

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRAL KÜLLERİNDE  
RADYOAKTİF DENGİNİN ARAŞTIRILMASI VE  
RADYOLOJİK AÇIDAN İNCELENMESİ**

**Ebru (BUKOVA) YÜKSEK**

**Nükleer Bilimler Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu: 622.01.01**

**Sunuş Tarihi: 24.08.2006**

**Tez Danışmanı: Doç.Dr. Günseli YAPRAK**

**Bornova-İZMİR**



Sayın **Ebru (BUKOVA) YÜKSEK** tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak sunulan “**Kömür Yakıtlı Termik Santral Küllerinde Radyoaktif Dengenin Araştırılması ve Radyolojik Açıdan İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’ nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 24.08.2006 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

Jüri Başkanı :

.....

Raportör Üye:

.....

Üye :

.....



## ÖZET

### KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRAL KÜLLERİNDE RADYOAKTİF DENGİNİN ARAŞTIRILMASI VE RADYOLOJİK AÇIDAN İNCELENMESİ

**YÜKSEK (BUKOVA) , Ebru**  
**Yüksek Lisans Tezi, Fizik Bölümü**  
**Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Günseli YAPRAK**  
**Ağustos 2006, 42 sayfa**

Türkiye'nin ve dünyanın enerji gereksiniminin karşılanmasında fosil bir yakıt olan kömür önemli bir yer tutmaktadır. Kömür, doğada bulunan bir çok materyaller gibi iz miktarda  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  içermektedir Kömürün yanması sırasında, bu radyonüklitler kömürden-küle farklı oranlarda zenginleşmektedir. Uranyum gibi radyoaktif bir seri içinde çeşitli radyonüklitlerin farklı oranda zenginleşmesi, küle radyoaktif dengesizliğe yol açmaktadır.

Kömüre dayalı termik santraller, teknolojik olarak zenginleşmiş doğal radyoaktivitenin en önemli kaynağı olarak işaret edildiğinden, termik santralleri besleyen kömürlerin ve oluşan küllerin radyolojik karakteristiklerinin incelenmesi oldukça önemlidir.

Bu doğrultuda sunulan çalışmada, Batı Anadolu' da yer alan “Soma, Yatağan, Yeniköy, Kemerköy, Orhaneli, Tunçbilek, Seyitömer ve Çan” termik santrallerini besleyen kömürlerde ve açığa çıkan küllerde radyoaktivite içeriği, radyonüklit zenginleşme faktörü ve radyoaktif dengeyi de kapsayan radyolojik karakteristiklerin incelenmesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** *kömür yakıtlı termik santral, Batı Anadolu, zenginleşme faktörü, radyoaktif denge, doğal radyoaktivite*



**ABSTRACT****RADIOLOGICAL CHARACTERISTICS AND INVESTIGATION OF  
THE RADIOACTIVE EQUILIBRIUM IN THE ASHES PRODUCED IN  
COAL-FIRED POWER PLANTS****YÜKSEK (BUKOVA) , Ebru****MSc in Physics****Supervisors: Assoc. Prof. Dr. Günseli YAPRAK****August 2006, 42 pages**

Fossil fuels such as coal play an important role in electric power generation worldwide as well as Turkey. In many cases, coal present high concentrations of naturally occurring radionuclides, such as  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ . During the combustion process, the produced ashes are enriched in the above radionuclides. The different enrichment of the various radionuclides within radioactive series, such as that of  $^{238}\text{U}$ , results in the disturbance of radioactive equilibrium. Since the coal fired power plant is a significant source of technologically enhanced exposure to naturally occurring radionuclides, it is very important to study in detail the radiological characteristics such as natural radioactivity, radionuclide enrichment factor and radioactive equilibrium of the feed coal as well as its combustion residues such as fly ash and bottom ash.

The aim of the study is to determine the radiological characteristics of the coal and ashes obtained from the power plants, namely “Soma, Yatağan, Yeniköy, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Tunçbilek, and Çan”, located in West Anatolia.

**Key Words:** *coal-fired power plant, West Anatolia, natural radioactivity, enrichment factor, radioactive equilibrium.*





## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmalarım süresince her türlü olanağı sağlayarak, bu çalışmanın gerçekleşmesinde önemli katkıları olan ve değerli bilgi ve görüşlerini benimle paylaşan hocam Sayın Doç.Dr. Günseli YAPRAK' a teşekkürlerimi sunarım.

Enstitü Laboratuvarlarında her türlü çalışma olanağını sağlayan Nükleer Bilimler Enstitüsü Müdürü Sayın Prof.Dr. Meral ERAL' a, Nükleer Bilimler Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Güngör YENER' e ve tüm Enstitü Çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında, bilgi, yardım ve desteğini esirgemeyen Sayın Araş. Gör. Dr. Filiz GÜR' e, moral ve destek veren Sayın Fizik Öğretmeni Özden YAŞAR' a ve Araş.Gör.Ercan TURAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Bilgilerini ve zamanlarını esirgemeyen ÇNAEM, Fizik Bölümü Başkanı Sayın Doç. Dr. İskender REYHANCAN' a teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında yanımda olup, sabırla beni yüreklendiren değerli eşim Reha YÜKSEK' e içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin en başından sonuna kadar bilgi, deneyim ve yardımlarını gördüğüm sevgili kız kardeşim Dr. Esra BUKOVA GÜZEL' e ve SEVGİLİ AİLEM' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

X

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                       | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>ÖZET .....</b>                                                                                                     | <b>V</b>     |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                                 | <b>VII</b>   |
| <b>TEŞEKKÜR .....</b>                                                                                                 | <b>IX</b>    |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>                                                                                           | <b>XIII</b>  |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>                                                                                         | <b>XIV</b>   |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                                                                  | <b>1</b>     |
| <b>2. GENEL BİLGİLER .....</b>                                                                                        | <b>3</b>     |
| 2.1 Kömür Yakıtlı Termik Santraller.....                                                                              | 4            |
| 2.2 Kömürdeki Radyoaktivite.....                                                                                      | 6            |
| 2.3 Radyonüklit Zenginleşme Faktörü.....                                                                              | 7            |
| 2.4 Radyoaktif Denge .....                                                                                            | 9            |
| 2.5 Kömür-Yakıt Çevirimi Boyunca Oluşan Radyolojik Risk.....                                                          | 13           |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>                                                                                    | <b>17</b>    |
| 3.1 Çalışılan Termik Santrallerin Genel Özellikleri .....                                                             | 17           |
| 3.2 Kömür ve Kül Örneklerinde $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , ve $^{40}\text{K}$<br>Radyonüklit Analizi ..... | 19           |
| 3.3 Kömür ve Kül Örneklerinde $^{210}\text{Pb}$ ve $^{234}\text{Th}$ Radyonüklit<br>Analizi .....                     | 20           |
| 3.4 Radyoaktif Dengenin Saptanması.....                                                                               | 21           |
| 3.5 Kömür ve Kül Örneklerinde Uranyum Analizi .....                                                                   | 22           |

## İÇİNDEKİLER (devam)

|                                                                                                                                                                      | <u>Sayfa</u>  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                                                                                                                        | <b>23</b>     |
| 4.1    Kömür ve Kül Örneklerinde $^{238}\text{U}$ $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{232}\text{Th}$ , ve<br>$^{40}\text{K}$ Aktivite Konsantrasyonları ..... | 23            |
| 4.2    Radyonüklit Zenginleşme Faktörleri.....                                                                                                                       | 26            |
| 4.3    Radyoaktif Dengenin İncelenmesi.....                                                                                                                          | 28            |
| 4.4    Radyolojik Risk Tayini.....                                                                                                                                   | 31            |
| <br><b>5. SONUÇLAR .....</b>                                                                                                                                         | <br><b>33</b> |
| <br><b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>                                                                                                                                    | <br><b>36</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                                                                                 | <b>42</b>     |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u>                                                                                           |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 2.1    | Toplam termik kapasitesi içinde fosil yakıtların dağılımı.....4                                        |
| Şekil 2.2    | Mevcut ve yapımı planlanan kömür yakıtlı termik santraller 5                                           |
| Şekil 2.3    | Ana ile ürün arasında radyoaktif dengenin kurulması<br>için gereken yarı-ömür sayısı ( $\tau$ ).....10 |
| Şekil 2.4    | Radyoaktif denge durumuna göre $^{238}\text{U}$ serisinin<br>gruplandırılması. ....12                  |
| Şekil 3.1    | U-238'in < 200 keV düşük enerji gama spektrumu .....22                                                 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Çizelge</u>                                                                                                                                                                   | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Çizelge 2.1</b> Uçucu Külde Parçacık Boyutuna Göre Zenginleşme Faktörleri (EF) .....                                                                                          | 8            |
| <b>Çizelge 2.2</b> Çeşitli Tip Kömür Santrallerinde Birim Elektrik Enerjisi Başına [GWyıl] Atmosfere Bırakılan Ortalama Doğal Radyonüklit Aktivite [MBq] Konsantrasyonları ..... | 14           |
| <b>Çizelge 2.3</b> Kömür Yakıt Çevrimi Boyunca Tahmin Edilen Yıllık Kollektif Etkin Doz Eşdeğeri .....                                                                           | 16           |
| <b>Çizelge 3.1</b> Batı Anadolu Termik Santrallerin Üretim ve Yakıt Özellikleri .....                                                                                            | 18           |
| <b>Çizelge 3.2</b> U-238'in Bozunumunda Yayınlanan Foton Enerjileri (<200 keV) ve İntensiteleri.....                                                                             | 21           |
| <b>Çizelge 4.1</b> Kömür ve Kül Örneklerinde $^{238}\text{U}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{232}\text{Th}$ , ve $^{40}\text{K}$ Aktivite Konsantrasyonları.....   | 24           |
| <b>Çizelge 4.2</b> Radyonüklit zenginleşme faktörleri.....                                                                                                                       | 27           |
| <b>Çizelge 4.3</b> Kömür ve Kül Örneklerinde U-Ra Dengesi .....                                                                                                                  | 29           |
| <b>Çizelge 4.4</b> Kömür ve Kül Örneklerinde Pb-Ra, Pb-U Dengesi .....                                                                                                           | 30           |
| <b>Çizelge 4.5</b> Kömür Depolama ve Kül Atık Alanlarında Maruz Kalınan Karasal Gama Doz Hızları.....                                                                            | 32           |



## 1. GİRİŞ

Türkiye'nin 2003 yılı sonunda toplam kurulu elektrik gücü kapasitesi, 35 587 MW ve net elektrik üretimi 135 425.1 GWh'dır (Türkiye İstatistik Yıllığı, 2004). Bu elektrik üretiminin yarıdan fazlası fosil yakıtlı 32 termik santralden sağlanmaktadır. Toplam kurulu gücü 20 433.8 MW olan termik kapasitesi içinde kömürün payı % 47, doğal gazın % 49, mazot ve fuel-oil'in % 4'dür.

Güvenilir ve ucuz bir yakıt olan kömür, 1950 yılından bu yana ülkemizde enerji açığının kapatılmasında yaygın şekilde kullanılmaktadır. 2004'de Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin (149 882GWh), yaklaşık  $\frac{1}{4}$ 'i (%23) kömürden sağlanmıştır. Bu miktarın  $\frac{3}{5}$ 'inden fazlasını linyit, kalanını taş kömürü oluşturmaktadır. Mevcut enerji kaynakları arasında linyit, Türkiye'deki rezerv bolluğu yanında düşük maliyetle elektrik enerjisi elde edilen en önemli yakıttır. Dünyadaki toplam linyit rezervlerinin % 0.85'ine (dünya sıralamasında yedinci) sahip olan Türkiye'nin görünen linyit rezervi 8.3 milyar ton, olası rezervi ise 30 milyar ton olarak tahmin edilmektedir. En büyük rezerv 3.4 milyar ton (% 40) ile Afşin- Elbistan'da, Ege Bölgesi ve Kuzey Batı Anadolu'da bulunmaktadır.

Gelişen Türkiye'nin enerji ihtiyacının ve enerji devamlılığının sağlanmasında ulusal kaynak olan linyit yakıtlı termik santraller, enerji politikaları arasında her zaman önemini korumuştur. Türkiye Elektrik Üretim Anonim Şirketine (EÜAŞ) bağlı toplam 15 kömür yakıtlı termik santral bulunmaktadır. Bu termik santrallerden Çatalağzı ve Sugözü taş kömürü yakıtlı iken, Çan, Orhaneli, Seyitömer, Tunçbilek, Çayırhan, Kangal, Soma A-B, Afşin-Elbistan A-B, Yatağan, Yeniköy, Kemerköy termik santralleri linyit yakıtlıdır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı



tarafından 2010 yılına kadar 4940 MW gücünde 8 linyit yakıtlı termik santral kurulması planlanmaktadır.

