

NÜKLEER ENERJİDE YENİ YAKLAŞIMLAR: TORYUM VE ENERJİ KAYNAĞI OLARAK KULLANIMI**Erol KAPLUHAN**

*Yrd. Doç. Dr., Ahi Evran Üniversitesi Üniversite Fen-Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü,
EKapluhan@hotmail.com*

ÖZ

Enerji, gelişmiş ve gelişmekte olan bütün ülkelerde ekonomik faaliyetlerin önde gelen koşuludur. Yerli üretimimizle enerji ihtiyacımızı karşılama oranı 2000'li yıllarda giderek azalmıştır. Bundan sonraki yıllarda da enerjinin önemi gün geçtikçe artacaktır. Enerjide dışa bağımlılığı azaltmanın tüm yolları denenmeli ve bu yönde yapılan araştırmalar hız verilmelidir. Tükenecek olan fosil kaynaklara alternatif olarak yeni enerji kaynakları üzerinde durularak artan enerji ihtiyacını diğer kaynaklardan temini üzerinde durulmalıdır. Linyit hariç fosil enerji kaynaklarından yoksun olan ülkemizde artan enerji ihtiyacının karşılanmasında nükleer enerji, alternatif enerji kaynaklarından biri durumundadır.

Yıllardır dünya genelinde nükleer santrallerde uranyum kullanılmaktadır. Hala da aynı şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Ancak son yıllarda gerek tükenebilir bir maden olması gerek se daha güçlü enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaçtan dolayı dünya genelinde çeşitli yeni madenler aranmakta yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Toryum, nükleer santrallerde elektrik üretiminde kullanılabilir olan bir elementtir. Günümüzde bu ihtiyaca karşılık verecek kaynak olarak toryum madeni öngörülmektedir. Ancak toryum madeni henüz tam anlamıyla insanların nükleer santrallerde kullanacak bilgi ve teknolojiye sahip olmamasından dolayı tam anlamıyla değerlendirilememektedir. Yapılan araştırmalar ve çalışmalar toryumun geleceğin enerji kaynağı olacağını kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, enerji kaynakları, nükleer enerji, toryum.

NEW APPROACHES IN NUCLEAR ENERGY: THORIUM AND USE OF ENERGY RESOURCE**ABSTRACT**

Energy is the leading condition of economic activity in all countries, developed and developing. Us to meet our energy needs domestic production rate has declined steadily in the 2000s. The importance of energy in the next year will increase day by day. They should try all ways to reduce dependence on foreign energy and research done in this direction should be accelerated. Endangered fossil resources as an alternative to the energy needs of the growing emphasis on new sources of energy should be focused on the supply from other sources. To meet the growing energy needs of our country lacking fossil energy sources lignite excluding nuclear energy, it has been one of the alternative energy sources.

Uranium is used in nuclear power plants throughout the world for decades. Still it continues to be used in the same way. However, in recent years it should be a mine can run either in general more powerful energy sources with the need for the world sought several new mines are needed for new energy sources. Thorium is an element, which can be used in nuclear power plants to generate electricity. Today, as a resource to respond to this need it is projected thorium mine.. However, due to lack of thorium mine yet have the knowledge and technology to use in nuclear power plants people literally can not be fully evaluated. Research and studies thorium is proved to be the energy source of the future.

Keywords: Energy, energy resources, nuclear energy, thorium.

1. GİRİŞ

Enerji, gelişmiş ve gelişmekte olan bütün ülkelerde ekonomik faaliyetlerin önde gelen koşuludur. Yerli üretimimizle enerji ihtiyacımızı karşılama oranı 2000'li yıllarda giderek azalmıştır. Bundan sonraki yıllarda da enerjinin önemi gün geçtikçe artacaktır. Enerjide dışa bağımlılığı azaltmanın tüm yolları denenmeli ve bu yönde yapılan araştırmalar hız verilmelidir. Tükenmekte olan fosil kaynaklara alternatif olarak yeni enerji kaynakları üzerinde durularak artan enerji ihtiyacını diğer kaynaklardan temini üzerinde durulmalıdır. Linyit hariç fosil enerji kaynaklarından yoksun olan ülkemizde artan enerji ihtiyacının karşılanmasında nükleer enerji, alternatif enerji kaynaklarından biri durumundadır (Temurçin & Aliğaoğlu, 2003: 25).

Dünya çapında bakıldığında, çevremiz enerjinin tüm şekillerinden gün geçtikçe etkilenmektedir. İstatistikler, nükleer enerjinin son 40 yılda birçok ülkede önemli bir enerji kaynağı olmaya başladığını göstermektedir. 1960'larda sanayi, nükleer gücün ucuz ve güvenilir bir enerji kaynağı olduğunu gördükten sonra, evrensel programlar buna göre düzenlenmiştir. Sonuç olarak, nükleer güç tesislerinin yapılması 1970'lerde hızla gelişmiştir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansının (IAEA) Güç Reaktörü Bilgi Sistem (PRIS) verilerine göre, 1980'de nükleer sanayi 692.1 Terawatt-saat güç üretimi ile toplam elektrik üretimine % 8.4 katkıda bulunmuştur. Bu durum, nükleer gücün 1970'tenberi hemen hemen 9 kat arttığını göstermektedir ve ortalama yıllık büyüme 10 yıl için % 24' dür (Juhn & Kupitz, 1996: 2).

Nükleer santrallerin, tüm insan yapısı araç gereç ve tesislerde olduğu gibi, toplum sağlığı bakımından bir risk taşıdığına şüphe yoktur. Önemli olan bu riskin diğer enerji sistemlerindeki risklerden çok Dünyanın enerji talebinin hızla artması, fosil yakıt rezervlerinin zamanla tükenmeye mahkûm olması ve dünyanın karşı karşıya bulunduğu çok ciddi çevre problemleri karşısında nükleer enerjinin getireceği önemli yararlar vardır (Aybers, 1994: 58).

Nükleer enerji, atomun çekirdeğinden elde edilen bir enerji türüdür. Nükleer enerjiyi zorlanmış olarak ortaya çıkarmak ve diğer enerji tiplerine dönüştürmek için nükleer reaktörler kullanılmaktadır. Nükleer enerji; Füzyon (Atomik parçacıkların birleşme reaksiyonu), Filyon (Atom çekirdeğinin zorlanmış olarak parçalanması) ve Yarılanma (Çekirdeğin parçalanarak daha kararlı hale geçmesi) şeklinde üç nükleer reaksiyondan biri ile oluşmaktadır. Örneğin; güneş patlamaları füzyon bir tepkime iken, nükleer santrallerde kullanılan teknolojiler, atom bombası teknolojisi gibi teknolojilerde filyon tepkimedir (Kaya, 2012: 74).

20. Yüzyılın ikinci yarısından itibaren, güvenilir kaynaklardan enerjiyi sağlama arayışı enerji dünyasının en önemli gündemi haline gelmiştir. Özellikle 1970'li yılların başında ortaya çıkan petrol dar boğazı, bu arayışları hızlandırmış ve güvenilir enerji kaynağı olarak nükleer enerjinin ön plana çıkmasını sağlamıştır. Bunun sonucu olarak 1980'li yılların ikinci yarısına kadar yüksek kapasiteli birçok nükleer reaktör kurulmuş ve işletmeye alınmıştır. 1980'li yılların sonuna doğru ise nükleer enerjiye olan talep artışı azalma eğilimine geçmiş ve 1990'lı yıllar boyunca durağan hale gelmiştir.

Bunun nedeninin, Three Mile Island (1979, ABD) ve Çernobil (1986, Sovyetler Birliği) nükleer kazalarının olduğu söylene de, asıl etken dünya ekonomisindeki yavaşlama ve doğalgazın enerji pazarına girmesidir. İçinde bulunduğumuz 21. Yüzyılda, sürdürülebilir kalkınma anlayışı içinde iklim değışikliklerini göz önüne alan enerji üretim planları önem kazanmıştır. Bu çerçevede, nükleer enerjinin yanında yenilenebilir enerji kaynakları gündeme gelmiş ve bu kaynaklardan verimli enerji üretimi çalışmalarına başlanmıştır. Ancak, dış koşullara bağımlı olmaları (iklim koşullarına bağılı olarak her zaman yeterince güneş, rüzgar ve su kaynaklarının bulunmaması) nedeniyle günümüzde halen yenilenebilir enerji kaynaklarından yeteri kadar verimli enerji üretimi sağlanamamaktadır. Bu noktada nükleer enerji, 7 gün 24 saat enerji üreten sürekli bir kaynak olarak önemini korumaktadır.

