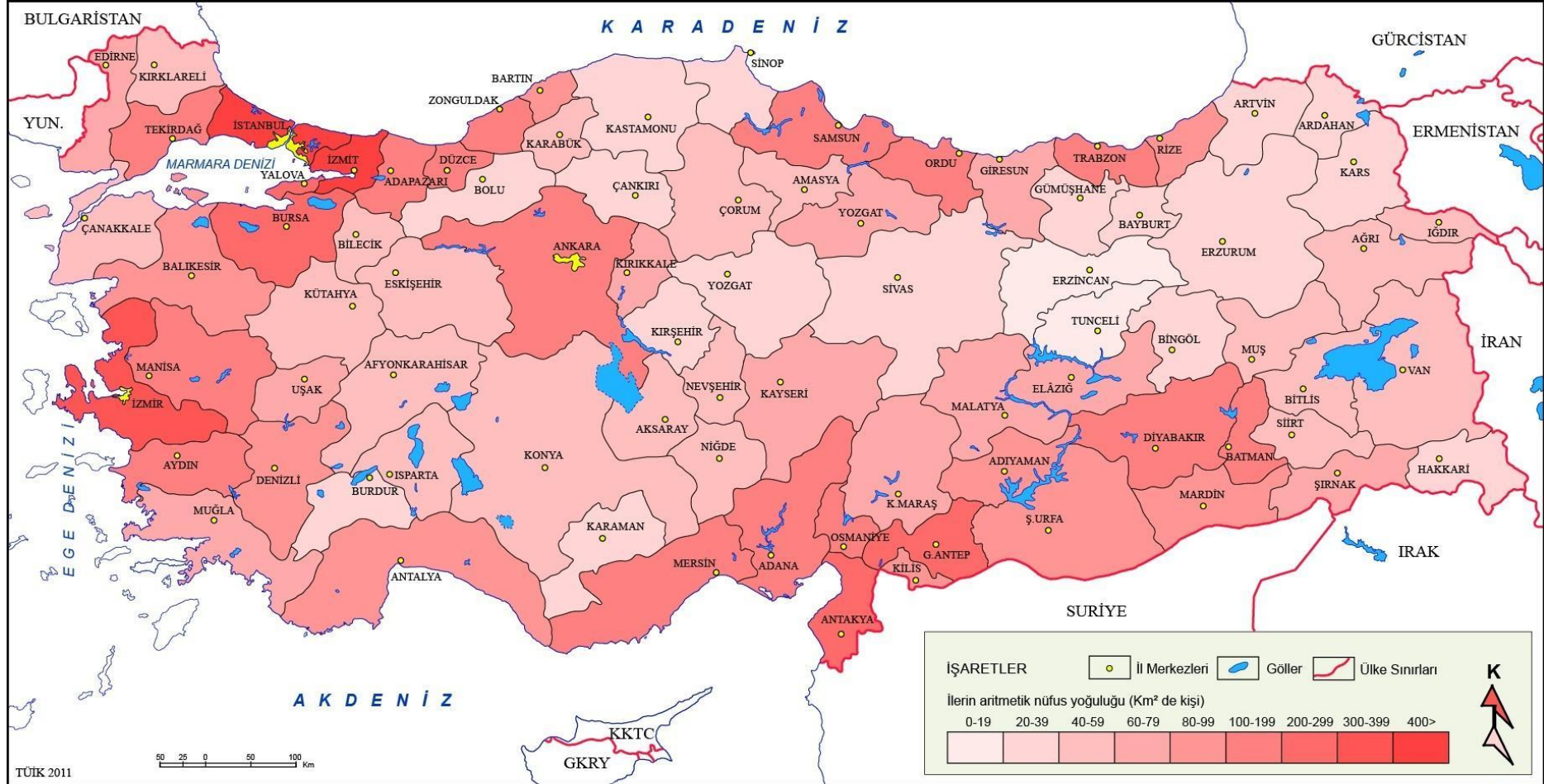
Şekil 3.5, her il için yaşayan kişi sayısının ilin yüzölçümüne bölünmesi sonucu bulunan oran yardımı ile oluşturulan bir haritadır. Ancak mikro ölçekte bir ilin sınırları içerisindeki her noktanın nüfus yoğunluğu eşit değildir ve nüfus homojen dağılım göstermez. İnsanlar genellikle ulaşımın kolay olduğu, akarsu ve göl vb. gibi kaynaklara yakın yerleşirler. Bu sebeple her ne kadar makro ölçekte Mersin ilinin tümünde nüfus yoğunluğu büyük gibi görünse bile Akkuyu bölgesinde yerleşim daha nadir bulunmaktadır.

Nüfus yoğunluğu açısından bakıldığında önceki iki değerlendirmede uygun şartları sağlayan; Antalya'nın doğusu, Mersin ve Karaman ülke geneline nispeten az sayılabilecek bir nüfus yoğunluğuna sahiptir. Sinop az nüfus yoğunluğuna sahiptir. Trabzon–Rize–Artvin kıyılarında ise nüfus yoğunluğu Artvin'den Trabzon'a doğru



Şekil 3.4: Türkiye Elektrik İletim Şeması [36].





Şekil 3.5: Türkiye Nüfus Yoğunluğu Haritası [37].

artmaktadır. Kırklareli ve Edirne'nin kuzeyinde ise nüfus yoğunluğu Türkiye geneli göz önünde bulundurulduğunda düşük olarak değerlendirilebilir.

