

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEBZE BÖLGESİNDE KULLANILAN BAZI YAPI MALZEMELERİNDE
DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ, SEM/EDS
ANALİZLERİ, TOPRAK VE SUDA RADON GAZI ÖLÇÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe Seda KARTAL

Fizik Anabilim Dalı

MAYIS 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEBZE BÖLGESİNDE KULLANILAN BAZI YAPI MALZEMELERİNDE
DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ, SEM/EDS
ANALİZLERİ, TOPRAK VE SUDA RADON GAZI ÖLÇÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe Seda KARTAL

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Filiz ERTUĞRAL YAMAÇ

MAYIS 2025

Ayşe Seda KARTAL tarafından hazırlanan “GEBZE BÖLGESİNDE KULLANILAN BAZI YAPI MALZEMELERİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ, SEM/EDS ANALİZLERİ, TOPRAK VE SUDA RADON GAZI ÖLÇÜMÜ” adlı tez çalışması 22.05.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Hakan YAKUT**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Filiz ERTUĞRAL YAMAÇ (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Betül USTA**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ GEBZE BÖLGESİNDE KULLANILAN BAZI YAPI MALZEMELERİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ, SEM/EDS ANALİZLERİ, TOPRAK VE SUDA RADON GAZI ÖLÇÜMÜ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(22/05/2025)

(imza)

Ayşe Seda KARTAL





Anneme ve Babama..



TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca bana rehberlik eden, bilgi ve deneyimleriyle çalışmama katkı sağlayan saygıdeğer Danışman Hocam Prof. Dr. Filiz ERTUĞRAL YAMAÇ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin değerli yönlendirmeleri ve sabrı, bu çalışmayı mümkün kılmıştır.

Bu çalışmanın her aşamasında yanımda olan, varlığıyla her zaman güç veren sevgili eşim Musa KARTAL'a ; desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Hatice GÖK'e ve babam Hüseyin GÖK'e ; hayatıma neşe ve anlam katan kıymetli çocuklarıma sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca laboratuvar çalışmaları sırasında destek olan ve bilgilerini benimle paylaşan Dr. Gamze HOŞGÖR' e ve Dr. Elif KEMAH' a; bu sürece beraber başladığım sınıf arkadaşım Seval TUNÇAY' a ve değerli destekleriyle bu çalışmanın gelişimine yardımcı olan İsa KARTAL 'a içtenlikle teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunar ve bu çalışmanın ilgili alanlara fayda sağlamasını temenni ederim.

Ayşe Seda KARTAL



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SİMGELER	xvii
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Çalışma Alanının Coğrafi ve Endüstriyel Özellikleri	2
1.3. Radyoaktif Maddelerin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri	3
1.4. Konunun Önemi ve Literatür Özeti	4
2. GENEL BİLGİLER	17
2.1. Radyoaktivite	17
2.1.1. Doğal radyasyon kaynakları	18
2.1.2. Yapay radyasyon kaynakları	20
2.2. Yarılanma Ömrü ve Bozunma Türleri	21
2.2.1. Alfa bozunması	21
2.2.2. Beta bozunması	22
2.2.2.1. Beta Artı Bozunumu	22
2.2.2.2. Beta Eksi Bozunumu	23
2.2.2.3. Elektron yakalama olayı	24
2.2.3. Gama bozunması	24
2.3. Radyoaktif Seriler	25
2.3.1. Aktinyum serisi	26
2.3.2. Toryum serisi	27
2.3.3. Uranyum serisi	27
2.4. Radon Gazının Özellikleri ve Yayılımı	28
2.4.1. Uranyum, toryum ve radon ilişkisi	30
2.4.2. Yapı malzemelerinde radyoaktivite ve radon	31
2.4.3. Toprak ve maden alanlarında radyoaktivite ve radon	34
2.4.4. Sularda radyoaktivite ve radon	37
3. MATERYAL ve METOD	39
3.1. Yapı Malzemelerinde Doğal Radyoaktivite	39
3.1.1. Numunelerinin toplanması ve özellikleri	39
3.1.2. Yapı malzemeleri numunelerindeki doğal radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonlarının tespitinde kullanılan yöntem	43
3.1.2.1. Gama spektrometresi yöntemi ve NaI (Tl) dedektörü	43
3.1.2.2. NaI(Tl) dedektörü ile ölçümlerin yapılışı	46

3.1.2.3. Radyolojik risk parametrelerinin hesaplanması	51
3.1.3. Doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi için numunelerin ölçüme hazırlanması	54
3.2. SEM ve EDS Analizleri.....	55
3.3. Yapı Malzemelerinde Radyasyon Soğurma	57
3.4. Toprak Numunelerinde Radon ve Radyum Analizi	59
3.4.1. Çalışma alanı	59
3.4.2. Katı hal iz dedektörleri ile kapalı kutu yöntemi kullanılarak radon ölçümü	60
3.4.2.1. Kapalı kutu tekniği ile radon ölçüm yöntemi ve yayılım hızlarının tespiti	62
3.4.3. Toprak numunelerinin analizi	68
3.5. Su Numunelerin Radon Analizi.....	72
3.5.1. Çalışma bölgesi	72
3.5.2. RAD-7 Radon ölçüm cihazı özellikleri.....	73
3.5.3. Numune hazırlama ve radon ölçüm düzeneği	75
4. DENEYSEL BULGULAR.....	79
4.1. Yapı Malzemelerinde Doğal Radyoaktivite Bulguları	79
4.1.1. Aktivite ölçüm çıkarımları	79
4.1.2. Aktivite değerlerinin hesaplanması.....	82
4.1.3. Radyum eşdeğer aktivitesi	85
4.1.4. Soğurulan doz oranı	85
4.1.5. Yıllık etkin doz miktarı	87
4.1.6. Dış ortam tehlike indeksi, iç ortam tehlike indeksi.....	87
4.1.7. Gama indeksi, Alfa indeksi	89
4.2. SEM ve EDS Bulguları	90
4.2.1. Alçı 1	90
4.2.2. Alçı 2	91
4.2.3. Ateş tuğla.....	93
4.2.4. Derz 1	94
4.2.5. Granit 1.....	95
4.2.6. Çimento	97
4.2.7. Dolomit.....	98
4.2.8. Gaz beton.....	99
4.2.9. Derz 2	100
4.2.10. İzolasyon tuğla 1	102
4.2.11. Kalsit	103
4.2.12. Kiremit	104
4.2.13. Sönmüş kireç	105
4.2.14. Seramik.....	106
4.2.15. Sıva.....	108
4.2.16. Tuğla.....	109
4.3. Yapı Malzemelerinde Radyasyon Soğurma Bulguları	110
4.4. Toprak Numunelerine Ait Bulgular.....	113
4.5. Su Numunelerine Ait Bulgular.....	117
4.5.1. Farklı su türlerinde ölçülen radon aktivite düzeylerinin karşılaştırılması	121
4.5.2. Ölçülen su numunelerinin insan sağlığı üzerindeki etkileri	123
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	127
KAYNAKLAR.....	135

ÖZGEÇMİŞ.....	157
----------------------	------------





KISALTMALAR

AED	: Yıllık etkin doz eşdeğeri
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
Bq	: Becquerel (radyoaktivite birimi)
Ci	: Curie (radyoaktivite birimi)
C_{Ra}^{eff}	: Etkin radyum konsantrasyonu
Ci	: Curie (radyoaktivite birimi)
C(t)	: Radon aktivite konsantrasyonu
C_{Rn}^{ind}	: Toprakтан salınan radonun kapalı alandaki radona katkısı
C_{Rn}	: Radon aktivite konsantrasyonu
CR-39	: Polikarbonat
CN-85	: Selüloz Asetat
°C	: Santigrad
ÇNAEM	: Çekirdek Araştırma ve Nükleer Enerji Merkezi
EU-BSS	: Avrupa Temel Güvenlik Standartları
EURATOM	: Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu
eV	: Elektron-Volt
Gy	: Gray (soğurulan doz birimi)
HpGe	: Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektörü
ICRP	: Uluslararası Radyolojik Korunma Komitesi
LR-115	: Selüloz Nitrat
NaI (TI)	: Talyum katkılı sodyum iyodür dedektörü
OSB	: Organize Sanayi Bölgesi
PET	: Pozitron Emisyon Tomografisi
Ppm	: Milyarda bir
RAD-7	: Ra gazı ölçümü için kullanılan alfa spektrometresi
Sv	: Sievert (eşdeğer doz birimi)
SAÜ	: Sakarya Üniversitesi
SSNTD	: Polimer yapılı katı hal iz dedektörü
Te(h)	: Etkin ışıınma zamanı
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu

UNSCEAR : Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi
USEPA : ABD Çevre Koruma Ajansı
WHO : Dünya Sağlık Örgütü
WLM : Aylık çalışma seviyesi



SİMGELER

Ac	: Aktinyum
A_K	: Potasyum aktivite konsantrasyonu
A_{Ra}	: Radyum aktivite konsantrasyonu
A_{Th}	: Toryum aktivite konsantrasyonu
Bi	: Bizmut
D_{in}	: Yapı İçi Gama Soğurma Oranı
D_{out}	: Yapı Dışı Gama Soğurma Oranı
E	: Eksalasyon oranı
E_A	: Yüzey radon yayılım hızı
E_S	: Yüzey radon eksalasyon oranı
E_M	: Kütle radon yayılım hızı
e_{Th}	: Eşdeğer Toryum
e_U	: Eşdeğer Uranyum
ε	: Dedektörün Verimi
G_y	: Gray (soğrulan doz birimi)
H_{ex}	: Dış Radyolojik Risk Faktörü
H_{in}	: İç Radyolojik Risk Faktörü
HNO₃	: Nitrik asit
k_f(K)	: Kalibrasyon faktörü
KOH	: Potasyum Hidroksit
I_y	: Gama İndeksi
I_α	: Alfa İndeksi
K	: Potasyum
K₁,K₂,K₃	: Duyarlılık Faktörleri
m	: Kütle
MDA	: Minimum dedekte edilebilen aktivite
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Pa	: Protaktinyum
Pb	: Kurşun

Po	: Polonyum
ppm	: Milyonda bir
Ra	: Radyum
Ra_{eq}	: Eşdeğer radyum içeriği
Rn	: Radon
SiO₂	: Silisyum Dioksit
Sr	: Kapalı ortamın alanı
t	: Zaman
Th	: Toryum
Tl	: Talyum
U	: Uranyum
V	: Hacim
VB	: Hasara uğramamış yüzeyin iz kazıma hızı
Vr	: Kutu hacmi
VT	: Hasara uğramış yüzeyin iz kazıma hızı
y	: Yıl
Z	: Atom numarası
$\tilde{\nu}_e$	: Antinötrino
μB	: Art Ortam Sıyırma Hızı
ν_e	: Nötrino

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Kozmik Radyasyonun Canlı Üzerine Etkileriyle İlişkili Yıllık Etkin Doz Miktarı (UNSCEAR, 2000; Canbaz, 2007).	19
Tablo 2.2. Primordial radyonüklidler ve yarı-ömürleri (Değerlier, 2007)	19
Tablo 2.3. Doğal Radyoaktif Seriler ve Özellikleri.....	26
Tablo 3.1. Bazı yapı malzemelerinde doz hesabında kullanılan doz dönüşüm katsayıları (EC, 1999)	52
Tablo 3.2. Aktivite konsantrasyon indeksinin doz kriteri ve kullanılan malzemenin miktarına bağlı olarak değişimi (OECD,” Paris,(1979).EC(European Commission), Cenevre,(1999).	53
Tablo 3.3. Numune alınan bölgeler ve koordinatları.	73
Tablo 4.1. Gebze bölgesinde alınan numune örneklerinin kütle ve yüzey radon yayılım oranları ile etkin radyum konsantrasyonu	113
Tablo 4.2. Dünya genelinde yapılan çalışmaların değerlendirmesi.	116
Saad vd. (2013), Libya (Al-Marj)	116
Tablo 4.3. Ölçülen suların koordinatları, numune alma ve ölçüm zamanları arasındaki geçen süre ile DCF bozunum faktörü değerleri.	118
Tablo 4.4. Ölçülen suların ortalama radon aktiviteleri, standart sapmaları ve DCF düzeltmeleri yapılmış değerleri.	119
Tablo 4.5. Ulusal ve Uluslararası Değerler	122
Tablo 4.6. Yaş gruplarına göre yıllık su alım ve solunum oranları ile doz dönüşüm katsayıları(Kaur. Et al 2019).....	123
Tablo 4.7. Ölçümü yapılan suların, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunmasından kaynaklanan değişik yaş gruplarındaki yıllık efektif dozlar.	125



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Küresel radyasyon dozunda doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının katkı payları.....	18
Şekil 2.2. Radyasyon Kaynakları (USNRC, 1987).....	20
Şekil 2.3. Alfa bozunumunun şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.4. ^{230}Pa çekirdeğindeki β^+ ışıması	23
Şekil 2.5. ^{228}Ra çekirdeğindeki β^- ışıması.....	23
Şekil 2.6. ^{60}Co γ bozunumu şematik gösterimi	24
Şekil 2.7. Radyasyonların birbirine göre giricilik özellikleri	25
Şekil 2.8. Radyoaktif bozunma şeması (Kanişkan vd.,1996)	25
Şekil 2.9. Aktinyum serisinin bozunma zinciri.....	26
Şekil 2.10. Toryum serisinin bozunma zinciri	27
Şekil 2.11. Uranyum serisinin bozunma zinciri.....	28
Şekil 3.1. Kocaeli ili ve ilçeleri haritası.	39
Şekil 3.2. Çalışma alanı ve örnekleme noktalarının lokasyon haritası.	40
Şekil 3.3. Gama spektrometre sisteminin elektronik üniteleri.	45
Şekil 3.4. Gama spektrometresinin enerji kalibrasyonu	46
Şekil 3.5. Diğer kanallardan U, Th ve K kanallarına gelen katkılar (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007; Özken, 2011; Çam et al.,2013)	48
Şekil 3.6. ^{40}K sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011).	48
Şekil 3.7. ^{238}U sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011).....	49
Şekil 3.8. ^{232}Th sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011).....	50
Şekil 3.9. Bazı numunelerin toz haline getirilmesi ve elenmesi.	54
Şekil 3.10. Bazı numunelerin kaplara yerleştirilmesi ve etiketlenmesi.....	55
Şekil 3.11. Farklı Kalınlıkta bazı yapı malzemesi örnekleri (Ateş Tuğla, İzolasyon Tuğla,Granit1,Granit2,Granit3,Seramik)	57
Şekil 3.12. μ katsayısının grafiksel analiz yoluyla belirlenmesi.....	59
Şekil 3.13. Toprak numunesi alınan bölgelerin harita üzerindeki konumu	60
Şekil 3.14. Polimer zincirin yüksek enerjili parçacıklar tarafından hasara uğraması.61	
Şekil 3.15. Polimer dedektör yüzeyinde oluşan iz yapısının evreleri; konik faz, geçiş fazı ve küresel faz.....	62
Şekil 3.16. Kapalı Kutu Tekniği şematik gösterimi.....	63
Şekil 3.17.Kurutulmuş ve öğütülmüş Toprak Örneklerine Ait Temsili Görsel	69
Şekil 3.18. Kapalı kutu yöntemine ait şematik gösterim.	70
Şekil 3.19. İz kazıma işlemi sırasında kullanılan deney düzeniğine ait görsel.....	71
Şekil 3.20. İmageJ programı aracılığıyla elde edilen izlerin mikroskopik görüntüsü.	71
Şekil 3.21.Gebze ve çevre köylerinden alınan su numunelerine ait konumların harita üzerindeki dağılımı.....	73

Şekil 3.22. RAD-7 radon detektörü (DurrIDGE Company,1997).....	74
Şekil 3.23. RAD-7 ile elde edilen radon bozunma ürünlerine ait alfa spektrum grafikleri (DurrIDGE Company,1997).	75
Şekil 3.25. RAD7 sistemine bağlı RAD H ₂ O aksesuarının çalışma şeması (DurrIDGE Company,1997).....	76
Şekil 3.26. Su Numunelerinin RAD-7 H ₂ O dedektörüne bağlanması(DurrIDGE Company,1997).....	77
Şekil 4.1. Yapı malzemerleri örneklerine ait gama spektrumları	79
Şekil 4.2. Yapı malzemesi örneklerine ait gama spektrumları.	80
Şekil 4.3. Yapı malzemesi örneklerine ait gama spektrumları.	81
Şekil 4.4. ⁴⁰ K aktivite sonuçları	83
Şekil 4.5. ³² Th ölçüm sonuçları.....	84
Şekil 4.6. ²³⁸ U ölçüm sonuçları	84
Şekil 4.7. Radyum Eşdeğer Aktivitesi sonuçları.....	85
Şekil 4.8. Yapı dışında soğurulan doz oranı (D _{out}) sonuçları.....	86
Şekil 4.9. Yapı içinde soğurulan doz oranı (D _{in}) sonuçları.....	86
Şekil 4.10. Yıllık etkin doz miktarı (AED) sonuçları	87
Şekil 4.11. Dış ortam tehlike indeksi (H _{ex}) sonuçları	88
Şekil 4.12. İç ortam tehlike indeksi (H _{in}) sonuçları	88
Şekil 4.13. Gama indeksi (I _γ) sonuçları	89
Şekil 4.14. Gama indeksi (I _α) sonuçları	90
Şekil 4.15. Alçı 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.....	91
Şekil 4.16. Alçı 2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.....	92
Şekil 4.17. Ateş Tuğla numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları. ..	93
Şekil 4.18. Derz 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.....	94
Şekil 4.19. Granit 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	96
Şekil 4.20. Çimento numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.....	97
Şekil 4.21. Dolomit numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	98
Şekil 4.22. Gaz Beton numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları....	99
Şekil 4.23. Derz 2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.....	101
Şekil 4.24. İzolasyon Tuğla 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	102
Şekil 4.25. Kalsit numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.....	103
Şekil 4.26. Kiremit numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	104
Şekil 4.27. Sönmüş Kireç numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	105
Şekil 4.28. Seramik numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	107
Şekil 4.29. Sıva numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	108
Şekil 4.30. Tuğla numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.	109
Şekil 4.31. Gebze bölgesinden alınan yapı malzemelerinin μ katsayısı değerleri... ..	110
Şekil 4.32. Gebze bölgesi yapı malzemelerinin μ katsayısı değerlerinin enerjiye bağlı değişimi	112
Şekil 4.33. Örneklerde ölçülen ²²⁶ Ra konsantrasyonlarının (Bq.kg ⁻¹) dağılımı.....	114
Şekil 4.34. Radon eksalasyon oranlarının E _m (mBq.kg ⁻¹ .h ⁻¹) grafiği.	114
Şekil 4.35. Radon yoğunluklarının dağılımı. (Bq.m ⁻³)	115
Şekil 4.36. Yüzeye bağlı radon eksalasyon oranlarının E _s (Bq.m ⁻³) grafiği.....	115
Şekil 4.37. Su numunelerinde ölçülen ²²² Rn radon konsantrasyonlarının değişimi.	121
Şekil 5.1. Ölçülen U-238 aktivite değeri ile limit değerin karşılaştırılması.	128
Şekil 5.2. Ölçülen Th-232 aktivite değeri ile limit değerin karşılaştırılması.	128
Şekil 5.3. Ölçülen K-40 aktivite değeri ile limit değerin karşılaştırılması.	129

Şekil 5.4. Absorblanmış doz hızının limit değeri ile karşılaştırılması.....	130
Şekil 5.5. Yıllık etkin doz eşdeğerinin limit değeri ile karşılaştırılması	130
Şekil 5.6. Yapı malzemelerinin ve normal betonun doğrusal zayıflama katsayılarının karşılaştırılması	132
Şekil 5.7. Ölçülen radon konsantrasyonlarının, Türkiye'deki ev iç radon ortalaması (TAEK,2014) ve dünya genelindeki radon ortalaması (UNSCEAR, 2000) değerleri ile karşılaştırılması.	133
Şekil 5.8. Farklı yaş gruplarına (Yetişkin, Çocuk ve Bebekler) ait içme suyu tüketimiyle alınan radon aktivitelerin göre belirlenen yıllık efektif doz değerlerinin örneklere bağlı değişimi.....	133





GEBZE BÖLGESİNDE KULLANILAN BAZI YAPI MALZEMELERİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ, SEM/EDS ANALİZLERİ, TOPRAK VE SUDA RADON GAZI ÖLÇÜMÜ

ÖZET

Günlük yaşamın büyük bir bölümünü kapalı alanlarda geçiren bireyler, yapı malzemelerinden kaynaklanan radyasyon enerjisinin sağlık üzerindeki etkilerini deneyimlemektedir. Doğal radyoaktivite, inşaat sektöründe kullanılan malzemelerin içeriğinde bulunan uranyum, toryum, potasyum ve bu elementlerin bozunma ürünleri ile doğrudan bağlantılıdır. Bu malzemelerde var olan uranyum ve toryum, bozunma süreçleri sonucunda radyoaktif gazlar üreterek iç mekanlarda birikme riski oluşturur. Uzun süreli maruz kalma, bireylerin sağlığı üzerinde olumsuz etkiler bırakabilir.