Nükleer enerji üretiminin hammaddesi uranyumdur. Bu radyoaktif madde 1789 yılında Alman kimyager Klaproth tarafından keşfedilmiştir. Uranyum aslında bir metaldir. Fakat daha çok enerji üretiminde kullanıldığı için diğer metallere farklı bir sınıfa dahil edilir (Temurçin & Aliğaoğlu, 2003: 25).

Yıllardır dünya genelinde nükleer santrallerde uranyum kullanılmaktadır. Hala da aynı şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Ancak son yıllarda gerek tükenbilir bir maden olması gerek se daha güçlü enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaçtan dolayı dünya genelinde çeşitli yeni madenler aranmakta yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde bu ihtiyaca karşılık verecek kaynak olarak toryum madeni öngörülmektedir. Ancak toryum madeni henüz tam anlamıyla insanların nükleer santrallerde kullanacak bilgi ve teknolojiye sahip olmamasından dolayı yüzde yüz anlamda değerlendirilememektedir. Yapılan araştırmalar ve çalışmalar toryumun geleceğin enerji kaynağı olacağını kanıtlamaktadır.

2. NÜKLEER ENERJİNİN TARİHÇESİ VE DÜNYA'DAKİ KULLANIMI DURUMU

Nükleer kelimesi, İngilizce nucleus adının sıfatlaşmış halidir. Nükleer, çekirdeksel, çekirdek ile ilgili anlamını ifade etmektedir (Redhouse, 2000: 284). Dolayısıyla nükleer enerji, benzer şekilde atomik enerji, çekirdek enerjisi şeklinde de ifade edilebilir. Terim dünyada ilk kez 2. Dünya Savaşı sırasında duyulmuştur. 6 Ağustos 1945 tarihinde Japonya'nın Hiroşima, 9 Ağustos 1945'de Nagazaki kentlerine atılan bombalarla ilgili çalışmaların başlangıcı 20. yy'ın başlangıcına kadar iner. Rutherford, Hans, Strassman, Oppenheimer ve Einstein bu enerji kaynağı üzerinde ilk çalışan bilim adamları olmuşlardır (Karabulut, 1999: 119).

Nükleer enerjinin esasını oluşturan atom eski Yunanca kökenli olup, parçalanmaz anlamına gelmektedir. Atom minerallerin en küçük parçası olup, onun karakterini belirler ve kendisini oluşturan bir çekirdek ve onu çevreleyen elektronlardan oluşur. Nükleer enerji, atom reaktörleri veya nükleer santraller denilen tesislerde atom çekirdeklerinin parçalanması (fission) veya birleştirilmesi (fusion) yöntemleri ile elde edilir. Birinci teknik atom çekirdeklerinin parçalanması esasına dayanmaktadır. Atom çekirdeğinin hemen hemen iki eşit parçaya ayrılması işlemine fission (fizyon) yani atom çekirdeğinin bölünmesi denir. Parçalanma ile meydana gelen reaksiyonlar devam ederken, patlamalarla büyük ölçüde enerji açığa çıkar. Bu yöntem ilk olarak atom bombası yapımında kullanılmış, bugün nükleer elektrik santrallerinde kullanılmaya devam edilmektedir. İkinci teknik,

füzyon (birleşme, birleştirme) tekniğidir. Bu yöntemle daha ağır ve yeni bir atom çekirdeği oluşturmak üzere, iki veya daha fazla atom çekirdeğinin (hidrojen gibi) birleştirilmesi olayıdır (Doğanay, 1998: 456, Karabulut, 1999: 120).

Nükleer enerjinin 1945 yılında barışçıl olmayan hedefler doğrultusunda kullanılması, 1986 yılında Ukrayna'daki Çernobil nükleer santrali kazası ve günümüzde bazı ülkelerin Kuzey Kore, İran gibi nükleer silah elde etme gayretleri, nükleer teknolojinin sicilindeki en önemli olumsuzluklardır. Bununla birlikte, dünyada nükleer teknolojinin barışçıl amaçlı kullanımı gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Günümüzde bilimsel araştırmalardan sanayi alanına, tarım alanından tıptaki kullanımına ve elektrik enerjisi üretiminden uzay çalışmalarında kullanımıyla vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmiştir.

Ağır atom çekirdeklerinin nötron yakalamaları sonucu parçalanması (filyon) ve hafif atom çekirdeklerinin çok yüksek sıcaklıkta birleşme (füzyon) tepkimeleri sonucunda ortaya çıkan büyük miktardaki enerjiye nükleer enerji adı verilmektedir. Genel olarak, 83 veya daha yüksek atom numaralı elementler kararsızdır. Diğer bir deyişle, doğal durumlarında değildirler ve bu durumlarına dönebilmek için kendiliğinden çekirdeklerinden elektrik yüklü parçacıklar fırlatır veya elektromanyetik dalgalar halinde radyasyon yayarlar. Çekirdekten parçacık fırlatılması ve elektromanyetik dalga yayılması, "radyoaktif bozunum" olarak adlandırılır. Bunun sonucu olarak, çekirdek parçalanarak yeni bir element veya izotop formuna dönüşür. Radyoaktif bozunum sürecinde, elementin radyoaktivitesinin yarı yarıya azaldığı zaman periyodu olarak tanımlanan yarılanma ömrü, her element için farklılık gösterir. Radyoaktif element miktarı, 20 yarılanma ömrü sonrasında milyonda birine düşer (TMMOB-EMO, 2013: 19, 20).

İkinci Dünya Savaşı sonrasında nükleerin askeri amaçlar dışında barışçıl amaçlar için kullanımı konusunda yapılan çalışmalar ve nükleer teknolojideki gelişmeler nükleer enerjiden elektrik üretimi dönemini ortaya çıkarmıştır. İlk olarak, 1970'li yıllarda, özellikle nükleer silahlanma amacıyla bu teknolojiye sahip olan ülkeler tarafından nükleer santraller kurulmuştur. Nükleer santraller; ucuz enerji vaadiyle ve 1970'li yıllarda enerji alanında yaşanan petrol kriziyle kısa sürede ilgi kaynağı olmuştur. Özellikle 70'li yıllar nükleer enerjinin yükselişinde altın yılları olmuştur. Daha sonraları yaşanan kazalar, artan güvenlik ve teknolojik maliyetler nükleer santrallere olan ilginin azalmasına neden olmuştur. Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren nükleere olan ilgide bir duraklama dönemi başlamıştır. 2000'lere doğru; iklim krizi ve artan enerji ihtiyaçları üzerine "nükleer Rönesans" denilerek yeniden canlandırılmaya çalışılsa da, nükleer enerjiye olan güven yitimi nedeniyle "düşüş" dönemine girdiği görülmektedir (TMMOB-EMO, 2013: 33, 34).

Dünyada çeşitli ülkeler tarafından geliştirilmiş farklı reaktör tipleri kullanılmaktadır. Ticari nükleer reaktörlerin büyük bölümünde soğutucu olarak su kullanılmaktadır. Bu reaktörler hafif su reaktörü olarak adlandırılmaktadır. Hafif su reaktörlerinin, basınçlı su (pressurized water reactor, PWR) ve kaynar su reaktörleri (boiling water reactor, BWR) olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Bunların dışında, ağır su (pressurized heavy water reactor, PHWR) ve gaz soğutmalı (gas cooled reactor, GCR) reaktör tasarımları da düşük oranda kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, hızlı üretken reaktör (fast-breeder reactor, FBR) adlı, yüksek düzeyde

safılaştırılmış plütonyum ve uranyum karışımını yakıt olarak kullanan reaktörler tasarlanmıştır. Bu tip reaktörlerde işletme süresi boyunca elektriğin yanı sıra plütonyum üretilmektedir. Haziran 2013 itibarıyla dünyada yalnızca iki adet hızlı üretken reaktör çalıştırılmaktadır (TMMOB-EMO, 2013: 22).

