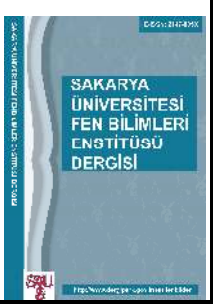
	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	Geliş/Received 17-03-2017 Kabul/Accepted 12-09-2017	Doi 10.16984/saufenbilder.298662	

## Yatağan termik santrali emisyon kontrol sistemi boyunca doğal radyonüklid zenginleşmesi

Banu Özden\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Çalışmada, Yatağan kömür yakıtlı termik santralinden alınan kömür ve çeşitli uçucu kül fraksiyonlarında <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K ve <sup>210</sup>Pb konsantrasyonları Canberra HPGe (yüksek saflıklı Germanyum dedektörü) gama spektrometresi ile belirlenmiştir. Uçucu kül örnekleri su ön ısıtıcı, hava ön ısıtıcı ve elektrostatik filtreler olmak üzere termik santralin emisyon kontrol sistemi boyunca toplam 5 farklı noktadan toplanmıştır. Aynı noktadan 3 örnek alınmış, böylece toplam 24 örnek (kömür, dip külü ve uçucu kül) elde edilmiştir. Her örnekleme noktasından toplanan örnek miktarı yaklaşık 1 kg'dır. Çalışma kapsamında elde edilen aktivite konsantrasyonlarının <sup>238</sup>U için 155±12 - 451±20 Bq kg<sup>-1</sup>, <sup>226</sup>Ra için 187±7 - 563±20 Bq kg<sup>-1</sup>, <sup>232</sup>Th için 65±3 - 136±5 Bq kg<sup>-1</sup>, <sup>40</sup>K için 305±18 - 831±29 Bq kg<sup>-1</sup> ve <sup>210</sup>Pb için 186±20 - 1153±44 Bq kg<sup>-1</sup> arasında değiştiği bulunmuştur. Çalışmada aktivite indeksleri hesaplanmış olup, en düşük aktivite indeksi 2,37 değeri ile su ön ısıtıcı noktasından alınan kül örneklerinde bulunmuştur. Bina materyali olarak bu çalışma kapsamında alınan uçucu kül örnekleri %40'ın altında kullanılırsa, radyolojik sorunlar dış gama radyasyonu açısından göz ardı edilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Kömür Yakıtlı Termik Santraller, Uçucu kül, Aktivite indeksi, Doğal radyonüklidler

## Enrichment of natural radionuclides along the emission control system of yatagan thermal coal fired power plant

### ABSTRACT

In this study, fly ash and bottom ash which are generated in Yatagan coal-fired thermal power plant in Mugla, Turkey and coal samples were analyzed by Canberra HPGe (high-purity Germanium detector) gamma ray spectrometry to determine the activity concentration of natural radionuclides such as <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K and <sup>210</sup>Pb. Fly ash samples were collected at a total of 5 points along the emission control system of the thermal power plant, namely: the water pre-heater, (economizer), air preheater (LUVO) and the three rows of the electrostatic precipitators (ESP). Triplicate samples were collected from the same point, thus resulting in a total of 24 samples (coal, bottom ash and fly ash). The amount of collected samples was around 1 kg from each sampling point. The range of the activity concentrations obtained in this study were between 155±12 - 451±20 Bq kg<sup>-1</sup> for <sup>238</sup>U, 187±7 - 563±20 Bq kg<sup>-1</sup> for <sup>226</sup>Ra, 65±3 - 136±5 Bq kg<sup>-1</sup> for

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, 35100, Bornova, İzmir  
banu.ozden@ege.edu.tr

$^{232}\text{Th}$ ,  $305\pm 18 - 831\pm 29 \text{ Bq kg}^{-1}$  for  $^{40}\text{K}$  and  $186\pm 20 - 1153\pm 44 \text{ Bq kg}^{-1}$  for  $^{210}\text{Pb}$ . In this study, the activity index was calculated and the lowest activity index was found in the ash sample taken from water pre-heater point with a value of 2.37. If the building materials were to be prepared from the ash samples which were taken in this study at a proportion below 40%, the radiological issues can be ignored in terms of external gamma radiation.

