

DÜNYADA VE TÜRKİYEDE URANYUM, TORYUM

Gonca EROĞLU* ve Mesut ŞAHİNER*

URANYUM

Genel Bilgiler

Radyoaktif bir element olan Uranyum (U), 1789 yılında Martin Heinrich Klaproth tarafından keşfedilmiştir. O yıllarda radyoaktivite ile ilgili fazla bilgi olmadığından diğer elementler gibi düşünülmüş ancak 1896 yılında bilim tarihinin önemli isimlerinden olan Dimitri Mendeleev'in çalışmalarıyla radyoaktif bir element olarak sınıflandırılmıştır.

Doğada serbest olarak bulunmayan uranyum, çeşitli elementlerle birleşerek uranyum minerallerini meydana getirmektedir. Hemen her tip kayaç içerisinde ve eser miktarda sulara bulunur. Yeraltı su tablasının üstünde, satıh ve satha yakın yerlerdeki mevcut oksidasyon şartlarında +6 değerlikli uranyum içeren ikincil uranyum mineralleri kolayca eriyebilirler (sudaki pH değerinin artmasıyla) ve uranil iyonları halinde solüsyona geçerek yeraltı suları vasıtasıyla uzun mesafelere taşınırlar. Taşınma sırasında uygun redüksiyon (indirgeme) şartlarıyla karşılaştıklarında +4 değerlikli uranyuma redüklenerek Uraninit ve Pitchblende (uranyum oksit içeren maden cevheri) olarak çökler ve böylece uranyum yatakları oluşur. Başlıca uranyum mineralleri uraninit, autinit, pitchblend, tobernit ve koffinitir.

Atom numarası: 92 Simge: U Kütle numarası: 238,03 Kaynama Noktası (°C): 3818 Erime Noktası (°C): 1132 Yoğunluk: 19,07 Buharlaştırma Isısı: 110 Kaynaşma (Füzyon) Isısı: 2,7 Elektriksel iletkenlik: 0,034, Isıl iletkenlik: 0,064, Özgül Isı Kapasitesi: 0,028'dir.

Uranyum Yataklarının Oluşumu

Uranyum yataklarının oluşumunda en önemli rolü tektonik hareketlerin oynadığı bilinmektedir. Uranyum içeren damarlar herhangi bir bölgeyi etkileyen tektonik aktivitenin son fazlarında oluşur. İlk tektonik

fazlarda meydana gelen damarların uranyum içeriği tektonizmanın diğer fazları sırasında harekete geçerek göç eder. Yerkabuğundaki uranyumun ilk depo kayaçları, dış kabukta yer alan asit karakterdeki postkinematik granitler, alkalin kompleksler ve felsik kayaçlardır. Bu kayaçlar, değişik süreçlerle, muhtelif tipte radyoaktif mineral yataklarının oluşumunu doğrudan veya dolaylı yollardan sağlarlar.

Ülkemizde uranyum yataklarının çoğu sedimanter oluşumlar olup, Neojen yaşlı karasal kumtaşları ve konglomeralar içinde bulunmaktadır. Köprübaşı, Fakılı, Küçükçavdar ve Sorgun uranyum yatakları sedimanter tip yataklardır. Sadece Demirtepe yatağı damar tipi uranyum yatağı grubundadır.

Sedimanter uranyum yatağının meydana gelebilmesi için 4 temel faktörün olması gerekir. Bunlar;

1. Birincil uranyum minerallerini kapsayan bir ana kayaç,
2. Uranyum minerallerini içeren ana kayacın yıkanması ve uranyumun hareketli hale gelmesiyle ortaya çıkan eriyiklerin taşınması,
3. Uranyumlu eriyiklerden ortamın fiziksel ve kimyasal koşullarına bağlı olarak uranyumun çökmesi,
4. Çökelen uranyumu içeren katmanların erozyondan korunması.

Uranyum Üretim Yöntemleri ve Teknolojisi

Uranyum üretiminde uygulanacak yöntemin seçimi, yatağın oluşum türüne, derinliğine, tenörüne ve rezervine bağlı olarak değişmektedir. Açık veya yeraltı işletmesi yöntemleriyle çıkarılan cevher, kırma-öğütme işlemlerinden sonra, ön zenginleştirme işlemlerinden geçirilerek saflaştırılır, rengi ve biçimi nedeniyle "Sarı Pasta" (uranyum oksit, UO_2) olarak adlandırılan katı bir forma çevrilir (Şekil 1).

Diğer bir yöntem olan yerinde özütlemeye (liç), kuyular vasıtasıyla yatağa enjekte edilen kimyasallar ile uranyum çözeltisi elde edilir, bu çözeltiden sarı pasta (UO_2) yapımı gerçekleştirilir.

* Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı, ANKARA.

Elde edilen katı haldeki sarı pasta (UO_2), zenginleştirme işlemleri için gaz formuna (UF_6 -uranyum hegzaflorid) çevrilerek varillerde depolanır ve zenginleştirme tesislerine gönderilir.



Şekil 1- Sarı Pasta (UO_2).

Zenginleştirme

Zenginleştirmenin amacı, uranyumun içindeki, nükleer fisyon sırasında en iyi sonucu veren, fisil U-235 atomlarının miktarını artırmaktır. Çünkü nükleer reaktörde kullanılacak uranyumun, %2-5 oranında U-235 atomu içerecek şekilde zenginleştirilmiş olması gerekir. Silahlarda kullanılan uranyum ise en az % 90 oranda U-235 içermelidir.

Zenginleştirme işlemleri oldukça zordur ve büyük miktarda enerji sarfiyatına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu yüzden bir ülkenin zenginleştirme tesisi kurabilmesi için büyük bir enerji programına ve enerji santrallerine sahip olması gerekir. Fransa, Almanya, Hollanda, Japonya, ABD, İngiltere, Rusya ve Çin'de büyük ölçekli uranyum zenginleştirme tesisleri bulunmaktadır.