Nükleer elektrik üreten ülkelerde "5 Büyükler" sırasıyla ABD, Fransa, Rusya, Güney Kore ve Almanya Dünya nükleer elektriğinin % 67'sini üretmektedirler. Nükleer üretimini istikrarlı bir şekilde artıran ülkeler Çin, Çek Cumhuriyeti ve Rusya'dır (Tablo 1), bununla beraber nükleer elektrik üretimini artıran ülkelerde bile artış hızı, genel elektrik talep artışının gerisinde kalmıştır. Çek Cumhuriyeti ise % 35 artışla rekor kırmıştır. Nükleer üretimdeki artış yeni reaktörler kurulmasından ziyade mevcut reaktörlerin prodüktivite artışı ve rehabilitasyonlar sonucu kapasite artışlarından kaynaklanmıştır. Dünya yıllık kapasite faktörü 2011'deki % 77'den 2012'de % 70'e düşmüştür. Doğal olarak en büyük değişiklik Japonya'da görülmüştür ve yük faktörü 2010'da % 69,5 iken 2011'de % 39,5'e ve 2012'de % 3,7'ye düşmüştür. Japonya dışında yük faktöründeki en büyük düşüşler: Belçika (-%11,8); Meksika (-% 20) ve Güney Afrika'da (-% 9,5) yaşanmıştır. Belçika'da yedi reaktörden ikisi basınçlı kaplarda görülen çatlaklar nedeniyle yıl içinde genelde devre dÖüÖydÖ. Ancak Haziran 2013'de devreye alınmışlardır. Meksika'da da iki ünite uzun dönemli bakımdaydı. ABD'de yük faktörü % 3,1 düşerek % 83,2'ye gerilemiş, Fransa'da ise % 2,3 gerileyerek % 73,6'ya düşmüştür (DEK-TMK, 2014: 264).

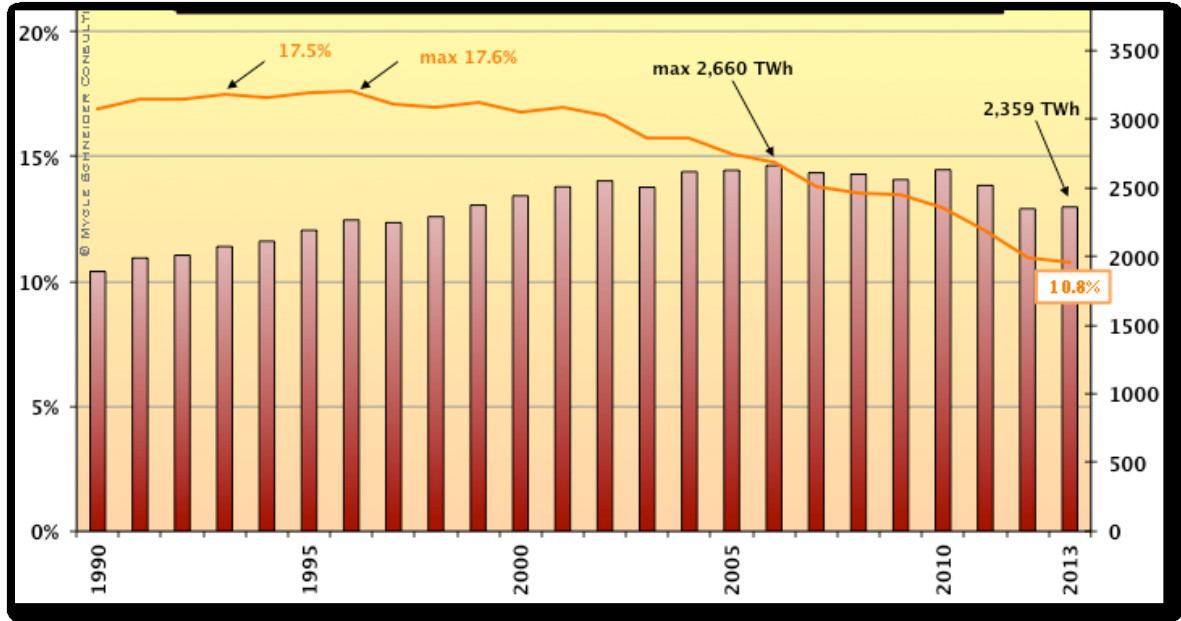
Tablo 1: Haziran 2015 itibarıyla işletmede, inşa halinde ve Planlanan Nükleer Santraller

ÜLKELER	NÜKLEER ELEKTRİK ÜRETİMİ (2014)		İŐLETMEDEKİ SANTRALLER (Haziran 2015)		İNŐA HALİNDEKİ SANTRALLER (Haziran 2015)		PLANLANAN SANTRALLER (Haziran 2015)		ÖNERİLEN SANTRALLER (Haziran 2015)		URANYUM İHTİYACI (2015)
	Milyar kWh	%	Adet	MWe	Adet	MWe	Adet	MWe	Adet	MWe	Ton
Arjantin	5.3	4.0	3	1627	1	27	2	1950	2	1300	215
Ermenistan	2.3	30.7	1	376	0	0	1	1060			88
Bangladeş	0	0	0	0	0	0	2	2400	0	0	0
Belarus	0	0	0	0	2	2388	0	0	2	2400	0
Belçika	32.1	47.5	7	5943	0	0	0	0	0	0	1017
Brezilya	14.5	2.9	2	1901	1	1405	0	0	4	4000	326
Bulgaristan	15.0	31.8	2	1906	0	0	1	950	0	0	324
Kanada	98.6	16.8	19	13553	0	0	2	1500	3	3800	1784
Őili	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4400	0
Çin	123.8	2.4	26	23144	24	26313	44	51050	136	153000	8161
Çek Cumhuriyeti	28.6	35.8	6	3904	0	0	2	2400	1	1200	566
Mısır	0	0	0	0	0	0	2	2400	2	2400	0
Finlandiya	22.6	34.6	4	2741	1	1700	1	1200	1	1500	751
Fransa	418.0	76.9	58	63130	1	1720	1	1720	1	1100	9230
Almanya	91.8	15.8	9	12003	0	0	0	0	0	0	1889
Macaristan	14.8	53.6	4	1889	0	0	2	2400	0	0	357
Hindistan	33.2	3.5	21	5302	6	4300	22	21300	35	40000	1579
Endonezya	0	0	0	0	0	0	1	30	4	4000	0
İran	3.7	1.5	1	915	0	0	2	2000	7	6300	176
İsrail	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
İtalya	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Japonya	0	0	43	40480	3	3036	9	12947	3	4145	2549
Ürdün	0	0	0	0	0	0	2	2000			0
Kazakistan	0	0	0	0	0	0	2	600	2	600	0
Kuzey Kore	0	0	0	0	0	0	0	0	1	950	0

Güney Kore	149.2	30.4	24	21657	4	5600	8	11600	0	0	5022
Litvanya	0	0	0	0	0	0	1	1350	0	0	0
Malezya	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Meksika	9.3	5.6	2	1600	0	0	0	0	2	2000	270
Hollanda	3.9	4.0	1	485	0	0	0	0	1	1000	103
Pakistan	4.6	4.3	3	725	2	680	2	2300	0	0	101
Polonya	0	0	0	0	0	0	6	6000	0	0	0
Romanya	10.8	18.5	2	1310	0	0	2	1440	1	655	179
Rusya	169.1	18.6	34	25264	9	7968	31	33264	18	16000	4206
Südi Arabistan	0	0	0	0	0	0	0	0	16	17000	0
Slovakya	14.4	56.8	4	1816	2	942	0	0	1	1200	466
Slovenya	6.1	37.2	1	696	0	0	0	0	1	1000	137
Güney Afrika	14.8	6.2	2	1830	0	0	0	0	8	9600	305
İspanya	54.9	20.4	7	7002	0	0	0	0	0	0	1274
İsveç	62.3	41.5	10	9487	0	0	0	0	0	0	1516
İsviçre	26.5	37.9	5	3333	0	0	0	0	3	4000	521
Tayland	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5000	0
Türkiye	0	0	0	0	0	0	4	4800	4	4500	0
Ukrayna	83.1	49.4	15	13107	0	0	2	1900	11	12000	2366
Birleşik Arap Emirlikleri	0	0	0	0	3	4200	1	1400	10	14400	0
Birleşik Krallık	57.9	17.2	16	9373	0	0	4	6680	7	8920	1738
Amerika	798.6	19.5	99	98792	5	6018	5	6063	17	26000	18692
Vietnam	0	0	0	0	0	0	4	4800	6	6700	0
DÜNYA	2,411	c 11.5	437	380,250	66	68,997	168	189,504	322	364,270	66,883

Kaynak: <http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/World-Nuclear-Power-Reactors-and-Uranium-Requirements/>, 2015.