Sanayileşmek ve gelişmek isteyen Türkiye'nin enerji gereksinimi ve buna paralel olarak toplam elektrik üretimi içerisinde kömüre dayalı termik santrallerin payı inkar edilemez. Ancak, termik santrallerde kömürün yanması sonucu, küresel ısınmaya ve asit yağmurlarına neden olan karbon oksitler (CO ve CO<sub>2</sub>), sülfür oksitler (genel olarak SO<sub>x</sub> olarak tanımlanan SO, SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub>) ve azot oksitler (genel olarak NO<sub>x</sub> olarak tanımlanan NO ve NO<sub>2</sub>), gibi gazlar yanında, katı kirleticiler (kül) de açığa çıkmaktadır.

Enerji ve çevre, sağlıklı yaşam koşullarının korunmasında birbiri ile ilişkili iki temel unsurdur. Bu anlamda termik santrallerin gaz emisyonlarını (SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub>) kontrol altına alabilen teknikler (Furimsky, 2000; Müezzinoğlu, 2000) ve düzenlenmeler mevcuttur. Bununla birlikte, termik santrallerde sistemden uzaklaştırılamayan ve çevrede kalan katı atıklar (dip külü ve uçucu kül), içerdikleri radyonüklitler, ağır metaller ve toksik iz elementler nedeni ile tesis çevresinde radyolojik ve ekolojik problemlere neden olmaktadır.

Geleceğe yönelik enerji üretim planlarının yapılmasında, çevresel faktörlerin mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Bu doğrultuda sunulan çalışmada, Batı Anadolu'da yer alan "**Yeniköy, Kemerköy, Yatağan, Soma, Çan, Seyitömer, Tunçbilek ve Orhaneli**" termik santralleri katı atıkları olan küllerde, radyoaktivite içeriği, radyonüklit zenginleşme faktörü ve radyoaktif dengeyi de kapsayan radyolojik karakteristiklerin ortaya konulması amaçlanmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

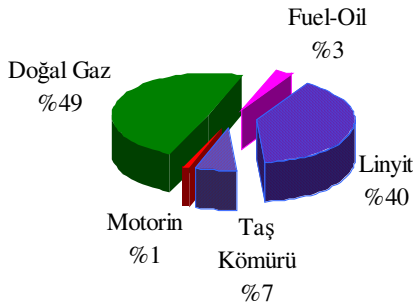
Güvenilir ve ucuz bir yakıt olan kömür, 1950 yılından bu yana ülkemizde enerji açığının kapatılmasında yaygın şekilde kullanılmaktadır. 2004 yılında Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin (149 882GWh), yaklaşık  $\frac{1}{4}$ 'i (%23) kömürden sağlanmıştır. Bu miktarın  $\frac{3}{5}$ 'inden fazlasını linyit, kalanını taş kömürü oluşturmaktadır. Ancak, termik santrallerde kömürün yanması sonucu, küresel ısınmaya ve asit yağmurlarına neden olan karbon oksitler (CO ve CO<sub>2</sub>), sülfür oksitler (genel olarak SO<sub>x</sub> olarak tanımlanan SO, SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub>) ve azot oksitler (genel olarak NO<sub>x</sub> olarak tanımlanan NO ve NO<sub>2</sub>), gibi gazlar yanında, katı kirleticiler (kül) de açığa çıkmaktadır.

Enerji ve çevre, sağlıklı yaşam koşullarının korunmasında birbiri ile ilişkili iki temel unsurdur. Bu anlamda termik santrallerin gaz emisyonlarını (SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub>) kontrol altına alabilen teknikler (Furimsky, 2000; Müezzinoğlu, 2000) ve düzenlenmeler mevcuttur. Bununla birlikte, termik santrallerde sistemden uzaklaştırılamayan ve çevrede kalan katı atıklar (dip külü ve uçucu kül), içerdikleri radyonüklitler, ağır metaller ve toksik iz elementler nedeni ile tesis çevresinde radyolojik ve ekolojik problemlere neden olmaktadır.

Geleceğe yönelik enerji üretim planlarının yapılmasında, çevresel faktörlerin mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Bu doğrultuda sunulan çalışmada, Batı Anadolu'da yer alan "**Yeniköy, Kemerköy, Yatağan, Soma, Çan, Seyitömer, Tunçbilek ve Orhaneli**" termik santralleri katı atıkları olan küllerde, radyoaktivite içeriği, radyonüklit zenginleşme faktörü ve radyoaktif dengeyi de kapsayan radyolojik karakteristiklerin ortaya konulması amaçlanmıştır.

## 2.1 Kömür Yakıtlı Termik Santraller

Türkiye'nin 2003 yılı sonunda toplam kurulu elektrik gücü kapasitesi, 35 587 MW ve net elektrik üretimi 135 425.1 GWh'dır (Türkiye İstatistik Yıllığı, 2004). Bu elektrik üretiminin yarıdan fazlası fosil yakıtlı 32 termik santralden sağlanmaktadır. Toplam kurulu gücü 20 433.8 MW olan termik kapasitesi içinde kömürün payı % 47, doğal gazın % 49, mazot ve fuel-oil'in % 4'dür (Şekil 2.1).

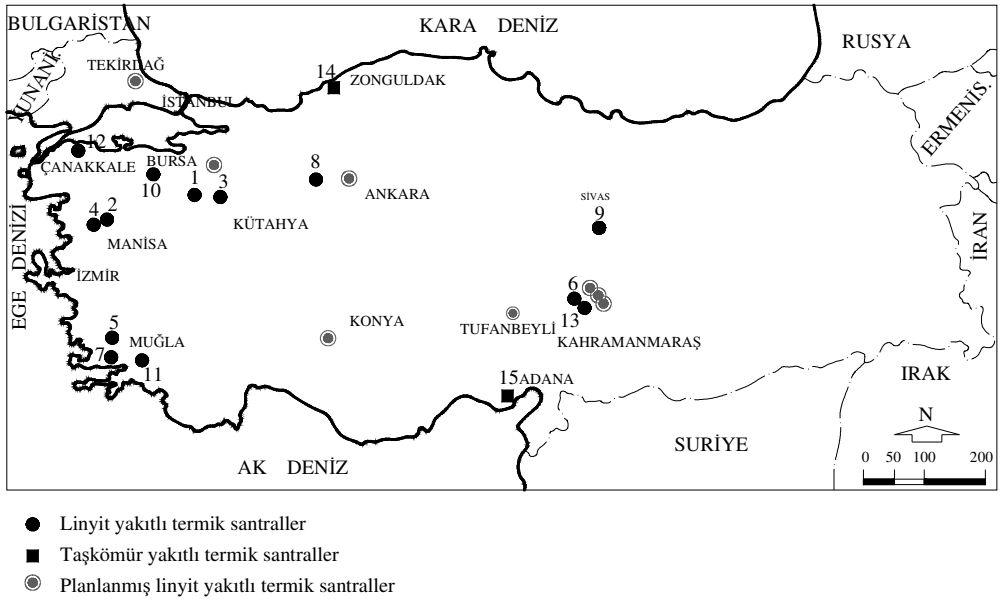


Şekil 2.1 Toplam Termik Kapasitesi İçinde Fosil Yakıtların Dağılımı (EÜAŞ, 2004)

Türkiye Elektrik Üretim Anonim Şirketi'ne (EÜAŞ) bağlı toplam 15 kömür yakıtlı termik santral bulunmaktadır. Bu termik santrallerden Çatalağzı ve Sugözü taş kömürü yakıtlı iken, Çan, Orhaneli, Seyitömer, Tunçbilek, Çayırhan, Kangal, Soma A-B, Afşin-Elbistan A-B, Yatağan, Yeniköy, Kemerköy termik santralleri linyit yakıtlıdır. Mevcut enerji kaynakları arasında linyit, Türkiye'deki rezerv bolluğu yanında düşük maliyette elektrik enerjisi elde edilen en önemli yakıttır. Dünyadaki toplam linyit rezervlerinin % 0.85'ine (dünya sıralamasında yedinci) sahip olan Türkiye'nin görünen linyit rezervi 8.3 milyar ton, olası rezervi ise 30 milyar ton olarak tahmin edilmektedir. Bu doğrultuda, sanayileşmek ve gelişmek isteyen Türkiye'nin enerji ihtiyacının ve enerji devamlılığının

sağlanmasında ulusal kaynak olan linyit yakıtlı termik santraller, enerji politikaları arasında her zaman önemini korumuştur.

Türkiye’de mevcut kömür yakıtlı termik santraller ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2010 yılına kadar kurulması planlanan 4940 MW gücünde 8 linyit yakıtlı termik santral Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Mevcut ve Yapımı Planlanan Kömür Yakıtlı Termik Santraller

Batı Anadolu’da yer alan (Şekil 2.2) linyit yakıtlı termik santrallerin “Yeniköy, Kemerköy, Yatağan, Soma, Çan, Seyitömer, Tunçbilek ve Orhaneli” bir çoğu turizm merkezlerinin, ormanlık alanların ve yasal olarak korunmuş bölgelerin oldukça yakınına kurulmuştur. Bu anlamda, söz konusu tesislerin katı atıkları olan küllerin radyolojik karakteristiklerinin incelenmesi çevre kalitesi ve insan sağlığı açısından oldukça önemlidir.

## 2.2 Kömürdeki Radyoaktivite

Kömür, doğada bulunan bir çok materyaller gibi iz miktarda  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve bozunum ürünleri ile birlikte  $^{40}\text{K}$  içermektedir (Tadmor, 1986). Kömürdeki ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve bozunum ürünleri için  $20 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $^{40}\text{K}$  için  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$  olarak verilmektedir (UNSCEAR, 1982; 1988).

Genelde kömürdeki doğal radyonüklit aktivite içeriği, yer kabuğundaki ortalama konsantrasyonlardan daha küçüktür. Bununla birlikte, linyit gibi düşük kaliteli kömürlerin (özellikle genç linyitlerin), uranyum içeriğinin yüksek olduğu gözlenmiştir (UNSCEAR, 1982; Papastefanou and Charalambous, 1979; Öztürk ve Özdoğan, 2000; Varinlioğlu ve arkadaşları, 1998; Yener ve Uysal, 1998; Aycik ve Ercan, 1995).

Yılda 1GW elektrik enerjisi üretmek için yaklaşık  $3 \times 10^9 \text{ kg}$  kömür yakılması gerekmektedir. Termik santrallerde, toz haline getirilen kömür,  $1500\text{-}1800^\circ\text{C}$ ' de yakılmaktadır (UNSCEAR, 1982; 1988).

Yanma işleminde kömürde bulunan birçok mineral eriyerek kül içinde camlaşmakta ve bu ağır külün bir kısmı tamamen yanmayan organik madde ile birlikte dip külü veya curuf olarak fırının dibine düşmektedir. Ancak hafif olan uçucu kül, sıcak gazlarla ve herhangi bir uçucu mineral bileşiği ile birlikte bacadan çıkarak atmosfere yayılmaktadır. Bacadan çıkan uçucu külün miktarı elektrostatik filtrelerin tutucu verimine (% 90–99,5) bağlı olarak değişmektedir. Kömürde gazlar ve uçucu mineraller hariç yanmayan mineral maddenin içerdiği radyonüklit miktarı dip külü (%20) ve uçucu kül (%80) arasında paylaşılmaktadır. Kömürün yanmasında, organik bileşenlerin eliminasyonu esas olduğundan kömürden küle aktivite konsantrasyonları bir kat veya daha fazla zenginleşmektedir (Yaprak, 1998).

Kısaca, bir termik santralde açığa çıkan dip külü ve uçucu külde, doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları yerkabuğunda bulunan konsantrasyonlarından çok daha yüksek olmaktadır. Uçucu külde rapor edilen (UNSCEAR, 1982) ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları  $^{40}\text{K}$  için  $265 \text{ Bq kg}^{-1}$ ;  $^{238}\text{U}$  için  $200 \text{ Bq kg}^{-1}$ ;  $^{226}\text{Ra}$  için  $240 \text{ Bq kg}^{-1}$ ;  $^{210}\text{Pb}$  için  $930 \text{ Bq kg}^{-1}$ ;  $^{210}\text{Po}$  için  $1700 \text{ Bq kg}^{-1}$ ;  $^{232}\text{Th}$  için  $70 \text{ Bq kg}^{-1}$ ;  $^{228}\text{Th}$  için  $110 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $^{228}\text{Ra}$  için  $130 \text{ Bq kg}^{-1}$ 'dir. Bu doğrultuda, kömüre dayalı termik santraller, teknolojik olarak zenginleşmiş doğal radyoaktivitenin en önemli kaynağı olarak işaret edilmektedir.