Zenginleştirme Yöntemleri

Uranyum zenginleştirme işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan metotlar; gaz difüzyonu, gaz santrifüj ve lazer ayırıştırma yöntemi olarak bilinmektedir. Günümüzde özellikle gaz santrifüj, gaz difüzyonu metotları uluslararası standartlarda zenginleştirilmiş uranyum elde etmek için kullanılmaktadır. Lazer ayırıştırma yöntemi ise Ar-Ge aşamasında olup bu konuda pilot çalışmalar yapılmaktadır.

Gaz difüzyonu yöntemi ilk defa 2. Dünya Savaşı'nda kullanılmış, 1960'lı yıllar itibari ile de ticari amaçlı zenginleştirilmiş uranyum üretilmeye başlanmıştır. Bu sistem; difüzyon evreleri, elektrik santrali ve dağıtım sistemi, soğutma kuleleri, florlama tesisi, buhar üretim

santrali, filtre imalat ünitesi, kuru hava ve azot üretim ünitesi içermektedir. Tesisin işletme masrafları yüksek ve açılıp kapatılma süreleri uzun olduğundan artık günümüzde tercih edilmemektedir.

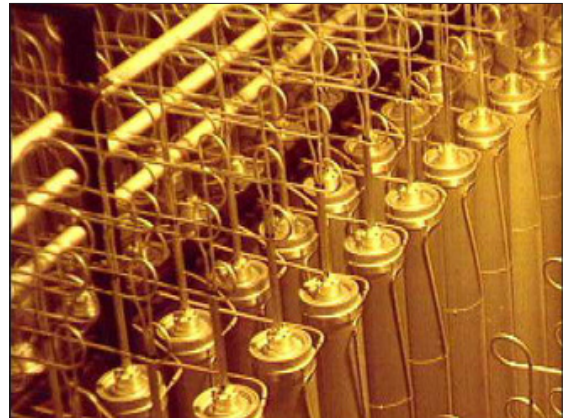
Dünyada uranyum zenginleştirmesi yapan ülkelerin kullandığı teknolojilerine bakıldığında son yıllarda santrifüj metodunun çoğunlukta olduğu görülmektedir (Çizelge 1). Bunun nedeni santrifüj yönteminde maliyetlerin daha düşük ve işlemlerin daha basit olmasıdır (www.world-nuclear.org).

Çizelge 1- Uranyum zenginleştirme yöntemleri (%).

Tedarik Kaynağı	2000	2010	2015	2020
Difüzyon	50%	25%	0%	0%
Santrifüj	40%	65%	100%	93%
Lazer	0%	0%	0%	3%
Eski Silahlardan Dönüşüm	10%	10%	0%	4%

Santrifüj Yöntemi

Doğada az oranda bulunan U-235'i diğer uranyum atomlarından (U-238) ayırmak için en çok gaz santrifüj tekniği kullanılır. Bu yöntemde; hazırlanmış olan UF_6 (Uranyum Hekzaflorid) gazı, sestene daha hızlı sürekli olarak dönen, 3-5 m uzunluğunda 20-40 cm çapındaki silindirlere, konulur. Silindirlerin hızla dönmesi sırasında yoğun olan U-238 izotopları hafif olan U-235 izotoplarından ayırıştırılır. Yoğun izotoplar (U-238) santrifüjün dış kenarlarında, hafif olan U-235 parçacıkları ise merkezde toplanır. Bu sayede U-238 izotopu U-235 izotopundan ayrışır. İstenilen (nükleer santraller için % 2-5, nükleer silahlar için % 90) zenginleştirme seviyesine ulaşılan kadar işleme devam edilir (Şekil 2).



Şekil 2- Zenginleştirme tesisi santrifüj tüpleri.

Difüzyon Yöntemi

Bu yöntemde; gaz bileşik (UF_6) içindeki uranyum atomlarının gözenekli filtrelerden geçmesiyle ayrışma sağlanır. Hafif olan U-235 atomları gözeneklerden daha hızlı geçer ve bu sayede ağır olan U-238 atomlarından ayrılmış olur. Nükleer yakıt için ihtiyaç olan %2-5 seviyesine ulaşabilmek için zar şeklindeki ince filtrelerden çok sayıda arka arkaya yerleştirilmesi gerekir. Örneğin Fransa'daki zenginleştirme tesisinde 1400 adet filtre kullanılır.

Zenginleştirme işlemleri tekrar tekrar yapılarak en saf U-235 sağlanmaya çalışılır. İşlem sonunda zenginleşmiş ve fakirleşmiş uranyum ayrı ayrı depolanır. Zenginleşmiş UF_6 , UO_2 'ye dönüştürülür, yakıt tabletleri yapılır ve nükleer enerji santrallerine gönderilir. Fakirleşmiş uranyum ise dönüştürme tesislerine veya depolama alanlarına gönderilir.

Uranyumun Kullanım Alanları

Uranyum,

- Nükleer enerji santral yakıtı olarak,
- Uranil asetat analitik uygulamalarında,
- Zırh kaplama, gemi ve uçak yapımında,
- Seramiğe renk vermek amacıyla,
- Üretim reaktörlerinde, plütonyum hidrojen bombası yapımında,
- Nükleer patlayıcı yapımında kullanılır.

Dünyadaki Nükleer Enerji Santralleri

İlk kez 1951'de ABD, Idaho-Arco'da EBR-I Deneysel Reaktörü'nde, dört adet ampulü elektrikle aydınlatılabilen nükleer enerji üretildi. EBR-I, elektrik üretmek için değil, reaktör konseptini doğrulamak üzere tasarlanmıştır (Şekil 3).