2013 ortası itibariyle 31 ülke nükleer reaktörleri elektrik üretmek amacıyla kullanıyordu. 2012'de nükleer enerjiden 2.346 TWh elektrik üretilmiştir. 2011'e göre bu 172 TWh daha azdır ve % 6,8 düşüş anlamına gelmektedir. 2006'da ulaşılan maksimum nükleer üretimin %11,8 daha aşağıdadır. Dünya'da elektrik üretiminde nükleerin pay 1993'de % 17 ile maksimum seviyeye ulaşmışken 2012'de % 11'e düşmüştür ki bu 1980'deki seviyedir. BP enerji istatistiklerine göre primer enerjide nükleerin pay % 4,5 olmuştur ve bu 1984'den bu yana en düşük seviyedir. Bu düşüşün dörtte üçü Japonya'daki büyük düşüşten (önceki yıla göre -139 TWh veya -% 50) kaynaklanmıştır ve Japonya nükleer elektrik üreten ülkeler arasında 3. sıradan 18. sıraya gerilemiştir. En çok nükleer elektrik üreten 5 ülkede de farklı nedenlerle üretim düşmüştür: ABD (-20 TWh veya -%2,5), Fransa (-16 TWh veya - %4), Almanya (-8 TWh veya -%10), Güney Kore (-7 TWh veya -%5), Rusya (-0,8 TWh veya -%0,5 (DEK-TMK, 2014: 263).

Tablo 2: 1990-2013 Yılları Arası Dünya'da Nükleer Enerjiden Elektrik Üretimi

Kaynak: Schneider & Froggatt vd, Temmuz 2014: 13.

Yakıt maliyeti; nükleer enerjiye, kömür, petrol ve doğal gaz santrallerine göre bir avantaj sağlamaktadır. Bununla beraber uranyum işlenmeli, zenginleştirilmeli, yakıt çubuğu haline getirilmelidir, zaten maliyetin yarısı zenginleştirme ve yakıt çubuğu haline getirilmesi işlemlerinden oluşmaktadır. Nükleer Enerjinin Ekonomisinin değerlendirilmesinde kullanılmış yakıtın yönetimi, kullanılmış yakıt ve diğer radyoaktif atıkların nihai depolanması içinde bütçe ayrılmalıdır. Bunlar eklendiğinde bile OECD üyesi bir ülkedeki nükleer santralin toplam yakıt maliyeti, bir kömür santrali yakıt maliyetinin üçte biri, bir doğal gaz kombine çevrim santrali yakıt maliyetinin beşte biridir. ABD NEI (Nuclear Energy Institute=Nükleer Enerji Enstitüsü) verilerine göre bir kömür santralinde elektrik üretim maliyetinin % 78'i, bir doğal gaz kombine çevrim santralinde % 89'u, bir nükleer santralinde ise % 14'üdür (DEK-TMK, 2014: 273).

3. TORYUM'UN GENEL ÖZELLİKLERİ VE REZERV DURUMU

Yeryüzünde nadir bulunan aktinitler sınıfında yer alan toryum (Th) 1829 yılında İsveçli kimyacı Jöns Jacob Berzelius tarafından keşfedilmiştir. İsmi İskandinav mitolojisinde savaş tanrısı olan Thor'dan almaktadır. Atom numarası 90 olan bu madenin atom ağırlığı 232,0381 atomik kütle birimidir. Erime noktası 1750° C, kaynama noktası 4785° C olan toryumun yoğunluğu 11,72 g/cm³ seviyesindedir. Asıl rengi gümüş beyazı olan toryum, oksitlendiğinde önce grileşip daha sonra siyah bir renge bürünmektedir (Şekil 1, Şekil 2). Toryum radyoaktif bir element olup yaklaşık 60 mineralin yapısında bulunmaktadır. Toryum, dünya yer kabuğunda yüzbinde 7 oranında bulunan Torit (ThSiO₄), Torianit (ThO₂) ve monazitten elde edilmektedir. Th²³² (Toryum-232) doğada bulunan tek toryum izotopudur. Th²³² radyoaktif alfa parçacıkları yaymakta olup uzun (14 milyar yıl) bir yarılanma ömrüne sahiptir (<http://www.rsc.org/periodic-table/element/90/thorium>, 2015).

Toryumun nükleer yakıt olarak kullanılması dışında, radyasyon detektörlerinde, X-ışını şiddeti ölçümünde, katalizörlerde, yüksek yansıtımlı camlarda, yüksek sıcaklık seramiklerinde, lüks lambalarının gömlek yapımında kullanılabilir (TAEK Bilgi Dokümanı, 2015: 7).

Madenleri çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür; metal olanlar, olmayanlar, yataklarının durumuna göre madenler gibi. Bir diğer sınıflandırma ise, ulusal güvenlik açısından yapılan sınıflandırmadır. Buna göre madenler, stratejik, kritik ve temel olarak üç gruba ayrılırlar. Uranyum ve toryum stratejik madenler grubuna dahil edilirler. Bilindiği üzere stratejik madenler, sanayi için gerekli olduğu halde, her ülkede yeterli miktarda çıkarılmayan madenlerdir. Bu nedenle uranyum ve toryumun üretimleri ve coğrafi dağılımları, petrol ve kömür yatakları gibi net bir şekilde bilinemez (Doğanay, 1998: 458).



Şekil 1: Monazit - Kristal Hali

Kaynak: http://nevada-outback-gems.com/mineral_information/Monazite_mineral_info.htm, 2015.



Şekil 2: Thorianite (ThO₂)

Kaynak: <http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=1147&target=Thorianite#>, 2015.

Radyoaktifliği 1898’de Marie Curie tarafından ortaya konan bu element torit, torianit ve monazit gibi cevherlerin içinde bulunan ve uranyumdan üç kat daha fazla rastlanan bir metaldir. Toryum bölünebilir (fisil) madde değildir ve tek basına nükleer yakıt olarak kullanılamaz. Fertil (doğurgan; bölünebilir maddeye dönüşebilen) bir izotop olan Th^{232} ’nin bir nötron yutarak fisyon yapabilen bir izotop olan U^{233} ’e dönüştürülmesi gerekir. Th^{232} ’nin düşük enerjili nötronlarla tepkimesi (nötron yutması) sonucunda önce daha az kararlı olan Th^{233} oluşmaktadır. Th^{233} ise, 22,2 dakika içinde, bir beta parçacığı atarak Pa^{233} (Protaktinyum-233)’e dönüşmektedir. Pa^{233} , 27 gün içinde yarılanma süresi 163.000 yıl olan fisil U^{233} ’e dönüşmektedir. Toryum yakıt çevriminin önemli özelliklerinden biri U^{233} ’ün küçük fakat önemli bir bölümünün (n, 2n) reaksiyonuna girerek U^{232} oluşturmasıdır (TAEK Bilgi Dokümanı, 2015: 8).

Bu çekirdek, Th^{228} ’e (yarılanma ömrü: 1,9 yıl), Ra^{224} (Radyum-224)’e ve diğer kısa ömürlü çekirdeklere bozunur. Toryum-uranyum yakıt çevriminde ortaya çıkan U^{232} ve Th^{232} yakıtın yeniden üretimi, taşınması ve depolanması sırasında çeşitli problemlere (güçlü gama ışını, x-ışını ve enerjik nötron yayılımı) neden olmaktadır.

Toryumun fiziksel, termal, mekanik özellikleri ve ışınlanma kararlılığına sahip olma özelliği termal reaktörlerde başlangıç (fertil) maddesi olarak, hızlı üretken reaktörlerde ise örtü (blanket) malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Bilinen toryum kaynaklarının 6,3 milyon ton olduğu belirlenmiştir (Tablo 3). Toryum yer kabuğunda oldukça fazla bulunan bir elementtir. Önemli miktarda toryum kaynağına sahip olan ülkelerden bazıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 3: Dünya’da Belirlenen Toryum Kaynakları

BÖLGE	ÜLKE	TOPLAM TORYUM KAYNAKLARI (TON)
Avrupa	Türkiye	374.000
	Norveç	87.000
	Danimarka	86.000-93.000
	Finlandiya	60.000
	Rusya Federasyonu	55.000
	İsveç	50.000
	Fransa	1.000
	Toplam	713.000-720.000
Amerika	ABD	595.000
	Brezilya	632.000
	Venezüella	300.000
	Kanada	172.000
	Peru	20.000
	Uruguay	3.000
	Arjantin	1.300
	Toplam	1.723.300
	Mısır	380.000
	Güney Afrika	148.000
	Morokko	30.000
	Nijerya	29.000

Afrika	Madagaskar	22.000	
	Angola	10.000	
	Mozambik	10.000	
	Malavi	9.000	
	Kenya	8.000	
	Kongo	2.500	
	Diğerleri	1.000	
	Toplam	649.500	
	Asya	Kazakistan	>50.000
Rusya Federasyonu Asya kısmı		>100.000	
Özbekistan		5.000-10.000	
Hindistan		846 500	
Çin		>100.000	
İran		30.000	
Malezya		18.000	
Tayland		10.000	
Vietnam		5.000 - 10.000	
Kore		6.000	
Srilanka		4.000	
Total		>2.647.500	-
		2.684.500	
Avustralya	595.000		
Dünya Toplam	6.355.300	-	
	6.372.300		

Kaynak: OECD/NEA Uranium 2014: 40.