### 2.3 Radyonüklit Zenginleşme Faktörü

Radyonüklitlerin kömürden-küle zenginleşme oranları, zenginleşme faktörü ( $EF$ ) ile karakterize edilmekte ve aşağıdaki eşitlikle verilmektedir.

$$EF = \frac{(X)_{\text{örnek}} / (^{40}\text{K})_{\text{örnek}}}{(X)_{\text{kömür}} / (^{40}\text{K})_{\text{kömür}}}$$

K-40 aktivitesi hemen hemen bütün kül tiplerinde sabit kaldığından zenginleşme faktörünü tayin etmek için  $^{40}\text{K}$  referans radyonüklit olarak kullanılmaktadır.

Kömürden küle radyonüklit zenginleşme oranına bakıldığında en çok zenginleşmenin  $^{210}\text{Po}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  konsantrasyonlarında ve bunları takiben  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  olduğu görülmektedir.

Çeşitli tip termik santrallerden alınan küllerde doğal radyonüklit zenginleşmesinin partikül boyutu ile çok fazla değiştiği bulunmuştur (Coles et al., 1978). Yüksek zenginleşme oranları  $2.4\mu\text{m}$  çapındaki partiküllerde gözlenmiştir ve  $EF$  değerleri  $^{226}\text{Ra}$  için 1.9,  $^{238}\text{U}$  için 2.8 ve  $^{210}\text{Pb}$  için 5.0 olarak saptanmıştır.

Genel bir kural olarak zenginleşme faktörü kömürün yanma sıcaklığı ile artmakta ve partikül boyutu (1  $\mu\text{m}$ 'den daha büyük olduğunda) ile azalmaktadır. Uçucu külde parçacık boyutuna göre rapor edilen zenginleşme faktörlerinin (UNSCEAR, 1982),  $^{238}\text{U}$  için 1-3,  $^{226}\text{Ra}$  için 1-2,  $^{210}\text{Pb}$  için 1-5,  $^{232}\text{Th}$  için 1.0-1.2 arasında değiştiği görülmektedir ( Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 Uçucu Külde Parçacık Boyutuna Göre Zenginleşme Faktörleri (EF) (UNSCEAR,1982)

| Partikül<br>boyutu<br>( $\mu\text{m}$ ) | EF (Zenginleşme Faktörü) |                   |                   |                   |
|-----------------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                         | $^{238}\text{U}$         | $^{226}\text{Ra}$ | $^{228}\text{Th}$ | $^{210}\text{Pb}$ |
| 0-2.5                                   | 2.8                      | 1.9               | 1.2               | 4.9               |
| 2.5-5                                   | 2.2                      | 1.6               | 1.1               | 4.1               |
| 5-10                                    | 1.6                      | 1.4               | 1.1               | 2.9               |
| >10                                     | 1.3                      | 1.0               | 1.0               | 1.5               |

Kömürün yanması sırasında,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{232}\text{Th}$  izotopları alüminyum silikat mineralleri ile birlikte erir ve dip külü olarak çökerken, uranyum izotopları kömürdeki kimyasal veya mineralojik formlarına göre davranmaktadır. Uranyum kömür içinde coffinite olarak mineralize olmuşsa dip külünde kalır, ancak uraninite olarak dağılmışsa  $\text{UO}_3$  formunda uçucu olabilir ve uçucu kül partikülleri üzerine yoğunlaşarak birlikte hareket eder. Uranyumun bozunum ürünü olan radyum da benzer şekilde davranmaktadır.

Ancak,  $^{232}\text{Th}$ 'in bozunum ürünü olan  $^{228}\text{Ra}$  uçucu kül partiküllerinin matrisi içinde kalmaktadır (UNSCEAR, 1982). Uçucu külde  $^{226}\text{Ra}$  zenginleşmesinin  $^{228}\text{Ra}$ 'den daha yüksek olması her iki izotopun, ana elementlerinin kömür matrisi içinde farklı formda bulunmalarından kaynaklanmaktadır. Po-210 ve  $^{210}\text{Pb}$  radyonüklitleri ise oldukça uçucudur ve

yanma sırasında buharlaşarak, büyük yüzey hacim oranına sahip ince uçucu kül partikülleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Özetle, kömürden-küle doğal radyonüklit zenginleşme faktörü, kömürün mineorolojik yapısına, yakma tipine ve yanma sıcaklığına ve partikül boyutuna bağlı olarak değişmektedir.

Radyolojik açıdan, uçucu kül partikülleri üzerine yoğunlaşarak birlikte hareket eden  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{210}\text{Po}$ 'un yanı sıra dip külünde kalan  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve bozunum ürünleri oldukça önemlidir. Kömürün yanması sırasında, farklı fizikokimyasal özelliklere sahip olan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{210}\text{Po}$  farklı davranış sergilemekte ve kömürden-küle farklı oranlarda zenginleşerek, kömürün aksine külde radyoaktif dengesizliğe yol açmaktadır. Uranyum serisinin yanı sıra, toryum serisinde de ürünler lehine gelişen bu radyoaktif dengesizlik, dip külü ve uçucu külün farklı radyolojik karakteristikler göstermesine neden olmaktadır.

## 2.4 Radyoaktif Denge

Bir bozunum zincirinde ana çekirdek ömrünün, ürüne göre ( $\tau_1 \gg \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$  veya  $\lambda_1 \ll \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ ) çok uzun olması durumunda, belli bir süre sonunda bir ürünün radyoaktif parçalanma ile kayıp hızı oluşum hızına eşit olmaktadır. Aşağıdaki eşitlikle verilen bu durum, radyoaktif bozunum serileri için daimi denge koşuludur.

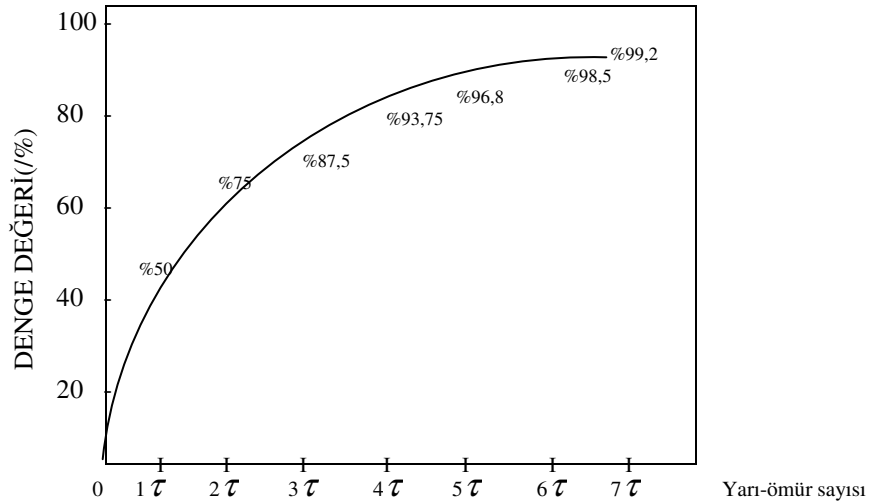
$$\lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2 = \lambda_3 \cdot N_3 = \dots = \lambda_n \cdot N_n$$

Ana atomun veya ürünlerin bir veya birden fazlasının radyoaktif parçalanma dışında herhangi bir yolla kaybedilmesi durumunda yukarıdaki eşitlik geçersiz olur ve radyoaktif dengesizlik oluşur. Eğer bir nüklit kısa yarı ömrü ile ortamdan uzaklaşırsa denge hızla yenilenebilir, fakat uzun yarı ömürlü bir nüklit ortamdan kalkarsa, bozunum zincirinde bütün üyeler arasında dengenin tamamlanıp yenilenmesi, ürünlerin yarı ömürlerine bağlı olarak milyonlarca yıla kadar varan çok uzun süreler alabilmektedir.



Bir radyoaktif seride, denge bozulmuş ise dengenin yeniden sağlanması için gereken süre, o serinin en uzun yarı ömürlü ürününün yarı ömrüne bağlıdır. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi bu süre yaklaşık 6-7 yarı ömür kadardır (Killeen, 1979).

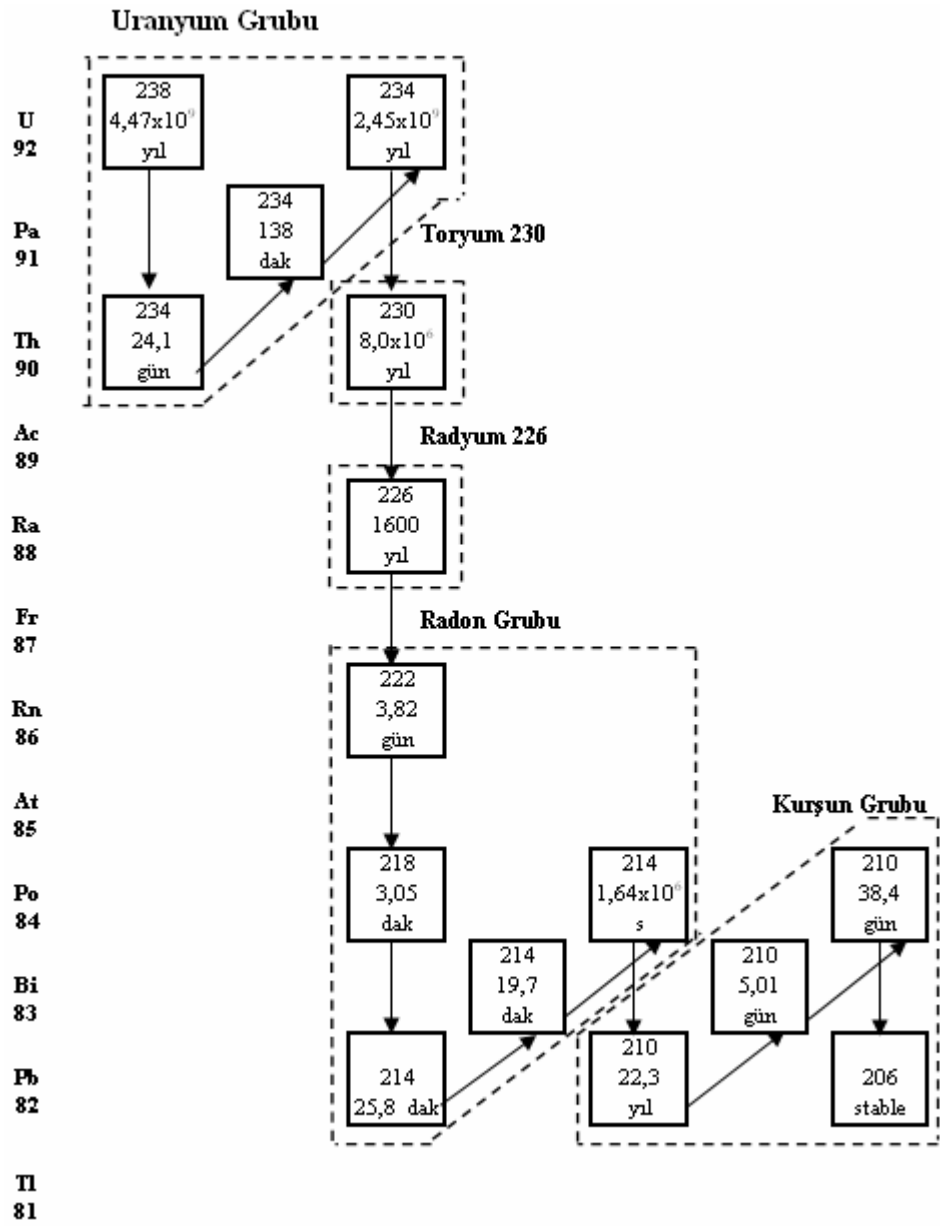
Uranyumun, bozunum zincirindeki üyeleri ile arasındaki denge, serideki iki uzun yarı ömürlü nüklit  $^{234}\text{U}$  ( $t_{1/2}=250000$  yıl) ve  $^{230}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=80000$  yıl) nedeniyle  $10^6$  yıldan daha fazla zaman alırken,  $^{232}\text{Th}$  ile bozunum ürünleri arasındaki radyometrik denge yaklaşık 40-50 yılda kurulur. Bunun nedeni toryum serisindeki ürünlerin  $^{238}\text{U}$  serisindeki ürünlere göre çok daha kısa yarı ömürlü olmalarıdır (Molinary and Snodgrass, 1990). Toryum serisinde en uzun yarı ömürlü ürün ( $t_{1/2}=6.7$  yıl) ile  $^{228}\text{Ra}$ ’dır. Bu yüzden çoğu jeolojik örnekte toryum serisinin dengede olduğu varsayılır. Herhangi bir metamorfik olay ile seri dağılmış olsa bile bu geçici dengesizlikle sonuçlanır ve seri jeolojik olarak hemen denge durumuna döner (Killeen and Carmichael, 1976, Yaprak, 1995).