**Keywords:** Coal Fired Thermal Power Plants, Fly ash, Activity index, Natural Radionuclides

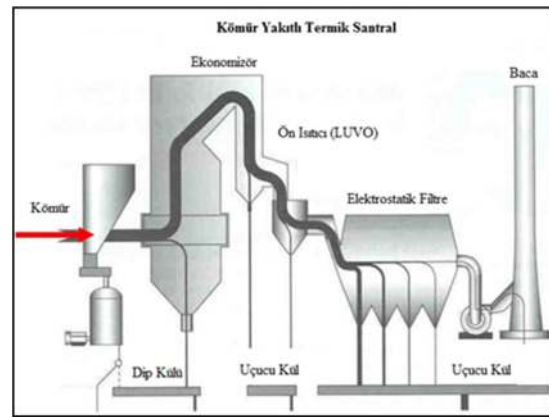
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizde ve dünya ülkelerinde sosyal ve ekonomik kalkınmanın temel girdisi olan enerjiye, gün geçtikçe daha çok gereksinim duyulmaktadır. Dünyadaki enerji kaynaklarının sınırlı olması ve hızla azalması nedeniyle ülkeler, enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye, enerjiyi etkin kullanmaya ve enerji sürdürülebilirliğinin üzerinde durmaya başlamışlardır. Ayrıca, enerji kaynak rezervlerinin azalması, enerji üretim maliyetlerini de yükseltmektedir. Bu nedenle enerjinin üretim ve kullanımında verim kayıplarının en aza indirilmesi gerekmektedir. Enerji üretimi sonucu meydana gelen atıkların yeniden kullanımı, verim kayıplarını azaltmanın yanı sıra çevresel problemlerin de çözümü için önemli bir adım olacaktır.

Doğal olarak meydana gelen radyonüklidleri içeren hammaddelerin kullanıldığı endüstriler, büyük miktarda atık üretmektedirler. Bu nedenle, üretilen atık maddelerin yönetimi, çevre ve ülke ekonomisi açılarından önemli bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtlı termik santrallerden, nadir toprak elementlerin ekstraksiyonundan, alüminyum ve diğer sanayilerden oluşan atık malzemeler değerli yeni bir hammadde kaynağı olarak düşünülmektedir. Son yıllarda artan endüstriyel atıkların neden olduğu çevre kirliliğini önlemek amacı ile bu atıkların çeşitli alanlarda ikincil bir hammadde olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Kömürün yanması sonucu oluşan küllerin çeşitli alanlarda tekrar kullanımının ve geri dönüşümünün çevresel, teknolojik ve ekonomik açılarından önemli katkı sağladığı açıktır. Bu atık malzemelerin sadece bir kısmı çimento, beton, gaz beton, tuğla ve hafif agreta üretimi, zemin stabilizasyonu, dolgu yapımı ve tarım gibi alanlarda kullanılmaktadır [1-6]. Meydana gelen atıkların ikincil bir hammadde olarak kullanılması ile atıkların depolanma sorununun çözülmesinin yanı sıra oluşabilecek

çevre kirliliğinin de önemli ölçüde önlenmesi sağlanacaktır [7].

Kömür yakıtlı termik santraller enerji üretimi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aşağıda yer alan şekil 1’de, kömür yakıtlı termik santrale ait örnek bir yakma sistemi görülmektedir.



Şekil 1. Kömür yakıtlı termik santralin blok şeması  
(Diagram of coal fired power plant)

Kömürün yüksek sıcaklıkta yanması sonucu oluşan kül tanecikleri çok ince (0.5-150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Uçucu küllerin büyük bir kısmı santral bacasındaki filtreler yardımı ile tutularak atmosfere kaçması önlenmektedir. Ancak, açığa çıkan uçucu küllerin tutunumu, kullanılan filtrelerin çalışma verimine bağlı olarak değişmektedir. Filtreler yardımı ile toplanan uçucu küller santral çevresinde veya uygun yerlerde depolanmaktadır. Zaman içerisinde biriken bu küller geniş alanları kaplayarak ekolojik açıdan bir çok probleme neden olmaktadır. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından 1998 yılında yayınlanan “Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu” başlıklı araştırmada, 1000 MW’lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve dip külü elde edildiği belirtilmiştir [8]. Elde edilen bu külün depolanabilmesi için yılda 60000 m<sup>2</sup> alana ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Ülkemizde kömür yakıtlı termik santrallerden her yıl 16 milyon ton

kül ortaya çıkmaktadır [9-10]. Yan ürün olarak kullanılabilen bu atıkların büyük oranlarda birikimi ekonomik ve çevresel etkilerden dolayı problemlere neden olmaktadır. Çin'de her yıl yaklaşık 100 MT kömür yakma ürünleri üretilmektedir. Bu rakam Hindistan için 112 MT'dur. Farklı ülkelerde uçucu kül kullanım oranını incelediğimizde yıllık 2 MT üretimi ile Danimarka, İtalya ve Hollanda'da üretilen uçucu külün tamamının; Almanya, Avustralya ve Kanada'da %85'nin; Çin'de ise %45'nin kullanıldığı bilinmektedir (Tablo 1). Hindistan'da uçucu kül kullanımı 1990'lı yıllarda %3'den, 2005 yılında %38'e kadar artmıştır. Hindistan'daki düşük uçucu kül kullanım nedeni ucuz maliyetli bir teknolojinin olmamasıdır [5]. Ülkemizde ise bu konuda çalışmalara devam edilmekte ancak külün çok az bir bölümü değerlendirilmektedir.