Rusya-Obninsk'deki, 5 MW net elektrik çıkışlı APS-1 nükleer santrali (1954), ticari kullanım için elektrik üreten dünyanın ilk nükleer santralidir.

Günümüzde çalışır durumda 450 ve inşaat halindeki 60 nükleer enerji santrallerinin bulunduğu ülkeler arasında 99 çalışır 4 inşaat halinde olmak üzere toplamda 103 nükleer santralle ABD ilk sırada yer alırken bunu sırasıyla; 58 çalışır 1 inşaat halinde Fransa, 43 çalışır 2 inşaat halinde Japonya, 36 çalışır 20

inşaat halinde Çin ve 36 çalışır 7 inşaat halinde Rusya yer almaktadır. Bunun yanında; Güney Kore, Hindistan, Kanada, Ukrayna önde gelen nükleer enerji üreten ülkelerdendir (www.world-nuclear.org).



Şekil 3- Nükleer enerji ile ilk elektrik üretimi, Deneysel Reaktör EBR-I, ABD.

Dünya Uranyum Rezervi

Dünyada bilinen uranyum rezervi 5.718.400 tondur. Bilinen uranyum rezervinin 1milyon 664 bin tonu Avustralya'da, 745 bin tonu Kazakistan'da, 509 bin tonu Kanada'da ve 507bin tonu Rusya'da bulunmaktadır. Güney Afrika, Çin, Brezilya, Nijer, Namibya diğer önemli rezerve sahip ülkelerdir (www.oecd-nea.org).

Dünya Uranyum Üretimi

2016 yılı verilerine göre, nükleer enerji santrallerinin yakıtı olarak kullanılan uranyumun üretiminde Kazakistan, Kanada ve Avustralya başta gelmektedir. Bu üç ülke toplam uranyum üretiminin % 71'ini gerçekleştirmektedir.

Kazakistan, dünya uranyum üretiminin üçte birinden fazlasını tek başına gerçekleştirmektedir. Toplam uranyum üretiminin %39'unu karşılayan Kazakistan'ı, %22'lik üretimle Kanada ve %10'luk üretimle de Avustralya takip etmektedir. Uranyum üretim miktarı Kazakistan'da 24.575 ton, Kanada'da 14.039 ton ve Avustralya'da 6.315 ton 'dur. Nijer'de 3.477 ton, Namibya'da 3.315 ton ve Rusya'da 3.004 ton olarak gerçekleşmiştir (www.oecd-nea.org).

Türkiye'de Uranyum Madenciliği

Türkiye'de geçmiş dönemlerde yapılmış olan uranyum aramaları sonucunda pilot laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Bu teknolojik çalışmalar

sırasında, bulunan uranyum cevherinden sarı pasta üretimi de gerçekleştirilmiştir. 1974 yılında Köprübaşı (Manisa) cevherlerinde MTA tarafından kurulan pilot tesisler 1974-1982 yılları arasında faaliyet göstermiş, bu tesislerde Köprübaşı ve Fakılı (Uşak) yöresinde çıkarılan uranyum cevherlerinden yaklaşık 1200 kg sarı pasta üretilmiş ve 1996 yılında da TAEK'e teslim edilmiştir.

2017 yılı verilerine göre Ülkemizde toplam 12.614 ton uranyum rezervi olduğu belirlenmiştir. MTA, Nevşehir-Avanos-Yeşilöz sahasında uranyum arama çalışmalarına devam etmektedir (Çizelge 2).

Çizelge 2- Türkiye uranyum rezervi (2017 yılı).

Bölge	TENÖR (% U ₃ O ₈)	REZERV (ton)
Manisa - Köprübaşı	0,04 - 0,07	3.487
Uşak-Eşme-Fakılı	0,05	490
Yozgat-Sorgun	0,1	6.700
Aydın-Küçükçavdar	0,04	208
Aydın-Demirtepe	0,08	1.729
TOPLAM		12.614

Ülkemizdeki mevcut yatakların ortalama tenör ve rezervleri, aranıp buldukları yıllarda, dünyaca kabul edilen ekonomik sınırlarda olmalarına rağmen, günümüzde bu değerler söz konusu sınırların altında kalmıştır. Bunun nedeni, son yıllarda nükleer santral planlamalarında önemli değişiklikler olması ve özellikle Kanada ve Avustralya'da yüksek tenörlü ve üretim maliyetleri düşük olan uranyum yataklarının bulunmasıdır.

Yozgat-Sorgun yöresinde MTA tarafından yapılan arama çalışmaları sonrasında, işletme ruhsatı verilen Temrezli köyü madeninde, Anatolia Enerji Ltd. Şti. tarafından, yerinde kazanım metodu (liç) ile bazik ortamda uranyum kazanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bölgede yapılan fizibilite çalışmaları sonucunda yaklaşık 10 yıl faaliyette olması planlanan tesiste çözelti madenciliği teknolojisi ile yaklaşık 4 bin ton U₃O₈ üretilmesi hedeflenmiştir. Çözelti madenciliği kapalı bir sistem olup bu metot dâhilinde uranyumun çözeltiye alınarak ürün eldesi için işlenmesi yöntemi izlenmektedir. Çözelti madenciliği teknolojisinde uranyum cevherinin bulunduğu yeraltı katmanlarına kuyular yardımı ile çözelti

verilmektedir. Yeraltındaki katmanlara verilen çözelti bu tabakalarda bulunan uranyum cevherini mobil hale getirmektedir. Çözeltiye alınan uranyum sahada yer alan kuyulardan pompalar yardımı ile yüzeye çıkartılmaktadır. Yüzeye pompalanan çözelti proses tesisine gönderilmekte olup proses tesisinde konsantre uranyum oksit (U₃O₈) elde edilmektedir (Üçgül ve Çetin,2014).