Şekil 2.3 Ana ile Ürün Arasında Radyoaktif Dengenin Kurulması İçin Gereken Yarı-Ömür Sayısı ( $\tau$ )

Th-232'nin aksine  $^{238}\text{U}$  serisinde radyometrik dengesizliğin çok yaygın olduğu bilinmektedir. Uranyum bozunum ürünlerinin jeolojik olarak bile uzun sayılan yarı ömürleri ile aynı ortamdaki farklı fiziksel ve kimyasal davranışları bu dengesizliğin en önemli nedenidir. Bu yüzden radyoaktif bozunum dışında ürünlerden birinin veya birkaçının kaybedilmesi ile sonuçlanan dağınıklıkta denge kolay tamir edilemez ve radyometrik dengesizlik oluşur.

Uranyum bozunum zinciri denge yönünden 5 ayrı grupta incelenebilir (Şekil 2.4). Her bir gruptaki ürünler kendi gruplarının ana çekirdeği ile dengede kalmak eğilimindeyken, her bir grubun başındaki radyonüklit serinin ana izotopu ile dengede olmayabilir.



Şekil 2.4 Radyoaktif Denge Durumuna Göre  $^{238}\text{U}$  Serisinin Gruplandırılması (Killeen, 1979).

Uranyum bozunum zincirinde, uranyum grubunun ilk üç üyesi arasında ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{Th}$ — $^{234\text{m}}\text{Pa}$ ) radyoaktif denge bir yıldan az sürede kurulur. U-234 ile  $^{238}\text{U}$  aynı kimyasal özelliklere sahip olduğundan, genelde doğada uranyum grubunun ilk dört üyesi arasında radyoaktif dengenin sürdüğü varsayılır.

Uranyum bozunum zincirinde ilk kırılma  $^{230}\text{Th}$ 'dan kaynaklanır. U-Th kimyasındaki farklılık ve  $^{230}\text{Th}$ 'un uzun yarı ömrü ( $t_{1/2}=80000$  yıl) bu dengesizliğin en büyük nedenidir.

Bozunum zincirindeki ikinci önemli kırılmayı ise 1600 yıl yarı-ömürlü ve toprak alkalilere benzer kimyası ile  $^{226}\text{Ra}$  ve bozunum ürünü  $^{222}\text{Rn}$  oluşturur. Rn-222, 3.82 gün yarı ömürlü asal bir gazdır ve gözenekli ortamda 1.6 m olan difüzyon uzunluğu ile sistemden kaçma olasılığı çok fazladır (Yaprak, 1995).

Son grubun ilk üyesi olan  $^{210}\text{Pb}$ 'a 22 yıl yarı ömrü ve önünde yer alan  $^{222}\text{Rn}$  hareketliliği jeokimyasal bağımsızlık kazandırmaktadır.

## 2.5 Kömür-Yakıt Çevirimi Boyunca Oluşan Radyolojik Risk

Teknolojik olarak zenginleşmiş doğal radyoaktivite kavramı yetmişli yılların ortalarında hayatımıza girmiştir ve bu kavram; teknolojik aktivite olmaksızın var olmayacak olan doğal radyasyon kaynaklarına maruz kalma olarak tanımlanmaktadır (UNSCEAR, 1982).

Kömür yakıtlı elektrik santrallerinde kömürün yanması sonucu, radyoaktivite doğrudan doğruya baca gazı ve uçucu kül ile atmosfere yayılmakta ve radyoaktivitenin geri kalan önemli bir kesri, dip külü veya cürufta tutulmaktadır. Kömür yakıtlı termik santrallerde oluşan uçucu külün yaklaşık % 0.5-2'si (elektrostatik filtrelerin tutucu verimine bağlı olarak) atmosfere kaçmakta ve tesis çevresinde radyolojik risk oluşturmaktadır.

Bir güç santralinde, birim elektrik üretimi başına atmosfere bırakılan doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları;

- \* Kömürdeki doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonuna
- \* Kömürün kül oranına
- \* Yanma sıcaklığına
- \* Uçucu kül ve dip külü paylaşım oranına
- \* Filtre sisteminin verimine

bağlı olarak değişmektedir (Gür,2006). Bundan dolayı farklı santrallerde birim enerji başına açığa çıkan doğal radyonüklit aktiviteleri arasında fark beklenmelidir. Çizelge 2.2’de dünyadaki çeşitli ülkelerde eski ve modern tip kömür santrallerinde yılda 1GW enerji üretimi başına açığa çıkan ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları verilmiştir.

Çizelge 2.2 Çeşitli Tip Kömür Santrallerinde Birim Elektrik Enerjisi Başına [GWyıl] Atmosfere Bırakılan Ortalama Doğal Radyonüklit Aktivite [MBq] Konsantrasyonları (UNSCEAR, 1988)

| Toz Tutucu Verimi (%)     | $^{40}\text{K}$ | $^{238}\text{U}$ | $^{238}\text{U}$<br>$^{226}\text{Ra}$ | Serisi<br>$^{210}\text{Pb}$ | $^{210}\text{Po}$ | $^{232}\text{Th}$<br>$^{232}\text{Th}$ | Serisi<br>$^{228}\text{Th}$ |
|---------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| (UNSCEAR-82) 97.5         | 4000            | 1500             | 1500                                  | 5000                        | 5000              | 1500                                   | 1500                        |
| Modern Tip 99.5           | 600             | 250              | 250                                   | 750                         | 750               | 250                                    | 250                         |
| Eski Tip 90 ( UNSCEAR-88) | 12000           | 5000             | 5000                                  | 15000                       | 15000             | 5000                                   | 5000                        |

\*1 GWyıl elektrik enerjisi üretmek için  $3 \times 10^6$  ton kömür gerektiği varsayımı yapılmıştır.

Çizelge 2.2’de verilen radyonüklitlerin dışında, GWe/yıl başına serbest bırakılan  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$  aktivitesi ( $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  ile dengede olduğu varsayımı ile),  $^{238}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$ ’nin her birinin ortalama konsantrasyonunun  $20 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve Rn izotoplarının kömürün yanması sırasında tamamen açığa çıktığı kabulleriyle

60 GBq olarak tahmin edilmektedir (UNSCEAR, 1982). Ayrıca, kül-atık havuzlarında uzun yarı ömürlü  $^{238}\text{U}$  ve bozunum ürünleri  $^{222}\text{Rn}$  üretmeye devam ederek tesis çevresinde yaşayan insanlar için radyolojik riski arttırmaktadır.

Atmosferde,  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonunun son 80 yılda 100 faktörüyle arttığı ve bu artışın temelde kömüre dayalı termik santrallerden kaynaklandığı işaret edilmektedir (Jaworowski 1971). Papastefanou ve Charalambous (1984), linyit yakılan bir santralde (Yunanistan) bir yılda kömürdeki  $^{226}\text{Ra}$  içeriğinin %80'inden fazlasını oluşturan  $1.6 \times 10^{12}$  Bq  $^{226}\text{Ra}$ 'nın gaz veya uçucu küllerle açığa çıktığını hesaplamışlardır. Eğer bu santrallerden  $^{226}\text{Ra}$ , gaz formunda da açığa çıkıyorsa ve bu bulgu doğrulanırsa, kömür yakıt çevriminden  $^{226}\text{Ra}$ 'nın global atmosferik akışının düzeltilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Kömür santrali çevresinde yaşayan insanlar için zenginleşmiş doğal radyasyona maruz kalmanın iki yolu vardır. Bunlardan ilki bacadan çıkan dumanın solunması diğeri ise yeryüzüne doğru zenginleşmiş doğal radyonüklit depozisyonunu takiben dışsal gama radyasyonuna maruz kalmalarıdır. Eski kömür santrallerinde GWyıl başına tahmin edilen kollektif etkin doz eşdeğeri 6 insan Sv/GWyıl, yenilerde ise 0.3 insan Sv/GWyıl'dır (UNSCEAR, 1982).

Genel anlamda, kömür yakıt çevrimi boyunca alınan radyasyon dozu, kömür madenciliğini, kömürün (elektrik üretimi, evlerin ısıtılması ve pişirme amaçlı kullanımı) ve uçucu külün (bina yapım malzemesi, yol dolgusu, asfalt yapımı, gübre, vb.) kullanımını içermektedir. UNSCEAR, 1982 raporunda, termik santrallerde enerji üretimi sonucu açığa çıkan toplam külün %5'inin bina yapım malzemesi olarak kullanıldığı (çimento, biriket vb.) ve bunun bina içi ortamda, içsel ve dışsal maruz kalmayı hızlı şekilde arttırdığı öne sürülmektedir. Bu durum, kömür yakıt çevrimi boyunca maruz kalınan kolektif

etkin doz eşdeğerini veren Çizelge 2.3’de açıkça görülmektedir (UNSCEAR, 1988).

Çizelge 2.3 Kömür Yakıt Çevrimi Boyunca Tahmin Edilen Yıllık Kollektif Etkin Doz Eşdeğeri (UNSCEAR,1988)

| Kaynak                    | Kollektif Etkin Doz Eşdeğeri<br>(manSv/yıl) |                        |
|---------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
|                           | Halk                                        | Çalışanlar             |
| Kömür madenciliği         | 0.5-10                                      | 2000                   |
| Kömür kullanımı           |                                             |                        |
| Elektrik enerjisi üretimi | 2000                                        | 60                     |
| Evsel kullanım            | 2000-4000                                   | -                      |
| Mutfak kullanımı          | Tahmin edilememektedir                      | Tahmin edilememektedir |
| Uçucu kül kullanımı       | 50000                                       | Tahmin edilememektedir |

Bu doğrultuda, termik santral küllerinin radyoaktivite içeriği, radyonüklit zenginleşme faktörü ve radyoaktif dengesini kapsayan radyolojik özelliklerinin ortaya koyulduğu bu çalışma, teknolojik olarak zenginleşmiş radyasyona maruz kalma ile insanların alacakları dozların doğru tahmin edilmesinde ve inşaat sektöründe kullanılan bu malzemenin oluşturacağı radyolojik riskin belirlenmesinde oldukça önemlidir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Batı Anadolu’da yer alan “*Yeniköy, Kemerköy, Yatağan, Soma, Çan, Seyitömer, Tunçbilek ve Orhanel*” termik santrallerini besleyen kömürlerde ve küllerde doğal radyonüklit ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{40}\text{K}$ ) aktivite konsantrasyonlarının saptanması, kömürden- küle radyonüklit zenginleşme faktörünün belirlenmesi ve radyoaktif dengenin incelenerek sonuçların radyolojik risk açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaca yönelik olarak tesislerin girişinin (liniyit) ve çıkışının (kül) incelendiği bu radyolojik inceleme, aşağıdaki adımlardan oluşmuştur.

#### 3.1 Çalışılan Termik Santrallerin Genel Özellikleri

Çalışılan linyit yakıtlı termik santrallerin işletim süreleri, üretim, tüketim ve genel yakıt özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. İlgili çizelgede görüleceği üzere, bu termik santralleri besleyen linyitlerin büyük çoğunluğunun kül (% 23-42), nem (% 23-36) ve sülfür içerikleri yüksek (% 0.7-4.2), ısı değerleri (1500-2600 kcal/kg) ise düşüktür (Say, 2006).

1950’li yıllarda kömür madenleri yakınına kurularak, enerji üretimine başlayan Tunçbilek (1954) ve Soma (1956)’dan sonra, ulusal kaynak olan düşük kaliteli linyitlerin elektrik üretiminde kullanılmasının ülke ekonomisine yarar sağlayacağı düşüncesiyle 1974-1990 yılları arasında termik santral yapımına ağırlık verilmiştir. 2003 yılında elektrik üretimine başlayan, akışkan yataklı yakma (fluidized bed combustion) sistemine sahip Çan (320 MW) termik santrali dışında, diğer linyit yakıtlı tesisler klasik yakma teknolojileri (toz kömür yakma sistemi, pulverized coal-combustion) ile çalıştırılmaktadır.