Tablo 1. Farklı ülkelerdeki uçucu kül üretimi ve kullanımı (Generation and utilization of fly ash in different countries)

Ülke	Uçucu kül üretimi (milyon ton / yıl)	Uçucu kül kullanımı (%)
Hindistan	112	38
Çin	100	45
USA	75	65
Almanya	40	85
Avustralya	10	85
Kanada	6	75
Danimarka	2	100
İtalya	2	100
Hollanda	2	100
Türkiye*	16	5

\* [9-10]

Doğal olarak meydana gelen radyonüklidler fosil yakıt kullanımı, fosfat ve gübre üretimi, metal ve nadir toprak elementlerinin madenciligi, petrol ve gaz üretimi gibi endüstriyel faaliyetler sonucunda çevrede her yerde meydana gelirler. Bu durum insanlar ve çevre üzerine doğal olarak meydana gelen radyonüklidlerin etkisinin küçük bir alanla sınırlı olmadığını göstermektedir. Kömürün enerji kaynağı olarak kullanılması sonucu bünyesinde bulunan doğal radyonüklidler ve onların ürünleri, radyoaktif çevresel kirliliği meydana getirirler. Kömür yandıktan sonra bünyesindeki radyonüklidler külde birikmektedir. Kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların kullanıldığı santrallerde yakıtın yanması ve ayrışımı sonucunda açığa çıkan atıklarda  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  gibi doğal olarak meydana gelen radyonüklidler ile Cd, Cr, Pb, Ni, Zn gibi iz elementlerin önemli ölçüde zenginleştiği bilinmektedir. Buna bağlı olarak, meydana gelen atık malzemelerin kullanımının

sürdürülebilirliği sadece teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmemeli, aynı zamanda bu hammaddeler kullanılarak üretilen ürünler çevre ve insan sağlığı açısından da incelenmelidir [11].

Türkiye'de termik santrallerde kömürün yanması sonucu oluşan atıkların depolanması önemli problemlere yol açmakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenle, oluşan bu atıkların sürdürülebilirliğinin incelenmesi, çevre kirliliğini azaltmak ve ülke ekonomisine katkıda bulunmak amacı ile büyük bir öneme sahiptir. Kömür yakıtlı termik santrallerde yanma işlemi boyunca organik madde yandığı için, üretilen küllerdeki iz element konsantrasyonları bu elementlerin fiziko-kimyasal özelliklerine de bağlı olarak artmaktadır. Uranyum serisindeki radyonüklidleri dikkate aldığımızda,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  gibi farklı fiziko-kimyasal özelliğe sahip radyonüklidler santral içerisinde farklı davranış sergileyecektir. Dolayısıyla, özellikle uçucu küllerin ayrı ayrı birikim noktalarına göre incelenmesi farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, emisyon kontrol sistemi boyunca alınan kül örneklerinde radyonüklid içeriğini belirlemek ve uçucu küllerin bina materyallerinde kullanımının radyolojik etkilerini araştırmaktır.

## 2. YÖNTEM (METHOD)

### 2.1. Çalışma Alanı (Sampling Area)

Çalışma, F tipi (Si oranı yüksek) uçucu küle sahip, çimento hammaddesi olarak satışının mümkün olduğu Yatağan kömür yakıtlı termik santralden alınan kömür ve çeşitli kül fraksiyonlarıyla gerçekleştirilmiştir. Santral, Türkiye'nin güneybatısında yer alan Muğla ilinde 415.255.000 ton linyit rezervine sahip Yatağan ilçesi'nde, şehir merkezine 3 km uzaklıktaki bir alan üzerine kurulmuştur. Yatağan kömür yakıtlı termik santrali 3x210 MW gücünde olup, 1. birimi 21.10.1982, 2. birimi 09.06.1983, 3. birimi 18.12.1984 tarihinde çalıştırılmaya başlanmıştır. Bacaların yüksekliği 120 m'dir. Üç birimin toplam kömür tüketimi 5,5 milyon ton/yıl olup, günlük ortalama kömür ihtiyacı 18.000 tondur. Bu tüketimin sonucunda yılda yaklaşık olarak 1.500.000 ton uçucu kül açığa çıkmaktadır.

## 2.2. Örnekleme (Sampling)

Çalışma kapsamında, kazana giriş noktasından kömür ve kazan altından dip külü örnekleri alınmıştır. Uçucu kül örnekleri ise su ön ısıtıcı (Ekonomizör), hava ön ısıtıcı (LUVVO) ve her bir elektrostatik filtre kademesinin (EF) kül birikim noktalarından ayrı ayrı alınmıştır. Emisyon kontrol sistemi boyunca meydana gelen tüm uçucu küller SİLO olarak adlandırılan bir alanda geçici olarak depolanmaktadır. Çalışma kapsamında bu alandan da uçucu kül örneği alınmıştır. Bu örnekleme yöntemi ile çeşitli kül fraksiyonlarındaki aktivite konsantrasyonlarını belirlemek ve zenginleşme faktörlerini değerlendirmek mümkün olmaktadır.