Enerji ihtiyacının ve sanayileşmenin yüksek olduğu bölgelerin yüksek deprem riski içeren bölgelerde veya bu bölgelere yakın olmaları sebebiyle birlikte, deprem riskinin önemli bir öncelik olması sebebi sonucu Türkiye'ye kurulacak toryum yakıtlı nükleer santraller mecburen büyük merkezlere belli uzaklıklarda olmak zorundadır. Bu yönden bakıldığında Kırklareli ve Edirne'nin kuzeyine kurulacak santraller İstanbul'a yakın olmaları sebebiyle etkin bir konuma sahip olacaklardır.

Antalya'nın doğusu, Mersin ve Karaman bölgesine kurulacak bir toryum yakıtlı nükleer santral, Akdeniz bölgesine elektrik sağlayan güç santrallerinin azlığı sebebiyle ülke şebekesini dengeleyici bir etki sağlayabilir. Sinop, Ankara'ya yakınlığı durumuyla yine uygun bir bölge olarak değerlendirilebilir. Trabzon–Rize–Artvin kıyılarında kurulacak bir santral ise Karadeniz Bölgesi'nin enerji ihtiyacını karşılamada baz yük santrali olarak etkin biçimde kullanılabilir. Ancak bu bölgede nükleer santral ve hidrolik santrallerin bir arada bulunması ile, devlet harici tüzel kişi veya kurumlara elektrik satışında bir rekabet eşitsizliği oluşabilir.

Soğutma olanakları düşünüldüğünde ise, Karadeniz ve Ege Denizi'nin mevcudiyetinin Kırklareli ve Edirne'nin kuzeyi için uygun şartları sağladığı söylenebilir. Aynı şekilde Sinop ve Trabzon–Rize–Artvin kıyılarında Karadeniz'in sağladığı bir soğutma avantajı bulunmaktadır. Antalya'nın doğusu ve Mersin'in batısı için ise Akdeniz'e kıyı olmanın getirdiği soğutma avantajı bulunmaktadır. Karaman'ın hiçbir denize kıyısı olmaması her ne kadar soğutma olanakları açısından bir dezavantaj gibi görünse de bölgede bulunan akarsu ve göller, santral soğutmasına yardımcı olabilir.

Belirleyici genel faktörler doğrultusunda Türkiye'de; Antalya'nın doğusu ve Mersin, Karaman, Sinop, Trabzon – Rize – Artvin kıyıları, Kırklareli ve Edirne'nin kuzeyinin genel olarak toryum yakıtlı nükleer santral inşası için diğer bölgelerden daha avantajlı ve üstün oldukları görülmektedir.

Lâkin burada kabaca belirlenen bu bölgeler içerisinde tesis inşası yapılacak bölgenin mikro ölçekte daha ayrıntılı ve daha titiz çalışmalar sonucu itina ile belirlenmesi lazımdır. Örneğin, her ne kadar Karaman genel olarak iyi bir bölge gibi görünse bile,

bölgenin zemin yapısının obruk oluşumuna yatkın olması ve göçme eğilimi göstermesi, nükleer santral inşası için büyük bir risk teşkil edebilir.

İkinci nükleer tesisin kurulacağı alan olarak Sinop'un seçilmesi, genel olarak da olsa tez çalışmasında yapılan bu değerlendirme ile mantıklı sonuçlara ulaşıldığının bir göstergesi olarak düşünülebilir. Dolayısıyla Türkiye'de kurulacak diğer nükleer santraller yüksek ihtimalle tahmin edilen bu bölgeler veya civarlarına konumlandırılacaktır.



#### **4. TORYUM İLE NÜKLEER ENERJİ ÜRETİMİNDE HİNDİSTAN ÖRNEĞİ VE TÜRKİYE’NİN NÜKLEER ENERJİ KONUSUNDA İZLEDİĞİ YOL**

Türkiye ile Hindistan, birbirleri ile birçok noktada benzerlik gösteren, gelişmekte olan iki ülkedir. Hindistan da aynı Türkiye gibi mücadele vererek bağımsızlığını kazanmıştır. Her iki ülke de diğerinin bağımsızlık mücadelesini desteklemiştir. Her iki ülkenin de köklü bir tarihi geçmişi bulunmaktadır. Her iki ülke de, kendine has benzersiz bir kültüre ve geleneklere sahiptir. Her iki ülke de halkın iradesi ile yönetilmektedir, lâik ve demokratik bir devlet yapısına sahiptir. Nitekim daha birçok konuda bu benzerlikler çoğaltılabilir.

İki ülke arasındaki dosthane ilişkiler tarih boyunca; kültürel, bilimsel, felsefik ve benzeri birçok konuda bilgi alışverişine sebep olmuştur. Örneğin, Mimar Sinan’ın yetiştirdiği Osmanlı mimarı Mimar Yusuf, Hindistan’a gitmiş ve Hint İmparatoru Ekber Şah’ın hizmetinde çalışmıştır. Mimar Yusuf, Agra ve Delhi’de yaptığı mimari eserleri ile ün salmıştır. Hindistan’ın zengin söz varlığıyla önemli dillerinden biri olan Urdu, ismini Türkçe bir kelimeden almıştır. Mevlânâ Celaleddin-i Rumi’nin temsil ettiği Sufizm (Tasavvuf) felsefesi, Sufizmin gelenekleri, Hindistan’da kabul görmüştür [38].

İki ülke arasında enerji kaynakları ve potansiyelleri bakımından da büyük benzerlikler bulunmaktadır. Örneğin her iki ülkenin de hidroelektrik potansiyelleri yüksektir. İki ülke de fosil yakıt olarak yalnızca kömür rezervleri bakımından zengindir, petrol ve doğalgaz bakımından fakirdir.