Sorgun - Temrezli bölgesindeki uranyum yatağı Türkiye'de bilinen uranyum cevherleşmeleri içerisinde rezerv bakımından ekonomik ve tenörü en yüksek olan yataktır. Uranyum cevherleşmesi mercerler şeklindedir, bu mercerlerin yüzeyden olan derinliği 25 ile 215 m arasında değişmektedir. Yürütülen ekonomik ön değerlendirme çalışmaları sonucunda, kaynağın içerdiği uranyumun miktarı yaklaşık 6.700 ton olarak tahmin edilmektedir.

Uranyum Ticareti

Uranyum piyasasındaki fiyat gelişmeleri yıllara göre büyük farklılıklar göstermiştir. 1970 yılında 6,8 \$/lb olan uranyum fiyatı, 1978 yılında 51,25 \$/lb a kadar çıkmış, 1990 yılında ise 34,75\$/lb seviyesine inmiştir. Bu iniş 1994 yılının 3 üncü çeyreğine kadar sürmüş ve spot piyasada fiyatı 8,3 \$/lb olmuştur. 1994-1996 yılları arasında fiyatlarda bir kıpırdanma olmuş ve 1996 yılında 19,22 \$/lb düzeyine yükselmiştir. Buna bağlı olarak hem arama harcamaları hem de üretim miktarı artmıştır.

2007 yılının ortalarında uranyum fiyatlarındaki ani düşüş ile kısa vadeli arz daralması pazarda korkular yaratmıştır. Fiyatlar daha sonra hafifçe iyileşmiş fakat 2011 yılındaki Fukushima afeti uranyum fiyatlarının aşağı çekilmesine neden olmuştur. Bu olay neticesinde nükleer güç olumsuz algı yarattıysa da karbondioksit emisyonu açısından nükleer enerji üretimi en temiz kaynak olarak gösterilmiştir.

ABD'de yaklaşık 99 aktif nükleer reaktör bulunurken, diğer ülkeler de nükleer enerji üretimlerini hızla genişletmeye başlamıştır. Örneğin, Çin, şu anda aktif olan 36 nükleer reaktöre sahiptir. Ancak 1,4 milyar nüfuslu ve büyüyen bir ülke durumundaki Çin, hala daha çok enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Artan enerji talebinin karşılanmasına yardımcı olmak

için, Çin şu anda 20 adet yeni nükleer tesis yapımına devam ederken 177 adet daha inşa etmeyi planlamaktadır.

Nükleer kapasitesini genişleten tek ülke Çin değildir, Hindistan da enerji ihtiyacını karşılamak için nükleer enerjiye doğru hızla ilerlemektedir. Şu anda Hindistan'da 22 adet nükleer enerji santral varken, 5 adet inşaat halinde, 66 adet planlanan santral bulunmaktadır.

MiningFeeds.com'a göre, aşağıdaki şirketler uluslararası uranyum ticaretinde önde gelen şirketlerdir;

- BHP Billiton Ltd. (Avustralya)
- Rio Tinto Ltd. (Avustralya)
- Cameco Corp. (Kanada)
- NexGen Energy Limited (Kanada)
- Altius Minerals (Kanada)
- Uranium Participation Corp. (Kanada)
- Energy Resources of Australia (Avustralya)
- Denison Mines Corp. (Kanada)
- Fission Uranium Corp (Kanada)
- Uranium Energy Corp. (Amerika Birleşik Devletleri)

Uranyum Fiyatı

Uranyum fiyatı Şubat 2017'ye göre %20 yükselerek Ağustos 2017'de 20,80 \$/lb'ye yükselmiştir. Şu anki olumsuzluklara rağmen,

Focus Economics analistleri tarafından yapılan araştırmaya göre, fiyatın bugünkü seviyelerden istikrarlı bir şekilde 2018 yılının sonuna kadar %40 artış sağlaması, 2020'de ise 40 doların üzerine kadar yükseleceği tahmin edilmektedir. Doğal olarak bu eğilimin olması için ülkeler tarafından planlanan nükleer enerji santrallerinin üretime geçmesiyle fiyat artışının daha da hızlanacağı açıktır (Çizelge 3) (www.uraniumenergy.com).