Toryuma olan düşük talebin bir sonucu olarak toryum madenciliği başlıca arama hedefi olamamıştır. Toryumun nadir toprak elementlerinin bir yan ürünü olarak çıkarılmasının daha ekonomik olacağı değerlendirilmiştir.

4. TORYUM'UN NÜKLEER YAKIT OLARAK KULLANIMI

Bu gün üretilen nükleer enerjinin tamamı doğal uranyum veya % 2 - % 4 oranında zenginleştirilmiş uranyum kullanan nükleer santrallerde üretilebilmektedir. Bu reaktörler 30-40 yıl ömürlü olup bol miktarda nükleer yakıt gerektirirler. Bilindiği gibi termal nötronlarla en iyi fisyon yapabilen malzeme U^{235} dir ve bu da doğal uranyumun içinde % 0,7 oranında bulunmaktadır. Bu da günümüz reaktörlerinin nükleer yakıtın çok az bir miktarını enerjiye dönüştürebildiğini ve kalan büyük miktarının nükleer atık olarak tutulduğunu göstermektedir. Dünyadaki uranyum rezervlerinin sınırlı olması ve zenginleştirme işleminin yüksek maliyet getirmesinden dolayı yeni tip nükleer yakıtlar ve bunlara göre yeni tip reaktör dizaynları araştırılmaya başlanmıştır. Toryum bu çalışmalarda üzerinde yoğun olarak durulan yeni bir yakıt olarak yakın gelecekte kullanılmaya adaydır (Şahin v.d, 2002: 164).

Toryum tabanlı yakıt çevrimlerine yönelik çalışmalar, uranyum ve uranyum/plütonyum çevrimlerinden daha küçük ölçekte olmakla birlikte uzun zamandır devam etmektedir. Toryumlu yakıt denemeleri 1960 yıllarının ortalarında başlamış olmasına rağmen güç reaktörlerinde kullanılmasına 1976 yılında başlanmıştır. Temel araştırmalar Almanya, Hindistan, Japonya, Rusya, İngiltere ve ABD'de gerçekleştirilmiştir. Toryum yakıtının yüksek yanma oranlarına kadar ışınlanması, kısmen veya tamamen toryum tabanlı yakıtla doldurulmuş test reaktörlerinde yapılmıştır (TAEK Bilgi Dokümanı, 2015: 12).

Th²³² dünyada uranyumdan üç misli daha fazla bulunmaktadır. Günümüze kadar toryum, nadir toprak elementleri ya da uranyumun yan ürünü olarak üretilmiştir. Günümüz şartlarında toryumun çıkarılması ve üretimi, toryum talebi ve piyasası olmadığından ekonomik değildir. Nadir toprak elementlerine talep arttığından ve toryum da bunların yan ürünü olduğundan kısa ve orta dönem için toryum çıkarılmasına ihtiyaç bulunmamaktadır. Toryum madenciliği uranyuma göre daha kolay olup en önemli avantajı, açık kuyu monazit yataklarından elde edilmesidir. Toryum madencilik atıklarının idaresi uranyuma göre daha kısa yarı ömürlü bozunum ürününe, Rn²²⁰ (Radon-220, 55 saniye) sahip olduğundan daha kolaydır (OECD/NEA Uranium 2014: 33).

Termal nötron reaktörlerinde U²³³'ün, U²³⁵ ve Pu²³⁹'a göre en önemli avantajı her yutulan termal nötron için üretilen nötron sayısının (η) fazla olmasıdır. Toryum yakıt çevriminde, U²³³ fisil madde olarak ortaya çıkmaktadır. U²³³ için η değerinin yüksek olması Th/U²³³ yakıt çevriminin dönüştürme oranının yüksek olması anlamına gelmektedir. Toryumdan üretilen U²³³, nötronik açıdan en iyi nükleer yakıttır ve bu tüm nötron enerjilerinde (termal, epitermal ve hızlı) geçerlidir.

Th/U²³³ yakıt çevriminde, uranyum/plütonyum yakıt çevrimine göre daha az miktarda neptunyum, plütonyum, amerisyum, küriyum gibi uranyum ötesi elementler ortaya çıkmaktadır. Ancak Th/Pu yakıtları için bu avantaj geçerli değildir. Toryum yakıtlarının yeniden işlenmesiyle ortaya çıkacak atıkların radyotoksik envanteri uranyum yakıt çevrimine göre daha azdır. Nükleer silah olarak kullanılabilen zengin uranyum veya plütonyumun fisil madde olarak toryumla birlikte yakıtlarda kullanılması bunların envanterinde azalmaya neden olup silahsızlanma anlamında avantaj sağlar. Ayrıca toryum tabanlı yakıt çevrimlerinde U²³²'nin varlığı, kuvvetli gama yayan bozunum ürünlerine sebep olmakta ve bu da yeniden işleme konusunda önemli ölçüde zırlama ve uzaktan kumanda gerektirerek bu sürecin yönetimini zorlaştırarak da silahsızlanma konusunda ikinci bir avantaj oluşturmaktadır.

Toryum ve bileşikleri kararlı ve ısıya dayanıklılığı yüksektir. ThO₂, 3300 °C' de erir (UO₂: 2700 °C-2800 °C). Bu kararlılık yüksek sıcaklık ve yüksek yanma oranlarına izin verir. Nötronik özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da korur (TAEK Bilgi Dokümanı, 2015: 17).

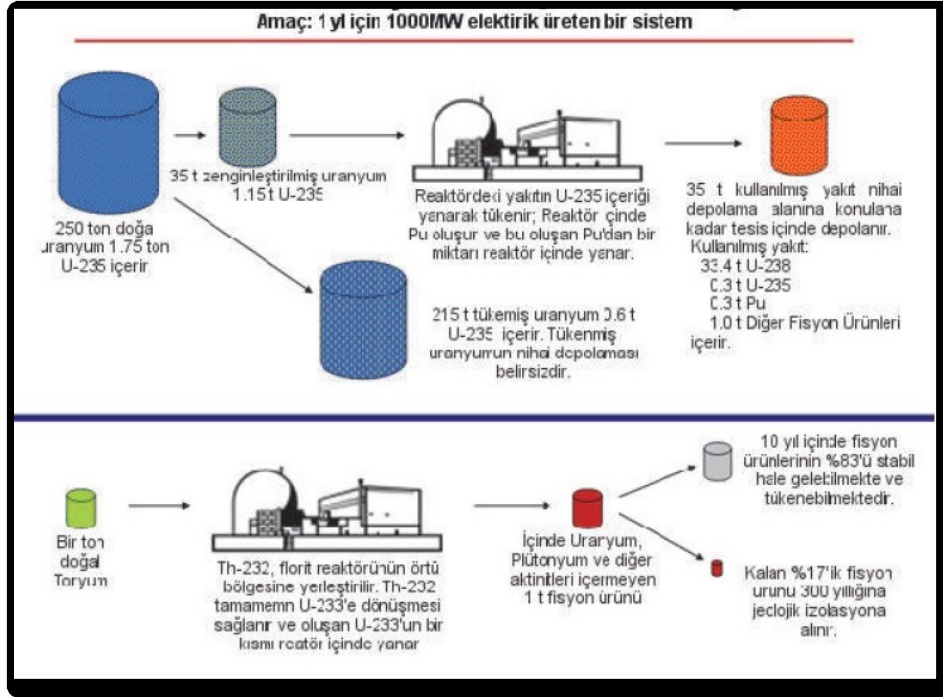
Toryumun nükleer güç santrallerinde kullanılması teknolojisinin, mevcut uranyum temelli yapıya kıyasla önemli bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar arasında, toryumun doğada uranyumdan çok daha yaygın ve dengeli bir şekilde bulunabiliyor olması ve toryumun, nükleer enerji üretiminde uranyuma kıyasla daha verimli bir şekilde kullanılabiliyor olması başı çekmektedir (Şahin v.d, 2004: 1068).