Bu kadar ortak noktanın yanında ilginç bir tesadüf olarak; Hindistan da Türkiye gibi yüksek toryum rezervlerine sahip bir ülkedir. Tez çalışmasının bu kısmında; Türkiye’ye kendi öz kaynağı olan toryum madeni ile nükleer enerji üretebilme adına örnek olabilecek, birçok konuda benzerlik taşıdığı, Hindistan’ın nükleer enerji geçmişinden, ardından Türkiye’de nükleer enerji adına yapılan girişimlerden ve çalışmalardan kısaca bahsedilecektir.

#### 4.1 Toryum ile Nükleer Enerji Üretiminde Hindistan Örneği

Hindistan, nükleer teknolojinin enerji üretimi amaçlı kullanıldığında, ülkedeki mevcut veya muhtemel birçok problemin üstesinden gelinebileceğini farketmiştir. Özellikle fosil kaynaklar bakımından zengin bir ülke olmamasına rağmen enerji üretebilmek için dış kaynak kullanmamış, nükleer enerji sayesinde mevcut kaynaklarından yararlanarak enerjisini üretebilmiştir. Böylelikle enerji konusunda dışa bağımlılığını azaltmıştır [39].

Nükleer enerji konusundaki atılımları ve girişimleri sayesinde Hindistan günümüzde; yakıtın maden halinden reaktörlerde kullanılacak standartlara getirilmesine kadar olan sürece hakim ve üretim için gereken teknolojiye ve sanayiye sahip, kendi reaktörlerinde kullanmak için ağır su üretebilen, yakıtlarının atıklarını değerlendirme imkânına ve teknolojisine sahip olan dünyadaki birkaç ülkeden biridir [39].

Hindistan nükleer serüvenine 1945 yılında Bombay'da açılan Tata Temel Araştırmalar Enstitüsü ile başlar. 1948'de ülkenin tam bağımsızlığını kazanması sonucu bu araştırma biriminde nükleer teknoloji barışçıl amaçlar doğrultusunda incelenmeye başlanır. Hükümet, Atom Enerjisi Departmanı'nı ülkedeki faaliyetlerde yegane sorumlu olarak atar. Araştırma tesisinde ayrıca çeşitli kimyasal analizler ve değerli metallerin geri kazanımı adına çeşitli çalışmalar yapılmıştır [39].

1954'te Bombay'a yakın bir başka bölge olan Trombay'a disiplinler arası araştırma ve geliştirme tesisi olan Bhabha Atomik Araştırma Tesisi inşa edilir. Bu tesisin inşa amacı; nükleer enerji konusunda ülkenin yerel bilgi birikimini ve deneyimlerini arttırabilmektir. Tesis çalışmaya toplamda 130 bilimadamı ve teknisyen ile başlayıp, günümüzde 10000 kişinin çalıştığı bir kurum haline gelir [39].

Gelişmekte olan ülkeler için sanayileşmiş ülkelere ithal edilen teknolojinin, ülkenin mevcut sosyo-ekonomik şartlarına uyum sağlama konusunda genellikle sıkıntı yaşadığı görülür. İthal edilen bu teknoloji, ülkenin çoğu yerli kaynağını ve imkanlarını atıl bırakır. Ancak olumsuz etkilerine rağmen çoğu gelişmekte olan ülke, araştırma ve geliştirme faaliyetlerine ayıracak kadar finansal kaynak bulamaz ve teknoloji ithal etmek zorunda kalır [39].

1956 yılında APSARA isimli reaktör, kurulum kararının alınmasından yaklaşık iki sene sonra kritik hale gelir. Bu reaktör ile Hindistan, ilk havuz tipi reaktör tecrübesini gerçekleştirir. Reaktörün tasarımı tamamen yerli olma özelliği taşır. Yalnızca yakıt

elemanları İngiltere'den ithal edilmiştir. Bunun dışında reaktörün bütün ekipmanları yerli tasarıma sahiptir ve yerli sanayi ile üretilmiştir [39].

Aynı anda 1956 yılında CIRUS adlı 40 MW güç kapasiteli doğal uranyum yakıtlı ağır su yavaşlatıcılı araştırma reaktörü, Kanada ile işbirliği yapılarak kurulur. Proje sürecinde Hindistanlı bilimadamları, Kanadalı bilimadamları ile eşzamanlı çalışırlar. Bu reaktörün yakıtının yarısı Hindistan tarafından, mevcut tesisleri yardımı ile üretilir. Reaktör 1960 yılında kritik hale gelir. Reaktörün yakıtı önceden kurulmuş olan Trombay tesislerinde üretilmiştir. Reaktöre gereken ağır su ise yine yerli üreticiler tarafından üretilmiştir [39].

Hindistan, 1956-1966 yılları arasında; uranyum saflaştırma, yakıt fabrikasyonu, reaktör yan parçaları üretimi, araştırma reaktörü kurulumu, radyoizotop ayırımı, radyasyon tedavisi gibi önemli işlere girer. Bu girişimleri başarıyla yürütür. Başlangıçtaki küçük girişimlerini zaman içerisinde geliştirerek büyüyen Hindistan, günümüzde nükleer teknoloji alanında uzman kurum ve kuruluşlara sahip bir ülke haline gelir [39].