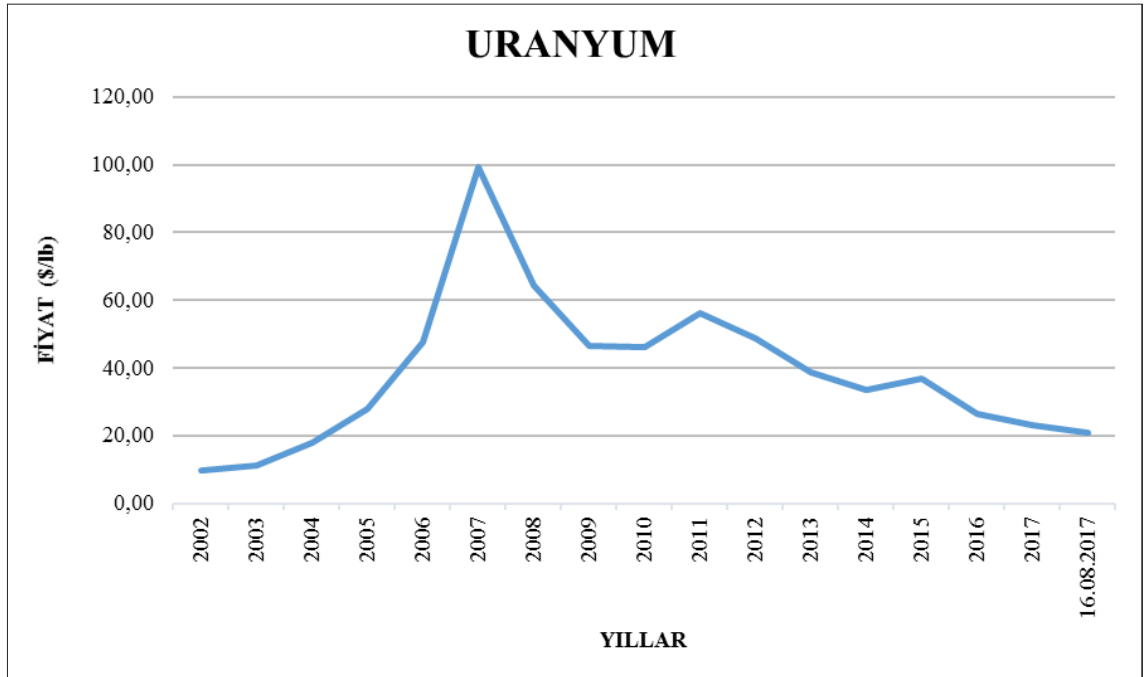
Dünya Uranyum Ticareti

Asya ülkeleri 2016 yılı dünya doğal uranyum ihracatının %47,6'sını ve 2 milyar dolarlık kısmını gerçekleştirmiştir. İkinci sırada Kuzey Amerika %38,9, üçüncü sırada % 12,9 ile Avrupa ve sadece %0,6 ile Afrika doğal uranyum ihracatı gerçekleştirmiştir.

Ancak, zenginleştirilmiş uranyum satışlarının %85,9'u Avrupa ihracatçıları tarafından yapılmıştır. Bu oran Asya ülkelerinde %8,1, Kuzey Amerika'da %5,8 olarak gerçekleştirilmiştir.

Dünya uranyum ihracatının 1,7 milyar \$ ve %40,8 pay ile Kazakistan gerçekleştirmiştir. Bunu sırasıyla; 1,2 milyar \$ ile Kanada, 483 milyon \$ ile ABD, 288 milyon \$ ile Özbekistan takip etmiştir (www.worldstopexports.com).

Çizelge 3- Uranyum fiyatı değişimleri.



Dünya zenginleştirilmiş uranyum ihracatının 2016 yılında %34 pay ve 727,7 milyon \$ ile Fransa ilk sırada yer almaktadır. Bu ülkeyi sırasıyla; %25,2 ile Almanya, %24,3 ile Hollanda, %6,3 ile Çin ve %4,6 ile ABD takip etmektedir.

Türkiye Uranyum Ticareti

Ülkemizde uranyum ticareti bulunmamaktadır. Ancak önümüzdeki yıllarda nükleer santrallerin yapılması planlanmıştır. Bu planlamalardan hayata geçirilecek olan Akkuyu Nükleer Santrali'nin devreye girmesiyle ileriki dönemlerde uranyum ticaretine yönelik hareketlenme ve yurt içinde üretime yönelik çalışmalar kaçınılmazdır.

Öneriler

Fransa'da yapılan İklim Değişikliği Konferansı sonrasında küresel ısınmaya karşı çözüm olarak nükleer enerji ön plana çıkmıştır. Bu nedenle gelecek yıllarda uygun bir yükselişle uranyum talebi artmaya devam edecektir

2025 yılında yaklaşık 480 kadar elektrik enerjisi üreten nükleer santralin çalışıyor olacağı tahmin edilmektedir. Bu da uranyum talebinin artacağı anlamına gelmektedir.

Çin, şu anda 36 aktif halde çalışan nükleer santrale sahiptir. 2017 yılı itibarıyla 20 adedi inşa halindedir ve yakın gelecekte 100 adet daha nükleer santral kurulumu planlanmaktadır. Buna bağlı olarak da Çin'in bugünkü uranyum talebinin 2025 yılında üç kat daha artacağı tahmin edilmektedir.

Nuclear Energy Agency (NEA) tarafından dünyada belirlenmiş uranyum rezervlerinin bugünkü tüketim koşullarında yaklaşık 200 yıl yeterli olduğu ifade edilmektedir. Yapılacak araştırmalar sonucu yeni arz kaynaklarının devreye sokulmasıyla bu sürenin 230-250 yıla kadar çıkacağı tahmin edilmektedir.

Yukarıda sayılan tahminler ışığında ve yeni ikame bulunma ihtimalinin azalması sebebiyle uranyum fiyatının gelecek yıllarda artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle hem ülkemiz de kurulması planlanan ve dünyadaki gelişmelere yönelik tahminlere göre uranyum aramalarına ve üretimine yönelik çalışmalara ivedilikle geçilmesi gerekmektedir.

Ayrıca yeryüzündeki okyanuslar Dünya'nın bütün büyük şehirlerine binlerce yıl enerji sağlayabilecek miktarda uranyum içermektedir. Tabii ki uranyumun sudan ayrılabilmesi, bu noktadaki en büyük problemdir. Uranyumun deniz suyundan elde edilmesi halen verimsiz ve pahalı olsa da, geleceğin nükleer enerji planlamalarında önemli bir adım olan uranyum cevheri madenciliğine alternatif sunmaktadır. Karasal kaynaklardan elde edilen uranyumun 100 ila 200 yıl daha dayanabileceği öngörüsü düşünülürse; yeni yöntemlerle uranyum madenciliği yapmak, gelecek için oldukça önemlidir.

TORYUM

Genel Bilgiler

Radyoaktif bir element olan Toryum ilk kez 1828 yılında Norveçli mineralog Morten Thrane Esmark tarafından keşfedilmesine rağmen İsveçli kimyager Jons Jacob Berzelius tarafından tanımlanarak periyodik cetveldeki yerini almıştır. Element adını mitolojide savaş tanrısı olarak kabul edilen Thor'dan almıştır.