Dünya'da yaklaşık on ülke, milli toryum stratejilerini oluşturmuş ve toryum reaktörleri için uygun teknolojiyi geliştirmek amacıyla çalışmalara başlamıştır. Bu on ülke Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Çin, Rusya, Birleşik Krallık, Fransa, Japonya, Güney Kore, Norveç, Belçika ve Hindistan'dır. Dikkate değer herhangi bir toryum rezervine sahip olmayan Japonya, Güney Kore ve hatta Belçika gibi devletlerin de toryum teknolojisine yatırım yapıyor olmaları, toryum reaktörlerinin yakın gelecekte ticarileşmesi beklentilerinin bir sonucudur. Uranyum

(veya plütonyum) katkılı toryum yakıtlarıyla çalışan ve geleneksel nükleer güç santrallerine benzeyen tipteki toryum reaktörlerinin takriben beş yıl içerisinde ticarileşeceği, hızlandırıcı sürümlü toryum reaktörlerinin ise, 10 ila 15 yıl içinde ticarileşebileceği düşünülmektedir. Örneğin Çin, 2020'li yılların ilk yarısında, toryum reaktörlerini devreye almayı planlamaktadır (Sultansoy v.d., 2015: 16).

“Toryum yarışı” olarak adlandırılan kavram da, ticari toryum reaktörlerini ilk önce üretip Dünya'ya pazarlayarak yüksek kazanç/fayda elde etmeyi hedefleyen ülkelerin kendi aralarında girmiş oldukları yarışı simgelemektedir. Bu yarışa katılan ülkeler arasında başta gelen Çin, toryum araştırmaları için 350 milyon dolar tahsis etmiş bulunmaktadır ve 2015 yılı sonunda, toryum Ar-Ge projesi kapsamında istihdam edilen araştırmacı sayısının 750'ye ulaşması beklenmektedir. 1960'lı yıllarda, Oak Ridge laboratuvarında başarılı denemeler yapan ABD de, Çin'in toryum yarışında öne geçmesi üzerine, son zamanlarda bu alana yaptığı yatırımları artırmaktadır (Sultansoy v.d., 2015: 17).

Bir yılda 1 GW kesintisiz güç üretmek için 3.5 milyon ton kömür, 200 ton Uranyum veya sadece 1 ton Toryum gerekmektedir (Arık v.d, 2012: 47). Geleneksel uranyum yakıtlı reaktörlerin en önemli problemi olan uzun ömürlü radyoaktif atıklar açısından, birinci seçenekte bu atıkların miktarı uranyum katkısı oranında azalmaktadır. Mesela, % 5 uranyum ve % 95 toryum karışımı durumunda bu atıkların miktarı 20 kat daha azdır. Diğer iki seçenekte ise uzun ömürlü atıklar ihmal edilebilir seviyede olup çevresel açıdan önemli bir risk oluşturmamaktadır. Yüksek düzeyli uluslararası güvelik önlemlerine ve denetimlere rağmen, zenginleştirilmiş uranyumun terörist örgütlerin veya uluslararası barış ve istikrara tehdit oluşturan devlet aktörlerinin eline geçmesi riski, bu teknolojinin kullanılmasında, Nükleer Silahların Yayılmasını Önleme Anlaşması'nın koyduğu kısıtlardan da kaynaklanan bazı pratik sıkıntılar doğurmaktadır. Bu tip yakıtların kullanımında ortaya çıkan plütonyum da, tehlikeli ve silah yapımında kullanılabilen radyoaktif bir maddedir. Uranyum veya plütonyum katkılı sistemler, uranyum temelli geleneksel santrallerdeki bazı riskleri taşımaya devam etmektedir (Sultansoy v.d., 2015: 20).



Şekil 3: Uranyum ve Toryum yakıt çevrimlerinin karşılaştırılması

Kaynak: Bayraktar & Çelikten, 2014: 56.

Toryum yakıt çevriminde, uranyum yakıt çevrimine göre daha düşük miktarda Plütonyum ve diğer trans-uranik elementler elde edilmektedir. Toryum yakıt çevrimi uranyuma göre daha düşük miktarda atık oluşturduğu için toryum yakıt çevrimini daha temiz olarak kabul edilmektedir. Ayrıca düşük miktarda plütonyum oluşması da nükleer silahların yayılmasının önlenmesi için önemli bir kıstas olarak karşımıza çıkmaktadır (Bayraktar & Çelikten, 2014: 53).

Dört çeşit reaktör tipi için toryum yakıt çevrimi uygundur. Tükettiklerinden daha fazla yakıt üreten reaktörler üretken reaktörler olarak adlandırılmaktadır. Üretkenlik için rejenerasyon faktörünün (η) 2'den büyük olması gereklidir. Bu, reaktörün kritikliği ve zincirleme reaksiyonun sürdürülmesi için fisyonun çıkan bir nötronunun nihai olarak yakıtta yutulmasından kaynaklanmaktadır. Toryum (U^{233}) 2'den büyük η değerinden dolayı üretken olarak cazip bir seçenek oluşturmakta ve termal enerji seviyelerinde başarılı özellikler göstermektedir. Bu tasarımlarda da, diğer fisil izotopların toryumla karıştırılması gerekmektedir. Fisil izotoplar sürücü olarak görev yaparak başlangıçtaki tüm nötronları sağlamakta ve yavaş yavaş toryumdan üretilen U^{233} tarafından tamamlanmaktadır. Eriyik tuzlu üretken reaktörler (MSBR), sıvı floritli toryum reaktörü (LFTR) ve hafif sulu üretken reaktör (LWBR) üretken reaktörlere örnek olarak verilebilir (TAEK Bilgi Dokümanı, 2015: 15).

4.1. Hafif sulu üretken reaktör: Bu reaktörde, çekirdek-örtü (seed-blanket) tasarımına göre Th/ U^{233} yakıtlarının etrafında toryum yakıtları yer almaktadır. Hafif sulu reaktörler, çubuk şeklinde düzenlenmiş UO_2 , PuO_2 ve/veya ThO_2 esaslı yakıt kullanabilmektedir. Mevcut plütonyum stokunun eritilmesi ve enerji üretilmesine yönelik olarak toryum-plütonyum MOX seçeneğinin, kısa vadede ve hızlı reaktörlere göre daha ucuz potansiyel bir

alternatif olarak düşük moderasyonlu LWR'lerde kullanılabileceğini yapılan araştırmalar göstermektedir (IAEA Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges, 2005: 14).

4.2. Basınçlı Ağır Su Reaktörü: Bu reaktör tipinde kendi kendine yeterli denge toryum çevrimleri olasıdır. Bu çevrim, Th/HEU ya da düşük zenginlikte uranyum (LEU) ya da Th/Pu yakıtla başlar ve kendi kendine yeterli denge toryum çevrimlerini başlatmak için gerekli miktarda U^{233} oluşur. Kendi kendine yeterli denge toryum çevrimleri içinde dönüştürme oranları 1 olan toryum çevrimleri elde etmek mümkündür (IAEA Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges, 2005: 17).

4.3. Hızlı üretken reaktör: Alaşımli uranyum metali ile toryumu birleştiren yakıt çevrimi hızlı üretken reaktörlerde kullanılabilir. Metalik alaşımların ısı iletkenliklerinin fazla olması oksitli yakıtlara göre daha yüksek özel güç üretimine neden olmaktadır.

4.4. Yüksek sıcaklık gaz soğutmalı reaktör: Bu reaktörler için Th/ U^{233} yakıt çevrimi çok uygundur. Geçmişte ThO_2 , (Th, U) O_2 , ThC_2 ve (Th,U) C_2 kaplanmış yakıt parçacıkları ABD, Almanya ve İngiltere'deki HTGR'lerde başarılı performanslar göstermiştir. Bu tecrübe ışığında toryum tabanlı karışık oksit ve karışık karbürü yakıtların, GIF (Generation International Forum) tarafından hidrojen üretim sistemi olarak tespit edilen ve 2020 yılında kullanılabileceği öngörülen, $1000^{\circ}C$ soğutucu çıkış sıcaklıklarına sahip, 600 MW ısı güçteki helyum soğutmalı çok yüksek sıcaklıklı reaktörler (VHTR) için aday yakıtlar olarak dikkate alınması için yeterli gerekçe ve rasyonelliğin bulunduğu gündeme getirilmektedir. Toryum tabanlı kaplanmış yakıt parçacıkları, Gaz Türbinli-Modüler Helyum Reaktörünün (GT-MHR) prizmatik yakıtı veya Çakıl Yataklı Modüler Reaktördeki (PBMR) çakıl yakıtı dayalı 600 MWt güçteki VHTR için cazip bir yakıt seçeneği sunmaktadır (IAEA Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges, 2005: 28).