1961 yılında dışarıdan hiçbir destek almadan tamamiyle yerel imkanlar dahilinde nükleer atık işleme tesisi inşasına başlanır. Tesis, 1964 yılında hizmete alınır. Bu tesis hizmete alındığı yıl itibariyle Hindistan'ı dünyada kendi nükleer atık işleme tesisine sahip beşinci ülke yapar. Nükleer atık işleme tesisi, aynı yıl bir başka ülkede inşa edilen aynı kapasitedeki bir nükleer santralin maliyetinin yarısından daha az bir miktara maledilir. Bir diğer ifade ile yerli kaynaklar kullanılarak maliyetler düşürülmüştür [39].

Nükleer teknoloji alanında yerli imkanların geliştirilip uygun şartların sağlanması ile birlikte Hindistan 1966-1976 yılları arasında ticari amaçlı nükleer santraller kurmak için çalışır. Bu yıllarda kurulan bütün santrallerin yer seçimleri, enerji ihtiyaçları vb. değerlendirmeler ve fizibilite çalışmaları yaklaşık 15 yıl önceden yapılmıştır. Nükleer santraller daha çok ülkenin enerji kaynakları bakımından fakir bölgelerine konumlandırılmıştır [39].

Hindistan'da doğal gaz ve petrolden enerji üretimi hiçbir zaman ciddi olarak düşünülmemiştir. Hindistan bu kaynaklar bakımından fakir bir ülkedir ve dolayısıyla bu kaynaklar ile enerji üretebilmek için kaynakları yurtdışından ithal etmesi gerekecektir. Bunun yanında petrol ve doğal gaz fiyatlarının artış içinde olması

sebebiyle bu kaynakların enerji üretiminde kullanılmasının ülke için kârlı bir çözüm olmayacağı düşünülmüştür. Hindistan enerji politikalarında; üretimin tamamiyle yerli kaynaklardan yapılması düşüncesindedir [39].

Hindistan, enerji üretimi için kaynak ithal etmek yerine kendi öz kaynaklarını etkin biçimde kullanabilmenin daha doğru olacağını düşünmüştür. Özellikle ülkenin zengin toryum rezervlerini değerlendirebilmek adına çeşitli çalışmalar yapılır. Toryum yakıtların nükleer santrallerde etkin biçimde kullanılabilmesi için üç aşamalı plan tasarlanır. Planın ilk aşamasında doğal uranyum ile çalışabilen reaktörler kurulacak, ikinci aşamada bu reaktörlerin yakıtları geri dönüştürülerek karışık oksit yakıtlar olarak toryum ile birlikte kendi yakıtını üretebilen hızlı reaktörlerde kullanılacak, son aşamada ise kendini besleyebilen sürdürülebilir bir toryum - uranyum-233 yakıt zinciri oluşturulacaktır. Böylelikle ülke zengin toryum rezervlerini etkin ve verimli bir biçimde kullanabilecektir. İlk aşamada doğal uranyum yakıtlı reaktörler, ülkenin mevcut uranyum rezervlerini daha ucuz ve etkin biçimde değerlendirebilmek amaçlı seçilmiştir [39].

Hindistan'ın ilk nükleer güç santrali, 1969 yılında Tarapur'da iki kaynar su reaktöründen oluşmaktadır ve kurulu güç kapasitesi 200 MWe civarındadır. Bu santral General Electric firmasına anahtar teslim proje olarak yaptırılmıştır. Bu projede Hindistan'ın bilimadamları ve mühendisleri de görev almıştır. Bu reaktörün zenginleştirilmiş uranyum yakıtı 1975 yılında Hindistan'da, Hyderabad Nükleer Kompleksi'nde Amerika Birleşik Devletleri'nden uranyum hexaflorit ithal edilerek üretilmiştir [39].

Tarapur Güç Santrali'nin inşası sürerken, Rajasthan eyaletinin Kota şehrinde 220 MWe kapasiteli bir ağır su reaktörlü güç santrali kurulması kararlaştırılır. Bu projede Hindistan, Kanada ile ortak bir çalışma yürütür. Reaktör 1975 yılında devreye alınır [39].

Herbiri 235 MWe güç kapasiteli iki ağır su reaktörünün oluşturduğu üçüncü nükleer güç istasyonu, Madras yakınlarında inşa edilir. Bu projede tüm sorumluluk ve faaliyetlerin sürdürülmesi görevi Hindistan'ın yetiştirdiği bilimadamları ve mühendisler tarafından üstlenilir. Nükleer alanda bilgi birikiminin artması ve edinilen tecrübelerin neticesinde reaktörlerin bölge şartlarında etkinlikle kullanılabilmesi için dizaynlarında çeşitli yenilemeler ve geliştirmeler yapılır [39].



Hindistan'ın dördüncü nükleer güç santrali, Uttar Pradesh eyaletinde bulunan Narora şehrine kurulur. Buraya kurulan reaktörler, depreme dayanıklı tasarım, iki bağımsız hızlı güvenlik sistemi, arttırılmış güç kapasitesi gibi yeniliklere sahiptirler. Hindistan, Narora'da kullandığı tasarımını geliştirip yeni santrallerin yapılarında da kullanmayı hedeflemiştir. Reaktöre ait, buhar üretici, soğutucu pompaları vb. gibi tüm yardımcı parçaların yerli sanayi ile üretilmesi planlanmıştır [39].