Çizelge 3.1 Batı Anadolu Termik Santrallerin Üretim ve Yakıt Özellikleri ( Say, 2006)

| Batı Anadolu<br>Termik<br>Santrallerinin<br>Genel Adı | Ünite | Kurulum<br>kapasitesi<br>(MW) | İlk<br>çalışma<br>tarihi | 2003 yılı<br>gros<br>üretimi<br>(MWh) | Yakıt             |                              |               |            |            |
|-------------------------------------------------------|-------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------|------------|------------|
|                                                       |       |                               |                          |                                       | Tüketim<br>(kg/h) | Kalorifik değer<br>(kcal/kg) | Sülfür<br>(%) | Nem<br>(%) | Kül<br>(%) |
| Tunçbilek                                             | 5     | 365                           | 1956                     | 510000                                | 255               | 2600                         | 2             | 23         | 42         |
| Soma A                                                | 2     | 44                            | 1957                     | -                                     | 44                | 2400                         | 0.7           | 25         | 24         |
| Seyitömer                                             | 4     | 600                           | 1973                     | 1435000                               | 466               | 1500                         | 2             | 34         | 40         |
| Soma B                                                | 6     | 990                           | 1981                     | 2450000                               | 604.5             | 2200                         | 1.5           | 27         | 40         |
| Yatağan                                               | 3     | 630                           | 1982                     | 1644000                               | 230               | 2100                         | 2.7           | 36         | 20         |
| Yeniköy                                               | 2     | 420                           | 1986                     | 1400000                               | 280               | 1750                         | 4             | 33         | 29         |
| Orhaneli                                              | 1     | 210                           | 1992                     | 510000                                | 200               | 2560                         | 1.9           | 34         | 23         |
| Kemerköy                                              | 3     | 630                           | 1993                     | 1572000                               | 230               | 2600                         | 3.2           | 32         | 24         |
| Çan                                                   | 2     | 320                           | 2003                     | 320000                                | 200               | 2600                         | 4.2           | 22         | 32         |

### 3.2 Kömür ve Kül Örneklerinde $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , ve $^{40}\text{K}$ Radyonüklit Analizi

**Kömür ve Kül Örnekleme:** Her bir santralin üretimde olan ünitelerinden kömür, dip külü ve uçucu kül örnekleri ardışık 2 aylık periyot boyunca toplanmış ve bu örneklerde aylık ölçüm yapılmıştır. Her bir aylık örnek, işletimde olan ünitelerden günlük olarak toplanan örneklerden oluşmaktadır.

**Örnek Hazırlama:** Kömür, uçucu kül ve dip külü örnekleri de  $105^\circ \text{C}$ 'de kurutulup, gama spektrometrik analiz için 1 L'lik Marinelli kaplara (yoğunluğuna bağlı olarak 0.80-1.65 kg) yerleştirilmiştir. Ra-226 ve Rn-222 arasındaki radyoaktif dengenin oluşması için kapatılan materyaller, ölçümlerden önce 4 hafta süre ile bekletilmiştir.

**Radyonüklid analizi:** İncelenen örneklerde  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{214}\text{Bi}$ ; 1764 keV),  $^{232}\text{Th}$  ( $^{208}\text{Tl}$ ; 2614 keV) ve  $^{40}\text{K}$  (1461 keV) içeriklerinin saptanmasında kullanılan gama spektrometre sistemi, 184 cc Hp Ge koaksial dedektör (dedektör verimi: %25,  $^{60}\text{Co}$ 'ın 1.33 MeV gama enerjisi için FWHM: 1.83 keV ve pik/compton oranı: 57:1), Ortec Model-671 spektroskopi amplifikatörü ve Canberra PC bazlı MCA (8K) Wilkinson ADC'den oluşmuş ve 100 mm kurşun ile zırhlanmıştır. Curie (1968) kriterlerine dayalı olarak, gama spektrometre sisteminin 20.000s'de ölçebileceği minimum dedekte edilebilen aktiviteler (MDA)  $^{226}\text{Ra}$  için  $2 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  için  $1 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $^{40}\text{K}$  için  $4 \text{ Bq kg}^{-1}$ 'dir. Radyometrik sayım hatasının, toprak ve kömür örneklerinde % 20'nin altında kaldığı, uçucu kül örneklerinde <%5 olduğu ve dip külü örneklerinde % 11'i aşmadığı gözlenmiştir.

**Analitik Kalite Kontrolü:** Gama spektrometre sisteminin analitik kalite kontrolü, IAEA ve Amersham kaynaklı standard referans materyallerden, örneklerle benzer matris ve geometride hazırlanan standartlar kullanılarak yapılmıştır.

### 3.3 Kömür ve Kül Örneklerinde $^{210}\text{Pb}$ ve $^{234}\text{Th}$ Radyonüklit Analizi

Uranyumun düşük enerji gama spektrumunda (0-200 keV) birçok gama ve dönüşüm X-ışını bulunur ve bu ışınlar bozunma zincirindeki denge durumunun saptanması için kullanılmaktadır. Bu amaca yönelik olarak, çalışılan kömür ve kül örneklerinde  $^{234}\text{Th}$ 'ün 63.3 keV ve  $^{210}\text{Pb}$ 'un 46.5 keV enerjili gamaları ölçülmüştür.

**Örnek Hazırlama:** Gama spektroskopisi ile saptanan bir örnek aktivitesinin geçerli olması için, örnek içinde göz önüne alınan fotonların soğurulmasının ihmal edilebilir olması veya örnek ile standart materyalin absorpsiyonunun benzer olması gerekir. Kalibrasyon standartı ile örnek matrisi arasındaki self absorpsiyon farklılığı orta ve yüksek gama enerjilerinde küçük iken, düşük enerjilerde (<200 keV) gözardı edilemez ve self absorpsiyon düzeltmesi gerekliliği doğar (Yaprak and Uysal, 1998). Bu nedenle çalışmada, örnek kalınlığı ve matrisi ölçüm sonuçlarını etkileyen önemli parametrelerden olduğundan, self absorpsiyonu engellemek ve standartizasyonu sağlamak için çalışılan örnekler, inceltirilip homojenize edilerek 40.6 mm çapında ve 7 mm kalınlığında peletler haline getirilmiştir.

**Radyonüklid analizi:** Çalışma altındaki örneklerde,  $^{234}\text{Th}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  aktivitesi; berilyum pencereci HP Ge (82cc, relatif verim % 25, 122 keV'de FWHM: 2 keV) detektör, Canberra-85 çok kanallı analizör ve ilgili elektronik aksesuardan oluşan gama spektrometre sistemi ile ölçülmüştür. Sistem 100mm kurşun ile zırhlanarak art-ortam sayımlarının katkısı minimuma indirilmesi amaçlanmıştır. Düşük aktiviteli bu örneklerde, radyometrik sayım hatasının, % 30'u aşmadığı gözlenmiştir.

**Analitik Kalite Kontrolü:** Ölçümlerin analitik kalite kontrolü, IAEA (S-13) standart referans materyalinden, örneklerle benzer matris ve geometride hazırlanan standartlar kullanılarak yapılmıştır.

### 3.4 Radyoaktif Dengenin Saptanması

Gama spektrometreleri ile uranyum ölçümleri yapıldığında genelde çalışmalar yüksek enerjili (1.76 MeV) bizmut gaması üzerine yoğunlaşmıştır. Uranyum ölçümlerinde yüksek enerji emisyonunun kullanımı, düşük enerjili radyasyonun zayıf giricilik gücünden ve yüksek art-ortam katkısından dolayı gereklidir. Düşük enerji gama spektrometresi uranyum ölçümlerinde kullanıldığında klasik sistemden farklı olarak iki avantajı beraberinde getirmektedir. Bunlardan ilki uranyum içeriğini doğrudan saptaması diğeri ise uranyumla ürünleri arasındaki radyoaktif denge durumu hakkında bilgi vermesidir. Uranyumun düşük enerji gama spektrumunda (0-200 keV) birçok gama ve dönüşüm X-ışını bulunur ve bu ışınlar bozunma zincirindeki denge durumunun saptanması için kullanılırlar (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 U-238'in Bozunumunda Yayımlanan Foton Enerjileri (< 200 keV) ve İntensiteleri

| Radyonüklit | Foton (keV) | Foton emisyon hızı (%) |
|-------------|-------------|------------------------|
| Pb-210      | 46.5        | 4.06                   |
| Pb-214      | 53.2        | 1.12                   |
| Th-234      | 63.3        | 3.9                    |
| Pb-214      | 74.8 X      | 10.7                   |
| Pb-214      | 77.1 X      | 10.4                   |
| Pb-214      | 87.3 X      | 4.6                    |
| Th-234      | 92.6        | 5.6                    |
| Ra-226      | 186.2       | 3.29                   |

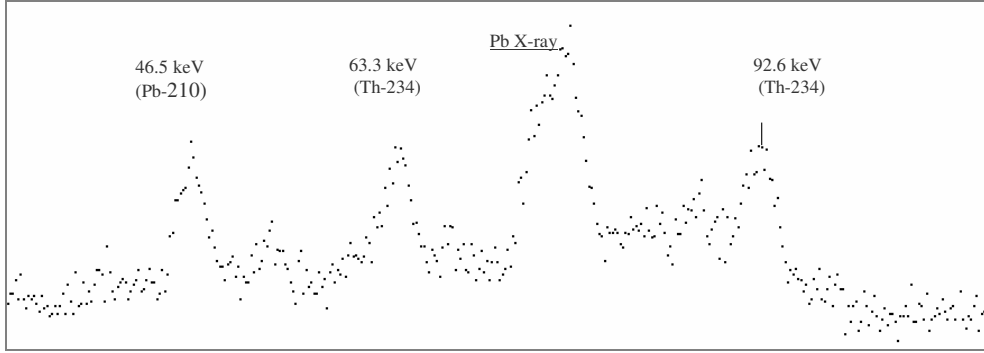
Th-234 ( $t_{1/2}=24.1$  gün) uranyumun ilk bozunum ürünüdür ve daima  $^{238}\text{U}$  ile dengededir, bu nedenle  $^{238}\text{U}$ 'in düşük enerji gama spektrumunda yer alan 63.3 keV ile yapılan ölçümler doğrudan  $^{238}\text{U}$  konsantrasyonunu vermektedir. Bu yolla,  $^{234}\text{Th}$  ve  $^{226}\text{Ra}$  aktivitelerinden gidilerek hesaplanan  $^{238}\text{U}$  aktivitesi karşılaştırıldığında, jeolojik örneğin ve alındığı ortamın U-Ra dengesizlik derecesi saptanmış olur. Benzer şekilde,  $^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2}=22$

yıl) aktivitesi kullanılarak U-Pb ve Ra- Pb dengesi tahmin edilebilir. U-238'in ilk bozunum ürünü  $^{234}\text{Th}$  ile seri sonunda yer alan  $^{210}\text{Pb}$  aktiviteleri arasındaki oran uranyumla ürünleri arasındaki daimi denge durumu için iyi bir göstergedir. Özetlenirse,

1.  $\frac{^{234}\text{Th}}{^{210}\text{Pb}} = 1$  Uranyum ile ürünlerinin dengede olduğunu,
2.  $\frac{^{234}\text{Th}}{^{210}\text{Pb}} < 1$  Uranyumun yıkandığını, ürünlerin kaldığını,
3.  $\frac{^{234}\text{Th}}{^{210}\text{Pb}} > 1$  Uranyum birikiminin genç olduğunu,

gösterir.

Çalışmada, radyoanalitik hesaplarda kullanılan  $^{238}\text{U}$  standardının (ürünleri ile dengede) HPGe gama spektrometre sistemi ile alınan < 200 keV gama spektrumu Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 U-238'in < 200 keV Düşük Enerji Gama Spektrumu

### 3.5 Kömür ve Kül Örneklerinde Uranyum Analizi

Çalışılan kömür ve kül örneklerinin bir kısmının uranyum içeriği ICP-MS yöntemi ile ACME Analitik Laboratuvarında (KANADA) analiz edilmiştir.

#### 4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Sanayileşmek ve gelişmek isteyen Türkiye'nin enerji gereksinimi ve buna paralel olarak toplam elektrik üretimi içerisinde kömüre dayalı termik santrallerin payı inkar edilemez. Türkiye'nin yıllık elektrik enerjisi üretimi içinde kömürün payı, E.Ü.A.Ş. 2004 raporlarında %31.3 olarak verilmektedir (Say, 2006).