Bu araştırmanın hedefi, inşaat malzemelerindeki doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi yöntemlerini çok boyutlu bir şekilde analiz etmek ve bu radyoaktivitenin insan sağlığı üzerindeki muhtemel etkilerini analiz etmektir.

Bu çalışmada Kocaeli Gebze (Merkez, Köşeler köyü, Tavşanlı köyü, Pelitli Köyü, Çayırova, Dilovası, Hereke) bölgesinin jeolojik ve sanayi yapısı göz önünde bulundurularak, inşaat sektöründe kullanılan çeşitli yapı malzeme örneklerindeki doğal radyonüklid konsantrasyonları (^{40}K , ^{232}Th ve ^{238}U) “3x3 NaI (TI)” detektörlü gama spektroskopisi kullanılarak belirlenmiştir. Bunun için Gebze ilçesinin 9 ayrı bölgesinden temin edilen 17 (Tuğla, Ateş tuğla, İzolasyon tuğla, Kiremit, Kalsit, Alçı (Saten, Kartonpiyer), Seramik, Dolomit, Granit, Çimento, Kireç taşı, Sıva, Ytong (gaz beton), Mermer, Traverten, Derz) farklı yapı malzemedan oluşan toplam 32 örneğin doğal radyoaktivite seviyeleri ^{40}K için 1460 keV, ^{232}Th için 2610 keV (^{208}Tl) ve ^{238}U için 1760 keV (^{214}Bi) enerji değerlerine sahip gama ışınları kullanılarak Sakarya Üniversitesi laboratuvarında analiz edilmiştir. Ölçümü yapılan yapı malzemesi örneklerinde ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonları sırasıyla 32 - 199 Bq.kg⁻¹, 10,6 - 39 Bq.kg⁻¹ ve 9,8 - 152,3 Bq.kg⁻¹ aralığında ölçülmüştür. Ayrıca çalışmada ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th aktivite değerlerinin halk sağlığına etkilerini değerlendirmek amacıyla; yapı içerisinde ve dışarısında soğurulan doz oranı (D_{out} , D_{in}), yıllık etkin doz eşdeğeri (AED), radyum eşdeğer aktivitesi (R_{eq}), gama ineksi (I_{γ}), alfa indeksi (I_{α}) ve iç ve dış tehlike indeksi (H_{ex} , H_{in}) için ortalama değerlerde hesaplanmıştır.

Ayrıca bazı yapı malzemelerinin yüzey morfolojisi ile elementel bileşimini ortaya koymak amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri ile malzemelerin gözeneklilik düzeyleri, yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı özellikleri değerlendirilirken; EDS analizleri örneklerin elementel kompozisyonları belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, yapı malzemelerinin içerdiği mineral fazları ve radyoaktif elementlerle ilişkili yapısal özelliklerin çok boyutlu analizine olanak sağlamıştır.

Yapı malzemesi örneklerinin (granit, mermer, gaz beton, seramik, ateş tuğlası, tuğla, izolasyon tuğla ve kiremit) radyasyon zayıflatma özellikleri, 1173 keV ve 1332 keV enerjili gama ışınları kullanılarak belirlenmiş ve toplam doğrusal zayıflama katsayıları (μ , cm⁻¹) hesaplanmıştır. Ölçümler sonucunda, 1173 keV için zayıflama katsayılarının 0,08 – 0,135 cm⁻¹; 1332 keV için ise 0,013 – 0,156 cm⁻¹ aralığında

değiştiği belirlenmiştir. İncelenen yapı malzemelerinin zayıflama katsayılarının normal betonlara kıyasla daha düşük olduğu, dolayısıyla gama ışınlarına karşı daha sınırlı bir soğurma kapasitesine sahip oldukları tespit edilmiştir.

Ana çalışma, yapı malzemeleri üzerine odaklanmakla birlikte, maden alanlarına yakın bölgelerden alınan toprak örneklerinde radon gazı konsantrasyonu ölçümleri yapılmış, bunun yanı sıra Gebze merkezi ve çevresindeki köylerden alınan su örneklerinde de radon gazının konsantrasyonu incelenmiştir. Bu ölçümler, bölgedeki doğal radyasyon yükünün genel değerlendirmesine katkı sağlamıştır.

Çalışmada yapı malzemesi, toprak ve su numuneleri için ulaşılan bulgular literatürdeki benzer sonuçlarla ve dünya ortalama değerleri ile karşılaştırılmış olup çalışmada incelenen tüm örneklerin insan sağlığı açısından radyolojik tehlike oluşturmayacağı görölmüştür.



DETERMINATION OF NATURAL RADIOACTIVITY LEVELS IN SOME CONSTRUCTION MATERIALS USED IN THE GEBZE REGION, SEM/EDS ANALYSES, AND MEASUREMENT OF RADON GAS IN SOIL AND WATER

SUMMARY

The fact that individuals spend a significant portion of their daily lives indoors highlights the impact of radiation energy emitted from building materials on public health. Natural radioactivity is directly associated with the presence of uranium, thorium, potassium, and their decay products within the composition of materials commonly used in the construction sector. Uranium and thorium contained in these materials, through their decay processes, generate radioactive gases that carry a potential risk of accumulation in indoor environments. Prolonged exposure to such radioactive substances may leave detrimental effects on human health over time.

The primary objective of this study is to conduct a comprehensive analysis of methods for determining the levels of natural radioactivity in construction materials, and to assess the potential health impacts associated with this exposure. Recognizing the significance of natural radionuclides in contributing to indoor radiation levels, this research aims to provide a multidimensional evaluation of both material properties and their implications for human health.

Within the scope of the study, the geological and industrial characteristics of the Kocaeli-Gebze region (including central Gebze, Köseler Village, Tavşanlı Village, Pelitli Village, Çayırova, Dilovası, and Hereke) were taken into account. Various building material samples collected from these areas were analyzed for natural radionuclide concentrations, specifically focusing on potassium-40 (^{40}K), thorium-232 (^{232}Th), and uranium-238 (^{238}U). These concentrations were determined using a 3×3 inch NaI(Tl) scintillation detector coupled with a gamma spectrometry system.

In total, 32 samples were obtained from 9 different locations within the Gebze district, comprising 17 distinct types of construction materials, such as bricks, fire bricks, insulation bricks, roof tiles, calcite, plaster (satin and gypsum board types), ceramics, dolomite, granite, cement, limestone, plaster coating, autoclaved aerated concrete (gas concrete), marble, travertine, and tile joint materials. The activity concentrations were measured at characteristic gamma energies of 1460 keV for ^{40}K , 2610 keV for ^{232}Th (via ^{208}Tl decay), and 1760 keV for ^{238}U (via ^{214}Bi decay), using laboratory facilities at Sakarya University.

The measured activity concentrations in the building materials were found to vary within the ranges of 32–199 Bq/kg for ^{40}K , 10.6–39 Bq/kg for ^{238}U , and 9.8–152.3 Bq/kg for ^{232}Th . Furthermore, in order to evaluate the implications of these radioactivity levels on public health, several radiological hazard indices were calculated, including the absorbed dose rate indoors (D_{in}) and outdoors (D_{out}), the annual effective dose equivalent (AED), the radium equivalent activity (Ra_{eq}), the gamma activity index (I_{γ}), the alpha activity index (I_{α}), and the internal and external hazard indices (H_{in} and H_{ex}).

Furthermore, in order to determine the surface morphology and elemental composition of certain building materials, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) analyses were conducted. Through SEM

imaging, the pore structures, surface roughness, and microstructural characteristics of the materials were examined, whereas the EDS technique was employed to identify their elemental compositions. The results enabled a comprehensive evaluation of the mineral phases and structural properties associated with radioactive constituents within the materials.

In addition to the determination of natural radioactivity levels, the radiation attenuation properties of selected building materials — including granite, marble, autoclaved aerated concrete, ceramic, fire brick, regular brick, insulation brick, and roof tile — were also assessed. Measurements were conducted using gamma rays of energies 1173 keV and 1332 keV, and the total linear attenuation coefficients (μ , cm^{-1}) were calculated. The attenuation coefficients were found to range from 0.08 to 0.135 cm^{-1} for 1173 keV and from 0.013 to 0.156 cm^{-1} for 1332 keV gamma energies. Compared to standard concrete, the building materials examined in this study demonstrated lower attenuation capabilities, indicating a relatively limited ability to absorb gamma radiation.

Understanding the natural radioactivity levels of construction materials is of critical importance, as these materials constitute the primary sources of indoor exposure to gamma radiation. The accumulation of radioactive gases, particularly radon, within enclosed environments elevates the background radiation dose received by occupants, thereby emphasizing the necessity for comprehensive assessments of construction-related radiological parameters.

Moreover, the evaluation of radiological indices provides essential insights into the potential risks posed by building materials. The radium equivalent activity (Ra_{eq}) serves as a consolidated parameter representing the combined activities of ^{40}K , ^{238}U , and ^{232}Th , and facilitates a direct comparison with internationally recommended safety thresholds. Similarly, the internal (H_{in}) and external (H_{ex}) hazard indices offer a quantitative measure of the possible radiological hazards associated with prolonged exposure to materials containing natural radionuclides.

The gamma activity index (I_γ) and alpha index (I_α) further contribute to the radiological risk assessment by specifically addressing the contributions of high-energy gamma emitters and alpha particle-emitting isotopes, respectively. In accordance with UNSCEAR (2000) and European Commission guidelines, all calculated indices for the analyzed samples in this study remained well within the permissible limits, corroborating the finding that the investigated building materials, soil, and water samples pose no significant radiological threat under typical usage scenarios.

Although the primary focus of the research centered on building materials, complementary measurements were conducted on soil and water samples. Soil samples collected from areas in close proximity to mining activities were analyzed for radon gas concentrations, while water samples gathered from central Gebze and surrounding villages were similarly evaluated for radon levels. These additional assessments provided a broader understanding of the natural radiation burden within the region.

In conclusion, this research highlights the importance of systematic radiological evaluations for construction materials, particularly in regions with diverse geological and industrial characteristics such as Gebze. The findings contribute to a growing body of knowledge that supports the safe use of building materials in residential and commercial infrastructure, while simultaneously addressing public health concerns

related to natural radiation exposure. Furthermore, the inclusion of soil and water analyses enriches the regional radiation profile, providing a more holistic understanding of environmental radioactivity levels in the study area.





1. GİRİŞ

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, Kocaeli ilinin Gebze ilçesi ve çevresinden temin edilen yapı malzemesi örnekleri başta olmak üzere, su ve toprak örneklerinde doğal radyonüklid (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi ve radyolojik risk parametrelerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Ayrıca, su ve toprak örneklerinde radon gazı konsantrasyonu ölçümleri gerçekleştirilmiş, böylece farklı çevresel unsurların oluşturabileceği radyolojik risk düzeyleri çok yönlü bir şekilde değerlendirilmiştir. Radon gazı, doğal radyoaktif bir element olarak çevresel riskler bakımından büyük önem taşımakta olup, yapı malzemeleri ile jeolojik yapılar bu riski doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, çalışmanın temel hedefi, yapı malzemeleri merkezli olmak üzere, bölgedeki yapı hammaddeleri, toprak ve su örneklerinde doğal radyoaktivite ve radon gazı salınımlarının belirlenmesidir.

Tez çalışması kapsamında, Gebze bölgesinin jeolojik ve sanayi yapısı göz önünde bulundurularak, yapı malzemeleri, maden sahalarından elde edilen toprak örnekleri ve su örneklerinden doğal radyoaktivite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, yapı malzemelerindeki radyonüklid aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi ve radyasyon soğurma analizlerinde Sodyum İyodür (NaI(Tl)) dedektörü; su örneklerinde radon gazı için RAD7 dedektörü, toprak örneklerinde ise LR-115 katı hal iz dedektörü kullanılmıştır. Tüm deneysel çalışmalar, Sakarya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

Elde edilen veriler, hem yapı malzemeleri kullanımının hem de çevresel kaynakların radyolojik risk potansiyelini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir veri seti oluşturmuştur.

Çalışmanın kapsamını genişletmek amacıyla, yapı malzemelerine ait mikro yapıların morfolojik özelliklerini ve elementel bileşenlerini incelemek üzere Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri de yapılmıştır. Bu analizler sayesinde malzemelerin iç yapısal özellikleri ile radyoaktivite

düzeyleri arasındaki olası ilişkiler irdelenmiş, elde edilen bulgular literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır.

Elde edilen radyonüklid konsantrasyonları ve radon ölçümleri, çevresel etkileri ve halk sağlığı üzerindeki muhtemel riskleri değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle su kaynaklarında doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi, bölgedeki içme suyu güvenliği açısından önemli bir gösterge niteliğindedir. Yapı malzemeleri üzerine yapılan radyasyon geçirgenliği çalışmaları ise, malzeme seçiminde sağlık odaklı yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması ile Gebze ilçesi ve çevresindeki yapı malzemeleri, toprak ve su kaynakları üzerinden yürütülen doğal radyoaktivite ve radyolojik risk analizleri aracılığıyla bölgenin mevcut çevresel radyasyon profiline ışık tutulması amaçlanmaktadır. Elde edilen verilerin, halk sağlığının korunmasına yönelik bilinçlendirme faaliyetlerine ve çevresel risklerin azaltılmasına yönelik çözüm önerilerinin geliştirilmesine katkı sağlaması öngörülmektedir.

1.2. Çalışma Alanının Coğrafi ve Endüstriyel Özellikleri

Gebze ; Marmara Bölgesi'nin kuzey doğusunda yer alan Kocaeli iline bağlı bir ilçedir. İstanbul Boğazı'nın güneydoğusunda, İzmit Körfezi'nin kuzeydoğusunda bulunmaktadır. Kuzeyde Körfez ilçesi, doğuda Şile ilçesi, güneyde Darıca ve Çayırova ilçeleri, batıda ise Dilovası ilçesi ile komşudur. Coğrafi konumu itibariyle, Gebze'nin kıyıları dağlık ve ormanlık alanlarla kaplı olup, iç kesimlerde tarıma elverişli düzlükler bulunmaktadır. Ayrıca, Gebze ilçesi, Anadolu'nun batısı ile doğusu arasında bir geçiş noktasında yer alması sebebiyle tarihi ticaret yollarının kesişim noktasında bulunmaktadır.

Gebze bölgesi, Marmara Denizi'nin kuzey doğusunda yer aldığından dolayı deprem fay hatları açısından oldukça önemli bir konumdadır. Bölgede Kuzey Anadolu Fay Hattı ve Doğu Marmara Fay Hattı gibi önemli fay hatları bulunmaktadır. Gebze bölgesinin toprak yapısı, çeşitli jeolojik süreçlerin etkisi altında gelişmiştir. Bu bölgenin toprak özelliklerini belirleyen unsurlardan biri coğrafi konumudur. Gebze, Marmara Bölgesi'nin doğusunda yer almakta olup, aynı zamanda Karadeniz ve Akdeniz iklimleri arasında geçiş bölgesindedir. Bu nedenle bölgenin toprak yapısı, iklim etkileriyle birlikte farklılık göstermektedir.

Gebze'de sanayileşmenin özellikle 1980'li yıllardan itibaren hız kazanmasıyla birçok sanayi tesisi Gebze ve çevresine taşınmıştır. 1990 yılında ilk organize sanayi bölgesinin (OSB) faaliyete geçmesiyle birlikte Gebze bir sanayi şehrine dönüşmüştür. Bu süreçte, arazi kullanımında önemli değişiklikler yaşanmış; tarım ve orman alanları sanayi ve yerleşim alanlarına dönüşmüştür (Döker ve Aydoğdu, 2019).

Gebze Organize Sanayi Bölgesi (GOSB), ilçenin sanayi kimliğinin oluşmasında kilit rol oynamıştır. OSB'nin faaliyete geçmesiyle birlikte, bölgedeki sanayi tesislerinin sayısı artmış ve bu durum çevresel etkileri de beraberinde getirmiştir. Sanayileşmenin yoğunlaşması, çevre kirliliği ve plansız kentleşme gibi sorunları gündeme getirmiştir. Bu nedenle, Gebze'nin sürdürülebilir kalkınması için çevresel etkilerin minimum seviyeye indirilmesi ve planlı kentleşme politikalarının uygulanması önem arz etmektedir (Döker ve Aydoğdu, 2017).