Kendi öz kaynaklarını kullanması, Hindistan'ın inşa ettiği santrallerde ithal parçaların sayılarının azalmasına sebep olmuştur. Rajasthan Güç Santrali'nin ilk reaktör ünitesinin yaklaşık %45'lik kısmı ithal edilerek temin edilmiştir, ikinci reaktör ünitesinde bu oran %30'a düşmüştür. Madras Güç Santralinde ithal edilerek temin edilen kısım yaklaşık %12'lik bir bölümü oluşturmaktadır. İthal edilerek temin edilen kısım oranı Narora Santrali'nde %9'lara düşmüştür [39].

Bunun yanında yerli üretim kapasitesinin ve yerli kaynakların kullanılması, inşa edilen santrallerin maliyetlerini de azaltmıştır. Örnek olarak yerli kaynakların kullanılması, Rajasthan Santrali'ndeki kilowatt başına mühendislik maliyetlerini %15 civarı düşürmüştür. Narora Santrali'nde ise bu oran %6'dan daha az miktarlara inmiştir. Bunun yanında Hindistan'ın kendi nükleer güç santrallerini yerel imkanları ile kurması, bu alanda deneyim ve tecrübelerinin artmasına sebep olmuştur ve bu sayede dizaynlarını iyileştirebilme imkanı sağlamışlardır [39].

Özetlemek gerekirse Hindistan, nükleer enerji konusunda oldukça cesur atılımlar yaparak, büyük sorumluluk alır ve çabaları sonucu nükleer teknolojiye sahip ve bu teknolojiyi kontrol edebilen, geliştirebilen, kendi santrallerini ve yakıtını üretebilen, atıklarını değerlendirebilen bir ülke haline gelir. Tüm bu faaliyetlerinde yerli sanayinin de katılımı ve desteğini sağlayan Hindistan, nükleer teknoloji alanında uygun kalitede malzeme ve ekipman üretebilecek seviyede ve kapasitede sanayiye sahip olmuştur. Bu aşamaya gelinirken zamanında mevcut imkanlar ile yapılması güç ve maliyetli olan parçalar yurtdışından ithal edilirler [39].

Nükleer enerji uygulamaları Hindistan'da yalnızca enerji ihtiyacını karşılamakla kalmayıp dolaylı yoldan ülkedeki bilim, sanayi ve teknolojiyi de geliştirmiştir. Nükleer güç santralleri gibi büyük projelerin yerli imkanlar ile gerçekleştirilebilmesi, Hindistanlı sanayicileri ve yatırımcıları ülkede büyük ve pahalı fabrikalar, güç santralleri vb. kurmaya teşvik ederek cesaretlendirir. Bunun yanında teknolojinin

ilerlemesi üretimi zor ve karışık çeşitli parçaların ve bileşenlerin yerli sanayi ile üretilebilmelerini sağlar [39].

Hindistan nükleer enerji hakkındaki gelecek planlarında kendi yakıtını üretebilen hızlı reaktörler geliştirip, toryum rezervlerini uranyum veya karışık oksit yakıtlar ile bu reaktörlerde yakıt olarak kullanmayı hedeflemektedir. Böylelikle enerji ihtiyacını yerel ve öz kaynaklarından karşılayabilen ve enerji konusunda kendine yetebilen bir ülke olmayı hedeflemektedir.

#### **4.2 Türkiye'nin Nükleer Enerji Süreci ve Girişimleri**

Türkiye'nin nükleer süreci 1955 yılında Amerika Birleşik Devletleri ile "Sulh için Atom" programı çerçevesinde imzalanan anlaşma ile başlar [40]. Bu anlaşmanın sonucunda Türkiye'de nükleer enerji konusunda çalışmalar ve girişimler artış gösterir. İstanbul Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi'nin ortak girişimi ile kendi nükleer araştırma reaktörüne sahip Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi kurulur [40].

Araştırma reaktörünün kurulumu sürerken, 1956 yılında yasal yükümlülükleri ve gereklilikleri kapsayacak olan 6821 sayılı Atom Enerjisi Komisyonu (AEK) yasası yürürlüğe girer [40].

Bu yasanın yürürlüğe girmesini takiben 1957 yılında 7015 sayılı yasa ile Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı'na (IAEA) üye olunur. Ardından 1959 yılında 7091 sayılı yasa ile radyoizotop üretiminin yasal çerçevesi oluşturularak, nükleer enerji girişimlerinin başlamasına yasal zemin hazırlanır. Bu yasanın ardından 1959 ve 1961'de çıkartılan sırasıyla 7256 ve 234 sayılı yasalar yardımıyla uygulama ile ilgili çeşitli düzenlemeler getirilir. Tüm bu yasal düzenlemelerin sonucunda kurumsallaşmış bir sistem ihtiyacını karşılayabilmek adına 9 Temmuz 1982 yılında çıkarılan 2690 sayılı yasayla Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) kurulur [40].

Türkiye tüm bu girişimlerinde nükleer enerjiyi silahlanma amaçlı kullanmayacağını, yalnızca barışçıl amaçlar için kullanacağını beyan eder ve Nükleer Silahların Yayılmasını Önleme Antlaşmasını 1980 yılında imzalayarak bunun garantisini verir [38]. Söz konusu anlaşma;

- Nükleer silah yapımına kalkışılmayacağı,
- Nükleer silah yapmaya çalışan ülkelere her türlü yardımın da yapılmayacağı

maddelerini içerir ve anlaşmayı imzalayan ülkenin uluslararası güvenliği sağlamanın bir parçası olacağını taahhüt ettiğinin bir göstergesidir [40].

Bunun yanında Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı ile 1981 yılında imzalanan anlaşma ile Türkiye’de bulunan mevcut ve inşa halindeki bütün nükleer tesisleri üzerinde IAEA’nın denetimini kabul eder [40].