Ancak, kömür kimyasal bileşimindeki değişiklikler nedeniyle, farklı zamanlarda toplanan kül örneklerinin analiz sonuçları büyük olasılıkla tam olarak aynı olmayacaktır. Çalışma kapsamında analizi yapılan tüm örnekler aynı gün içerisinde ve her bir örnekleme noktasından 1 kg'lık 3 örnek alınarak gerçekleştirilmiştir. Toplamda 24 örnek radyolojik açıdan değerlendirilmiştir.

## 2.3. Örnek Hazırlama ve Gama Spektrometrik Yöntem ile Ölçümü (Sample Preparation and Measurement by Gamma Ray Spectrometry)

Çalışma kapsamında alınan kömür ve uçucu kül örnekleri 105 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan örnekler hidrolik baskı ile sıkıştırılmış ve yaklaşık 55 cm<sup>3</sup> (çap: 6,14 cm, yükseklik: 1,88 cm) hacimli metal kaplara yerleştirilmiştir. Toplam kütlenin artması için numuneler sıkıştırılmıştır. Böylece, daha kısa ölçüm süresi ile gerekli sayım istatistiğine ulaşmak ve sayım belirsizliğini düşürmek mümkün olmaktadır. <sup>238</sup>U (<sup>226</sup>Ra ve bozunum ürünleri arasında) ve <sup>232</sup>Th (<sup>228</sup>Th ve bozunum ürünleri arasında) serilerinde daimi dengeye ulaşmak için, örnekler (<sup>222</sup>Rn ve <sup>220</sup>Rn) sızıntıyı önlemek için hava geçirmez bir kap içinde bekletilmiştir. Örneğin yerleştirildiği kap ve kapak izolasyon bandı kullanılarak sızdırmaz hale getirilmiştir. Bu şekilde kapatılan örnekler gama spektroskopik ölçümlerden önce en az 23 gün depolanmıştır. Doğal radyonüklidlerin aktivitelerini belirlemek için HPGe dedektörü Canberra BEGe BE3830-P modeli kullanılmıştır. Kömür ve çeşitli kül fraksiyonlarında aktivite konsantrasyonları; <sup>238</sup>U (<sup>234</sup>Th-63,3 keV), <sup>226</sup>Ra (<sup>214</sup>Bi-609,3 keV ve <sup>214</sup>Pb-295,2 keV), <sup>232</sup>Th (<sup>208</sup>Tl-583,2 keV), <sup>210</sup>Pb (46,5 keV) ve <sup>40</sup>K (1460

keV) için hesaplanmıştır. Sayım süresi 12-24 saat arasındadır. <sup>238</sup>U aktivite konsantrasyonunu belirlemek için, bozunum ürünü <sup>234</sup>Th (63,3 keV) kullanılmıştır. Aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- 1) Örnekteki <sup>234</sup>Th'un tamamı <sup>238</sup>U'dan gelmektedir.
- 2) Bu iki radyonüklid yanma süresince benzer davranış özelliğine sahiptir. Bu durum, aktivite konsantrasyonlarının aynı kabul edilebilmesini sağlamaktadır [12-14].

Enerji kalibrasyonu; RGU-1 kaynağı, verim hesaplamaları ise RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1 kaynakları ile yapılmıştır. Bu kaynaklar (RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1) jeolojik örneklerdeki U, Th ve K tayinlerinde gama spektrometre kalibrasyonu için kullanılan IAEA (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı) sertifikalı referans materyallerdir. RGU-1 ve RGTh-1 referans materyalleri benzer tane boyutu dağılımı olan silika tozu ile BL-5 uranyum cevheri (% 7.09 U) ve OKA-2 toryum cevherinin (% 2.89 Th) seyreltilmesi ile hazırlanmaktadır. RGK-1 kaynağı ise yüksek saflıkta (% 99,8) potasyum sülfat içermektedir.

Yayınlanan gama enerjisi 100 keV'den düşük olduğunda, örnek matrisi içinde yayınlanan fotonların kısmi absorpsiyonu söz konusudur. Bu nedenle, gama spektrometrik analizlerde self absorpsiyon düzeltmesi yapılmaktadır. <sup>210</sup>Pb aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesinde self absorpsiyon düzeltmesi Cutshall ve arkadaşları (1983) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre hesaplanmıştır [15]. Self absorpsiyon düzeltme faktörü aşağıda gösterilen formül ile hesaplanmıştır:

$$F_{ca} = F_{a1} / F_{a0} \quad (1)$$

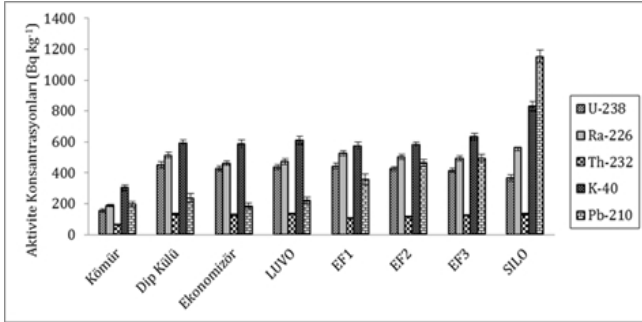
Burada;

F<sub>a1</sub>: kül örneğinin absorpsiyon faktörüdür.