1.3. Radyoaktif Maddelerin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Radyoaktif maddelerden yayılan iyonize radyasyon, insan sağlığı üzerinde önemli etkiler yaratabilmektedir. Radyasyonun zararlı etkileri maruz kalınan doza ve süreye değişkenlik göstermektedir (Güdük vd., 2018). Radyasyona maruz kalmak, radyasyon yanıkları, kanser, kardiyovasküler hastalıklar ve genetik mutasyonlar gibi sağlık sorunlarına yol açabilir (Daşdağ, 2010; Gökoğlan vd., 2020; Luan vd., 2006).

Radyoaktif maddelerin insan vücuduna giriş yolu genellikle solunum, sindirim veya deri teması yoluyla gerçekleşir (Kapdan, 2009). Bu durum, iç radyasyon olarak adlandırılan bir etkiye neden olur ve radyasyonun organlara doğrudan zarar vermesine yol açabilir. Özellikle, Çernobil ve Fukushima gibi nükleer kazalar sonrasında bu etkiler yoğun olarak gözlemlenmiştir (Gachályi ve Gyulai, 2014).

Radyasyon, yalnızca olumsuz etkiler yaratmakla kalmaz; aynı zamanda tıbbi alanda da kullanılabilir. Radyoterapi gibi yöntemler, kansere karşı mücadelede etkin birer araçtır. Ancak, bu tür tedavilerin yan etkileri dikkatle yönetilmeli ve takip edilmelidir (Parlak vd., 2020). Bununla birlikte, doğal seviyelerdeki radyoaktif izotopların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin genellikle düşük olduğu belirtilmektedir (Kritzberger ve Navarrete, 2017).

1.4. Konunun Önemi ve Literatür Özeti

Radon gazı, yapı malzemeleri, toprak ve su örneklerinden kaynaklanabilen doğal bir radyoaktif gaz olarak çevresel sağlık riskleri açısından büyük bir öneme sahiptir. Yapı malzemelerinde radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi ve maden alanlarından alınan toprak örneklerinde radon ölçümü, bu bölgelerde yaşayan bireylerin sağlık risklerinin değerlendirilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır (Özcan, 2022). Türkiye'de gerçekleştirilen çalışmalar, radon gazının farklı yapı malzemeleri üzerindeki etkisini ve bu malzemelerin iç mekanlarda radon konsantrasyonuna olan etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle jeolojik yapının radon salınımı üzerindeki etkilerini değerlendiren bu ölçümler, radyoaktif gazların potansiyel tehditlerini azaltmaya yönelik düzenlemelerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Kürkçüoğlu vd., 2024; Ozan ve Ekinci, 2011; Özcan, 2022).

Maden bölgelerinde yapılan radon ölçümleri, bu bölgelerde çalışan işçiler kadar, bu madenlerin ürünlerinin kullanıldığı binalarda yaşayan bireyler için de önem taşımaktadır (Kürkçüoğlu vd., 2019). Yapılan çalışmalar, radon gazının yer altı madenlerinden atmosfere salınımı ve bina temellerinde birikimi nedeniyle insan sağlığını tehdit edebileceğini göstermektedir (Thabayneh, 2018). Türkiye'de yapılan bölgesel araştırmalar, bu tür tehlikelerin özellikle yoğun nüfuslu yerleşim alanlarında daha dikkatli bir şekilde ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Gebze gibi yoğun sanayi faaliyetlerinin olduğu bölgelerde radyoaktivite ölçümlerine dayalı risk değerlendirmeleri, halk sağlığını koruma ve güvenli yaşam alanları oluşturma açısından önem arz ettiği düşünülmektedir. Konuya ilişkin gerçekleştirilen ulusal ve uluslararası çalışmaların özetleri şu şekildedir:

Özer (2009), Bursa ilinin Keleş ve Orhaneli ilçelerinden topladığı doğal kaynak sularında RAD-7 cihazı ile radon ölçümleri gerçekleştirmiştir. Konsantrasyonlar $0,704 \text{ BqL}^{-1}$ ile $87,48 \text{ BqL}^{-1}$ arasında ölçülmüş, ortalama değer $35,05 \text{ BqL}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

Damla (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'de yaygın olarak yapı malzemesi olarak kullanılan gazlı beton, çimento, kum, tuğla, kiremit, mermer, kireç ve alçı örneklerinde doğal radyonüklidlerin (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları ve bu malzemelere ait kütle zayıflatma katsayıları deneysel olarak incelenmiştir. NaI(Tl) gama spektrometresi ile gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, bu yapı malzemelerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için elde edilen aktivite seviyeleri sırasıyla

gazlı betonda 82, 28 ve 384 Bq/kg, çimentoda 52, 40 ve 324 Bq/kg, kumda 44, 26 ve 441 Bq/kg, tuğlada 34, 34 ve 462 Bq/kg, mermerde 23, 15 ve 149 Bq/kg, kireçte 38, 20 ve 56 Bq/kg, alçıda ise 17, 13 ve 70 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, uluslararası raporlardaki sınır değerlerle karşılaştırılmış ve örneklerin gama (I_γ) ve alfa (I_α) indisleri, radyum eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}), absorpsiyon doz oranı (D) ve yıllık etkin doz eşdeğeri (YED) gibi radyolojik parametreleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, söz konusu yapı malzemelerinin kütle zayıflatma katsayıları hem deneysel olarak belirlenmiş hem de teorik XCOM verileriyle karşılaştırılmıştır.

Akkurt, Akyıldırım, Mavi, Kılınçarslan ve Başyigit (2010) tarafından yürütülen çalışmada, farklı oranlarda zeolit içeren beton örneklerinin gama radyasyonuna karşı zayıflatma özellikleri hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada, %0, %10, %30 ve %50 zeolit katkısı içeren beton numuneleri hazırlanarak, ^{137}Cs (662 keV) ve ^{60}Co (1173 ve 1332 keV) gama kaynaklarıyla zayıflatma katsayıları ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, zeolit oranının artmasıyla birlikte betonun yoğunluğunun azaldığını ve buna bağlı olarak radyasyon zayıflatma kapasitesinin düştüğünü ortaya koymuştur. Bu durumun, zeolitın gözenekli yapısı nedeniyle betondaki yoğunluğu azaltmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, XCOM programı aracılığıyla elde edilen teorik verilerle karşılaştırılmış ve genel olarak tutarlı bir uyum tespit edilmiştir. Sonuç olarak, beton içerisinde zeolit kullanımının radyasyondan korunma açısından istenilen düzeyde etkinlik sağlamadığı, dolayısıyla zırlama amacıyla tercih edilmemesi gerektiği belirtilmiştir.

Günoğlu (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden temin edilen doğal taş örneklerinin radyolojik özellikleri detaylı biçimde incelenmiştir. NaI(Tl) gama spektrometresi kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda, ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{232}Th izotoplarına ait aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla 99.670–1.305.567 Bq/kg, 12.006–155.649 Bq/kg ve 6.088–171.126 Bq/kg aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, söz konusu doğal taşların radyasyon zayıflatma kapasiteleri de 662, 1173 ve 1332 keV enerjili gama ışınları için belirlenmiş; toplam zayıflatma katsayıları sırasıyla 0,188–0,268 cm^{-1} , 0,156–0,234 cm^{-1} ve 0,117–0,175 cm^{-1} aralığında hesaplanmıştır. Bu veriler, mevcut literatürde yer alan mermer katkılı beton numunelerle karşılaştırıldığında, bazı doğal taş türlerinin özellikle yüksek enerji seviyelerinde daha etkili bir radyasyon soğurma performansı gösterdiği anlaşılmıştır.

Özellikle magmatik kökenli kayaçların hem aktivite düzeyleri hem de zayıflatma katsayıları bakımından betonlara göre daha yüksek değerlere sahip olması, bu taşların radyasyondan korunma amacıyla yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini gündeme getirmiştir.

Awhida'nın (2017), doktora tezinde yapı malzemelerinden radon salınımını ölçmek için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmasında gamma spektrometri kullanılarak radyoaktif izotopların aktivite konsantrasyonları ölçülmüş ve bu veriler radon ekshalasyon oranlarını hesaplamak için kullanmıştır. Deneylerde yüksek çözünürlük ve hassasiyet sunan yüksek saflıkta germanium dedektörler (HPGe) kullanmıştır. Radon gazının yapı malzemelerinden salınımı, özel olarak tasarlanmış bir akümüasyon odasında değerlendirmiştir. Çalışmadan elde ettiği sonuçlarına göre, test edilen yapı malzemelerindeki radon salınım oranları $0.2 \text{ Bq/m}^2\cdot\text{h}$ ile $1.5 \text{ Bq/m}^2\cdot\text{h}$ arasında değiştiği sonucuna ulaşmıştır. Çalışmada uranyum içeriği yüksek olan malzemelerin daha fazla radon salınımına neden olduğunu göstermiştir. Geliştirdiği yeni yöntemin, doğruluk ve hassasiyet açısından mevcut tekniklere göre daha üstün performans sergilediği ve özellikle radon salınımının düşük olduğu durumlarda kullanılmak üzere tasarlandığı belirtilmiştir.

Masevhe (2017), yüksek lisans tezinde, Güney Afrika'nın Gauteng Eyaleti'ndeki nehirlerde radon konsantrasyonu ölçmüştür. Çalışmada, maden atıkları ve radyoaktif materyallerin bölgedeki su kaynaklarına olası etkilerini değerlendirmeyi amaçlanmıştır. 25 farklı nehir ve dere kolundan alınan toplam 50 su örneği analiz etmiştir. Ticari olarak satılan üç şişelenmiş su örneği de çalışmaya dahil edildiği belirtilmiştir. Radon konsantrasyonları, α -spektrometri tekniği kullanılarak RAD-7 cihazı ile ölçülmüştür. Sonuçlara göre, nehirlerdeki radon konsantrasyonu Kuzey ve Kuzeydoğu bölgelerinde daha yüksek bulunmuştur; örneğin, Moretela Nehri'nde $4.9 \pm 0.3 \text{ Bq/l}$ gibi yüksek bir değer saptanmıştır. Buna karşın, Vaal Nehri'nde radon konsantrasyonu $0.1 \pm 0.1 \text{ Bq/l}$ ile en düşük seviyede kaydedilmiştir. Genel olarak, Gauteng'deki nehir sularında ortalama radon konsantrasyonu $1.4 \pm 0.2 \text{ Bq/l}$ olarak ölçülmüştür ve bu değerler, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen uluslararası standartların altında kalmıştır. Çalışma, Gauteng Eyaleti'nin nehir sularındaki radon konsantrasyonlarının halk sağlığı için bir tehdit oluşturmadığını ortaya koymuştur.

Kuş (2017), Sakarya ilinin tüm ilçelerinden toplanan toprak örnekleri üzerinde gerçekleştirdiği tez çalışmasında, doğal radyoaktivite düzeylerini belirlemek amacıyla NaI(Tl) gama dedektörü ve LR-115 yöntemi ile yalıtılmış kutu tekniğini birlikte kullanmıştır. Araştırma sonucunda, toprak örneklerinde ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{232}Th radyonüklidlerinin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 371,0 Bq/kg, 23,2 Bq/kg ve 21,0 Bq/kg olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerin, uluslararası güvenlik sınırları içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Tabar ve arkadaşları (2018) tarafından yürütülen ve aynı bölgede pasif ölçüm yöntemi olarak LR-115 filmiyle gerçekleştirilen devam niteliğindeki çalışmada ise, efektif ^{226}Ra konsantrasyonu 3,77–26,69 Bq/kg, yüzeysel radon eksalasyon hızı 0,73–5,18 Bq/m²·h ve kütleli eksalasyon hızı 35,76–253,15 mBq/kg·h aralıklarında ölçülmüştür.

Sağlam (2019), Sakarya ilinin Geyve, Örencik ve Doğançay bölgesinden alınan toprak numuneleri üzerinde kapalı kutu tekniği ile ölçümler yapmıştır. Ölçümlerin neticesinde ortalama radon konsantrasyon değerlerini sırasıyla 463,4 Bqm-3 , 587,11 Bqm-3 , 447,18 Bqm-3 olarak tespit edilmiştir.

Küçükkılıncı (2019) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezinde, Samsun ilinden temin edilen taş yünü, bims, granit, saf beton, mermer ve ytong gibi altı farklı yapı malzemesinin gama ışınlarına karşı zayıflatma kapasiteleri hem deneysel hem de teorik yöntemlerle değerlendirilmiştir. Her bir malzeme farklı kalınlıklarda hazırlanarak ^{60}Co ve ^{152}Eu kaynakları ile sekiz farklı enerji seviyesinde ölçümler yapılmış ve sonuçlar XCOM programından elde edilen teorik verilerle karşılaştırılmıştır. Kütle zayıflatma katsayılarının değer aralıkları; taş yünü için 0,18–0,19 cm²/g, granit için 2,6–2,9 cm²/g, mermer için 2,6–2,7 cm²/g, beton için 1,1–1,5 cm²/g, bims için 0,7–0,8 cm²/g ve ytong için 0,3–0,4 cm²/g olarak hesaplanmıştır. En yüksek zayıflatma kapasitesi taş yününde gözlemlenirken, en düşük değer %98 gözenek oranına sahip olması nedeniyle ytong numunelerinde tespit edilmiştir. Ayrıca, numune kalınlığı arttıkça kütle zayıflatma katsayısında artış gözlenmiş ve bu durum teorik olarak Beer–Lambert yasası ile uyumlu bulunmuştur. Çalışma sonuçları, malzeme yoğunluğunun ve bileşiminin zayıflatma kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuş; bu bağlamda taş yününün en iyi gama soğurucu yapı malzemesi olduğu belirlenmiştir.

Kaptan (2020), yüksek lisans tezinde Sakarya iline ait 35 farklı yer altı su kaynağında radon konsantrasyonlarını belirlemek amacıyla RAD-7 dedektörü ve H₂O aksesuarları kullanmıştır. Ölçümler sonucunda radon seviyeleri 0,1 ile 62,4 BqL⁻¹ aralığında değişmiş ve ortalama değer 21,6 BqL⁻¹ olarak saptanmıştır. Ayrıca, bu suların tüketimiyle insan vücuduna alınan radonun sebep olduğu yıllık etkin dozların ortalama düzeyleri; yetişkinler için 38 µSv/yıl, çocuklar için 39 µSv/yıl ve bebekler için 74 µSv/yıl olarak hesaplanmıştır.

Yıldırım (2020), İzmir ili Menderes ilçesindeki iki farklı şantiyede bina materyallerinden kaynaklanan radon gazı aktivite konsantrasyonlarını ve yıllık etkin dozlarını incelemiştir. Çalışmasında LR-115 nükleer iz dedektörleri kullanmış ve dedektörler yerden 25 cm yükseklikte, inşaat işlerine engel olmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Dedektörler, 6 ay boyunca aylık olarak yenilenmiştir. Birinci şantiyede, zemin katta radon konsantrasyonu 1072.95 Bq/m³, en yüksek değer ise birinci katta 1404.47 Bq/m³ olarak ölçülmüştür. İkinci şantiyede, en düşük değer zemin katta 626.89 Bq/m³, en yüksek değer ise dördüncü katta 1362.28 Bq/m³ olarak bulunmuştur. Ortalama radon konsantrasyonları birinci bina için 1173.01 Bq/m³, ikinci bina için 1097.03 Bq/m³'tür. Bu değerler, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından belirlenen sınır değerlerin üzerinde olduğu ifade edilmiştir. İnşaat çalışanları için yıllık etkin doz eşdeğerleri birinci şantiyede en düşük 11.17 mSv/y, en yüksek 14.62 mSv/y, ortalama 12.21 mSv/y; ikinci şantiyede ise en düşük 6.52 mSv/y, en yüksek 12.98 mSv/y, ortalama 11.42 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Bu dozlar, Uluslararası Radyasyon Koruma Komisyonu (ICRP, 2007) tarafından belirlenen 20 mSv/y sınır değerinin altında kalmıştır.

Yazzie vd. (2020), Navajo Ulusu'ndaki farklı ev tiplerinde ve çevresel koşullarda iç mekan radon seviyelerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, kısa süreli radon test kitleri ve ev yapısal özellikleri ile ilgili anketler kullanılmışlardır. Ölçümler, 51 evde yapılmış ve ortalama radon konsantrasyonu 60.5 Bq/m³ olarak bulunmuştur. Ev tipine göre radon seviyeleri değişim gösterdiği belirlenmiştir. Akıllı/mobil evlerde 29.0 Bq/m³, ahşap evlerde 58.6 Bq/m³, beton ve ahşap karışım evlerde 82.6 Bq/m³ ve betonarme yapılarda 105.7 Bq/m³ radon konsantrasyonu tespit edilmiştir. Evlerin yapısal özellikleri, zemin ile doğrudan temas ve havalandırma koşulları gibi faktörler radon konsantrasyonu üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kış aylarında azalan havalandırma oranlarının radon seviyelerini artırdığı görülmüştür.

Wang vd. (2021), yapı malzemelerindeki kaplama katmanlarının radon salınımı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışmalarında, beton bloklar üzerine uygulanan sıva ve akrilik kaplamaların farklı kalınlıkları incelemişlerdir. Kaplama kalınlığı 15 mm'den 35 mm'ye çıktığında radon konsantrasyonunun 234.9 Bq/m³'ten 201.1 Bq/m³'e düştüğü ve etkili doz oranının yıllık 0.61 mSv azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma, kaplama katmanlarının radon salınımını azaltmada etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Altamemi (2021), Kastamonu il merkezinde sıklıkla tüketilen sebze ve meyvelerde bulunan ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K radyonüklitlerinin aktivite konsantrasyonlarını gama-ışını spektrometrik yöntem kullanarak analiz etmiştir. Ölçümleri için yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü kullanmıştır. Sebze örneklerinde ²²⁶Ra aktivite konsantrasyonu 0.8–32.8 Bq/kg, ²³²Th aktivite konsantrasyonu 0.7–41.3 Bq/kg ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonu 391.8–4679 Bq/kg olarak ölçülmüştür. Meyve örneklerinde ise ²²⁶Ra 1.3–12.6 Bq/kg, ²³²Th 1.4–15.0 Bq/kg ve ⁴⁰K 133–777 Bq/kg aralığında bulunmuştur. Sarımsakta en yüksek ²²⁶Ra ve ²³²Th konsantrasyonları ölçülürken, en yüksek ⁴⁰K konsantrasyonu ıspanakta bulunmuştur. Sebze ve meyve tüketimine bağlı olarak yetişkin bireylerin alabileceği yıllık etkin doz 201 µSv olarak hesaplanmış ve yaşam boyu kanser riski 8.9×10^{-5} olarak bulunmuştur. ⁴⁰K, yıllık etkin dozun %70'ine katkıda bulunmuştur.