Tüm bu yasal ilerlemeler ile birlikte Türkiye’de nükleer santral inşası ve işletmesi de tartışılmaya başlanır. Amerika Birleşik Devletleri, İsviçre ve İspanya firmalarının oluşturdukları konsorsiyum ile Elektrik İşleri Etüt İdaresine 1969 yılında danışmanlık yaparlar. Ve bu dayanışma sonucu Türkiye’ye döneminin ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacı ile ilk olarak 400 MWe’lik doğal uranyum yakıtlı basınçlı ağır su reaktörü tipi bir reaktör tavsiye edilir. Ancak bu proje yeterince siyasi destek bulamaz ve askıya alınır [40].

Bunun ardından 1974 yılında ise Türkiye Elektrik Kurumu Nükleer Santraller Dairesi tarafından nükleer santral kurulması kararı alınır ve yer seçimi için çalışmalar başlatılır. Yapılan çalışmalar sonucu Mersin–Akkuyu bölgesi uygun görülür ve 1976 yılında lisanslanır [40].

Lisanslanan alan için üçü İsviçre, biri Fransa firmasından oluşan danışman konsorsiyumu ile birlikte nükleer santral ihalesi için çalışmalara tekrar başlanır. Tekliflerin değerlendirilmesi sonucu 1977 yılında iki firma ile sözleşme öncesi görüşmelere başlanır. Ancak çeşitli siyasi sebeplerden dolayı 1979 yılında bu proje de askıya alınır. Hatta bu projede danışmanlık hizmeti veren firmalardan birinin verdiği referanslarında asılsız bir Türkiye haritası kullanarak bu görevinden bahsetmesi, danışmanlık yaptığı ülkeyi tam olarak tanıyamaması nedeniyle ironik bir durum oluşturmuştur [40].

Bu girişimin de ardından TAEK tarafından 1982 yılında ihalesiz olarak AECL, Siemens–KWU ve General Electric firmalarından teklifler istenir. Takiben 1983 yılında ise 7405 sayılı Nükleer Tesislere Lisans Verilmesine Dair Tüzük yürürlüğe girer. Aynı yıl AECL ve Siemens–KWU ile pazarlık görüşmelerine başlanır ve yap–işlet–devret modeli devlet tarafından uygun görülür. Yap–işlet–devret modelini uygun bulmayan Siemens–KWU ve General Electric firmaları ihaleden çekildiklerini açıklarlar. AECL firması ile yapılan anlaşmalar, gerek Türk tarafındaki siyasi irade

eksikliklerinden gerek Kanada hükümetinin yap–işlet-devret modelini fazla riskli bulması sonucu 1986 yılında askıya alınır [40].

1992 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hazırlamış olduğu rapor ile Türkiye'nin 2010 yılında muhtemel bir enerji krizi yaşayabileceği vurgulanır. Enerji açığını kapatabilmek adına nükleer enerjiden yararlanmak gerektiğinden bahsedilir. 1995 yılında Türkiye Elektrik Üretim–İletim Anonim Şirketi (TEAŞ), Nükleer Santral İhalesi yürütebilmek için danışman olarak KAERI isimli Güney Kore firması ile anlaşır. 1996 yılında ise TEAŞ Nükleer Santraller Dairesi'nden görevli kişiler ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yetkilendirdiği kişiler tarafından ihale şartnamesine son şekli verilir. 1996 yılında ise Resmi Gazete'de Akkuyu Nükleer Santrali için ihale ilanı verilir. Aynı anda mecliste nükleer santral hakkında siyasi irade de sağlanır [40].

1997 yılında AECL, NPI ve Westinghouse firmaları ihale için tekliflerini sunarlar. Ancak 2000 senesinde hükümetin bu projenin sonlandırıldığını açıklaması ve nükleer enerjiden yine vazgeçilmesi, bu projeyi de askıda bırakır [40].

Türkiye–Rusya işbirliği ile inşa edilecek Akkuyu Nükleer Güç Santrali projesi, Türkiye'nin beşinci nükleer santral girişimi olacaktır ve eğer hayata geçirilebilirse Akkuyu Nükleer Güç Santrali, Türkiye'nin ilk nükleer güç santrali olacaktır. Türkiye'nin nükleer geçmişi, her ne kadar yasal olarak zemin hazırlanmaya çalışılsa da santral projelerin hayata geçebilmesi için siyasi iradenin gerekliliğini ve önemini göstermektedir.

Nitekim Türkiye'nin girişimlerin askıda bırakıldığı ve hayata geçirilmediği geçmişinin, nükleer enerji yatırımcıları ve kurulum firmalarını Türkiye'ye yatırım yapmaktan soğutmuş olabileceği söylenebilir. Ancak beşinci girişimini başarıyla tamamlayan bir Türkiye, bu yatırımcılar ve üreticiler için yine cazip bir ülke haline gelecektir.

Nükleer santraller için siyasi iradenin sağlanamamasında halkın tepkisinin rolü büyüktür. Dönemlerinin yönetim anlayışları doğrultusunda kurucu ve danışman olan şirketler halkın katılımına gereken özeni gösterememiş ve halkın bilgilendirilmesine gereken önemi verememiş olabilirler. Günümüzde en küçüğünden, böylesine büyük projelere kadar halkın katılımının sağlanmasına, eskiye göre daha çok özen gösterilmekte ve önem verilmektedir.