Toryum, atom numarası 90, atom ağırlığı 232 g/mol, yoğunluğu 11,72 g/cm³ fiziksel özellikleri ile periyodik tabloda aktinit serisinin ikinci üyesi olarak yer almaktadır. Aktinitler arasında en yüksek erime ve kaynama noktasına sahip elementtir. Ergime noktası 1750 °C, kaynama noktası 4785 °C, asıl rengi gümüş beyazı olan toryum, oksitlendiğinde önce gri renge bürünen sonrasında ise siyahlaşan ve nükleer enerji kaynağı olarak kullanılan radyoaktif bir elementtir. Bilinen 6 izotopu (227Th, 228Th, 230Th, 231Th, 232Th ve 234Th) vardır, bunlardan sadece 232Th izotopu duraylıdır.

Toryum da doğada serbest halde bulunmaz, yaklaşık 50 civarında mineralin yapısı içinde yer alır. Bunlardan sadece monazit, torit, torianit ve allanit toryum üretiminde kullanılmaktadır. Bu mineraller de genellikle nadir toprak elementleri (NTE) ile birlikte bulunmaktadır.

Dünya Toryum Rezervleri

Toryumun yerkabuğundaki ortalama konsantrasyonu yaklaşık 7 ppm olup, diğer bir radyoaktif element olan uranyuma göre birkaç yüz kat daha fazla bulunmaktadır.

Toryumun doğada bulunma sıklığı molibden, arsenik ve kalaydan da yaklaşık 2 kat daha fazladır. Bununla birlikte kayaçlar içindeki konsantrasyonları oldukça düşüktür.

2016 verilerine göre dünyada bilinen toplam toryum rezervinin yaklaşık 6,35 milyon ton olduğu ve ortalama % 6-7 civarında toryum içerdiği tahmin edilmektedir. Rezervler ağırlıklı olarak Hindistan, Brezilya, Avustralya, ABD ve Türkiye’de bulunmaktadır (www.world-nuclear.org).

Idaho-Montana sınırında yer alan Lemhi Pass yatağı ABD’nin bilinen en büyük toryum yatağıdır. 5,5 km² alana yayılan cevherleşme bölgesinde 64.000 ton kesin monazit rezervi bulunmaktadır. Mümkün rezervin 121.000 ton olduğu öngörülmektedir. Bu yatağın NTE konsantrasyonunda ortalama %0,073 ile %2,2 arasında değişmektedir. Toryum konsantrasyonu ise ortalama %0,43 olarak hesaplanmıştır. Diğer önemli toryum yatağı ise Colorado’da yer alan Wet Mountains yatağıdır. Siyenitik ve karbonatit dayklar içerisinde damarcıklar ile birlikte gelişmiş bir cevherleşmedir. Ortalama tenor %0,04-0,6 arasında değişmekte, 58.200 ton kesin, 145.600 ton mümkün rezerve sahiptir (www.world-nuclear.org).

Türkiye’de Toryum Rezervleri

Ülkemizin toryum rezervi için MTA tarafından yapılan araştırmalar sonucunda, Eskişehir’e bağlı Sivrihisar ilçesinin kuzey batısında, Kızılcaören, Karkın ve Okçu Köyleri arasında yer alan 15 km²’lik bir sahada, toryumun yanı sıra nadir toprak elementleri, barit ve fluorit içeren karmaşık yapıları yataklara rastlanmıştır. 1977 yılında hazırlanan rapora göre söz konusu bölgedeki cevherin ortalama tenörü % 0,21 ThO₂, toplam rezerv yaklaşık 374.000 ton ThO₂ olarak belirlenmiştir.

Bölgede toryum, monazit ve torobastnazit minerallerinin kafes yapısında yer almaktadır. Tenör bazı örneklerde % 3’e kadar çıksa da yatağın ortalama tenörü % 0,2’dir. Bu bölge haricinde, toryum yatakları tespit edilmiş olan Malatya-Hekimhan-Kuluncak, Kayseri-Felâhiye, Sivas, Diyarbakır ve Burdur-Çanaklı sahalarında daha ayrıntılı arama çalışmalarının yapılması sonucunda, ülkemizin toryum rezervinin artacağı tahmin edilmektedir. Bulunan ve araştırılmakta olan toryum yatakları

ile Türkiye’nin, dünyanın en büyük toryum rezervine sahip ülkelerden biri konumunda olduğu söylenebilir. Teknolojik sorunların çözülebilmesi şartıyla, Türkiye, nükleer enerji hammaddesi olan toryum açısından önemli bir potansiyele sahiptir ve zenginlik sınıflandırmasında toryum madenimiz çok zengin madenler sınıfında bulunmaktadır.

Toryumun Kullanım Alanları

Toryumun yakıt döngüsünde uranyumdan daha az plütonyum ve diğer trans-uranyum elementleri üretildiğinden, nükleer santrallerin en temiz yakıtı olarak kabul edilir. Çevreye daha az zarar vermesi açısından da ileride nükleer reaktörlerde uranyum yerine kullanılması düşünülmektedir. Toryumun nükleer yakıt olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir. Ancak günümüzde toryumla çalışan ticari ölçekli bir nükleer reaktör bulunmamaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda magnezyumun direncini artırmak amacıyla alaşımlarda, elektronik cihazlarda ve aydınlatmada tungsten filamanların kaplanması, yüksek ısıya dayanıklı potaların yapımında, yüksek kaliteli kamera merceğinde ve nükleer teknolojide kullanılmaktadır. Gaz tungsten ark kaynağında %1 toryum katkılı elektrotlar ark duraylılığını artırmak amacı ile kullanılmaktadır. Ayrıca toryum yüksek erime noktasına sahip olduğu için gaz lambalarında, kamp lambalarında ve sinemalarda yer alan projektörlerde kullanılmaktadır.