Shahrokhi ve Kovacs (2021), çalışmalarında Avrupa Birliği Temel Güvenlik Standartları'na (EU-BSS) uygun olarak yeraltı madenlerinde radon giriş yollarını araştırmış ve optimize edilmiş bir azaltma sistemi geliştirmişlerdir. Çalışma, Macaristan'daki Úrkút manganez madeninde gerçekleştirilmiş ve radon seviyelerinin maden duvarlarındaki farklı kayaç türlerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Özellikle, siyah şist tabakalarında Ra-226 konsantrasyonlarının 12–16 Bq/kg ve radon salınım oranlarının 1.2–1.6 mBq/m²/s olduğu belirlenmiştir. CR-39 dedektörleri ve gamma spektrometrisi kullanılarak radon ölçümleri yapılmış ve madencilik sırasında kırılan duvarlar yakınındaki radon konsantrasyonlarının ortalama 5900 ± 420 Bq/m³'ye ulaştığı saptanmıştır. Optimize edilen mobil havalandırma sistemi kullanılarak bu değer 250 ± 41 Bq/m³'ye düşürülmüştür. Çalışma sonucunda, radon giriş yollarının esas olarak yeni kırılan kayaçlardan kaynaklandığı, yaşlı duvarların radon birikiminde birincil kaynak olmadığı belirlenmiştir.

Jasaitis ve Pečiulienė (2021), çalışmalarında Litvanya'daki yer altı otoparklarında kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktivite ve radon salınımını incelemişlerdir. Çalışmada, ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K gibi doğal radyoizotopların aktivite konsantrasyonlarını gama spektrometrisi ile ölçülmüştür. Sonuçlar, ferrobeton örneklerinde ^{226}Ra konsantrasyonunun 90 Bq/kg, ^{232}Th konsantrasyonunun 34 Bq/kg ve ^{40}K konsantrasyonunun 603 Bq/kg olarak en yüksek seviyelerde olduğunu göstermiştir. Radon yüzey salınım oranı ferrobeton için 26.2 mBq/m²/h, kum için ise 10.2 mBq/m²/h olarak bulunmuştur. Ayrıca, yıllık etkili doz oranı 1.0 mSv/y sınırının altında kalmıştır.

McGrath vd., (2021), çalışmalarında enerji tasarrufu sağlamak amacıyla yapılan bina yenileme işlemlerinin iç mekan radon konsantrasyonlarına etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, radon giriş oranlarının modellendiği bir çerçeve kullanılmıştır. Simülasyonlarda, CONTAM (hava akışı ve basınç farklarını hesaplama), EnergyPlus (termal profilleri analiz etme) ve IAPPEM (radon giriş oranını hesaplama) modelleri birleştirilmiştir. Yapılan 3.780 simülasyonun sonuçları, bina hava geçirgenliğinin radon konsantrasyonu üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Hava geçirgenliğinde %107'ye varan artışlarla iç mekan radon seviyelerinde ciddi yükselmeler tespit edilmiştir. Örneğin, hava geçirgenliği 5 m³/h/m²'den 15 m³/h/m²'ye çıkarıldığında radon seviyelerinde ortalama %42 artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, termal yalıtım sırasında iç mekan sıcaklıklarının artması radon seviyelerinde %7'lik bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

Miklyaev vd., (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada Kuzey Kafkasya'da Beshtau magmatik masifinin batı yamacında bir fay hattında radon salınım oranlarını ve toprak gazındaki konsantrasyonları uzun dönemli ölçümlerle incelemişlerdir. Yaz aylarında radon salınım oranı 23.8 Bq/m²/s, toprak gazındaki radon konsantrasyonu ise 166 kBq/m³ olarak ölçülmüştür. Kış aylarında bu değerler sırasıyla 0.025 Bq/m²/s ve <3 kBq/m³'e kadar düşmüştür. Yeraltı sularındaki radon konsantrasyonları yıl boyunca 100–210 Bq/L arasında değişim göstermiştir ve mevsimsel dalgalanma gözlemlenmemiştir. Çalışma, radon salınımındaki mevsimsel değişimlerin hava ve kayaç kütlesi arasındaki sıcaklık farklarından kaynaklandığını ve bunun fay zonlarında atmosferik hava dolaşımını tetiklediğini göstermiştir.

Tene vd., (2021) Ekvador'un Highland bölgesinde kullanılan yapı malzemelerindeki radon salınımını değerlendirmişlerdir. Araştırmada, beton bloklar, kil tuğlalar, granit

ve beton örnekleri gibi 40 farklı yapı malzemesi incelenmiştir. Ölçümler, kapalı oda yöntemi ve RAD7 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Granit örneklerinde radon yüzey salınım oranı maksimum 7.83 Bq/m²/h olarak ölçülürken, kil tuğlalarda tespit edilebilir radon salınımı bulunmamıştır (<0.05 Bq/m²/h). Çalışmada, MIDUVI sosyal konutlarda yıllık etkili doz oranının 0.019 ila 0.112 mSv/y arasında değiştiği hesaplanmıştır. Özellikle granit kullanımının kapalı mekanlardaki radon maruziyetini artırdığı tespit edilmiştir.

Yarmoshenko vd., (2021) yüksek katlı binalarda iç mekan radon konsantrasyonlarının zamansal değişimlerini analiz etmiş ve bu değişimleri etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Çalışma, 12 yüksek enerji verimliliğine sahip konut odası ve iki ofis odasında gerçekleştirilmiştir. Radon ölçümleri, AlphaGUARD PQ2000 PRO cihazlarıyla yapılmış ve cihazlar 60 dakikalık bir yayılma modu ile 1 ila 6 ay arasında ölçüm yapmışlardır. Veriler, Ekaterinburg şehrindeki meteorolojik merkezlerden alınan dış ortam sıcaklıkları ile birlikte değerlendirilmiştir. Bulgular, iç mekan radon konsantrasyonlarının mevsimsel olarak soğuk dönemlerde arttığını, sıcak dönemlerde ise azaldığını göstermiştir. Bunun temel nedeninin, soğuk havalarda doğal havalandırmanın sınırlanması ve sıcak havalarda kullanıcıların daha fazla mekanik havalandırma yapması olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, özellikle düşük insan etkinliği olan odalarda, radon konsantrasyonunun iç ve dış hava sıcaklıkları arasındaki fark ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Düşük havalandırma koşullarında radon birikiminin ana kaynağının yapı malzemelerinden radon difüzyonu olduğu saptanmıştır. Örneğin, yüksek radyoaktif içeriğe sahip betonarme yapılarda ²²⁶Ra konsantrasyonu 105 Bq/kg'a kadar çıkmıştır. Sonuç olarak, yüksek katlı binalarda radon konsantrasyonlarını kontrol altına almak için havalandırma sistemlerinin optimize edilmesi gerektiği vurgulanmış ve yapısal özelliklerin radon girişine olan etkisi detaylandırılmıştır.

Küçükönder ve Gümbür (2022), Kahramanmaraş ilindeki içme sularında radon gazı konsantrasyonlarını analiz etmiştir. Radon konsantrasyonları, doğal kaynak sularında 174.7–211.7 Bq/m³, depo sularında 80.6–303.0 Bq/m³ ve musluk sularında 99.3–305.8 Bq/m³ arasında değişmiştir. Bu değerlerin uluslararası güvenli sınırların altında olduğu ve bölgedeki içme suyunun halk sağlığı açısından güvenli olduğu belirtilmiştir.

Oyero (2022), çalışmasında Kwara Eyaleti'ndeki seçili bölgelerde jeojenik radon ve radyonüklid konsantrasyonlarının radyolojik etkilerini incelemiştir. Çalışmada, RAD7

cihazı ile toprak ve su örneklerinden radon ölçümleri yapılmıştır. Gamma spektrometresi ve HPGe dedektörü kullanılarak radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları analiz edilmiştir. Elde edilen veriler Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Birleşmiş Milletler Radyasyondan Korunma Komitesi (UNSCEAR) standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Bulgular, bazı bölgelerde radon seviyelerinin uluslararası sınırların üzerinde olduğunu ve radyolojik risk oluşturduğunu göstermiştir. Özellikle radonun ev içi hava kalitesine olumsuz etkileri vurgulanmış ve bu bölgelerde düzenli izleme yapılması önerilmiştir.

Wysocka vd. (2022), Polonya'daki Yukarı Silezya Kömür Havzası'ndaki maden kapanışlarının radon konsantrasyonlarına etkisini incelemişlerdir. Araştırmalarında, 1990'lar ile 2020-2021 yılları arasındaki radon seviyelerini karşılaştırmışlardır. Ölçümler, bodrum katlarında radon seviyelerinin 1990'da 260 Bq/m³ iken 2020'de 644 Bq/m³ ve 2021'de 1041 Bq/m³'e yükseldiğini göstermiştir. Bu artış, maden kapatmaları sırasında yer altındaki kaya yapısındaki değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Araştırma, radonun zemin katlarındaki ortalama konsantrasyonunun 47 Bq/m³, bodrum katlarında ise 64 Bq/m³ olduğunu, ancak bu değerlerin maden alanına yakın bölgelerde önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, maden kapatmalarının yerel jeolojik yapı üzerindeki etkileri nedeniyle radon seviyelerini artırabileceğini ve halk sağlığı için risk oluşturabileceğini göstermektedir.

Alemy (2023), Bursa iline bağlı Orhaneli ve Keles ilçelerinden daha önce temin edilen toprak numuneleri üzerinde gerçekleştirdiği tez çalışmasında, doğal radyoaktivite düzeylerini belirlemek amacıyla NaI(Tl) gama spektrometresi yöntemini kullanmıştır. Çalışma kapsamında, ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K doğal radyonüklidlerinin ortalama aktivite konsantrasyonları incelenmiştir. Orhaneli bölgesine ait örneklerde sırasıyla 37,35 Bq/kg, 9,19 Bq/kg ve 119,76 Bq/kg olarak belirlenen ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K aktiviteleri, Keles bölgesinde ise aynı sıralamayla 46,02 Bq/kg, 13,72 Bq/kg ve 148,80 Bq/kg olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu değerlerin, ulusal ve uluslararası düzeyde radyasyondan korunmaya yönelik belirlenen limitler içerisinde yer aldığı belirtilmiştir.

Aydın (2023), Türkiye'de ticari olarak satılan 83 farklı marka şişelenmiş kaynak suyundaki radon gazı aktivite konsantrasyonlarını ve bunların radyolojik risklerini değerlendirmiştir. Ölçümler Alpha GUARD PQ 2000PRO radon monitörü ile gerçekleştirilmiştir. Şişelenmiş suların radon aktivite konsantrasyonları 3.2 ± 0.8 mBq/L ile 28.7 ± 2.7 mBq/L arasında değişirken, ortalama değer 14.8 ± 0.6 mBq/L

olarak hesaplanmıştır. Ölçülen değerler, Avrupa Komisyonu (100 Bq/L) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (11.1 Bq/L) sınır değerlerinin oldukça altındadır. Ayrıca, yıllık etkin radyasyon dozu (YERD) ve yaşam boyu kanser riski (YBKR), farklı yaş grupları (bebek, çocuk ve yetişkin) için hesaplanmıştır. YERD değerleri 100 μ Sv bireysel doz limitinin altında bulunmuştur. Sonuçlar, bu suların tüketiminin Türk halkı için önemli bir radyolojik sağlık riski oluşturmadığını göstermektedir.

Başdemir (2023), Türkiye’de tünel kalıp sisteminde yoğun beton kullanılan binalarda yapı malzemelerinden kaynaklanan radon gazı konsantrasyonlarını incelemiştir. Çalışmasında, yapı malzemelerinin radon yayma hızını ve difüzyon sabitlerini ölçmüş; radon konsantrasyonlarını kapalı oda yöntemi kullanarak belirlemiştir. Elde edilen verilere göre, tünel kalıp sistemlerinde kullanılan betonlarda radon yayma hızı 5.2 ± 0.3 mBq/m²/h ile 18.1 ± 0.8 mBq/m²/h arasında değişmiştir. Ayrıca, bina içi radon konsantrasyonu modelleri oluşturulmuş ve bu modellerde radon konsantrasyonlarının, malzeme yoğunluğuna ve yapı türüne bağlı olarak değişim gösterdiği saptanmıştır. Sonuç olarak, Türkiye’de yaygın kullanılan yapı türlerindeki radon konsantrasyonlarının sağlık riskleri açısından uluslararası sınır değerlerin altında olduğu belirlenmiştir.

Chen (2023), uranyum dışı madenlerdeki radon maruziyetini incelemiştir ve Kanada'daki madenlerde işçi maruziyetine yönelik yıllık tahmini dozlar sunmuştur. Çalışma, 474 yeraltı madenindeki radon ölçümlerini değerlendirerek ortalama radon konsantrasyonunun 570 Bq/m³ olduğunu, ancak bu değer 10.000 Bq/m³ üzerine çıkabileceğini göstermiştir. Çalışmasında, işçilerin yıllık etkili radon dozunun 3.8 mSv olduğu ve bu değer havalandırma koşullarına bağlı olarak 0.22 ile 10 mSv arasında değişebileceğini hesaplamıştır. Ayrıca, radon progenlerinin işçiler üzerindeki etkisi incelenmiş ve bazı durumlarda Kanada’nın zorunlu radyasyon izleme eşiğini aşabileceğini belirlemiştir.

Francisca vd., (2023), çalışmalarında Brezilya’daki madencilik alanlarında radon gazına maruziyeti ölçmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada, açık ocak madencilik sahalarındaki radon konsantrasyonlarını ölçülmüş ve laboratuvar testleriyle alan verilerini karşılaştırılmıştır. Sahada yapılan ölçümlerde radon konsantrasyonlarının düşük olduğu ve çalışan sağlığı için düşük risk oluşturduğu belirlenmiştir. Laboratuvar ölçümlerinde ise radon gazının hızla tespit edilebildiği ve daha fazla alanın analiz edilmesine olanak sağladığı gösterilmiştir.

Huang vd. (2023), araştırmalarında kömür madenciliği sırasında kireçtaşı tabanında radon ve radyum aktivitelerini analiz etmiş ve su kaynaklarının karışım mekanizmalarını modellemişlerdir. Jiaozuo kömür madeni bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada, kapalı ve aktif maden alanlarından 20'den fazla yeraltı suyu örneği toplanmış ve toplam çözünmüş katılar (TDS), pH ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Radyoaktif izotoplardan ^{234}U , ^{226}Ra ve ^{222}Rn aktiviteleri sırasıyla kütle denge modeli ve radon tarihleme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, kapalı madenlerdeki yeraltı suyu yaşlarının aktif madencilere kıyasla daha eski olduğu, karışım oranlarının Permiyen kumtaşı suyundan Ordovisiyen kireçtaşı suyuna doğru değiştiği tespit edilmiştir. ^{226}Ra aktiviteleri, kapalı madenlerde 0.002–0.006 Bq/L arasında düşük bir seviyede iken aktif madencilik bölgelerinde 0.003–0.021 Bq/L arasında daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, kömür madenciliğinin yeraltı suyu çevresine önemli etkiler yaptığını ve su kaynaklarının doğru bir şekilde belirlenmesinin maden güvenliği için önemli olduğunu göstermiştir.

Mao vd., (2023) Pekin'in kırsal bir bölgesinde toprak gazı radon konsantrasyonlarının zamansal değişimlerini incelemişlerdir. Çalışmada, 0.1 m ile 5.0 m arasında değişen on farklı derinlikte radon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için NRS-M-D01 radon-in-soil monitörleri (Sairatec Inc., in) kullanılmıştır. Bu cihazın, alfa spektrometresi ve elektrostatik toplama teknikleri ile radon gazını analiz etmekte, $230 \pm 15 \text{ Bq/m}^3$ seviyesindeki minimum tespit limitiyle 1 saatlik döngülerde veri sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, toprak sıcaklığı, hava sıcaklığı, nem, atmosferik basınç ve yağış durumunu kaydeden sensörler entegre edilmiştir. Bu sensörler arasında MS10 sıcaklık sensörleri (Dalian Endeavour Technology Co., in), SHT31 sıcaklık-nem sensörleri (Sensirion AG, İsviçre) ve BME280 basınç sensörleri (Bosch Sensortec GmbH, Almanya) yer almaktadır. Araştırma sonuçlarına göre, toprak derinliği arttıkça radon konsantrasyonu yükselmiştir; örneğin, 1.6 m derinlikte radon konsantrasyonu kış ve ilkbahar dönemlerinde günlük dalgalanmalar göstermiştir. Bununla birlikte, 4.0 m derinlikte radon konsantrasyonlarının daha düşük ve sabit olduğu gözlenmiştir; bu durum, kil tabakasının gaz hareketini sınırlamasına bağlanmıştır. Genel olarak, en yüksek radon konsantrasyonları $15,000 \text{ Bq/m}^3$ seviyelerine ulaşırken, atmosferik basınç ile radon konsantrasyonu arasında negatif bir ilişki tespit edilmiştir. Bu bulgular, radon konsantrasyonunun deprem ve volkanik olay tahminlerinde potansiyel

bir öncül gaz olarak kullanılabilirliğini değerlendirmek için önem taşıdığı ifade edilmiştir.

Watkins (2023) doktora tez çalışmasında iç mekan radon gazının sağlık ve ekonomik etkilerini incelemiştir. Çalışmada, radon gazının Amerika Birleşik Devletleri'ndeki dağılımını modellemek, uzun dönem iç mekan radon seviyelerini tahmin etmek ve bu seviyelerin sağlık üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kapsamlı bir veri seti kullanmıştır. Araştırmada, radon gazının ana kaynağı olan radyoaktif minerallerin jeolojik dağılımı ve bina özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırmada, EPA'nın 1993 yılında oluşturduğu radon haritasına dayalı olarak, ABD'deki konutların yalnızca %1.62'sinde radon testi yapıldığı belirlenmiştir. Bu test oranının yıllık 21.000 radon kaynaklı akciğer kanseri vakasına neden olduğu hesaplanmıştır. Modelleme çalışmaları için atmosferik bismut-214 izotopları kullanılarak radon seviyeleri tahmin edilmiştir. Sonuçlar, yüksek radon konsantrasyonlarının belirli jeolojik özelliklerle ilişkili olduğunu ve bina temellerinin radon geçişini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Araştırmada elde edilen bulgular, Tennessee'deki Davidson County bölgesindeki konut fiyatlarını analiz etmek için kullanılmış ve radon seviyelerindeki kısa dönem değişimlerin konut fiyatları üzerinde ekonomik etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, radon seviyesi yüksek bölgelerdeki konut fiyatlarının %10'a kadar daha düşük olduğu belirlenmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyoaktivite

Radyoaktivite, atom çekirdeklerinin kararsızlığı sonucu enerji yayarak daha kararlı hale gelme sürecini tanımlamaktadır (L'Annunziata, 2020). Bu süreçte alfa, beta ve gama radyasyonu gibi farklı radyasyon türleri oluşmaktadır. Doğal radyoaktif elementler arasında uranyum, toryum ve potasyum yer almakta ve bu elementler toprak, kayaç ve yer altı sularında doğal olarak bulunmaktadır (Dobrzyńska vd., 2023).

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin enerji yayarak daha kararlı bir hale geçmesi sürecidir. Bu süreç, alfa, beta veya gama radyasyonu şeklinde enerji salınımını içermektedir. Radyoaktivite, doğal olarak meydana gelebileceği gibi insan yapımı radyoaktif maddelerde de görülebilmektedir (Ünal, 2017). Radyoaktivitenin doğal kaynakları arasında uranyum, toryum ve potasyum-40 (^{40}K) gibi elementler bulunmaktadır.

Radyoaktivite ve radyasyonun fiziksel temelleri, çevre bilimi, mühendislik ve sağlık alanlarında temel bir araştırma alanı olarak kabul edilmektedir. Yapı malzemelerinin ve toprak örneklerinin radyoaktif içeriklerinin belirlenmesi, çevresel radyasyon seviyelerinin kontrol altına alınmasına olanak sağlamaktadır (Karmaker vd., 2021). Bu çalışmalar, sağlık risklerini azaltmak ve koruyucu önlemler geliştirmek için önemli bilgiler sunmaktadır.

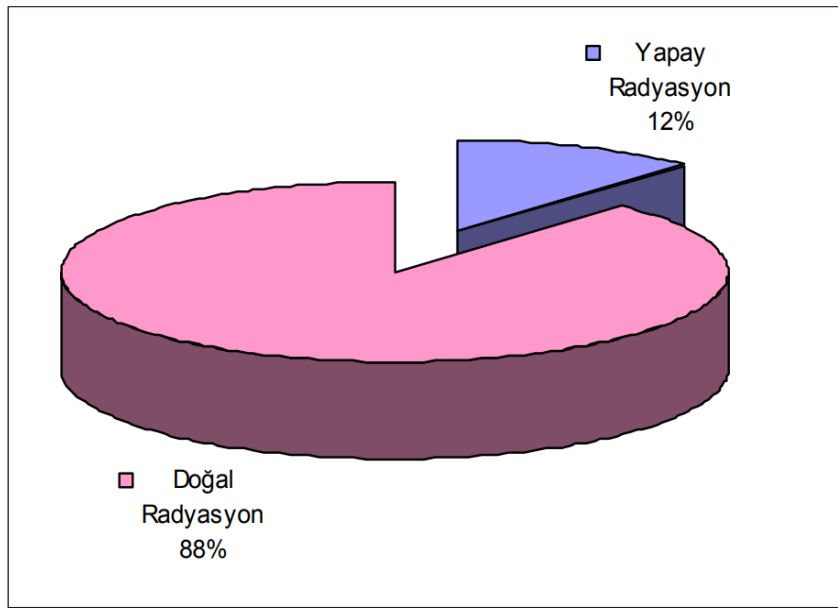
Radyoaktif elementler, çekirdeklerinin kararsızlığı nedeniyle enerji yayarak daha kararlı bir hale dönüşen atomlardan oluşmaktadır. Bu süreç radyoaktif bozunma olarak adlandırılmaktadır ve çevresel radyasyonun ana kaynaklarından biridir. Bu elementlerin temel özelliklerinden biri, doğal çevrede uzun yarılanma ömürlerine sahip olmalarıdır (Awadh, 2020).

Radyoaktif bozunma, nükleer enerji üretiminden medikal görüntüleme tekniklerine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, radyoterapi, gama radyasyonunun kanser tedavisinde etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır (Marakhtanov ve Okunev, 2018).

Bazı radyoaktif zincirlerde, bozunma süreçleri dengesiz bir şekilde ilerleyebilir. Bu durum, radyoaktif elementlerin çevresel dağılımını etkileyebilir ve bu dengenin korunması için kapsamlı analizler yapılmaktadır (Soliyev ve Muzafarov, 2021).

Radyoaktif elementlerin ve bozunma süreçlerinin anlaşılması, çevresel radyasyon seviyelerini kontrol etmek ve sağlık risklerini azaltmak için önem arz etmektedir. Bu araştırmalar, nükleer enerji ve tıbbi teknolojilerde daha güvenli uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (González-Alonso vd., 2018).

Radyoaktivite, iki farklı şekilde, doğal ve yapay süreçlerle meydana gelir. Doğal radyasyon kaynaklarından maruziyet %80 oranında iken insan yapımı radyasyon kaynaklarından maruziyet %20 oranındadır (UNSCEAR, 2008). Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının küresel radyasyon dozuna oransal katkıları Şekil 1.1. de verilmiştir (TAEK).



Şekil 2.1. Küresel radyasyon dozunda doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının katkı payları

2.1.1. Doğal radyasyon kaynakları

Doğal radyasyon, insanoğlunun müdahalesi olmaksızın varlık gösteren ve çevremizde bulunan radyasyon biçimidir. Bu tür radyasyon maruziyetinin başlıca iki kaynağı bulunmaktadır. Birincisi, atmosferde yer alan yüksek enerjili kozmik ışın parçacıklarıdır; ikincisi ise yer kabuğunda mevcut olan radyoaktif atomlardır. Dış uzaydan gelen bu yüksek enerjiye sahip parçacıkların oluşturduğu doğal radyasyon maruziyeti, kozmik radyasyon olarak adlandırılmakta olup, insanların yıllık olarak

maruz kaldığı doz ise 0.39 mSv civarındadır. (UNSCEAR, 2000) Çevremizdeki radyasyon seviyelerini belirlemek için bu iki kaynak ciddi önem sağlamaktadır.

Tablo 2.1. Kozmik Radyasyonun Canlı Üzerine Etkileriyle İlişkili Yıllık Etkin Doz Miktarı (UNSCEAR, 2000; Canbaz, 2007).

Doğal Radyasyon Kaynakları		Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (mSv)	
Kozmik Işınlr	Ortalama	Tipik Aralık	Toplam
İyonizasyon Bileşeni	0,28 (0,3) ¹		
Nötron Bileşeni	0,1(0,08)	0,3-1	
Kozmojenik radyonüklitler	0,1(0,1)		
			0,39

¹ Parantez içindeki değerler daha önceki UNSCEAR tahminleridir.

Jeolojik kökenli doğal radyasyon, yer katmanında ortaya çıkan ve evrenin başlangıcından bu yana primordial radyonüklitlerden oluşmaktadır. Radyolojik riski belirleyici primordial radyonüklitler; ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th ve her iki doğal radyoaktif serinin yıkım ürünleridir. Karasal gama radyasyonuna bina içi ve bina dışı ortamda dışsal maruz kalma sonucu öngörülen yıllık etkin doz değeri 480 µSv’ dır.(UNSCEAR, 2000). İçsel maruziyetin başlıca kaynağı ise radon gazının solunmasıdır.(UNSCEAR, 2000)

Tablo 2.2. Primordial radyonüklitler ve yarı-ömürleri (Değerlier, 2007)

Promordial radyonüklitler			
Nüklid	Sembolü	Yarı Ömrü	Doğal Aktivitesi
URANYUM-238	²³⁸ U	4,51x10 ⁹ y	Doğal Uranyumun tamamı %99,28’i(Sık görülen kaya türleri toplam uranyum 0,5 ile 4,7 ppm)
URANYUM-235	²³⁵ U	7,04x 10 ⁹ y	Doğal uranyumun tamamı %72’si

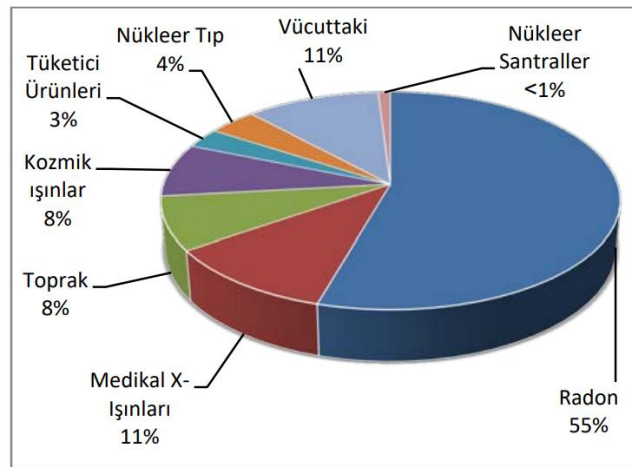
Tablo 2.2. (Devamı) Primordial radyonüklidler ve yarı-ömürleri (Değerler, 2007)

TORYUM-232	^{232}Th	$1,41 \times 10^{10}$ y	Kabuk ortalama sık görülen kaya örnekleri 1,6 ile 20 ppm, ortalama 10,7 ppm
RADON-222	^{222}Rn	3,82 gün	Asal gazlar; US'deki havada yıllık konsantrasyon ortalaması 0,6 Bq/m ³ ile 28 Bq/m ³ aralığında
RADYUM-226	^{226}Ra	$1,60 \times 10^3$ y	Kireçtaşı 16 Bq/kg ve volkanik kayalarda 48 Bq/kg
POTASYUM-40	^{40}K	$1,28 \times 10^9$ y	Toprak için 1-30 pCi/g (0,037-1,1 Bq/g)

Organizma içerisine gıda maddeleri ve havanın solunmasıyla alınan radyoizotoplar ilk olarak ^{40}K sonra ^{226}Ra ve ^{14}C dür. Örnek olarak, 80kg'lık insan bedeninde ortalama 160 gr potasyum(^{40}K) yer alır. Söz konusu potasyumun çoğunluğu kas dokusunda yer almaktadır, %0.018'i 5 radyonüklid ^{40}K 'tır bu nedenle 80kg'lık bir insan bedeninde 0.03 gr. ^{40}K mevcuttur (Bektaşoğlu, 2009)

2.1.2. Yapay radyasyon kaynakları

Doğada mevcut olmayan bazı radyasyon kaynakları yapay yollarla da üretilebilmektedir. Şekil 'de görüldüğü gibi ana kaynağını medikal X- ışınlarının oluşturduğu yapay radyasyon maruziyetinin yıllık etkin doz değeri 0.4 mSv değerindedir (UNSCEAR, 2000).



Şekil 2.2. Radyasyon Kaynakları (USNRC, 1987)

2.2. Yarılanma Ömrü ve Bozunma Türleri

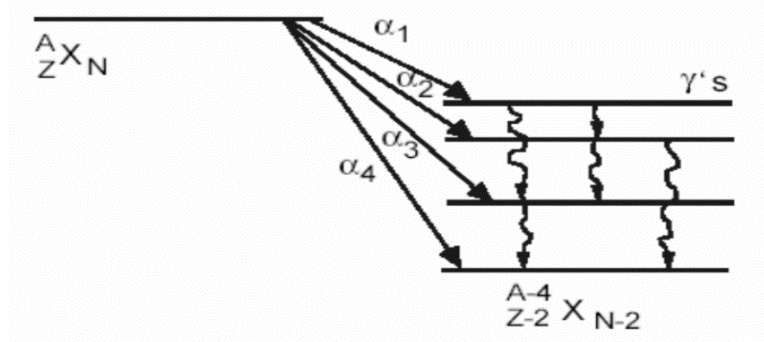
Yarılanma ömrü, bir radyoaktif izotopun başlangıç miktarının yarısına kadar bozunması için geçen süreyi ifade etmektedir. Bu süre her izotop için sabit bir değerdir ve radyoaktif maddelerin özelliklerini anlamada önemlidir (Yushardi vd., 2020). Örneğin, karbon-14'ün yarılanma ömrü yaklaşık 5,730 yıldır ve bu süre, arkeolojik kalıntıların yaşının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Ocak, 2015).

Yarılanma ömrü, radyoaktif maddelerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde önem arz eden bir parametredir. Uzun yarılanma ömürlü izotoplar, çevrede daha uzun süre kalıcı olabilmekte ve çevresel kirlenmeye yol açabilmektedir (Ram vd., 2024; Segovia-Campos vd., 2024).

Radyoaktif bozunma üç ana türde gerçekleşmektedir: alfa, beta ve gama bozunması. Her biri farklı enerji ve özelliklere sahiptir. Bu bozunmalar, hem çevresel radyasyon seviyelerini anlamada hem de nükleer enerji uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır (Chen ve Bernard, 2020).

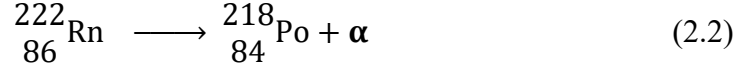
2.2.1. Alfa bozunması

Alfa bozunması, ağır radyoaktif elementlerde sıklıkla görülen bir süreçtir. Bu bozunma sırasında, çekirdekten iki proton ve iki nötron içeren bir alfa parçacığı yayılmaktadır. (Pereira, 2021). Ağır elementler, (Atom numarası 83'ten büyük elementler) kendiliğinden alfa ışıması yaparak kararlı bir çekirdek yapısına ulaşır. Özellikle uranyum-238 (^{238}U) ve toryum-232 (^{232}Th) gibi izotoplarda sıklıkla gözlemlenmektedir. Bu süreçte, çekirdek iki proton ve iki nötron içeren bir alfa parçacığı yayar. Alfa parçacıkları düşük nüfuz etme gücüne sahip olsa da canlı dokulara temas ettiğinde ciddi biyolojik hasarlara yol açabilmektedir (Radchenko vd., 2016).



Şekil 2.3. Alfa bozunumunun şematik gösterimi

α ışımalarının en bilindik örneklerinden, 1602 yıllık yarı-ömre sahip ^{226}Ra 'nın, radyoaktif olan ^{222}Rn 'ye bozunmasıdır ve bu da, 3.82 gün yarı-ömürle ^{218}Po 'ya bozunur: (Denklem 2.1 ve Denklem 2.2.)



Yeni araştırmalar, süper ağır elementlerin alfa bozunma yarılanma ömürlerini modellemekte ve bu izotopların nükleer reaksiyonlardaki potansiyel kullanımlarını değerlendirmektedir (Seyyedi, 2020)

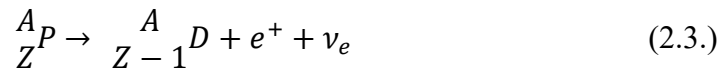
2.2.2. Beta bozunması

Beta bozunması, bir nötronun protona dönüşmesi sırasında bir elektron veya pozitron salınımını içermektedir. Beta parçacıkları, daha hafif elementlerde sıklıkla gözlemlenmekte ve genellikle ince metal tabakalarla engellenebilmektedir (Marakhtanov ve Okunev, 2018). Beta bozunması ayrıca karbon-14 gibi izotopların yaş tayininde kullanılmaktadır (Bhattacharya, 2021).

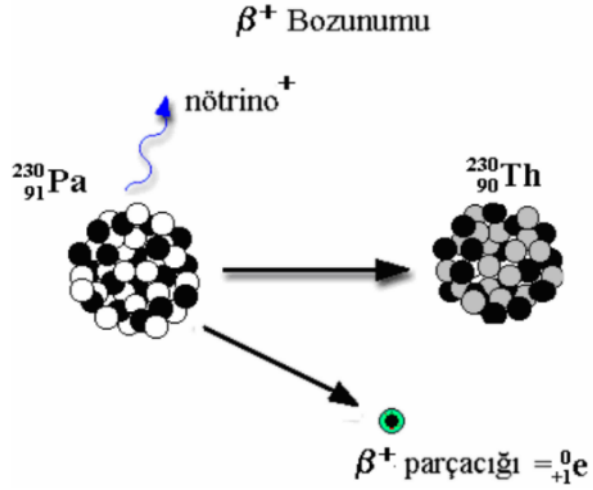
Beta bozunumunun üç çeşiti vardır.

2.2.2.1. Beta Artı Bozunumu

β^+ beta artı bozunmasında proton sayısı fazla olan bir ana çekirdek , bir protonu bir nötrona dönüştürür ve bir pozitron e^+ ve bir elektronik nötrino ν_e çıkarır. Beta artı bozunmasında ana çekirdeğin (P) atom numarası 1 azalırken, kütle numarası sabit kalır. (Denklem 1.3.)



Tıpta özel görüntüleme tekniği (PET) ile işlevsel görüntüleme için kullanılır ve sıklıkla β^+ bozunmasına uğrayan radyonüklidler pozitron emitörler olarak adlandırılır. Örneğin ^{230}Pa elementinin β^+ bozunumu Şekil 2.4.'de gösterilmiştir.



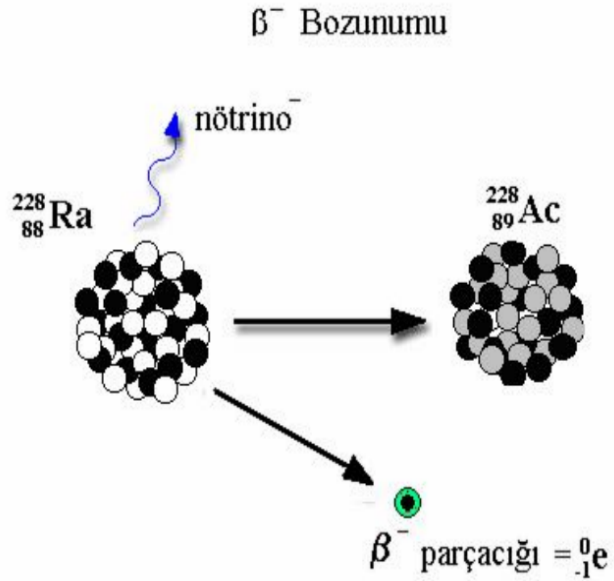
Şekil.2.4. ^{230}Pa çekirdeğindeki β^+ ışıması

2.2.2.2. Beta Eksi Bozunumu

(β^-) Beta eksi bozunmasında, nötronca sayısı fazla bir ana çekirdek, bir nötronu bir protona dönüştürür ve bir elektron e^- ve bir antinötrino $\bar{\nu}_e$ çıkarır. Beta eksi bozunmasında ana çekirdeğin (P) atom numarası 1 artarken, kütle numarası sabit kalır.



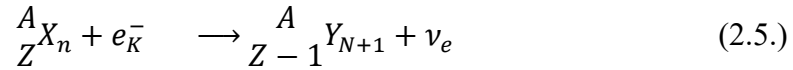
^{228}Ra çekirdeğindeki β^- bozunumu Şekil 2.5.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. ^{228}Ra çekirdeğindeki β^- ışıması

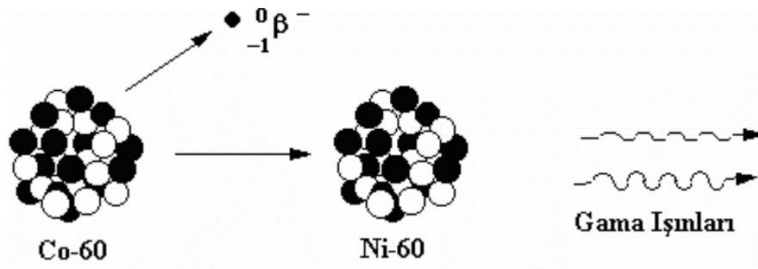
2.2.2.3. Elektron yakalama olayı

Kararsız çekirdeğin proton sayısı fazlalığından ileri geliyor ve bu çekirdek β^+ ışınması yapmıyorsa atomun çekirdeğinin yakınındaki yörüngelerinde yer alan elektronlarından birinin çekirdek aracılığıyla yakalanmasıdır. Proton ile elektron birleşerek nötrino ve nötrona dönüşür. Işımada kütle numarası sabit kalırken proton sayısı bir azalır. (Denklem 2.5.)



2.2.3. Gama bozunması

Gama ışınları, çekirdeğin enerji düzeylerindeki farklılıklardan oluşur. Çekirdek bir beta bir alfa taneciği yayınlamasından sonra çoğunlukla kararlı hale gelmez. Bir çekirdeğin fazla enerjisini elektromanyetik dalgalar şeklinde salmasıyla gerçekleşmektedir. Gama ışınları çok yüksek nüfuz gücüne sahiptir ve bu nedenle beton veya kurşun gibi yoğun malzemelerle zayıflatılmaktadır. Tıbbi görüntüleme, radyoterapi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Hiremath vd., 2024).



Şekil 2.6. ${}^{60}\text{Co}$ γ bozunumu şematik gösterimi

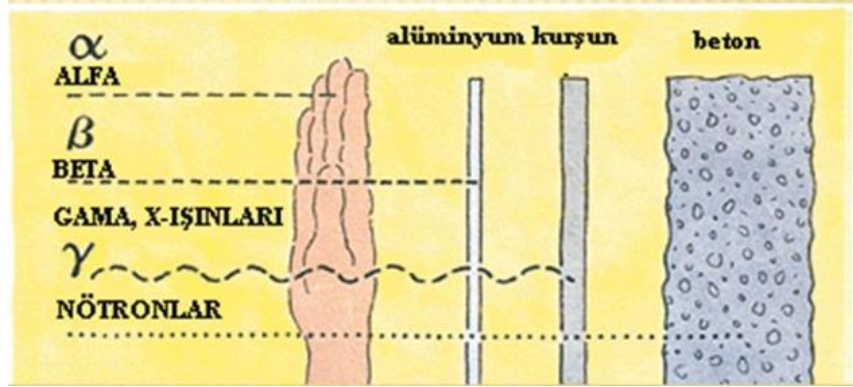
Gama bozunması, bir radyoaktif çekirdeğin fazla enerjisini elektromanyetik dalga formunda serbest bırakmasıyla gerçekleşmektedir. Gama ışınları, çok yüksek nüfuz etme gücüne sahip olduğu için beton veya kurşun gibi yoğun malzemelerle zayıflatılabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle gama ışınları tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Cavazzini, 2019).

Radyoaktif bozunma, nükleer enerji üretiminde, tıbbi teşhis ve tedavi yöntemlerinde önemli bir role sahiptir. Örneğin, gama ışınları kanser tedavisinde kullanılırken, karbon-14 yaş tayini çalışmalarında kullanılmaktadır (González-Alonso vd., 2018).

Radyoaktif maddelerin yarılanma ömrü ve bozunma türlerinin anlaşılması, bu maddelerin güvenli bir şekilde depolanmasını ve kullanılmasını sağlamaktadır. Bu

bilgi, nükleer enerji reaktörlerinden çıkan atıkların yönetimi için hayati öneme sahiptir (Santhosh vd., 2021).

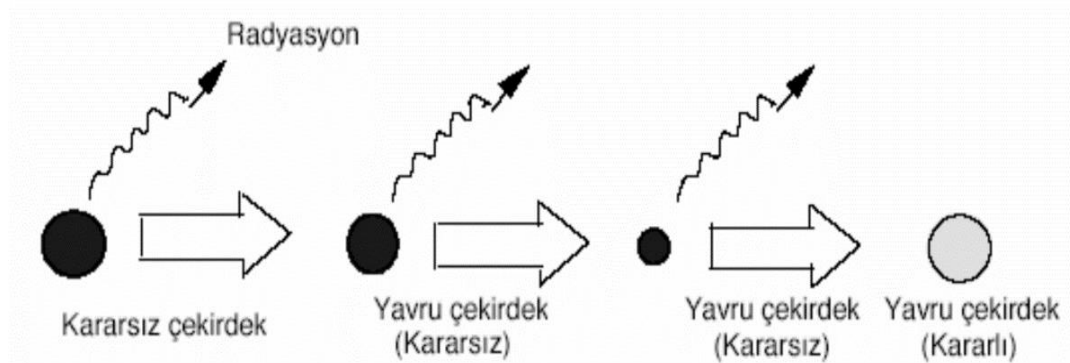
Işımların madde tarafından durdurulması Şekil 2.7.' de gösterilmiştir



Şekil 2.7. Radyasyonların birbirine göre giricilik özellikleri

2.3. Radyoaktif Seriler

Radyoaktif seriler, doğal elementlerin sürekli bir bozunma sürecine girdiği karmaşık zincirlerdir. Radyoaktif serilerin oluşumu, genellikle uranyum-238 ve toryum-232'nin karmaşık bozunma süreçleriyle ilişkilidir. Bu elementlerin radyoaktif bozunması esnasında ortaya çıkan başlangıç ürünleri, ardışık bir şekilde başka radyoaktif elementlere dönüşmektedir. Bu zincirleme reaksiyon, her bir elementin kendine has yarı ömürleri ve bozunma ürünleri ile karakterizedir.



Şekil 2.8. Radyoaktif bozunma şeması (Kanışkan vd.,1996)

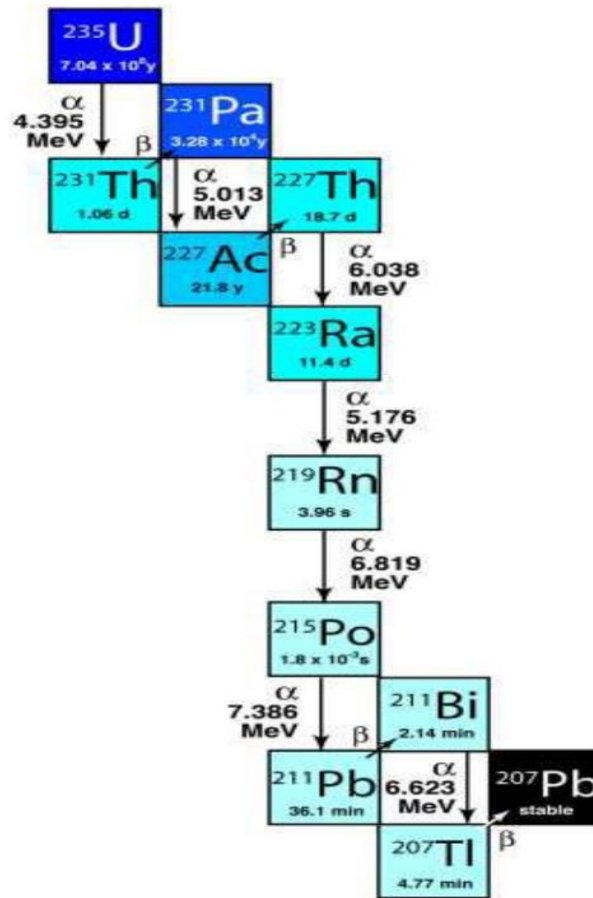
Doğal Radyoaktif seriler olarak Toryum, Uranyum ve Aktinyum serisi şeklinde üç grup oluşturulmuştur. Doğal radyoaktif seriler ve özellikleri Çizelge 2.3.de verilmiştir.

Tablo 2.3. Doğal Radyoaktif Seriler ve Özellikleri

En uzun Ömürlü Üyesi			
Seri Adı	Çekirdek	Yarı-Ömür (yıl)	Son Çekirdek (Kararlı)
Aktinyum	^{235}U	7.04×10^8	^{207}Pb
Toryum	^{232}Th	1.41×10^{10}	^{208}Pb
Uranyum	^{238}U	4.47×10^9	^{206}Pb

2.3.1. Aktinyum serisi

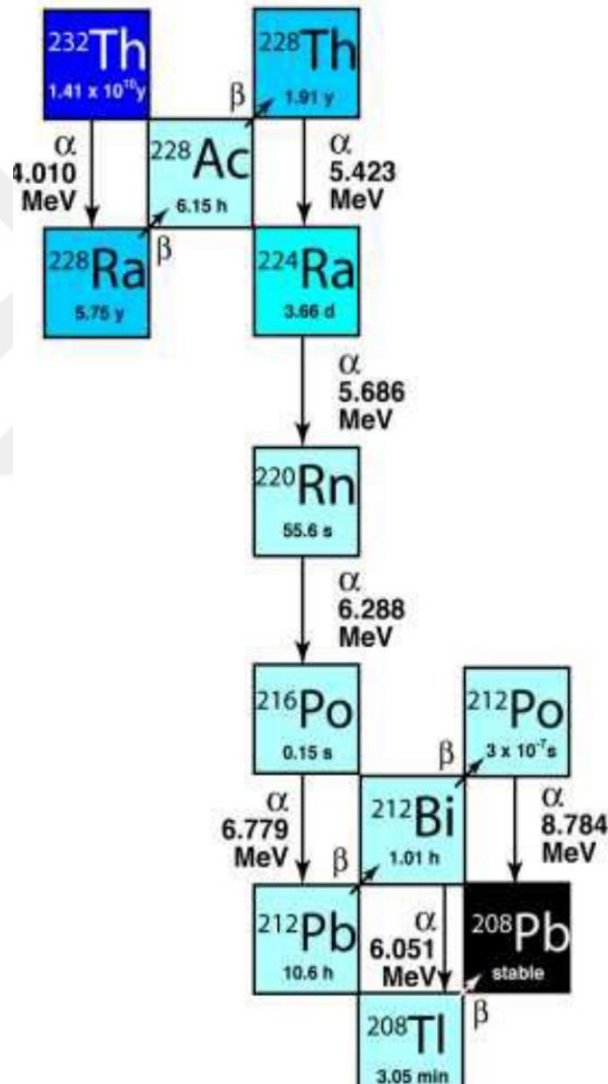
Aktinyum serisinin bozunma zinciri ana elemanı ^{235}U olan ve doğada bulunma bolluğu %0.72 olan ve ^{207}Pb izotopu ile sonlanan zincir şekil 2.9.da görülmektedir.

**Şekil 2.9.** Aktinyum serisinin bozunma zinciri

2.3.2. Toryum serisi

^{232}Th izotopu, doğal ortamda bulunan ve radyoaktif özellikler taşıyan bir elementtir. Kendiliğinden bozunma sürecine girerek, farklı nüklidleri meydana getirir. Bu bozunma serisi, uzun yarı ömürleri ile dikkat çeken ve alfa parçacıkları ile bozulan çeşitli ürün nüklitleri üretmektedir. Bu nüklitler arasında ^{228}Ra , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po ve ^{212}Pb , ^{208}Tl ve son olarak kararlı ^{208}Pb izotopu bulunmaktadır. Bozunma ürünleri, gama ışınları yayarak zengin gama spektrumları oluştururlar.

Şekil 2.10. da Toryum serisinin bozunma zinciri görülmektedir.

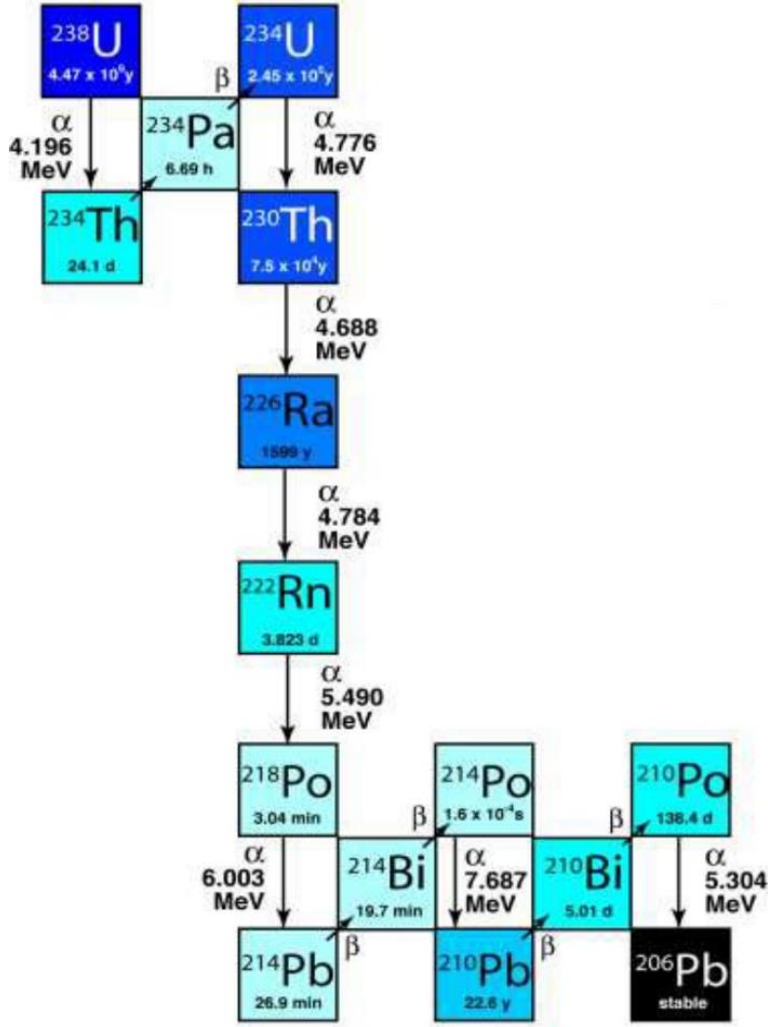


Şekil 2.10. Toryum serisinin bozunma zinciri

2.3.3. Uranyum serisi

^{238}U 'nun bozunma serisi, α ve β bozunmaları aracılığıyla 14 farklı bozunma ürününün meydana gelmesini sağlar. Bu seride ortaya çıkan her bir ürün, kendine has

radioaktivite özellikleri taşır ve birbirinden farklı bozunma hızlarına sahip olabilmektedir. Sonuç itibarıyla, bu karmaşık süreç, nihayetinde ^{206}Pb 'ye dönüşene dek çeşitli radyoaktif elementlerin oluşumunu mümkün kılar. Bu dönemde meydana gelen ürünler arasında, dikkat çeken bir unsur olarak ^{222}Rn radyoaktif gazı da yer almaktadır.



Şekil 2.11. Uranyum serisinin bozunma zinciri

2.4. Radon Gazının Özellikleri ve Yayılımı

Radon, periyodik tabloda simgesi Rn olan, atom numarası 86 ile tanımlanan bir elementtir. Renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olan radon, uranyum ve toryum gibi doğal radyoaktif elementlerin alfa bozunması sonucu oluşmaktadır (Ulutin vd., 2019). Radon-222 (^{222}Rn), doğal olarak oluşan radon izotopları arasında en yaygın olanıdır ve Uranyum-238'in (^{238}U) radyoaktif bozunma zincirinde yer almaktadır. Yarılanma ömrü yaklaşık 3.8 gün olan bu izotop, gaz formunda çeşitli yüzeylerde yoğunlaşabilmektedir (Das, 2021).

Radon gazı, uranyum ve toryum açısından zengin toprak ve kayaçların doğal bozunma süreçleri sırasında oluşmaktadır (Dobrzyńska vd., 2023). Granit, fosfat içerikli kayaçlar ve bazı tortul kayaçlar radon salınımı için önemli birer kaynaktır. Bu kayaçların bulunduğu bölgelerde radon konsantrasyonu genellikle daha yüksektir (Topsakal, 2015).

Radon, toprak yapısındaki gözeneklilik ve nem oranı gibi faktörlere bağlı olarak çevreye salınabilmektedir. Yer altı suları da radon taşımakta ve bu gaz, jeotermal aktivite bölgelerinde daha yoğun bir şekilde görülebilmektedir. Özellikle derin toprak katmanlarında biriken radon, yüzeye yakın bölgelere taşınarak atmosfere yayılabilmektedir (Tufaner, 2018).

Radon, zemin seviyesinden atmosfere yayılırken, havalandırması yetersiz kapalı alanlarda birikme eğilimi göstermektedir. Bodrum katları ve zemin seviyeleri, yüksek radon konsantrasyonlarının ölçüldüğü başlıca alanlardır. Bu durum, kapalı alanlardaki havalandırma sistemlerinin önemini artırmaktadır (Nam ve Ryu, 2018).

Dünya Sağlık Örgütü'ne göre radon, akciğer kanserinin sigaradan sonraki en büyük çevresel nedenidir. Solunum yoluyla alındığında, radonun alfa radyasyonu yayarak DNA hasarına neden olduğu bilinmektedir. Uzun süreli maruziyet, kanser riskini önemli ölçüde artırmaktadır (Urrutia-Pereira vd., 2023; World Health Organization, 2009).

Radon, özellikle madencilik ve jeotermal faaliyetlerde çalışan bireyler için bir sağlık riski oluşturmaktadır. Maden ocaklarında ve jeotermal alanlarda çalışanlar, yüksek radon konsantrasyonlarına maruz kalabilmektedir. Bu durum, bu tür ortamlarda etkili koruma önlemleri geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Nguyen vd., 2022).

Radon gazının etkilerini azaltmak için ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli ölçüm ve azaltma stratejileri uygulanmaktadır. Türkiye’de, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve diğer kuruluşlar tarafından ulusal radon haritalama çalışmaları yürütülmekte ve havalandırma sistemlerinin etkinliği artırılmaktadır (Duran vd., 2020).

Uluslararası düzeyde, radon ölçümleri için NaI(Tl) dedektörleri gibi teknolojiler kullanılmakta ve risk bölgelerine yönelik yapı standartları geliştirilmektedir. Bu standartlar, radonun yapı malzemelerinden kaynaklanan etkilerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır (Yunrui vd., 2021).

Radonun halk sağlığı üzerindeki etkilerini azaltmak için politika yapıcılar, radon ölçümlemlerini ve halk farkındalığını artırmayı hedeflemektedir. Bu uygulamalar, hem bireysel hem de toplumsal sağlık risklerini en aza indirmek için önem taşımaktadır (Sulthanah, 2022).

2.4.1. Uranyum, toryum ve radon ilişkisi

Uranyum ve toryum, doğada yaygın olarak bulunan ve uzun yarılanma ömürleriyle bilinen iki ağır radyoaktif elementtir. Uranyum, genellikle granit kayaçlarda ve fosfat içerikli minerallerde yüksek konsantrasyonlarda bulunurken, toryum monazit mineralleri içinde daha fazla yoğunlaşmaktadır (Szajerski, 2020). Bu elementler, radyoaktif zincirlerin başlangıcında yer almakta ve çevresel radyoaktivitenin temel kaynakları arasında gösterilmektedir.

Uranyum-238 (^{238}U) ve toryum-232 (^{232}Th) gibi elementler, radyoaktif bozunma zincirlerinde alfa, beta ve gama ışınları yayarak daha kararlı hale gelmektedir. Bu süreçte, uranyum ve toryumun çekirdek yapısında meydana gelen deformasyonlar, bozunma ile daha stabil bir forma evrilmektedir (Marid vd., 2018).

Uranyum-238'in (^{238}U) radyoaktif bozunması sırasında radon gazı ara ürün olarak oluşmaktadır. Bu süreç, uranyum açısından zengin toprak ve kayaçlarda yoğun olarak gözlemlenmektedir. Radon gazı, yer altı madenlerinden ve yapı malzemelerinden atmosfere salınarak kapalı alanlarda birikebilmektedir. Bu durum, özellikle akciğer kanseri gibi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (World Health Organization, 2009).

Toryum-232 (^{232}Th) zincirinde radon gazı, bozunma sırasında bir ara ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak, toryumun bozunma hızı uranyuma göre daha düşük olduğu için radon birikimi daha sınırlıdır. Toryumun yaygın olduğu bölgelerde, özellikle monazit mineralleri çıkarılan madenlerde, radon birikimi potansiyel bir sağlık riski oluşturmaktadır (Reilly vd., 2019).

Radon gazı, yer altı sularına, topraklara ve bina temellerine yayılmaktadır. Bu yayılım, özellikle uranyum ve toryumun doğal dağılımıyla doğrudan ilişkilidir. Kapalı ortamlarda birikerek zararlı konsantrasyonlara ulaşan radon, çevresel radyasyon seviyelerini artırarak halk sağlığı açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Marid vd., 2018).

Uranyum ve toryum kaynaklı radyoaktivitenin izlenmesi, radon salınımının kontrol altına alınması için önemlidir. Bu amaçla, maden ocakları ve yapı malzemelerinde

düzenli ölçümler yapılmaktadır. Özellikle radon gazının havalandırma sistemleriyle uzaklaştırılması, kapalı alanlarda birikimin önlenmesine yardımcı olmaktadır (Szajerski, 2020).

Uranyum ve toryum, yalnızca radon salınımına neden olmakla kalmamakta, aynı zamanda nükleer enerji üretiminde de kullanılmaktadır. Toryum, uranyuma göre daha az radyoaktif atık üretmesi nedeniyle gelecek vaat eden bir nükleer yakıt olarak değerlendirilmektedir (Reilly vd., 2019).

Uranyum ve toryum kaynaklı radyoaktif maddelerin halk sağlığı üzerindeki etkileri geniş çaplı araştırmalara konu olmaktadır. Özellikle madencilik faaliyetleri sırasında radon gazına maruz kalan işçilerin sağlık riskleri bilimsel olarak incelenmekte ve koruyucu önlemler önerilmektedir (Chen ve Bernard, 2020).

Uranyum, toryum ve radon ilişkisine dair farkındalık artırıcı çalışmalar, toplumun bilinçlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmalar, radyasyon yönetimi politikalarının geliştirilmesi ve uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır (Reilly vd., 2019).

2.4.2. Yapı malzemelerinde radyoaktivite ve radon

Yapı malzemelerinde doğal radyoaktivite, kullanılan materyallerin içerdikleri radyoaktif izotoplar olan uranyum-238 (^{238}U), toryum-232 (^{232}Th) ve potasyum-40 (^{40}K) gibi elementlerden kaynaklanmaktadır (Zararsız vd., 2013). Bu malzemelerin doğal radyoaktivite seviyeleri, çevreye yayılan gama radyasyonunu ve iç mekan hava kalitesini etkileyebilir (Gelgün, 2010). Örneğin, beton, doğal taşlar ve tuğla gibi yapı malzemelerinin radyoaktif izotop içerikleri, radyasyon seviyelerini doğrudan belirler. Bir çalışmada, fosfat bazlı malzemelerin radyum-226 içeriği nedeniyle yüksek radyoaktivite yaydığı gözlemlenmiştir (Ravisankar vd., 2011).

Avrupa Birliği'nde yapılan araştırmalar, yapı malzemelerindeki doğal radyoaktivitenin insan sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kapsamlı veri tabanları oluşturmuş ve bu malzemelerin güvenli kullanımına dair sınırlar belirlemiştir (Trevisi vd., 2012). Türkiye'de Kars bölgesinde gerçekleştirilen bir başka çalışmada, yapı malzemelerinin radyasyon riskinin genel olarak düşük olduğu ve inşaatlarda güvenle kullanılabileceği tespit edilmiştir (Cengiz vd., 2017).

Radyoaktivite seviyelerini değerlendirmek için radyolojik tehlike indeksleri, gama doz hızları ve radon çıkışı gibi parametreler ölçülmektedir (Aydın, 2020). Özellikle tarihi

binalarda kullanılan tuğla gibi malzemelerde, global ortalamaların üzerinde radyoaktivite tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bu yapıların yerleşim amaçlı kullanımının dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Singovszka ve Eštoková, 2020).

Radon, yer kabuğundaki uranyum ve toryum gibi radyoaktif elementlerin doğal bozunma süreçleri sonucu oluşmaktadır (Bezuidenhout, 2019). Bu gaz, yer altı suyu, toprak ve kayaçların içeriğiyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle granit, şist ve fosfat gibi yüksek radyoaktif yoğunluğa sahip kayaçlar, radon salınımı açısından dikkat çekmektedir (Gazda vd., 2018). Jeotermal alanlar ve volkanik bölgeler, yer kabuğundaki radyoaktivite nedeniyle radon gazının daha yüksek seviyelerde bulunduğu yerlerdir (Hong vd., 2018).

Yapı malzemeleri, içerdikleri radyoaktif izotoplar nedeniyle radon salınımına katkıda bulunmaktadır. Çimento, beton ve tuğla gibi yapı malzemelerinin yanı sıra doğal taşlar da radon salınımına neden olmaktadır. Radonun yapı malzemelerinden kapalı alanlara salınımı, havalandırma sistemlerinin eksikliği durumunda birikime yol açmaktadır. Bu durum, özellikle ev ve iş yerlerindeki hava kalitesini olumsuz etkileyerek sağlık risklerini artırmaktadır (Barreto vd., 2019; Soniya vd., 2023).

Kapalı alanlarda radon birikimi, genellikle havalandırma eksikliği ve kullanılan yapı malzemelerinin radyoaktif özellikleri ile ilişkili bulunmaktadır (Raptis vd., 2019). Yapısal malzemelerin yüzey kaplamaları, radon birikimini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, mermer tozu gibi kaplama malzemeleri radon sızıntısını önemli ölçüde azaltmaktadır (Raptis vd., 2019)..

Türkiye, jeolojik yapısı nedeniyle radon salınımına elverişli toprak ve kayaçlara sahiptir. Özellikle İç Anadolu ve Ege bölgelerindeki granit içeren jeolojik yapılar, yüksek radon emisyon potansiyeline sahiptir (Tufaner, 2018). Yapılan araştırmalar, radon gazının kapalı alanlarda birikmesini önlemek için yapı malzemelerinin dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir (Duran vd., 2020).

Radon gazı, insan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturmakta ve akciğer kanseri ile ilişkilendirilmektedir (Usikalu vd., 2019). Dünya Sağlık Örgütü, radonu sigaradan sonra akciğer kanserinin en büyük nedeni olarak tanımlamaktadır. Radon konsantrasyonlarının azaltılması için yapı temellerinde kullanılan bariyerlerin etkinliği önemli bir çözüm sunmaktadır (World Health Organization, 2009).

Radon birikimini önlemek için yapı malzemelerinde bariyer teknolojileri ve uygun havalandırma sistemleri kullanılmaktadır (Fuhrmann vd., 2019). Türkiye’de ve dünyada radon yönetimi için standartlar geliştirilmekte ve kapalı alanlardaki radon seviyelerini azaltmak amacıyla ulusal düzeyde ölçüm ve kontrol çalışmaları yapılmaktadır. Bu önlemler, radon gazının insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır (Gazda vd., 2018).

Radon gazı, yapısal malzemelerin özelliklerinden büyük ölçüde etkilenir. Özellikle beton, tuğla ve doğal taş gibi yapı malzemelerinin içerdiği uranyum ve radyum elementleri, radon gazının yayılımını artırabilir (Özkorucuklu vd., 2006). Örneğin, fosfogips içeren betonların radon emisyonu, uçucu kül içerenlere kıyasla daha yüksektir. Fosfogips, radium-226 içeriği nedeniyle daha fazla radon yayarken, uçucu kül içeren malzemeler daha az radon yaymaktadır (Vu vd., 2021).

Yapı malzemelerinin su geçirgenliği ve mikro yapısal özellikleri, radonun geçişine karşı direnç sağlayabilir. Su yalıtım malzemeleri üzerinde yapılan araştırmalar, radon bariyer özelliklerinin kalınlık kadar malzemenin kimyasal ve fiziksel yapısından da etkilendiğini göstermektedir. Bu durum, malzeme seçiminde radon direncine yönelik daha ayrıntılı bir değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir (Jiránek ve Svoboda, 2017).

Binaların altındaki jeolojik yapılar da radon gazının bir yapıya sızma oranını etkiler (Yaşar, 2020). Özellikle uranyum açısından zengin kayaçlar üzerinde inşa edilen yapılarda daha yüksek radon seviyeleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yapısal malzeme seçiminde çevresel ve jeolojik faktörler de dikkate alınmalıdır (Ball vd., 1991).

Radon gazı yayılımını azaltmak için çevre dostu harçlar ve emici maddeler kullanılabilir. Örneğin, adsorban olarak kullanılan zeolit içeren harçlar, radon gazı emisyonlarını etkin bir şekilde azaltmaktadır. Bu yöntem hem yapı güvenliği hem de iç mekan hava kalitesini iyileştirmek için umut vadetmektedir (Giosuè vd., 2019).

Yapı malzemeleri, iç mekânlardaki radon gazı seviyeleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çeşitli malzemelerdeki radon salınım oranları, malzemenin radyoaktif içeriğine ve yoğunluğa bağlı olarak değişir (Bulut ve Şahin, 2024). Örneğin, sahil kumları yüksek radyoaktivite içeriğe sahiptir (Andaç, 1971) ve seramik karolara göre daha fazla radon salınımına neden olabilir (Hussein, 2017). Benzer şekilde, doğal

taşlar içinde granit, partikül boyutları ve nem içeriği gibi faktörlere bağlı olarak radon salınımını artırabilir (Bayram vd., 2019).

Bazı yapı malzemeleri, radon salınımını azaltan kaplama malzemeleri ile işlenebilir. Çalışmalar, kırmızı tuğla, çimento tuğlası ve alçıpan gibi malzemelerin radon salınımlarının, radon bariyer malzemeleri ile kaplandıktan sonra azaldığı göstermektedir (Walczak vd., 2016).

Yapı malzemelerinin türlerine göre seçimi, iç mekân hava kalitesini ve kişisel radyasyon maruziyetini azaltmada stratejik bir rol oynamaktadır (Zorlu ve Karadayı, 2020). Ecocarar gibi düşük radon emisyonlu seramik malzemeler, iç mekân radon seviyelerini düşürmek için tercih edilebilir (Ju vd., 2012; Karalı, 2019). Ek olarak, havalandırma ve bina yaşının da iç mekân radon seviyelerini etkilediği gözlemlenmiştir (Kürkçüoğlu ve Bayraktar, 2014).

2.4.3. Toprak ve maden alanlarında radyoaktivite ve radon

Toprakta bulunan radyoaktif elementler, özellikle uranyum ve toryum, radon gazının oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu elementlerin doğal bozunma süreçleri sırasında radon gazı açığa çıkmakta ve bu gaz toprakta birikerek atmosfere taşınmaktadır (Nguyen vd., 2022). Granit gibi radyoaktif kayaçların yoğun olduğu alanlarda toprak radon konsantrasyonları daha yüksek seviyelerde ölçülmektedir (Alonso vd., 2019).

Toprak türleri ve özellikleri, radon gazının üretim ve taşınım potansiyelini belirlemektedir. Toprak nemi ve yoğunluğu gibi faktörler, radon gazının hareketini ve birikimini doğrudan etkilemektedir (Jin vd., 2020).

Toprak derinliği, radon gazı konsantrasyonu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Derinlik arttıkça radon konsantrasyonu da genellikle artmakta, yüzey seviyelerine doğru ise gazın yayılım hızı azalmaktadır. Bunun nedeni, derin toprak katmanlarındaki radyoaktif elementlerin yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır (Nguyen vd., 2022).

Maden alanları, radon gazı açısından dikkat çeken bölgeler arasında yer almaktadır. Bu bölgelerdeki toprak radon konsantrasyonu, çevresel radyoaktivitenin en yüksek seviyelere ulaştığı alanlardan biri olarak bilinmektedir (Leshukov vd., 2023). Özellikle kömür ve metal madenlerinin bulunduğu bölgelerde radon gazı birikimi riskli seviyelere çıkmaktadır (Pişkin, 2016).

Toprakta biriken radon gazı, çevresel radyoaktiviteyi artırarak bitki ve hayvan yaşamını etkileyebilmektedir. Yer altı sularına karışarak radyoaktif kirliliğe neden olan radon, bu şekilde hem ekosistem hem de insan sağlığı için tehdit oluşturabilmektedir (Rizo Maestre ve Iribarren, 2018).

Türkiye'deki jeolojik yapılar, toprak radon çalışmaları için elverişli bir ortam sunmaktadır. İç Anadolu ve Ege bölgeleri gibi volkanik alanlarda yapılan araştırmalar, bu bölgelerde yüksek radon konsantrasyonları bulunduğunu göstermektedir. Türkiye'deki toprak radon çalışmaları, bu gazın sağlık üzerindeki etkilerini incelemek ve riskleri en aza indirmek için önem taşımaktadır (Tufaner, 2018).

Toprak radonunun çevresel etkilerini en aza indirmek için çeşitli yönetim stratejileri geliştirilmektedir. Toprak özelliklerine uygun yapı malzemelerinin kullanımı, radon gazının kapalı alanlara taşınmasını engellemeye yardımcı olmaktadır (Barreto vd., 2019). Ayrıca, toprak havalandırma sistemleri ve bariyer malzemeler, radon salınımını azaltmada etkili yöntemler arasında yer almaktadır (Duman, 2021).

Toprakta bulunan Toprakta bulunan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K gibi doğal radyo-çekirdekler toprağın radyoaktif olmasına neden olmaktadır ve hem çevresel hem de sağlık açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Bal ve Doğru, 2013). Radon-222 (^{222}Rn) ve Radon-220 (^{220}Rn), toprakta doğal olarak bulunan uranyum ve toryum gibi elementlerin bozunmasından meydana gelir ve toprak gazı olarak yayılarak hava ve suya karışabilir (Cameron, 1987; Heath, 1991). Toprak radon konsantrasyonları, özellikle granit gibi uranyum açısından zengin kayaların bulunduğu bölgelerde yüksektir ve bu durum, yer altı yapılarında hava kirliliğine yol açabilir (Papachristodoulou vd., 2009; Gümüş ve Yalım, 2019).

Toprak nem oranı, radon yayılımını doğrudan etkileyen bir faktördür (Ozan ve Ekinci, 2011; Saç ve Camgöz, 2005.). Nem, radonun toprak gözeneklerinden yayılmasını sınırlandırarak gazın birikmesine neden olabilir. Bu durum, radon ölçümleri ve değerlendirme süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir parametre olarak belirtilmektedir (Jin vd., 2020). Gümüş ve Yalım (2019), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Akşehir fay hattına yakın bölgelerdeki radon yoğunluklarının fay hattından uzak bölgelerdekilere göre belirgin şekilde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Toprakta bulunan radyoaktif elementlerin ve radonun sağlık üzerindeki etkileri, özellikle akciğer kanseri riskine dikkat çekmektedir. Yüksek radon seviyelerine sahip

alanlar, iç mekânlarda biriken radon gazının bir sonucu olarak uzun süreli radyasyon maruziyetine yol açabilir (Özkorucuklu vd., 2006).

Radon gazı, uranyum ve toryum gibi doğal radyoaktif elementlerin bozunmasından kaynaklanır ve bu süreç genellikle toprak ve kayaç yapılarında meydana gelir. Toprakta bulunan uranyum-238 (^{238}U) ve radyum-226 gibi elementler, radon gazının doğal kaynaklarını oluşturur. Granit ve diğer radyoaktif mineraller bakımından zengin olan kayaçlar, radon gazının daha yoğun bir şekilde yayılmasına neden olur (Kemski vd., 1992).

Özellikle nemli topraklarda radon gazının hareketi sınırlanırken, kuru ve geçirgen topraklarda gazın yayılması daha hızlı gerçekleşir. Bu durum, toprak özelliklerine bağlı olarak radon gazının farklı bölgelerde değişen konsantrasyonlarda bulunmasına neden olur (Maestre ve Iribarren, 2018). Jeolojik kırıklar ve fay hatları gibi yapılar, radon gazının yüzeye taşınmasını hızlandırabilir. Fay hatlarına yakın alanlarda toprak radon konsantrasyonlarının belirgin şekilde yüksek olduğu görülmüştür (Gümüş ve Yalım, 2019).

Mevsimsel değişiklikler ve atmosferik koşullar da radon konsantrasyonun topraktaki miktarını etkilemektedir (Seyis, 2015). Kış aylarında artan nem ve düşük sıcaklıklar, radon gazının gözeneklerde sıkışmasına ve konsantrasyonunun artmasına neden olur. Yaz aylarında ise toprak kurudukça radon yayılımı artar ve yüzeydeki konsantrasyon azalmaktadır (Puchkov vd., 2022; Shashikumar vd., 2019).