Bugün toplam elektrik üretimi içindeki payları dikkate alınarak, uzun bir geçmişi olan termik santrallerin, gelecekte de ulusal enerji kaynağı olarak önemini koruyacağı gerçeğinden hareketle bu çalışmada, Batı Anadolu'da yer alan “*Yeniköy, Kemerköy, Yatağan, Soma, Çan, Seyitömer, Tunçbilek ve Orhaneli*” termik santralleri inceleme altına alınmıştır. Çalışmanın amacına uygun olarak, termik santralleri besleyen kömürlerde ve açığa çıkan küllerde (dip külü ve uçucu kül) doğal radyonüklit ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) aktivite konsantrasyonları, kömürden-küle radyonüklit zenginleşme faktörü ve radyoaktif denge saptanmıştır. Elde edilen bulgular aşağıdaki başlıklar altında toplanmıştır.

##### 4.1 Kömür ve Kül Örneklerinde $^{238}\text{U}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{232}\text{Th}$ , ve $^{40}\text{K}$ Aktivite Konsantrasyonları

Çalışma altındaki santrallerden sağlanan kömür ve kül (uçucu kül ve dip külü) örneklerinin  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  doğal radyonüklit emisyon karakteristikleri gama spektrometrik olarak saptanmıştır. Yaklaşık 80 kömür ve kül örneğinde saptanan ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çalışmada,  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{234}\text{Th}$  ( $^{238}\text{U}$  tayini için) aktivite ölçümleri ÇNAEM'de gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1 Kömür ve Kül Örneklerinde  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , ve  $^{40}\text{K}$  Aktivite Konsantrasyonları

| Termik Santral | Ünite No | Radyonüklit       | Aktivite Konsantrasyonu ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) |           |          |
|----------------|----------|-------------------|-------------------------------------------------|-----------|----------|
|                |          |                   | Kömür                                           | Uçucu Kül | Dip Külü |
| Yeniköy        | 1        | $^{238}\text{U}$  | 180±18                                          | 451±45    | 305±30   |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 151±4                                           | 486±6     | 308±6    |
|                |          | $^{232}\text{Th}$ | 13±1                                            | 24±1      | 16±2     |
|                |          | $^{40}\text{K}$   | 114±4                                           | 217±5     | 155±5    |
|                | 2        | $^{238}\text{U}$  | 181±18                                          | 425±42    | 363±36   |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 137±4                                           | 493±6     | 360±8    |
|                |          | $^{232}\text{Th}$ | 11±1                                            | 22±1      | 18±1     |
|                |          | $^{40}\text{K}$   | 97±4                                            | 202±5     | 170±6    |
| Kemerköy       | 1        | $^{238}\text{U}$  | 479±48                                          | 965±96    | 1109±110 |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 356±7                                           | 1041±10   | 1234±13  |
|                |          | $^{210}\text{Pb}$ | 681±116                                         | 1256±163  | 524±147  |
|                |          | $^{232}\text{Th}$ | 21±1                                            | 50±2      | 53±2     |
|                |          | $^{40}\text{K}$   | 243±6                                           | 564±8     | 510±9    |
|                | 3        | $^{238}\text{U}$  | 442±44                                          | 994±99    | 1140±114 |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 328±6                                           | 1098±10   | 1214±12  |
|                |          | $^{232}\text{Th}$ | 20±1                                            | 46±2      | 47±2     |
| Yatağan        | 1        | $^{40}\text{K}$   | 208±6                                           | 515±7     | 471±9    |
|                |          | $^{238}\text{U}$  | 104±10                                          | 244±24    | 230±23   |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 62±7                                            | 333±6     | 338±7    |
|                |          | $^{232}\text{Th}$ | 33±2                                            | 118±2     | 118±3    |
|                | 3        | $^{40}\text{K}$   | 159±5                                           | 600±8     | 563±10   |
|                |          | $^{238}\text{U}$  | 107±10                                          | 260±26    | 217±22   |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 82±3                                            | 340±6     | 297±7    |
|                |          | $^{210}\text{Pb}$ | 95±24                                           | 293±114   | 265±103  |
| Soma           | 1-4      | $^{232}\text{Th}$ | 38±2                                            | 117±2     | 102±3    |
|                |          | $^{40}\text{K}$   | 177±5                                           | 609±8     | 568±10   |
|                |          | $^{238}\text{U}$  | 169±17                                          | 268±27    | 174±17   |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 155±4                                           | 435±7     | 264±7    |
|                | 5-6      | $^{232}\text{Th}$ | 32±2                                            | 71±2      | 51±2     |
|                |          | $^{40}\text{K}$   | 148±5                                           | 306±6     | 217±7    |
|                |          | $^{238}\text{U}$  | 171±17                                          | 240±24    | 220±22   |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 176±4                                           | 395±6     | 325±8    |
|                | 7-8      | $^{232}\text{Th}$ | 53±2                                            | 97±2      | 100±3    |
|                |          | $^{40}\text{K}$   | 188±5                                           | 302±6     | 310±8    |
|                |          | $^{238}\text{U}$  | 275±27                                          | 1233±123  | 806±80   |
|                |          | $^{226}\text{Ra}$ | 270±6                                           | 1473±13   | 1098±14  |
|                |          | $^{210}\text{Pb}$ | 283±71                                          | 941±235   | 550±137  |
|                |          | $^{232}\text{Th}$ | 28±2                                            | 96±3      | 81±3     |
|                |          | $^{40}\text{K}$   | 99±4                                            | 334±7     | 303±9    |
|                |          |                   |                                                 |           |          |

Çizelge 4.1 devam ediyor.

| Termik Santral | Ünite No | Radyonüklit       | Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg <sup>-1</sup> ) |           |          |
|----------------|----------|-------------------|------------------------------------------------|-----------|----------|
|                |          |                   | Kömür                                          | Uçucu Kül | Dip Külü |
| Çan            | BC-7 AB  | <sup>238</sup> U  | 113±11                                         | -         | 267±27   |
|                |          | <sup>226</sup> Ra | 95±6                                           | -         | 231±10   |
|                |          | <sup>210</sup> Pb | 104±10                                         | -         | 231±23   |
|                |          | <sup>232</sup> Th | 24±4                                           | -         | 38±5     |
|                |          | <sup>40</sup> K   | 33±12                                          | -         | 108±16   |
| Seyitömer      | 3        | <sup>238</sup> U  | 42±4                                           | 62±6      | 42±4     |
|                |          | <sup>226</sup> Ra | 45±2                                           | 117±4     | 82±4     |
|                |          | <sup>232</sup> Th | 34±2                                           | 76±2      | 57±2     |
|                |          | <sup>40</sup> K   | 264±6                                          | 617±10    | 337±7    |
|                | 4        | <sup>238</sup> U  | 47±5                                           | 54±5      | 45±5     |
|                |          | <sup>226</sup> Ra | 43±2                                           | 118±4     | 99±4     |
|                |          | <sup>232</sup> Th | 37±2                                           | 73±2      | 63±2     |
|                |          | <sup>40</sup> K   | 261±6                                          | 514±9     | 393±8    |
| Tunçbilek      |          | <sup>238</sup> U  | 111±11                                         | 82±8      | 84±8     |
|                |          | <sup>226</sup> Ra | 137±4                                          | 290±6     | 210±6    |
|                |          | <sup>232</sup> Th | 55±2                                           | 118±3     | 88±3     |
|                |          | <sup>40</sup> K   | 246±6                                          | 456±9     | 366±9    |
| Orhaneli       |          | <sup>238</sup> U  | 185±18                                         | 363±36    | 363±36   |
|                |          | <sup>226</sup> Ra | 173±5                                          | 479±7     | 445±9    |
|                |          | <sup>232</sup> Th | 37±2                                           | 80±2      | 83±3     |
|                |          | <sup>40</sup> K   | 223±6                                          | 461±8     | 443±10   |

Çizelge 4.1 incelendiğinde; kömür örneklerinde, <sup>238</sup>U aktivite konsantrasyonunun, 42±4 Bq kg<sup>-1</sup> (Seyitömer 3.ünite)-479±48 Bq kg<sup>-1</sup> (Kemerköy 1.ünite), <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonunun 43±2 Bq kg<sup>-1</sup> (Seyitömer 4.ünite)-356±7 Bq kg<sup>-1</sup> (Kemerköy 1.ünite), <sup>232</sup>Th aktivite konsantrasyonunun 11±1 Bq kg<sup>-1</sup> (Yeniköy 2.ünite)-55±2 Bq kg<sup>-1</sup> (Tunçbilek) ve <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonunun 33±12 Bq kg<sup>-1</sup> (Çan BC-7 AB)-264±6 Bq kg<sup>-1</sup> (Seyitömer 3.ünite) aralığında değiştiği gözlenmektedir. Termik santral uçucu küllerinde doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının oldukça zenginleştiği ve <sup>238</sup>U için 1233±123 Bq kg<sup>-1</sup> (Soma 7-8), <sup>226</sup>Ra için 1473±13 Bq kg<sup>-1</sup> (Soma 7-8), <sup>232</sup>Th için 118±3 Bq kg<sup>-1</sup> (Tunçbilek ve Yatağan), <sup>40</sup>K için 617±10 Bq kg<sup>-1</sup> (Seyitömer 3.ünite)'e



ulaştığı görülmektedir. Dip külünde ise doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının  $^{238}\text{U}$  için  $1140 \pm 114 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Kemerköy 3.ünite),  $^{226}\text{Ra}$  için  $1234 \pm 13 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Kemerköy 1.ünite),  $^{232}\text{Th}$  için  $118 \pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Yatağan 1.ünite),  $^{40}\text{K}$  için  $568 \pm 10 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Yatağan 3.ünite) olduğu gözlenmektedir.

Çizelge 4.1’de,  $^{210}\text{Pb}$  aktivite konsantrasyonunun kömür örneklerinde  $95 \pm 24 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Yatağan)- $681 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Kemerköy), uçucu kül örneklerinde  $293 \pm 114 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Yatağan)- $1256 \pm 163 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Kemerköy) ve dip külü örneklerinde  $231 \pm 23 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Çan BC-7 AB)- $550 \pm 137 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Soma 7-8) aralığında değiştiği gözlenmektedir. Bu sonuçların, teknolojik olarak zenginleşmiş doğal radyoaktivitenin en önemli kaynağı olarak işaret edilen kömüre dayalı termik santral giriş (liniyit) ve çıkışının (küller) incelendiği benzer radyolojik gözlemlerle uyum içinde olduğu görülmektedir (Altaş ve ark., 2001, Eren, E., 2005, Rouni et al., 2001; Bem et al., 2002; Karangelos et al., 2004).

## 4.2 Radyonüklit Zenginleşme Faktörleri

Bu çalışmada tesislerin girişinin (yanan kömür) ve çıkışının (kül) incelenmesi, kömürden-küle radyonüklit zenginleşme faktörlerinin saptanmasını sağlamıştır.

Çalışılan termik santrallerde kömürden-küle  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  zenginleşme faktörlerinin verildiği Çizelge 4.2’de,  $^{226}\text{Ra}$  (~2),  $^{238}\text{U}$  (~1.5) ve  $^{210}\text{Pb}$  (~1) radyonüklitleri için uçucu külde hesaplanan zenginleşme oranlarının önceki saptamalar (UNSCEAR, 1982) ile örtüştüğü

görülmektedir. Elde edilen sonuçlar,  $^{226}\text{Ra}$  radyonüklitinin uçucu kül ve dip külünde,  $^{238}\text{U}$  radyonüklitine oranla daha fazla zenginleştiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, uçucu kül ve dip külünde radyumun,  $^{238}\text{U}$ 'e göre %25- %30 oranında daha fazla zenginleştiği gözlenmektedir.