Geçmişten günümüze kadar toryumun yakıt olarak kullanımı hafif sulu reaktörler (LWR), ağır sulu reaktörler (HWR), gaz soğutmalı reaktörler (HTGR) ve hızlı spektrumlu reaktörler dâhil olmak üzere çeşitli reaktör tiplerinde gösterilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4: Değişik Deneysel ve Güç Reaktörlerinde Toryum Kullanımı

Ülke	Reaktör Adı	Reaktör Tipi	Reaktör Gücü	Yakıt	İşletme Süresi
Almanya	AVR	HTGR	15 MWe	Th + U^{235}	1967-1988
Almanya	THTR	HTGR	300 MWe	Th + U^{235}	1985-1989
Almanya	Lingen	BWR	60 MWe	(Th, Pu) O_2	1973'te kapatıldı
İngiltere	Dragon	HTGR	20 MWt	Th + U^{235}	1966-1973
ABD	Peach Bottom	HTGR	40 MWe	Th + U^{235}	1966-1972
ABD	Fort St. Vrain	HTGR	330 MWe	Th + U^{235}	1976-1989
ABD	MSRE ORNL	MSBR	7,5 MWt	U^{233}	1964-1969
ABD	Borax IV	BWRs	2,4 MWe	Th + U^{235} Oksit pelet	1963-1968
ABD	Shippingport Indian Point 1	LWBR PWR	100 MWe 285 MWe	Th + U^{233}	1977-1982
Hollanda	SUSPOP/KSTR KEMA	Sulu Homojen	1 MWt	Th + HEU (Yüksek zenginlikte)	1974-1977

		Süspansiyon		Uranyum)	
Kanada	NRU&NRX	MTR		Th + U ²³⁵	Yakıt ışınlama testi yapılmakta
Hindistan	KAMINI, CIRUS, DHRUVA	MTR	30 kWt 40 MWt 100 MWt	Al- U ²³⁵	İşletmede
Hindistan	KAPS, KGS, RAPS	PHWR	220 MWe	ThO ₂ Pelet	İşletmede
Hindistan	FBTR	LMFBR	40 MW t	ThO ₂ Örtü	İşletmede

Kaynak: IAEA Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges, 2005: 4.

SONUÇ

İkinci Dünya Savaşı sonrasında nükleer askeri amaçlar dışında barışçıl amaçlar için kullanımı konusunda yapılan çalışmalar ve nükleer teknolojideki gelişmeler nükleer enerji dönemini ortaya çıkarmıştır. İlk olarak, 1970'li yıllarda, özellikle nükleer silahlanma amacıyla bu teknolojiye sahip olan ülkeler tarafından nükleer santraller kurulmuştur. Nükleer santraller; ucuz enerji vaadiyle ve 1970'li yıllarda enerji alanında yaşanan petrol kriziyle kısa sürede ilgi kaynağı olmuştur. Özellikle 70'li yıllar nükleer enerjinin yükselişinde altın yılları olmuştur. Daha sonra yaşanan kazalar, artan güvenlik ve teknolojik maliyetler nükleere olan ilginin azalmasına neden olmuştur. Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren nükleere olan ilgide bir duraklama dönemi olmuştur. Nükleer teknolojilerin kullanımının başlamasından bu yana gerçekleşen kazalar ve bunların sonuçları, güvenlik önlemlerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koyarak bu alandaki çalışmalar ve yatırımın artmasına neden olmuş, nükleer santral sahibi bazı ülkeleri ise bu teknolojiyi terk etme kararı almaya itmiştir.

Nükleer enerji yeni bir enerji kaynağıdır. Mevcut ve tesis halindeki reaktörlerin sayısına bakılırsa, nükleer enerjinin dünya toplam enerji üretimindeki payı artacak gibi görünmektedir. Kaynak bugüne kadar daha çok batılı, sanayisi gelişmiş ülkeler tarafından kullanılmıştır. Gelişmekte olan bir ülke konumundaki Türkiye için enerji hayati önem taşımaktadır. Mevcut diğer enerji kaynaklarının yanı sıra nükleer enerji alternatifinin kullanılması gereklidir.

Toryum doğada uranyumdan daha bol bulunur. Dünyada kesin toryum rezervleri konusunda sağlıklı bilgiler bulunmamaktadır. Eldeki veriler tahminden öteye geçmemektedir. Th, bölünebilir (fisil) olmaktan ziyade daha çok doğurgan (fertil) özelliği vardır ve yakıt olarak ya zenginleştirilmiş uranyum ile birlikte ya da yeniden işlenmiş bölünebilir(uranyum ve/veya plütonyum gibi)malzemelerle birlikte kullanılabilir. Çeşitli nükleer reaktörlerde kullanılmak üzere, toryum içeren yakıtlar bölünebilir U²³³'ü üretirler veya nükleer reaktör içinde hızlandırıcı tetiklemeli nötron bombardımanı ile bölünebilir malzeme üretilebilir. Toryumun 4. nesil nükleer reaktör teknolojilerinin bazılarında hali hazırdaki yakıt fabrikasyonuna ihtiyaç duymadan, sıvı yakıt olarak kullanılabilmesi reaktörler bulunmaktadır. Bu şekilde konvansiyonel olarak yakıt fabrikasyonuna gerek duyulmamaktadır.

Th²³² dünyada uranyumdan üç misli daha fazla bulunmaktadır. Günümüze kadar toryum, nadir toprak elementleri ya da uranyumun yan ürünü olarak üretilmiştir. Günümüz şartlarında toryumun çıkarılması ve üretimi, toryum talebi ve piyasası olmadığından ekonomik değildir. Nadir toprak elementlerine talep

arttığından ve toryum da bunların yan ürünü olduğundan kısa ve orta dönem için toryum çıkarılmasına ihtiyaç bulunmamaktadır. Toryum madenciliği uranyuma göre daha kolay olup en önemli avantajı, açık kuyu monazit yataklarından elde edilmesidir.

Toryumun nükleer güç santrallerinde kullanılması teknolojisinin, mevcut uranyum temelli yapıya kıyasla önemli bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar arasında, toryumun doğada uranyumdan çok daha yaygın ve dengeli bir şekilde bulunabiliyor olması ve toryumun, nükleer enerji üretiminde uranyuma kıyasla daha verimli bir şekilde kullanılabiliyor olması başı çekmektedir.

Dünya’da, 10 ülkenin toryum stratejisi vardır: ABD, Çin, Rusya, Birleşik Krallık, Fransa, Japonya, Güney Kore, Norveç, Belçika ve Hindistan. Bu ülkeler arasında Japonya ve Güney Kore gibi toryuma sahip olmayan ülkelerin de olması, toryum teknolojisinin ticarileşmesi beklentisinin bir sonucudur. Dünya’da bu durum, ‘toryum yarışı’ olarak adlandırılmaktadır.

Toryum yakın gelecekte nükleer santrallerde kullanılabilme potansiyeli olan bir maddedir ve Türkiye’deki toryum rezervi, Dünya’daki önde gelen toryum rezervlerindedir. Her ne kadar toryum teknik açıdan nükleer güç santrallerinde kullanılabilir olsa da bu durumun ancak beş yıl zarfında pratiğe geçirilmesi beklenmektedir. “Toryum yarışı” olarak adlandırılan yarış ise, bu beklentinin hızla hayata geçirilerek ticarileştirilmesi ve yüksek teknoloji ürünü/hizmet ihracından büyük boyutta kazanç elde edilmesine yönelik olan bir yarıştır.