F<sub>a0</sub>: Verim hesaplamalarında kullanılan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tarafından sertifikalanmış referans materyali (RGU-1) olan karşılaştırma örneğinin absorpsiyon faktörüdür.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yatağan kömür yakıtlı termik santralinden alınan kömür ve farklı kül fraksiyonlarında  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen aktivite konsantrasyonlarının  $^{238}\text{U}$  için  $155\pm 12 - 451\pm 20 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  için  $187\pm 7 - 563\pm 20 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $^{232}\text{Th}$  için  $65\pm 3 - 136\pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $^{40}\text{K}$  için  $305\pm 18 - 831\pm 29 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  için  $186\pm 20 - 1153\pm 44 \text{ Bq kg}^{-1}$  arasında değiştiği bulunmuştur. Belirsizlik, örnek ve art ortamın istatistiksel, verimlilik ve referans materyal aktivitesini kapsamaktadır.  $^{214}\text{Pb}$  (295.22 keV) ve  $^{214}\text{Bi}$  (609.32 keV) gama enerjilerinin verim belirsizliği yaklaşık %0,5'dir (1 sigma). İstatistiksel belirsizlik baskın faktördür.



Şekil 2. Kömür ve farklı kül fraksiyonlarındaki doğal radyonüklid konsantrasyonları (Natural radionuclide activity concentrations in coal and different ash fractions)

Genel olarak, kömürde bulunan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'un aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla  $10-600 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $10-200 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $30-100 \text{ Bq kg}^{-1}$  arasında değiştiği görülmektedir [16]. Santralde oluşan küllerdeki iz element ve radyonüklid konsantrasyonları; kömür bileşimine ve yakma işlemi boyunca kül haline gelen organik maddeye bağlı olarak artmaktadır. Termik santrallerde, kömürün organik kısmı yandıktan sonra geride kalan inorganik maddeler uçucu kül ve dip külü şeklinde atılmaktadır. Kömürde tayin edilen uranyum ve bozunum serisi ürünlerinin, kömürün organik madde içeriği ile bağlantılı olduğu bilinmektedir. Toryum ve bozunum ürünlerinin yanı sıra, potasyum konsantrasyonları ise inorganik materyal (kül matrisi) ile ilişkilidir [17]. Dolayısıyla, Şekil 2'de de görüldüğü gibi,  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları artarken,  $^{238}\text{U}$  konsantrasyonlarında bir azalma görülmektedir.  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonlarında ise benzer bir eğilim elde edilmiştir. Emisyon kontrol sistemi

boyunca toplanan uçucu kül örneklerindeki  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{210}\text{Pb}$ 'un farklı zenginleşmelerinden dolayı, uranyum serisi içindeki radyoaktif dengede önemli bir sapma görülmektedir.  $^{210}\text{Pb}$  aktivite konsantrasyonu emisyon kontrol sisteminin en soğuk bölümünde yüksek tayin edilmiştir.  $^{210}\text{Pb}$  genel olarak diğer doğal radyonüklidlerden daha uçucu olduğu için, santralin elektrostatik filtrelerindeki uçucu kül örneklerinde daha fazla zenginleştiği görülmektedir. Zenginleşme faktörü azalan parçacık boyutu ile artmaktadır. Uçucu küldeki bazı radyonüklidlerin zenginleşmesi, zenginleşme faktörü ile karakterize edilmiştir. Zenginleşme faktörü, uçucu külde tayin edilen ilgili elementin ve  $^{40}\text{K}$ 'ın aktivitesinin, kömürde elde edilene oranı olarak tanımlanmaktadır [11, 18-19, 21]:

$$EF = \frac{[X]_{\text{uçucu kül}} / [^{40}\text{K}]_{\text{uçucu kül}}}{[X]_{\text{kömür}} / [^{40}\text{K}]_{\text{kömür}}} \quad (2)$$

Uçucu külün tüm tiplerinde  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu aşağı yukarı sabit kaldığı ve dolayısıyla alüminosilikat baskın uçucu kül matrisi için izleyici olarak kabul edildiği için, bu normalizasyonda referans olarak  $^{40}\text{K}$  kullanılmaktadır [18]. Zenginleşme faktörü, düzgün bir dağılım gösteren bir element için birdir. Çalışmada, referans olarak  $^{40}\text{K}$  kullanılarak hesaplanan zenginleşme faktörlerinin,  $^{238}\text{U}$  için 1,29-1,51;  $^{226}\text{Ra}$  için 1,26-1,49;  $^{232}\text{Th}$  için 0,92-1,05;  $^{210}\text{Pb}$  için 0,48-1,23 arasında değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre,  $^{232}\text{Th}$ 'nin emisyon kontrol sistemi boyunca diğer radyonüklidlerden ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{210}\text{Pb}$ ) daha düzgün bir dağılım gösterdiği söylenebilir.