Çizelge 4.2 Radyonüklit Zenginleşme Faktörleri

| Termik Santral | Ünite | Zenginleşme Faktörü (EF) | Uçucu Kül | Dip Kül |
|----------------|-------|--------------------------|-----------|---------|
| Yeniköy        | 1     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.69      | 1.50    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 1.32      | 1.25    |
|                | 2     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.73      | 1.50    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 1.13      | 1.14    |
| Kemerköy       | 1     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.29      | 1.65    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.88      | 1.10    |
|                |       | $^{210}\text{Pb}$        | 0.80      | 0.37    |
|                | 3     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.35      | 1.63    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.91      | 1.14    |
|                |       |                          |           |         |
| Yatağan        | 1     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.42      | 1.54    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.62      | 0.63    |
|                | 3     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.21      | 1.13    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.71      | 0.63    |
|                |       | $^{210}\text{Pb}$        | 0.90      | 0.87    |
|                |       |                          |           |         |
| Soma           | 1-4   | $^{226}\text{Ra}$        | 1.35      | 1.16    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.77      | 0.70    |
|                | 5-6   | $^{226}\text{Ra}$        | 1.40      | 1.12    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.87      | 0.78    |
|                | 7-8   | $^{226}\text{Ra}$        | 1.62      | 1.33    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 1.33      | 0.96    |
|                |       | $^{210}\text{Pb}$        | 0.99      | 0.64    |
|                |       |                          |           |         |
|                | BC-7  | $^{226}\text{Ra}$        | -         | 0.74    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | -         | 0.72    |
| Çan            | AB    | $^{210}\text{Pb}$        |           | 0.68    |
|                |       |                          |           |         |
|                | 3     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.11      | 1.43    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.63      | 0.78    |
|                | 4     | $^{226}\text{Ra}$        | 1.39      | 1.53    |
|                |       | $^{238}\text{U}$         | 0.58      | 0.64    |

Çizelge 4.2 devam ediyor.

| Termik Santral | Ünite | Zenginleşme Faktörü (EF) | Uçucu Kül | Dip Kül |
|----------------|-------|--------------------------|-----------|---------|
| Tunçbilek      |       | <sup>226</sup> Ra        | 1.13      | 1.02    |
|                |       | <sup>238</sup> U         | 0.39      | 0.49    |
| Orhaneli       |       | <sup>226</sup> Ra        | 1.34      | 1.29    |
|                |       | <sup>238</sup> U         | 0.95      | 0.99    |

\* Zenginleşme faktörünü tayin etmek için <sup>40</sup>K referans radyonüklit olarak kullanılmıştır

Çizelge 4.2’de dikkat çeken bir diğer sonuç, uçucu külde <sup>210</sup>Pb zenginleşmesinin dip külüne oranla 2 kat fazla olmasıdır. Bunun olası nedeni, uçucu olan <sup>210</sup>Pb’un diğer gazlarla birlikte gaz formunda kazandan ayrılması ve gaz sıcaklığı düşerken uçucu kül üzerinde yoğunlaşması olarak açıklanmaktadır (Karangelos, 2004).

### 4.3 Radyoaktif Dengenin İncelenmesi

Önceki bölümlerde, *radyoaktif denge*; bir radyoaktif seride, ürün nüklitlerin yarı ömrünün ana nüklite göre çok kısa olduğu durumda, belli bir süre sonra ürün aktivitesinin ana aktivitesine eşit olması olarak açıklanmıştı. Çizelge 4.1 ve 4.2 incelendiğinde, termik santrallerde açığa çıkan küllerde, <sup>238</sup>U serisindeki ürün nüklitlerin kömürden- küle göre farklı oranlarda zenginleştiği, buna dayalı olarak ana ile ürün arasında önceden tahmin edilen aktivite oranlarının olmadığı ve radyoaktif dengenin bozulduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, çalışmada incelenen kömür ve kül örneklerde <sup>238</sup>U ile bozunum ürünleri, <sup>226</sup>Ra ve <sup>210</sup>Pb arasındaki radyoaktif denge veya dengesizlik derecesi incelenerek Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Kömür ve Kül Örneklerinde U-Ra Dengesi

| Termik Santral | Ünite   | U-Ra  |           |          |
|----------------|---------|-------|-----------|----------|
|                |         | Kömür | Uçucu Kül | Dip Külü |
| Çan            | BC-2 AB | 1.21  | -         | -        |
|                | BC-7 AB | 1.19  | -         | 1.16     |
| Orhaneli       | -       | 1.07  | 0.76      | 0.81     |
| Seyitömer      | 3       | 0.94  | 0.53      | 0.51     |
|                | 4       | 1.09  | 0.46      | 0.45     |
| Tunçbilek      | 4       | 0.80  | 0.28      | 0.40     |
| Soma           | 1-4     | 1.09  | 0.62      | 0.66     |
|                | 5-6     | 0.97  | 0.61      | 0.68     |
|                | 7-8     | 1.01  | 0.84      | 0.73     |
| Yatağan        | 1       | 1.69  | 0.73      | 0.68     |
|                | 3       | 1.30  | 0.77      | 0.73     |
| Kemerköy       | 1       | 1.34  | 0.92      | 0.89     |
|                | 3       | 1.34  | 0.90      | 0.94     |
| Yeniköy        | 1       | 1.19  | 0.93      | 0.99     |
|                | 2       | 1.32  | 0.86      | 1.00     |

Çalışılan örneklerin  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  aktivite oranlarından yararlanılarak elde edilen U-Ra dengesini veren Çizelge 4.3 incelendiğinde, genelde, termik santralleri besleyen kömürlerde  $^{238}\text{U}$  ve  $^{226}\text{Ra}$  arasında radyoaktif dengenin sürdüğü gözlenmektedir. Bu gözlem, kapalı bir jeolojik sistemde, uranyum ve toryumun serideki ürün nüklitlerle radyoaktif dengede olduğu varsayımı ile örtüşmektedir (Ivanovich M., and Harmon R.S., 1992; Karangelos et al., 2004). Bununla birlikte, Yatağan, Kemerköy ve Tunçbilek santrallerini besleyen kömürlerde dengesizlik gözlenmiştir.

Organik sedimentlerde (kömür veya linyit) uranyumun zenginleşmesinin temel nedeni humuslu materyaller tarafından doğal radyonüklitlerin absorbe edilmesidir. Doğal radyonüklit içeren herhangi bir jeolojik sistemde (granit, pigmatit vb.), yüzeye yakın yerlerde bulunan uranyum, toryumun ve bozunum ürünlerinin değişik fiziksel ve kimyasal prosesler ile sistemden ayrılarak ana kaynaktan uzakta bulunan organik sedimentlere taşınarak depo edilmesi, sedimentler bir kayaç olan kömür

veya linyitlerin U ve Th içermesini yanı sıra bu materyalde gözlenen radyoaktif dengesizliği de açıklamaktadır.

Termik santrallerde kömürün yanması sonucu açığa çıkan küllerde, kömürden-küle  $^{238}\text{U}$  ve bozunum ürünlerinin farklı oranlarda zenginleşmesinin (Çizelge 4.2) uranyum ve ürünleri arasında radyoaktif dengesizliğe yol açacağı daha önce belirtilmişti. Bu beklenti doğrultusunda, Çizelge 4.3’de,  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  aktivite oranlarının 1’in altında kaldığı ve radyoaktif dengenin  $^{226}\text{Ra}$  radyonükliti lehine bozulduğu görülmektedir. Pb-Ra dengesinin verildiği Çizelge 4.4’de, benzer şekilde kömürden- uçucu kül ve dip külüne  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  aktivite oranlarının 1’in altında kaldığı ve radyoaktif dengenin  $^{226}\text{Ra}$  radyonükliti lehine bozulduğu görülmektedir. Söz konusu çizelgede  $^{210}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}$  radyoaktif dengesinin ise, genelde  $^{238}\text{U}$  radyonükliti lehine bozulduğu gözlenmektedir.

Çizelge 4.4 Kömür ve Kül Örneklerinde Pb-Ra, Pb-U Dengesi

| Termik Santral | Ünite   | Denge | Kömür | Uçucu Kül | Dip Külü |
|----------------|---------|-------|-------|-----------|----------|
| Çan            | BC-7 AB | Pb/Ra | 1.09  | -         | 1.00     |
|                |         | Pb/U  | 0.92  |           | 0.87     |
| Soma           | 7-8     | Pb/Ra | 1.05  | 0.64      | 0.50     |
|                |         | Pb/U  | 1.03  | 0.76      | 0.68     |
| Yatağan        | 3       | Pb/Ra | 1.16  | 0.86      | 0.89     |
|                |         | Pb/U  | 0.89  | 1.13      | 1.22     |
| Kemerköy       | 1       | Pb/Ra | 1.91  | 1.20      | 0.43     |
|                |         | Pb/U  | 1.42  | 1.30      | 0.47     |

\* Çan Termik Santrali, akışkan yataklı yakma teknolojisine sahiptir ve uçucu kül açığa çıkarmamaktadır.

Çizelge 4.4’de elde edilen sonuçların Kemerköy ve Yatağan termik santrallerinde farklılık göstermesi, bu tesisleri besleyen kömürlerde, uranyum ve ürünleri arasında radyoaktif dengesizlik gözlenmesi ile açıklanabilir.

Elde edilen sonuçları değerlendirirken göz önünde bulundurulacak önemli bir nokta da, Çan termik santralinin, diğer santrallerden farklı olarak *akışkan yataklı yakma teknolojisine* sahip olması ve bacasız bu tesisin uçucu kül üretmemesidir. Bu nedenle, Çan termik santraline ilişkin bulguların, yakma teknolojisi dikkate alınarak değerlendirilmesinde ve bu tesisi besleyen kömür ve oluşan küllerde (dip külü) radyonüklit davranışının belirlenebilmesi için daha fazla örnekle bu gözlemlerin sürdürülmesinde yarar görmekteyiz.

Sonuç olarak, uranyum serisi içinde ürünler lehine gelişen bu radyoaktif dengesizlik, dip külü ve uçucu külün farklı radyolojik karakteristikler göstermesine neden olmaktadır.

#### 4.4 Radyolojik Risk Tayini

Kömür yakıt çevrimi boyunca, kömür depolama ve kül atık alanlarında maruz kalınan karasal gama doz hızı, UNSCEAR 1993’de verilen doz dönüşüm katsayıları kullanılarak, aşağıdaki eşitlik uyarınca hesaplanmıştır.

$$D(nGy h^{-1}) = 0.0414 C_K + 0.623 C_{Th} + 0.461 C_{Ra}$$

Burada  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  ve  $C_K$  sırasıyla kömür ve kül örneklerindeki radyum, toryum ve potasyumun aktivite konsantrasyonlarıdır.

Her bir santralin kömür ve külünde saptanan ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları kullanılarak, kömür depolama ve kül atık alanlarında maruz kalınan karasal gama doz hızları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Kömür Depolama ve Kül Atık Alanlarında Maruz Kalınan Karasal Gama Doz Hızları

| Termik Santral | Karasal Gama Doz Hızları (nGyh <sup>-1</sup> ) |                |
|----------------|------------------------------------------------|----------------|
|                | Kömür depo alanı                               | Kül atık alanı |
| Yeniköy        | 78±4                                           | 233±12         |
| Kemerköy       | 182±10                                         | <57            |
| Yatağan        | 62±8                                           | 250±7          |
| Soma           | 121±10                                         | <57            |
| Çan            | 61±12                                          | <57            |
| Seyitömer      | 53±4                                           | 118±5          |
| Tunçbilek      | 107±6                                          | 214±8          |
| Orhaneli       | 112±8                                          | <57            |

\*Kemerköy, Soma ve Orhaneli Termik Santrallerinin kül atık havuzları bulunmaktadır. Küller, bu havuzlarda bekletilip sedimentleştirilmektedir. Kül atık havuzlarında biriktirilen küllerden kaynaklanan karasal gama dozunun 57 nGyh<sup>-1</sup>'i aşmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.5’de kül atık alanlarında maruz kalınan karasal gama doz hızı, dip külü (%20) ve uçucu kül (%80) paylaşım oranı dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5’den görüldüğü üzere, kül atık alanlarında karasal gama dozu, kömür depolama alanlarına göre 2-4 kat fazla olmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, termik santralleri besleyen kömürlerin ve açığa çıkan küllerin radyolojik özelliklerinin incelenmesinin, tesis çevresinde teknolojik olarak zenginleşmiş radyasyona maruz kalma ile oluşan radyolojik riskin tahmininde ve bu malzemenin inşaat sektöründe değerlendirilebilmesinde oldukça önemli olduğunu göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR

Modern dünyanın karşı karşıya kaldığı iki temel problem enerji ve beslenme ihtiyacıdır. Bu problemlerin çözümünde kullanılan doğal kaynakların yeni teknolojiler ile işlenmesi, çevresel kirliliği ve insanların maruz kaldığı radyolojik riski arttırmıştır (Yaprak ve ark., 2004).