U-Th yaş tayini metodunda 230Th izotopu kullanılmaktadır. Bu metod genellikle kalsiyum karbonat (CaCO₃) içeren sedimanlar, mercanlar, kemikler ve dişlerin yaşlarının tayinlerinde kullanılır. 234U/230Th oranı kütle spektrometreleri ile ölçülebilmektedir. Yaş çalışmaları 1.000 ile 1.000.000 yıl arasında sınırlıdır.

Toryumun Enerji Alanında Kullanımı

Japonya’da 2011 yılında gerçekleşen tsunami felaketi ve sonrasında Fukuşima Nükleer Santrali’nde oluşan radyoaktif sızıntı, tüm dünyanın nükleere olan bakış açısını değiştirmiştir. Birçok ülke, mevcut nükleer santrallerini kapatıp yenilenebilir enerjilere daha fazla ağırlık verme kararı almıştır. Nükleer santrallerden vazgeçmeyen bazı

lkeler ise santrallerde kullanılmak üzere uranyumdan daha az tehlikeli toryuma yönelmeye başlamıştır. Toryumun uranyumdan daha az nükleer tehlike içermesi, bazı ülkelerin toryumla çalışan nükleer santral yapımı için projeleri hızlandırmıştır. ABD, Çin, Norveç, Kanada ve Hindistan gibi ülkeler, toryumun elektrik üretiminde kullanılabilmesi için projeler geliştirmektedirler.

Hindistan, toryumla çalışan santraller konusunda dünyada en büyük ilerlemeyi sağlayan ülkedir. Hindistan'ın çok zengin toryum kaynaklarına sahip olması ve bu elementle elektrik üretmeyi başarması durumunda hammadde sıkıntısını tamamen aşacak olması, bu ilerlemelerindeki en büyük etkidir. Çin'de de ülkenin tüm elektrik ihtiyacını tam 20 bin yıl boyunca karşılamaya yetecek kadar toryum rezervi olduğu iddia edilmektedir (www.world-nuclear.org).

Toryum retimi

Toryum ağırlıklı olarak monazit kumlarından üretilmektedir. Bu mineral kumu nitrik asit ile reaksiyona alınarak toryum nitrat ve tributil fosfat elde edilir. Çözelti içerisindeki nadir toprak elementleri ortamın pH oranının artması ile solüsyondan ayrılır. Diğer bir ayırma metodu ise monazitin %45'lik sulu çözelti haline sodyum hidroksit ile getirilerek 140°C'de karıştırılması ve sonrasında 80°C'ye soğutulurak metal hidroksitler filtrelenmesidir. Sonrasında ise su ile yıkanarak konsantr hidroklorik asit ile çözülmesi sağlanır. Son aşamada asidik solüsyonun pH'ı hidroksitler ile nötralize edilerek toryum hidroksitin Th(OH)₄ çökelmesi gerçekleşir. kelmiş olan toryum hidroksit içerisinde yaklaşık %3 oranında nadir toprak elementleri katkısı bulunmaktadır. Bu elementler de inorganik asitler ile çözülerek ortamdaki ayrılırlar. En çok tercih edilen toryum üretim tekniği ise nitrik asit kullanımıdır (www.data.un.org).

Toryumdan Nükleer Enerji retim alışmaları

Toryum kendiliğinden bölünebilir yeteneğine sahip olmadığından, doğrudan nükleer yakıt olarak kullanılamaz. 232Th izotopunun, bir nötron yutarak, fisyon yapabilen (fisil) bir izotop olan 233U'e dönüştürülmesi gerekir. 232Th'nin düşük enerjili nötronlarla reaksiyonu (nötron yutumu) sonucunda, önce kararlılığı daha az olan 233Th oluşur. Radyoaktif

yarılanma suresi 23 dakika olan 233Th ise, bir beta ışması (β) yaparak yarılanma suresi 27 gün olan, 233Pa'a dönüşür. 233Pa, bir beta (β) ve bir gama parçacığı (γ) yayarak bölünebilir 233U'a (radyoaktif yarılanma suresi 163 bin yıl) dönüşmektedir. Böylece 232Th, 235U veya 239Pu gibi bir fisil maddeyle birlikte kullanılır. Toryumun radyoaktif yarılanma süresi 14 milyar yıldır. Toryumlu yakıt denemeleri 1960 yıllarının ortalarında başlamış olmasına rağmen deneysel olarak enerji reaktörlerinde kullanılmasına 1976 yılında başlanmıştır. Almanya, Hindistan, Japonya, Rusya, İngiltere ve ABD'de Ar-Ge alışmaları sürdürülmektedir. Almanya'da geliştirilen 300 MWe gücündeki toryum yüksek sıcaklık reaktörü, yarısından fazlası Th/U olan yakıtla 1983-1989 yılları arasında başarıyla işletilmiştir. 60 MWe Lingen kaynar sulu reaktöründe ise Th/Pu tabanlı yakıt test elemanı kullanılmıştır (www.world-nuclear.org).

Toryum-uranyum karışık yakıtlar, uranyum yakıtına göre daha az plütonyum üretmektedir. Ayrıca yüksek yanma sıcaklığında çalışabilmektedir. Bu da yakıtın reaktörde kalma süresini yani yakıtın yeniden yükleme periyodunu uzatarak tesis kapasite faktörünün artmasına katkı sağlamaktadır.

Toryum Ticareti

Dünyada, monazit öncelikle nadir toprak element içeriği için üretilmiş ve üretilen yan ürün toryumunun sadece küçük bir kısmı tüketilmiştir. Hindistan monazitin önde gelen üreticisi konumdadır. Dünya genelinde toryum tüketiminin diğer maden ürünlerinin çoğuna kıyasla nispeten daha az olduğu görülmektedir.