Bu çalışmada, emisyon kontrol sisteminin en sıcak bölümleri olan ekonomizör ve hava ön ısıtıcıdan toplanan uçucu kül örneklerinde  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  oranının 0,4'e kadar düştüğü görülmektedir. Bu oran, elektrostatik filtre bölümünde 1,0'e kadar yükselmiştir. Karangelos ve arkadaşları 2004 yılında gerçekleştirdikleri bir çalışma kapsamında, uçucu kül örneklerinde  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  oranının emisyon kontrol sistemi boyunca 0,5 – 3,6 arasında değiştiğini bulmuşlardır [20]. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda elde edildiği gibi, bu çalışmada da,  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  oranının soğuk bölümlere doğru artan bir eğilime sahip olduğu

görülmektedir. Manolopoulou ve Papastefanou (1992), Yunanistan linyit yakıtlı santralin ön-ısıtıcılarından elektrostatik filtreler doğru aldıkları uçucu kül örneklerinde  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  ve  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonlarını tayin etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, daha küçük parçacık boyutlarına sahip uçucu kül örneklerinde  $^{238}\text{U}$  ve  $^{210}\text{Pb}$  zenginleşmesi görülürken,  $^{226}\text{Ra}$  içeriğinin ise azalma eğiliminde olduğunu bulmuşlardır [21]. Farklı kimyasal bileşime sahip yakıt, farklı yakma sisteminin kullanımı ve yakma sıcaklığı, radyonüklid zenginleşmesinde büyük dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, farklı örnekleme noktalarından alınan uçucu kül örneklerinden elde edilen aktivite konsantrasyonlarına göre hesaplanan  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  ve  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  oranlarında gözlenen farklılıklar, santral içinde sıcak bölümden (ekonomizer ve hava ön ısıtıcı) soğuk bölüme (elektro filtreler) doğru gidildikçe radyonüklid aktivite konsantrasyonlarındaki değişimi göstermiştir (Tablo 2). Bu durum yanma koşulları ve uçucu küllerin farklı parçacık boyutları ile açıklanabilir. Doğal radyonüklid içeriğinin santral içindeki örnek alma noktasına bağlı olduğu literatürde yer alan diğer çalışmalarda da belirtilmiştir [12-13, 20].

Tablo 2. Uçucu küllerdeki  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  ve  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  aktivite oranları ( $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  and  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  activity ratio in fly ash)

Örnekleme noktası	Radyoaktivite oranı	
	$^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$	$^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$
Ekonomizer	0,40	0,80
LUVO	0,47	0,85
EF1	0,94	0,88
EF2	0,91	0,93
EF3	1,16	0,92

İnşaat malzemelerinin üretiminde uçucu külün ikincil bir hammadde olarak kullanılması oldukça yaygındır. Ancak, uçucu kül içinde doğal radyonüklidlerin bulunmasından dolayı bunların gama radyasyon kaynağı olarak değerlendirilmesi sözkonusudur. Beton, dünyanın bir çok ülkesinde ana yapı malzemesi olarak dikkate alınmaktadır. Beton üretiminde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  gibi doğal radyonüklidleri içeren ham materyaller kullanılmaktadır. Günümüzde, beton karışımlarında santralden üretilen uçucu külün kullanımı üzerine bir çok çalışma bulunmaktadır

[6, 22-25]. Atık materyalin radyolojik katkısını değerlendirmek için aktivite konsantrasyon indeksi (ACI) kullanılmaktadır. Bu indeksin kullanım amacı, yapı malzemelerinde kullanılan atıkların radyoaktivite içeriğinden dolayı radyasyona maruz kalma seviyesini kontrol etmek ve sınırlamaktır. Aktivite indeksi uranyum bozunum serisinden  $^{226}\text{Ra}$ , toryum bozunum serisinden  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan indeksin 1'i geçmemesi gerekmektedir. Aktivite indeksi 1'e eşit veya 1'den küçük olduğu durumda herhangi bir kısıtlama olmaksızın materyal kullanılabilir. Bina inşaatında kullanılan malzemeler için kullanılan aktivite indeks formülü [6, 22-23]:

$$I = \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_K}{3000} \quad (3)$$

şeklinde dir.