Tüm bu süreçlerin sonunda görülmektedir ki; Türkiye nükleer enerji konusunda, birçok konuda benzerlik gösterdiği Hindistan kadar atılım yapamamış, girişimleri çeşitli nedenler dolayısıyla hep yarım kalmıştır. Bu yüzden Türkiye’de ne yazık ki nükleer enerjiden ve avantajlarından henüz yararlanılamamıştır.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye gelişen bir ülkedir. Gelişim konusunda istikrarını sürdürmekte ve gün geçtikçe daha da büyümektedir. Büyüme ve gelişme ile birlikte ülkenin enerji ihtiyacı da giderek artmaktadır. Bu hususta bizlerin üzerine düşen ise; yarınlarımıza aydınlık bir gelecek garanti edebilmektir.

Toryum, nükleer enerji üretimi konusunda oldukça iyi özelliklere sahip bir fertil maddedir. Nükleer santrallerde kullanımı birçok konuda uranyuma göre daha üstün, daha avantajlı ve daha sürdürülebilirdir. Toryum içeren yakıtların performansları yüksektir. Ayrıca atıkları yeniden işlenerek değerlendirilebilir. Daha az zenginleştirilmiş fissil yakıtlar ile birlikte kullanıma uygundur. Toryum yakıtların atıkları daha az ağır metal içerirler.

Dolayısıyla zengin toryum rezervleri, Türkiye için enerji üretebilmek adına değerlendirilmeyi bekleyen büyük ve önemli bir potansiyeldir. Türkiye enerji konusunda ne yazık ki dışa bağımlı bir ülkedir. Öz kaynaklarını yeterli etkinlikle kullanamamaktadır. Bu sebeple çeşitli sorunlarla yüzleşmek zorunda kalmaktadır. Sahip olduğu toryum rezervlerini nükleer santraller vasıtası ile enerji üretiminde kullanmak muhakkak ki Türkiye'nin sorunlarını çözebilmesinde yardımcı olacaktır. Her ne kadar nükleer teknoloji uygulamaları yüksek maliyetli olsalar bile Türkiye için uzun vadedeki getirileri ödenen bedeli her türlü karşılayacaktır.

Türkiye'de toryum ile nükleer enerji üretiminde yol almak ve ilerleyebilmek için Hindistan gibi cesur kararlar alınmalıdır. Öncelikle zengin toryum rezervlerimiz hakkında daha ayrıntılı çalışmalar yapmalıyız ve toryum rezervlerimizin miktarları ve tenör oranları hakkındaki verileri çeşitli çalışmalar ile belirleyip güncel tutabilmeliyiz. Bunun yanında toryum rezervlerimizi kullanarak üretebileceğimiz toryum yakıtlarımızı etkin bir biçimde değerlendirebilmek için kendi yakıt stratejimizi oluşturmalı, yakıtlarımızı üretebilmek ve atıklarını değerlendirebilmek için kendi tesislerimizi kurmalı, üniversitelerimizde ve araştırma merkezlerimizde bu

konuda çalışmalar yürüterek teknolojimizi geliştirip, toryum ile nükleer enerji üretebilme konusunda kendimize yetebilen bir ülke olmalıyız.

Tüm bunları gerçekleştirebilmek mümkündür ve hiçbir Şey için henüz geç değildir. Nitekim Türk milleti, Mustafa Kemal ATATÜRK'ün de bahsettiği üzere "Az zamanda çok ve büyük işler başarmış" bir millettir. Bu sebeple Türkiye'nin gelecekte, kendi milli toryum yakıtlı nükleer santrallerine, yakıt üretim tesislerine, geri dönüşüm tesislerine sahip olması; kendi teknolojisini üretebilmesi ve kullanabilmesinin önünde bu konudaki kararsızlığından başka hiçbir engel yoktur.



## KAYNAKLAR

- [1]**Url-1** <<http://www.bizansbizans.com/>>, The Greek Fire or Grejuva, alındığı tarih: 16.02.2013.
- [2]**BP.** (2006). Statistical Review of World Energy, Haziran.
- [3]**Url-2** <<http://aboutjapan.japansociety.org/>>, Nagasaki After The Atomic Bomb, alındığı tarih: 16.02.2013.
- [4]**TMMOB-EMO** (2012). Enerji Verimliliği Raporu, EMO Yayınları, Ankara, Türkiye.
- [5]**Toryum.** (t.y.). *Wikipedia, Özgür Ansiklopedi.* Alındığı tarih:04.03.2013, adres: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Toryum>
- [6]**Url-3**<<http://www.galleries.com/>>, The Mineral Thorite, alındığı tarih: 04.03.2013
- [7]**Özgener, H., A.,** (1987). *Reaktör Teorisi*, Ders Notu, Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [8]**The OECD Nuclear Energy Agency and The IAEA.** (2012). Uranium 2011, Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD, 2012
- [9]**Tokay, M. , Erentöz, C.** (1957) Türkiye’de Muhtemel Uranyum ve Toryum Bölgeleri, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü*, Ankara.
- [10]**Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.** (2013). Türkiye Maden Yatakları Haritası, alındığı tarih: 05.03.2013, adres: [http://www.mta.gov.tr/v2.0/haritalar/maden\\_haritalari/myatak/myatak1.html](http://www.mta.gov.tr/v2.0/haritalar/maden_haritalari/myatak/myatak1.html)
- [11]**Vujić, J., et al.,** (2012) Environmental impact and cost analysis of coal versus nuclear power: The U.S. case, *Energy* (2012), doi:10.1016/j.energy.2012.02.011
- [12]**Thorium Fuel Cycle.** (t.y.). *Wikipedia, Özgür Ansiklopedi.* Alındığı tarih:04.03.2013, adres: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium\\_fuel\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium_fuel_cycle)
- [13]**Herring, J. S., et al.,** (2001) Low cost, proliferation resistant, uranium – thorium dioxide fuels for light water reactors, *Nuclear Engineering and Design* 203 (2001) 65 - 85
- [14]**Tsige - Tamirat, H.,** (2011) Neutronic assesment of the use of thorium fuels in current pressurized water reactors, *Progress in Nuclear Energy* 53 (2011) 717 – 721
- [15]**Jiyang, Y., et al.,** (2004) Thorium Fuel Cycle of a Thorium – Based Advanced Nuclear Energy System, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 71, 71 – 84