Dünyada, toryumun ticari kullanımları arasında katalizörler, yüksek sıcaklık seramikleri ve kaynak elektrotları yer almaktadır. Son yıllarda araştırma amaçlı alınan toryum fiyatları, yukarı doğru yönelme eğilimindedir.

Toryum ticaretine bakıldığında; toplam dünya ithalatında en büyük alıcı %99,7'lik pay ile Çin'dir. Diğer alıcılar ise; Japonya, İspanya ve Rusya'dır.

Toryumun dünyadaki ihracatını yapan ülkeler sırasıyla Çin (%30), Vietnam (%24,6), Malezya (%21,2) ve Avustralya (%18,3)'dir (www.data.un.org).

Toryum Fiyatı

Birkaç şirket ve ülke, yeni nesil nükleer reaktörlerin yakıt malzemesi olarak toryumun ticarileştirilmesi için harekete geçmiştir. Bunlar; Belçika, Brezilya, Kanada, Çin, Çek Cumhuriyeti, Fransa, Almanya, Hindistan, Japonya, İsrail, Hollanda, Norveç, Rusya ve Birleşik Krallıkta toryum temelli nükleer araştırma ve geliştirme programları yapmakta ya da sürdürme eğilimindeki ülkelerdir. Bununla birlikte, Avustralya, Brezilya, Kanada, Grönland, Hindistan, Kazakistan, Kenya, Madagaskar, Malavi, Mozambik, Namibya, İsveç, Rusya, Güney Afrika, Tanzanya, Türkiye, ABD ve Vietnam'da üretime ve aramaya yönelik projeler yürütülmektedir.

Dünya toryum ticareti henüz hareketlenmemiş olup 1990'lı yıllarda toryum dioksitin kilosu 60 dolar seviyesinde işlem görürken 2010 yılında da aynı seviyelerde işlem görmüştür. 2013 yılında Hindistan gibi bazı ülkelerin yeni enerji kaynağı araştırmalarına yönelik çalışma başlatmasının etkisiyle 65 dolar seviyesinde işlem görmüş ve halen aynı seviyede seyretmektedir. Toryum bileşiklerinin içeriğine göre kilosu 35 dolar ve 75 dolar aralığında alıcı bulunmaktadır.

Türkiye Toryum Ticareti

Türkiye'de toryum ile ilgili dış ticaret söz konusu değildir. Dünyadaki son gelişmeler ışığında ülkemizde de gelecekte toryum ile ilgili gelişmeler olabileceği düşünülerek dünyada satılabilecek, pazar bulabilecek cevher zenginleştirme ve uç ürün üretmeye yönelik çalışmalara başlanmalıdır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler toryum konusunda çalışmalara başlamış olup önemli yol kat etmişlerdir.

Öneriler

Günümüzde toryum yakıtı ile çalışan ticari ölçekte bir enerji santrali bulunmamaktadır. Deneme amaçlı küçük ölçekli santral çalışmaları Hindistan, Norveç ve ABD'de devam etmektedir. Bunun sonucu olarak da toryumun enerji hammaddesi olarak tüketimi yok denecek düzeydedir. Bu nedenle ülkemizde bulunan toryumun yakıt, çubuk veya cevher olarak satışı bugün için söz konusu değildir. Dünya genelinde de herhangi bir toryum pazarı temelde bu sebepten dolayı oluşmamıştır. En önemli potansiyel kullanım alanı olarak kabul edilen nükleer enerji santrallerindeki

teknolojiler toryum kullanımına uygun hale geldiğinde, toryumun ticari karşılığından bahsedilebilmesinin mümkün olacağı ve fiyatının hızla artacağı öngörülmektedir. Ancak, ülkemizde bilinen ve henüz bilinmeyen toryum yataklarının daha detaylı bir şekilde araştırılması ve yapılacak olan pilot tesisler ile cevher kazanımına yönelik Ar-Ge çalışmalarına devam edilmesi, ülkemizin dünyadaki yerini sağlamlaştırması için önem arz etmektedir.

Bugünkü piyasa şartlarında binde 21 tenörlü toryumu işlemek ekonomik olmaktan çok uzaktır. Bu nedenle, bu cevherin çıkarılması ve saflaştırılması için büyük yatırımlar gerekecektir. Ancak, toryum kıymetli nadir toprak elementleri ile birlikte bulunduğu takdirde günümüzde işletilmesi ekonomik olabilir.

Toryum potansiyel nükleer enerji kaynağı olarak birkaç ülke gibi ülkemizde de yakın bir gelecek için büyük bir umut kaynağı olarak görülmektedir.

Toryumdan nükleer enerji elde edebilmek için toryumun Uranyum - 233'e dönüştürülmesi gerekmektedir. U-233'ün taşınması, saflaştırılması ve güvenli bir şekilde atıklarının depolanması kolay değildir. Riskleri azaltacak teknolojiler geliştirilebilirse toryum gelecekte güvenle kullanılan bir enerji kaynağı olabilecektir.

Ülkemiz açısından yakın bir gelecekte kalıcı bir stratejik değer oluşturabilmek için toryumla ilgili ulusal yol haritasının belirlenmesi, gerekli insan kaynağının yetiştirilmesi ve laboratuvarların kurulması gerekmektedir.

DEĞİNİLEN BELGELER

- <http://www.worldstopexports.com> 2017 yılında yayınlanan verileri
- <http://www.uraniumenergy.com/> 2017 yılında yayınlanan verileri
- <http://www.uraniumresources.com> 2017 yılında yayınlanan verileri
- <http://www.world-nuclear.org> 2017 yılında yayınlanan verileri
- <https://www.eia.gov/uranium/marketing> 2017 yılında yayınlanan verileri
- <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>
- data.un.org 2017 yılında yayınlanan verileri
- Üçgül, E., Çetin, K. 2014. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, Sayı: 17, Ankara.