Burada;

$C_{Th}$ : Örnekteki  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu (Bq  $\text{kg}^{-1}$ )

$C_{Ra}$ : Örnekteki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu (Bq  $\text{kg}^{-1}$ )

$C_K$ : Örnekteki  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu (Bq  $\text{kg}^{-1}$ )

Çalışma kapsamında alınan dip külü ve uçucu kül örneklerinde, yukarıdaki formül kullanılarak aktivite indeksi hesaplanmış ve elde edilen sonuçların 2,37 – 2,82 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük aktivite indeksi 2,37 değeri ile su ön ısıtıcı (ekonomizör) noktasından alınan kül örneklerinde bulunmuştur. Çimento katkı maddesi olarak %30 oranında uçucu kül kullanıldığı kabul edilirse, aktivite indeksi ekonomizör noktasında 0,71; emisyon kontrol sistemi boyunca meydana gelen tüm uçucu küllerin depolandığı alan olan SILO noktasında ise 0,85 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, çimento katkısı olarak uçucu külün %40'ın altında bir oranla kullanılmasının radyolojik perspektif açısından uygun olduğunu göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bugüne kadar kömür, dip külü ve uçucu küller (silo – tüm uçucu küllerin depolandığı nokta) ile ilgili ülkemizde ve dünyada çok sayıda çalışma yapılmıştır [17, 21, 26-28]. Bu çalışmalarda, santralden alınan uçucu kül örneklerinde doğal radyoaktivite tayini yapılmış, çeşitli fiziksel ve kimyasal analizlerle ikincil bir hammadde olarak uçucu küllerin kullanımı değerlendirilmiştir. Ancak, ülkemizde yapılan çalışmaları incelediğimizde termik santralin emisyon kontrol sistemi boyunca örneklerin ayrı ayrı değerlendirilmediği görülmektedir. Emisyon kontrol sistemi; kazan, su ön ısıtıcı (ekonomizör), hava ön ısıtıcısı (LUVU) ve birkaç kademeli kül tutucu sistemden (elektrostatik filtre seti) oluşmaktadır. Bu sistem boyunca tane boyutu açısından en iri uçucu kül ekonomizörde, en ince kül ise elektrostatik filtrenin son kademesinde birikmektedir. Dolayısıyla her bir emisyon noktasında biriken uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özellikleri farklı olmaktadır. Bu özellikler her bir noktada biriken uçucu külün içerdiği ağır metal ve radyonüklid miktarları üzerinde belirleyicidir.

Termik santrallerde üretilen küller, yüksek oranda doğal radyoaktivite içermektedir. Buna bağlı olarak, oluşan küllerin çevreye salınması, depolanması ve endüstriyel alanlarda kullanımı potansiyel bir sağlık tehlikesi oluşturabilir. Bu çalışma, Muğla'daki Yatağan kömür yakıtlı termik santralden emisyon kontrol sistemi boyunca farklı noktalardan toplanan küllerdeki doğal radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları üzerine yeni veriler sağlamıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, üretilen küllerin radyolojik özelliklerinin, santraldaki örnekleme noktasına büyük oranda bağlı olduğu söylenebilir. Uçucu külün bina materyali yapımındaki kullanım oranının, radyolojik açıdan değerlendirilerek belirlenmesi gereklidir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Yazar, laboratuvar çalışmalarındaki işbirliği ve destekleri için Tartu Üniversitesi, Fizik Enstitüsü'nden Sayın Dr. Madis Kiisk ve Sayın Taavi Vaasma'ya teşekkür eder. Ayrıca, Yatağan kömür yakıtlı termik santrali'nden kömür ve uçucu

kül örneklerinin temin edilmesinde yardımcı olan Sayın Murat Ünsal'a teşekkür eder.

#### REFERENCES

- [1] I. Kula, A. Olgun, Y. Erdogan, V. Sevinc, "Effects of Colemanite Waste, Cool Bottom Ash, and Fly Ash on the Properties of Cement". *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 491-494, 2001.
- [2] İ.B. Topçu, M. Canbaz, "Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri". *Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, vol. XIV (2), pp. 11-23, 2001.
- [3] T. Yıldız, C. Yıldız, "Soma Termik Santrali Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Yeni Bir Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9, pp. 163-169, 2003.
- [4] O. Ünal, T. Uygunoğlu, "Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi", *Türkiye 14. Kömür Kongresi*, 2004, pp. 311-321.
- [5] M. Basu, M. Pande, P.B.S. Bhadoria, S.C. Mahapatra, "Potential Fly-Ash Utilization in Agriculture: A Global Review". *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 1173-1186, 2009.
- [6] K. Kovler, "Legislative Aspects of Radiation Hazards From Both Gamma Emitters and Radon Exhalation of Concrete Containing Coal Fly Ash". *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3404-3409, 2011.
- [7] G. Güler, E. Güler, Ü. İpekoğlu, H. Mordoğan, "Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları", *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, 2005, pp. 419-423.
- [8] M. Tokyay, K. Erdoğan, "Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu". *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 1998, pp 70.
- [9] G. Kaplan, A.B. Gültekin, "Yapı sektöründe uçucu kül kullanımının çevresel ve toplumsal etkiler açısından incelenmesi" *International Sustainable Buildings Symposium-ISIS*, 2010, pp. 59-64.
- [10] A.Y. Çetin, "Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler İle

- Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu”, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*, 2011, pp 121.
- [11] F. Hasani, F. Shala, G. Xhixha, M.K. Xhixha, G. Hodolli, S. Kadiri, E. Bylyku, "Naturally Occurring Radioactive Materials (NORMs) Generated From Lignite-Fired Power Plants in Kosovo". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 138, pp. 156-161, 2014.
- [12] T. Vaasma, M. Kiisk, T. Meriste, A.H. Tkaczyk, "The Enrichment of Natural Radionuclides in Oil Shale-Fired Power Plants in Estonia - The Impact of New Circulating Fluidized Bed Technology". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 129, pp. 133-139, 2014a.
- [13] T. Vaasma, M. Kiisk, T. Meriste, A.H. Tkaczyk, "The Enrichment Behavior of Natural Radionuclides in Pulverized Oil Shale-Fired Power Plants". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 138, pp. 427-433, 2014b.
- [14] T. Vaasma, L. Bitjukova, M. Kiisk, B. Ozden, A.H. Tkaczyk, "Behaviour mechanisms and correlation between lead (Pb) and its isotope  $^{210}\text{Pb}$  in industrial residue as an indicator for waste characterization" *Environmental Technology*, vol. 37, pp. 3208-3218, 2016.
- [15] N.H. Cutshall, I.L. Larsen, C.R. Orslen, "Direct Analysis of  $^{210}\text{Pb}$  in Sediment Samples: Self-Absorption Corrections". *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research*, vol. 206, pp. 309-312, 1983.
- [16] G. Xhixha, G.P. Bezzon, C. Broggin, G.P. Buso, A. Cacioli, I. Callegari, S. De Bianchi, G. Fiorentini, E. Guastaldi, F. Mantovani, G. Massa, R. Menegazzo, L. Mou, A. Pasquini, C. Rossi Alvarez, M. Shyti, M.K. Xhixha, "The Worldwide NORM Production and a Fully Automated Gamma-Ray Spectrometer for Their Characterization". *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 295, pp. 445-457, 2013.
- [17] C. Papastefanou, "Escaping Radioactivity from Coal-Fired Power Plants (CPPs) Due to Coal Burning and the Associated Hazards: A Review". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 101, pp. 191-200, 2010.
- [18] D.G. Coles, R.C. Ragaini, J.M. Ondov, "Behavior of Natural Radionuclides in Western Coal-Fired Power Plants". *Environmental Science and Technology*, vol. 12, pp. 442-446, 1978.
- [19] D.G. Coles, R.C. Ragaini, J.M. Ondov, G.L. Fischer, D. Silberman, B.A. Prentice, "Chemical Studies of Stack Fly Ash From A Coal-Fired Power Plant". *Environmental Science and Technology*, vol. 13, pp. 455-459, 1979.
- [20] D.J. Karangelos, N.P. Petropoulos, M.J. Anagnostakis, E.P. Hinis, S.E. Simopoulos, "Radiological Characteristics and Investigation of the Radioactive Equilibrium in the Ashes Produced in Lignite-Fired Power Plants". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 77, pp. 233-246, 2004.
- [21] M. Manolopoulou, C. Papastefanou, "Behavior of Natural Radionuclides in Lignites and Fly Ashes". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 16, pp. 261-271, 1992.
- [22] Ş. Turhan, "Assessment of the Natural Radioactivity and Radiological Hazards in Turkish Cement and its Raw Materials". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 99, pp. 404-414, 2008.
- [23] K. Kovler, "Radiological Constraints of Using Building Materials and Industrial By-Products in Construction". *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 246-253, 2009.
- [24] N. Damla, U. Cevik, Al. Kopya, A. Celik, N. Celik, R. Van Grieken, "Radiation Dose Estimation and Mass Attenuation Coefficients of Cement Samples Used in Turkey". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 176, pp. 644-649, 2010.
- [25] K. Kovler, "Does the Utilization of Coal Fly Ash in Concrete Construction Present A Radiation Hazard?". *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 158-166, 2012.
- [26] E. Realo, K. Realo, J. Jogi, "Releases of Natural Radionuclides from Oil-Shale Fired Power Plants in Estonia". *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 33, pp. 77-89, 1996.



- [27] Ş. Turhan, İ.H. Arıkan, B. Yücel, A. Varinliođlu, A. Köse, “Evaluation of the Radiological Safety Aspects of Utilization of Turkish Coal Combustion Fly Ash in Concrete Production”. *Fuel*, vol. 89, pp. 2528-2535, 2010.
- [28] Ş. Turhan, A. Parmaksız, A. Köse, A. Yüksel, İ.H. Arıkan, B. Yücel, “Radiological Characteristics of Pulverized Fly Ashes Produced in Turkish Coal-Burning Thermal Power Plants”. *Fuel*, vol. 89, pp. 3892-3900, 2010.