KAYNAKÇA

- Arık, M., Sultansoy, S., Çetiner, M. A., Çalışkan, A. ve Bilgin, P. S. (2012). “Yeşil Nükleer Enerji: Proton hızlandırıcıya Dayalı Toryum Yakıtlı Enerji Sistemi”, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 45: 46 – 51.
- Aybers, N. (1994). “Nükleer Enerjinin Fayda ve Zararları”, Türkiye 6. Enerji Kongresi, Teknik Oturum Tebliğleri, 17-22 Ekim 1994, İzmir.
- Bayraktar, B. N. ve Çelikten, O. Ş. (2014). “Toryum”, Enerji Piyasası Bülteni, 32: 53-59, <http://web.enerjiuzmanlari.org/Portals/0/sayi32/say%C4%B1%2032.pdf>, (E.T: 14.07.2015).
- Doğanay, H. (1998). *Enerji Kaynakları*, Erzurum: Şafak Yayınevi,
- Dünya Enerji Konseyi- Türk Milli Komitesi (DEK-TMK) (OCAK 2014). *Enerji Raporu 2014*, DEK-TMK Yayın No : 0022/2014, Ankara: Poyraz Ofset. <http://www.dektmk.org.tr/upresimler/Enerji-Raporu-2013.pdf>, (E.T: 12.07.2015).
- International Atomic Energy Agency (IAEA)(May 2005). *Thorium fuel cycle — Potential benefits and challenges*, Austria: International Atomic Energy Agency. http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf, (E.T: 20.06.2015).
- Juhn, P. E. & Kupitz, J. (1996). “Nuclear Power Beyond Chernobyl: A Changing International Perspective”, IAEA Bulletin, 38 (1): 2-9.
- Karabulut, Y. (1999). *Enerji Kaynakları*, Ankara: Ankara Üniversitesi Basımevi.

- Kaya, İ. S. (2012). "Nükleer Enerji Dünyasında Çevre ve İnsan", Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 2012-1(24): 71-90.
- Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA) and The International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014). *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*, <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2014/7209-uranium-2014.pdf>, (E.T. 10.07.2015).
- Redhouse. (Eylül 2000). *Redhouse Büyük El Sözlüğü*, İstanbul: Ayhan Matbaası,
- Schneider, M., Froggatt, A., Ayukawa, Y., Burnie, S., Piria, R., Thomas, S. & Hazemann, J. (Temmuz 2014). *World Nuclear Industry Status Report 2014*, Paris, London, Washington, D.C. <http://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/201408msc-worldnuclearreport2014-lr-v4.pdf>, (E.T: 16.07.2015).
- Sultansoy, S., Şahin, S. & Ünal, S. (Şubat 2015). *Türkiye’de Toryum: Enerji, Ekonomi ve Siyasette Fırsatlar*, Ankara: Türkiye Enerji Vakfı (TENVA). <http://www.tenva.org/wp-content/uploads/2015/02/TENVA-TORYUM RAPOR.pdf>, (E.T: 12.06.2015).
- Şahin, S., Şahin, H. M., Alkan, M. & Yıldız, K. (2004). "An assessment of thorium and spent LWR-fuel utilization potential in CANDU reactors", ELSEVIER, *Energy Conversion and Management*, 45: 1067 – 1085, http://foe.atilim.edu.tr/shares/personel/447/113_publication.pdf, (E.T: 18.06.2015).
- Temurçin, K. & Aliğaoğlu, A. (2003). "Nükleer Enerji ve Tartışmalar Işığında Türkiye’de Nükleer Enerji Gerçeği", *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 1(2): 25-39.
- Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) (2013). *Nükleer Enerji Raporu 2013*, Ankara: Mattek Matbaa. http://www.emo.org.tr/ekler/d28ac2cf3783f23_ek.pdf, (E. T: 20.07.2015).
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK). (Ocak 2015). *Toryum Yakıt Çevrimi (Bilgi Dokümanı)*, <http://www.taek.gov.tr/belgeler-formlar/yayinlar/bilgi-dokumanlari/Toryum-Yak%C4%B1t-%C3%87evrimi-Bilgi-Dok%C3%BCman%C4%B1/>, (E.T: 10.07.2015).
- <http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/World-Nuclear-Power-Reactors-and-Uranium-Requirements/>, (E.T: 18.06.2015).
- <http://www.rsc.org/periodic-table/element/90/thorium>, (E.T: 18.06.2015).
- [http://nevada-outback-gems.com/mineral information/Monazite mineral info.htm](http://nevada-outback-gems.com/mineral%20information/Monazite_mineral_info.htm), (E.T: 13.06.2015).
- <http://webmineral.com/specimens/picshow.php?id=1147&target=Thorianite#>, (E.T: 10.06.2015).

EXTENDED ABSTRACT

Energy is the leading condition of economic activity in all countries, developed and developing. Us to meet our energy needs domestic production rate has declined steadily in the 2000s. The importance of energy in the next year will increase day by day. They should try all ways to reduce dependence on foreign energy and research done in this direction should be accelerated. Endangered fossil resources as an alternative to the

energy needs of the growing emphasis on new sources of energy should be focused on the supply from other sources. To meet the growing energy needs of our country lacking fossil energy sources lignite excluding nuclear energy, it has been one of the alternative energy sources.

Uranium is used in nuclear power plants throughout the world for decades. Still it continues to be used in the same way. However, in recent years it should be a mine can run either in general more powerful energy sources with the need for the world sought several new mines are needed for new energy sources. Thorium is an element, which can be used in nuclear power plants to generate electricity today, as a resource to respond to this need it is projected thorium mine. However, due to lack of thorium mine yet have the knowledge and technology to use in nuclear power plants people literally can not be fully evaluated. Research and studies thorium is proved to be the energy source of the future.

Thorium is a naturally-occurring, slightly radioactive metal discovered in 1828 by the Swedish chemist Jons Jakob Berzelius, who named it after Thor, the Norse god of thunder. It is found in small amounts in most rocks and soils, where it is about three times more abundant than uranium. Soil contains an average of around 6 parts per million (ppm) of thorium.

Thorium exists in nature in a single isotopic form – Th-232 – which decays very slowly (its half-life is about three times the age of the Earth). The decay chains of natural thorium and uranium give rise to minute traces of Th-228, Th-230 and Th-234, but the presence of these in mass terms is negligible. It decays eventually to lead-208.

The use of thorium as a new primary energy source has been a tantalizing prospect for many years. Extracting its latent energy value in a cost-effective manner remains a challenge, and will require considerable R&D investment. This is occurring preeminently in China, with modest US support.

The most common source of thorium is the rare earth phosphate mineral, monazite, which contains up to about 12% thorium phosphate, but 6-7% on average. Monazite is found in igneous and other rocks but the richest concentrations are in placer deposits, concentrated by wave and current action with other heavy minerals. World monazite resources are estimated to be about 16 million tonnes, 12 Mt of which are in heavy mineral sands deposits on the south and east coasts of India. There are substantial deposits in several other countries. Thorium recovery from monazite usually involves leaching with sodium hydroxide at 140°C followed by a complex process to precipitate pure ThO₂, Thorite (ThSiO₄) is another common thorium mineral. A large vein deposit of thorium and rare earth metals is in Idaho.

New energy technology solves more problems than just global warming. Some people are still skeptical that man-made CO₂ emissions are responsible for global warming. They are concerned that increasing energy costs will harm the US economy. Moreover they are concerned that international treaties might disadvantage the US and other OECD nations, by exempting developing nations from emissions constraints and by paying theirs to avoid CO₂ emissions.

There are multiple reasons to develop an energy source cheaper than coal. Any one of these reasons can justify the investment in developing a solution such as the liquid fluoride thorium reactor. As a result, annual uranium production capability of WOCA from existing and firmly committed mine sand mills is expected to be able to fill the annual reactor requirements before the end of this decade. Thereafter, additional mine sand mills will be required. As lead times for uranium exploration and mining projects are 10 to 15 years and are still growing, higher levels of exploration uranium efforts will be needed if future reactor requirements are to be met. The alternative is the implementation of thorium fuel cycle.

Thorium is not fissile – but fertile. In order to create a reactive thorium fuel capable of producing energy, some form of fresh or recycled fissile material is needed as a ‘driver component’. As the fuel operates, thorium transmutes to uranium-233 which is an excellent fissile material that then yields energy in the fuel. Reactor grade plutonium is a very good fissile driver since it is available from today’s spent nuclear fuel inventories.

Thorium fuel cycles offer attractive features, including lower levels of waste generation, less transuranic elements in that waste, and providing a diversification option for nuclear fuel supply. Also, the use of thorium in most reactor types leads to extra safety margins. Despite these merits, the commercialization of thorium fuels faces some significant hurdles in terms of building an economic case to undertake the necessary development work.

There are ten countries having a thorium strategy: the USA, China, Russia, the United Kingdom, Japan, Korea, Norway, Belgium, and India. The existence of countries with no thorium reserves, like Japan and Korea, among these ten countries, is an outcome of commercialization expectation of thorium technology. This situation is called “thorium race”.