Elektrik enerjisini sağlamak için fosil yakıtların (kömürün, doğal gazın, fuel-oilin, jeotermal kaynakların) kullanılması ve bunun yanı sıra tarımsal üretimi arttırmak için fosfat içeren yapay gübrelerin üretilmesi, insanların ve yaşadıkları çevrenin teknolojik olarak zenginleşmiş doğal radyoaktiviteye maruz kalmasına neden olmuştur.

Teknolojik olarak zenginleşmiş doğal radyoaktivite kavramı yetmişli yılların ortalarında hayatımıza girmiştir ve bu kavram; teknolojik aktivite olmaksızın var olmayacak olan doğal radyasyon kaynaklarına maruz kalma olarak tanımlanmaktadır (UNSCEAR, 1982; Yaprak ve ark., 2004).

Türkiye’de hızla büyüyen ekonomi, gelişen endüstri ve artan nüfus elektrik enerjisi tüketimini ve buna dayalı olarak toplam elektrik üretimi içinde kömüre dayalı termik santrallerin payının arttırmıştır ( Say, 2006).

Kömür yakıtlı elektrik santrallerinde kömürün yanması sonucu, radyoaktivite doğrudan doğruya baca gazı ve uçucu kül ile atmosfere yayılmakta ve radyoaktivitenin geri kalan önemli bir kesri, dip külü veya curufta tutulmaktadır. Kömür yakıtlı termik santrallerde oluşan uçucu külün yaklaşık % 0.5-2’si (elektrostatik filtrelerin tutucu verimine bağlı olarak) atmosfere kaçmakta ve tesis çevresinde radyolojik risk oluşturmaktadır.

Kömüre dayalı termik santraller çevresinde yaşayan insanlar için zenginleşmiş doğal radyasyona maruz kalmanın iki yolu vardır. Bunlardan ilki bacadan çıkan dumanın solunması diğeri ise yeryüzüne doğru zenginleşmiş doğal radyonüklit depozisyonunu takiben dışsal gama



radasyonuna maruz kalmalarıdır (UNSCEAR,1982;1988). Bu anlamda sunulan çalışmada, Batı Anadolu’da yer alan “*Yeniköy, Kemerköy, Yatağan, Soma, Çan, Seyitömer, Tunçbilek ve Orhaneli*” termik santralleri girişinin (yakılan linyit) ve çıkışının (kül) radyoaktivite içeriği, radyonüklit zenginleşme faktörü ve radyoaktif dengeyi kapsayan radyolojik karakteristikleri incelenmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, tesisleri besleyen kömürlerde (linyitlerde),  $^{238}\text{U}$  aktivite konsantrasyonunun, 42-479 Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonunun 43-356Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonunun 11-55 Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonunun 33- 264 Bq kg<sup>-1</sup> ve  $^{210}\text{Pb}$  aktivite konsantrasyonunun 95-681 Bq kg<sup>-1</sup> aralığında değiştiği göstermiştir.

Çalışılan termik santrallerde kömürden-küle  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  zenginleşme faktörlerinin önceki saptamalar (UNSCEAR, 1982) ile örtüştüğü ve bu radyonüklitlerin uçucu külde yüksek oranda zenginleştiği saptanmıştır (Çizelge 4.1-4.2). İnceleme altındaki termik santral uçucu küllerinde,  $^{238}\text{U}$ ’ın 1233±120 Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{226}\text{Ra}$ ’nın 1473±13 Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$ ’un118±3 Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{40}\text{K}$ ’ın 617±10 Bq kg<sup>-1</sup> ve,  $^{210}\text{Pb}$  aktivite konsantrasyonunun 1256±163 Bq kg<sup>-1</sup>’a ulaştığı görülmektedir. Dip külünde ise başlangıçtaki öngörüye uygun olarak (Rouni et all., 2001), doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının uçucu külde oranla daha az zenginleştiği gözlenmiştir.

Kömürün yanması sırasında, farklı fizikokimyasal özelliklere sahip olan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  radyonüklitleri, farklı davranış sergilemekte ve kömürden-küle farklı oranlarda zenginleşerek, kömürün aksine külde radyoaktif dengesizliğe yol açmaktadır. Uranyum serisi içinde,  $^{226}\text{Ra}$  lehine gelişen bu radyoaktif dengesizlik, dip külü ve uçucu külün depolandığı kül

atık alanları çevresinde,  $^{226}\text{Ra}$ 'nın bozunum ürünü olan  $^{222}\text{Rn}$ 'yi on binlerce yıl üretmeye devam ederek, tesis çevresinde yaşayan insanlar için içsel ve dışsal maruz kalmayı hızlı şekilde arttırmaktadır. Bu doğrultuda, çalışma altındaki termik santrallerin kül atık alanlarında karasal gama doz hızı hesaplanmıştır. Tahmin edilen karasal doz hızlarının  $119\text{nGyh}^{-1}$  (Seyitömer) ile  $251\text{nGyh}^{-1}$  (Yatağan) arasında değiştiği gözlenen bu karasal gama doz hızlarının, UNSCEAR 2000'de normal alanlar için rapor edilen ortalama  $57\text{nGyh}^{-1}$ 'in üzerinde olduğu, termik santral katı atığı olan ve sistemden uzaklaştırılamayan küllerin radyolojik açıdan ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu anlamda, büyük oranda inşaat sektöründe kullanılan uçucu küllerin yüksek radyoaktivite içeriğinin, insanların zamanlarının %80'ini geçirdikleri bina içi ortamda içsel ve dışsal maruz kalmayı hızlı şekilde arttıracak da unutulmamalıdır.

Enerji ve çevre sağlıklı yaşam koşullarının korunmasında birbiri ile ilişkili iki temel unsurdur ve bu nedenle geleceğe yönelik enerji üretim planlarının yapılmasında çevresel faktörlerin mutlaka dikkate alınması gerekir. Bu doğrultuda, termik santrallerde yakıt olarak kullanılan kömürlerde (linyitlerde) ve oluşan küllerde doğal radyonüklit emisyon karakteristiklerinin belirlenerek, kömürden küle radyonüklit zenginleşme faktörünün ve radyoaktif dengenin incelendiği bu radyolojik çalışma, teknolojik olarak zenginleşmiş radyasyona maruz kalma ile insanların alacakları dozların doğru tahmin edilmesinde ve inşaat sektöründe kullanılan bu malzemenin oluşturacağı radyolojik riskin belirlenmesinde oldukça önemlidir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

**Altaş, Y., Tel, H., Yaprak, G., Kütahyalı, C., Eral, M., Yener, G.,** 2001, Kömürde Radyolojik Açıdan Önemli Radyonüklitlerin Saptanmasında Analitik Yöntemlerin Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Ege Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi, 24 sayfa.

**Aycik, G. A. ve Ercan, A.,** 1997, Radioactivity Measurements of Coal and Ashes from Coal-Fired Power Plants in Southwestern Part of Turkey, Journal of Environmental Radioactivity, 35, 23-35.

**Bem, H., Wieczorowski, M.,** 2002, Evaluation of technologically enhanced natural radiation near the coal-fired power plants in the Lodzz region of Poland, Journal of Environmental Radioactivity, 61, 191-201.

**Coles, D.G., Regaini, R.C., Ondov, J.M.,** 1978, Behaviour of Natural Radionuclides in Western Coal-Fired Plants, Environmental Science and Technology 12 (4), 442-445.

**Eren, E.,** 2005, Kömürdeki Doğal Radyonüklit İçeriğinin Farklı Ocaklara Göre Değerlendirilmesi, Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 69 sayfa.

**EÜAŞ 2004 “<http://www.euas.gov.tr>”**

## **KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Furimsky, E.**, 2000, Characterization of trace element emissions from coal combustion by equilibrium calculations, Fuel Processing Technology, 63, 29-44.
- Gür, F.**, 2006, Batı Anadolu Termik Santralleri Çevresinde Radyoaktif ve Ağır Metal Kirliliğinin Biyomonitörlerle Saptanması, Doktora Tezi, Ege Üniv. Nükleer Anabilim Dalı, 2006.
- Ivanovich M. and Harmon R.S.**, 1992, Uranium- Series Disequilibrium “Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences” second edition Oxford Science Publications.
- Jaworowski, Z., Bilkiewicz, J., Zylicz, E.**, 1971, Ra-226 in contemporary and fossil snow, Health Physics, 20, 449-450
- Karangelos D.J., Petropoulos N.P., Anagnostakis M.J., Hinis E.P., Simopoulos S.E.**, 2004, Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants, Journal of Environmental Radioactivity 77, 233-246.
- Killeen, P.G.**, 1979, Gamma-ray Spectrometric Methods in Uranium Exploration-Application and Interpretation, Geol. Surv. Can. Econ. Geol. Rep., 31, 163-299.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Killeen, P.G., Carmichael, C.M.,** 1976, Determination of Radioactive Disequilibrium in Uranium Ores by Alpha-Spectrometry, Geol. Surv. Can., Pap., 75-78, Part 1, 1-20.
- Molinary, J., Snodgrass, W. J.,** 1990, The Chemistry and Radiochemistry of Radium and the Other Elements of the Uranium and Thorium Natural Decay Series, IAEA Technical Reports Series, No.310, Vol. 1, 11-56.
- Müezzinoğlu, A.,** 2000, Hava Kirliliği ve Kontrolünün Esasları, İzmir, 327s.
- Öztürk, N. ,Özdoğan, S.,** 2000, Preliminary analyses of radionuclides in Afşin-Elbistan lignite samples, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.245, No.3, pp. 653-657
- Papastefanou, C. and Charalambous, S.,** 1978, On the Radioactivity of Fly Ashes from Coal Power Plants, Z. Naturf., 34a, 533-537.
- Papastefanou, C. and Charalambous, S.,** 1984, On the Escaping Radioactivity From Coal Power Plants (CPP), Health Physics, 46, 293-302.

### **KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

**Rouni, P. K., Petropoulos, N. P., Anagnostakis, M. J., Hinis, E. P., Simopoulos, S. E.,** 2001, Radioenvironmental survey of the Megalopolis lignite field basin, The Science of the Total Environment 272 , 261-272.

**Say, N. P.,** 2006, Lignite-fired thermal power plants and SO<sub>2</sub> pollution in Turkey, Energy Policy.

**Skodras, G., Karangelos, D., Anagnostakis, M., Hinis, E., Grammelis, P., Kakaras, E.,** 2005, Coal Fly-Ash Utilisation in Greece, Natural Env. Radioactivity, V.7

**Tadmor, J.,** 1986, Radioactivity From Coal-Fired Power Plants: A Review, J.Environ.Radioactivity, 4, 177-204.

**Türkiye İstatistik Yıllığı,** 2004.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,** 1982, Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects, United Nations, New York.

**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,** 1988, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations, New York.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

### United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation,

1993, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations, New York.

**Varinoğlu, A., Akyüz, T., Köse, A.,** 1998, J. Environ. Radioact., 413 , 381.

**Yaprak, G.,** 1995, Radyoaktif Mineral İçeren Örneklerin Gama-

Spektroskopik Analizlerinde Matris Etkisi ve Self-Absorbsiyon İçin Bir Düzeltme Yönteminin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniv. Nükleer Anabilim Dalı, 1995.

**Yaprak, G.,** 1998, Indoor  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in the Vicinity of a Turkish

Coal-Fired Power Plant, Journal of Environmental Radioactivity, 46, 131-135.

**Yaprak, G., Uysal, B.,** 1998, Determination of low level  $^{210}\text{Pb}$  in

Tobacco, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.229, Nos.1-2 , 153-155.

**Yaprak, G., Gür, F., Camgöz, B., Candan, O., Köseoğlu, K.,** 2004, Küçük

Menderes Bölgesinde Cs-137 Dağılımının İncelenmesi, E.Ü., Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje No:2000 NBE 006.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

**Yener, G. and Uysal, I.,** 1998, Low-Energy Scintillation Spectrometry for Direct Determinations of  $^{238}\text{U}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in Coal and Ash Samples, Applied Radiation Isotope, 47, 93-96.



**ÖZGEÇMİŞ**

**Adı Soyadı** : Ebru (BUKOVA) YÜKSEK

**Doğum Yeri** : İZMİR

**Doğum Tarihi** : 28/06/1975

**Öğrenim Durumu** :

Lisans 1992-1996 Dokuz Eylül Üniversitesi Buca

Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü

Yüksek Lisans 1996-2006 Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler  
Enstitüsü

**Mesleki Durumu** :

2006 Işıkkent Eğitim kampusü

2004-2006 Özel İzmir Bilge Ata Okulları

1998-2004 Özel İdare 75.Yıl Cumhuriyet Özel Öğretim  
Kurumları

1996-1998 Özel İzmir Büyük Ege Dershaneleri