

TEKNİK RAPOR

TAEK TR 2009 -11



TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU

**TÜRKİYE'DEKİ KÖMÜR YAKITLI TERMİK
SANTRALLERDEN ELDE EDİLEN UÇUCU KÜLLERİN
İNŞAAT SEKTÖRÜNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
RADYOLOJİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU

TEKNİK RAPOR

**TÜRKİYE'DEKİ KÖMÜR YAKITLI TERMİK
SANTRALLERDEN ELDE EDİLEN UÇUCU KÜLLERİN
İNŞAAT SEKTÖRÜNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
RADYOLOJİK AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**



2009

TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU

2690 sayılı kanun ile kurulmuş olan Türkiye Atom Enerjisi Kurumunun ana görevi; atom enerjisinin barışçıl amaçlarla ülke yararına kullanılmasında izlenecek ulusal politikanın esaslarını ve bu konudaki plan ve programları belirlemek; ülkenin bilimsel, teknik ve ekonomik kalkınmasında atom enerjisinden yararlanılmasını mümkün kılacak her türlü araştırma, geliştirme, inceleme ve çalışmayı yapmak ve yaptırmak, bu alanda yapılacak çalışmaları koordine ve teşvik etmektir.

Bu çalışma TAEK personeli tarafından gerçekleştirilmiş araştırma, geliştirme ve inceleme sonuçlarının paylaşımı amacıyla Teknik Rapor olarak hazırlanmış ve basılmıştır.



Teknik Rapor 2009/11
Türkiye Atom Enerjisi Kurumu yayınıdır.
İzin alınmaksızın çoğaltılabilir.
Referans verilerek kullanılabilir.

TÜRKİYE ATOM ENERJİSİ KURUMU
Adres : Eskişehir Yolu 9. km 06530 Ankara/Türkiye
Tel : +90 (312) 295 87 00
Fax : +90 (312) 287 87 61
Web : www.taek.gov.tr

ÖNSÖZ

Enerji üretimi ve tüketimi, sosyal kalkınma ve gelişmenin temel göstergeleridir. Türkiye, nüfusu ve ekonomisi ile büyümekte olan bir ülkedir ve enerji talebi her yıl önemli ölçüde artmaktadır. Talep edilen enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi aşamalarında giderek artan çevre sorunları meydana gelmektedir. Ülkemizde, taşkömürü, linyit, asfaltit, bitümlü şistler, ham petrol, doğal gaz gibi fosil kaynak rezervleri ile hidrolik, jeotermal, güneş, rüzgar ve biyokütle enerjisi gibi birincil enerji kaynak potansiyelleri bulunmaktadır. Ancak kömür dışında diğer fosil kaynaklarının, yeterli rezervleri yoktur ve üretimleri düşüktür. Türkiye’de elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan 15 adet kömür yakıtlı termik santrallerde yılda yaklaşık olarak 55 Mton kömür yanması sonucunda, 15 Mton uçucu kül atık olarak elde edilmektedir. Bu uçucu küllerin büyük bir kısmı, elektrostatik filtrelerde tutulmasına rağmen filtrelerin zamanla çalıştırılmaması sonucunda bu küllerin etrafa yayılması, biriktirilmesi veya atılması; tozlanma, tarım ürünlerinin zarar görmesi, hava, su ve toprağın kirlenmesi gibi çevre problemlerine yol açabilmektedir. Bu tür çevre problemlerinin azaltılması veya ortadan kaldırılması, atık olarak elde edilen uçucu küllerin değişik alanlarda değerlendirilmesi ile mümkündür. Uçucu küller dünyada; inşaat, kimya, seramik, cam, tarım gibi sektörlerde ve geoteknik uygulamalarda katkı ve dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise son yıllarda, uçucu küllerin inşaat sektöründe; çimento, beton, tuğla, blok, panel, gaz beton, vb. yapı malzemelerinin üretilmesinde katkı maddesi olarak kullanılması yaygınlaşmaktadır.

Bu raporda uçucu küllerin, inşaat sektöründe katkı ham maddesi; yol ve köprü yapımında kaplama malzemesi ve geoteknik uygulamalarda ise dolgu malzemesi olarak kullanılabilişliğini radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla uçucu küllerde kömüre göre daha yoğun olarak bulunan ve bölgeden bölgeye değişiklik gösteren doğal radyonüklitlerin dağılımlarının belirlenmesi, izlenmesi ve bu radyonüklitlerden kaynaklanan ilave dozun değerlendirilmesine ilişkin çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Bu rapor, Türkiye’de inşaat

sektöründe kullanılan uçucu küllerin yönetimi, kullanılması, ilgili standartların hazırlanması ve geliştirilmesine yönelik olarak yol gösterici bilgi sağlayacak mahiyette hazırlanmıştır.

Bu rapora esas teşkil eden çalışmalarda, kömür yakıtlı termik santrallerden, çimento fabrikalarından ve inşaat sektöründeki firmalardan temin edilen veya Kurumumuza analiz için gönderilen 177 adet uçucu kül, 155 adet uçucu kül katkılı beton ve 27 adet uçucu kül katkılı çimento olmak üzere toplam 359 adet örneğin analiz sonucu değerlendirilmiştir. Çalışmalar, RSGD, SANAEEM ve ÇNAEM işbirliği ile gerçekleştirilmiştir.

İçindekiler

Sayfa No

Özet.....	1
Şekiller Dizini.....	4
Tablolar Dizini.....	5
Kısaltmalar ve Simgeler.....	6
1 GİRİŞ.....	1
2 MALZEME VE YÖNTEM.....	6
2.1 Örneklerin ölçme işlemi için hazırlanması.....	6
2.2 Doğal radyoaktivitenin ölçülmesi.....	6
3 ÖLÇME SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	8
3.1 Aktivite derişimi.....	8
3.2 Radyolojik parametrelerin hesaplanması ve değeriendirilmesi.....	16
3.2.1 Radyum eşdeğeri (Ra_{eq}) aktivite derişimi.....	16
3.2.2 Aktivite derişim indisi ve alfa indisi.....	17
3.2.3 Yapı içinde ve dışında soğurulan gama doz hızı ve etkin doz.....	23
4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	29
5 KAYNAKLAR.....	32

Tablolar Dizini

Sayfa No

Tablo 1 Türkiye’de elektrik enerjisi üreten kömür yakıtlı termik santraller.....	2
Tablo 2 Türkiye’deki kömür yakıtlı termik santrallerden atık olarak elde edilen UK’lerin kullanıldığı alanlar.....	4
Tablo 3 UK örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişim değerleri ($\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$).....	10
Tablo 4 UK katkı çimento örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişim değerleri ($\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$).....	11
Tablo 5 UK katkı beton örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri ($\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$).....	12
Tablo 6 Yapı tiplerine göre kullanılan yapı malzemeleri için tavsiye edilen Ra_{eq} sınır değerleri.....	17
Tablo 7 UK katkı beton örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} , $I\gamma$ ve $I\alpha$ değerleri.....	18
Tablo 8 Doz ölçütünün kontrolüne yönelik aktivite derişim indis değerleri.....	19
Tablo 9 UK katkı çimento örneklerine ilişkin $I\gamma$, $I\alpha$, D_{IO} ve H_{IO} değerleri.....	21
Tablo 10 UK örneklerine ilişkin $I\gamma$, D_{DO} ve H_{DO} değerleri.....	21
Tablo 11 UK katkı beton örneklerine ilişkin D_{IO} ve H_{IO} değerleri.....	24
Tablo 12 İncelenen örneklere ilişkin ortalama değerler, dünya ve AB ortalama değerleri ve ölçüt veya sınır değerler.....	31

Şekiller Dizini

Sayfa No

- Şekil 1** UK örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin ortalama aktivite derişimlerinin, AB UK ve yer kabuğu ortalaması ile karşılaştırılması.....13
- Şekil 2** UK katkılı çimento örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişimlerinin ortalama değerleri ile Türkiye çimento ortalamasının karşılaştırılması.....14
- Şekil 3** UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişimlerinin ortalama değerleri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması.....14
- Şekil 4** UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişim değerleri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması.....15
- Şekil 5** UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişim değerleri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması.....15
- Şekil 6** UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişim değerleri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması.....15
- Şekil 7** UK örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} ortalama değerlerinin, Türkiye ve AB UK ortalaması ve tavsiye edilen en yüksek değerler ile karşılaştırılması.....19
- Şekil 8** UK katkılı çimento ve beton örneklerine ait I_γ ve I_α ortalama değerleri ile tavsiye edilen ölçüt değerlerin karşılaştırılması.....22
- Şekil 9** UK katkılı çimento örneklerine ait I_γ değerleri ile tavsiye edilen ölçüt değerlerin karşılaştırılması.....22
- Şekil 10** UK katkılı beton örneklerine ait I_α değerleri ile tavsiye edilen ölçüt değerlerin karşılaştırılması.....23

Şekil 11 İncelenen örnekler için değerlendirilen D_{DO} ve D_{IO} (a) ve H_{IO} ve H_{DO} (b) değerlerinin, dünya ortalama değerleri ile karşılaştırılması.....	27
Şekil 12 Her bir termik santrale ait UK örnekler için değerlendirilen D_{DO} (a) ve H_{DO} (b) değerlerinin, dünya ortalama değerleri ile karşılaştırılması.....	28

Yönetici Özeti

Bu çalışmada, inşaat sektöründe kullanılan uçucu kül (UK) katkılı çimento ve beton örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin spesifik aktiviteleri, HPGe dedektörlü gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerden atık olarak elde edilen UK'lerin geoteknik uygulamalarda, UK katkılı çimento ve beton örneklerinin ise inşaat sektöründe kullanılabilirliğini radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla, her bir örnek için eşdeğer (R_{eq}) aktivite derişimi, aktivite derişim indisi (I_γ), alfa indisi (I_α), iç ve dış ortamdaki dış ışınlamanın sebep olduğu gama doz hızları (D_{io} , D_{do}) ve etkin doz hızı (H_{io} , H_{do}) hesaplanmış ilgili sınır veya ölçüt değeri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hesaplanan R_{eq} , I_γ (%30 Kangal UK katkılı beton örneklerine ilişkin ortalama değeri hariç), I_α (%30-%35 UK katkılı çimento örneklerine ilişkin ortalama değeri hariç) ve yapı içi etkin doz hızı (%30-%35 UK katkılı çimento örneklerine ve %30 Kangal UK katkılı beton örneklerine ilişkin ortalama değerleri hariç) ortalama değerlerin, yapı malzemelerinin güvenli kullanımı için tavsiye edilen ölçüt veya sınır değerlerden küçük veya yakın olduğunu göstermiştir.

Executive Summary

In this study, the specific activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K radionuclide in the samples of cement and concrete added fly ash (FA) used building sector were measured by using gamma spectrometer with HPGe detector. In order to assess the usability of the samples of the cement and concrete added FA in building sector and the FA samples obtained as a by-product from coal-burning thermic power plants in Turkey in geotechnical applications from radiological point of view, the radium equivalent activity (Ra_{eq}), the activity concentration index (I_γ), the alpha index (I_α), the absorbed gamma dose rates (D_{IO} , D_{DO}) and the corresponding effective dose rates (H_{IO} , H_{DO}) caused from the external exposure in indoor and outdoor were calculated and compared with the limit value or the criterion. The results showed that the mean values of the Ra_{eq} , I_γ (except the mean value calculated for the concrete added with 30% Kangal FA), I_α (except the mean values calculated for the cement added with 30-35%) and the indoor effective dose rate (except the mean values calculated for the cement added with 30-35% and the concrete added with 30% Kangal FA) were lower than or close to the limit value or the criterion recommended for the safe use of construction materials.

Kısaltmalar ve Simgeler

TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
RSGD	Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği Dairesi
SANAEM	Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
ÇNAEM	Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
OECD- NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development- Nuclear Energy Agency
UK	Uçucu kül
AB	Avrupa Birliği
AK	Avrupa Komisyonu
Ra_{eq}	Radyum eşdeğer
$I\gamma$	Aktivite değişim indisi
$I\alpha$	Alfa indisi
D_{DO} ve H_{DO}	Dış ortamda soğurulan gama doz hızı ve etkin doz hızı
D_{IO} ve H_{IO}	İç ortamda soğurulan gama doz hızı ve etkin doz hızı
A_{Ra}	Radyum aktivite değişimi
A_{Th}	Toryum aktivite değişimi
A_K	Potasyum aktivite değişimi
Sv	sievert
Gy	gray
Bq	becquerel
h	saat
y	yıl
m	mili (10^{-3})
n	nano (10^{-9})
N	Analiz edilen numune sayısı
M	milyon (10^6)
G	milyar (10^9)
g	gram
Mton	Milyon ton
Gton	Milyar ton

1. GİRİŞ

Yer kabuğu kökenli ham maddeler (kum, toprak, kaya, çakıl, kömür, mermer, granit, traverten, kireçtaşı, alçıtaşı, vb.) ve bunların kullanıldığı yapı malzemeleri (tuğla, kiremit, çimento, beton, vb), az veya çok miktarda doğal olarak var olan uranyum-radyum (^{238}U - ^{226}Ra), toryum (^{232}Th) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitleri ve potasyum (^{40}K) radyoizotopunu içermektedir. UNSCEAR (2000) raporunda, yer kabuğundaki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimlerinin ağırlıklı ortalaması sırasıyla, 32, 45 ve 420 Bq kg⁻¹ olarak verilmiştir [1].

Kömür; karbon, hidrojen ve oksijen gibi elementlerin bileşiminden oluşmuş yanabilen ve oluşumuna göre linyit, bitümlü (taş kömür), altbitümlü ve antrasit tipleri olan tortul organik bir kayadır [2]. Türkiye'nin yaklaşık 1,4 Gton taşkömürü ve dünya linyit rezervinin %2'sine karşılık gelen toplam 8,4 Gton linyit rezervi (görünür rezervi 7,3 Gton) bulunmaktadır [3]. Linyit üretimi, yılda ortalama 65 Mton'dur ve bunun yaklaşık %83'ü termik santrallerinde tüketilmektedir. Yılda 2,3 Mton seviyesinde üretilen taş kömürü, sanayi tüketimini bile karşılamaya yeterli değildir [2]. Türk linyiti yüksek oranda kül, toz, kükürt (%2'den daha büyük) ve su içerir. Rezervin yaklaşık %70'ni, ısı değeri 2500 kcal kg⁻¹ altında olan düşük kaliteli linyit oluşturmaktadır [3]. Türkiye kömürlerindeki ortalama uranyum ve toryum derişimi, sırasıyla, 12,5 mg kg⁻¹ ve 6,6 mg kg⁻¹ iken dünya kömürlerindeki ortalama uranyum ve toryum derişimi, sırayla, 2 mg kg⁻¹ ve 4 mg kg⁻¹ dır [4].

Türkiye'nin elektrik enerjisine olan talebi, son on yılın ortalamasına göre, her yıl yaklaşık %7-8 oranında artmaktadır. Bu enerji talebi, termik (taş kömürü, linyit, petrol ve doğal gaz yakıtlı), hidrolik, rüzgâr ve jeotermal olan birincil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Türkiye'nin 2006 yılı sonunda kurulu gücü; 27.377,2 MW termik, 13.060,9 hidrolik, 58,1 MW rüzgâr ve 22,9 MW jeotermal olmak üzere toplam 40.519,1 MW'dır [5]. Bu mevcut kurulu gücün %58,5'i (23.714,1 MW) Elektrik Üretim A.Ş (EÜAŞ) tarafından diğer kısmı ise, EÜAŞ' a bağlı ortaklıklar ve özel sektör tarafından sağlanmıştır [3]. Bugün dünyada toplam elektrik üretiminin %39'u, kömür yakıtlı termik santrallerden karşılanmakta iken Türkiye'de ise EÜAŞ tarafından sağlanan kurulu gücün yaklaşık üçte biri (%32,7) ve toplam kurulu gücün ise yaklaşık dörtte biri (%24), Tablo 1'de verilen aktif durumdaki 3'ü taşkömürü 12'si linyit kömürü ile çalışan 15 adet termik santralden karşılanmaktadır.

Bu santrallerde, elektrik enerjisi üretmek için toz hâline getirilmiş yaklaşık 55,5 Mton kömürün çok yüksek sıcaklıkta (1400 °C-1700 °C) yakılması sonucunda, çeşitli atıklar (veya yan ürünler) meydana gelmektedir.

Tablo 1 Türkiye’de elektrik enerjisi üreten kömür yakıtlı termik santraller

Termik Santraller	Birim sayısı x Kurulu güç kapasitesi (MW)	Yakıt Tipi	Yakıt kapasitesi (ton/h)
1. Yatağan	3 x 210	Linyit	3 x 235
2. Afşin-Elbistan A	4 x 340	Linyit	4 x 559
3. Afşin-Elbistan B	4 x 360	Linyit	-
4. Yeniköy	2 x 210	Linyit	2 x 303
5. Kemerköy	3 x 210	Linyit	2 x 342
6. Seyitömer	4 x 150	Linyit	4 x 189
7. Soma A	2 x 22	Linyit	2 x 21
Soma B	6 x 165		6 x 236
8. Tunçbilek A	2 x 32 + 1 x 65	Linyit	82,3
Tunçbilek B	2 x 150		2 x 145
9. Çayırhan	2 x 150 + 2 x 160	Linyit	4 x 152
10. Kangal	2 x 150 + 1 x 157	Linyit	3 x 243
11. Orhaneli	1 x 210	Linyit	1 x 188
12. Çatalağzı	2 x 150	Taş kömürü	2 x 97
13. Çan	2 x 160	Linyit	-
14. Çolakoğlu 2	1 x 190	Taş kömürü	-
15. Sığözü	2 x 650	İthal kömür	-

Bu atıklar; yanma süreci esnasında kömürdeki mevcut minerallerin büyük bir kısmının erimesi ile oluşan, kazanların dibinde biriken kazan altı cürufu, kazan dibi külü (veya taban külü), gazlar ile birlikte bacaya taşınan daha hafif olan uçucu kül (UK), kükürt oksitler (SO₂, az miktarda SO₃), azot oksitler (NO, NO₂) ve baca gazı temizleme sürecinde meydana gelen jips (yapay alçı) olarak sayılabilir. Kömür yakıtlı termik santrallerde elde edilen külün %80’ini UK, %20’sini ise kazan dibi külü oluşturmaktadır [6].

Kömürün yanmayan mineralinde bulunan doğal radyonüklitler, gazlar ve uçucu mineraller hariç taban külü ve uçucu kül arasında paylaşılır. Yanma sürecinde kömürdeki organik bileşenlerin uzaklaşması ile doğal radyonüklitler, külde daha yoğun olarak bulunmaktadır. Bu durum, küldeki doğal radyoaktivitenin, kömüre göre önemli ölçüde daha büyük olmasına yol açmaktadır [7]. UK'lerin büyük bir kısmının (%99,4'ü) bacadan atmosfere salınması, her bir termik santralin bacasında kurulu olan elektrostatik filtreler kullanılarak önlenmektedir. Termik santrallerden UK ile birlikte atmosfere bırakılan doğal radyonüklitlerin miktarları; radyonüklit derişimi, kül içeriğı, yanma sıcaklığı, taban külü ile uçucu kül oranı ve elektrostatik filtrelerin verimi gibi bir takım parametrelere bağılıdır.

Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerden yılda yaklaşık 15 Mton UK atık olarak elde edilmekte iken, bu miktar ABD'de 45 Mton ve Hindistan'da ise 50 Mton civarındadır [8]. Türkiye'de endüstriyel atıkların en büyük kaynağını teşkil eden UK'lerin bir kısmı, kazı yapılan maden ocaklardaki boşluklara doldurulmakta geriye kalanlar ise belli bölgelerdeki açık alanlarda depolanmak suretiyle kül yığınları oluşturulmaktadır [9]. UK'lerin biriktirilmesi veya atılması; tarım ürünleri, hava ve su kalitesi açısından arzu edilmeyen çevre problemlerine yol açmaktadır. UK'lerin tutulduğu elektrostatik filtrelerin bakım, onarım veya başka sebeplerden dolayı çalıştırılmaması durumunda çevreye yayılan UK'ler, bitkilerin yapraklarını örterek bunların solunum ve fotosentez yapma imkânını azaltmakta, hava kirliliğı oluşturarak insan sağığını olumsuz yönde etkilemektedir. Atık sahalarında veya depolarda biriktirilen UK'ler, toprağın kirlenmesine ve içerdiği ağır metaller (Fe, Mn, Co, Cu, Zn, Pb, Po, U ve Th) zamanla toprakta süzülerek veya yağmur suyu ile taşınarak taban sularının kirlenmesine yol açmaktadır [8, 10-11]. Aynı zamanda kül depolarındaki gözenekli ortamdan sızarak havaya ulaşan radon (²²²Rn) gazı da ayrı bir çevresel problem oluşturmaktadır.

Kömür yakıtlı termik santrallerin ürettiğı atıkların yönetimi, dünyanın birçok bölgesinde olduğu gibi Türkiye'de de büyük bir problem olmaya devam etmektedir. Bu atıkların, özellikle UK'lerin, inşaat sektöründe ve farklı uygulama alanlarında değerlendirilmesi, katı atıkların miktarlarının azaltılması ve çevre kirliliğinin önlenmesi açısından önemli bir husustur. Dünyada bir yılda üretilen toplam UK'ün %25'inden daha azı değerlendirilmekte iken, Almanya, Hollanda ve Belçika'da üretilen toplam UK'ün %95'inden fazlası, İngiltere'de ise yaklaşık %50'si inşaat sektöründe ve diğer uygulama alanlarında değerlendirilmektedir [8]. Ülkemizde ise toplam UK'ün ancak %1'inden daha azı, Tablo 2'de verilen alanlarda değerlendirilebilmektedir [8]. Bugüne kadar UK'lerin inşaat sektöründe değerlendirilmesine ilişkin yapılan çalışmalarda, UK'lerin karakterizasyonu ve UK katkılı mamullerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır [6,8-10,12-19].

Tablo 2 Türkiye’deki kömür yakıtlı termik santrallerden atık olarak elde edilen UK’lerin kullanıldığı alanlar

Kullanım alanı	Kullanılma amacı	Ürün
İnşaat sektörü		
Çimento Endüstrisi	Enerji tasarrufu ve daha ucuz çimento üretmek amacıyla kil ve kireç taşı karışımı olan çimento klinkerine katkı ham maddesi olarak karıştırılmaktadır.	CEM II-A-V (%6-%20 silisli UK katkılı) CEM II-B-V (%21-%35 silisli UK katkılı) CEM II-A-W (%6-%20 kalkersi UK katkılı) CEM II-B-W (%21-%35 kalkersi UK katkılı)
Hazır Beton Endüstrisi	Normal ve hafif beton üretmek amacıyla katkı ham maddesi olarak kullanılmaktadır.	UK katkılı hazır beton
Tuğla endüstrisi	Daha ucuz tuğla ve yüksek sıcaklığa dayanıklı refrakter tuğla üretmek amacıyla katkı ham maddesi olarak kullanılmaktadır.	Normal ve ateş tuğlası
Yapı Malzemesi sektörü	Enerji tasarrufu ve daha ucuz yapı malzemesi üretmek amacıyla çimento katkı ham maddesi olarak kullanılmaktadır.	Blok, panel, gaz beton, beton boru, cam, boya seramik, harç
Geoteknik uygulamalar	Otoyol ve köprülerde zemin stabilizasyonu, barajlarda bent yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.	-

Radyoaktivite açısından termik santraller ile ilgili literatürde yer alan çalışmalarda, birkaç termik santralin, özellikle Yatağan termik santralinin, çevreye olan etkilerinin incelenmesine yönelik olarak UK’lerdeki, santral çevresindeki bitki ve topraktaki aktive derişimi veya havadaki doz hızı ölçülmüştür [20-23]. Bu raporda ilk defa, Türkiye’de aktif durumdaki 11 adet kömür yakıtlı termik santralinden atık olarak ortaya çıkan UK’lerin, inşaat sektöründe ve geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliği radyolojik açıdan ele alınmıştır. UK’lerde ve UK katkılı yapı malzemelerinde doğal olarak mevcut olan radyonüklitler, zamanının büyük bir kısmını (yaklaşık %80’ini) ev ve işyeri gibi kapalı mekânlarda geçiren insanların iç ve dış olmak üzere iki farklı şekilde ışınlanmasına katkıda bulunur. Bu tür malzemelerden yayınlanan gama radyasyonu, doğrudan dış ışınlamaya

sebepler olurken bu malzemelerden serbest kalması sonucunda solunum yoluyla vücuda girebilen radon (^{222}Rn ; ^{226}Ra 'nın ürün çekirdeği), toron (^{220}Rn ; ^{224}Ra 'nın ürün çekirdeği) ve bunların yarılanma süreleri kısa olan bozunum ürünleri tarafından yayınlanan alfa ve beta ışınları ise iç ışınlamaya katkıda bulunmaktadır. Bu sebepten söz konusu radynüklitlerin derişimlerinin bilinmesi; bireylerin doğal yollarla aldıkları yıllık radyasyon dozu içindeki yapı malzemelerinin katkısı hesaplanarak radyolojik riskin değerlendirilmesi, bu tür malzemeler ile ilgili standartların oluşturulması ve geliştirilmesine yönelik olarak yol gösterici bilgilerin hazırlanması açısından çok önemlidir.

Bu raporda, UK'ler ve UK katkılı çimento ve beton örneklerine ilişkin aktive derişim sonuçları, bu tür yapı malzemelerin kullanılmasından kaynaklanabilen radyolojik riskleri değerlendirmek amacıyla hesaplanan radyum eşdeğer (Ra_{eq}) aktivite derişimi, aktivite derişim indisi (I_p), alfa indisi (I_α), yapı içinde (iç ortam) ve yapı dışında (dış ortam) soğurulan gama doz hızları (D_{io} ve D_{do}) ve etkin doz hızları (H_{io} ve H_{do}), Tablo hâlinde verilmiştir. Aynı zamanda bu veriler, ilgili ölçütler ve tavsiye edilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Örneklerin ölçme işlemi için hazırlanması

Bu raporda, son birkaç yıl içinde devreye sokulan Çan, Sugözü, Çolakoğlu 2 ve Afşin-Elbistan B hariç Tablo 1'de verilen diğer kömür yakıtlı termik santrallerden ve inşaat sektöründen temin edilen veya Kurumumuza analiz amacıyla gönderilen ve 1- 1,5 kg kütleyle sahip UK, UK katkılı çimento ve beton örnekleri olmak üzere toplam 359 örnek değerlendirilmiştir.

Toz hâlinde olan uçucu kül ve kül katkılı çimento örneklerinin dışındaki kül katkılı beton örnekleri öğütülerek diğer örnekler ile aynı boyuta getirilmiştir. Daha sonra örneklerin tamamı, net ağırlıklarını belirlemek amacıyla sıcaklığı 105 °C-110 °C olacak şekilde ayarlanmış fırın içinde, 20–24 saat süreyle bekletilerek kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma işlemine müteakip örnekler, kalibrasyon kaynakları ile aynı boyuta sahip kapların içine yerleştirilerek tartılmıştır. Tartım işleminden sonra örnek kapları, ^{226}Ra ve ürün çekirdeği olan ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengeyi sağlamak amacıyla sızdırmaz bir şekilde kapatılmış ve 3-4 hafta bekletilerek radyoaktivite ölçme işlemine hazır hâle getirilmiştir.

2.2 Doğal radyoaktivitenin ölçülmesi

Her bir örnekteki ^{226}Ra (uranyum serisindeki ^{226}Ra ile başlayan bozunum ürünleri radyolojik açıdan çok önemli olduklarından uranyum serisinin, ^{238}U yerine ^{226}Ra 'tan başladığı kabul edilmiştir), ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimleri, bağıl verimleri %10, %50 ve %110 olan yüksek saflıktaki germanyum (HPGe) dedektöründen ve ilgili elektronik donanımdan oluşan gama spektrometreleri kullanılarak ölçülmüştür. Dedektörler, doğal fon radyasyonunu en aza indirmek amacıyla zırhlanmıştır. HPGe dedektörlerinin mutlak verim kalibrasyonları, RGU-I (uranyum cevheri), RGTh-I (toryum cevheri), RGK-I (K_2SO_4) referans malzemeleri ve ^{210}Pb , ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{88}Y ve ^{60}Co radyonüklitini içeren kalibrasyon kaynakları kullanılarak yapılmıştır. Örneklerle ilişkin sayım süreleri, iyi bir sayım istatistiği elde edecek şekilde ayarlanmıştır. Her bir örneğe ait net sayımı elde etmek için doğal fon radyasyon ölçme işlemleri sonucunda elde edilen ilgili gama ışını pikine ait doğal fon sayımları, ilgili pikin alanından çıkarılmıştır.

⁴⁰K'n aktivitesi, 1460,8 keV enerjideki kendi gama ışını kullanılarak ölçülürken, ²²⁶Ra ve ²³²Th'nin aktiviteleri kalıcı dengede olan bozunum çekirdeklerine ait gama ışınlarından hesaplanan aktivitelerin ağırlıklı ortalamaları alınarak ölçülmüştür. ²²⁶Ra'nın aktivitesinin belirlenmesinde, bozunum çekirdeği olan ²¹⁴Pb'e ait 295,2, 351,9 keV ve ²¹⁴Bi'e ait 609,3, 1764,5 keV enerjili gama ışınları ve ²³²Th'nin aktivitesinin belirlenmesinde ise bozunum çekirdeği olan ²²⁸Ac'e ait 338,4, 911,2 keV ve ²⁰⁸Tl'e ait 583,2 keV enerjili gama ışınları kullanılmıştır [24]. Ancak bazı durumlarda ²²⁶Ra'nın aktivitesinin belirlenmesinde, kendisine ait 186,2 keV enerjili gama ışını da kullanılmıştır. Radyonüklitlerin aktivite derişimleri, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$A = \frac{C}{\varepsilon \cdot P_{\gamma} \cdot t \cdot m} \quad (1)$$

Burada A, radyonüklitlerin aktivite derişimi (Bq kg⁻¹); C, ilgilenilen gama ışınına ait net sayım; ε , ilgili gama ışını için mutlak verim; P_{γ} , ilgili gama ışınının yayınlanma ihtimali; t, sayım süresi (s) ve m, örneğin kütlesi (kg) dir.

3. ÖLÇME SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

3.1 Aktivite derişimi

Bu rapora esas teşkil eden çalışmalarda, 177 adet UK, 155 adet UK katkılı beton ve 27 adet UK katkılı imento olmak üzere toplam 359 adet örnekteki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimleri ölçölmüştür. Bu radyonöklitlerin aktivite derişimlerinin ortalama değerleri ve aralıkları (en küçük ve en büyük değerleri), istatistiki belirsizlikleri (1σ) ile birlikte UK örnekleri için Tablo 3'te, UK katkılı imento örnekleri için Tablo 4'de ve UK katkılı beton örnekleri için Tablo 5'te verilmiştir.

İncelenen UK örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimleri sırasıyla, $17,0\pm0,9$ ila $1389,0\pm277,8$ Bq kg⁻¹ (Ort.: $354,4\pm71,7$ Bq kg⁻¹), $9,0\pm1,0$ ila $216,8\pm22,4$ Bq kg⁻¹ (Ort.: $96,2\pm21,5$ Bq kg⁻¹) ve $11,0\pm1,2$ ila $2511,0\pm262,0$ Bq kg⁻¹ (Ort.: $485,9\pm99,5$ Bq kg⁻¹) olarak değişmektedir. Tablo 3'te verilen sonuçlar, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'nın aktivite derişimlerinin en büyük ortalama değerlerinin, sırasıyla, Kangal, Tunçbilek ve Çatalağzı termik santrallerine; en küçük değerlerinin ise, sırasıyla, Çatalağzı, Yeniköy ve Afşin-Elbistan termik santrallerine ait UK'lerde ölçöldöğünü göstermektedir. Literatürde, AB ölkelerinde inşaat sektöründe katkı malzemesi olarak kullanılan UK'deki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerinin ortalaması, 180 (en büyük: 1100 Bq kg⁻¹), 100 (en büyük: 300 Bq kg⁻¹) ve 650 (en büyük: 1100 Bq kg⁻¹) Bq kg⁻¹ olarak verilmektedir [25]. Her bir termik santrale ait UK örneklerinde ölçölen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri ile bu radyonöklitlerin AB ölkelerindeki UK ve yer kabuğu ortalama değerleri, şekil 1'de karşılaştırılmıştır. UK'de ölçölen ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalama değerinden 11 kat, AB UK ortalama değerinden ise yaklaşık 2 kat daha büyüktür. Bununla birlikte, ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalama değerinden yaklaşık iki kat daha büyük ve AB UK ortalama değerinden küçüktür. ^{40}K 'ın ortalama değeri ise yer kabuğu ortalamasından biraz daha büyük iken AB UK ortalamasından % 25 daha küçüktür.

UK katkılı imento örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla, %5 ila %10 UK katkılı imento için $74,6\pm5$, $24,3\pm2,9$ ve $261,0\pm20,1$ Bq kg⁻¹; %11 ila %15 UK katkılı imento için $111,1\pm4,1$, $29,5\pm2,3$ ve $275,5\pm10,3$ Bq kg⁻¹; % 20 ila % 25 UK katkılı imento için $185,5\pm8,1$, $27,4\pm2,5$ ve

219,8±14,6 Bq kg⁻¹ ve %30 ila %35 UK katkılı çimento için 238,0±9,5, 31,5±3,3 ve 237,8±20,3 Bq kg⁻¹ olarak ölçülmüştür. Türkiye’de üretilen CEM I, CEM II (UK katkılı CEM II tipleri hariç), CEM III, CEM IV ve CEM V tip çimentolarında ölçülen ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K’in ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla, 43,0 Bq kg⁻¹, 26,3 Bq kg⁻¹ ve 265,2 Bq kg⁻¹ dır [26]. Şekil 2’den de görüleceğı gibi % 5 ila % 35 oranında kül katkılı çimento örneklerindeki ²³²Th ve ⁴⁰K’in ortalama aktivite derişimleri, Türkiye çimento ortalama değerlerine yakinken, bu örneklerde ölçülen ²²⁶Ra’nın ortalama aktivite derişimi, Türkiye çimento ortalamasından 2 ila 5 kat daha büyüktür.

Kömür yakıtlı on bir termik santralden elde edilen UK’lerin katkı ham maddesi olarak kullanıldığı beton örneklerindeki ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K’in ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla, %10 UK katkılı beton için 28,7±4,2, 6,3±1,4 ve 55,4±6,8 Bq kg⁻¹; %20 UK katkılı beton için 44,4±6,2, 8,6±1,7 ve 88,6±10,3 Bq kg⁻¹ ve %30 UK katkılı beton için 73,9±7,3, 11,4±1,5 ve 167,1±12,2 Bq kg⁻¹ olarak ölçülmüştür. Türkiye’de inşaat sektöründe kullanılan hazır beton örneklerinde ölçülen ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite derişimlerinin ortalama değerleri, sırasıyla 18,8 Bq kg⁻¹, 26,6 Bq kg⁻¹ ve 170,1 Bq kg⁻¹ iken [27], AB ülkelerinde kullanılan betondaki radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin ortalaması ise 40 (en büyük: 240 Bq kg⁻¹), 30 (en büyük: 190 Bq kg⁻¹) ve 400 (en büyük: 1600 Bq kg⁻¹) Bq kg⁻¹ olarak verilmektedir [25]. Şekil 3’ten de görülebileceğı gibi %10 ila %30 katkılı beton örneklerinde ölçülen ²³²Th ve ⁴⁰K’in ortalama aktivite derişimleri, Türkiye ve AB beton ortalama değerlerinden daha düşüktür. Bu örneklerde ölçülen ²²⁶Ra’nın ortalama aktivite derişimleri, Türkiye ortalamasından daha büyük iken, %10 ila %20 UK katkılı beton örneklerine ilişkin ortalama değer, AB ortalama değerinden daha küçük veya yakın değerdedir. Her bir termik santrale ait %10, %20 ve %30 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen radyonüklit ortalama aktivite derişimlerinin, Türkiye ve AB beton ortalama değerleri ile karşılaştırılması, ²²⁶Ra için Şekil 4’de, ²³²Th için Şekil 5’te ve ⁴⁰K için Şekil 6’da verilmektedir. %10 ila %30 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ²³²Th’nin ortalama aktivite derişimi, Türkiye ve AB üye ülkelerinde kullanılan hazır beton ortalama değerinden daha küçük iken, Kemerköy, Çayırhan ve Orhaneli dışındaki termik santrallere ait UK katkılı beton örneklerindeki ⁴⁰K’in ortalama aktivite derişimi, ortalama değerden daha düşüktür. %10 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ²²⁶Ra’nın ortalama aktivite derişimi, Tunçbilek, Kangal, Soma, Kemerköy ve Afşin-Elbistan dışında Türkiye ve AB ortalamasından daha düşük iken, %20 UK katkılı beton örnekleri için ölçülen ortalama değer, Türkiye ortalamasından daha büyük olmasının yanı sıra Kangal, Soma ve Yeniköy dışında AB ortalamasından daha küçüktür. %30 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ²²⁶Ra’nın ortalama değeri, Türkiye ortalamasından 1,5-11 kat daha yüksek iken, Çatalağızı, Çayırhan ve Seyitömer dışında AB ortalamasında 1,2-5 kat daha yüksektir.

Tablo 3 UK örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişim değerleri ($\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$)

Santral	N		Aktivite Derişimi			Ra_{eq}
			A_{Ra}	A_{Th}	A_{K}	
Yatağan	28	Aralık	206,8±2,9 - 992,0±50,0	63,0±9,0 - 142,0±2,0	142,0±40,0 - 841,0±98,0	440,7 - 1092,9
		Ort. ± 1	389,3±12,5	115,7±5,7	585,1±26,0	599,6±30,8
Çatalağızı	13	Aralık	20,0±1,9 - 229,0±21,0	59,0±6,0 - 192,0±21,0	538,0±55,0 - 2511,0±262,0	228,7 - 665,4
		Ort. ± 1	120,7±8,4	110,4±6,4	1105,0±45,9	363,4±48,1
Tunçbilek	23	Aralık	83,0±7,5 - 647,0±46,0	114,0±3,0 - 216,8±22,4	25,0±2,4 - 710,0±50,0	402,7 - 902,4
		Ort. ± 1	342,8±14,8	148,8±9,6	402,2±18,1	586,4±27,2
Kangal	6	Aralık	156,0±8,9 - 1215,0±9,0	16,0±3,0 - 53,0±4,8	98,0±11,0 - 365,0±20,0	259,8 - 1279,9
		Ort. ± 1	860,7±20,8	35,7±2,8	269,7±13,7	932,4±27,2
Soma (A+B)	28	Aralık	23,0±3,0 - 1389,0±277,8	38,0±1,1 - 155,5±4,0	11,0±1,2 - 642,0±23,0	187,6 - 1610,3
		Ort. ± 1	501,7±28,6	103,1±6,5	331,3±17,9	651,3±35,9
Yeniköy	10	Aralık	182,0±21,0 - 906,0±32,0	15,0±2,0 - 45,0±3,5	112,0±14,0 - 405,0±11,5	212,0 - 405,0
		Ort. ± 1	453,4±20,8	29,5±3,1	232,6±16,0	513,5±26,7
Kemerköy	5	Aralık	341,0±18,0 - 1142,0±34,0	9,0±1,0 - 65,0±8,0	75,0±5,0 - 484,0±27,0	376,1 - 1201,0
		Ort. ± 1	723,6±20,6	30,0±3,9	249,0±16,0	785,6±26,5
Çayırhan	6	Aralık	17,0±0,9 - 476,0±52,0	44,0±6,0 - 100,0±11,0	301,0±22,0 - 850,0±53,0	142,6 - 684,2
		Ort. ± 1	224,7±18,0	63,7±4,7	524,2±32,6	355,9±39,0
Afşin-Elbistan	6	Aralık	234,0±25,0 - 1245,0±60,0	11,0±1,0 - 79,0±10,0	61,0±2,0 - 320,0±30,0	254,4 - 1382,5
		Ort. ± 1	689,8±26,3	36,2±4,8	169,3±17,2	754,5±33,7
Orhaneli	10	Aralık	87,0±4,5 - 575,9±7,0	70,0±3,0 - 159,0±4,0	28,2±2,0 - 594,1±15,0	269,1 - 742,5
		Ort. ± 1	351,2±12,6	100,3±5,1	384,8±18,4	524,0±24,0
Seyitömer	42	Aralık	27,0±1,8 - 493,0±60,0	45,0±6,0 - 172,0±5,0	23,9±2,3 - 1387,0±27,0	163,8 - 675,8
		Ort. ± 1	143,1±8,8	90,2±4,6	560,1±18,7	315,0±22,6

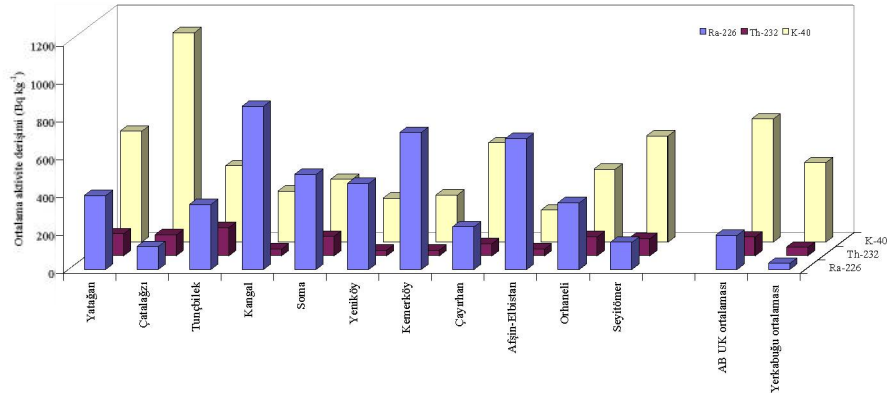
Tablo 4 UK katkı çimento örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişim değerleri ($\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$)

Kül katkı oranı (%)	N		Aktivite Derişimi			Ra_{eq}
			A_{Ra}	A_{Th}	A_{K}	
5-10	5	Aralık	$34,0 \pm 1,0 - 134,0 \pm 3,0$	$15,0 \pm 2,0 - 29,7 \pm 4,4$	$164,0 \pm 4,0 - 333,0 \pm 41,0$	$87,1 - 168,0$
		Ort. ± 1	$74,6 \pm 5,3$	$24,3 \pm 2,9$	$261,0 \pm 20,1$	$129,4 \pm 22,2$
11-15	9	Aralık	$33,0 \pm 1,0 - 195,0 \pm 3,0$	$13,0 \pm 2,0 - 40,1 \pm 3,9$	$160,0 \pm 4,0 - 364,2 \pm 16,1$	$117,5 - 230,5$
		Ort. ± 1	$111,1 \pm 4,1$	$29,5 \pm 2,3$	$275,5 \pm 10,3$	$174,4 \pm 11,7$
20-25	9	Aralık	$48,0 \pm 3,0 - 430,0 \pm 12,0$	$14,0 \pm 1,2 - 39,0 \pm 2,8$	$152,0 \pm 12,0 - 288,0 \pm 10,0$	$110,1 - 464,3$
		Ort. ± 1	$185,5 \pm 8,1$	$27,4 \pm 2,5$	$219,8 \pm 14,6$	$241,5 \pm 17,3$
30-35	4	Aralık	$67,0 \pm 8,0 - 458,0 \pm 12,0$	$18,0 \pm 2,0 - 53,0 \pm 4,0$	$166,0 \pm 16,0 - 387,0 \pm 41,0$	$151,1 - 499,0$
		Ort. ± 1	$238,0 \pm 9,5$	$31,5 \pm 3,3$	$237,8 \pm 20,3$	$301,3 \pm 23,2$

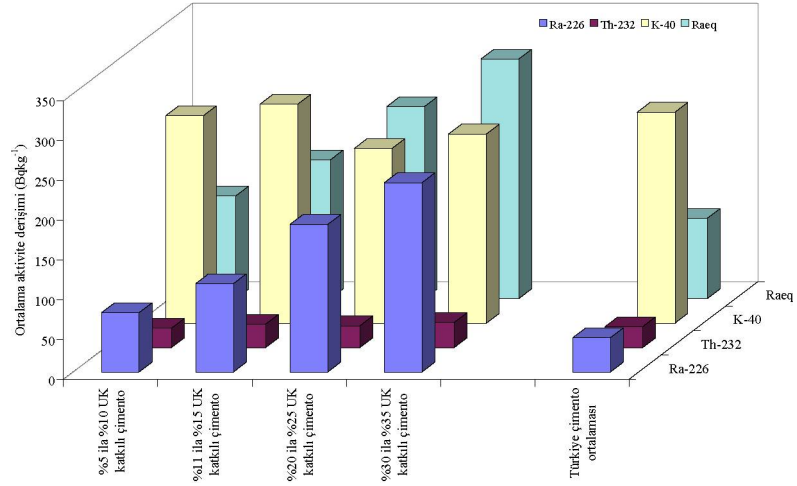
Tablo 5 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişim değerleri ($\text{Bq kg}^{-1} \pm 1\sigma$)

Santral	N	Kül katkı oranı (%)	Aktivite Derişimi					
			A_{Ra}		A_{Th}		A_{K}	
			Aralık	Ort. $\pm 1\sigma$	Aralık	Ort. $\pm 1\sigma$	Aralık	Ort. $\pm 1\sigma$
Yatağan	7	10	10,0 $\pm$ 2,0 - 25,0 $\pm$ 4,0	16,8 $\pm$ 2,6	4,0 $\pm$ 1,0 - 10,0 $\pm$ 1,0	6,6 $\pm$ 1,3	31,4 $\pm$ 2,3 - 93,0 $\pm$ 1,0	46,1 $\pm$ 5,3
	5	20	26,0 $\pm$ 4,0 - 41,0 $\pm$ 8,0	34,8 $\pm$ 4,7	6,0 $\pm$ 1,0 - 9,0 $\pm$ 3,0	8,0 $\pm$ 2,0	45,0 $\pm$ 5,0 - 68,0 $\pm$ 8,0	55,0 $\pm$ 13,2
	6	30	42,5 $\pm$ 2,9 - 71,0 $\pm$ 14,0	54,6 $\pm$ 9,0	3,0 $\pm$ 0,8 - 20,0 $\pm$ 2,0	10,3 $\pm$ 1,8	35,0 $\pm$ 7,0 - 414,0 $\pm$ 10,0	126,9 $\pm$ 7,4
Çatalağızı	3	10	16,0 $\pm$ 5,0 - 17,4 $\pm$ 2,5	16,5 $\pm$ 3,5	5,0 $\pm$ 1,0 - 12,0 $\pm$ 3,0	7,8 $\pm$ 1,6	52,0 $\pm$ 3,5 - 73,0 $\pm$ 7,0	59,4 $\pm$ 6,8
	2	20	18,7 $\pm$ 2,6 - 19,7 $\pm$ 2,8	19,2 $\pm$ 2,7	9,6 $\pm$ 1,3 - 14,8 $\pm$ 1,5	12,2 $\pm$ 1,4	76,4 $\pm$ 4,4 - 97,0 $\pm$ 3,8	86,7 $\pm$ 4,1
	3	30	25,0 $\pm$ 6,0 - 32,0 $\pm$ 6,0	28,3 $\pm$ 5,3	8,0 $\pm$ 1,0 - 14,0 $\pm$ 1,0	10,7 $\pm$ 1,0	82,0 $\pm$ 7,0 - 256,0 $\pm$ 6,0	146,7 $\pm$ 6,7
Tunçbilek	7	10	18,0 $\pm$ 3,2 - 30,0 $\pm$ 6,0	22,6 $\pm$ 3,8	5,0 $\pm$ 0,6 - 9,0 $\pm$ 3,0	6,8 $\pm$ 1,6	31,3 $\pm$ 6,2 - 45,0 $\pm$ 6,0	38,1 $\pm$ 4,7
	7	20	29,5 $\pm$ 2,9 - 41,0 $\pm$ 2,0	34,1 $\pm$ 5,4	4,2 $\pm$ 1,9 - 15,0 $\pm$ 3,0	10,1 $\pm$ 1,7	50,0 $\pm$ 2,0 - 111,0 $\pm$ 14,0	78,3 $\pm$ 6,7
	6	30	43,0 $\pm$ 14,0 - 84,0 $\pm$ 6,0	56,5 $\pm$ 7,3	10,1 $\pm$ 1,3 - 26,0 $\pm$ 2,0	15,3 $\pm$ 1,5	74,0 $\pm$ 4,0 - 206,0 $\pm$ 6,2	121,0 $\pm$ 5,2
Kangal	4	10	57,0 $\pm$ 3,9 - 121,0 $\pm$ 9,0	96,8 $\pm$ 9,2	4,7 $\pm$ 0,8 - 7,1 $\pm$ 1,3	5,7 $\pm$ 1,0	31,9 $\pm$ 4,0 - 35,3 $\pm$ 5,0	33,6 $\pm$ 4,0
	4	20	77,6 $\pm$ 9,5 - 206,0 $\pm$ 11,0	163,9 $\pm$ 11,1	5,0 $\pm$ 1,0 - 7,2 $\pm$ 1,3	6,0 $\pm$ 2,3	39,0 $\pm$ 4,0 - 45,0 $\pm$ 4,0	41,5 $\pm$ 4,5
	4	30	84,4 $\pm$ 4,3 - 258,0 $\pm$ 13,0	211,9 $\pm$ 12,1	6,9 $\pm$ 1,5 - 7,4 $\pm$ 1,4	7,2 $\pm$ 1,5	44,0 $\pm$ 6,0 - 50,0 $\pm$ 5,0	47,3 $\pm$ 4,6
Soma	5	10	19,6 $\pm$ 2,5 - 36,5 $\pm$ 3,3	28,2 $\pm$ 3,7	4,0 $\pm$ 0,9 - 7,3 $\pm$ 2,1	6,0 $\pm$ 1,6	34,5 $\pm$ 7,2 - 40,0 $\pm$ 3,2	37,8 $\pm$ 4,2
	6	20	37,5 $\pm$ 6,9 - 64,0 $\pm$ 13,0	48,5 $\pm$ 7,9	7,0 $\pm$ 1,0 - 10,0 $\pm$ 1,5	8,3 $\pm$ 1,4	42,9 $\pm$ 3,4 - 73,0 $\pm$ 8,0	62,3 $\pm$ 6,8
	6	30	67,0 $\pm$ 8,0 - 153,0 $\pm$ 12,0	103,6 $\pm$ 19,3	9,0 $\pm$ 2,0 - 14,1 $\pm$ 2,0	11,2 $\pm$ 1,8	70,0 $\pm$ 6,0 - 106,0 $\pm$ 3,7	83,6 $\pm$ 6,3
Yeniköy	3	10	27,6 $\pm$ 2,9 - 48,3 $\pm$ 3,3	41,3 $\pm$ 3,4	3,0 $\pm$ 1,3 - 4,0 $\pm$ 1,0	3,6 $\pm$ 1,0	24,4 $\pm$ 3,0 - 31,0 $\pm$ 3,0	27,8 $\pm$ 3,1
	3	20	49,9 $\pm$ 9,0 - 56,0 $\pm$ 12,0	52,3 $\pm$ 11,3	4,0 $\pm$ 2,0 - 7,7 $\pm$ 3,0	5,7 $\pm$ 2,3	34,6 $\pm$ 5,0 - 42,0 $\pm$ 5,0	37,9 $\pm$ 5,7
	4	30	57,0 $\pm$ 10,0 - 96,0 $\pm$ 5,0	71,9 $\pm$ 6,1	6,0 $\pm$ 1,3 - 9,0 $\pm$ 1,0	7,3 $\pm$ 1,1	66,0 $\pm$ 7,0 - 364,0 $\pm$ 2,5	142,9 $\pm$ 3,9
Kemerköy	4	10	21,0 $\pm$ 3,0 - 25,2 $\pm$ 7,5	22,8 $\pm$ 5,9	3,0 $\pm$ 2,0 - 5,0 $\pm$ 1,0	4,2 $\pm$ 1,4	38,4 $\pm$ 1,2 - 60,0 $\pm$ 10,0	51,8 $\pm$ 6,3
	4	20	27,0 $\pm$ 5,0 - 38,1 $\pm$ 7,5	31,8 $\pm$ 5,6	3,0 $\pm$ 1,5 - 7,0 $\pm$ 2,0	5,2 $\pm$ 1,9	63,0 $\pm$ 13,0 - 134,0 $\pm$ 41,0	92,3 $\pm$ 16,2
	3	30	53,2 $\pm$ 9,9 - 117,0 $\pm$ 6,0	84,4 $\pm$ 8,0	6,0 $\pm$ 1,0 - 14,0 $\pm$ 2,3	8,7 $\pm$ 1,4	190,0 $\pm$ 5,0 - 333,0 $\pm$ 9,8	239,7 $\pm$ 6,3
Çayırhan	8	10	13,0 $\pm$ 4,0 - 18,0 $\pm$ 2,6	15,6 $\pm$ 2,9	4,2 $\pm$ 2,0 - 13,0 $\pm$ 3,0	7,4 $\pm$ 1,6	27,0 $\pm$ 2,0 - 114,0 $\pm$ 5,2	64,8 $\pm$ 5,3
	7	20	20,1 $\pm$ 5,0 - 27,5 $\pm$ 5,6	23,3 $\pm$ 5,0	5,0 $\pm$ 1,0 - 17,0 $\pm$ 1,5	9,9 $\pm$ 1,1	58,0 $\pm$ 6,0 - 297,0 $\pm$ 6,0	158,9 $\pm$ 5,6
	5	30	29,0 $\pm$ 3,0 - 41,4 $\pm$ 5,8	35,3 $\pm$ 6,2	5,0 $\pm$ 1,0 - 25,8 $\pm$ 1,7	17,0 $\pm$ 1,7	108,0 $\pm$ 6,0 - 436,0 $\pm$ 7,0	297,4 $\pm$ 14,4
Afşin-E.	4	10	22,2 $\pm$ 2,6 - 34,8 $\pm$ 8,0	29,2 $\pm$ 5,2	3,0 $\pm$ 2,0 - 4,9 $\pm$ 1,6	3,6 $\pm$ 1,2	33,5 $\pm$ 2,7 - 55,0 $\pm$ 8,0	40,7 $\pm$ 4,9
	4	20	35,5 $\pm$ 6,7 - 46,0 $\pm$ 4,0	40,6 $\pm$ 7,2	5,0 $\pm$ 2,4 - 7,0 $\pm$ 1,0	5,8 $\pm$ 1,6	58,0 $\pm$ 14,0 - 65,0 $\pm$ 7,0	60,8 $\pm$ 10,5
	4	30	70,0 $\pm$ 9,0 - 110,0 $\pm$ 8,0	89,5 $\pm$ 8,5	7,0 $\pm$ 1,0 - 20,3 $\pm$ 1,0	10,6 $\pm$ 1,0	75,0 $\pm$ 8,0 - 286,0 $\pm$ 5,0	142,5 $\pm$ 6,3
Orhaneli	5	10	9,0 $\pm$ 1,0 - 14,0 $\pm$ 3,0	11,6 $\pm$ 2,3	3,2 $\pm$ 0,6 - 12,0 $\pm$ 2,0	7,2 $\pm$ 1,5	82,0 $\pm$ 8,0 - 132,0 $\pm$ 5,0	103,4 $\pm$ 9,3

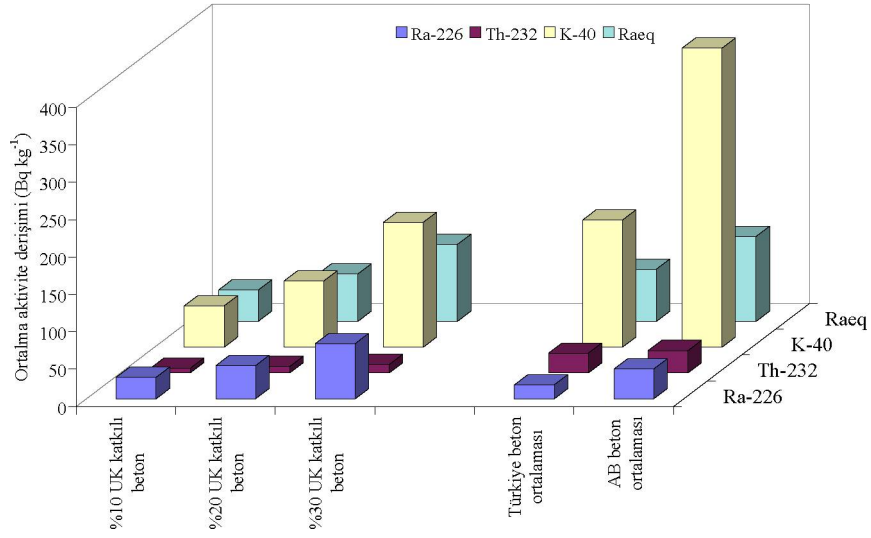
Santral	N	Kül katkı oranı (%)	Aktivite Derişimi					
			A_{Ra}		A_{Th}		A_K	
			Aralık	Ort. $\pm 1\sigma$	Aralık	Ort. $\pm 1\sigma$	Aralık	Ort. $\pm 1\sigma$
	4	20	15,0 $\pm$ 3,0 - 27,0 $\pm$ 2,0	19,3 $\pm$ 2,8	4,3 $\pm$ 0,3 - 21,0 $\pm$ 2,0	11,6 $\pm$ 1,3	148,0 $\pm$ 5,0 - 245,0 $\pm$ 10,0	191,9 $\pm$ 6,0
	5	30	29,0 $\pm$ 2,0 - 64,7 $\pm$ 4,9	47,8 $\pm$ 5,5	5,3 $\pm$ 1,0 - 26,7 $\pm$ 1,3	14,4 $\pm$ 1,5	265,0 $\pm$ 5,0 - 424,0 $\pm$ 7,0	319,8 $\pm$ 6,4
Seyitömer	4	10	10,0 $\pm$ 2,0 - 16,6 $\pm$ 4,5	13,9 $\pm$ 3,2	7,0 $\pm$ 1,3 - 13,0 $\pm$ 1,0	10,3 $\pm$ 1,3	40,4 $\pm$ 5,2 - 289,0 $\pm$ 8,0	105,8 $\pm$ 5,9
	5	20	18,0 $\pm$ 5,0 - 22,8 $\pm$ 8,2	20,4 $\pm$ 4,1	5,4 $\pm$ 1,7 - 15,0 $\pm$ 4,0	11,4 $\pm$ 1,8	56,2 $\pm$ 4,0 - 193,0 $\pm$ 15,0	109,4 $\pm$ 8,2
	4	30	22,0 $\pm$ 2,0 - 40,0 $\pm$ 4,0	28,8 $\pm$ 3,8	5,0 $\pm$ 1,0 - 18,0 $\pm$ 3,0	12,3 $\pm$ 1,8	63,0 $\pm$ 4,0 - 281,0 $\pm$ 3,0	170,0 $\pm$ 7,0



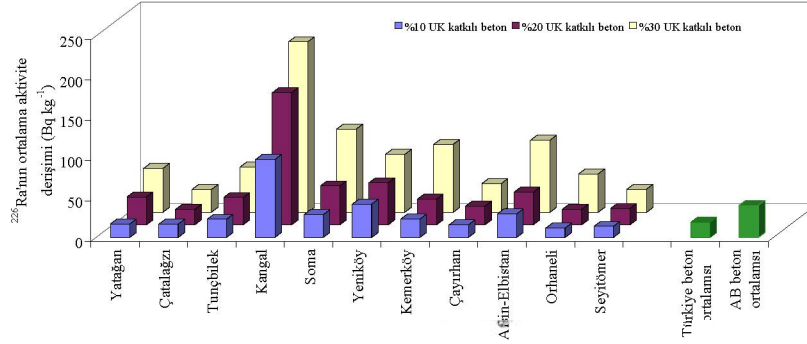
Şekil I UK örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin ortalama aktivite derişimlerinin, AB UK ve yer kabuğu ortalaması ile karşılaştırılması



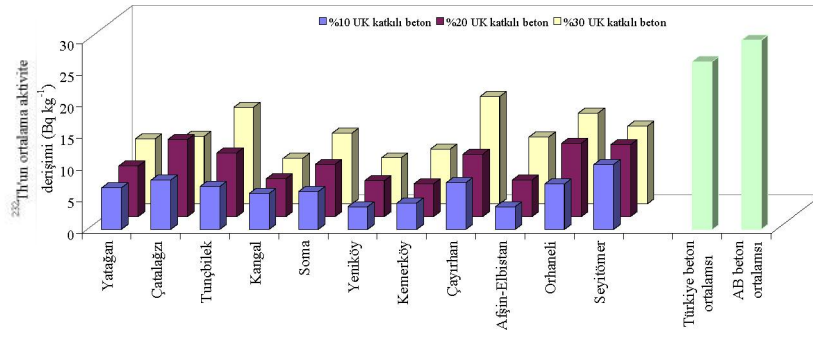
Şekil 2 UK katkılı çimento örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişimlerinin ortalama değeri ile Türkiye çimento ortalamasının karşılaştırılması



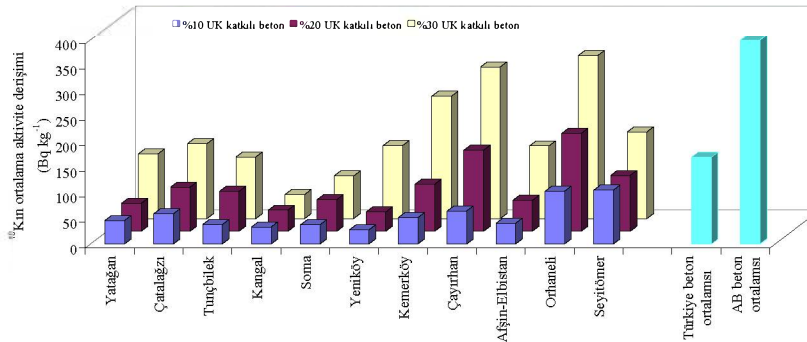
Şekil 3 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K ve Ra_{eq} aktivite derişimlerinin ortalama değeri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması



Şekil 4 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişim değerleri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması



Şekil 5 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişim değerleri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması



Şekil 6 UK katkılı beton örneklerinde ölçülen ^{40}K 'in ortalama aktivite derişim değerleri ile Türkiye ve AB beton ortalamasının karşılaştırılması

3.2 Radyolojik parametrelerin hesaplanması ve değerlendirilmesi

3.2.1 Radyum eşdeğer (Ra_{eq}) aktivite derişimi

Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'ten de görülebileceği gibi incelenen UK ve UK katkılı çimento ve beton örneklerinde ölçülen doğal radyonüklitler düzgün dağılımlı olmayıp aktivite derişimleri, örneklerin temin edildikleri bölgeye bağlı olarak değişmektedir. Bu sebepten dolayı, bu radyonüklitlerden kaynaklanan radyolojik riskleri hesaba katmak ve ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'un aktivite derişim seviyesini temsil etmek amacıyla, aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanan Ra_{eq} aktivite derişimi (veya Ra_{eq} aktivite derişim indisi) türetilmiştir [27].

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43 \cdot A_{Th} + 0,077 \cdot A_K \quad (2)$$

Burada, A_{Ra} , A_{Th} ve A_K , sırasıyla, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın, Bq kg^{-1} cinsinden aktivite derişimidir. İnşaat sektöründe ve geoteknik uygulamalarda kullanılan yapı malzemeleri için tavsiye edilen Ra_{eq} sınır değerleri, Tablo 6'da verilmiştir. OECD-NEA tarafından 1979 yılında yayımlanan raporda, ev ve iş yeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen malzemeler için Ra_{eq} 'nin müsaade edilen en büyük veya sınır değeri, 370 Bq kg^{-1} olarak belirlenmiştir [29]. Yapı malzemeleri için hesaplanan Ra_{eq} aktivite derişim indisinin, sınır değerden küçük veya eşit olması durumunda, bu malzemelerdeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış işinlamadan kaynaklanan yıllık etkin doz değerinin, $1,5 \text{ mSv}$ 'den küçük veya eşit olacağı kabul edilmiştir.

Ölçümü yapılan örnekler için hesaplanan Ra_{eq} değerleri, UK için Tablo 3'ün son sütununda, UK katkılı çimento için Tablo 4'ün son sütununda ve UK katkılı beton için Tablo 7'de verilmiştir. UK örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} değeri, $142,6 \pm 23,9 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $1610,3 \pm 287,0 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında değişmekte iken Ra_{eq} ortalama değeri ($526,3 \pm 62,2$), ev ve iş yeri binaları için tavsiye edilen sınır değerden (370 Bq kg^{-1}) % 40 daha büyük, yol ve köprü yapıları için tavsiye edilen sınır değerden (740 Bq kg^{-1}) ise % 40 daha küçüktür. şekil 7'den de görülebileceği gibi Kangal termik santraline ait UK'ler için hesaplanan Ra_{eq} 'nin ortalama değeri, diğer termik santraller için hesaplanan Ra_{eq} ortalama değerlerinden daha büyük iken Çatalağzı, Çayırhan ve Seyitömer termik santrallerine ait UK'ler için hesaplanan Ra_{eq} 'nin ortalama değerleri, ev ve iş yeri binaları için tavsiye edilen sınır değerden de daha küçüktür.

UK katkılı çimento örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} aktivite derişiminin ortalama değeri, %5 ila %10 UK katkılı çimento örnekleri için $129,4 \text{ Bq kg}^{-1}$, %11 ila %15 katkılı çimento örnekleri için $174,4 \text{ Bq kg}^{-1}$, %20 ila %25 katkılı çimento örnekleri için $241,5 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve %30 ila %35 katkılı çimento örnekleri için $301,3 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak

hesaplanmıştır. UK katkılı çimento örneklerine ilişkin Ra_{eq} ortalama değerleri, Türkiye çimento örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} ortalamasından daha büyüktür; ancak ev ve işyeri binaları için tavsiye edilen sınır değerden daha küçüktür. Şekil 3'ten de görülebileceği gibi %10, %20 ve %30 UK katkılı beton örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} ortalama değerleri, AB beton örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} ortalamasından ve %30 UK katkılı beton örnekleri hariç Türkiye beton örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} ortalamasında daha küçüktür. %10, %20 ve %30 UK katkılı beton örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} ortalama değerleri, ev ve işyeri binaları için tavsiye edilen sınır değerden önemli ölçüde küçüktür.

Tablo 6 Yapı tipleri için tavsiye edilen Ra_{eq} sınır değerleri [28]

Yapı Tipi	Ra_{eq} için tavsiye edilen sınır değerler (Bq kg ⁻¹)
Ev ve iş yeri binaları	< 370
Endüstriyel amaçlı yapılar	370 - 740
Yollar ve köprüler	740 - 2220
Baraj, bent, vb. yapılar	2220 - 3700

3.2.2 Aktivite derişim indisi (I_γ) ve alfa indisi (I_α)

Bu çalışmada, ev ve iş yeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen UK katkılı çimento ve beton örnekleri için aktivite derişim indisi veya gama indisi (I_γ), Avrupa Komisyonu (AK) tarafından 1999 yılında yayımlanan raporda açıklandığı gibi aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [25]:

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{300 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_{Th}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_K}{3000 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (3)$$

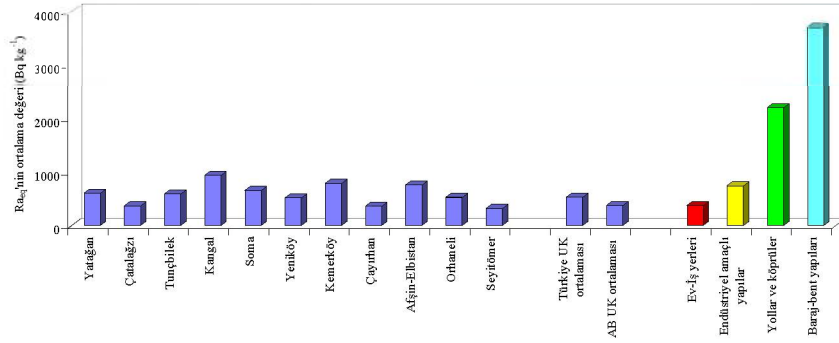
Yol, köprü, vb. geoteknik uygulamalarda kaplama veya dolgu malzemesi olarak kullanılan UK örnekler için I_γ , aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [30]:

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{700 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_{Th}}{500 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{A_K}{8000 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (4)$$

Burada, A_{Ra} , A_{Th} ve A_K , sırasıyla, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq kg⁻¹ cinsinden aktivite derişimidir.

Tablo 7 UK katkılı beton örnekleri için hesaplanan R_{eq} , I_γ ve I_α değerleri

Santral	Kül katkı oranı (%)	R_{eq} ($Bq\ kg^{-1} \pm 1\sigma$)		I_γ		I_α	
		Aralık	Ort. $\pm 1\sigma$	Aralık	Ort. $\pm SS$	Aralık	Ort. $\pm SS$
Yatağan	10	18,5 - 45,0	29,9 $\pm$ 6,1	0,07 - 0,16	0,10 $\pm$ 0,03	0,05 - 0,13	0,08 $\pm$ 0,03
	20	40,9 - 59,1	50,5 $\pm$ 8,2	0,14 - 0,20	0,17 $\pm$ 0,03	0,13 - 0,21	0,17 $\pm$ 0,03
	30	59,4 - 90,6	79,0 $\pm$ 12,0	0,20 - 0,34	0,28 $\pm$ 0,05	0,21 - 0,46	0,27 $\pm$ 0,06
Çatalağzı	10	29,0 - 37,2	32,2 $\pm$ 8,0	0,10 - 0,13	0,11 $\pm$ 0,02	0,08 - 0,09	0,08 $\pm$ 0,04
	20	39,9 - 46,7	43,3 $\pm$ 5,1	0,14 - 0,17	0,15 $\pm$ 0,02	0,09 - 0,10	0,10 $\pm$ 0,02
	30	47,1 - 67,7	54,9 $\pm$ 8,6	0,17 - 0,25	0,20 $\pm$ 0,05	0,13 - 0,16	0,14 $\pm$ 0,02
Tunçbilek	10	30,7 - 46,3	35,2 $\pm$ 6,3	0,11 - 0,16	0,12 $\pm$ 0,02	0,09 - 0,15	0,11 $\pm$ 0,02
	20	42,8 - 61,0	54,5 $\pm$ 9,0	0,15 - 0,22	0,19 $\pm$ 0,02	0,15 - 0,21	0,17 $\pm$ 0,02
	30	75,6 - 111,1	87,6 $\pm$ 9,2	0,26 - 0,38	0,31 $\pm$ 0,04	0,22 - 0,42	0,28 $\pm$ 0,07
Kangal	10	66,3 - 132,8	107,5 $\pm$ 10,2	0,22 - 0,45	0,36 $\pm$ 0,10	0,29 - 0,61	0,48 $\pm$ 0,14
	20	89,6 - 219,6	175,7 $\pm$ 12,4	0,31 - 0,73	0,59 $\pm$ 0,19	0,39 - 1,03	0,82 $\pm$ 0,29
	30	97,0 - 271,4	225,7 $\pm$ 13,1	0,33 - 0,91	0,76 $\pm$ 0,28	0,42 - 1,29	1,06 $\pm$ 0,43
Soma	10	31,1 - 49,6	39,8 $\pm$ 5,8	0,11 - 0,17	0,14 $\pm$ 0,03	0,10 - 0,18	0,14 $\pm$ 0,04
	20	52,7 - 82,3	65,1 $\pm$ 10,6	0,18 - 0,28	0,22 $\pm$ 0,04	0,19 - 0,32	0,24 $\pm$ 0,05
	30	88,8 - 174,2	126,1 $\pm$ 11,4	0,30 - 0,59	0,43 $\pm$ 0,10	0,34 - 0,77	0,52 $\pm$ 0,16
Yeniköy	10	35,6 - 55,6	48,6 $\pm$ 4,8	0,12 - 0,19	0,17 $\pm$ 0,04	0,14 - 0,24	0,21 $\pm$ 0,06
	20	58,8 - 66,7	63,4 $\pm$ 5,1	0,20 - 0,23	0,22 $\pm$ 0,01	0,25 - 0,28	0,26 $\pm$ 0,02
	30	75,0 - 111,1	93,2 $\pm$ 7,3	0,26 - 0,38	0,32 $\pm$ 0,05	0,29 - 0,48	0,36 $\pm$ 0,09
Kemerköy	10	31,2 - 35,8	32,7 $\pm$ 2,2	0,11 - 0,12	0,11 $\pm$ 0,01	0,11 - 0,13	0,11 $\pm$ 0,01
	20	41,8 - 48,0	46,3 $\pm$ 3,0	0,15 - 0,17	0,16 $\pm$ 0,01	0,14 - 0,19	0,16 $\pm$ 0,02
	30	98,8 - 140,6	115,2 $\pm$ 10,3	0,36 - 0,49	0,40 $\pm$ 0,07	0,27 - 0,59	0,42 $\pm$ 0,16
Çayırhan	10	23,4 - 40,6	31,1 $\pm$ 5,4	0,08 - 0,14	0,11 $\pm$ 0,02	0,07 - 0,09	0,08 $\pm$ 0,01
	20	39,5 - 73,2	49,7 $\pm$ 7,7	0,14 - 0,27	0,18 $\pm$ 0,05	0,10 - 0,14	0,12 $\pm$ 0,01
	30	53,5 - 103,7	82,4 $\pm$ 16,4	0,19 - 0,38	0,30 $\pm$ 0,08	0,15 - 0,21	0,18 $\pm$ 0,02
Afşin-E.	10	29,6 - 44,8	37,5 $\pm$ 6,2	0,10 - 0,15	0,13 $\pm$ 0,02	0,11 - 0,17	0,15 $\pm$ 0,03
	20	47,1 - 60,7	53,5 $\pm$ 7,6	0,16 - 0,21	0,18 $\pm$ 0,02	0,18 - 0,23	0,20 $\pm$ 0,02
	30	88,1 - 127,0	115,6 $\pm$ 18,5	0,30 - 0,45	0,40 $\pm$ 0,07	0,35 - 0,55	0,45 $\pm$ 0,10
Orhaneli	10	23,9 - 35,6	29,9 $\pm$ 5,3	0,09 - 0,13	0,11 $\pm$ 0,02	0,05 - 0,07	0,06 $\pm$ 0,01
	20	34,1 - 68,8	50,5 $\pm$ 6,8	0,13 - 0,25	0,19 $\pm$ 0,05	0,08 - 0,14	0,10 $\pm$ 0,03
	30	62,2 - 124,8	93,0 $\pm$ 8,6	0,23 - 0,44	0,34 $\pm$ 0,08	0,15 - 0,32	0,24 $\pm$ 0,08
Seyitömer	10	26,6 - 53,8	36,7 $\pm$ 6,9	0,09 - 0,20	0,13 $\pm$ 0,05	0,05 - 0,08	0,07 $\pm$ 0,01
	20	39,4 - 57,3	45,2 $\pm$ 7,2	0,14 - 0,21	0,16 $\pm$ 0,03	0,09 - 0,11	0,10 $\pm$ 0,01
	30	35,0 - 70,6	59,3 $\pm$ 8,2	0,12 - 0,25	0,21 $\pm$ 0,06	0,11 - 0,20	0,14 $\pm$ 0,04



Şekil 7 UK örnekleri için hesaplanan Ra_{eq} ortalama değerlerinin, Türkiye ve AB UK ortalaması ve tavsiye edilen en yüksek değerler ile karşılaştırılması

Ev ve işyeri binalarında kullanılan yapı malzemelerine ilişkin aktivite derişim indisi, doz ölçütüne, malzemenin yapı içinde kullanılma şekline ve miktarına bağlı olarak Tablo 8'de verilen değerleri aşmamalıdır. $I_\gamma \leq 1$ olduğu durumlarda; UK katkılı yapı malzemeleri, ev iş yeri binalarının inşasında ve UK'ler de kaplama veya dolgu malzemesi olarak yol ve köprü yapımında herhangi bir kısıtlama olmadan kullanılabilir.

Tablo 8 Doz ölçütünün kontrolüne yönelik aktivite derişim indisi değerleri [25]

Doz ölçütü	0,3 mSv y ⁻¹	1 mSv y ⁻¹
Yapısal malzemeler (beton, tuğla, vb.)	$I_\gamma \leq 0,5$	$I_\gamma \leq 1$
Yüzeysel olarak ve sınırlı kullanıma sahip diğer malzemeler (kiremit, vb.)	$I_\gamma \leq 2$	$I_\gamma \leq 6$
Yol, köprü, vb. geoteknik uygulamalarda kaplama veya dolgu malzemeleri (UK, fosfojips, vb.)	$I_\gamma^{(*)} \leq 1$	-

*) Eş. (4) kullanılarak hesaplanmıştır.

Radon (^{222}Rn) ve toron (^{220}Rn), alfa radyasyonu yayınlayan radyonüklitlerdir. Her ikisi de asal gaz olduklarından, yapı malzemeleri gibi gözenekli ortamlarda serbestçe hareket edebilir ve bina veya ev içine nüfuz edebilirler. Binaların temelinde bulunan toprak, en önemli ^{222}Rn ve ^{220}Rn kaynağıdır; ancak bazı durumlarda, binaların inşasında kullanılan yapı malzemeleri de ^{222}Rn ve ^{220}Rn

kaynağı hâline gelebilir. Bununla birlikte ^{220}Rn , yarılanma süresinin (55,6 s) çok kısa ve derişiminin de düşük olması nedeniyle genellikle radyolojik değerdendirmelerde dikkate alınmaz.

^{222}Rn ve kısa ömürlü bozunum ürünlerinin solunum yolu ile vücuda girmesi, yapı malzemelerinin kullanılmasından kaynaklanan iç ışınlamaya sebep olur. AK tarafından 1990 yılında yayımlanan tavsiye kararında bina veya yapı içi radon derişim sınırı, eski binalar için 400 Bq m^{-3} ve yeni binalar için ise 200 Bq m^{-3} olarak belirlenmiştir [31].

^{222}Rn gazının solunmasından kaynaklanan alfa ışınlarının sebep olduğu iç ışınlama doz değerdendirilmesinde, alfa indisi ($I\alpha$) esas alınmış ve aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmıştır [32]:

$$I\alpha = \frac{A_{\text{Ra}}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (5)$$

Burada, A_{Ra} , ^{226}Ra 'nın Bq kg^{-1} cinsinden aktivite derişimidir. $I\alpha > 1$ olması durumunda, yapı içine ilişkin ^{222}Rn aktivite derişim sınırının (200 Bq m^{-3}) 'ün aşılması olasıdır.

Ölçme işlemine tabi tutulan örnekler için hesaplanan $I\gamma$ ve $I\alpha$ değerdeleri, UK katkılı beton örnekleri için Tablo 7'de, UK katkılı çimento örnekleri için Tablo 9'da ve UK örnekleri için Tablo 10'da verilmiştir. %10, %20 ve % 30 UK katkılı beton örneklerine ilişkin $I\gamma$ 'nin ortalama değerdeleri (en küçük ve en büyük değerdeleri ile birlikte), sırasıyla, $0,15 \pm 0,07$ (0,10-0,37), $0,22 \pm 0,13$ (0,15-0,59) ve $0,36 \pm 0,15$ (0,20-0,75) olarak hesaplanmıştır. Şekil 8'den görülebileceğı gibi bu ortalama değerdeler, yapısal malzemeler için tavsiye edilen ölçüt değerdere olan 1'den çok küçüktür. Kangal dışındaki termik santrallere ait % 10 ve % 20 UK katkılı beton örneklerine ilişkin $I\gamma$ ortalama değerdeleri, 0,5 değerdereinden de küçüktür. Çatalağı ve Seyitömer termik santraline ait % 30 UK katkılı beton örneklerine ait $I\gamma$ ortalama değerdeleri de 0,5'den daha küçük iken Kangal dışındaki diğerdere termik santrallere ait $I\gamma$ ortalama değerdeleri, 1'den daha küçüktür (Şekil 9'a bakınız).

%5-%10, %11-%15, %20-%25 ve %30-%35 UK katkılı çimento örnekleri için hesaplanan $I\gamma$ ortalama değerdeleri (en küçük ve en büyük değerdeleri ile birlikte), sırasıyla, $0,46 \pm 0,09$ (0,32-0,58), $0,61 \pm 0,11$ (0,43-0,79), $0,83 \pm 0,32$ (0,39-1,57) ve $1,03 \pm 0,24$ (0,54-1,68) dir. %5 ila %25 UK katkılı çimento önekdereine ait $I\gamma$ ortalama değerdeleri, 1'den küçük iken %30-%35 UK katkılı çimento önekdereine ait $I\gamma$ ortalama değerdere, 1'e yakındır (Şekil 8).

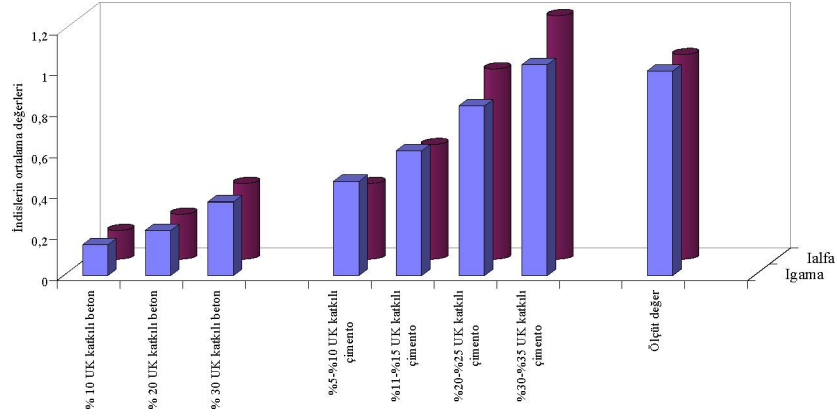
Tablo 9 UK katkılı çimento örneklerine ilişkin I_γ , I_α , D_{10} ve H_{10} değerleri

Kül katkı oranı (%)		I_γ	I_α	D_{10} (nGy h ⁻¹)	H_{10} (mSv y ⁻¹)
5-10	Aralık	0,3 - 0,6	0,2 - 0,7	77,3 - 152,9	0,38 - 0,75
	Ort. $\pm$ SS	0,5 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,2	116,3 $\pm$ 27,2	0,57 $\pm$ 0,13
11-15	Aralık	0,4 - 0,8	0,2 - 1,0	102,8 - 210,5	0,51 - 1,04
	Ort. $\pm$ SS	0,6 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,3	156,7 $\pm$ 33,3	0,77 $\pm$ 0,16
20-25	Aralık	0,4 - 1,6	0,2 - 2,2	97,6 - 425,9	0,54 - 2,09
	Ort. $\pm$ SS	0,8 $\pm$ 0,3	0,9 $\pm$ 0,3	218,3 $\pm$ 60,3	1,07 $\pm$ 0,25
30-35	Aralık	0,5 - 1,7	0,3 - 2,3	134,4 - 457,1	0,66 - 2,25
	Ort. $\pm$ SS	1,0 $\pm$ 0,2	1,2 $\pm$ 0,4	272,6 $\pm$ 59,1	1,34 $\pm$ 0,48

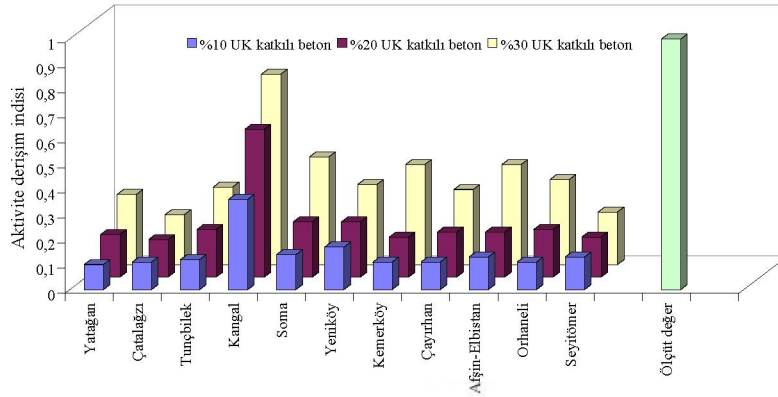
Tablo 10 UK örneklerine ilişkin I_γ , D_{DO} ve H_{DO} değerleri

Malzeme	N	I_γ ^{a)}		D_{DO} (nGy h ⁻¹)		H_{DO} (mSv y ⁻¹)	
		Aralık	Ort. $\pm$ SS	Aralık	Ort. $\pm$ SS	Aralık	Ort. $\pm$ SS
Yatağan	28	0,6 - 1,6	0,9 $\pm$ 0,2	200,9 - 502,3	274,2 $\pm$ 64,6	0,2 - 0,6	0,34 $\pm$ 0,08
Çatalağzı	13	0,3 - 1,0	0,5 $\pm$ 0,2	105,7 - 312,2	168,5 $\pm$ 49,4	0,1 - 0,4	0,21 $\pm$ 0,06
Tunçbilek	23	0,6 - 1,3	0,8 $\pm$ 0,2	176,9 - 410,1	265,1 $\pm$ 73,2	0,2 - 0,5	0,33 $\pm$ 0,09
Kangal	6	0,4 - 1,8	1,3 $\pm$ 0,6	119,3 - 591,0	430,4 $\pm$ 191,1	0,1 - 0,7	0,53 $\pm$ 0,23
Soma	28	0,3 - 2,3	0,9 $\pm$ 0,5	366,2 - 738,4	297,3 $\pm$ 148,1	0,8 - 0,9	0,37 $\pm$ 0,18
Yeniköy	10	0,3 - 1,4	0,7 $\pm$ 0,3	97,8 - 447,6	237,0 $\pm$ 104,2	0,1 - 0,6	0,29 $\pm$ 0,13
Kemerköy	5	0,5 - 1,7	1,1 $\pm$ 0,5	174,0 - 554,8	362,8 $\pm$ 147,4	0,2 - 0,7	0,45 $\pm$ 0,18
Çayırhan	6	0,2 - 1,0	0,5 $\pm$ 0,3	64,7 - 315,8	164,1 $\pm$ 83,2	0,1 - 0,4	0,20 $\pm$ 0,10
Afşin-E.	6	0,4 - 2,0	1,1 $\pm$ 0,6	117,3 - 636,3	347,6 $\pm$ 197,6	0,1 - 0,8	0,43 $\pm$ 0,24
Orhaneli	10	0,4 - 1,1	0,8 $\pm$ 0,2	120,2 - 336,8	238,8 $\pm$ 61,8	0,1 - 0,4	0,29 $\pm$ 0,24
Seyitömer	42	0,2 - 1,0	0,5 $\pm$ 0,1	75,7 - 310,3	143,9 $\pm$ 44,8	0,1 - 0,4	0,18 $\pm$ 0,06

^{a)} Eş. (4) kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 8 UK katkılı çimento ve beton örneklerine ait I_γ ve I_α ortalama değerleri ile tavsiye edilen ölçüt değerlerin karşılaştırılması

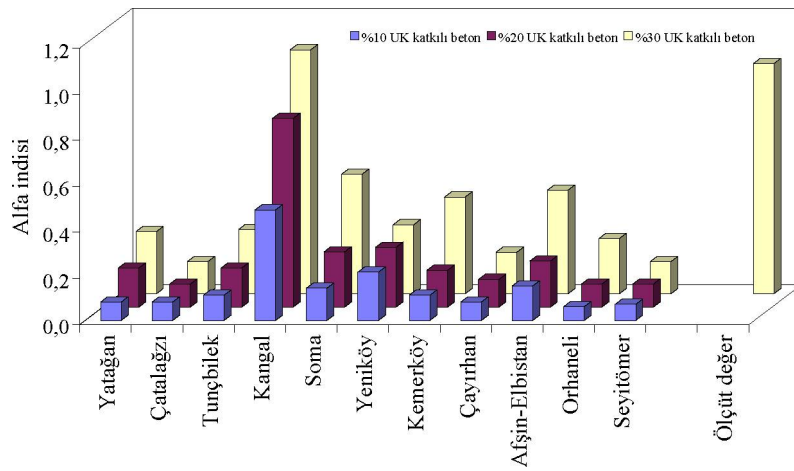


Şekil 9 UK katkılı çimento örneklerine ait I_γ değerleri ile tavsiye edilen ölçüt değerin karşılaştırılması

UK örnekleri için Eş. (4) kullanılarak hesaplanan I_γ değerleri 0,2 ile 2,3 aralığında iken, ortalama değer ($0,8 \pm 0,4$), 1'den küçüktür. Kangal termik santraline ait UK örneklerine ilişkin I_γ ortalama değeri, ölçüt değerden %30 daha büyük iken, diğere termik santrallere ait I_γ ortalama değerleri, ölçüt değere yakın veya daha küçüktür.

%10, %20 ve % 30 UK katkılı beton örnekleri için hesaplanan I_α ortalama değerleri, ölçüt değer 1'den yaklaşık olarak 3 ila 7 kate daha küçüktür.

termik santraline ait % 30 UK katkılı beton örnekleri için hesaplanan α ortalama değeri ($1,06 \pm 0,43$), 1'e yakındır (Şekil 8 ve Şekil 10' a bakınız). %20-%25 UK katkılı çimento örnekleri için hesaplanan α ortalama değeri ($1,1 \pm 0,5$), 1'e yakınken %30-%35 UK katkılı çimento örnekleri için hesaplanan α ortalama değeri ($1,3 \pm 0,8$), ölçüt değerden %30 daha büyüktür. Diğer UK, UK katkılı beton ve çimento örnekleri için hesaplanan α ortalama değerler ölçüt değerden küçük olduklarından, bu malzemelerden kaynaklanan radon gazı derişiminin, 200 Bq m^{-3} 'ü aşması beklenmez.



Şekil 10 UK katkılı beton örneklerine ait α değerleri ile tavsiye edilen ölçüt değerini karşılaştırılması

3.2.3 Yapı içinde ve dışında soğurulan gama doz hızı ve etkin doz hızı

Bu çalışmada, yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklanan soğurulmuş gama doz hızı, yapı içi (iç ortam) ve yapı dışı (dış ortam) olmak üzere iki farklı ortam için değerlendirilmiştir. UK'lerin depolandığı veya kaplama veya dolgu malzemesi olarak kullanıldığı dış ortamda (DO) ve yapısal malzeme olarak UK katkılı çimento ve betonun kullanıldığı ev ve işyeri binalarındaki iç ortamda (İO) yerden 1 m yükseklikte havada soğurulan gama doz hızları (D_{DO} ve D_{IO}), ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin düzgün dağılım gösterdikleri kabul edilerek ve bu radyonüklitlere ilişkin doz dönüşüm kat sayıları; DO için $0,462 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ (^{226}Ra için), $0,604 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ (^{232}Th için) ve $0,0417 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ (^{40}K için) ve İO için $0,92 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ (^{226}Ra için), $1,1 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ (^{232}Th için) ve $0,08 \text{ nGy h}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$ (^{40}K için) alınarak aşağıdaki eşitlikler ile değerlendirilmiştir [33-34]:

$$D_{DO} (nGy h^{-1}) = 0,462 \times A_{Ra} + 0,604 \times A_{Th} + 0,0417 \times A_K \quad (6)$$

$$D_{IO} (nGy h^{-1}) = 0,92 \times A_{Ra} + 1,1 \times A_{Th} + 0,08 \times A_K \quad (7)$$

Burada A_{Ra} , A_{Th} ve A_K ; ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in sırasıyla, Bq kg⁻¹ cinsinden aktivite derişimidir.

Dış ve iç ortamdaki etkin doz hızları (H_{DO} ve H_{IO}), dış ve iç ortamdaki havada soğurulan gama dozundan etkin doza dönüşüm kat sayısı 0,7 Sv Gy⁻¹ alınarak ve insanların zamanının % 20'sini dış ortamda, % 80'nini ise yapı içinde (kapalı mekânlarda) geçirdiği kabul edilerek aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmıştır:

$$H_{DO} (mSv y^{-1}) = D_{DO} (nGy h^{-1}) \times 365,25 \text{ gün} \times 24 \text{ h} \times 0,2 \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 10^{-6} \quad (8)$$

$$H_{IO} (mSv y^{-1}) = D_{IO} (nGy h^{-1}) \times 365,25 \text{ gün} \times 24 \text{ h} \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 10^{-6} \quad (9)$$

Burada, $D_{DO} (nGy h^{-1})$ ve $D_{IO} (nGy h^{-1})$, Eş. (6) ve Eş. (7)'de verilen soğurulmuş gama doz hızlarıdır.

UK katkılı çimento örnekleri için değerlendirilen D_{IO} ve H_{IO} sonuçları, Tablo 9'un; UK örnekleri için değerlendirilen D_{DO} ve H_{DO} sonuçları, Tablo 10'un son iki sütununda ve UK katkılı beton örnekleri için değerlendirilen D_{IO} ve H_{IO} sonuçları ise Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11 UK katkılı beton örneklerine ilişkin D_{IO} ve H_{IO} değerleri

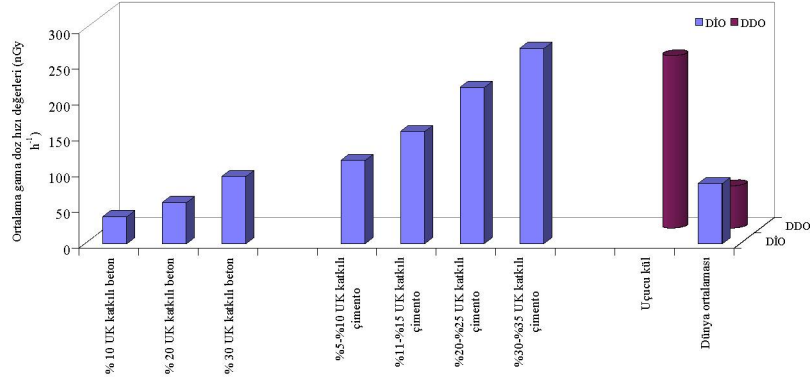
Santral	Kül katkı oranı (%)	$D_{IO} (nGy h^{-1})$		$H_{IO} (mSv y^{-1})$	
		Aralık	Ort. $\pm$ SS	Aralık	Ort. $\pm$ SS
Yatağan	10	16,5 - 40,3	26,5$\pm$8,6	0,08 - 0,20	0,13$\pm$0,04
	20	36,3 - 53,1	45,2$\pm$7,4	0,18 - 0,26	0,22$\pm$0,04
	30	53,0 - 84,8	71,6$\pm$11,1	0,26 - 0,42	0,35$\pm$0,05
Çatalağzı	10	26,2 - 32,2	28,5$\pm$3,2	0,13 - 0,16	0,14$\pm$0,02
	20	35,5 - 40,5	38,0$\pm$3,5	0,17 - 0,20	0,19$\pm$0,02
	30	42,2 - 61,6	49,5$\pm$10,6	0,21 - 0,30	0,24$\pm$0,05
Tunçbilek	10	7,0 - 41,1	31,3$\pm$4,8	0,13 - 0,20	0,15$\pm$0,02

Santral	Kül katkı oranı (%)	D _{io} (nGy h ⁻¹)		H _{io} (mSv y ⁻¹)	
		Aralık	Ort. ± SS	Aralık	Ort. ± SS
	20	39,1 - 53,9	48,7±5,1	0,19 - 0,27	0,24±0,02
	30	68,6 - 99,7	78,4±10,8	0,34 - 0,49	0,39±0,05
Kangal	10	60,3 - 121,3	98,0±26,6	0,30 - 0,59	0,48±0,13
	20	81,3 - 200,9	160,7±54,2	0,40 - 0,98	0,79±0,26
	30	88,1 - 248,6	206,6±78,3	0,44 - 1,22	1,02±0,39
Soma	10	27,7 - 44,5	35,6±7,1	0,14 - 0,22	0,18±0,03
	20	47,3 - 74,5	58,7±9,6	0,23 - 0,37	0,29±0,05
	30	79,9 - 159,0	114,4±27,2	0,39 - 0,78	0,56±0,13
Yeniköy	10	32,2 - 50,5	44,2±10,4	0,16 - 0,25	0,22±0,05
	20	53,7 - 60,5	57,5±3,5	0,26 - 0,30	0,28±0,02
	30	67,7 - 101,3	85,5±13,9	0,33 - 0,50	0,42±0,07
Kemerköy	10	28,4 - 32,4	29,7±1,9	0,14 - 0,16	0,15±0,01
	20	37,6 - 44,0	42,3±3,2	0,18 - 0,22	0,21±0,02
	30	91,0 - 129,9	106,4±20,7	0,45 - 0,64	0,52±0,10
Çayırhan	10	21,1 - 35,0	27,7±4,5	0,10 - 0,17	0,14±0,02
	20	36,3 - 66,3	45,0±11,0	0,18 - 0,33	0,22±0,05
	30	49,1 - 92,9	74,9±17,7	0,24 - 0,46	0,37±0,09
Afşin-E.	10	26,8 - 40,5	34,1±5,6	0,13 - 0,20	0,17±0,03
	20	42,8 - 54,9	48,6±5,0	0,21 - 0,27	0,24±0,02
	30	80,5 - 115,1	105,4±16,7	0,40 - 0,57	0,52±0,08
Orhaneli	10	22,3 - 32,2	26,9±4,3	0,11 - 0,16	0,13±0,02
	20	32,0 - 61,1	45,8±13,0	0,16 - 0,30	0,23±0,06
	30	58,5 - 111,7	85,4±20,5	0,29 - 0,55	0,42±0,10
Seyitömer	10	23,0 - 49,4	32,5±11,9	0,11 - 0,24	0,16±0,06
	20	35,7 - 51,3	40,1±6,4	0,18 - 0,25	0,20±0,03
	30	31,7 - 62,6	53,5±14,7	0,16 - 0,31	0,26±0,07

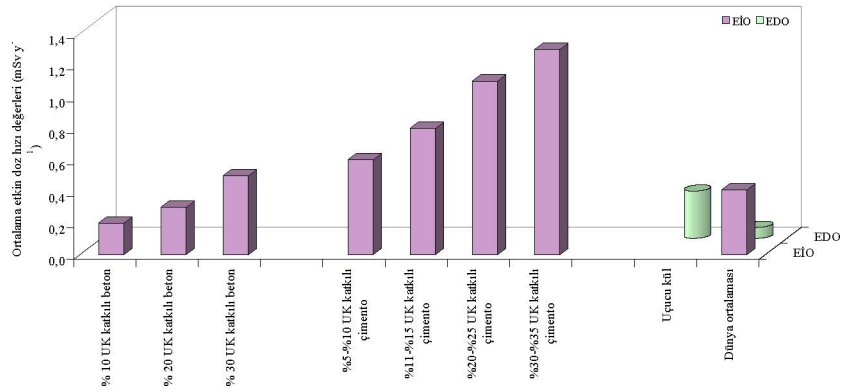
UNSCEAR (2000) raporunda, yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamanın sebep olduğu iç ve dış ortamda soğurulan gama dozu hızı ve etkin doz hızının nüfus ağırlıklı dünya ortalaması, sırayla, 84 nGy h^{-1} ; $0,41 \text{ mSv y}^{-1}$ ve 59 nGy h^{-1} ; $0,07 \text{ mSv y}^{-1}$ olarak verilmiştir [1]. AK tarafından 1999 yılında yayımlanan raporda, ev ve işyeri binalarında kullanılan yapı malzemelerinde doğal olarak mevcut olan radyonüklitlerden kaynaklanan gama radyasyonu sebebiyle halkın maruz kaldığı etkin doz hızı için uygulama sınırı veya doz hızı sınırı olarak 1 mSv y^{-1} tavsiye edilmiştir [25]. Aynı zamanda raporda bu tür yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi gama radyasyonu, bireylerin doğal yollarla aldıkları yıllık etkin dozu en fazla $0,3 \text{ mSv y}^{-1}$ kadar artırıyorrsa söz konusu malzemelerin, radyoaktivite ile ilgili bütün sınırlamalardan muaf olacağı kabul edilmiştir.

İncelenen örnekler için değerlendirilen D_{IO} , D_{DO} , H_{IO} ve H_{DO} değerlerinin, dünya ortalama değerleri ile karşılaştırılması, Şekil 11'de ve her bir termik santral için karşılaştırılması ise Şekil 12'de gösterilmiştir. %5-%35 UK katkılı çimento örneklerine ilişkin D_{IO} ortalama değerleri, 84 nGy h^{-1} 'den 1,4 ila 3,2 kat daha büyüktür. UK katkılı çimento örneklerine ilişkin H_{IO} değerleri, %5-%10 UK katkılı örnekler için 1 mSv y^{-1} 'den daha küçük; %10-%15 ve %20-%25 UK katkılı çimento örnekleri için bu değere yakın ve %30-%35 UK katkılı örnekler için ise bu değerden % 30 daha büyüktür. UK örnekleri için değerlendirilen D_{DO} ortalama değeri ($240,8 \text{ nGy h}^{-1}$), 59 nGy h^{-1} 'den, H_{DO} ortalama değeri ise ($0,30 \text{ mSv y}^{-1}$) ise $0,07 \text{ mSv y}^{-1}$ 'den 4 kata daha büyüktür. UK katkılı beton örnekleri için değerlendirilen D_{IO} değerleri, %10 ve %20 UK katkılı beton örnekleri için 84 nGy h^{-1} 'den daha küçük ve % 30 UK katkılı beton örnekli için ise biraz daha büyüktür. Kangal termik santraline ait %30 UK katkılı beton örneklerine ilişkin ortalama H_{IO} değeri, tavsiye edilen sınır değere (1 mSv y^{-1}) yakinken diğer UK katkılı beton örneklerine ilişkin ortalama H_{IO} değerlerinin büyük bir kısmı muafiyet ölçüt değerinden ($0,33 \text{ mSv y}^{-1}$) de küçüktür.

a)

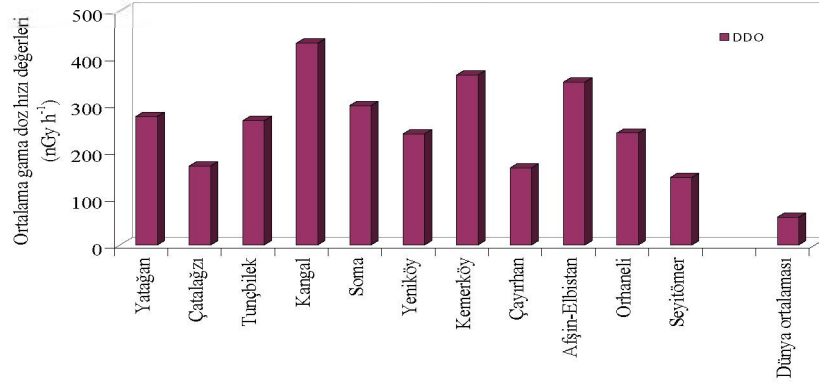


b)

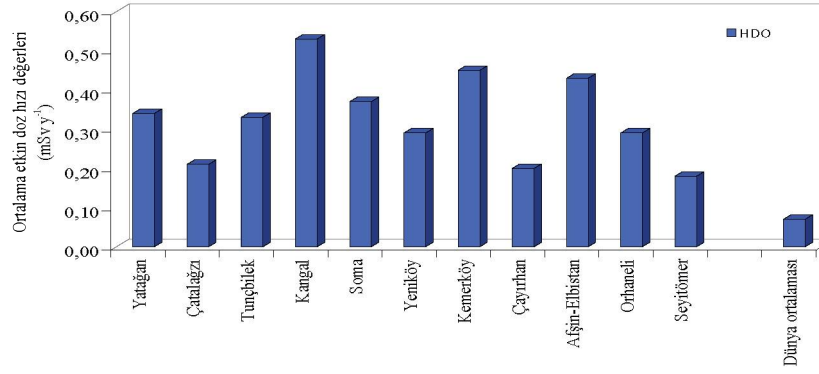


Şekil 11 İncelenen örnekler için değerlendirilen D_{DO} ve D_{IO} (a) ve H_{IO} ve H_{DO} (b) değerlerinin, dünya ortalama değerleri ile karşılaştırılması

a)



b)



Şekil 12 Her bir termik santrale ait UK örnekler için değerlendirilen D_{DO} (a) ve H_{DO} (b) değerlerinin, dünya ortalama değerleri ile karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu rapora esas teşkil eden çalışmalarda, Türkiye’de çalışır durumda olan 11 adet kömür yakıtlı termik santrallerinden elde edilen 177 adet UK ve UK’lerin yaygın olarak kullanıldığı çimento ve hazır beton endüstrisinden temin edilen 182 adet UK katkı çimento ve beton örneklerin her birinde doğal olarak var olan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin aktivite derişimleri ölçülmüştür. Aktivitesi ölçülen bu malzemelerden kaynaklanabilecek radyolojik riskin değerlendirilmesi amacıyla radyum eşdeğer aktivite, aktivite derişim indisi (gama indisi), alfa indisi, bu malzemelerdeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlama sonucunda iç ve dış ortamda soğurulan gama doz hızı ve etkin doz hızı hesaplanmıştır. Tablo 12’de, incelenen örneklerle ilişkin olarak ölçülen ve hesaplanan bu radyolojik parametreler, ilgili ortalama ve sınır veya ölçüt değerler özet hâlinde sunulmuştur. Ölçme sonuçları, UK ile UK katkı çimento ve beton örneklerindeki mevcut olan radyonüklitlerin aktivite derişimleri arasında kayda değer farklılıkların olduğunu göstermiştir. %10 UK katkı beton örnekleri hariç, diğer UK katkı beton ve çimento örneklerindeki ^{226}Ra ’nın ortalama aktivite derişiminin, yer kabuğu ve AB beton ortalamasından daha büyük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, ^{232}Th ve ^{40}K ’ın ortalama aktivite derişimi, yer kabuğu ortalama değeri ile Türkiye ve AB ortalama değerlerinden genelde daha küçüktür. Daha önce de bahsedildiği gibi ülkemizde mevcut kömür yakıtlı termik santrallerden elde edilen UK, CEM II Portland uçucu küllü çimento üretiminde, %6 ila %35 oranında, beton ve tuğla üretiminde ise en yüksek %30 oranında katkı malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra yol, köprü ve baraj yapımında da dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. R_{eq} aktivite derişim indisi ölçütü olarak alındığında, UK katkı çimento ve beton örnekleri için hesaplanan R_{eq} ortalama değerleri, 370 Bq kg^{-1} ve UK örnekleri için hesaplanan R_{eq} ortalama değeri ise 740 Bq kg^{-1} den daha düşük olduğundan, UK’lerin, yol, köprü ve baraj yapımında; %5 ila %35 oranında UK katkı çimento ve %10 ila %30 oranında UK katkı betonun yapı malzemesi olarak kullanılmasının, radyolojik açıdan herhangi bir tehlike oluşturmayacağı açıktır. Ancak 19 yıl önce teklif edilen ve yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi etkin doz sınırının $1,5 \text{ mSv y}^{-1}$ olarak kabul edildiği bu indis yerine son yıllarda yapı içi etkin doz sınırının, 1 mSv y^{-1} olarak kabul edildiği aktivite derişim indisi (I_y) kullanılmaktadır. %30 ila %35 oranında UK katkı çimento örneklerine ait ortalama I_y değeri ($1,0 \pm 0,2$), ölçüt değeri olan 1’e eşit değerde iken, diğer bütün UK katkı çimento ve beton örnekleri için hesaplanan ortalama I_y değerleri,

I'den daha küçüktür. Aynı zamanda %30 ila %35 oranında UK katkılı çimento örneklerine ait ortalama I_{α} değeri ($1,2 \pm 0,4$), ölçüt değeri olan I'den %20 daha büyük iken, diğer bütün UK katkılı çimento ve beton örnekleri için hesaplanan ortalama I_{α} değerleri, I'den daha küçüktür. Bu durum, UK katkı oranı %35'ten daha fazla olan UK'lü çimentonun radyolojik kontrolden geçirilmeden yapısal malzeme olarak ev ve işyeri binalarının yapımında kullanılmasının sınırlandırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Aynı şekilde Kangal termik santraline ait %30 UK katkılı beton örnekleri için hesaplanan I_{α} değeri ($1,06 \pm 0,43$), I'den ve UK örnekler için hesaplanan ortalama I_{γ} değeri ise, yol ve köprü yapımı için tavsiye edilen değerden %30 daha büyüktür. Bu sebepten dolayı, Kangal termik santralinden temin edilen UK'lerin beton içindeki katkı oranı %30'u aşmamalı ve UK'ler de yol ve köprü yapımında kaplama malzemesi yerine baraj ve bent yapımında dolgu maddesi olarak kullanılmalıdır.

Sadece Kangal termik santraline ait %30 UK katkılı örnekleri için değerlendirilen yapı içi etkin doz hızı (H_{IO}) ortalama değeri ($1,02 \text{ mSv y}^{-1}$) dışında, %10 ila %20 oranında UK katkılı beton örnekleri için değerlendirilen ortalama H_{IO} değerleri, $0,3 \text{ mSv y}^{-1}$ 'den bile daha küçük iken %30 UK katkılı beton örnekleri için değerlendirilen ortalama H_{IO} değerleri, tavsiye edilen en büyük değer olan 1 mSv y^{-1} 'in altındadır.

Dış ortamda, UK'lerin depolandığı alanlarda, UK'lerdeki doğal radyonüklitlerden kaynaklanan gama doz hızının (D_{DO}) ortalama değerinin ($240,8 \text{ nGy h}^{-1}$), dünya ortalamasından (59 nGy h^{-1}) 4 kat daha büyük olması, depoda çalışan görevlilerin, UK'lerden dolayı dünya ortalamasından dört kat daha fazla ilave doz alacağı gerçeğine götürmektedir. Bu durumda, UK deposunda çalışan görevlilerin aldıkları doz takip edilmeli ve doz kontrolleri dönemsel olarak yapılmalıdır.

Sonuç olarak, UK katkı oranı %35'i aşmadığı takdirde, UK katkılı çimento örneklerinin ve Kangal termik santraline ait UK'ün %30'dan daha büyük oranda katılmadığı takdirde, UK katkılı beton örneklerinin, inşaat sektöründe yapısal malzeme olarak kullanılmalarının radyolojik açıdan herhangi bir sakınca oluşturmayacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca Kangal termik santraline ait UK örneklerinin baraj ve bent yapımında dolgu maddesi olarak diğer on termik santraline ait UK örneklerinin de yol ve köprü yapımında kaplama veya dolgu malzemesi olarak kullanılmasının, radyolojik açıdan herhangi bir sakıncası olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 12 İncelenen örneklere ilişkin ortalama değerler, yer kabuğu, Türkiye ve AB ortalama değerleri ve ölçüt veya sınır değerler

	Radyolojik parametreler									
	²²⁶ Ra (Bq kg ⁻¹)	²³² Th (Bq kg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bq kg ⁻¹)	Ra _{eq} (Bq kg ⁻¹)	I _γ	I _α	D ₁₀ (nGy h ⁻¹)	D ₁₀₀ (nGy h ⁻¹)	H ₁₀ (mSv y ⁻¹)	H ₁₀₀ (mSv y ⁻¹)
UK	354,4	96,2	485,9	526,3	1,8	1,8	-	240,8	-	0,30
UK katkılı çimento										
%5-%10	74,6	24,3	261,0	129,4	0,5	0,4	116,3	-	0,57	-
%11-%15	111,1	29,5	275,5	174,4	0,6	0,6	156,7	-	0,77	-
%20-%25	185,5	27,4	219,8	241,5	0,8	0,9	218,3	-	1,07	-
%30-%35	238,0	31,5	237,8	301,3	1,0	1,2	272,6	-	1,34	-
UK katkılı beton										
%10	28,7	6,3	55,4	41,9	0,15	0,14	37,7	-	0,20	-
%20	44,4	8,6	88,6	63,4	0,22	0,22	57,3	-	0,30	-
%30	73,9	11,4	167,1	102,9	0,36	0,37	93,8	-	0,40	-
Yer kabuğu ort.	32	45	420	-	-	-	84	59	0,41	0,07
AB ort.										
UK	180	100	650	-	-	-	-	-	-	-
Beton	40	30	400	113,6	-	-	-	-	-	-
Türkiye ort.										
Çimento	43,0	26,3	265,2	101,0	-	-	-	-	-	-
Beton	18,8	26,6	170,1	69,9	-	-	-	-	-	-
Sınır değerler	-	-	-	370	1	1	-	-	1	-

5. KAYNAKLAR

1. UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations Publication, New York, USA.
2. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu web sayfası, <http://www.tki.gov.tr/default.asp>
3. Yıllık Rapor, 2006, Elektrik Üretim A.Ş., Ankara
4. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, MTA, 2002, Türkiye tersiyer kömürlerinin kimyasal ve teknolojik özellikleri, Ankara.
5. International Energy Agency, Energy Policies of IEA Countries, Turkey 2005 Review, OECD/IEA 2005.
6. Demir İ., 2005. Uçucu külün hafif yapı malzemesi üretiminde kullanılması. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1, 21-24.
7. Baxter, M.S., 1993. Environmental radioactivity: a perspective on industrial contributions. IAEA Bulletin 35 (2), 33–38.
8. Aruntaş H.Y., 2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. Gazi. Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 21 (1), 193-203.
9. Ural S., 2005, Comprasion of fly ash properties from Afsin-Elbistan coal basin, Turkey. J. Hazardous Materials B119, 85-92.
10. Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998. Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu. TÇMB/AR-GE/Y 98.3, Ankara.
11. Carlson, C. L., Andriano, D.C., 1993. Environmental impacts of coal combustion residues. J. Environ. Qual. 22, 227-247.
12. Karaman S., 2007, Tarımsal yapılarda kullanılan hafif inşaat malzemeleri. HR.Ü. Z. F. Dergisi 11 (1/2), 63-69.
13. Güzel, G. A., 1993. Pomza katkılı tuğla üretimi ve bu tuğlaların mekanik ve boşluk özelliklerinin incelenmesi. Doktora tezi. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 239 sayfa, İstanbul.

14. Karayiğit, A.I, Onacak, T., Gayer R.A., Goldsmith, S., 2001. Mineralogy and geochemistry of feed coals and their combustion residues from the Cayirhan power plant, Ankara, Turkey. *Appl. Geochem.* 16, 911-919.
15. Demirbaş A., Aslan, A., 1999. Evaluation of lignite combustion residues as cement additives. *Cem. Concr Res* 29, 983-987.
16. Demirbaş A., Karslıoğlu, A., Ayas, A., 1995. Utilization of lignite ash in concrete mixture. *Cem. Concr Res.* 25, 1610-1614.
17. Sezer, A., Gözde, İ., Yılmaz, H. R., Ramyar, K., 2006. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Build. Environ.* 41, 150-155.
18. Kula, I., Olgun A., Erdogan Y., Sevinc, V. 2001. Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement. *Cem. Concr. Res.* 31, 491-494.
19. Felekoglu, B., 2006. Utilisation of Turkish fly ashes in cost effective HVFA concrete production. *Fuel* 85, 1944-1949
20. Aytekin, H., Bayata, S., Baldık, R., Çelebi, N., 2007, Radon measurements in the Çatalağzı thermal power plant, Turkey. *Radiat. Protec. Dosi.* 1-3, doi:10.1093/rpd/ncm332.
21. Uğur, A., Özden, B., Saç, M. M., Yener G., 2003. Biomonitoring of ^{210}Po and ^{210}Pb using lichens and mosses around a uraniumiferous coal-fired power plant in western Turkey. *Atmos. Environ.* 37, 2237-2245.
22. Aycik, G. A., Ercan, A., 1997. Radioactivity measurements of coals and ashes from coal-fired power plants in the southwestern part of Turkey. *J. Environ. Radioactivity*, 35(1), 23-35.
23. Cevik, U., Damla, N., Nezir, S., 2007. Radiological characterization of Cayirhan coal-fired power plant in Turkey, *Fuel* 86, 2509-2513
24. Turhan, Ş., Yücel, H., Gündüz, L., Şahin, Ş., Vural, M., Parmaksız A., Demircioğlu B., 2007. Natural radioactivity measurement in pumice samples used raw materials in Turkey. *Appl. Radiat. Isot.* 65, 350-354.
25. EC (European Commission), 1999. Radiation protection 112- Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate- General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
26. Turhan, Ş., Gürbüz, G., Ertün T., Kent S., Vural M., Parmaksız A., 2007.

Radiometric Analysis of Cement and its Raw Materials. Proceedings of Third International Symposium-Sustainability in Cement and Concrete, 123-135, Istanbul, 21-23 May.

27. TAEK-RSGD-I, 2008, Türkiye'de kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktiviteden kaynaklanan radyasyon dozunun değerlendirilmesi, Ankara.
28. Oresangun, M. O., Babalola, A.I., 1988. Annual indoor dose burden estimates in dwellings built in Nigeria with radioactive U-Th rich tailing. In: Proceedings of an International Conference on Radiation Protection in Nuclear Energy, Vol.2. 159-166, 18-22 April, IAEA, Vienna.
29. OECD-NEA, 1979. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency (NEA), Paris.
30. STUK, 2003. The radioactivity of building materials and ash, GUIDE ST 12.2.
31. EC (European Commission), 1990. Commission recommendation 90/143/ Euratom of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. Official Journal L-80 of 27/03/90. European Commission, Brussels.
32. Krieger, V. R., 1981. Radioactivity of construction materials. Betonwerk Fertigteil Technology, 47, 468.
33. Papastefanou, C., Stoulos, S., Manolopoulou, M., 2005. The radioactivity of building materials. J. Radioanal. Nucl. Chem. 266 (3), 367-372.
34. Markkanen M., 1995. Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity. Report STUK-B-STO 32, Radiation and Nuclear Safety Authority- STUK, 1995.

TAEK YAYIN BİLGİ FORMU

Rapor Bilgileri	Yayın Numarası 2009/11
2. Rapor Başlığı Türkiye'deki Kömür Yakıtlı Termik Santrallerden Elde Edilen Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanılabilirliğinin Radyolojik Açıdan Değerlendirilmesi	3.Yayın Kurulu Tarih (Gün/Ay/Yıl) :No 25.03.2009-1
4. Yazarlar Doç. Dr. Şeref TURHAN, Bilgi YÜCEL, Dr. İsmail H.ARIKAN	5. Yayın Türü Teknik Rapor
6. Çalışmayı Yapan Birim Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği Dairesi Başkanlığı-Çevre Güvenliği Şubesi	
7. Destekleyen veya Ortak Çalışılan Kuruluşlar TAEK	
8. Özet İncelenen UK örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, sırasıyla, $354,4 \text{ Bq kg}^{-1}$, 96 Bq kg^{-1} ve $485,9 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerinin en yüksek ortalama değerlerinin, sırasıyla, Kangal, Tunçbilek ve Çatalağızı termik santrallerine; en düşük ortalama değerlerinin ise, sırasıyla, Çatalağızı, Yeniköy ve Afşin-Elbistan termik santrallerine ait küllerde ölçüldüğünü göstermektedir. %5 ila %35 UK katkılı çimento örneklerinde ölçülen ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri, Türkiye'de inşaat sektöründe çimentolardaki ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimine yakinken, bu örneklerde ölçülen ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişimi, Türkiye çimentolarındaki ^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişim değerinden 2 ila 5 kat daha büyüktür. %30-%35 UK katkılı örnekler için değerlendirilen H_{O} ortalama değeri ($1,34 \pm 0,48$), sınır değerden %34 daha büyüktür. Kangal termik santraline ait %30 UK katkılı beton örnekleri hariç, UK katkılı beton örneklerine ilişkin olarak değerlendirilen H_{O} ortalama değerleri, sınır değerden daha küçük olduğu gibi büyük bir kısmı, muafiyet ölçütünden ($0,33 \text{ mSv y}^{-1}$) de küçüktür. İncelenen örnekler için değerlendirilen radyolojik parametrelere ilişkin olarak elde edilen veriler; Kangal termik santrali dışında diğer on termik santralden temin edilen UK'lerin, yol ve köprü yapımında ve UK katkı oranı %35'i aşmadığı takdirde, UK katkılı çimentonun ve UK katkılı betonun inşaat sektöründe kullanılmaları sonucunda, herhangi bir radyolojik tehlikenin ortaya çıkmayacağını göstermiştir. Ancak, %35'den daha fazla oranda UK katkılı çimentodan ve Kangal termik santraline ait UK'ün %30'dan daha fazla oranda katıldığı UK katkılı betondan kaynaklanan yapı içi etkin doz hızı, tavsiye edilen sınır değerden daha büyük olacağından bu tür malzemelerin, kullanılmadan önce radyasyon kontrolüne tabi tutulmaları ve radyolojik değerlendirmeler sonucunda yapı içi etkin doz hızının sınır değerinin altında olduğu ispat edilmedikçe kullanılmamaları gerekmektedir.	
9. Anahtar Kelimeler Çevresel radyoaktivite; ^{226}Ra ; ^{232}Th ; ^{40}K ; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; Uçucu kül; Gama doz hızı; Etkin doz hızı	10. Gizlilik Derecesi Tasnif Dışı

GİZLİLİK DERECELERİ

TASNİF DIŞI (UNCLASSIFIED): İçerdiği konu itibarıyla, gizlilik dereceli bilgi taşımayan, ancak devlet hizmetiyle ilgili bilgileri içeren evrak, belge ve mesajlara verilen en düşük gizlilik derecesidir.

HİZMETE ÖZEL (RESTRICTED): İçerdiği konu itibarıyla, gizlilik dereceli konular dışında olan, ancak güvenlik işlemine ihtiyaç gösteren ve devlet hizmetine özel bilgileri içeren evrak, belge ve mesajlara verilen gizlilik derecesidir.

ÖZEL (CONFIDENTIAL): İçerdiği konu itibarıyla, izinsiz olarak açıklandığı takdirde, milli menfaatleri olumsuz yönde etkileyecek evrak, belge ve mesajlara verilen gizlilik derecesidir.

GİZLİ (SECRET): İzinsiz açıklandığı takdirde, milli güvenliği, milli prestij ve menfaatleri ciddi ve önemli bir şekilde zedeleyecek olan evrak, belge ve mesajlara verilen gizlilik derecesidir.