- [16] **Nuttin, A., et al.**, (2012) Comparative Analysis of High Conversion Achievable in Thorium – Fueled Slightly Modified CANDU and PWR Reactors, *Annals of Nuclear Energy* 40, 171 – 189
- [17] **Lewis, E., E.** (2008). *Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*, Elsevier, California, USA.
- [18] **EDAM, Ekonomi ve Dış Politika Araştırma Merkezi** (2012). Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli Raporu, Bölüm 2, EDAM, İstanbul, Türkiye.
- [19] **Lung, M., Gremm, O.**, (1998) Perspectives of the thorium fuel cycle, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 180, Issue 2, 133 – 146
- [20] **Dişbudak, H.**, (2001). Nuclear Perspective of Thorium Research and Boron Carbide Coating of Urania – Gadolina Fuel in Turkey, Technology Department, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK), Ankara, Türkiye.
- [21] **EDAM, Ekonomi ve Dış Politika Araştırma Merkezi, Saygın, H.**, (2012). Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli – II, Bölüm 4, Türkiye'nin Nükleer Yakıt Döngüsüne İlişkin Stratejisi, EDAM yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [22] **Url-4** < <http://world-nuclear.org/>>, Nuclear Fuel Fabrication, alındığı tarih: 25.04.2013
- [23] **Url-5** < <http://www.kntc.re.kr/>>, Reactor Core and Components, alındığı tarih: 18.03.2013
- [24] **Url-6** < <http://lisans.epdk.org.tr/>>, Elektrik Piyasası Üretim Lisansları, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, alındığı tarih: 01.04.2013
- [25] **Url-7** < <http://http://www.teias.gov.tr/>>, 2011 Yılı Türkiye Elektrik Üretim – İletim İstatistikleri, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü, alındığı tarih: 01.04.2013
- [26] **Schlissel, D., Biewald, B.**, (2008). Nuclear Power Plant Construction Costs, Synapse Energy Economics, Inc., Cambridge, İngiltere.
- [27] **The Keystone Center**, (2007). Nuclear Power Joint Fact – Finding, Washington DC, USA.
- [28] **Moody's Investor Services**, (2007). New Nuclear Generation in the United States, sayfa 11, USA.
- [29] **EDAM, Ekonomi ve Dış Politika Araştırma Merkezi, Atiyas, İ.**, (2012). Nükleer Enerjiye Geçişte Türkiye Modeli - I, Bölüm 4, Nükleer Santrallerde Riskler, Özendirme ve Finansman Modelleri: Uluslar arası Deneyim ve Akkuyu Modeli, EDAM yayınları, İstanbul, Türkiye.
- [30] **Url-8** < <http://enerjienstitusu.com/>>, Türkiye Kurulu Enerji Gücü, Yıllara Göre Kurulu Güç Gelişimi Senaryo 1, alındığı tarih: 05.04.2013
- [31] **T.C. Resmi Gazete**. (2010). Sayı: 27721, Karar Sayısı: 2010/918, 6 Ekim.
- [32] **MIT**. (2011). The Future of Nuclear Fuel Cycle: An Interdisciplinary MIT Study, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA.

- [33]**Feretic, D., Tomsic, Z.,** (2005) Probabilistic Analysis of Electrical Energy Costs Comparing: Production Costs for Gas, Coal and Nuclear Power Plants, Energy Policy 33, 5 – 13
- [34]**Topuz, G.,** (2012).Elektrik Enerjisi Yatırımları Analizleri, Ders Notu, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [35]**T.C. Deprem Dairesi Başkanlığı,** (t.y.) Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, T.C. Başbakanlık Acil Durum ve Afet Yönetimi Başkanlığı, adres: <http://www.deprem.gov.tr/sarbis/Shared/DepremHaritalari.aspx>
- [36]**TEİAŞ,** (2003) Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı, Milli Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü, Türkiye Elektrifikasyon Şeması
- [37]**Saygılı, R.,** (2012) Türkiye Nüfus Yoğunluğu Haritası, Eğitim Bilişim Ağı, adres: <http://www.eba.gov.tr/>
- [38]**Hindistan Büyükelçiliği,** (t.y.) Türkiye Hindistan ilişkileri, Kısa bilgi, Hindistan Büyükelçiliği, Ankara, Türkiye Cumhuriyeti, adres: <http://www.indembassy.org.tr/TR,27/kisa-bilgi.html>
- [39]**Sethna, H., N.,** (1979). *India's Atomic Energy Programme-Past and Future*, IAEA Bulletin – Vol 21, No 5, International Atomic Energy Agency (IAEA).
- [40]**Bayülken, A., R.,** (2008). *Türkiye’de Nükleer Enerji*, Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Ali İhsan Demirbağ  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** Denizli, 1989  
**E-Posta:** ali.ihsan.demirbag@gmail.com  
**Lisans:** Yıldız Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisi