

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN RADYOAKTİF  
İÇERİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Daniel HATUNGİMANA**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr Şemsi YAZICI**

**İkinci Danışmanı : Doç. Dr Müslim Murat SAÇ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 624.05.00**

**Sunuş Tarihi : 07.01.2015**

**Bornova-İZMİR**

**2015**



Daniel HATUNGIMANA tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN RADYOAKTİF İÇERİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 07.01.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**Jüri Başkanı : Prof. Dr. Kambiz RAMYAR**

**Raportör Üye : Doç. Dr. Şemsi YAZICI**

**Üye : Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL**

**Üye : Doç. Dr. Müslim Murat SAÇ**

**Üye : Doç. Dr. Gözde İNAN SEZER**

**İmza**

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

28

## EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

### ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “**ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN RADYOAKTİF İÇERİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

21 / 01/ 2015



Daniel HATUNGİMANA



## ÖZET

# ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN RADYOAKTİF İÇERİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

HATUNGİMANA, Daniel

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şemsi YAZICI

İkinci Danışmanı: Doç. Dr. Müslim Murat SAÇ

Ocak 2015, 79 sayfa

Bu tezde, çimento esaslı harçlarda radon gazı salınımı ile radyonüklid konsantrasyonlarına harçlarda kullanılan ince agrega kökeni, çimento ve silis dumanı ile uçucu külün etkisi incelenmiştir.

Bu amaçla, yerel çimento üreticisinden temin edilen CEM I 42,5 R tip çimento, değişik kökene sahip ince agregalar (kireçtaşı ve bazalt) ve değişik mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı) kullanılarak TS EN 196-1 standardına uygun olarak 7 farklı harç üretilmiştir. Üretilen harçların basınç ve eğilme dayanımları, birim ağırlık, boşluk oranı, su emme ve kılcal yolla su emme özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca, üretilen harçlarda kullanılan ham maddelerin, sertleşmiş harç örneklerinin ve sertleşmiş harçlardan elde edilen toz örneklerin radon gazı salınımları “Katı hal nükleer iz kazıma dedektörü” (LR-115 film dedektörler) yardımıyla saptanmıştır. Yine harç üretiminde kullanılan ham maddelerin ve sertleşmiş harçların toz örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , ve  $^{40}\text{K}$  gibi radyonüklid konsantrasyonları da belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan çalışma neticesinde harç üretiminde kullanılan malzemelerin ve üretilen harçların ölçülen radon salınımlarının ve doğal radyoaktivite konsantrasyonlarının dünya ortalamalarının altında olduğu, bu malzemelerin harçlarda kullanımının radyolojik açıdan risk taşımadığı değerlendirilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Radon, doğal radyoaktivite, kireçtaşı, bazalt, uçucu kül, silis dumanı.



**ABSTRACT**

**INVESTIGATION OF THE RADIOACTIVE CONTENT  
OF CEMENT BASED MORTARS**

HATUNGIMANA, Daniel

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şemsi YAZICI

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Müslim Murat SAÇ

January 2015, 79 pages

In this thesis, the effect of fine aggregate type, cement, silica fume and fly ash on the radon exhalation rate and natural radioactive content of cement based mortar were studied.

For this purpose, CEM I 42,5 R type Portland cement, 2 types of fine aggregate (limestone and bazalt) and 2 types of mineral admixture (silica fume and fly ash) were used to cast 7 different mortar mixtures according to TS EN 196-1 standard. After the 28 days of curing, flexural and compressive strength, water absorption and water sorptivity tests were conducted. Besides, the radon exhalation in raw materials and mortar samples were measured by “Sealed can technique” using LR-115 type II track detectors and gama ray spectrometric measurements were used for the measurement of natural radioactivity ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ).

The obtained results showed that the radon and natural radioactivity of raw materials and mortars mixtures values were lower than the limit values recommended for the building materials used in construction of dwellings and the use of these materials in mortar does not pose any radiological risk.

**Keywords:** Radon, natural radioactivity, limestone, bazalt, uçucu kül, silica fume.



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince, çalışmamın her aşamasında benimle ilgilenen, bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen tez danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Şemsi YAZICI ve Sayın Doç. Dr. Müslim Murat SAÇ'a, teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam boyunca bana her zaman destek olan, yardımlarını esirgemeyen Ar. Gör. Dr. Mutlu İÇHEDEF'e, Ar. Gör. Caner TAŞKÖPRÜ'ye de sonsuz teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımnda her türlü imkanlarını bana sunan Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve Nükleer Bilimler Enstitüsü' ne de teşekkürlerimi sunarım.

Sadece tez çalışmamda değil hayatımda desteğini hiç esirgemeyen eşim Joselyne NİRERA'na ve değerli arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
TEŞEKKÜR .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxii
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç.....	3
1.2 Kapsam .....	3
2.GENEL BİLGİLER.....	5
2.1 Radyasyon Kaynakları.....	5
2.2 Radyasyonun Birimleri ve Doz Nicelikleri .....	6
2.3 Yapı Malzemelerinde Doğal Radyoaktivite .....	7
2.3.1 Doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının tayini .....	8
2.3.2 Radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu .....	8
2.3.3 Dış tehlike ve iç tehlike indisleri .....	8
2.3.4 Soğurulmuş gama doz hızı ve yapı içi etkin doz hızı .....	10

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
2.4 Radon ve Özellikleri .....	11
2.4.1 Radonun bozunma reaksiyonu .....	11
2.4.2 Yapı içi radon gazı ve kaynakları .....	12
2.4.3 Radonun tipik konsantrasyonları .....	14
2.4.4 Radon gazının yapıya giriş yolları ve azaltma yöntemleri.....	15
2.4.5 Radon gazının sağlık etkileri.....	17
2.5 Yapı Malzemelerindeki Radon ve Radyonüklid Konsantrasyonlarının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar .....	18
2.6 Uçucu Külün Tanımı ve Betona Etkileri.....	22
2.7 Silis Dumanının Tanımı ve Betona Etkileri .....	25
3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	29
3.1 Malzemeler.....	29
3.1.1 Çimento .....	29
3.1.2 Agregası .....	29
3.1.3 Mineral katkıları (silis dumanı ve uçucu kül) .....	31
3.1.4 Karışım suyu .....	32
3.2 Harç Karışımları ve Üretimi .....	32

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.3 Yapılan Deneyler .....	33
3.3.1 Yayılma deneyi .....	33
3.3.2 Eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri.....	33
3.3.3 Birim hacim ağırlık, su emme deneyleri.....	34
3.3.4 Kılcal yolla su emme deneyleri .....	34
3.4 Radon Konsantrasyonu Deneyleri .....	34
3.4.1 Nükleer iz kazıma dedektörleri (LR-115 Tip 2) ile radon ölçümleri.....	34
3.5 Çalışmada Kullanılan Kalibrasyon Katsayısı .....	38
3.6 $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ ve $^{40}\text{K}$ Radyonüklid Konsantrasyonlarının Belirlenmesi.....	38
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALARI.....	41
4.1 Harç Numuneleri Üzerinde Yürütülen Fiziksel Deneyleri ve Sonuçları .....	41
4.1.1 Yayılma deneyi sonuçları .....	41
4.1.2 Su emme oranı, birim hacim ağırlık ve porozite sonuçları.....	41
4.1.3 Harç numunelerinin kılcal yolla su emme sonuçları .....	45
4.2 Harç Numuneleri Üzerinde Yürütülen Mekanik Deneyleri ve Sonuçları .....	46
4.2.1 Harç numune eğilme mukavemetleri.....	46
4.2.2 Harç numunelerinin basınç mukavemetleri .....	49

**İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa

4.3 Harç Numuneleri Üzerinde Yürütülen Radyoaktif Deneylei ve Sonuçları ....	51
4.3.1 Nükleer iz kazıma dedektörleri (LR-115) sonuçları .....	51
4.3.2 Harç Radon Konsantrasyonu İle Harçların Porozitesi, Birim Hacim Ağırlık ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki .....	57
4.3.3 Doğal radyonüklid konsantrasyonlarının sonuçları .....	61
4.3.4 Radyolojik açıdan değerlendirme .....	63
5.SONUÇ VE ONERİLER.....	65
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	69
ÖZGEÇMİŞ .....	79

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Doğal ve yapay radyoaktiviteden kaynaklanan ışınlamalar .....	5
2.2 Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oranları .....	6
2.3 Radon 222 ve Radon 220 bozunma zinciri.....	12
2.4 Değişik ülkelerdeki evlerde ortalama radon konsantrasyonları .....	14
2.5 Yapı içi radon girişleri.....	16
3.1 Kireç taşı, bazalt agregaları ve ASTM C 33 limit değerleri için granülometri eğrileri .....	30
3.2 Toz ve prizmatik örneklerde LR-115 dedektörlerin yerleştirilmesine ait görüntüler.....	35
3.3 İz kazıma banyo işlemine ait görüntü.....	36
3.4 Kullanılan Leica DM 750 Optik mikroskobu.....	36
3.5 LEICA Application Suite (LAS EZ) ile LR-115 film dedektör üzerinde rastgele seçilmiş bir bölgenin fotoğrafının görüntüsü .....	37
3.6 Corel PaintShop Pro X3 görüntü işleme yazılımı kullanılarak yapılan rötüşün ekran görüntüsü .....	37
3.7 Alfa izlerinin SCION yazılımı kullanılarak elde edilen görüntüsü .....	38
3.8 Toz hale getirilmiş örneklerinin silikonla kapatılmış haline ait görüntü .....	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.9 Toz hale getirilmiş harç örneklerinin NaI(Tl) dedektörlü gama spektroskopisinde alınan örnek spektrum görüntüsü .....	39
3.10 NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektrometresinin görüntüsü .....	40
4.1 Kireç taşı agrega içeren harç karışımlarının boşluk oranı değerleri .....	43
4.2 Bazalt agrega içeren harç karışımlarının boşluk oranı değerleri .....	44
4.3 Kireç taşı agrega içeren harç karışımlarının su emme oranı değerleri ..	44
4.4 Bazalt agrega içeren harç karışımlarının su emme oranı değerleri.....	45
4.5 Kireçtaşı agrega içeren harç karışımlarının kılcal yolla su emme deneyleri sonuçları .....	45
4.6 Bazalt agrega içeren harç karışımlarının kılcal yolla su emme deneyleri sonuçları .....	46
4.7 Kireçtaşı agregaları içeren harçlar için eğilme mukavemeti- ikame oranı ilişkisi.....	48
4.8 Bazalt agregaları içeren harçlar için eğilme mukavemeti- ikame oranı ilişkisi.....	48
4.9 Kireçtaşı agregaları içeren harç karışımlarının basınç dayanımları.....	50
4.10 Bazalt agregaları içeren harç karışımlarının basınç dayanımları .....	50
4.11 Hammaddelerinin radon aktivite konsantrasyonları.....	52
4.12 Kireçtaşı agregaları içeren öğütülerek toz hale getirilmiş uçucu küllü harç örneklerinin radon konsantrasyonları.....	53

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.13 Kireçtaşı agregaları içeren öğütülerek toz hale getirilmiş silis dumanlı harç örneklerinin radon konsantrasyonları.....	53
4.14 Bazalt agregaları içeren öğütülerek toz hale getirilmiş uçucu küllü harç örneklerinin radon konsantrasyonları .....	54
4.15 Bazalt agregaları içeren öğütülerek toz hale getirilmiş silis dumanlı harç örneklerinin radon konsantrasyonları.....	54
4.16 Kireçtaşı agregaları içeren uçucu küllü sertleşmiş harç örneklerinin radon konsantrasyonları.....	55
4.17 Kireçtaşı agregaları içeren silis dumanlı sertleşmiş harç örneklerinin radon konsantrasyonları .....	56
4.18 Bazalt agregaları içeren uçucu küllü sertleşmiş harç örneklerinin radon konsantrasyonları.....	56
4.19 Bazalt agregaları içeren silis dumanlı sertleşmiş harç örneklerinin radon konsantrasyonları.....	57
4.20 UK içeren harçların radon konsantrasyonu - porozite ile ilişki .....	58
4.21 SD içeren harçların radon konsantrasyonu - porozite ile ilişki.....	58
4.22 UK içeren harçların radon konsantrasyonu - BHA ile ilişki.....	59
4.23 SD içeren harçların radon konsantrasyonu - BHA ile ilişki .....	59
4.24 UK içeren harçların radon konsantrasyonu - 28 günlük $\sigma_c$ ile ilişki.....	60
4.25 SD içeren harçların radon konsantrasyonu - 28 günlük $\sigma_c$ ile ilişki .....	61

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İsveç'teki bazı kayalarda uranyum ve toryum konsantrasyonları .....	13
2.2 İşyerlerinde ölçülen radon konsantrasyonları .....	15
2.3 Bazı ülkeler ve uluslar arası kuruluşlarda müsaade edilen radon sınır değerleri .....	17
3.1 Kullanılan çimentonun özellikleri .....	29
3.2 Kireçtaşı ve bazalt agregaların elek analizi sonuçları .....	30
3.3 Agregaların fiziksel özellikleri.....	31
3.4 Silis dumanı ve uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	31
3.5 Harç karışım kompozisyonları ve malzeme miktarı .....	32
4.1 Harç karışımlarının yayılma değerleri sonuçları.....	41
4.2 Kireçtaşı agrega içeren karışımlarının su emme, porozite ve birim hacim ağırlık deneyleri sonuçları .....	42
4.3 Bazalt agrega içeren karışımlarının su emme, porozite ve birim hacim ağırlık deneyleri sonuçları .....	42
4.4 Kireçtaşı agregaları içeren harçların eğilme mukavemeti.....	47
4.5 Bazalt agregaları içeren harçların eğilme mukavemeti.....	47
4.6 Kireçtaşı agregaları içeren harç karışımlarının üç farklı yaşta belirlenen basınç dayanımları .....	49

**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.7 Bazalt agregaları içeren harç karışımlarının üç farklı yaşta belirlenen basınç dayanımları.....	49
4.8 Hammaddelerinin doğal radyonüklid konsantrasyonları.....	62
4.9 Kireçtaşı agrega içeren harç karışımlarının radyonüklid konsantrasyonları .....	62
4.10 Bazalt agrega içeren harç karışımlarının radyonüklid konsantrasyonları.....	62
4.11 Hammadde için hesaplan $R_{a_{eq}}$ , $H_{ex}$ , $H_{in}$ , $D$ ve $H_R$ değerleri .....	63
4.12 Kireçtaşı agregaları içeren harç karışımları için hesaplan $R_{a_{eq}}$ , $H_{ex}$ , $H_{in}$ , $D$ ve $H_R$ değerleri .....	63
4.13 Bazalt agregaları içeren harç karışımları için hesaplan $R_{a_{eq}}$ , $H_{ex}$ , $H_{in}$ , $D$ ve $H_R$ değerleri.....	63

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
<i>SD</i>	Silis dumanı
<i>UK</i>	Uçucu kül
<i>KT</i>	Kireçtaşı
<i>B</i>	Bazalt
<i>B<sub>q</sub></i>	Becquerel
<sup>226</sup> <i>Ra</i>	Radyum
<sup>232</sup> <i>Th</i>	Toryum
<sup>40</sup> <i>K</i>	Potasyum
<i>Ra<sub>eq</sub></i>	Radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu
<i>I<sub>γ</sub></i>	Aktivite konsantrasyon indisi veya gama indisi
<i>I<sub>α</sub></i>	Alfa indisi
<i>D</i>	Soğurulmuş gama doz hızı
<i>H<sub>R</sub></i>	Yapı içi etkin doz hızı
<i>H<sub>ex</sub></i>	Dış tehlike indisi
<i>H<sub>in</sub></i>	İç tehlike indisi
<i>A<sub>Ra</sub></i>	Radyum aktivite konsantrasyonu
<i>ND</i>	Dedekte edilmeyen aktivite

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$A_{Th}$	Toryum aktivite konsantrasyonu
$A_K$	Potasyum aktivite konsantrasyonu
$S_V$	Sievert
$R_n$	Radon
<u>Kısaltmalar</u>	
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
NEA- OECD	Nuclear Energy Agency - Organisation for Economic Cooperation and Development
EC	European Commission
WHO	World Health Organisation
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
NRPB	National Radiological Protection Board
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
HPGe	Yüksek Safılıkta Germanyum



## 1. GİRİŞ

Uranyum-238'in radyoaktif bozunum serisinde bulunan Radon, 1600 yıl yarı ömürlü Radyum-226'dan oluşmaktadır. Radonun bozunması sonucu alfa ve beta yayınlayan radon ürünleri meydana gelmektedir. Radon uranyum serisindeki tek radyoaktif soy gazdır. Uranyum tüm kayalarda ve topraklarda bulunmaktadır. Uranyumun varlığı radon gazının habercisidir. Uranyumun toprak ve kayalardaki miktarı bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir. İnsanlar yaşam standartlarına, yaşadıkları ortamın fiziksel özelliklerine ve coğrafik şartlara bağlı olarak ortalama toplam 2,4 mSv'lik yıllık doğal radyasyon dozuna maruz kalmaktadırlar. Doğal kaynaklardan alınan dozun en önemli bileşeni radondur ve radon nedeniyle maruz kalınan doz yaklaşık %55'lik bir paya sahiptir (Man and Yeung, 1997; Chauhan et al., 2008; Narula et al., 2013).

Radyum toprakta, kayalarda, yapı malzemelerinde, su ve gıdalarda bulunmakta ve oldukça geniş bir dağılım göstermektedir. Radyum uzun yarı ömürlü olması nedeniyle, Rn-222 oluşumunda bir üreteç görevi yapar. Radon-222'nin yarı ömrü 3,8 gündür ve radon, kısa yarı ömürlü bozunma ürünleri ile denge halinde bulunur. Dolayısıyla radon, az miktarda bile olsa uranyum içeren her toprak ve kaya ortamında mevcuttur. Uranyum içermeyen ortamlarda da daha aşağıdaki katmanlardan çatlak ve kırıklar vasıtası ile yeraltından yayılarak havaya ve sulara karışır. Toprağın geçirgenliği, yapıdaki açıklık ve çatlaklar radonun yapı içlerine taşınmasını da sağlamaktadır (Cozmuta and Van der Graaf, 2001; Kovler, 2011).

Radonun kapalı mekanlarda birikimi insan sağlığını tehdit edici boyutlarda olabilir. İnşaat malzemeleri, evlerde kullanılan sular ve doğal gaz ev içi radon kaynağıdır. Radona maruz kalma, Uluslararası Radyasyon Korunması Komitesi tarafından sınırlandırılarak, limit değerler tavsiye edilmiştir. Her ülke radon seviyelerini gösteren radon haritaları üzerinde çalışmalarda bulunmaktadır (Kovler, 2006).

Dünyayı oluşturan yer kabuğunda katmanların yapısına bağlı olarak uranyum ve radyum yoğunluğu farklı olabilmektedir. Doğadan temin edilen kayalarda, agregalarda ve bunların işlenmesinden elde edilen beton, çimento vb inşaat malzemelerinde de radon gazı salınımı oluşmaktadır. Özellikle yapıların bodrum katlarında zeminle temas sonucunda birikmesi ile karşılaşmaktadır. Yapılara temeller ve duvarlardaki kılcal çatlaklardan, derz yerlerinden ve tesisat

boşluklarından bu gazın giriş yaptığı bilinmektedir. Bu gazın birikiminin engellenmesi veya tahliyesinin yapılmaması önemli sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Yapıların özellikle uzun süre kapatılan bölümlerinde ve bodrum katlarında biriken gaz solunum yolu ile vücuda geçmektedir. Akciğerlere giren bu gaz yarı ömrünü burada tamamlayarak, radyoaktif alfa ışınları yaparak dokularda DNA zincirini bozmakta ve tahribat yapmaktadır. Gazın sürekliliğine bağlı olarak bozulan bu hücrelerde tümörler oluşturmaktadır. Radon gazının ABD'de yılda 21000 kişiyi etkileyerek kanserden öldürdüğü bilinmektedir (Kovler, 2011; Chauhan and Kumar, 2013).

Ortamdaki radon miktarı ölçüm cihazları ile saptanabilir. Her ülke veya uluslararası örgütler örneğin Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu evlerde müsaade edilebilir seviyede olması gereken miktarı belirlemiştir. İngiltere'de NRPB (The National Radiological Protection Board) radon miktarını dışarda ortalama 400 Bq/m<sup>3</sup>, evlerde ortalama 200 Bq/m<sup>3</sup> olarak belirlemiştir. Radon miktarı, evlerde 200 Bq/m<sup>3</sup>'ün üzerine çıkar ise müdahale edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Radon gazına uranyum madeninde, granit, şist, kalker esaslı ve fosfat içeren kayalarda rastlanmaktadır. Ayrıca uranyum ve toryum içeren kömürlerin atıklarında da radon gazı salınımı olduğu bilinmektedir. Dünya ölçeğinde yılda atmosfere salınan radon miktarının 2,4 milyar kuri (90 TerraBq) olduğu tahmin edilmektedir (Man ve Yeung, 1997; Cozmuta ve Van der Graaf, 2001; Kovler, 2006; Narula et al., 2013).

Bu tez çalışması GİRİŞ, GENEL BİLGİLER, DENEYSEL ÇALIŞMA, DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR, SONUÇ ve ÖNERİLER ile KAYNAKLAR DİZİNİ ana başlıklarından oluşmaktadır. GENEL BİLGİLER bölümünde öncelikle radyasyon kaynakları ve radyasyon birimleri ve doz niceliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra, radon ve özellikleri, bina içi radon konsantrasyonları ve kaynakları, binaya radon giriş yolları, azaltma yöntemleri ve radon gazının sağlık üzerine etkileri konuları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca, yapı malzemelerindeki aktivite konsantrasyonunun belirlenmesine yönelik çalışmalar ve betonlarda uçucu kül ve silis dumanının kullanımı ve üzerindeki etkiler de anlatılmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMA başlığı altında ilk olarak çalışmada kullanılan malzemeler hakkında bilgiler verilmiştir. Devamında ise çalışmada uygulanan metodoloji ile ilgili olarak harç numunelerin üretilmesi, üretilen numunelerin değişik kür sürelerinde kür edilmesi, kür süresini dolduran örneklerin üzerinde

basınç ve eğilme deneyleri, su emme ve kılcal yolla su emme deneylerinin yapılması, Radon ve radyonüklid konsantrasyonları için örneklerin hazırlanması, çalışmada radon ölçüm yöntemleri ve  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklid konsantrasyonlarının belirlenmesi açıklanmıştır.

Tezde elde edilen veriler DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALARI kısmında verilmiştir. Bu kısımda çalışma sonucunda elde edilen tüm mekanik, fiziksel, radon ve doğal radyoaktivite ölçüm sonuçları, radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, harici ve dahili aktivite indisleri, soğurulmuş gama doz hızı ve yapı içi etkin doz hızı hesaplamaları verilmiştir.

SONUÇ ve ÖNERİLER bölümünde çalışmada elde edilen verilerin değerlendirilmesi yapılmış ve bundan sonra yapabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur. KAYNAKLAR DİZİNİ'nde ise tez çalışmasında faydalanan kaynaklar liste halinde sunulmaktadır.

### 1.1 Amaç

Bu tez çalışmasının amacı, yapılarda kullanılan en yaygın malzemelerden biri olan harçlarda ham madde kaynaklı radon gazı salınımının belirlenmesi ve daha düşük risk taşıyan ham maddelerin beton ve harçlarda kullanılmasını sağlamaktır. Ayrıca, harçların veya betonların üretiminde kullanılan ham maddelerin doğal radyonüklit içeriklerinin incelenmesi de amaçlanmıştır.

### 1.2 Kapsam

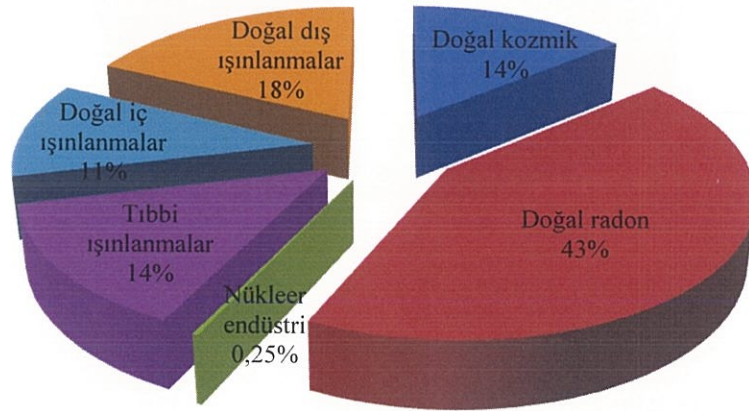
Tez kapsamında; yerel çimento üreticisinden temin edilen CEM I 42,5 R tipi çimento, değişik kökene sahip ince agregalar (kireçtaşı ve bazalt) ve değişik mineral katkıları (uçucu kül ve silis dumanı) kullanılarak TS EN 196-1 standardına uygun olarak harçlar üretilmiştir. Suda kürlenmiş numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımı, 28 günlük numunelerin su emme ve kılcal su emme özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca 28 günlük harç örneklerinin radon gazı salınımlarını "Katı hal nükleer iz kazıma dedektörü" yardımıyla saptanmıştır. Buna ilaveten, harç üretiminde kullanılan ham maddelerin ve sertleşmiş harç örneklerinin öğütülmesinden elde edilen toz malzemenin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklid konsantrasyonlarını da belirlenmiştir.



## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Radyasyon Kaynakları

Bütün canlılar az yada çok radyasyon bulunan ortamlarda yaşamaktadır. Canlılar, kozmik ışınlardan, zemin ve yapı malzemelerindeki radyoizotoplardan, sudan, gıdalar gibi doğal kaynaklardan ve yapay kaynaklardan radyasyona maruz kalmaktadır. İnsanlar; yaşam standartlarına, yaşadıkları ortamların fiziksel özelliklerine, coğrafi ve jeolojik şartların değişimine bağlı olarak ortalama 2,8 mSv'lik (milisievert) yıllık radyasyon dozuna maruz kalmaktadırlar. Bu değer %85'den fazlası doğal radyasyon kaynaklarından, bunun yarısı ise yaşadıkları yapılardaki radon bozunum ürünlerinden kaynaklanmaktadır (TAEK, 2012). Şekil 2.1'de doğal ve yapay radyoaktiviteden kaynaklanan ışınlamalar verilmiştir.



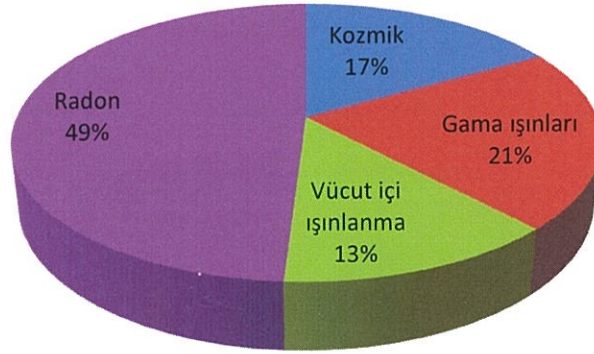
Şekil 2.1. Doğal ve yapay radyoaktiviteden kaynaklanan ışınlamalar (TAEK, 2009)

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, maruz kalınan toplam radyasyon dozunun büyük kısmı doğal kaynaklardan, diğer kısmı ise tıbbi uygulamalardan, mesleki ışınlamalar ve yapay kaynaklardan meydana gelmektedir (TAEK, 2009).

Doğal kaynaklardan alınan radyasyon dozunun en önemli bileşeni radon gazı ve onun kısa yarı ömürlü bozunma ürünleridir. Radon gazından dolayı maruz kalınan yıllık ortalama doz 1,3 mSv seviyesindedir. Radon, uranyum ve toryum içeren kayalardan, zeminiden (topraktan) gelmekte ve gaz olması nedeniyle bulunduğu ortamın boşluklarında ilerleyerek atmosfere sızmaktadır. Sıcaklık,

basınç farklılıkları ve zeminin yapısı (nem, gözeneklilik ve geçirgenlik) sızmayı etkileyen en önemli faktörlerdir (TAEK, 2012).

İnsan vücuduna solunum ve sindirim yollarıyla, hava, su, tüm bitkisel ve hayvansal besinlerde az da olsa bulunan radyoaktif maddeler alınmakta, bunlarda zamanla çeşitli organlarda birikmektedir. Ayrıca kozmik ışıklardan ve yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden etkilendiğimiz de düşünüldüğünde, insan vücudu hem iç hem de dış radyasyon ışınlanmasına doğal olarak maruz kalmaktadır. Şekil 2.2’de dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oranları verilmiştir (TAEK, 2009).



Şekil 2.2 Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oranları (TAEK, 2009)

## 2.2 Radyasyonun Birimleri ve Doz Nicelikleri

İyonlaştırıcı radyasyon için kullanılan ana niceliğin birimi aktivitedir. Bir radyoaktif maddedeki nükleer dönüşümlerin hızı aktivite olarak tanımlanmaktadır. SI (Uluslararası Birim Sistemi) birimi Becquerel (Bq) 1 saniyede oluşan bir parçalanmayı tanımlamaktadır. Kullanılan diğer birim Curie (Ci)’dir. 1 Ci;  $3,7 \times 10^{10}$  Bq’e eşdeğerdir. Havadaki radonun aktivite konsantrasyonu Bq m<sup>-3</sup> hava olarak belirtilir (TAEK, 2009).

Radyasyonun insan dokusu gibi herhangi bir maddenin birim kütlesine aktardığı enerji miktarına soğurulmuş doz adı verilir. Birimi gray, sembolü ise Gy’dir, 1 gray kilogram başına 1 joule’dur. Gray’in binde biri olan miligray (mGy) en kullanılan birimdir (TAEK, 2009).

İyonlaştırıcı radyasyon tiplerinin biyolojik maddeler ile etkileşim yolları farklıdır. Eşit miktarda soğurulmuş dozlar aynı biyolojik etkiye neden olmayabilmektedir. Örneğin, alfa parçacıklarının oldukça yavaş ve daha fazla pozitif yüklü olması ve yolları boyunca enerjilerini daha yoğun kaybetmelerinden dolayı dokuya aktarılan 1 Gy'lik alfa radyasyonu 1 Gy'lik beta radyasyonundan daha zararlıdır. İyonlaştırıcı radyasyonun farklı tiplerinin sahip olduğu hasar oluşturma potansiyelini aynı prensipleri esas alarak inceleyebilmek için yeni bir niceliğe gereksinim duyulmuştur. Bu nicelik eşdeğer doz olarak adlandırılmaktadır. Birimi sievert, sembolü ise Sv olarak tanımlanmıştır. Sievert'in binde biri milisievert'tir (mSv). Eşdeğer doz, soğurulmuş dozun belirli bir radyasyon tipinin doku içindeki enerji dağılımını dikkate alan bir faktör ile çarpımına eşittir (TAEK, 2009).

### 2.3 Yapı Malzemelerinde Doğal Radyoaktivite

Mermer ve granit gibi doğal taşlar, betonlar, agregalar, uçucu küller, tuğlalar, kiremitler, seramikler ve kaplama malzemeleri değişik miktarlarda doğal olarak meydana gelen radyonüklitleri ihtiva ederler. Doğal radyoaktiviteyi yer kabuğunun oluşmasından esas olarak radyonüklitler adlandırılan uranyum ( $^{238}\text{U}$ ), toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) ve aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) serilerinin bozunum ürünleri ve  $^{40}\text{K}$  oluşturmaktadır (Muminov et al., 2005; Akhtar et al., 2005; Baykara and Doğru, 2009; Canbaz et al., 2010). Yapı malzemelerindeki radyonüklitler yayımlanan gama ışınlarının sebep olduğu dış ışınlamadır. Ayrıca, bu malzemelerden solunum yoluyla vücuda girebilen radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) ve bunların yarılanma süreleri kısa olan bozunum ürünleri tarafından yayımlanan alfa ve beta ışınlarının sebep olduğu iç ışınlama önemli bir ölçüde artabilmektedir. Alfa, beta ve gama radyasyonu yayımlayan bu radyonüklitlerin miktarları veya konsantrasyonları, esas olarak yapı malzemelerinin jeokimyasal özelliklerine ve bölgenin jeolojik yapısına bağlı olduğundan, bölgeden bölgeye değişmektedir (UNSCEAR, 2000).

Yapı malzemelerinin kullanılmasından kaynaklanabilen radyolojik riskleri değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer ( $Ra_{eq}$ ) aktivite konsantrasyonu, aktivite derişim indisi veya gama indisi ( $I_\gamma$ ), alfa indisi ( $I_\alpha$ ), dış ışınlamadan kaynaklan soğurulmuş gama doz hızı ( $D$ ) ve yapı içi etkin doz hızı ( $H_R$ ) hesaplanmaktadır.

### 2.3.1 Doğal radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonlarının tayini

Toz haline getirilmiş örneklerin gama spektroskopik yöntemi kullanılarak doğal radyonüklitlerinin konsantrasyonları tespit edilmektedir. Elde edilen değerler ile literatürde önerilen değerler arasında kıyaslama yapılmaktadır. Yer kabuğundaki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının ağırlıklı ortalaması sırasıyla, 32, 45 ve 420 Bq/kg olarak belirlenmiştir (UNSCEAR, 2000). NEA-OECD tarafından yayımlanan raporda ise  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'un aktivite konsantrasyonları sırasıyla 50, 50 ve 500 Bq/kg olarak verilmiştir (NEA-OECD, 1979).

### 2.3.2 Radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu

Yapı malzemelerindeki doğal radyonüklitler düzgün dağılımlı olmadıklarından dolayı, bu radyonüklitlerden kaynaklanan radyolojik tehlikeyi hesaba katmak ve  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'un konsantrasyon seviyesini temsil etmek amacıyla radyum eşdeğer aktivite indisi kullanılmaktadır. Radyum eşdeğer aktivitesi denklem (2.1) kullanılarak hesaplanmaktadır (OECD, 1979; UNSCEAR, 1988; Beretka and Mathew, 1985; Amrani and Tahtat, 2001, Veiga et al., 2006; Sharaf and Hamideen, 2013).

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43 A_{Th} + 0,077 A_K \quad (2.1)$$

Bu denklemde  $Ra_{eq}$  radyum eşdeğer aktivitesi,  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$  sırasıyla radyum, toryum ve potasyum aktivite konsantrasyonlarıdır. Somlai ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ev ve işyeri binalarında kalıcı olarak kullanılan malzemelerde  $Ra_{eq}$  aktivite konsantrasyonunun 370 Bq/kg değerini aşmaması belirlenmiştir (OECD, 1979; Somlai et al., 1998).

### 2.3.3 Dış tehlike ve iç tehlike indisleri

Yapı malzemelerindeki 370 Bq/kg radyum eşdeğerinin 1,5 mSv/yıl gama doz hızını üreteceği bildirilmiştir (Beretka and Mathew, 1985). Bu doz değerini aşmamak için Hayabbu ve arkadaşları (1995) tarafından dış tehlike indisini hesaplamak için denklem (2.2) önerilmiştir.

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (2.2)$$

Bu denklemde  $^{226}\text{Ra}$ 'nın 370 Bq/kg'lık aktivitesi,  $^{232}\text{Th}$ 'nin 259 Bq/kg'lık aktivitesi ve  $^{40}\text{K}$ 'nin 4810 Bq/kg'lık aktivitesinin aynı gama doz hızını ürettiği fark edilmiştir. Ancak, duvarların kalınlıkları, kapı ve pencerelerin yerleri ve radyonüklitlerin düzgün dağılım göstermesi, malzemenin tipi ve yapı içindeki miktarı doz hızı dağılımlarını etkileyebilmektedir. Bu yüzden söz konusu faktörler dikkate alınarak, denklem (2.2) Hewamanna et al. (2001) tarafından aşağıdaki gibi değiştirilmiştir.

$$H_{\text{ex}} = \frac{A_{\text{Ra}}}{740} + \frac{1,43A_{\text{Th}}}{520} + \frac{0,077A_{\text{K}}}{9620} \quad (2.3)$$

Denklem (2.2) ve (2.3)'de,  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  ve  $A_{\text{K}}$  yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'in sırasıyla, Bq/kg cinsinden aktivite konsantrasyonlarıdır. Ev ve iş yerlerinde kalıcı olarak kullanılacak malzemelerin harici indis ( $H_{\text{ex}}$ ) değerinin 1'i aşmaması gerektiği önerilmiştir (ICRP, 1977).

Ev ve işyerinde kullanılan yapı malzemelerinden kaynaklanan ve solunum yolu ile vücuda giren radon ve kısa ömürlü bozunum ürünlerinin yayınladığı alfa ve beta radyasyonları, iç ışınlamaya sebep olmaktadır. Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan raporda yapı içi radon konsantrasyon sınırı, eski binalar için 400 Bq/m<sup>3</sup>, yeni binalar için ise 200 Bq/m<sup>3</sup> olarak bildirilmiştir (EC, 1990). Radon gazı solunmasının sebep olduğu ilave alfa radyasyonunu değerlendirmek için alfa indisi ve dahili indisi kullanılmaktadır. Alfa indisi denklem (2.4) kullanılarak hesaplanmaktadır (Krieger, 1981; Zubair et al., 2013).

$$I_{\alpha} = \frac{A_{\text{U}}}{200} \quad (2.4)$$

Bu denklemede  $A_{\text{U}}$ , yapı malzemelerindeki  $^{238}\text{U}$ 'un Bq/kg cinsinden aktivite konsantrasyondur. Dahili indisi ya da iç tehlike indisi ise denklem (2.5) kullanılarak hesaplanmaktadır (Beretka and Mathew, 1985; Lu et al., 2012; Sharaf and Hamideen, 2013).

$$H_{\text{in}} = \frac{A_{\text{Ra}}}{185} + \frac{A_{\text{Th}}}{259} + \frac{A_{\text{K}}}{4810} \quad (2.5)$$

Bu denklemde,  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  ve  $A_{\text{K}}$  yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'in sırasıyla, Bq/kg cinsinden aktivite konsantrasyonlarıdır. Ev ve iş yerinde kalıcı olarak kullanılan malzemelerin hesaplanan dahili indis değerinin 1'i aşmaması önerilmektedir (Abbady et al., 2006).

### 2.3.4 Soğurulmuş gama doz hızı ve yapı içi etkin doz hızı

Soğurulmuş doz hızına doğal radyonüklitlerinin katkısı  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'un doğal spesifik aktivite konsantrasyonuna bağlıdır. Yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin sebep olduğu dış ışınlamadan kaynaklan yapı içi soğurulmuş gama doz hızı (D), El-Shershaby ve arkadaşları (2006) ve Thabayneh (2013) tarafından yapılan çalışmalarda önerilen formül kullanılarak (yerden 1 metre yukarıda maruz kalınan doz hızı) hesaplanabilir (Denkem 2.6).

$$D(\text{nGy saat}^{-1}) = 0,462A_{\text{Ra}} + 0,621A_{\text{Th}} + 0,0417A_{\text{K}} \quad (2.6)$$

Burada, D yerden 1 metre yukarıda soğurulan doz hızı,  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  ve  $A_{\text{K}}$  yapı malzemelerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'un Bq/kg cinsinden aktivite konsantrasyonlarıdır.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'ın dönüşüm faktörleri her Bq/kg için sırasıyla 0,462, 0,621 ve 0,0417 nGy/saat'dir.

Yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamanın sebep olduğu yapı içi soğurulmuş gama dozu hızının dünya ortalaması UNSCEAR tarafından 2000 yılında yayımlanan raporda 84 nGy/saat olarak verilmiştir (UNSCEAR, 2000).

Yapı içi etkin doz hızı ( $H_R$ ), havada soğurulmuş gama dozundan etkin doza dönüşüm katsayısı 0,7 Sv/Gy alınarak ve bireylerin zamanının %80'ini kapalı mekanlarda geçirdiği kabul edilerek denklem (2.7) ile hesaplanmıştır (UNSCEAR, 1993, 2000; Otoo et al., 2011; Veiga et al., 2006).

$$H_R(\text{mSv y}^{-1}) = D(\text{nGysaat}^{-1}) \times 365,25\text{gün} \times 24 \text{ saat} \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 10^{-6} \quad (2.7)$$

Bu denklemde D (nGy saat<sup>-1</sup>) denklem (2.6)'da verilen soğurulmuş gama doz hızıdır. Binalarda kullanılan yapı malzemelerindeki radyonüklitlerden kaynaklanan gama radyasyonu sebebiyle insanın maruz kaldığı yapı içi etkin doz hızı için uygulama sınırı olarak 1 mSv/y tavsiye edilmiştir (EC, 1999).

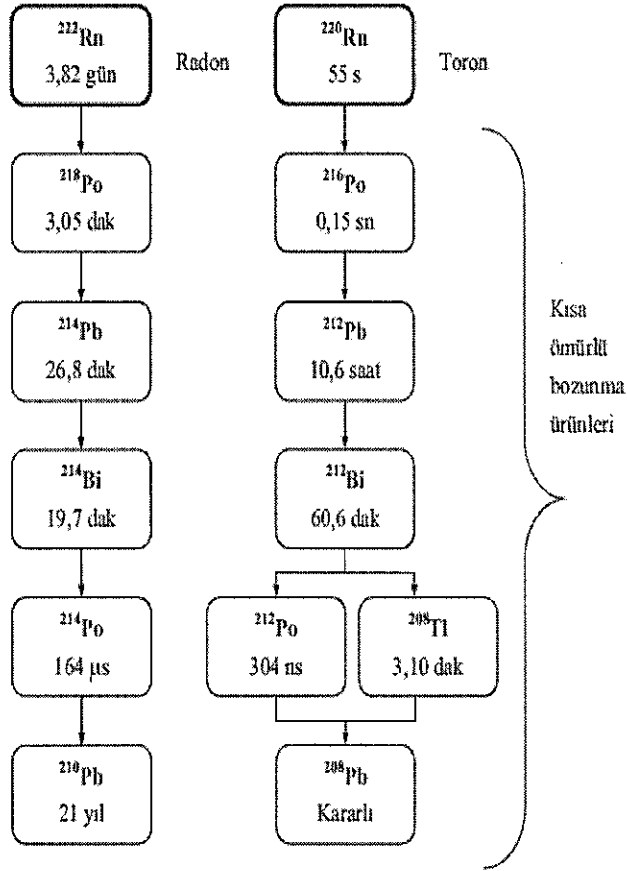
## 2.4 Radon ve Özellikleri

Radon, 86 atom numarası ile periyodik çizelgenin soy gazlar grubunda yer alan elementtir. Radon renksiz, kokusuz, tatsız, gözle görülmeyen radyoaktif bir gazdır. Oldukça ağır bir gaz olan radon'un 0 °C'de yoğunluğu 9,72 g/l'dir. Havadan 7,5 kez, hidrojenden ise 100 kez daha ağırdır, -61,8°C derecede sıvılaşır ve -71°C derecede donar. Daha çok soğutulacak olursa yumuşak sarı bir renk alarak parlar. Sıvı -195°C derecede turuncu-kırmızı arası bir renk alır. Radyoaktif radyumun stabil özellikteki kurşuna dönüşümü sırasında meydana gelir. Radyum 226'nın bozunumundan yarı ömrü 3,8 gün olan radon 222 ortaya çıkar. Radon bozunarak alfa ışınımı ile Polonyum 218'e dönüşür. Polonyum 218'in yarı ömrü 3 dakikadır. Radon terimi bazen sadece radon 222 için kullanılır. Diğer iki doğal izotopu Toron ve Aktinondur. Toron radon 220, Aktinon ise Radon 219'dur. Radon 220'nin yarı ömrü 51,5 saniyedir. Toronun yarı ömrü ise 3,92 saniyedir (Güler ve Çobanoğlu, 1997; Yücel ve Arıkan, 2006).

### 2.4.1 Radonun bozunma reaksiyonu

Radon doğal olarak oluşan radyoaktif ve herhangi bir yerde bulunabilir bir gazdır. Coğrafik bölgenin jeolojik yapısıyla yakından ilişkili olarak çevreye yayılım göstermektedir. Ayrıca, yapılarda birikebilmekte ve bu nedenle insanlar yüksek derişimlere maruz kalabilmektedir. Yapılan çalışmalar, radonun yüksek konsantrasyonda solunması durumunda akciğer kanseri riskini önemli oranda artırdığını ortaya koymuştur. Radonun ikinci önemli akciğer kanseri nedeni olduğu belirtilmiştir (Field et al, 2000; Yamada, 2003; Darby and Hill, 2003; Darby et al, 2004).

Radyum, radyoaktif radyumun stabil özellikteki kurşuna dönüşümü sırasında oluşur. Radyum zeminde, kayalarda ve bazı inşaat malzemelerinde çok fazla miktarda bulunmaktadır. Radyum 226'nın bozunumundan yarı ömrü 3,8 gün olan Radon 222 ortaya çıkar. Radon bozunarak alfa ışınımı ile Polonyum 218'e dönüşür. Polonyum 218'in yarı ömrü 3 dakikadır. Radon terimi bazen sadece Radon 222 için kullanılır. Diğer iki doğal izotopu Toron ve Aktinondur. Toron radon 220 ve Aktinon ise Radon 219 izotopudur. Radon 220'nin yarı ömrü 51.5 saniyedir. Toronun yarı ömrü ise 3,92 saniyedir. Bozunma reaksiyonu Şekil 2.3 'de şematik olarak gösterilmiştir (Yücel ve Arıkan, 2006).



Şekil 2.3 Radon 222 ve Radon 220 bozunma zinciri (Yücel ve Arıkan, 2006)

## 2.4.2 Yapı içi radon gazı ve kaynakları

Yapı malzemeleri, zemin, şebeke suyu ve doğal gaz bina içi radonun ana kaynaklarıdır.

### 2.4.2.1 Kaya ve topraktan gelen bina içi radon gazı

Bina altındaki zemin tabakası genel olarak bina içi radonun ana kaynağıdır. Zeminde radyum konsantrasyonu genelde 10 Bq/kg ve 50 Bq/kg arasında değişmektedir. Ancak, yüzlerce Bq/kg değerine de ulaşabilmektedir (UNSCEAR, 1993). Radon konsantrasyonları ise 10000 Bq/m<sup>3</sup> ve 50000 Bq/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Zeminden radon girişi  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu ve zeminin geçirgenliğine bağlıdır (EC, 1995). Tablo 2.1'de, İsveç'teki kaya türlerinde görülen uranyum ve toryum konsantrasyonu değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1 İsveç'teki bazı kayalarda uranyum ve toryum konsantrasyonları (Swedish Radon Commission, 1983)

Kayaç Türü	Uranyum Konsantrasyonu (g/10 <sup>3</sup> kg)	Toryum Konsantrasyonu (g/10 <sup>3</sup> kg)
Normal granit	2-10	5-20
Radyoaktif Granit	8-40	10-90
Kum	0,5-5	1-10
Kireçtaşı	0,5-2	1-2
Killi Yapraktaşı	1-10	2-15

Radon gazı kayanın farklı tabakaları boyunca kaya yapısında, çatlaklar boyunca ve çatlak bölgelerinde ilerlemektedir. Zemin geçirgen ise, kayanın alt tabakasında meydana gelmiş olan radon gazı zemin katmanları boyunca yukarıya doğru kolayca taşınabilmektedir. Yeraltı suyunun varlığı, nemli kil ya da diğer geçirgen olmayan topraklar radon gazının yukarıya doğru akışını belirli derecede engelleyebilmektedir. Zeminde çatlak bölgeler var ise radon gazı bu bölgelerde çatlaklar vasıtası ile yukarılara etkili bir şekilde taşınmaktadır (Can, 2011).

#### **2.4.2.2 Yapı malzemelerinden kaynaklanan yapı içi radon**

Yapı içi radonun kaynaklarından birisi yapı malzemeleridir. Bütün malzemeler <sup>238</sup>U içerir ve potansiyel radon yayıcılarıdır (Can, 2011). Bununla birlikte, bazı malzemeler <sup>226</sup>Ra ve <sup>238</sup>U'nun daha yüksek konsantrasyonlara sahiptirler. Bu hem doğal hem de yapay malzemeler için geçerlidir. Tipik uranyum taşıyan doğal malzemeler granitlerdir. Yapı malzemesi olarak kullanılan agregalar da yüksek uranyum içeriğine sahip olabilir. Yapay malzemeler arasında farklı tür betonlar uranyum kaynağıdır.

#### **2.4.2.3 Şebeke suyundan kaynaklan yapı içi radon**

Kaya kuyulardan çıkan suyun radon konsantrasyonu yüksek olabilir. Bu tür sular evsel amaçla kullanıldığında, radon miktarını artabilmektedir. Derin kuyularda ve şebeke suyunda radon konsantrasyonu 100 kBq/m<sup>3</sup> ve 100 mBq/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir (UNSCEAR, 1988). Her türlü su kaynaklarının dünya ortalama radon konsantrasyonunun 10 kBq/m<sup>3</sup> olduğunu varsayılmaktadır (UNSCEAR, 1993).

#### 2.4.2.4 Doğal gazdan kaynaklanan yapı içi radon

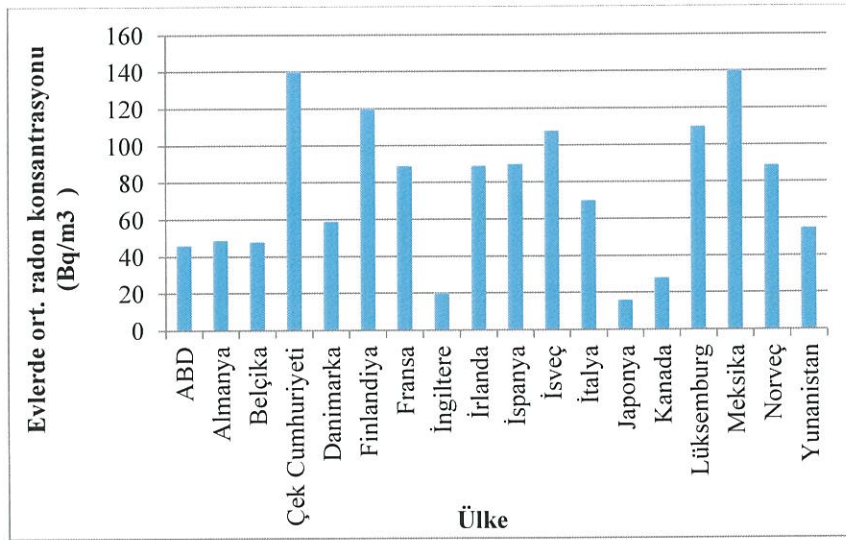
Bazı bölgelerde, pişirme ve ısınma için kullanılan doğal gazda yüksek miktarda radon bulunabilmektedir. Doğal gazda radon konsantrasyonunun yaklaşık  $1000 \text{ Bq/m}^3$  seviyesinde olduğu belirlenmiştir (UNSCEAR, 1993).

#### 2.4.3 Radonun tipik konsantrasyonları

##### 2.4.3.1 Konutlarda radon

Genelde insanlar zamanlarının büyük kısmını kapalı mekanlarda geçirdikleri için radona maruz kalmaktadırlar. Yapılardaki radon gazının büyük bir kısmı (%90'ı), yapıların temelindeki zeminden (toprak ve kayalardan), geri kalan ise yapıyı oluşturan yapı malzemelerinden kaynaklanmaktadır (TAEK, 2009). Granit ve volkanik kayaçların bulunduğu bölgelerdeki yapılarda radon konsantrasyonu tortul kayaçların bulunduğu yerlere göre daha yüksektir (WHO, 2004 ). Yapının altındaki zeminde oluşan radon gazı, zemin boyunca yükselerek, yapının altında birikmektedir.

Ülkelerin jeolojik ve coğrafi yapısı, inşaat kalitesi, yaşam alışkanlıkları, yapıların ısıtılma şekli, sosyoekonomik durum gibi parametreler kapalı ortamlardaki radon konsantrasyonunun değişimine neden olabilmektedir. Şekil 2.4'te değişik ülkelerde konutlarda yapılan radon ölçüm sonuçları verilmektedir (WHO, 2009).



Şekil 2.4 Değişik ülkelerdeki evlerde ortalama radon konsantrasyonları (WHO, 2009)

### 2.4.3.2 İşyerlerinde radon

Radonun maden ocaklarında çalışanlar için akciğer kanseri olma riskini arttırdığı bilinmektedir. Maden ocakları dışında, metrolar, tüneller, mağaralar, kaplıcalar gibi yerler ile fabrikalar, alışveriş merkezleri, okul ve ofisler de radon riski taşıyan işyerleri olarak tanımlanabilmektedir. Tablo 2.2’de işyerlerindeki ölçülen radon konsantrasyonları verilmektedir (IAEA, 2003).

Tablo 2.2 İşyerlerinde ölçülen radon konsantrasyonları (IAEA, 2003)

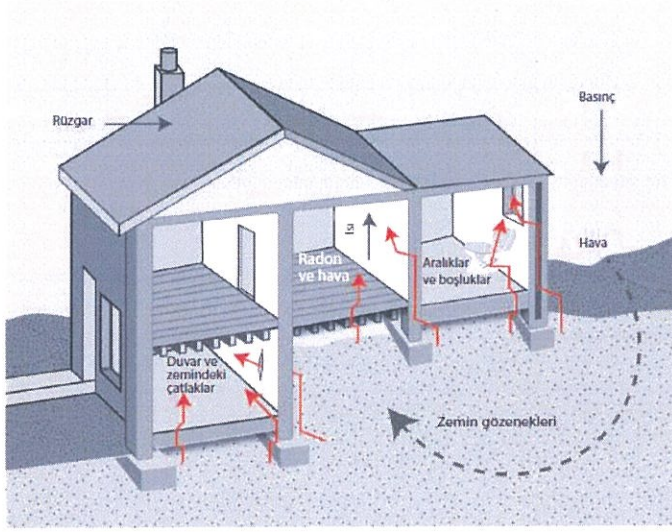
İşyeri	Ülke	Radon Konsantrasyon Aralığı (Bq/m <sup>3</sup> )
Turistik Mağaralar	Almanya	400 - 11180
	Macaristan	130 - 21100
	İrlanda	260 - 19060
	Slovenya	20 - 10000
	ABD	48 - 1850
Tüneller	Çek Cumhuriyeti	229 - 3312
	Finlandiya	500 - 7000
	Norveç	250 (ortalama)
Metrolar	Finlandiya	45 – 200 (istasyon)
		20 – 790 (ofisler)
	Yunanistan	9 – 22 (istasyon)

### 2.4.4 Radon gazının yapıya giriş yolları ve azaltma yöntemleri

Zemindeki ve yapı malzemelerindeki <sup>226</sup>Ra miktarı, zemin ve yapı malzemelerinin nem oranı, difüzyon potansiyeli, zeminle temasta olan yapının yüzey alanı ve izolasyonun niteliği, yapı zemini, yapının havalandırma kapasitesi, iklim koşulları, iç-dış hava sıcaklık ve basınç farkı yapıdaki radon konsantrasyonunu etkileyen ana unsurlardır (TAEK, 2009).

Yapıdaki radon; zemindeki çatlaklar, dilatasyon derzleri, duvar çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası boşluklarından girmekte, ayrıca yapı malzemeleri, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gaz ve içme sularında bulunan radon da yapı içi konsantrasyonunu artırmaktadır. Yapılardaki radon kaynağının büyük bir kısmı, yapının temelindeki zemindir (toprak ve kayalardır). Radon gazı, zemin katmanları boyunca yükselerek, yapının altında hapsolmakta ve basınç oluşturmaktadır. Bu yüksek basınç etkisiyle zeminde biriken gazlar yerden ve duvarlardan, özellikle çatlak ve boşluklardan yapı

içlerine sızarlar. Şekil 2.5'de yapı içi radon giriş yolları gösterilmektedir (TAEK, 2009).



Şekil 2.5 Yapı içi radon girişleri (TAEK, 2009)

Yapılardaki radon konsantrasyonunu azaltmak için alınan bazı tedbirler aşağıda sıralanmaktadır (ICRP, 1993; NRPB, 2002; WHO, 2009).

1. Düşük doğal radyoaktif madde içeren yapı malzemeleri kullanmak,
2. Özellikle yapıların zemin ile temas eden yüzeylerinde radon girişi olan çatlakların geçirimsizliğini beton veya harç ile azaltmak,
3. Yapıların havalandırma sistemini iyileştirmek,
4. Evsel suyun radon içeriğini azaltmak,
5. Mevcut yapılarda radonun yapı içerisine girmesini önlemek için zemin altında biriken radon gazının boru ya da fanlar yardımı ile uzaklaştırmak,
6. Evlerin duvarlarında, su ve kanalizasyon borularının geçtiği yerlerde bulunan çatlaklar ve açıklıkları onarmak ve kapatmak.

### 2.4.5 Radon gazının sağlık etkileri

Radonun yaydığı radyasyon insan vücutuna sindirim ya da solunum yoluyla girmektedir. Akciğerin en küçük dokularına kadar nüfuz eden radyoaktif partiküller, bu organın dokularına zarar verir. Uranyum madencilerinin üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar sonucu, solunum yoluyla alınan radonun akciğer kanseri riskini arttırdığı saptanmıştır (MC Laughin, 2001).

İngiltere Milli Radyasyon Korunma Komitesi (NRPB), İngiltere'deki yıllık toplam 41000 akciğer kanserinden en az 2500'ünün, ABD Halk Sağlığı Servisi yıllık akciğer kanseri vakalarının sigara içmeyenlerden 5000'inin, sigara içenlerde ise 15000'inin, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) ise toplam akciğer kanserlerinin %10'unun sebebinin radon kaynaklı olduğunu bildirmektedir. Ancak bu durum yüksek dozda radona maruz kalmış herkesin akciğer kanserine yakalanacağı anlamına gelmez. Sigara, kanser riskini artırır. Hem sigara içip hem de yüksek dozda radona maruz kalmış kişilerde kansere yakalanma riski daha yüksektir. Radonun sağlık açısından tehlikeli oluşu ve sürekli olarak maruz kalınması nedeniyle radon değerlerinin denetim altında tutulması gerekmektedir (Can, 2011). Bunun için de her bölgede radon sınır değerleri belirlenmelidir. Belirlenen bu sınır değerleri her bölge ve her ülke için farklılık göstermektedir.

Tablo 2.3'de çeşitli ülkeler ve uluslar arası kuruluşlar tarafından benimsenen kapalı ortamlar için müsaade edilebilir radon konsantrasyonları Bq/m<sup>3</sup> birimi cinsinden verilmektedir (Yücel, 2006).

Tablo 2.3 Bazı ülkeler ve uluslar arası kuruluşlarda müsaade edilen radon sınır değerleri  
(Yücel, 2006)

Ülke	Radon sınırı (Bq/m <sup>3</sup> )	Ülke	Radon sınırı (Bq/m <sup>3</sup> )	Ülke	Radon sınırı (Bq/m <sup>3</sup> )
Litvanya	100	İrlanda	200	Danimarka	400
WHO	100	İsrail	200	Fransa	400
Hindistan	150	İsveç	200	ICRP	400
Finlandiya	200	Norveç	200	Polonya	400
Avustralya	200	Rusya	200	İsviçre	400
Çek Cum.	200	Almanya	250	<b>Türkiye</b>	<b>400</b>
Çin	200	Lüksemburg	250	Kanada	800
İngiltere	200	AB	400	-	-

## 2.5 Yapı Malzemelerindeki Radon ve Radyonüklid konsantrasyonlarının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Günümüzde pekçok ülkede yapı malzemelerindeki radon ve radyonüklid konsantrasyonlarını belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Shoeib ve arkadaşının yaptığı çalışmada; Mısır'da kullanılan yapı malzemelerinin radyolojik etkisi incelenmiştir. Çalışmada, 30 farklı yapı malzemelerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörüne sahip gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür.  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu  $8,15 \pm 2,81 - 288,5 \pm 17,49$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu  $3,59 \pm 1,36 - 77,77 \pm 15,61$  Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu ise  $4,09 \pm 4,72 - 1314 \pm 15,30$  Bq/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca, radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu ve soğurulmuş doz hızı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; Mısır'daki yapı malzemelerinin çimento, tuğla, granit ve seramik dışında konutlarda kullanılmasının herhangi bir tehlike yaratmadığı saptanmıştır (Shoeib and Thabayneh, 2014).

Sharaf ve Hamideen (2013), Ürdün'de inşaatlar ve ham yapı malzemeleri tedarik eden yerel satıcılardan farklı malzemeler toplamıştır. Çalışmada, malzemelerin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörüne sahip gama spektrometresi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu malzemelerde radyum konsantrasyonlarının  $2,84 - 41,52$  Bq/kg, toryum konsantrasyonlarının  $0,78 - 58,42$  Bq/kg ve potasyum konsantrasyonlarının  $3,74 - 897$  Bq/kg arasında değiştiği belirtilmiştir. Radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, harici ve dahili aktivite indisleri, soğurulmuş doz ve yıllık etkin dozlar hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre; granit ve seramik dışındaki diğer malzemelerin önerilen uluslararası sınırları aşmadığı ortaya çıkarılmıştır.

Agbalagba ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada, Nijerya'da inşaat ve yapı malzemesi olarak kullanılan farklı çimentoların gama spektrometresi kullanılarak radyolojik içeriği analiz edilmiştir. Çalışmada, tüm çimento numunelerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla  $36,1 \pm 13,6$  Bq/kg,  $27,4 \pm 8,3$  Bq/kg, ve  $295,8 \pm 32,7$  Bq/kg olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu değerler, inşaat malzemeleri için dünya ortalama değerlerinden daha düşük bulunmuştur.

El-Mageed ve arkadaşları (2014), Aden'de (Yemen'in bir bölgesi) kullanılan yaygın yapı malzemelerinin gama spektroskopisi kullanarak,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  doğal radyoaktivitelerini analiz etmiştir. Araştırmada, radyum aktivite konsantrasyonu 20,78 - 68,6 Bq/kg, toryum aktivite konsantrasyonu 15,48 - 95,08 Bq/kg ve potasyum aktivite konsantrasyonu ise 116,7 - 2636,7 Bq/kg olarak bulunmuştur. Radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, harici ve dahili aktivite indisleri, soğurulmuş doz hızı ve yıllık etkin doz da hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; çoğu verilerin literatürdeki miktarlarla uyum gösterdiği rapor edilmiştir.

Bavarnegin ve arkadaşları (2013), yüksek radyasyon alan olarak tahmin edilen bir bölgeden yapı malzemeleri tedarik ederek yaptığı çalışmada, malzemelerde radon salınımı hızı ve radionüklitlerin içeriğini ölçmüştür. Elde edilen verilere göre; radon salınımı oranı ile radyum konsantrasyonu arasında doğrusal korelasyon katsayısı (0,90) olarak saptanmıştır.

Gupta ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışma, termik santrallardan elde edilen uçucu kül örneklerinin radon salınımı ve doğal radyoaktivitesi incelenmiştir. Çalışmada, radon gazı salınımı katı hal nükleer iz kazıma dedektörü yardımıyla saptanmıştır. Uçucu kül örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklid konsantrasyonları ise yüksek saflıkta germanyum dedektörüne sahip gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, harici aktivite indisi ve yıllık etkin doz da hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre; tüm uçucu kül örneklerinin literatürde önerilen sınır değerleri aşmadığı belirtilmiştir.

Mahur ve arkadaşlarının (2013) yaptığı çalışmada, zemin (toprak) örneklerinin radon gazı ve  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklid konsantrasyonları ölçülmüştür. Zeminde radon gazı Konsantrasyonları katı hal nükleer iz kazıma dedektörleri (LR 115 - Tip2) ile belirlenmiştir.  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  doğal radyonüklid konsantrasyonları ise, yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörüne sahip gama spektrometresi ile belirlenmiştir. Zemin örneklerinde, radon konsantrasyonu  $177,5 \pm 23,1$  ile  $583,4 \pm 4,9$  Bq/m<sup>3</sup>,  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonu  $32,2 \pm 6,0$  ile  $120 \pm 4,5$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonu  $19,3 \pm 0,9$  ile  $44,6 \pm 1,5$  Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonu ise  $195,4 \pm 2,8$  ile  $505,4 \pm 6,3$  Bq/kg arasında değiştiği belirtilmiştir.

Ali (2012) tarafından yapılan çalışmada, Irak'ta kullanılan 45 farklı yapı malzemesi örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklid aktivite konsantrasyonları, yüksek saflıkta germanyum dedektörüne sahip gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen örneklerle ilişkin aktivite konsantrasyonu sonuçları ile birlikte yapı malzemelerinin kullanılmasından kaynaklanan radyolojik riskler değerlendirilmiştir. Bu amaçla, radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, soğurulmuş gama doz hızı, yıllık etkin doz, alfa indisi, harici ve dahili indisleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; literatürdeki değerlere kıyasla incelenen malzemelerin yapılarda kullanılmasının oldukça güvenli olduğu ifade edilmiştir.

Lu (2005), Çin'deki 8 tür yapı malzemelerinin gama spektroskopisi kullanarak  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  doğal radyoaktivitesini analiz etmiştir. Seçilen yapı malzemelerinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları sırasıyla, 19,5 ve 68,3 Bq/kg, 13,4 ve 51,7 Bq/kg ve 63,2 ve 713,9 Bq/kg civarında değiştiği bildirilmiştir. Tüm yapı malzemelerinin radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu ( $Ra_{eq}$ ) değerleri tavsiye edilen sınır değerden (370 Bq/kg) daha düşük çıkmıştır.

Yine Lu ve arkadaşların (2012), Çin'in bir bölgesinden toplanan yapı malzemelerinin gama spektroskopisi yardımı ile radyum, toryum ve potasyumun doğal radioaktivitesi incelemesi yapılmıştır. Radyum ( $^{226}\text{Ra}$ ) konsantrasyonlarının 13,4 ile 69,9 Bq/kg arasında, Toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) konsantrasyonlarının 13,1 ile 99,1 Bq/kg arasında, potasyum konsantrasyonlarının ise ( $^{40}\text{K}$ ) 124,7 ile 915,1 Bq/kg arasında değiştiği saptanmıştır. Ayrıca, çalışmada incelenen yapı malzemelerinin radyasyon açısından herhangi bir tehlike arz etmediği de ifade edilmiştir.

Başka bir çalışmada, Isparta'daki yapılarda kullanılan bazı malzemelerin radyoaktif içeriği incelenmiştir. Seçilen yapı malzemeleri için;  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  spesifik aktivitesi sırasıyla 17,91 ve 58,88 Bq/kg, 6,77 ve 19,49 Bq/kg, 65,72 ve 248,76 Bq/kg olarak hesaplanmıştır (Mavi and Akkurt, 2010).

Bangladeş'te Alam ve arkadaşları (1999) tarafından yapılan çalışmada, gama spektroskopisi yardımıyla kireç taşı, toz haline getirilmiş kireç, yan ürün kireç ve çimento üzerinde  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{40}\text{K}$  doğal radionüklitlerin aktivite Konsantrasyonları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar kullanılarak, radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, alfa ve gama indisi ve etkin doz değerleri saptanmıştır.  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'nin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla kireç taşı için 60,8, 60,2 ve 928 Bq/kg, toz haline getirilmiş kireç için 107, 68 ve 1660 Bq/kg ve

yan ürün kireç için 83, 31 ve 972 Bq/kg'dır. Çimentoda ise bu değerler 54,3, 29,7 ve 523 Bq/kg ölçülmüştür.

Turhan ve Gündüz (2008) tarafından yapılan çalışmada, Orta Anadolu, Doğu Anadolu, Akdeniz ve Ege bölgelerinde bulunan 11 coğrafi bölgeden toplanan 52 adet pomza numunesinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklid aktivite konsantrasyonları, yüksek safılıkta germanyum dedektörüne sahip gama spektrometresi (HPGe) ile belirlenmiştir. Pomza numunelerde,  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonunun  $12,7\pm 0,5$  ile  $256,2\pm 9,1$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonunun  $12,3\pm 1,0$  ile  $237,9\pm 12,2$  Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonunun  $300,1\pm 5,5$  ile  $1899\pm 30,8$  Bq/kg arasında değiştiği bulunmuştur. Tüm numuneler için, ortalama  $Ra_{eq}$  (radium eşdeğer) aktivite konsantrasyonu  $306,6\pm 177,7$  Bq/kg olarak hesaplanmış ve bu değer literatürde önerilen değerleri aşmadığı rapor edilmiştir.

Turhan ve arkadaşlarının (2007) yaptığı bir başka çalışmada; Göller bölgesinden ve Çukurova bölgesinden alınmış pomza örneklerinin  $Ra_{eq}$  aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır. Göller bölgesindeki pomza örneklerinin  $Ra_{eq}$  aktivite konsantrasyonunun NEA-OECD tarafından tavsiye edilen sınır değerden (370 Bq/kg) daha büyük olduğu rapor edilmiştir. Çukurova bölgesindeki pomza örneklerinin ise hesaplanmış olan  $Ra_{eq}$  aktivite konsantrasyonunun tavsiye edilen sınır değerden daha küçük olduğu saptanmıştır.

Baykara ve arkadaşları (2014) tarafından yapılan çalışmada, Elazığ'da üretilen yapı malzemelerinden elde edilen örneklerin radyoaktivite içeriği gama spektrometresi ile analiz edilmiştir. Ayrıca, radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, yıllık etkin doz, gama ve alfa indisleri de hesaplanmıştır. En düşük  $Ra_{eq}$  değeri tuğla örneklerinde ( $36,5 \pm 1,8$  Bq/kg) bulunmuş, en yüksek  $Ra_{eq}$  değeri ise gaz betonda ( $405,2 \pm 20,9$  Bq/kg) hesaplanmıştır. Ayrıca, bölgedeki bazı yapılarda radon konsantrasyonu ve radon salınımı hızı da ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; ortalama radon konsantrasyonu  $364,3$  Bq/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır (Baykara et al., 2011).

Al-Jarallah'ın (2001) yaptığı çalışmada, Suudi Arabistan'da inşaatlarda kullanılan malzemelerin (kum, agrega, çimento, alçı, sönmüş kireç, granit ve seramik) radon salınımlarını ölçmüştür. Granit örneklerin radon salınımı hızı ortalaması  $1,3$  Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> olarak bulunmuş ve granitin yapı içi radon salınımı için ana neden olduğu saptanmıştır.

Damla ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2011), Türkiye’de yaygın yapı malzemeleri olarak kullanılan tuğla ve kiremit örneklerinin doğal radyonüklitlerin ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) konsantrasyonları gama spektrometre kullanılarak ölçülmüştür. Radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları, radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu, yıllık etkin dozlar da hesaplanmıştır. Tuğla örnekleri için,  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu  $34 \pm 14$  Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu  $34 \pm 13$  Bq/kg, ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonu ise  $462 \pm 175$  Bq/kg olarak ölçülmüştür. Kiremit örneklerinin ise doğal radyonüklitlerinin konsantrasyonları sırasıyla,  $34 \pm 14$  Bq/kg,  $33 \pm 12$  Bq/kg ve  $429 \pm 161$  Bq/kg olarak ölçülmüştür. Çalışmada örneklerin saptanan radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonu değerlerinin dünyada izin verilen değerden (370 Bq/kg) küçük olduğu rapor edilmiştir.

## 2.6 Uçucu Külün Tanımı ve Betona Etkileri

Uçucu kül, elektrik üreten termik santrallerde toz haline getirilmiş taş kömürünün ya da linyitin yakıt olarak kullanılmasından, ikincil bir ürün olarak elde edilmektedir. Bazı uçucu kül taneleri küresel şekilli katı parçacıklardır. Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1-150  $\mu\text{m}$  arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak 2,1-2,7  $\text{g}/\text{cm}^3$  yoğunluğa sahiptirler. UK’lerin daha çok karbon içerenleri koyu gri renkte, daha çok demir içerenleri ise açık gri renkte olmaktadır. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedir. Kalsiyum hidroksitle sulu ortamlarda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. Bu nedenle hem küller, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadır. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilir. Beton karışımında içerisinde yer alabilecek uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15-%50’si civarında değişebilmektedir (Erdoğan, 2007).

Uçucu küller kimyasal ve mineralojik kompozisyonları ve CaO içeriklerine göre düşük ve yüksek kireçli olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. ASTM C 618, düşük ve yüksek kireç içerikli uçucu külleri sırasıyla F ve C sınıfı olarak ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürden üretilen ve toplam “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” yüzdesi %70’den fazla olan küllerdir, C sınıfı uçucu küller ise linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” miktarı %50’den fazla olan küllerdir (Erdoğan, 2007).

Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları, yakıt olarak kullanılan kömürün tipine ve yanma işlemine göre değişiklik göstermektedir. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  olup, diğerleri  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$  ve alkali oksitlerdir. Ayrıca yanmamış karbon ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunmaktadır (Erdoğan, 2006).

Uçucu küllerde az miktarlarda da olsa,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ , alkali ve karbon yer almaktadır. Bunların oranlarının yüksek olması istenmemektedir.  $\text{MgO}$ , hidratasyon sonucunda betonda genleşmeye yol açmaktadır.  $\text{SO}_3$ , sertleşmiş betonda etrenjit oluşumuna ve böylece çok büyük genleşmelere neden olmaktadır. Alkali miktarının yüksek olması, reaktif silis içeren agregalarla reaksiyon olanağını artırarak betonda genleşmelere yol açabilmektedir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerle yapılan hava sürüklenmiş betonlarda, hava sürükleyici katkı maddesi içeriğinin arttığı görülmüştür (Erdoğan, 2003). Uçucu külde bulunan yanmamış karbon kızdırma kaybı olarak bilirlenmektedir. Kızdırma kaybı tayini için yüksek sıcaklıklara kadar pişirilen uçucu kül numunesindeki ağırlık kaybı, büyük oranda, külün içerisindeki karbonun yanmasında kaynaklanmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu külün beton karışımında kullanılması taze ve sertleşmiş beton özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Uçucu küllerin beton özellikleri üzerine olan etkileri aşağıda özetlenmiştir.

Uçucu kül taze betondaki işlenebilmeyi artırabilmektedir. UK yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. Bu nedenle, puzolanik beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betonda agregaların arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır. Ayrıca, uçucu kül taneleri küresel şekilde olduğunda iç sürtünmeyi azaltarak betonun akıcılığını arttırmaktadır (Neville, 1996).

Uçucu kül katkılı betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlıdır. Uçucu külün inceliği arttıkça su ihtiyacı artmaktadır (Erdoğan, 2007). Uçucu külün tane şekli düzensizliğin artmasıyla da su ihtiyacı artmaktadır (Salehahari, 2014).

UK katkılı betonlarda yer alan portland çimentosu miktarı, katkısız betondakine göre daha azdır. Uçucu kül katkılı betonların priz süreleri katkısız

betondakinden genellikle daha uzun olmaktadır. Priz süresi, kullanılan uçucu küllün tipine ve inceliğine göre değişmektedir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllerden daha kısa priz süresi göstermektedir (Erdoğan, 2007).

Uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığına, bu tür betonların hidrasyon ısıları, katkısız betondakinden daha az olmaktadır (Erdoğan, 2007).

Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolanların etkisine benzemektedir. Normal olarak, ilk zamanlarda, uçucu küllü betonun dayanımı katkısız beton dayanımına kıyasla birazcık daha az olmaktadır. Ancak sonunda dayanım oldukça yüksektir (Erdoğan, 2007).

Uçucu küllü betonun geçirgenliği genelde katkısız betonun geçirgenliğinden daha düşüktür. Geçirgenliğin böyle düşük olmasının nedeni uçucu kül ile çimentonun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki puzolanik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ilave C-S-H jelleridir. Bu jeller kapiler boşlukları azaltmaktadır. Uçucu kül kullanımının betonda geçirgenliği azaltması ayrıca sülfatların beton üzerindeki bozucu etkilerini de azaltmaktadır (Erdoğan, 2007).

Uçucu küllü betonların sülfatlara dayanıklılığı katkısız betonlara göre daha fazladır. Çünkü puzolanik katkı maddeleriyle üretilen betonlarda daha az portland çimentosu yer alacağından, sülfat reaksiyonuna yol açabilecek  $C_3A$  miktarı daha az olmaktadır (Erdoğan, 2003). Ayrıca, puzolan katkılı betonlardaki hidrasyon, önce Portland çimentosu ile su arasında başlamaktadır. Puzolanların reaksiyon gösterebilmeleri;  $C_3S$  ve  $C_2S$  anabileşenlerinin hidrasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Yani puzolan katkılı betonlarda daha az miktarda kalsiyum hidroksit yer almaktadır. Bu da, sülfat ve kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyon sonucunda oluşabilecek alçıtaşı miktarının az olmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllü betonlarda katkısız betondakine göre daha az Portland çimentosu bulunması, betonun içerisinde daha az miktarda  $C_3A$  ve alkalilerin yer almasına, dolayısıyla uçucu küllü betonlarda alkali-agrega reaksiyonunun daha az miktarda gerçekleşmesine sebep olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu külün radon salınımına etkileri konusunda yapılmış bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Stranden'in (1983) yaptığı çalışmada, betonda uçucu külün etkisi incelenmiştir. Çimento ile uçucu külün radon aktivite konsantrasyonları ve radon salınımı hızı ölçülmüştür. Radon salınımı hızı uçucu kül içeren betonlar normal betona göre daha düşük olduğu bulunmuştur.

Çimentonun bir bölümü yerine uçucu kül ikame edilmiş olan betonların radon salınımı hızları Ulbak ve arkadaşları (1984) tarafından incelenmiştir. Çimento yerine uçucu kül hacimce %25 ikame edilirken betonun <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonu 1,5'e kadar arttığı bulunmuştur. Aynı zamanda, daha yüksek <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonu içeriğine rağmen, portland çimentosu ve uçucu kül ile yapılan betonların radon salınımında ufak bir artış ya da düşüş olduğu bulunmuştur.

Yu ve arkadaşları (1997) portland çimentosunun %25'i yerine uçucu kül ikamesi ile üretilen betonun radon salınımı hızını incelemiştir. Beton örnekleri laboratuvar ortamında (23°C ve %60 bağıl nemde) 1 yıl boyunca izlenmiştir. Uçucu kül içeren betonlarda radon salınımı hızı azaldığı bulunmuştur.

Kovler ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan çalışma, uçucu kül içeren sertleşmiş çimento hamurunun porozitesini azaltarak betonun radon salınım hızını düşüğe neden olduğunu gösterilmiştir.

## 2.7 Silis Dumanının Tanımı ve Betona Etkileri

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozudur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO<sub>2</sub> olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur (Yeğınobalı, 2007).

Silis dumanının rengi açık griden koyu griye kadar değişiklik göstermektedir. Karbon içeriği arttıkça renk daha koyu olmaktadır. Demir oksit fazlalığı ise renge hafif kahverengi bir ton verir. Su ile birleşmiş durumda, siyaha yakın bir renk sergilemektedir (Erdoğan, 2003).

Silis dumanının özgül ağırlığı ortalama 2,20 civarındadır (bilindiği gibi portland çimentosunun özgül ağırlığı 3,10 - 3,15 civarındadır). Silis dumanının birim ağırlığı, üretildiği haliyle, 240 - 300 kg/m<sup>3</sup> civarındadır. Silis dumanının çok ince taneli olduğundan, su ihtiyacı oldukça yüksektir. Ayrıca, çok kuvvetli bir puzolanik bağlayıcılık göstermektedir (Erdoğan, 2007).

Silis dumanı tanelerinin çok ince olmasından dolayı, belirli bir çökme değeri için betonun su ihtiyacını artırmaktadır. Bu yüzden, betonda daha az su kullanmak amacıyla, silis dumanlı katkılarla yapılan betonlarda su azaltıcı katkı malzemelerinin de kullanılması gerekmektedir (Erdoğan, 2007).

Silis dumanı çok ince taneli olduğundan, su ihtiyacı oldukça yüksektir. Ayrıca, çok ince taneleri ve yüksek amorf silis içeriği nedeni ile silis dumanı çimento hamurundaki CH ile reaksiyona girerek puzolanik C-S-H jeli oluşturmaktadır (Yeğınobalı, 2007).

Çok ince ve yuvarlak silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iterler ve taze hamurun kıvamı üzerinde etkili hale getirirler. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu büyük yüzey alanı su ihtiyacını artırarak kıvamı olumsuz etkilemektedir (Yeğınobalı, 2007).

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Silis dumanının çok ince taneli olmasıyla beton içerisindeki boşlukların azaltılması ve puzolanik aktivitesinin çok yüksek olması, silis dumanı katılan betonlarda çok yüksek dayanımlar elde edilebilmesine yol açmaktadır. Silis dumanlı betonların su geçirimsizliği katkısız betonunkinden daha azdır. İnce tanelerin beton içerisindeki boşlukları doldurması ve puzolanik reaksiyonların bir an önce başlayarak kapiler boşlukları azaltması, bunun muhtemel nedenleri olarak belirtilmektedir. Silis dumanlı betonların su geçirgenliği daha az olduğundan bu tür betonlarda sülfatlara karşı daha yüksek direnç göstermektedir (Erdoğan, 2003).

Silis dumanının ince taneleri içindeki silis, çimento hamuru boşluk sıvısındaki alkalileri hızla bağlayarak sıvının alkali yoğunluğu ve pH değerini azaltır. Bu durumda boşluk sıvısında azalan alkalilerin agregadaki reaktif silis ile reaksiyona girmelerini zorlaştırır. Katkılı hamurda geçirgenliğin azalmış olması da olumlu etki yapmaktadır (Yeğınobalı, 2007).

Silis dumanının radon salınımına etkileri konusunda yapılmış bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Chauhan ve Kumar'ın (2013) yaptığı çalışmada, çimento yerine %10, %20, %30, %40 ve %50 mertebesinde silis dumanı ikame ederek 70 mm ayrıtlı küp harç örnekleri hazırlamıştır. Bu harç örneklerin üzerinde su emme, basınç ve radon salınımı hızı deneyleri yapılmıştır. Silis dumanının ikame oranı arttıkça harçların boşluklarının azaldığı ve basınç dayanımlarının yükseldiği fark edilmiştir. Bunun nedeni silis dumanının çok ince olduğu ve CH ile puzolanik reaksiyona girerek ilave C-S-H jelleri oluşmasını sağlaması olarak açıklanmıştır. Yine silis dumanının ikame oranı arttıkça harç örneklerin radon salınımı hızı kontrol harç örneklere göre yaklaşık 3 kat azaldığı rapor edilmiştir.

Betonda silis dumanı ikame edildiğinde radon salınımı hızı ile ilgili benzer bir çalışma Yu ve arkadaşları (2000) tarafından yapılmıştır. Bildirilen değerlere göre, silis dumanlı betonun radon salınımı hızının kontrol betonun %40 ile %45 arasında değiştiği bildirilmiştir (Yu et al., 2000).



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1 Malzemeler

##### 3.1.1 Çimento

Bu çalışmada üretilecek olan harçlarda yöresel bir CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimento üreticiden torbalar halinde teslim alınmış ve laboratuvar ortamında saklanmıştır. Kullanılan çimentonun üreticisi tarafından verilen bazı kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Kullanılan çimentonun özellikleri

Kimyasal özellikler	Miktar (%)
SiO <sub>2</sub>	19,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,48
CaO	62,5
MgO	1,09
Na <sub>2</sub> O	0,27
K <sub>2</sub> O	0,8
SO <sub>3</sub>	3,41
Kızdırma Kaybı	1,42
Cl	0,0074
Çözünmeyen Kalıntı	0,63
Serbest CaO	1,06
C <sub>3</sub> S	56,54
C <sub>2</sub> S	13,62
C <sub>3</sub> A	10,09
C <sub>4</sub> AF	7,54
Fiziksel özellikler	
Özgül Ağırlık	3
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3677
Priz başlangıç Süresi, (dak.)	150
Priz Sona Erme Süresi, (dak.)	200
Mekanik özellikler	
Basınç Dayanımı (MPa)	
3 gün	30,8
7 gün	39,3
14 gün	45,4
28 gün	49,6

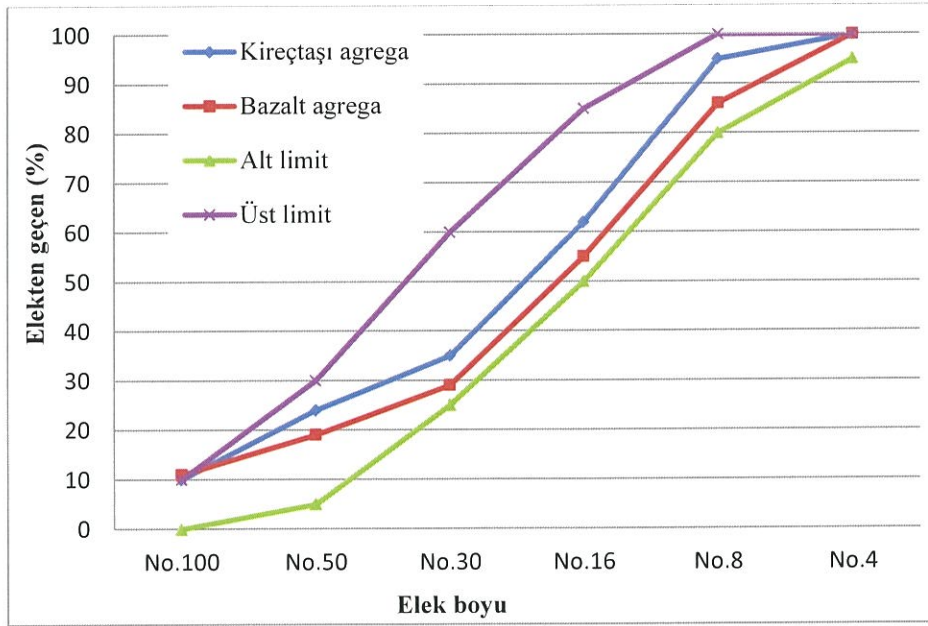
##### 3.1.2 Agregalar

Tez kapsamında, yöresel kaynaklardan temin edilmiş kırma ince kireçtaşı ve bazalt agregaları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agregaların gradasyonu,

özgül ağırlığı, su emme kapasitesi ve birim hacim ağırlık değerleri TS EN 933-1, ASTM C 128-07 ve TS 3529 standartlara uygun olarak saptanmıştır. Agregaların elek analizi sonuçları Tablo 3.2’de, gradasyonu Şekil 3.1’de, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme özellikleri de Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Kireçtaşı ve bazalt agregaların elek analizi sonuçları

Elek açıklığı (mm)	Kireçtaşı agregası (0 - 4 mm)	Bazalt agregası (0 - 4 mm)
	Geçen (%)	
8	100	100
4	100	100
2	78	67
1	48	42
0.5	31	26
0.25	19	17
0.125	10	10
0.063	2	9



Şekil 3.1 Kireçtaşı, bazalt agregaları ve ASTM C 33 limit değerleri için granülometri eğrileri

Tablo 3.3 Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Kireçtaşı agregası	Bazalt agregası
<b>Birim hacim ağırlık, (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
Sıkışık	1607	1753
Gevşek	1460	1634
<b>Özgül ağırlık</b>		
Kuru	2,63	2,77
Doygun Yüzey Kuru	2,66	2,79
Görünür	2,70	2,82
Su emme oranı (%)	0,93	0,65

### 3.1.3 Mineral katkıları (silis dumanı ve uçucu kül)

Çalışmada 2 tip mineral katkı harç üretiminde kullanılmıştır. Bunlar silis dumanı ve uçucu küldür. Her iki mineral katkıda yerel kaynaklardan temin edilmiştir. Kullanılan uçucu kül ve silis dumanının bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Silis dumanı ve uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

	Silis dumanı	Uçucu kül
<b>Kimyasal özellikler</b>		
SiO <sub>2</sub>	87,29	47,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47	11,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,62	7,22
CaO	0,81	15,94
MgO	4,47	7,77
Na <sub>2</sub> O	1,25	1,59
K <sub>2</sub> O	1,28	3,04
SO <sub>3</sub>	0,22	2,78
Kızdırma kaybı	3,08	0,42
Cl	0,1351	-
Çözünmeyen kalıntı	78,72	-
Serbest CaO	-	-
<b>Fiziksel özellikler</b>		
Özgül ağırlık	2,22	2,55
Blaine yüzeyi, (cm <sup>2</sup> /g)	18000	4040
7 günlük puzolanik aktivite indeksi (%)	69	101
28 günlük puzolanik aktivite indeksi (%)	79	132

### 3.1.4 Karışım suyu

Harç üretiminde karışım suyu olarak içilebilir nitelikte şebeke suyu kullanılmıştır.

### 3.2 Harç Karışımları ve Üretimi

Tez kapsamında 14 farklı içerikte harç karışımı tasarlanmıştır. Üretilen harç karışımlarında (ağırlıkça) 1 kısım bağlayıcı, ½ kısım su, 3 kısım ince agrega kullanılmıştır. Ayrıca tüm harçlarda yayılma değeri  $170\pm 10$  mm olacak şekilde tutulmaya çalışılmıştır. Bunu sağlayabilmek için harçlarda hiperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

Üretilen kontrol harcında bağlayıcı olarak %100 CEM I 42,5 R çimento, SD5 kodlu harç karışımında %95 CEM I 42,5 R + % 5 SD, SD10 kodlu harç karışımında %90 CEM I 42,5 R + %10 SD, SD15 kodlu harç karışımında %85 CEM I 42,5 R + %15 SD, UK10 kodlu harç karışımında %90 CEM I 42,5 R + %10 UK, UK20 kodlu harç karışımında %80 CEM I 42,5 R + %20 UK, UK30 kodlu harç karışımında %70 CEM I 42,5 R + %30 UK kullanılmıştır. Harçların karışım oranları Tablo 3.5’de sunulmuştur.

Tablo 3.5 Harç karışım kompozisyonları ve malzeme miktarı (g)

Harç kodu	Çimento	SD*	UK**	Su	Kireçtaşı agrega	Bazalt agrega	HPA***
	Malzeme ağırlığı, g						
KTK	450	0	0	225	1350	0	0,9
KTSD5	422,5	22,5	0	225	1350	0	1,2
KTSD10	405	45	0	225	1350	0	1,5
KTSD15	382,5	67,5	0	225	1350	0	1,8
KTUK10	405	0	45	225	1350	0	1,2
KTUK20	360	0	90	225	1350	0	1,3
KTUK30	315	0	135	225	1350	0	1,4
BK	450	0	0	225	0	1350	0,9
BSD5	422,5	22,5	0	225	0	1350	1,1
BSD10	405	45	0	225	0	1350	1,5
BSD15	382,5	67,5	0	225	0	1350	2,1
BUK10	405	0	45	225	0	1350	1,1
BUK20	360	0	90	225	0	1350	1,2
BUK30	315	0	135	225	0	1350	1,5

\*SD: Silis dumanı, \*\*UK: Uçucu kül, \*\*\*HPA:Hiperakışkanlaştırıcı

Çalışmada tasarlanan 14 tip harç laboratuvar tipi mikser yardımıyla hazırlanmıştır. Miksere önce kuru olarak su ve bağlayıcılar konulmuş. Mikser düşük hızda çalıştırılmaya başlanmış ve 30 saniye sonra, ince agrega, 30 saniye içinde sürekli olarak ilave edilmiş. Mikser yüksek hıza ayarlanmış ve karıştırmaya 30 saniye daha devam edilmiş. Mikser, 90 saniye sonra durdurulmuş. Daha sonra, mikserin çeperlerine ve tabanına yapışan harç sıyırılmıştır. Hiperakışkanlaştırıcı katkı ekleyerek karıştırma işlemi yüksek hızda 1 dakika daha devam ettirilmiştir. Bu işlem tüm harçlarda benzer şekilde yapılmıştır.

Üretilen harçlardan 40/40/160 mm boyutlu prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan prizmatik örneklere harç karışımları iki tabaka halinde doldurulmuş ve sarsma tablasında sıkıştırılmıştır. Kalıplara doldurulmuş harç örnekler bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak 7, 28 ve 90 gün boyunca  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisinde küre tabi tutulmuştur.

### **3.3 Yapılan Deneyler**

Çalışmada üretilen harçlar üzerinde yapılan deneyler aşağıda sıralanmıştır.

#### **3.3.1 Yayılma deneyi**

Üretilen harçların taze halde yayılma değerleri TS EN 1015-3'e uygun olarak saptanmıştır.

#### **3.3.2 Eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri**

Harç karışımlardan üretilen 7, 28 ve 90 günlük 40/40/160 mm boyutlu örnekler üzerinde; TS EN 196-1'e uygun olarak önce ortadan tekil yüklemeli eğilme deneyi, daha sonra da eğilme deneyinde kırılan örnekler üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır. Eğilme ve basınç deneyleri 10 ton kapasiteli universal preste yapılmıştır. Eğilme deneylerinde giriş açıklığı 100 mm olarak ayarlanmıştır.

### 3.3.3 Birim hacim ağırlık, su emme deneyleri

Su emme deneyleri her karışım için 3 adet olmak üzere, toplam 42 (kireçtaşı agrega içeren harç numuneleri 21 adet ve bazalt agrega içeren harç numuneleri 21 adet) adet 28 günlük 40x40x160 mm prizmatik numune kullanılarak yapılmıştır. 28 günlük sertleşmiş harç örneklerin birim hacim ağırlık ve su emme deneyleri ASTM C 642'e göre tespit edilmiştir.

### 3.3.4 Kılcal yolla su emme deneyleri

Çalışma kapsamında kılcallık deneyleri boyutları 40x40x160 mm olan harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. Örnekler kılcallık deneyinde 40x40 mm'lik yüzeylerinden su ile temas edilmiştir. Numunelerin yan yüzleri parafinle kaplanmıştır. 28 günlük suda bekletilmiş olan harç numunelerinin kılcal yolla su emme deneyi ASTM C 1585 standardına uygun olarak yapılmıştır.

## 3.4 Radon Konsantrasyonu Deneyleri

Çalışmada radon gazı ölçümleri sertleşmiş harç yapımında kullanılan ham maddeler, 28 günlük prizmatik örnekler ve 28 günlük harç örneklerin öğütülerek toz hale getirilmiş numuneleri üzerinde ayrı ayrı yapılmıştır. Yukarıda sıralanan harç örneklerin radon konsantrasyonları LR -115 Tip 2 nükleer iz kazıma dedektörleri kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu testler Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir.

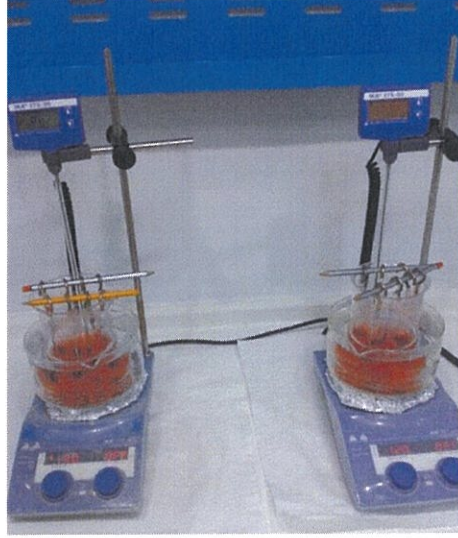
### 3.4.1 Nükleer iz kazıma dedektörleri (LR-115 Tip 2) ile radon ölçümleri

Tez kapsamında harç ve ham maddelerin radon gazı salınımlarının saptanabilmesi için; harç yapımında kullanılan ham maddeler, 28 günlük prizmatik örnekler ve 28 günlük harç örneklerin öğütülerek toz hale getirilmiş numuneleri önce 105°C'de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra 3 gruptaki örnekler ayrı ayrı özel cam kavanozlara konulmuştur. Cam kavanozlara 1,5cm / 1,5cm boyutlarındaki LR-115 film dedektörleri yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Bu dedektörle toz örneklerin bulunduğu kaplarda kapaklara, prizmatik örneklerin bulunduğu kaplarda ise örnek üzerilerine tutturulmuştur. Kavanozlarda bulunan filmi dış etkilerden korumak amacıyla hava almayacak bir şekilde kavanozların kapakları parafilin ile kapatılarak izole edilmiştir.



Şekil 3.2 Toz ve prizmatik örneklerde LR-115 dedektörlerin yerleştirilmesine ait görüntüler

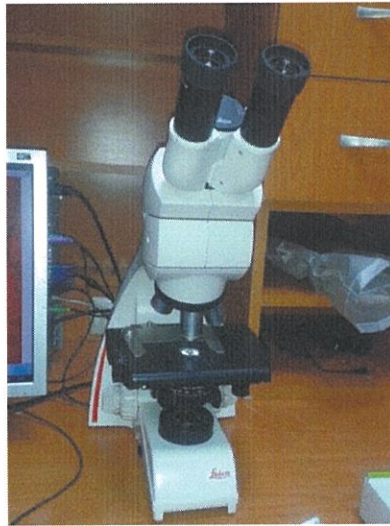
Kavanozlarda bulunan film dedektörler sayesinde 4 hafta boyunca ölçümler alınmıştır. Bu süre sonunda eski film dedektörler kavanozlardan çıkarılıp yerlerine yeni dedektörler yerleştirilmiş ve alınan film dedektörlerdeki izlerin belirginleştirilmesi için kimyasal iz kazıma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sırasında dedektörler Şekil 3.3’de görüldüğü gibi, önceden 60 °C sıcaklığa getirilmiş 2,5 N (% 10) NaOH çözeltisi içerisinde 90 dakika boyunca bekletilmiştir (Baixeras et al., 1997). Bu süre sonunda çözeltiden çıkarılan dedektörler saf su içerisinde 10 dakika temizleme işlemine tabi tutulmuştur. İz kazıma işlemi ile gizli izler optik mikroskopta görünür hale getirilmiştir. Bundan sonra, optik mikroskop yardımıyla dedektör üzerindeki izlerin görüntüleri fotoğraflanmıştır.



Şekil 3.3 İz kazıma banyo işlemine ait görüntü

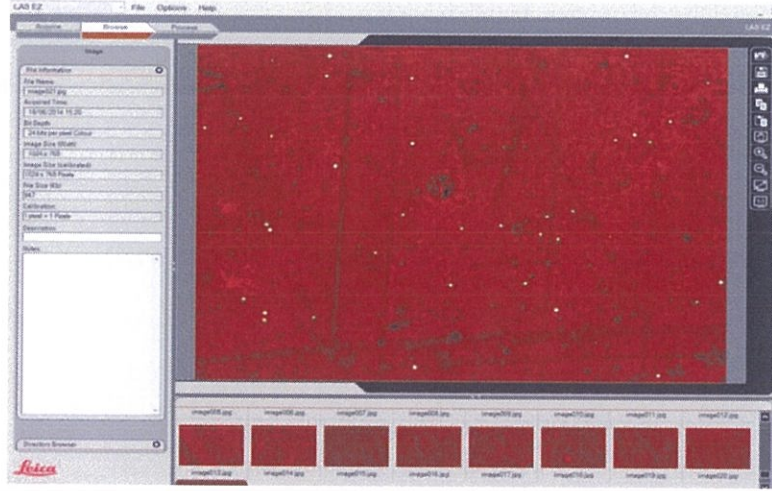
Çalışma kapsamında kullanılan film dedektörlerdeki alfa iz yoğunluğunun belirlenmesi 3 aşamada gerçekleştirilmiştir (Arias et al., 2005). Birinci aşamada, optik mikroskobu (Şekil 3.4) kullanılarak dedektörlerin farklı alanlarından görüntülerin fotoğrafı çekilmiştir. İkinci aşamada, fotoğraf görüntüsü Corel PaintShop yazılımı ile işlenerek elde edilmiştir. Son aşamada ise, Scion yazılımı kullanılarak görüntü üzerindeki iz yoğunluğu tayin edilmiştir.

Çalışmada, LEICA DM 750 optik mikroskop, LEICA ICC 50 dijital kamera, masaüstü bilgisayar ve LEICA Application Suite (LAS EZ) yazılımını içeren dijital mikroskop sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.4).



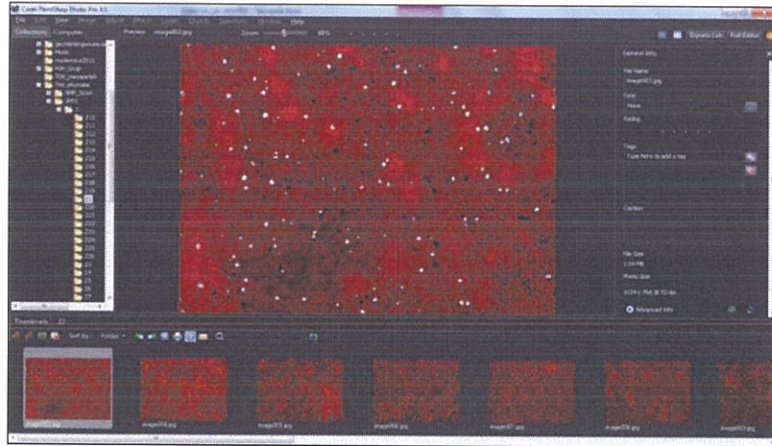
Şekil 3.4 Kullanılan Leica DM 750 Optik mikroskobu

Fotoğraflama işlemi her bir dedektör için, dedektörün bir yüzey alanını kapsayacak şekilde yapılmıştır. Bu şekilde rastgele seçilmiş olan 20 farklı bölgenin fotoğrafı elde edilmiştir. Çalışmada mikroskobun 100 kat büyütme objektifi kullanılmıştır. Bu objektif ile  $1,2838 \text{ mm}^2$  büyüklüğünde alanlar görüntülenmiştir. Şekil 3.5’de LR-115 film dedektörü üzerinde rastgele seçilmiş bölgenin fotoğrafının görüntüsü verilmiştir.



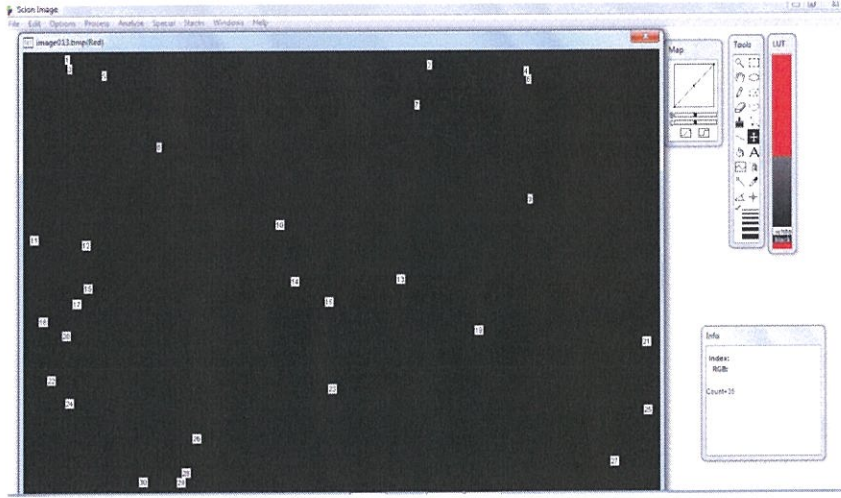
Şekil 3.5 LEICA Application Suite (LAS EZ) ile LR-115 film dedektör üzerinde rastgele seçilmiş bir bölgenin fotoğrafının görüntüsü

İkinci aşamada, elde edilen film dedektörlerin fotoğrafları Corel PaintShop Pro X3 görüntü işleme yazılımı kullanılarak rötuşlanmıştır (Şekil 3.6). Bu yazılım kullanılarak elde edilmiş olan siyah beyaz görüntüler bmp formatında kayıt edilmiştir.



Şekil 3.6 Corel PaintShop Pro X3 görüntü işleme yazılımı kullanılarak yapılan rötuşun ekran görüntüsü

Üçüncü ve son aşamada görüntülerin işlenmesinin ardından, SCION Image Analyser yazılımı kullanılarak, her bir fotoğraf alanı üzerindeki izlerin sayısı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). Optik mikroskop altında çekilen görüntülerin alanları  $1,2838 \text{ mm}^2$  olduğu için elde edilen iz sayıları üzerinde matematiksel işlemler uygulanarak bu iz sayıları birim alandaki (iz  $\text{cm}^{-2}$ ) iz yoğunluğuna dönüştürülmüştür.



Şekil 3.7 Alfa izlerinin SCION yazılımı kullanılarak elde edilen görüntüsü

### 3.5 Çalışmada Kullanılan Kalibrasyon Katsayısı

Çalışma kapsamında elde edilen LR-115 nükleer iz kazıma dedektörlerinin iz yoğunluklarını (iz  $\text{cm}^{-2} \text{ gün}^{-1}$ ) aktiviteye ( $\text{Bq/m}^3$ ) dönüştürmek için, İçhedef (2011) tarafından hesaplanan kalibrasyon katsayısı  $0,0217 \text{ kBq m}^{-3}/\text{iz cm}^{-2} \text{ gün}^{-1}$  kullanılmıştır.

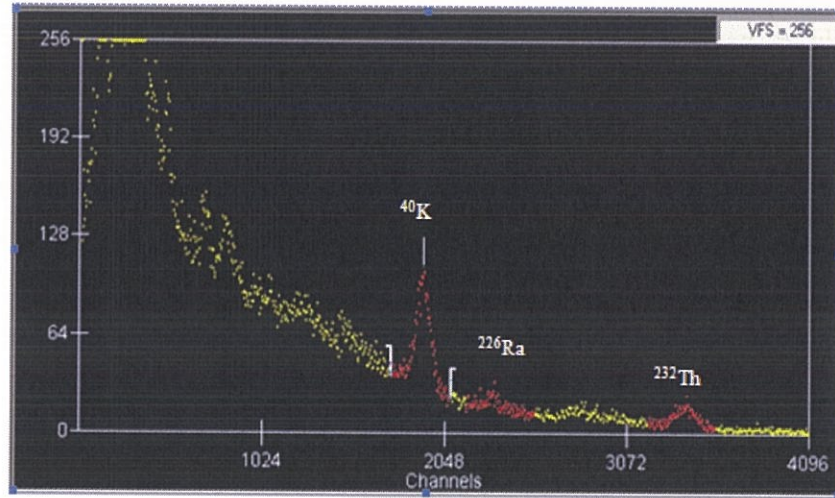
### 3.6 $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ ve $^{40}\text{K}$ Radyonüklid Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Tez kapsamında üretilen harçlarda üretimde kullanılan ham maddelerin ve 28 günlük sertleşmiş harç örneklerin öğütülerek toz hale getirilmiş numunelerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklid konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalarda yürütülmüştür. Bu işlem için önce her iki grup örnekler öğütülerek toz hale getirilmiş ve daha sonra net ağırlıklarını belirlemek amacıyla, örnekler, sıcaklığı  $105^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}$  olacak şekilde ayarlanmış etüvde 24 saat süreyle bekletilerek kurutulmuştur. Kurutulan örnekler 1 mm elekten geçirilip 100 cc'lık silindirik plastik kaplara konulmuştur. Kaplarda oluşan radon gazının dışarı çıkışını engellemek için hava almayacak şekilde kapların ağızları silikonla

kapatılmıştır (Şekil 3.8). Kapatılan örnekler radyum ve ürünleri arasındaki radyoaktif dengenin oluşabilmesi amacıyla 40 gün bekletilmiştir. Bu süreyi tamamlayan örneklerde doğal radyoaktivite ölçümleri gama spektroskopisiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9).



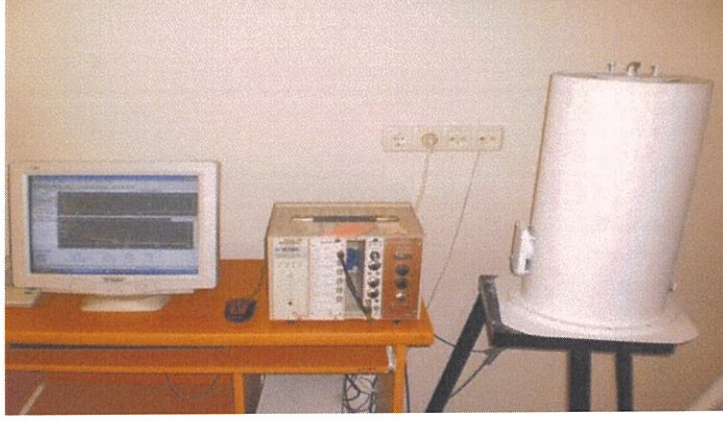
Şekil 3.8 Toz hale getirilmiş örneklerinin silikonla kapatılmış haline ait görüntü



Şekil 3.9 Toz hale getirilmiş harç örneklerinin NaI(Tl) dedektörlü gama spektroskopisinde alınan örnek spektrum görüntüsü

Çalışma kapsamında toz hale getirilmiş örneklerin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları 3x3 inç'lik NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektroskopi sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Kullanılan gama spektrometre sistemi NaI(Tl) sintilasyon dedektörü, fotoçoğaltıcı tüp, Canberra AMP/TSCA (Model 2015A)

Amplifier, Canberra Multiport II ve Genie 2000 yazılımından oluşmuştur. Dedektör sistemini çevreyen kurşun zırh ile bina yapı malzemelerinden ve çevreden gelebilecek radyasyonu en aza indirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 NaI(Tl) sintilasyon dedektörlü gama spektrometresinin görüntüsü

Çalışmada  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları,  $^{40}\text{K}$ 'un radyoaktif bozunumunda yayımlanan 1,46 MeV (milyon elektron volt) enerjili gama ışınlarının spektrumunda oluşturduğu pik altında kalan alan taranarak belirlenmiştir. Çalışmada,  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları 1,46 MeV enerjili gama pikinden,  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonları  $^{214}\text{Bi}$ 'ün 1,76 MeV enerjili gama pikinden ve  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonları  $^{206}\text{Tl}$ 'nin 2,61 MeV enerjili gama pikinden yararlanılarak tayin edilmiştir (Bolca et al., 2006, Mahur et al., 2008). Çalışmada, 40 gün bekletildikten sonra, toz hale getirilmiş örnekler 10000 s sayım süresinde ölçüm yapılmıştır.

## 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALARI

Tez kapsamında üretilen harç karışımları üzerinde yapılan bazı fiziksel, mekanik ve radyoaktif deneylerinden elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

### 4.1 Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Bazı Fiziksel Deney Sonuçları

#### 4.1.1. Yayılma deneyi sonuçları

Üretilen harçların taze halde yayılma değerleri TS EN 1015-3'e uygun olarak saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1.Harç karışımlarının yayılma değerleri sonuçları

Karışım	Yayılma değeri (mm)	Karışım	Yayılma değeri (mm)
KTK	170	BK	165
KTSD5	175	BSD5	170
KTSD10	175	BSD10	165
KTSD15	180	BSD15	170
KTUK10	175	BUK10	170
KTUK20	180	BUK20	175
KTUK30	175	BUK30	180

Tablo 4.1'de sunulan sonuçlar incelendiğinde hedeflenen işlebilme değeri olan  $17 \pm 10$  cm'nin tüm harç karışımlarında sağlandığı görülmektedir. Harçlarda istenilen işlenebilmenin sağlanması için, özellikle mineral katkı içeren harçlarda, çimento ağırlığının değişik oranlarında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

#### 4.1.2 Su emme oranı, birim hacim ağırlık ve porozite sonuçları

Su emme oranı, birim hacim ağırlık ve porozite test sonuçları Tablo 4.2 ve 4.3'de verilmiştir. Hesaplamalar ölçülen ağırlıklar kullanılarak aşağıdaki förmüllere göre yapılmıştır.

$$P = 1 - \frac{BHA}{\text{Özgül ağırlık}}$$

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{A}{V_d}$$

$$BHA = \frac{A}{V}$$

$$\text{Su emme oranı (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

$$\text{Görünür boşluk oranı (\%)} = \left( \frac{B - A}{B - C} \right) \times 100$$

Yukarıdaki formüller; p,  $V_d$ , V, A, B, C ve BHA sırasıyla porozite, dolu hacim, görünür hacim, kuru ağırlık, doymun yüzey ağırlık, sudaki ağırlık ve birim hacim ağırlıktır.

Tablo 4.2 Kireçtaşı agregası içeren harç karışımlarının su emme, porozite ve birim hacim ağırlık deneyleri sonuçları

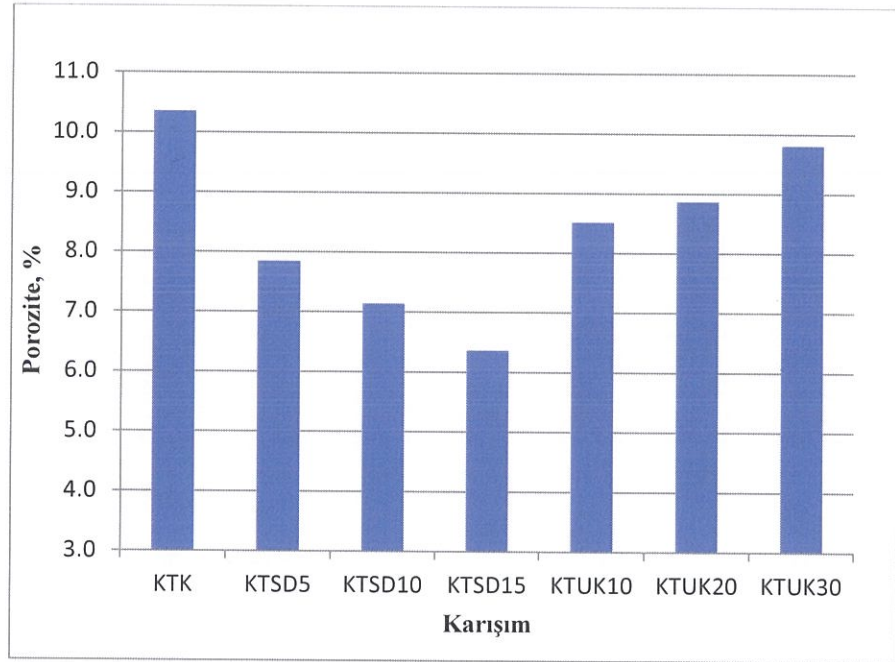
Karışım	Su emme (%)	Porozite (%)	BHA (kg/m <sup>3</sup> )
KTK	4,1	10,4	2112
KTSD5	3,3	7,9	2099
KTSD10	2,8	7,1	2116
KTSD15	2,4	6,4	2141
KTUK10	3,5	8,5	2152
KTUK20	3,6	8,9	2113
KTUK30	4,1	9,8	2094

Tablo 4.3 Bazalt agregası içeren harç karışımlarının su emme, porozite ve birim hacim ağırlık deneyleri sonuçları

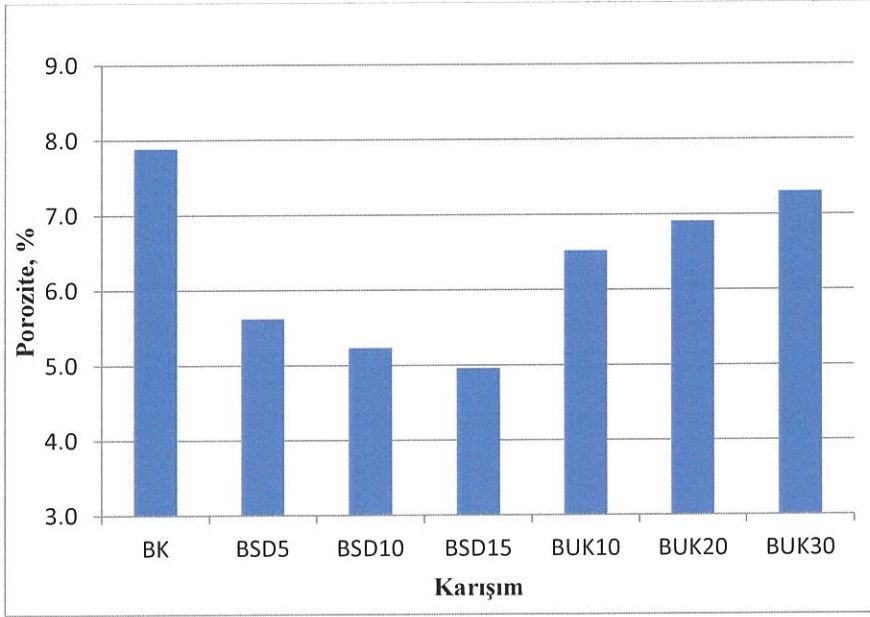
Karışım	Su emme (%)	Porozite (%)	BHA (kg/m <sup>3</sup> )
BK	2,9	7,9	2185
BSD5	2,1	5,6	2194
BSD10	1,7	5,2	2216
BSD15	1,7	5,0	2226
BUK10	2,5	6,5	2204
BUK20	2,8	6,9	2200
BUK30	2,9	7,3	2196

Tablo 4.2, Tablo 4.3, Şekil 4.1 - Şekil 4.4 incelendiğinde, kireç taşı agregası içeren harç karışımlarının su emme ve porozite oranlarının bazalt agregası içeren harç karışımlarına kıyasla fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, silis dumanı içeren karışımların su emme ve porozite oranları kontrol ve uçucu kül karışımlarına göre daha düşük çıkmıştır. Su emme açısından en kötü sonuçlar kontrol harçlarında elde edilmiştir. Bu sonuçlar mineral katkıların inceliklerine bağlı olarak harçların boşluklarını tıkadığını, dışarıya açık boşluk sayısını azalttığını göstermektedir.

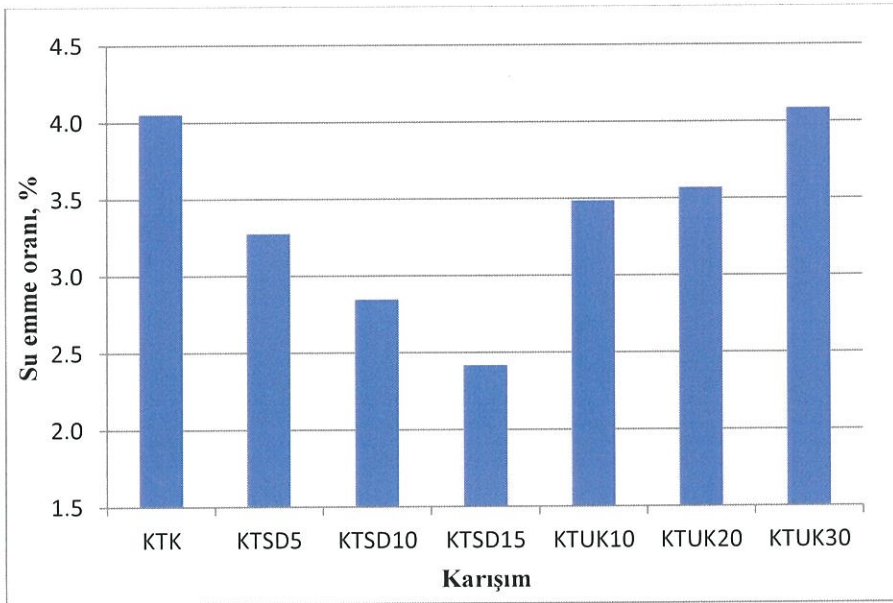
Ayrıca, hem kireç taşı hem de bazalt agregalı kontrol harçlarının porozite ve su emme oranlarının değişik oranlarda silis dumanı ve uçucu kül içeren harçlardan daha yüksek değerlere sahip oldukları da görülmektedir. Kireç taşı veya bazalt agregalı harçlarda çimento yerine kullanılan silis dumanı oranının %5'den %15'e çıkması ile harçların porozitesi ve su emme oranının düştüğü, buna karşın %10 ile %30 oranlarında uçucu kül kullanımı ile ise harçların porozite ve su emme oranlarının yükseldiği de görülmektedir. Silis dumanı içeren harçların su emme oranının ve porozite oranlarının uçucu küllü harçlardan daha düşük olmasının nedeninin ise silis dumanının uçucu külden çok daha fazla inceliğe sahip olmasıdır. Ayrıca uçucu külün 28 günlük küre süresinde puzolanik özelliğinin etkisinin daha az gerçekleşmesi, kür süresi uzadıkça oluşturacağı yeni C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) ürünleri ile bu handikapını kapatacağı düşünülmektedir. Burada elde edilen sonuçlar mineral katkılardan beklenen sonuçtur.



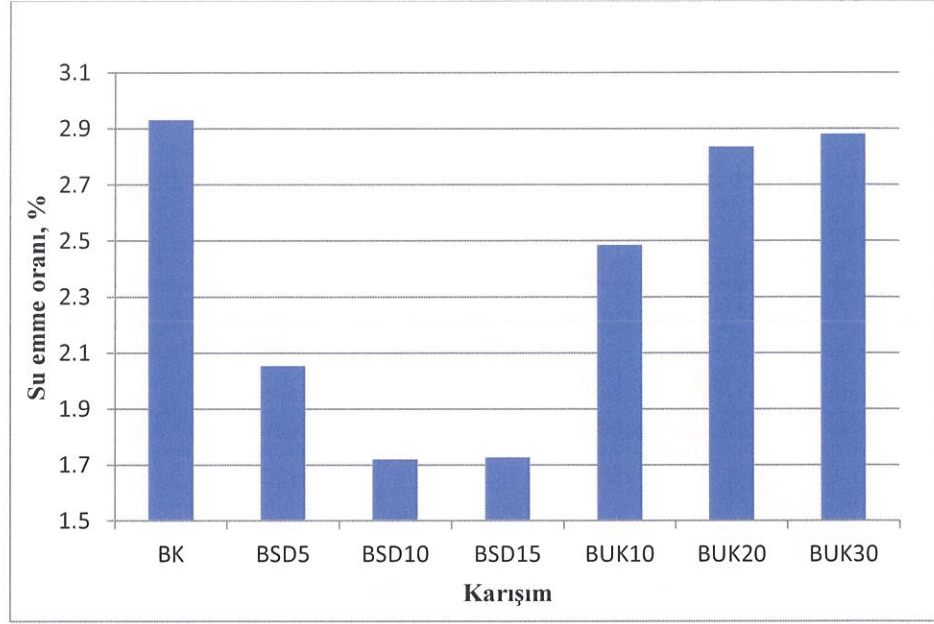
Şekil 4.1 Kireçtaşı agregası içeren harç karışımlarının porozite değerleri



Şekil 4.2 Bazalt agrega içeren harç karışımlarının porozite değerleri



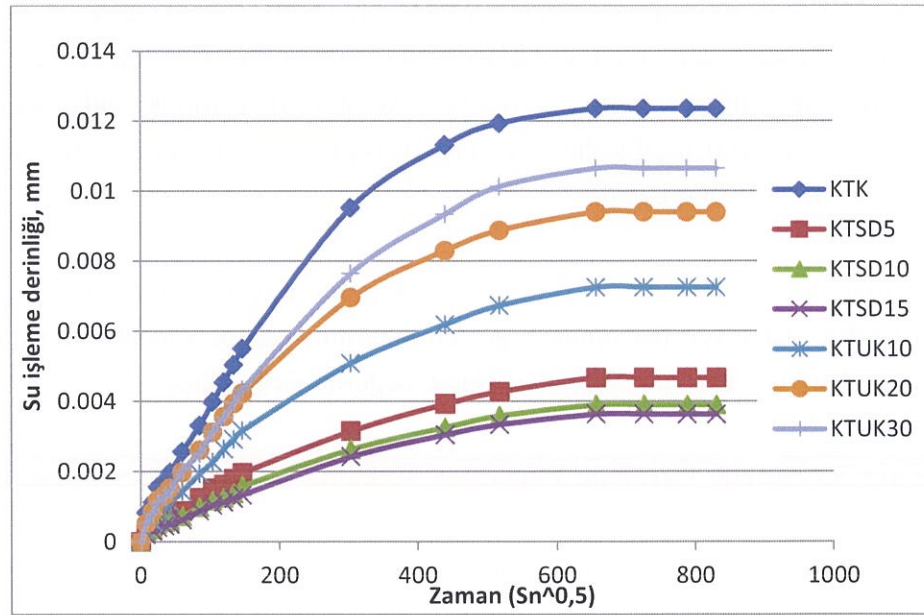
Şekil 4.3 Kireçtaşı agrega içeren harç karışımlarının su emme oranı değerleri



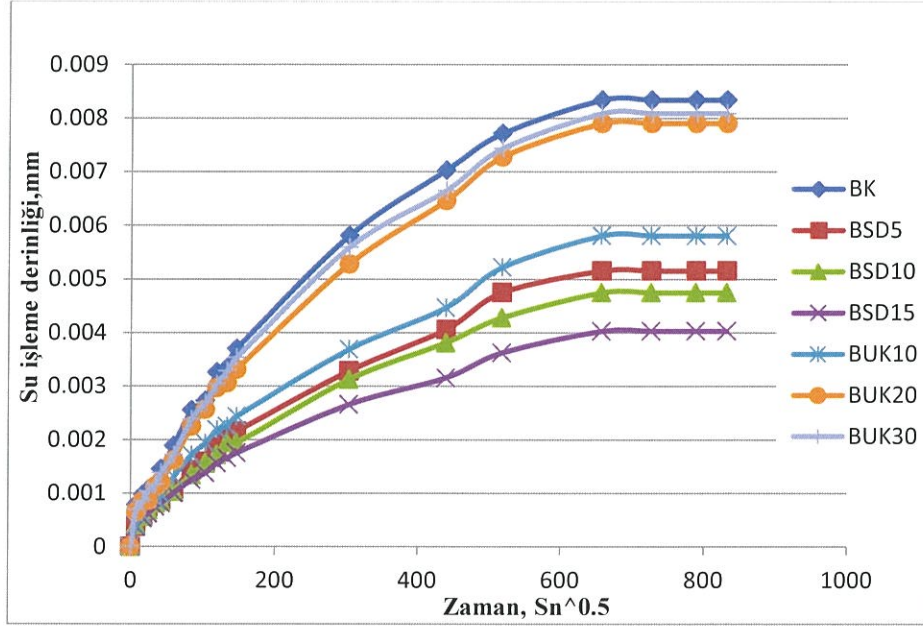
Şekil 4.4 Bazalt agrega içeren harç karışımların su emme oranı değerleri

#### 4.1.3 Harç numunelerinin kılcal yolla su emme sonuçları

Harç örnekleri üzerinde yapılan kılcallık deneyleri sonuçları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5 Kireçtaşı agrega içeren harç karışımlarının kılcal yolla su emme deneyleri sonuçları



Şekil 4.6 Bazalt agregaları içeren harç karışımlarının kılcal yolla su emme deneyleri sonuçları

Şekil 4.5 ve 4.6'da görüldüğü gibi; bazalt agregası içeren harçların kireç taşı agregası içeren harçlara kıyasla kılcal yolla emilen suyun %32'ye varan oranlarda daha az yükseldiği görülmektedir. Ayrıca hem bazalt hem de kireç taşı agregalı harçlarda silis dumanı içeren harçların kontrol harçlarından ve uçucu kül içeren harçlardan kılcal yolla az su emdiği de görülmektedir. Kılcal yolla emilen su açısından bakıldığında; en iyi sonuçların silis dumanı içeren harçlarda, en kötü sonuçların da mineral katkı içermeyen kontrol harçlarında elde edildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca silis dumanı oranı arttıkça harçların kılcal yolla emdiği suyun azaldığı görülmektedir.

Silis dumanı ve uçucu kül içeren harçların kılcallık açısından kontrol harçlarından daha iyi performans göstermelerinin nedeni olarak bu mineral katkıların harç boşluklarını tıkamaları olarak değerlendirilmektedir.

## 4.2 Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Mekanik Deneyler ve Sonuçları

### 4.2.1 Harç numune eğilme mukavemetleri

Çalışma kapsamında üretilen harç numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda yapılan eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.4, Tablo 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.4 Kireçtaşı agregaları içeren harçların eğilme mukavemeti (MPa)

Karışım	Eğilme Mukavemeti (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
KTK	8,9	10,5	11,9
KTSD5	9,1	11,1	12,4
KTSD10	8,9	11,4	11,5
KTSD15	9,6	11,2	12,5
KTUK10	8,3	9,9	11,1
KTUK20	8,0	8,8	10,7
KTUK30	7,1	9,1	9,6

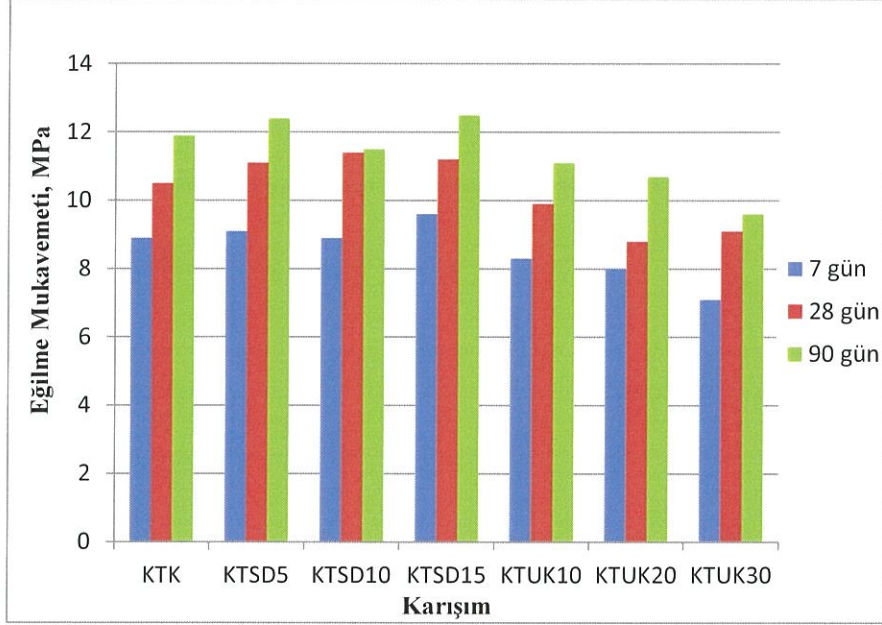
Tablo 4.5 Bazalt agregaları içeren harçların eğilme mukavemeti (MPa)

Karışım	Eğilme Mukavemeti (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
BK	8,3	8,3	9,2
BSD5	7,0	8,7	10,0
BSD10	6,6	9,5	10,9
BSD15	6,3	9,2	9,9
BUK10	6,6	8,1	9,8
BUK20	6,1	8,1	9,3
BUK30	4,7	7,2	8,2

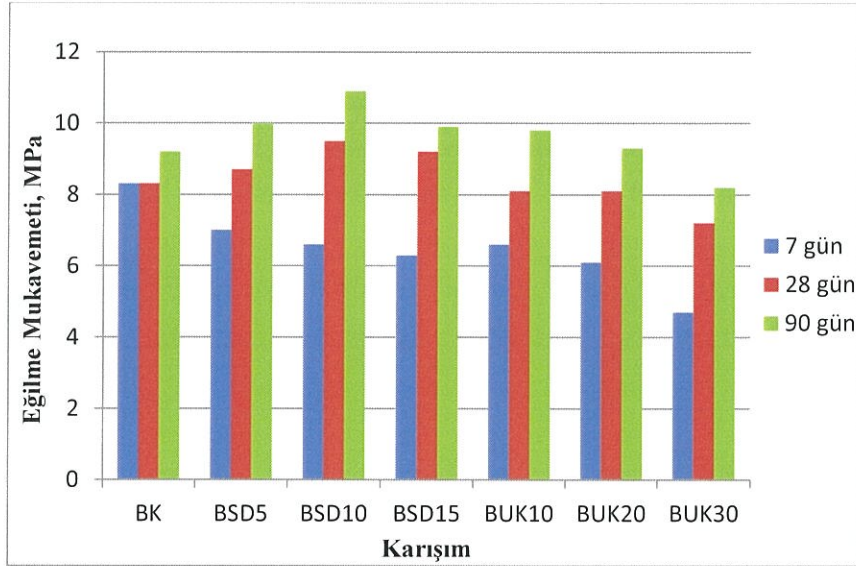
Tablo 4.4, Tablo 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki sonuçlar incelendiğinde; beklendiği gibi geçen zamanla birlikte kireçtaşı ve bazalt agregaları içeren bütün harçların eğilme dayanımlarında artış olduğu görülmektedir. Yine aynı sonuçlardan 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda kireç taşı agregalı harçların bazalt agregalı harçlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahip oldukları da anlaşılmaktadır. En yüksek eğilme dayanımları çimento yerine silis dumanı kullanılan harçlarda en düşük eğilme dayanımları ise uçucu kül içeren harçlarda elde edilmiştir. Genel olarak silis dumanı kullanım oranı %5'ten %10'a arttıkça tüm zamanlarda eğilme dayanımlarının da yükseldiği, bu oran aşıldıktan sonra eğilme dayanımında düşme olduğu da görülmektedir. Buna karşın uçucu kül oranının %10'dan %30'a çıkması ile eğilme dayanımının düştüğü de tespit edilmiştir.

Kireç taşı agregalı harçların bazalt agregalı harçlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahip olmalarının nedeni olarak; kireç taşı agregaların yüzey pürüzlülüğünün bazalt agregalardan daha fazla olması, buna bağlı olarak hamur ile agrega arasındaki aderansın daha yüksek olması olarak görülmektedir.

Yine silis dumanının uçucu külden daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olması, uçucu küle kıyasla daha fazla kalsiyum hidroksiti bağlayarak yeni C-S-H üretmesi olarak görülmektedir. Ayrıca silis dumanının inceliğinin uçucu külden fazla olması ve buna bağlı olarak boşlukları daha fazla oranda tıkararak kompasiteyi artırması da başka bir etken olarak görülmektedir.



Şekil 4.7 Kireçtaşı agregaları içeren harçlar için eğilme mukavemeti - ikame oranı ilişkisi



Şekil 4.8 Bazalt agregaları içeren harçlar için eğilme mukavemeti - ikame oranı ilişkisi

#### 4.2.2 Harç numune basınç mukavemetleri

Kireçtaşı ve bazalt agregaları içeren harç karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiş sonuçlar Tablo 4.6 ve 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.6 Kireçtaşı agregaları içeren harç karışımlarının üç farklı yaşta belirlenen basınç dayanımları

Karışım	Basınç Mukavemeti (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
KTK	46,6	58,7	67,5
KTSD5	47,1	64,2	76,9
KTSD10	48,7	67,4	79,6
KTSD15	47,1	66,1	78,7
KTUK10	44,1	59,4	70,2
KTUK20	37,5	49,5	66,0
KTUK30	29,4	44,7	61,3

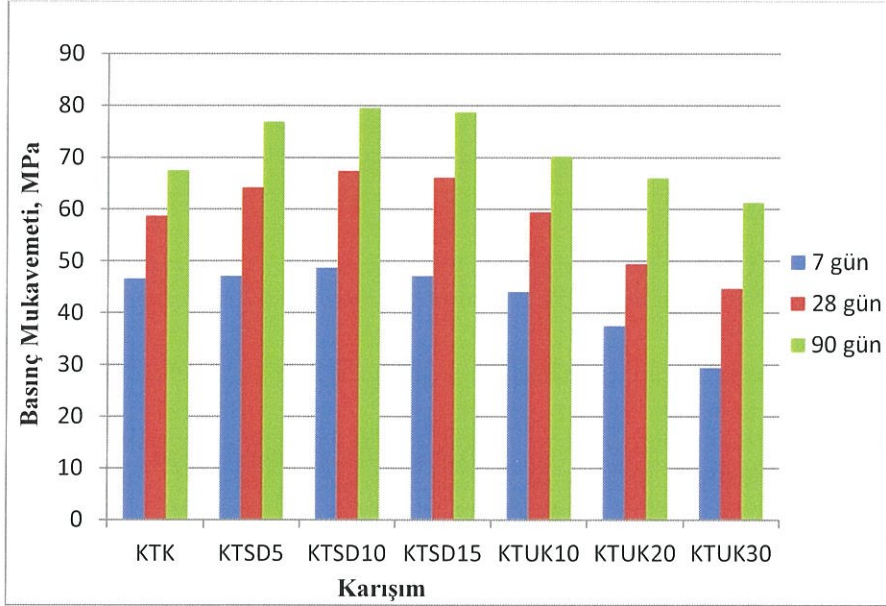
Tablo 4.7 Bazalt agregaları içeren harç karışımlarının üç farklı yaşta belirlenen basınç dayanımları

Karışım	Basınç Mukavemeti (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
BK	42,4	51,2	66,8
BSD5	45,9	58,1	73,2
BSD10	44,1	60,4	74,3
BSD15	43,4	59,7	73,7
BUK10	42,2	52,1	67,1
BUK20	37,2	46,7	61,3
BUK30	28,0	39,2	57,1

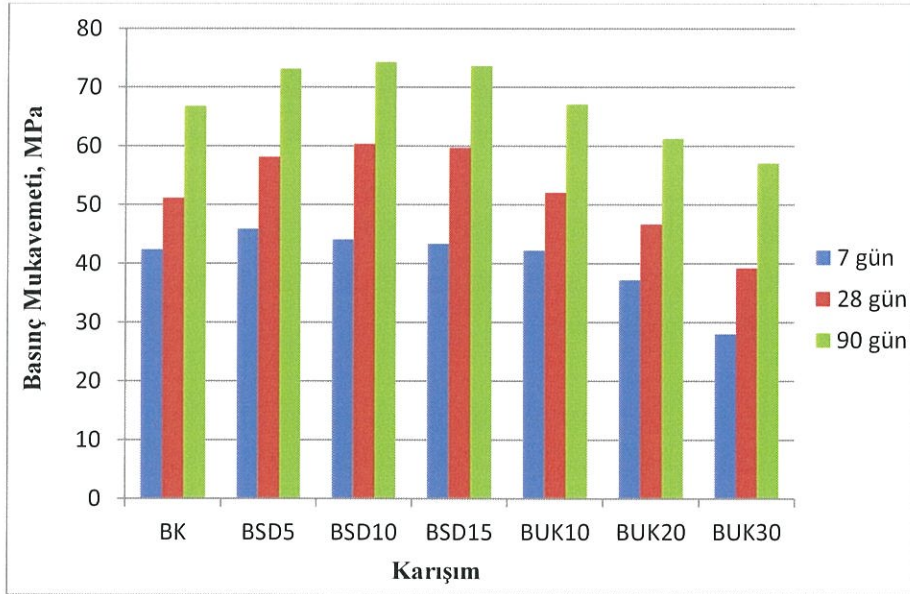
Tablo 4.6, Tablo 4.7, Şekil 4.9 ve 4.10’da verilen basınç dayanım sonuçları incelendiğinde; kireç taşı agregası içeren harçların bazalt agregası içeren harçlardan daha yüksek basınç dayanımına sahip oldukları görülmektedir. Bu olayın nedeninin bazalt agregalarının kireçtaşı agregalara kıyasla daha düzgün yüzeye sahip olmaları, buna bağlı olarakta agregası ile harç arasındaki aderansın daha zayıf olması olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 4.9 ve 4.10’da beklendiği gibi kireçtaşı veya bazalt agregaları içeren silis dumanı katkılı harçların basınç dayanımları kontrol harçlarına kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Şekil 4.9 incelendiğinde, silis dumanı ikame oranının % 5’e çıkması durumunda, kontrol harcına kıyasla 7 günlük dayanımların %1, 28 günlük dayanımların %9, 90 günlük dayanımların ise %14’e kadar yükseldiği görülmektedir. SD ikame oranı %10’a yükseltildiğinde, kontrol harçlarına kıyasla, 7

günlük dayanımların %4.5, 28 günlük dayanımların %15, 90 günlük dayanımların ise %18 oranında arttığı tespit edilmiştir. SD ikame oranının %15'e çıkması ise, kontrol harcına kıyasla, 7 günlük dayanımları %1, 28 günlük dayanımları %13 ve 90 günlük dayanımları ise %17'ye kadar yükselmiştir. Uçucu kül katkıli harçların basınç dayanımlarının ise kontrol harçlarına kıyasla, uçucu kül ikame oranı %10'un üzerine çıkıldıkça azaldığı saptanmıştır. Bu azalmanın 7 günlük dayanımlarda %37'ye kadar çıktığıda görülmektedir.



Şekil 4.9 Kireçtaşı agregaları içeren harç karışımlarının basınç dayanımları



Şekil 4.10 Bazalt agregaları içeren harç karışımlarının basınç dayanımları

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi silis dumanı kullanımı 7 ve 28 ve 90 günlük dayanımlarda artışa sebep olmuştur. En yüksek 28 günlük dayanım, kontrol harcına göre %18 artış gösteren %10 silis dumanı katkılı harçlardan elde edilmiştir. En yüksek 90 günlük dayanım ise, kontrol harcına göre %11 artış gösteren %10 silis dumanı içeren harçlarda elde edilmiştir.

Yine tüm SD içeren harçların 7 günlük kür sonunda (erken yaşta) hem kontrol harçlarından hem de UK içeren harçlardan daha yüksek dayanıma sahip olduklarıda belirlenmiştir. Buna karşın sadece %10 UK içeren harçların 28 ve 90 günlük kür sonunda (ileriki yaşlarda) SD içeren harçlardan daha düşük kontrol harçlarından daha yüksek dayanıma sahip olduklarıda görülmektedir. Genel olarak UK oranı arttıkça tüm kür süreleri için basınç dayanımlarının da azaldığı, hatta kontrol harçlarından bile daha düşük seviyede basınç dayanımına sahip olduklarıda anlaşılmaktadır.

Şekil 4.9 ve 4.10'da beklendiği gibi, uçucu kül katılmasıyla harçların ilk dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir. Her yaşta, uçucu kül oranı arttıkça harçların dayanımları azalmış, sadece %10 oranında UK kullanılan harçların 90 günlük basınç dayanımlarının kontrol harçlarını geçtiği de görülmüştür.

SD içeren harçların hem kontrol hem de UK içeren harçlardan daha yüksek basınç dayanımı vermesinin nedeni olarak SD'nin yüksek puzolanik aktiviteye sahip olması, çimentonun hidrasyonunun sonucu açığa çıkan serbest kalsiyum hidroksiti bağlayarak yeni C-S-H jelleri üretmesi olarak değerlendirilmektedir.

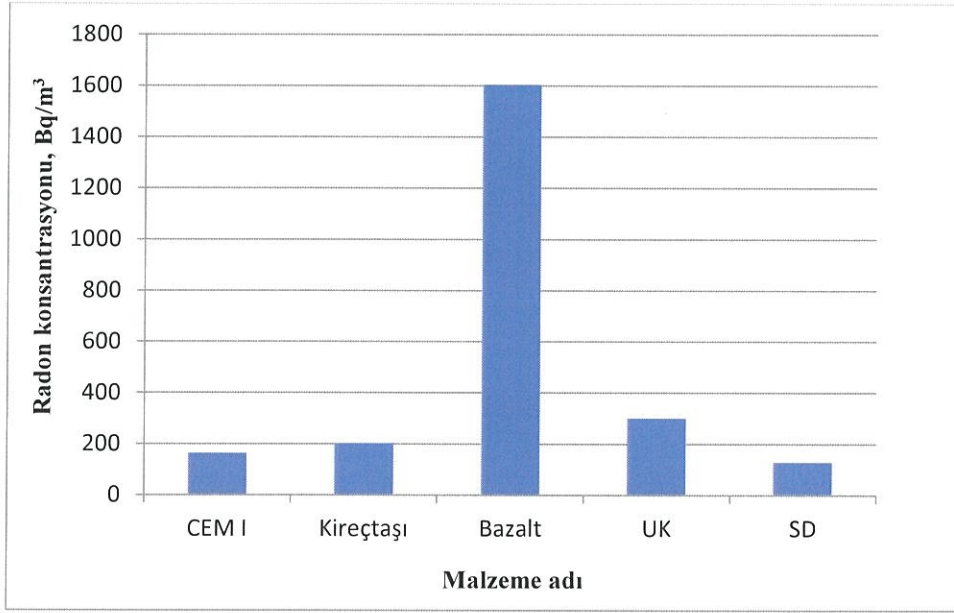
### **4.3 Harç Numuneler Üzerinde Yürütülen Radyoaktif Deneyleri ve Sonuçları**

#### **4.3.1 Nükleer iz kazıma dedektörleri (LR-115) sonuçları**

Çalışma kapsamında harçları üretmek için kullanılan ham maddelerin, 28 günlük sertleşmiş harç örneklerinin ve sertleşmiş harçların toz hale getirilmiş örneklerinin radon konsantrasyonu, nükleer iz kazıma yöntemi yardımıyla ölçülmüştür. LR-115 dedektörler ile alınan radon ölçümlerine ait sonuçlar Şekil 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 ve 4.19'da verilmiştir.

#### 4.3.1.1 Harç ham maddelerinin radon konsantrasyonları

Tezde ham madde olarak kullanılan malzemelerin radon konsantrasyonları 129,7 ile 1604,1 Bq/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. En yüksek radon konsantrasyonu bazalt agregalarda ölçülmüştür ve en düşük radon konsantrasyonu ise silis dumanında ölçülmüştür (Şekil 4.11).



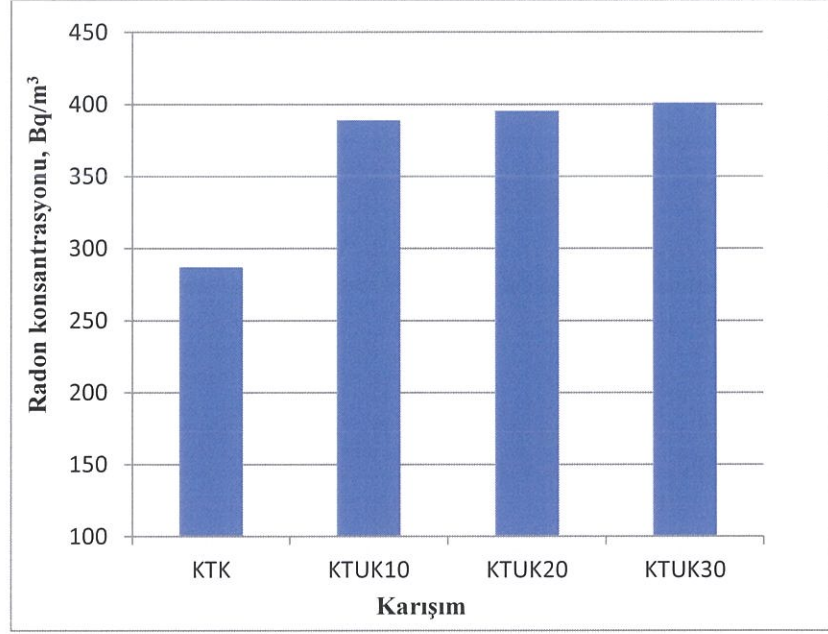
Şekil 4.11 Ham maddelerinin radon aktivite konsantrasyonları

#### 4.3.1.2 Toz haline getirilmiş sertleşmiş harçların radon konsantrasyonları

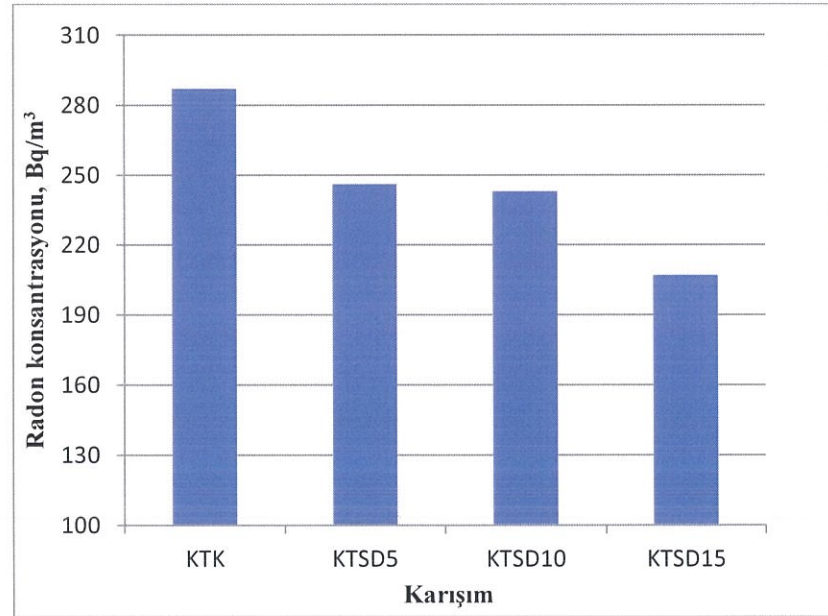
Toz hale getirilmiş sertleşmiş harçların radon konsantrasyonları Şekil 4.12 - Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi uçucu kül içeren harçların radon aktivite konsantrasyonları kontrol harçlarından daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4.12). Uçucu kül içeriği arttıkça harçların radon konsantrasyonlarının arttığı söylenebilmektedir (Şekil 4.12 ve 4.14). Kireçtaşı içeren uçucu küllü harçların radon konsantrasyonlarının kontrol harçlarına göre %39'a kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Bazalt agregası içeren uçucu küllü harçların radon konsantrasyonunun ise kontrol harcına kıyasla %22'ye kadar yükseldiği belirlenmiştir.

Şekil 4.13 ve 4.15'te görüldüğü ve beklendiği gibi, silis dumanının ikame oranı arttıkça, harçların radon konsantrasyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Yine silis dumanlı harçların radon konsantrasyonlarının kontrol harcına göre

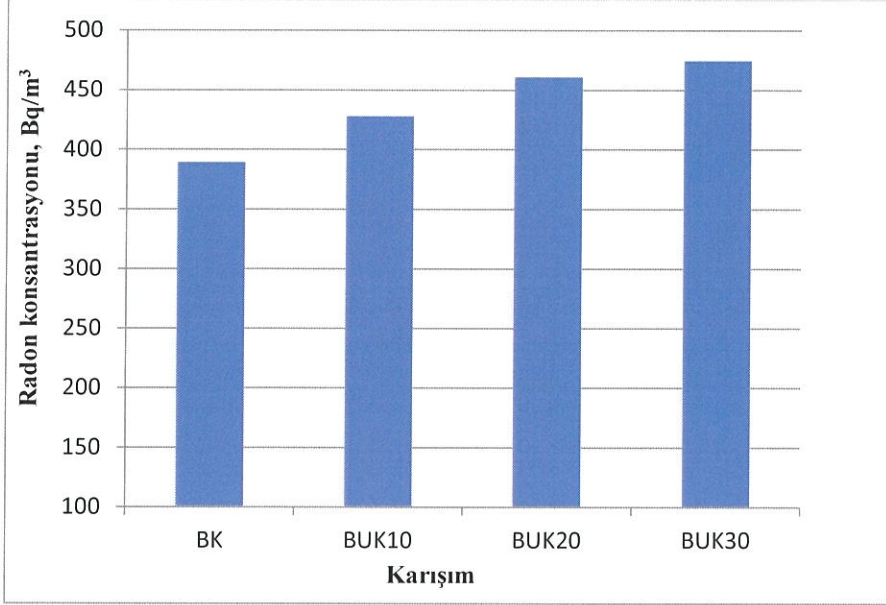
%27'ye kadar daha az olduğu bulunmuştur. Bu tez çalışmasındaki sonuçlarda literatürdeki sonuçları destekler niteliktedir.



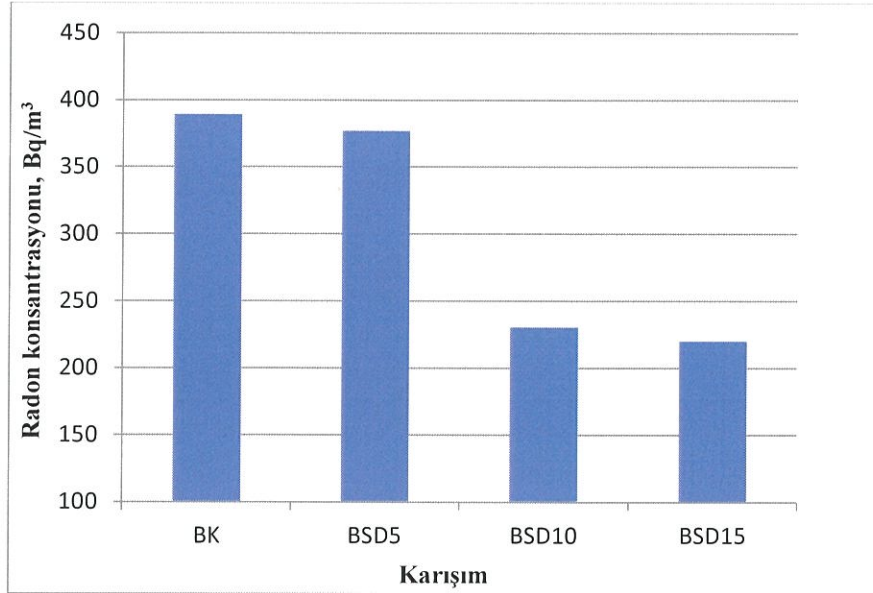
Şekil 4.12 Kireçtaşı agregaları içeren öğütülerek toz hale getirilmiş uçucu küllü harç örneklerinin radon konsantrasyonları



Şekil 4.13 Kireçtaşı agregaları içeren öğütülerek toz hale getirilmiş silis dumanlı harç numunelerinin radon konsantrasyonları



Şekil 4.14 Bazalt agregaları içeren toz hale getirilmiş uçucu küllü harç örneklerinin radon konsantrasyonları



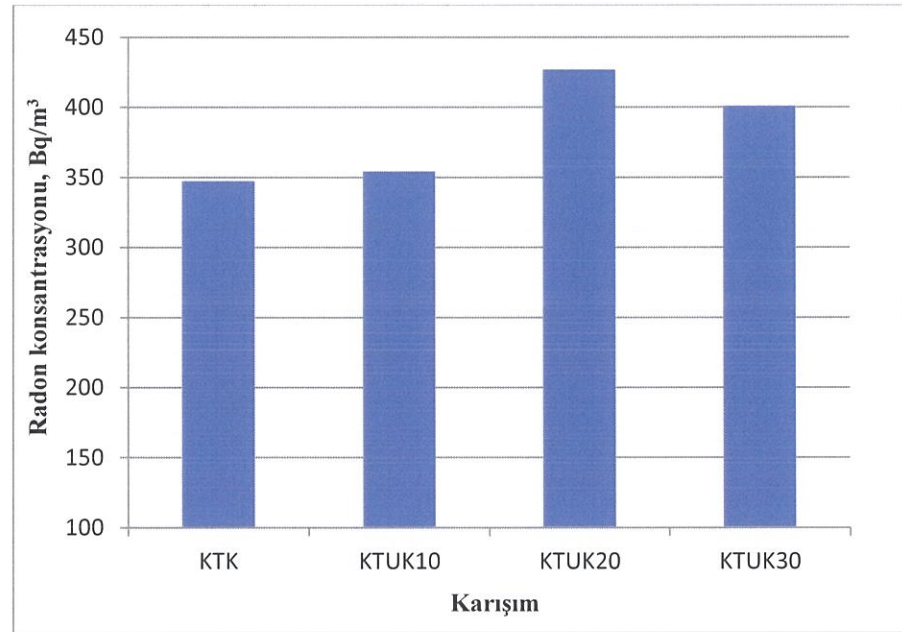
Şekil 4.15 Bazalt agregaları içeren toz hale getirilmiş silis dumanlı harç örneklerinin radon konsantrasyonları

#### **4.3.1.3 Sertleşmiş harçların (prizmatik örneklerin) radon konsantrasyonları**

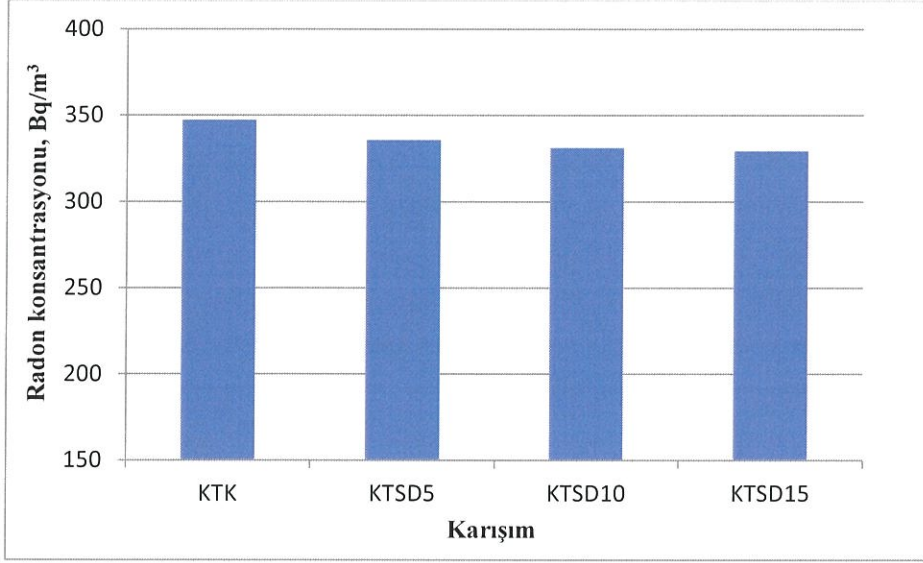
Çalışmada sertleşmiş haldeki prizmatik harç numuneler üzerinde yapılan radon gazı ölçümü sonuçları Şekil 4.16 - Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.16 ve 4.18 incelendiğinde, uçucu kül oranı ikame arttıkça sertleşmiş harçların radon

konsantrasyonlarının yükseldiği tespit edilmiştir. Uçucu küllü harçların radon konsantrasyonlarındaki bu yükseliş kireçtaşı içeren harçlarda kontrol harcına kıyasla %22'ye, bazalt içeren harçlarda ise kontrol harcına kıyasla %12'ye varmaktadır. Bu artışın nedeni ham madde olarak uçucu külün radon konsantrasyonunun çimento ve silis dumanıdan yüksek olmasıdır.

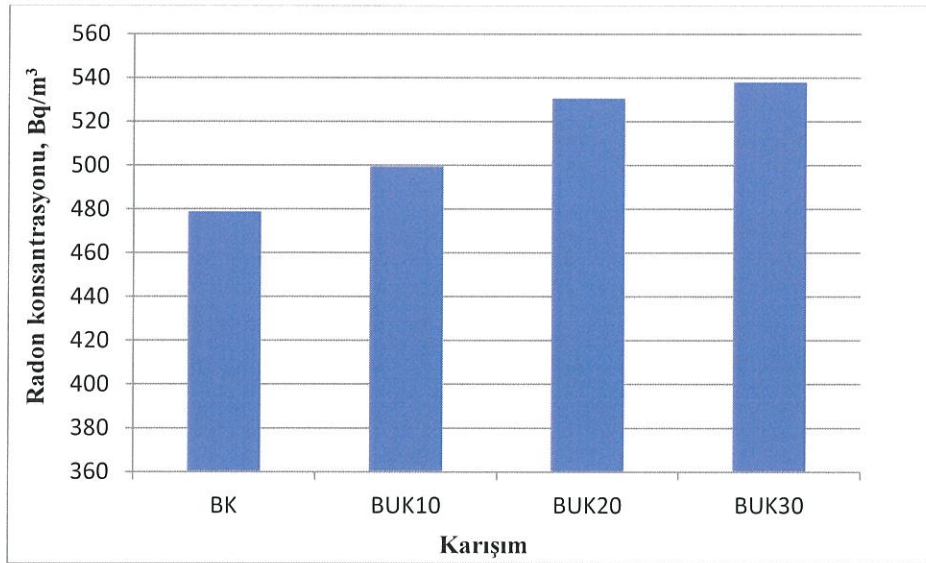
Harçlardaki SD içeriği arttıkça sertleşmiş harçların radon konsantrasyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu düşüş kireçtaşı ve bazalt agregaları içeren silis dumanlı harçlarda kontrol harçlarına kıyasla sırasıyla %5 ve %16 olarak hesaplanmıştır. Çok ince daneli silis dumanının harç içerisindeki boşlukları doldurması ve SD'nin puzolanik reaksiyona girerek kapiler boşlukları da azaltması radon konsantrasyonundaki bu düşüşün nedeni olarak görülmektedir.



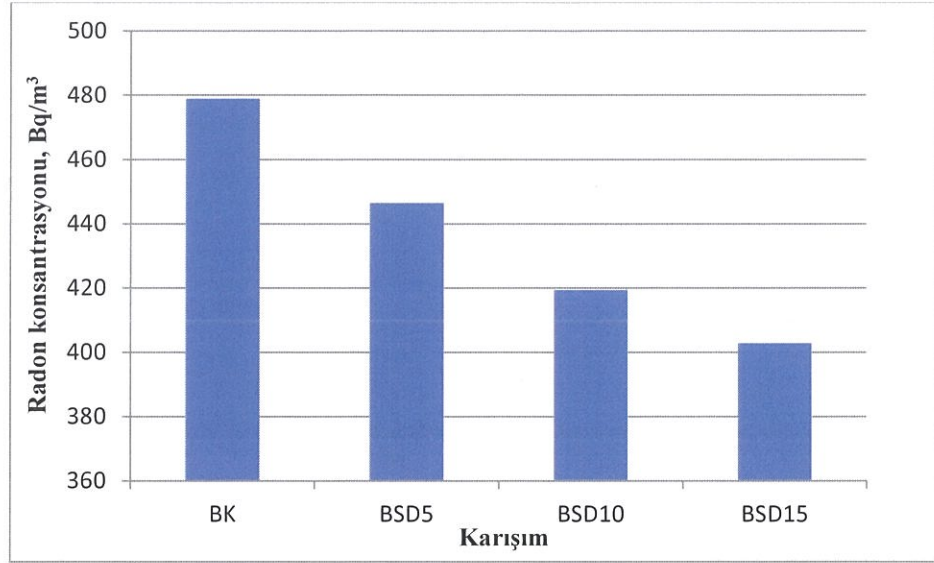
Şekil 4.16 Kireçtaşı agregaları içeren uçucu küllü sertleşmiş harç örneklerinin radon konsantrasyonları



Şekil 4.17 Kireçtaşı agregaları içeren silis dumanlı sertleşmiş harç örneklerinin radon konsantrasyonları



Şekil 4.18 Bazalt agrega içeren uçucu küllü harç örneklerinin radon konsantrasyonları

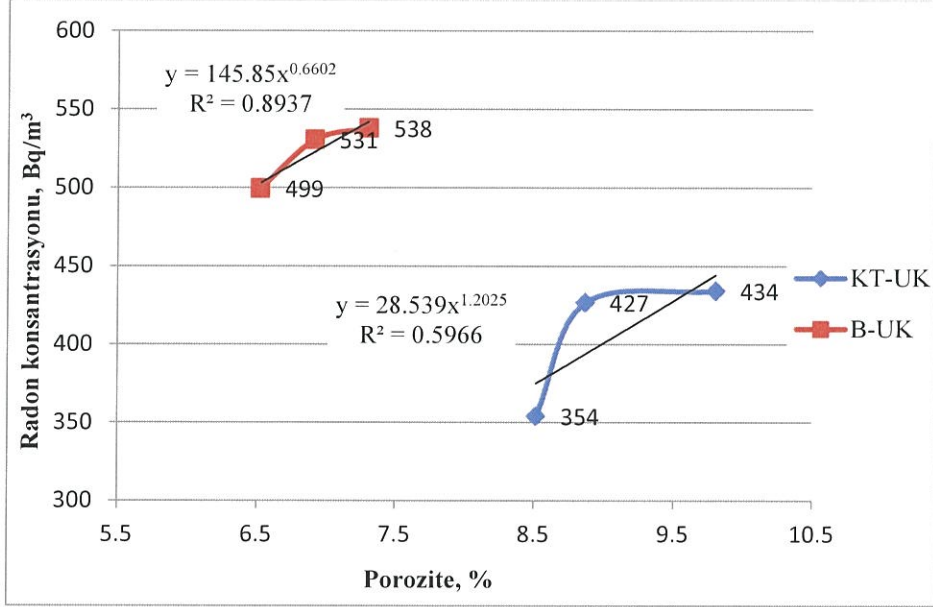


Şekil 4.19 Bazalt agrega içeren silis dumanlı harç örneklerinin radon konsantrasyonları

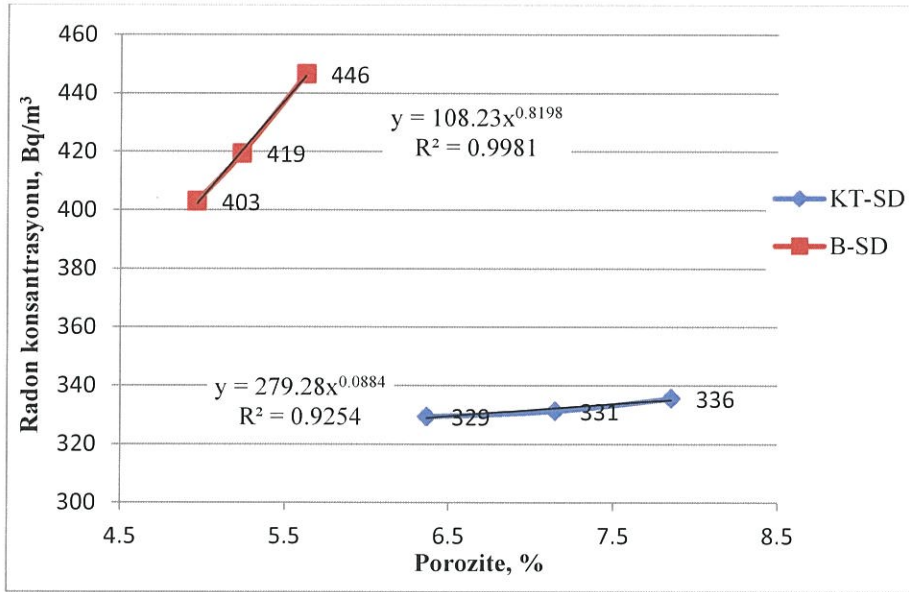
### 4.3.2 Harçların radon konsantrasyonu ile porozitesi, birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler

#### 4.3.2.1 Radon konsantrasyonu - porozite ile ilişki

Harçların radon konsantrasyonları ile porozitesi arasındaki ilişkiler Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’den görüldüğü gibi, değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren kireç taşı veya bazalt agregalı harçlarda porozite yükseldikçe harçların radon konsantrasyonları da artmaktadır. Harçlarda radon konsantrasyonu ile porozite arasındaki ilişkiyi tanımlamak için çizilen eğrilerde; kireç taşı ve uçucu kül içeren harçlar için %77, bazalt ve uçucu kül içeren harçlar için %95, kireç taşı ve silis dumanı içeren harçlar için %96 ve bazalt ve silis dumanı içeren harçlar için %100 oranlarında uyumun olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar harçların boşluk durumunun radon gazı salınımını etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.20 Uçucu kül içeren harçların radon konsantrasyonu - porozite ile ilişki

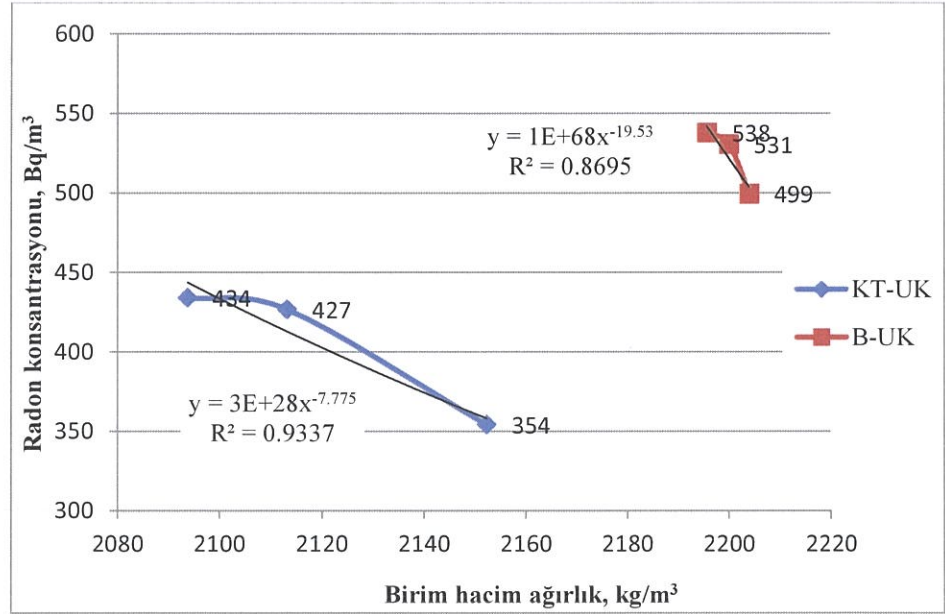


Şekil 4.21 Silis dumanı içeren harçların radon konsantrasyonu - porozite ile ilişki

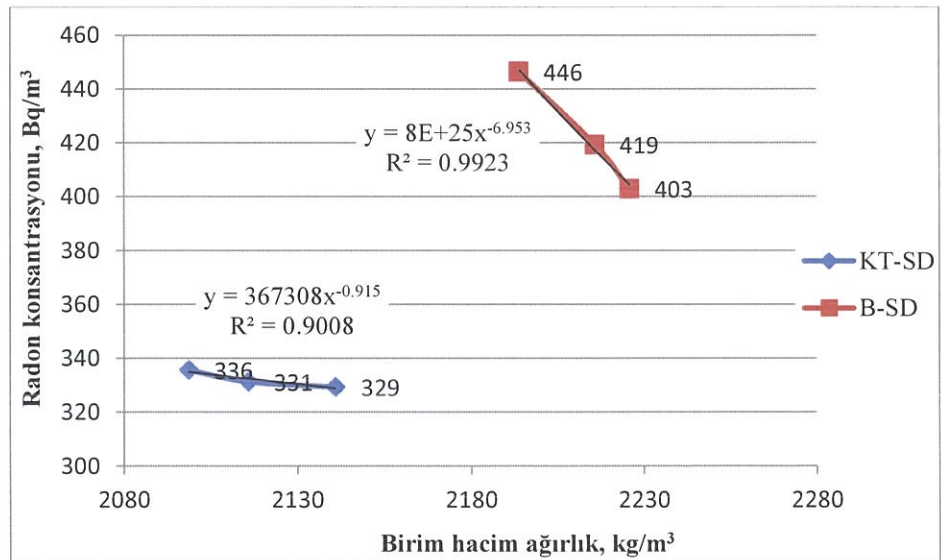
#### 4.3.2.2 Radon konsantrasyonu - birim hacim ağırlık ile ilişki

Harçların radon konsantrasyonları ile harçların birim hacim ağırlığı arasındaki ilişki Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de verilmiştir. Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'den görüldüğü gibi, değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren kireç taşı veya bazalt agregalı harçlarda birim hacim ağırlık değeri yükseldikçe harçların radon konsantrasyonları düşmektedir. Harçlarda radon konsantrasyonu ile

birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi tanımlamak için çizilen eğrilerde; kireç taşı ve uçucu kül içeren harçlar için %97, bazalt ve uçucu kül içeren harçlar için %93, kireç taşı ve silis dumanı içeren harçlar için %95 ve bazalt ve silis dumanı içeren harçlar için %100 oranlarında uyumun olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar harçlarda doluluk oranı yükseldikçe birim ağırlıklarının artacağını buna bağlı olarak da radon gazı salınımında düşeceğini göstermektedir.



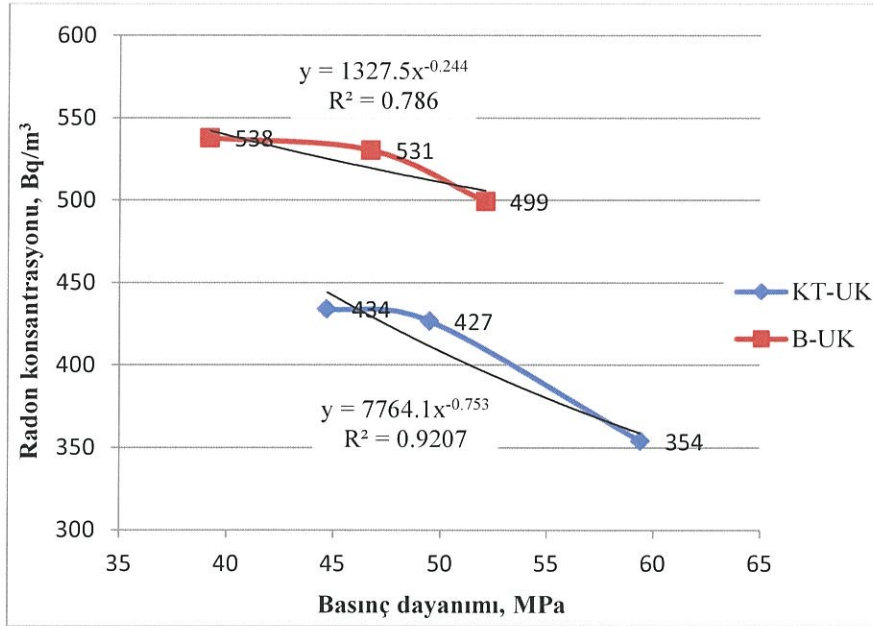
Şekil 4.22 Uçucu kül içeren harçların radon konsantrasyonu - birim hacim ağırlık ile ilişki



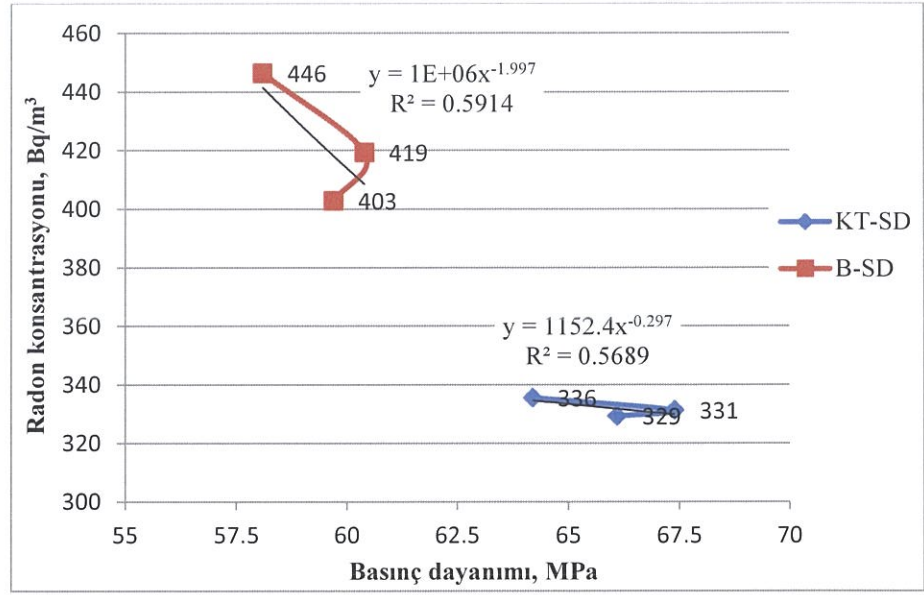
Şekil 4.23 Silis dumanı içeren harçların radon konsantrasyonu - birim hacim ağırlık ile ilişki

#### 4.3.2.3 Radon konsantrasyonu - 28 günlük basınç dayanımı ile ilişki

Harçların radon konsantrasyonları ile harçların 28 günlük basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de verilmiştir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’den görüldüğü gibi, değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren kireç taşı veya bazalt agregalı harçlarda 28 günlük basınç dayanımı değeri yükseldikçe harçların radon konsantrasyonları düşmektedir. Harçlarda radon konsantrasyonu ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için çizilen eğrilerde; kireç taşı ve uçucu kül içeren harçlar için %96, bazalt ve uçucu kül içeren harçlar için %89, kireç taşı ve silis dumanı içeren harçlar için %75 ve bazalt ve silis dumanı içeren harçlar için %77 oranlarında uyumun olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar harçlarda 28 günlük basınç dayanımı arttıkça buna bağlı olarak da radon gazı salınımında düşeceğini göstermektedir.



Şekil 4.24 Uçucu kül içeren harçların radon konsantrasyonu - 28 günlük basınç dayanımı ile ilişki



Şekil 4.25 Silis dumanı içeren harçların radon konsantrasyonu - 28 günlük basınç dayanımı ile ilişki

#### 4.3.3 Doğal radyonüklid konsantrasyon sonuçları

Tablo 4.8, 4.9 ve 4.10'da NaI(Tl) sintilasyon gama spektrometresi kullanılarak belirlenen doğal radyonüklid konsantrasyonları verilmiştir. Çalışmada kullanılan hammadde örneklerinde  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonları ND ile 48,5 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonları ND ile 41,0 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları ND ile 720,4 Bq/kg arasında belirlenmiştir. Kireçtaşı içeren harç örneklerinde  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonları ND ile 21,8 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonları ND ile 15,3 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları ND ile 143,8 Bq/kg arasında değişmektedir. Bazalt içeren harç numuneleri ise  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonları 23,0 ile 42,4 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  konsantrasyonları ND ile 22,5 Bq/kg ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları 98,6 ile 355,3 Bq/kg arasında belirlenmiştir. UNSCEAR tarafından yer kabuğundaki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının ağırlıklı dünya ortalaması sırasıyla 32, 45 ve 420 Bq/kg olarak verilmiştir (UNSCEAR, 2000). Çalışmada kullanılan hammadde örneklerinden alınan radyonüklid değerlerine bakıldığında;  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonlarından sadece uçucu külün  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları dünyadaki ortalama değerlerin üzerinde çıkmıştır. Kireçtaşı içeren harç numunelerinden alınan radyonüklid değerlerine bakıldığında;  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları dünyadaki ortalama değerlerin altında olduğu görülmektedir. Bazalt agregaları içeren harç numunelerinden alınan radyonüklid değerlerine bakıldığında  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları sadece

kontrol numunesinin  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonu dünyadaki ortalama değerlerin üzerinde çıkmıştır.

$^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için sırasıyla minimum dedekte edilebilen aktivite (MDA) değerleri 11 Bq/kg, 9 Bq/kg ve 54 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.8 - Tablo 4.10'da hesaplanan değerler MDA'dan düşük olduğu için ND (dedekte edilmeyen aktivite) değerleri kullanılmıştır.

Tablo 4.8 Hammaddelerinin doğal radyonüklid konsantrasyonları

Malzeme adı	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)
CEM I	30,9	14,3	155,8
SD	ND	31,4	352,6
UK	35,5	41,0	720,4
Kireçtaşı	ND	ND	ND
Bazalt	48,5	34,1	372,0

Tablo 4.9 Kireçtaşı agrega içeren harç karışımlarının doğal radyonüklid konsantrasyonları

Karışım	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)
KTK	13,8	15,3	74,1
KTSD5	ND	14,5	ND
KTSD10	ND	ND	54,9
KTSD15	ND	ND	ND
KTUK10	19,0	9	143,8
KTUK20	19,3	9	71,5
KTUK30	21,8	15,3	ND

Tablo 4.10 Bazalt agrega içeren harç karışımlarının doğal radyonüklid konsantrasyonları

Karışım	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)
BK	42,4	ND	98,6
BSD5	24,3	18,9	331,2
BSD10	25,4	21,0	283,7
BSD15	23,0	18,4	300,4
BUK10	28,9	22,5	271,2
BUK20	23,5	18,4	269,1
BUK30	27,1	21,6	355,3

#### 4.3.4 Radyolojik açıdan değerlendirme

Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin radyolojik riskini tayin etmek amacıyla, (2.1), (2.3), (2.5), (2.6) ve (2.7) eşitlikleri kullanılarak radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonları ( $Ra_{eq}$ ), dış ve iç tehlike indisleri ( $H_{ex}$  ve  $H_{in}$ ), soğurulmuş gama doz hızları ( $D$ ) ve yapı içi etkin doz hızları ( $H_R$ ) de hesaplanmıştır (Tablo 4.11, 4.12 ve 4.13).

Tablo 4.11 Hammadde için hesaplanan  $Ra_{eq}$ ,  $H_{ex}$ ,  $H_{in}$ ,  $D$  ve  $H_R$  değerleri

Malzeme adı	$Ra_{eq}$ (Bq/kg)	$H_{ex}$	$H_{in}$	$D$ (nGy/saat)	$H_R$ (mSv/y)
CEM I	63,35	0,08	0,25	29,67	0,15
SD	43,75	0,05	0,04	21,16	0,10
UK	149,6	0,17	0,50	72,0	0,35
Kireçtaşı	11,06	0,02	0,04	4,95	0,02
Bazalt	125,9	0,16	0,47	59,1	0,29

Tablo 4.12 Kireçtaşı agrega içeren harç karışımları için hesaplanan  $Ra_{eq}$ ,  $H_{ex}$ ,  $H_{in}$ ,  $D$  ve  $H_R$  değerleri

Karışım	$Ra_{eq}$ (Bq/kg)	$H_{ex}$	$H_{in}$	$D$ (nGy/saat)	$H_R$ (mSv/y)
KTK	38,32	0,06	0,13	17,56	0,09
KTSD5	22,70	0,04	0,06	10,09	0,05
KTSD10	19,91	0,03	0,08	9,33	0,05
KTSD15	9,14	0,02	0,04	4,02	0,02
KTUK10	42,5	0,05	0,17	20,18	0,10
KTUK20	37,5	0,05	0,15	17,4	0,09
KTUK30	46,5	0,07	0,18	19,0	0,10

Tablo 4.13 Bazalt agrega içeren harç karışımları için hesaplanan  $Ra_{eq}$ ,  $H_{ex}$ ,  $H_{in}$ ,  $D$  ve  $H_R$  değerleri

Karışım	$Ra_{eq}$ (Bq/kg)	$H_{ex}$	$H_{in}$	$D$ (nGy/saat)	$H_R$ (mSv/y)
BK	57,80	0,07	0,27	27,10	0,13
BSD5	76,72	0,09	0,27	36,75	0,18
BSD10	77,28	0,09	0,28	36,63	0,18
BSD15	72,35	0,08	0,26	34,56	0,17
BUK10	81,88	0,10	0,30	38,62	0,19
BUK20	70,43	0,08	0,25	33,48	0,16
BUK30	85,33	0,10	0,30	40,77	0,20

Tablo 4.11 - Tablo 4.13 incelendiğinde, çalışmada kullanılan hammadde ve katkı harçlar için hesaplanan  $Ra_{eq}$  değerleri, aşılmaması tavsiye edilen değerden (370 Bq/kg) daha küçüktür. Radyum eşdeğer aktivite konsantrasyonuna

bakıldığında incelenen hammadde ve katkılı harç numunelerinin, konut ve işyeri yapılarında kullanılmasının, radyolojik açıdan herhangi bir tehlike oluşturmayacağı söylenebilmektedir. Yine, Tablo 4.11-Tablo 4.13'de hesaplanan dış ve iç tehlike indislerinin değerleri de 1'den daha küçük çıkmıştır. Dolayısıyla, çalışmada kullanılan malzemelerin bu açıdan herhangi bir sakınca yaratamayacağı değerlendirilmektedir.

Kullanılan hammaddeler için değerlendirilen soğurulmuş gama doz hızı (D)'nin değerleri uçucu kül hariç UNSCEAR (2000) tarafından önerilen ağırlıklı ortalamadan (84 nGy/saat) daha küçüktür. Kireçtaşı ve bazalt katkılı harçlar için değerlendirilen D'in değerleri ortalamadan daha da küçüktür. Yine de hammaddeler ve katkılı harç örnekleri için değerlendirilen yapı içi etkin doz hızı ( $H_R$ )'nin değerleri de aşılmaması UNSCEAR (2000) tarafından tavsiye edilen sınır değerden (1 mSv/y) daha küçük elde edilmiştir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kullanılan malzeme ve uygulanan deneylere göre aşağıdaki sonuçlara verilmiştir:

Su emme testleri sonucunda; en yüksek su emme oranları kireç taşı agregaları kullanılarak üretilen harçlarda görülmüştür. En düşük değerler ise bazalt agrega içeren harçlara aittir. Bazalt veya kireçtaşı agregaları içeren karışımlarda, silis dumanının ikame oranı arttıkça su emme oranlarının azaldığı saptanmıştır. Yine, bazalt veya kireçtaşı agregaları içeren harçlarda uçucu küllü harçların porozite oranlarının silis dumanlı karışımlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Harçlarda, uçucu kül ikame oranı arttıkça su emme ve porozite oranlarının yükseldiği, buna karşın silis dumanı ikame oranı arttıkça porozite ve su emme oranlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Kılcal yolla su emme testleri sonucunda; en yüksek kılcal yolla su emme oranı kontrol harçlarında görülmüştür. En düşük değerler ise silis dumanlı harçlarda elde edilmiştir. Uçucu kül ikame oranı arttıkça numunelerin kılcal yolla su emme miktarı yükselmektedir. Öte yandan, silis dumanı ikame oranı arttıkça harç karışımlarının kılcal yolla su emme miktarı azalmaktadır.

Bazalt veya kireçtaşı agrega içeren harçlarda, 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının silis dumanı içeren harçlarda kontrol ve uçucu küllü harçlara kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durumun silis dumanının uçucu küle göre daha ince olması ve puzolanik aktivitesinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Silis dumanlı harçların 90 günlük basınç dayanımlarının uçucu küllü ve kontrol harçlarına kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu da görülmüştür.

Uçucu küllü harçların erken yaştaki (7 günlük) basınç dayanımları kontrol harçlarına ve silis dumanı içeren harçlara kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç uçucu küllü harçların daha uzun zamanlarda dayanıma katkı verdiğini göstermektedir.

Çalışmada harç üretmek için kullanılan hammaddelerin, sertleşmiş harç örneklerinin ve sertleşmiş harçların toz haldeki örneklerinin radon aktivite konsantrasyonları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlara göre; bazalt agregalarda kireç taşı agregalara kıyasla daha yüksek radon aktivitesinin tespit edildiği,

mineral katkıları içerisinde en düşük radon aktivitesinin silis dumanında ve silis dumanı harçlarda, en yüksek radon aktivitesinin de uçucu kül ve uçucu küllü harçlarda elde edildiği, harçlarda kullanılan silis dumanı ve uçucu kül oranları arttıkça radon konsantrasyonlarının azaldığı da tespit edilmiştir.

Değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren kireç taşı veya bazalt agregalı harçlarda porozite oranı yükseldikçe harçların radon konsantrasyonları da artmaktadır. Harçlarda radon konsantrasyonu ile porozite arasındaki ilişkiyi tanımlamak için çizilen eğrilerde; kireç taşı ve uçucu kül içeren harçlar için %77, bazalt ve uçucu kül içeren harçlar için %95, kireç taşı ve silis dumanı içeren harçlar için %96 ve bazalt ve silis dumanı içeren harçlar için ise %100 oranlarında uyumun olduğu görülmüştür.

Değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren kireç taşı veya bazalt agregalı harçlarda birim hacim ağırlık değeri yükseldikçe harçların radon konsantrasyonları düşmektedir. Harçlarda radon konsantrasyonu ile birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi tanımlamak için çizilen eğrilerde; kireç taşı ve uçucu kül içeren harçlar için %97, bazalt ve uçucu kül içeren harçlar için %93, kireç taşı ve silis dumanı içeren harçlar için %95 ve bazalt ve silis dumanı içeren harçlar için %100 oranlarında uyumun olduğu görülmüştür.

Değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren kireç taşı veya bazalt agregalı harçlarda 28 günlük basınç dayanımı değeri yükseldikçe harçların radon konsantrasyonları düşmektedir. Harçlarda radon konsantrasyonu ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için çizilen eğrilerde; kireç taşı ve uçucu kül içeren harçlar için %96, bazalt ve uçucu kül içeren harçlar için %89, kireç taşı ve silis dumanı içeren harçlar için %75 ve bazalt ve silis dumanı içeren harçlar için %77 oranlarında uyumun olduğu görülmüştür.

Çalışmada hem ham maddeleri hem de toz hale getirilmiş harç numunelerinin doğal radyoaktivite konsantrasyonlarının her bir radyonüklid için (uçucu küllün  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{40}\text{K}$  konsantrasyonları dışında) UNSCEAR (2000) tarafından önerilen radyonüklid konsantrasyon değerlerinin altında bulunmuştur.

Çalışmada üretilen harçların  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları yardımıyla hesaplanan radyum eşdeğer aktivite, dış ve iç tehlike indisleri, soğurulmuş gama ve yapı içi etkin doz hızları dünya standartlarındaki değerlere yakın olduğu bulunmuştur.

Çalışmada kullanılan yapı malzemeleri (uçucu kül dışında) ve üretilen harçların radyonüklitlerden kaynaklanan yapı içi gama dozları tavsiye edilen sınır değerlerden daha düşük olduğundan, bu malzemelerin konut ve işyeri yapılarında kullanılmalarının radyolojik açıdan herhangi bir tehlike oluşturmayacağı değerlendirilmektedir.

Yapılan radyolojik test sonuçlarına göre; kireçtaşı agreganın bazalt agregaya kıyasla, mineral katkıları arasında ise silis dumanının uçucu küle kıyasla radyolojik açıdan daha güvenilir malzemeler olduğu görülmektedir.

Çalışmanın benzerinin değişik su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda yapılması önerilmektedir.

Yine, çalışmanın benzerinin daha çok sayıda agrega, çimento ve mineral katkı üzerinde yapılması da önerilmektedir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abbady, A.I., Ahmed, N.K., El-Arabi, A.M., Michel, R., El-Kamel, A.H. and Abbady, A.G.E.**, 2006, Estimation of radiation hazard indices from natural radioactivity of some rocks, *Nuclear Science and Techniques*, 17(2):118 -122 pp.
- Agbalagba, E.O., Osakwe, R.O.A. and Olarinoye, I.O.**, 2014, Comparative assessment of natural radionuclide content of cement brands used within Nigeria and some countries in the world, *Journal of Geochemical Exploration*, 142:21-28 pp.
- Akhtar, N., Tufail, M., Ashraf, M. and Mohsin Iqbal, M.**, 2005, Measurement of environmental radioactivity for estimation of radiation exposure from saline soil of Lahore, Pakistan, *Radiation Measurements*, 39:11-14 pp.
- Amrani, D. and Tahtat, M.**, 2001, Natural radioactivity in Algerian building materials, *Applied Radiation and Isotopes*, 54:687-689 pp.
- Alam, M.N., Miah, M.M.H., Chowdhury, M.İ., Kamal, M., Ghose, S., İslam, M.N., Mustafa, M.N. and Miah, M.S.R.**, 1999, Radiation dose estimation from the radioactivity analysis of lime and cement used in bangladesh, *Journal of Environmental Radioactivity*, 42:77-85 pp.
- Al-Jarallah, M.**, 2001, Radon exhalation from granites used in Saudi Arabia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 53:91-98 pp.
- Ali, K.**, 2012, Radioactivity in building materials in İraq, *Radiation Protection Dosimetry*, 148 (3):372-379 pp.
- Arias, H., Palacios, D., Sajo-Bohusa, L. and Vilorio, T.**, 2005, Alternative procedure for LR-115 chemical etching and alpha tracks counting, *Radiation Measurements*, 40:357-362 pp.
- ASTM C 33-13**, 2013, Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM C 128-07**, 2007, Standard Test Method for Density, Relative density (Specific gravity) and Absorption of Fine Aggregates, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 618- 12**, 2012, Standard Specification for Coal Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 642-13**, 2013, Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 1585-13**, 2013, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water bu Hydraulic Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- Baixeras, C., Climent, H., Font, L.L., Baemeister, G.U., Albarracín, D. And Monnin, M.M.**, 1997, Using SSNTDS in soil and indoors in two Mediterranean locations for radon concentration measurements, *Radiation Measurements*, 28 (1-6):713-716 pp.
- Bavarnegin, E., Fathabadi, N., Moghaddam, M.V., Farahani, M.V., Moradi, M. and Babakhni, A.**, 2013, Radon exhalation rate and natural radionuclide content in building materials of high background areas of Ramsar, Iran, *Journal of Environmental Radioactivity*, 117: 36-40 pp.
- Baykara, O. and Doğru, M.**, 2009, Determination of terrestrial gamma,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in soil along fracture zones, *Radiation Measurements*, 44: 116-121 pp.
- Baykara, O., Karatepe, Ş., and Doğru, M.**, 2011, Assessments of natural radioactivity and radiological hazards in construction materials used in Elazığ, Turkey, *Radiation Measurements*, 46: 153-158 pp.
- Beretka, J. and Mathew, P.J.**, 1985, Natural radioactivity in Australian building materials, industrial wastes and by-products, *Health Physics*, 48:87-95 pp.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bolca, M., Kılınc, R., Altınbaş, Ü., Saç, M.M., Kumru, M.N., Çolak, B., Esetlili, T. ve Özen, F.,** 2010, Alangüllü (Aydın) Bölgesindeki Jeotermal Kaynakların Kimyasal Özelliklerinin ve İçerdikleri Radyoaktif Maddelerin Su Kaynakları, Tarım Toprakları ve Kültür Bitkilerine Etkilerinin Multidisipliner Yaklaşımla Saptanması Üzerine Araştırmalar, (1070085), Tübitak Projesi.
- Can, B.,** 2011, Kilis İlindeki Evlerde Radon Gazı Ölçümü, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63s (Yayımlanmamış).
- Canbaz, C., Çam, N.F., Yaprak, G. and Candan, O.,** 2010, Natural Radioactivity ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ) and Assessment of Radiological Hazards in The Kestanbol Granitoid, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2):192-198 pp.
- Chauhan, R.P. and Kumar, A.,** 2013, Study of radon transport through concrete modified with silica fume, *Radiation Measurements*, 59: 59-65 pp.
- Chauhan, R.P. and Kumar, A.,** 2013, Radon resistant potential of concrete manufactured using Ordinary Portland Cement blended with rice husk ash, *Atmospheric Environment*, 81: 413-420 pp.
- Chauhan, R.P., Nain, M. and Kant, K.,** 2008, Radon diffusion studies through some building materials: Effect of grain size, *Radiation Measurements*, 43: 445-448pp.
- Cozmuta, I. and van der Graaf, E.R.,** 2001, Methods for measuring diffusion coefficients of radon in building materials, *The Science of the Total Environment*, 272: 323-335 pp.
- Damla, N., Cevik, U., Kobya, A.I., Celik, A., Celik, N. and Yıldırım, I.,** 2011, Assessment of natural radioactivity and mass attenuation coefficients of brick and roofin tile used in Turkey, *Radiation Measurements*, 46: 701-708 pp.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Darby, S.C. and Hill. D.C., 2003**, Health effects of residential radon: a European perspective at the end of 2002, *Radiation Protection Dosimetry*, 104(4): 321-329 pp.
- Darby, H., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Schaffrath Rosario, A., Tirmarche, M., Tomášek, L., Whitley, E., Wichmann, H.E. and Doll, R., 2004**, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies.
- EC, 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 27/03/1990, European Commission, Luxembourg.
- EC, 1995**, Radon in Indoor Air, Directorate General for Science, Research and Development Joint Research Centre, Environment Institute, European Commission, Luxembourg.
- EC, 1999**, Radiation Protection 112 - Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, European Commission, Brussels.
- El-Mageed, A.I.A., Farid, M.E., Saleh, E.E., Mansour, M. and Mohammed, A.K., 2014**, Natural radioactivity and radiological hazards of some building materials of Aden, Yemen, *Journal of Geochemical Exploration*, 140:41-45 pp.
- El-Shershaby, A., El-Bahy, S., Walley El-Din, N., and Dabayneh, K., 2006**, Assessment of natural and man-made radioactivity levels of the plant leaves samples as bio-indicators of pollution in hebron district- Palestine, *Arab Journal of Nuclear Sciences and applications*, 39(2):232-242 pp.
- Erdoğan, Y.T., 2003**, Beton, METU Press, 738s, Ankara.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Erdoğan, Y.T.**, 2007, **BETON**, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş, Genişletilmiş 2. Baskı, Ankara.
- Erdoğan, E.**, 2006, Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yayımlanmamış).
- Field, R.W., Steck, D.J., Smith, B.J., Brus, C.P., Fisher, E.L., Neuberger, J.S., Platz, C.E., Robinson, R.A., Woolson, R.F. and Lynch, C.F.**, 2000, Residential radon gas exposure and lung cancer: The Iowa radon lung cancer study, *American Journal of Epidemiology*, 151(11): 1091-110 2pp.
- Gupta, M., Mahur, A.K., Varshney, R., Sonkawade, R.G., Verma, K.D. and Prasad, R.**, 2013, Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate in fly ash samples from a thermal power plant and estimation of radiation doses, *Radiation Measurements*, 50: 160-165 pp.
- Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z.**, 1997, Radon Kirliliği. Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi, 44: 9-11s.
- Hayabba, P., Zaman, M., Lubba, N., Munsanje, S. and Nuleya, D.**, 1995, Natural radioactivity in Zambian building materials collected from Lusaka, *Journal of radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 199:229-238 pp.
- Hewamanna, R., Sumithrarachchi, C., Mahawatte, P., Nanayakkara, H. and Ratnayake, H.**, 2001, Natural radioactivity and gamma dose from Sri Lankan clay bricks used in building construction, *Applied Radiation and Isotopes*, 54:365-369 pp.
- IAEA-** Safety report Series No.33, 2003, Radiation Protection Against Radon in Workplaces other than Mines, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- İçhedef, M.**, 2011, Radon Difüzyon Hızının Farklı Büyük Toprak Gruplarına Göre Değişiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 123s (yayımlanmamış).

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ICRP**, 1977, International Commission on Radiological Protection, Recommendations of ICRP, Publication 26, Pergamon Press, Oxford.
- ICRP**, 1993, International Commission on Radiological Protection, Protection Against Radon-222 at Home and at Work. Publication 65, Pergamon Press, Oxford.
- Kovler, K.**, 2006, Radon exhalation of hardening concrete: monitoring cement hydration and prediction of radon concentration in construction site, *Journal of Environmental Radioactivity*, 86: 354-366 pp.
- Kovler, K.**, 2011, Legislative aspects of radiation hazards from both gamma emitters and radon exhalation of concrete containing coal fly ash, *Construction and Building Materials*, 25: 3404-3409 pp.
- Krieger, R.**, 1981, Radioactivity of construction materials. *Betonwerk Fertigteil Technology*, 47:468-473 pp.
- Lu, X.**, 2005, Natural radioactivity in some building materials of Xi'an, China, *Radiation Measurements*, 40: 94-97 pp.
- Lu, X., Yang, G. and Ren, C.**, 2012, Natural radioactivity and radiological hazards of building materials in Xianyang, China, *Radiation Physics and Chemistry*, 81: 780-784 pp.
- Mahur, A.K., Gupta, M., Varshney, R., Sonkawade, R.G., Verma, K.D. and Prasad, R.**, 2013, Radon exhalation and gamma radioactivity levels in soil and radiation hazard assessment in the surrounding area of National Thermal Power Corporation, Dadri (U.P.), India, *Radiation Measurements*, 50: 130-135 pp.
- Man, C.K. and Yeung, H.S.**, 1997, The effects of cracks and holes on the exhalation of radon from concrete, *Building and Environment*, 32 (4): 351-354 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Mavi, B. and Akkurt, I.**, 2010, Natural radioactivity and radiation hazards in some building materials used in Isparta, Turkey, *Radiation Physics and Chemistry*, 79: 933-937 pp.
- Mc Laughlin, J.P.**, 2011, Approaches to the assessment of long term exposure to radon and its progeny, *The Science of the Total Environment*, 272: 53-60 pp.
- Muminov, I.T., Muhamedov, A.K. and Osmanov B.S.**, 2005, Application of NaI(Tl) detector for measurement of natural radionuclides and <sup>137</sup>Cs in environmental samples: new approach by decomposition of measured spectrum, *Journal of Environmental Radioactivity*, 84:321-331 pp.
- Mustonen, R., Pennanen M., Annanmäki, M. and Oksanen, E.**, 1999, Enhanced Radioactivity of Building Materials. Final report of the contract No 96-ET-002 for the European Commission, Radiation and Nuclear Safety Authority- STUK, Finland, 1997; Radiation Protection 96, Luxembourg.
- Narula, A.K., Goyal, S.K., Chauhan, R.P. and Chakarvarti, S.K.**, 2013, Study of radon diffusion from RHA-modified ordinary Portland cement using SSNTD technique, *Radiation Measurements*, 50: 109-111 pp.
- NEA-OECD**, 1979, Nuclear Energy Agency, Exposure to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials, Reported by NEA Group of Experts, OECD, Paris, France.
- Neville, A.M.**, 1996, Properties of Concrete: Fourth and Final Edition, Prentice Hall.
- OECD**, 1979, Exposure to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials, Report by a Group of Experts of OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- Otoo, F., Adukpo. O., Darko, E., Emi-Reynolds, G., Awudu, A., Ahiamadjie, H., Tandoh, J., Hasford, F., Adu, S. and Gyampo, O.**, 2011, Assessment of natural radioactive materials in building materials used along the coast of central region of Ghana, *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 3(3):261-268 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Salehahari, R.**, 2014, Mineral Katkıların Kendiliğinden Yerleşen Betonun Reolojik, Tiksotropik ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).
- Sharaf, J.M. and Hamideen, M.S.**, 2013, Measurement of natural radioactivity in Jordanian building materials and their contribution to the public indoor gama dose rate, *Applied Radiation and Isotopes*, 80: 61-66 pp.
- Shoeib, M.Y. and Thabayneh, K.M.**, 2014, assessment of natural radiation exposure and radon exhalation rate in various sample of Egyptian building materials, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2): 174-181 pp.
- Somlai, J., Horvath, M., Kanyar, B., Lendvai, Z. and Nemeth, C.C.**, 1998, Radiation hazard of coal slags as building material in Tatabanya town (Hungarry), *Health Physics*, 75(6): 648-651 pp.
- Stranden, E.**, 1983, Assessment of the radiological impact by using fly ash in cement, *Health Physics*, 2(45):145-153 pp.
- TAEK**, 2009, Radyasyon, İnsan ve Çevre: iyonlaştırıcı radyasyon, etkileri ve kullanım alanları, güvenli kullanımı için uygulamada olan tedbirler, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, Turkey.
- TAEK**, 2009, Türkiye’de Kullanılan Yapı Malzemelerindeki Doğal Radyoaktiviteden Kaynaklanan Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, Turkey.
- TAEK**, 2012, Kapalı Ortamlarda Radon Gazı, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, Turkey.
- Thabayneh, K.M.**, 2013, Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate in granite samples used in Palestinian buildings, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38:201-207 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- TS 3529**, 1980, Beton agregalarının birim hacim ağırlıklarının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1**, 2000, Çimento Deneyi Metotları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1**, 1999, Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler- Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı Tayini- Eleme Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-3**, 2000, Kağır Harcı Deney Metotları – Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (yayıma tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turhan, Ş., Yücel, H., Gündüz, L., Şahin, Ş., Vural, M., Parmaksız, A. and Demircioğlu, B.**, 2007, Natural radioactivity measurement in pumice samples used raw materials in Turkey, *Applied Radiation and Isotopes*, 65: 350-354 pp.
- Turhan, Ş. and Gündüz, L.**, 2008, Determination of specific activity of <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K for assessment of radiation hazards from Turkish pumice samples, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99: 332-342 pp.
- Ulbak, K., Jonassen, N. and Baekmark, K.**, 1984, Radon exhalation from samples of concrete with different porosities and fly ash additives, *Radiation Protection Dosimetry*, 7(1-4):45-48 pp.
- UNSCEAR**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988, Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation, United Nations Publication, New York, USA.
- UNSCEAR**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, Exposure from Natural Sources of Radiation, United Nations Publication, New York, USA.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- UNSCEAR**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Publication, New York, USA.
- Veiga, R., Sanches, N., Anjos, R.M., Macario, K., Bastos, J., Iguatemy, M., Aguiar, J.G., Santos, A.M.A., Mosquera, B., Carvalho, C., Baptist Filho, M. and Umisedo, N.K.**, 2006, Measurement of natural radioactivity in brazilian beach sands, *Radiation Measurements*, 41: 189-196 pp.
- WHO**, World Health Organisation, 2002, Radon and Health, Information Sheet.
- WHO**, World Health Organisation, 2009, Handbook of Indoor Radon: a public health perspective, edited by Hajo Zeeb and Ferid Shannoun.
- Yamada, Y.**, 2003, Radon exposure and its health effects, *Journal of Health Science*, 49(6): 417-422 pp.
- Yeğınobalı, A.**, 2007, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 64s.
- Yu, K.N., Balendran, R.V., Koo, S.Y. and Cheung, T.**, 2000, Silica fume as a retardant from concrete, *Environmental Science and Technology*, 34:2284 -2287 pp.
- Yu, K., Young, E.C., Stokes, M.J., Kwan, M.K., and Balendran, R.V.**, 1997, Radon emanation from concrete surfaces and the effect of the curing period, pulverized fuel ash (PFA) substitution and age, *Applied Radiation and Isotopes*, 48(7):1003-1007 pp.
- Yücel, B. ve Arıkan, İ.H.**, 2006, Binalarda radon ve sağlık etkileri, Standard, TSE, 531: 108- 110s.
- Zubair, M., Verma, D., Azam, A. and Roy, S.**, 2013, Natural radioactivity and radiological hazard assessment of soil using gamma-ray spectrometry, *Radiation Protection Dosimetry*, 155(4): 467 - 473 pp.

## ÖZGEÇMİŞ

Daniel HATUNGIMANA, 1982 yılında Munini’de doğdu. İlköğrenimini Ndava İlkokulu’nda, orta öğrenimini ise Buta Lisesi’nde tamamladı.

2002 yılında girdiği Burundi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2009 yılında tamamladı. 2010 yılından beri Burundi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. 2012 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitime başladı.