Maden alanları doğal radyasyon aktiviteleri bakımından dikkat çekmektedir. Bu alanlardaki radyoaktivite, özellikle uranyum, toryum ve potasyum gibi doğal radyoaktif elementlerin bulunduğu kayaçların varlığından kaynaklanmaktadır (Vural ve Kaya, 2021). Bu elementlerin bozunması sırasında oluşan radon gazı, toprak ve kayaçların gözeneklerinden ilerleyerek atmosfere çıkmaktadır (Akbal, 2007). Türkiye genelinde yapılan çalışmalar, maden sahalarının ve çevresindeki yerleşim alanlarının radon gazı birikimi açısından potansiyel risk taşıdığını göstermektedir (Erol, 2020; Küçükönder, 2021; Şimşek vd., 2012). Özellikle Batı Anadolu'daki granit plutonları ve Afyon'daki fay hatları üzerinde yapılan araştırmalar, bu bölgelerdeki radyoaktivitenin yüksek olduğunu ve radon gazının sağlık açısından tehlike oluşturabilecek seviyelere ulaşabileceğini ortaya koymaktadır (Aksu vd., 2020; Canbaz Öztürk, 2015; Uludağ, 2018).

Radon gazının dağılımı, jeolojik etmenler, madenlerin işletmesinde havalandırma yöntemlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Kürkçüoğlu vd., 2024; Özmen, 2023). Örneğin, kapalı maden işletmelerinde yetersiz havalandırma, radon birikimini artıran temel faktörlerden biridir. Ayrıca, granit gibi volkanik kayaların yoğun olduğu bölgelerde radon emisyonunun diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Yaşar, 2020). Bu durum, yalnızca maden işçilerini değil, çevredeki toplulukları da risk altına sokmaktadır. Dolayısıyla, radon gazı ölçümlerinin düzenli olarak yapılması ve havalandırma sistemlerinin geliştirilmesi, maden sahalarının çevresel ve iş sağlığı güvenliği standartlarına uygun hale getirilmesi için kritik öneme sahiptir (Kapdan, 2009; Çolakgil ve Tanrıvermiş, 2024).

2.4.4. Sulara radyoaktivite ve radon

Dünya yüzeyinin yaklaşık %71'i sularla kaplıdır. Bu su kütlelerinin %97,5'ini denizler ve okyanuslardaki tuzlu sular oluştururken, kalan %2,5'lik bölüm tatlı sulardan meydana gelmektedir. Tatlı su kaynaklarının ise yaklaşık %99,7'si buzullar ve yeraltı suları şeklinde bulunurken, yalnızca %0,3'ü yüzey sularında yer almaktadır. Bu durum, dünya genelinde erişilebilen içilebilir su miktarının oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Yeraltı suları, sürekli olarak kayalar ve toprakla temas halinde olduğu için, bu ortamlarda bulunan doğal radyoaktif bozunma ürünleri zamanla suya geçebilmektedir. Öte yandan yüzey suları da hem toprak kaynaklı hem de kozmik ışınlama etkisiyle belirli düzeylerde radyoaktif bozunma ürünleri içerebilir. Bu nedenle, yer altı sularında, kuyu ve kaynak sularında, hatta jeotermal sularda, yüzey sularına kıyasla daha yüksek radon gazı konsantrasyonlarına rastlanması mümkündür. İçme suyu kaynaklarında dahi belirli düzeylerde radon bulunabilmektedir. Radon gazının suda bulunması, hem insan sağlığı hem de çevresel radyasyon yükü açısından önemli riskler teşkil etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) içme sularında radondan kaynaklı maruziyet için yıllık 100 mSv limitini önermektedir. Türkiye'de ise, Sağlık Bakanlığı tarafından 17 Şubat 2005 tarih ve 25730 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan yönetmelik kapsamında, birincil ve ikincil içme suyu ile genel su kullanımı için alfa yayıcılar için 0,1 Bq/L ve beta yayıcılar için 1 Bq/L sınır değerleri belirlenmiştir. (T.C. Sağlık Bakanlığı, 2005).

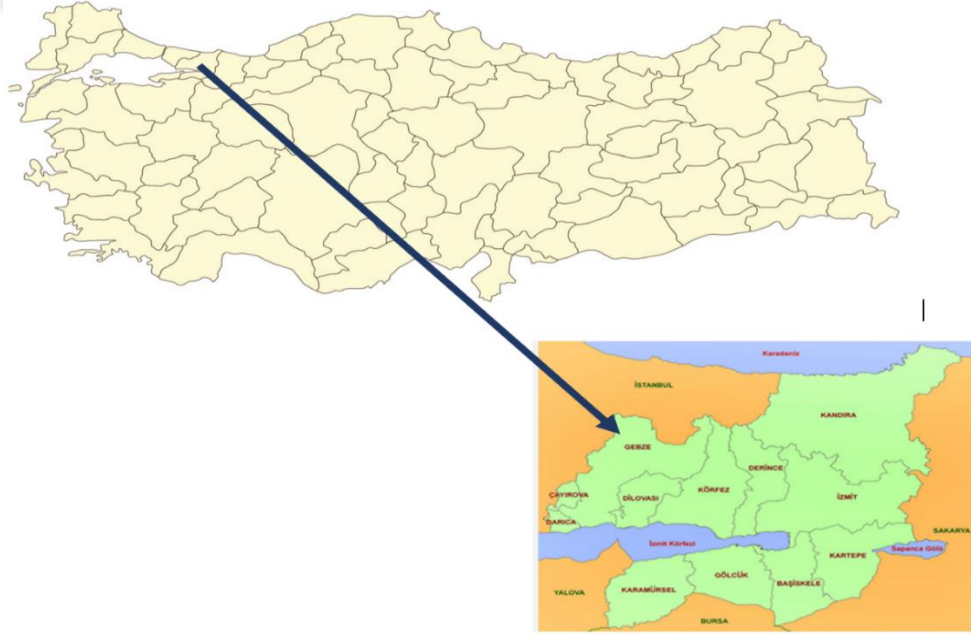


3. MATERİYAL VE METOD

3.1. Yapı Malzemelerinde Doğal Radyoaktivite

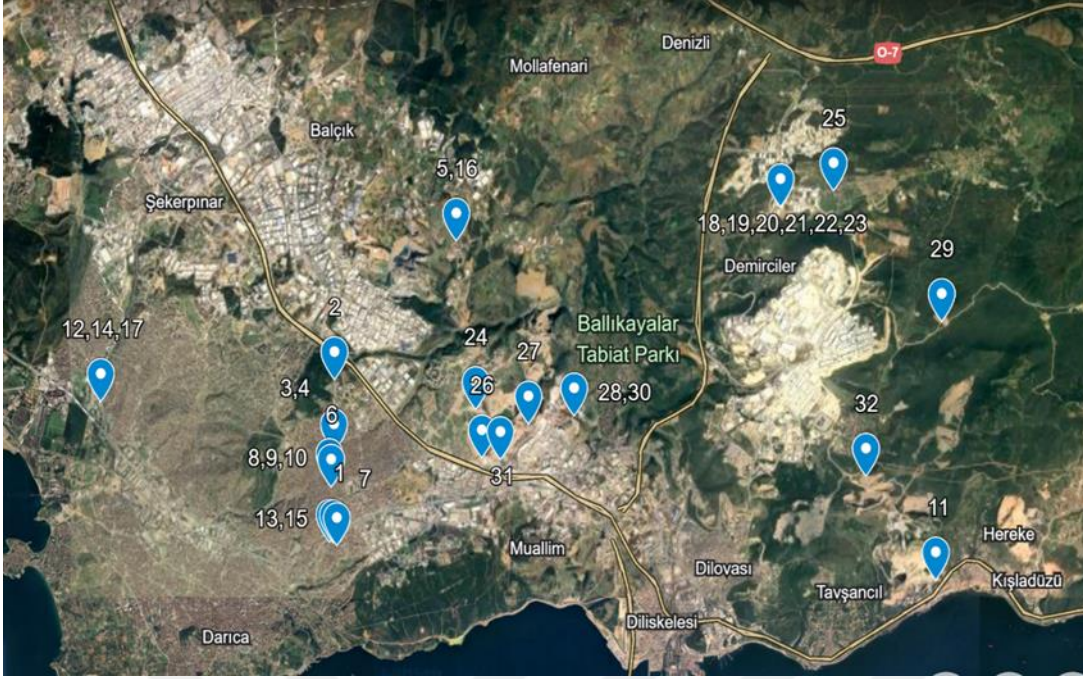
3.1.1. Numunelerinin toplanması ve özellikleri

Kocaeli ili ve ilçeleri haritaları sırasıyla Şekil 3.1.'de verilmiştir. Çalışma bölgesi öncelikle Gebze (Merkez, Köşeler köyü, Tavşanlı köyü, Pelitli Köyü) sonrasında ise Çayırova, Dilovası, Hereke olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerden 32 tane yapı malzemesi örneği alınmıştır. Yapı malzemesi örneklerinin alındığı noktaların koordinatları



Şekil 3.1. Kocaeli ili ve ilçeleri haritası.

İncelenecek yapı malzemeleri, Gebze ve çevresinde yapılmakta olan inşaatlarda kullanılan 17 farklı malzemedan toplam 32 örnekleme yapılarak alınmış ve yapı malzemeleri numuneleri [Tuğla, Ateş tuğla, İzolasyon Tuğla, Kiremit, Kalsit, Alçı (Saten, Kartonpiyer) Seramik, Dolomit, Granit, Çimento, Kireç taşı, Sıva, Ytong (gaz beton), Mermer, Traverten, Derz] olarak seçilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışma alanı ve örnekleme noktalarının lokasyon haritası.

Tuğla, belirli bir ısı ile işlemden geçirilmiş kil ve killerin özel bir teknikle şekillendirilmesiyle ortaya çıkan bir yapı malzemesidir. Bununla birlikte, ateş tuğlası, yüksek sıcaklık dayanıklılığı gerektiren spesifik uygulamalarda kullanılan özel bir tuğla türüdür. Sıklıkla refrakter olarak adlandırılan ateş tuğlası, özellikle fırın, ocak ve yüksek sıcaklıkta çalışan endüstriyel süreçlerde tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Kiremit, genellikle yüksek sıcaklıkta pişirilen kil malzemesinden üretilen bir çatı kaplama elemanıdır.

Kalsit, kireçtaşı ve mermer gibi kalkerli kayaların bir ürünü olarak karşımıza çıkan bir mineraldir. Bu mineral, inşaat sektörü başta olmak üzere, çimento üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kimyasal bileşenleri arasında beton, harç ve sıvalar gibi yapı malzemeleri yer alır. Kalsitin öğütülmesiyle elde edilen toz, kalker tozu, yapı malzemeleri üretiminde kritik bir hammadde olarak kabul edilmektedir. Bunun yanı sıra, kalsit, kireç üretimi süreçlerinde de önemli bir rol üstlenerek, yapı malzemelerinin üretiminde vazgeçilmez bir unsur haline gelmektedir.

Alçı, inşaat ve dekorasyon alanlarında yaygın bir şekilde başvurulan bir yapı malzemesi niteliği taşımaktadır. Bu malzeme, kalker ve kükürt dioksit minerallerinin titizlikle öğütülmesiyle elde edilen ince bir toz formundadır. Su ile bir araya geldiğinde, bu toz, sertleşerek dayanıklı bir yapı oluşturma özelliğine sahiptir.

Seramik malzemelerinin bileşiminde temel unsurlar kil, kum ve feldspattır. Bu hammadde grupları, belirli oranlarda karıştırılarak istenilen şekillerde biçimlendirilir ve ardından yüksek sıcaklıkta pişirilerek kalıcı bir sertlik kazanır. Seramik, yüksek yoğunluk, sertlik ve aşınma direnci ile bilinen bir malzemedir; aynı zamanda asitlere ve çeşitli kimyasallara karşı gösterdiği dirençle dikkat çeker. Düşük su emme oranı sayesinde, suya karşı da oldukça dayanıklıdır. Seramik malzemeler, dayanıklılığı ve hijyenik yapısı sebebiyle genellikle mutfaklar ve banyo gibi suya maruz kalan alanlarda öne çıkmaktadır.

Dolomit, yüksek oranda magnezyum karbonat içeren bir kayaç türü olarak dikkat çeker. Bu kayaç, inşaat sektöründe yaygın bir şekilde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Beton üretiminde katkı maddesi işlevi gören dolomit, özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilmesiyle öne çıkar.

Granit, doğal taşlar arasında sağlamlık ve dayanıklılığı ile tanınan bir malzemedir. Granitin bileşimi, esasen kuvars, feldspat ve mika minerallerinin etkileşimlerine dayanır. Bu mineral kombinasyonu, granitin sertlik derecesini, dayanıklılığını ve estetik niteliklerini belirleyen kritik unsurlardır. Yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına karşı gösterdiği direnç sayesinde hem iç hem de dış mekanlarda çeşitli amaçlarla kullanılabilmektedir. Zemin kaplamaları, mutfak tezgâhları ve merdiven basamakları gibi pek çok farklı alanda uygulama imkânı sunan granit, uzun ömürlü oluşu ve estetik yapısıyla sıklıkla tercih edilmektedir.

Çimento, inşaat sektöründe kritik bir yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Beton, harç ve sıva gibi yapı bileşenlerinin imalatında vazgeçilmez bir rol üstlenen bu malzeme, kireç, kil, demir cevheri, alümina ve kuvarsit gibi doğal hammaddelerin titizlikle öğütülüp harmanlanmasıyla elde edilir. İnşaatın temeli olan çimento, sağlam ve yüksek mukavemetli yapılar inşa etmede son derece önemlidir; farklı türleriyle de çeşitli inşaat uygulamalarında geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

Kireç taşı, doğal kaynaklardan elde edilen bir yapı malzemesi olarak inşaat sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. Bu malzeme, kireç üretiminde temel bir bileşen olmasının yanı sıra, kireç harcı ve sıvası gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılmaktadır. Geleneksel yapı tekniklerinin vazgeçilmez unsurlarından biri olan kireç taşı, çevresel sürdürülebilirlik açısından da dikkate değer bir alternatif sunar.

Sıva, inşaat sektöründe yapılar için vazgeçilmez bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Sıva malzemesinin bileşenleri, genellikle kum, çimento, su ve bazen de kireçten oluşmaktadır. Bu malzeme, yüzeye uygulandığında kimyasal tepkimeler aracılığıyla sertleşmekte ve sağlam bir yapı meydana getirmektedir. Sıvanın içerisindeki bileşenlerin oranları, malzemenin dayanıklılığı, yapışma kabiliyeti ve su geçirmezlik gibi kritik özelliklerini belirlemektedir. Özellikle sıvanın yapısında bulunan ince kum taneleri, yüzeyin pürüzsüz ve düzgün bir hale gelmesini sağlamaktadır; bu durum, boyama ve diğer kaplama işlemlerinin daha rahat bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Ytong, inşaat alanında hafif yapı malzemeleri sınıfında yer alan ve gaz beton olarak tanımlanan bir üründür. Bu malzeme, hafif yapısı sayesinde kolayca taşınabilir ve uygulanabilir olmasının yanı sıra, yüksek ısı ve ses yalıtım yetenekleri ile de ön plana çıkar. Yangına karşı gösterdiği dayanıklılık özellikleri, Ytong’u daha da cazip hale getirmektedir. Ytong bloklar hem duvar hem de döşeme elemanları olarak kullanılmakta olup, yapıların enerji verimliliğine önemli katkılarda bulunmaktadır. Hafif yapısı, kolay şekil alabilme kabiliyeti ve üstün performansı ile inşaat sektöründe vazgeçilmez bir malzeme olarak tercih edilmektedir.

Mermer, doğal bir taş olmasının ötesinde, metamorfik süreçlerin bir sonucu olarak karşımıza çıkan önemli bir kayaç türüdür. Genellikle kalsit ve dolomit gibi minerallerin birleşiminden meydana geldiği için, mineralojik yapısı oldukça zengin ve çeşitlidir. Mermerin homojen yapısı, ona hem estetik bir görünüm kazandırmakta hem de çeşitli renk ve desen alternatifleri sunmaktadır. Sertlik ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle, iç mekân dekorasyonunda ve bina kaplamalarında sıklıkla tercih edilmektedir.

Traverten, kireç taşının özel bir formudur ve genellikle suyun birikimi neticesinde meydana gelir. Gözenekli yapısı ile suyu emme kapasitesine sahiptir. Bu malzeme, çoğunlukla dekoratif amaçlarla ve yapı elemanları olarak değerlendirilir. Travertenin doğadaki varlığı ve işlenebilirliği, onu mimari ve dekoratif alanlarda vazgeçilmez kılmaktadır.

3.1.2. Yapı malzemeleri numunelerindeki doğal radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonlarının tespitinde kullanılan yöntem

3.1.2.1. Gama spektrometresi yöntemi ve NaI (Tl) dedektörü

Canlıların maruz kaldığı radyasyon, doğal ve yapay kaynaklar vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Bu radyasyonun hangi kaynaklardan geldiğini tespit etmek ve maruziyet miktarını hesaplamak oldukça kritik bir süreçtir. Başka bir deyişle; çevresel koşullarda bulunan maddelerin radyoaktif olup olmadığını anlamak, eğer radyoaktif ise hangi elementlerden kaynaklandığını ve bu elementlerin aktivite düzeylerini belirlemek nükleer fizik alanında önemli bir yer tutmaktadır. Bu tür bir araştırma, gama spektrometre sistemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir ve bu sayede radyasyonun çevresel etkileri hakkında derinlemesine bilgiler elde etmek mümkün hale gelir.

Gama spektrometresi, yüksek enerjili gama ışınlarının kapsamlı bir incelemesini mümkün kılan bir aygıttır. Bu aygıtın temel işleyişi, numunenin maruz kaldığı gama ışınlarının enerjilerinin ölçümü ve elde edilen spektrumun detaylı bir şekilde çıkarılması üzerine kuruludur. Böylelikle, numunenin içindeki radyoaktif maddelerin tespiti ve bunların miktarlarının belirlenmesi olanaklı hale gelir. Cihazın çalışma prensibi, gama ışınlarının etkileşimde bulunduğu detektör aracılığıyla üretilen elektrik sinyallerinin analizi ile şekillenir. Bu analiz süreci, numunedeki radyoizotopların aktivite düzeyleri ve enerji değerlerinin saptanmasına imkân tanır.

Gama spektrometresi, çevre örneklerinin analizinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan bir sistemdir. Bu sistemin en sık tercih edilen türleri, germanyum ve silisyumdan üretilenlerdir; bununla birlikte, selenyum gibi elementler, bakır oksit, galyum arsenik, indiyum fosfor ve kurşun sülfür gibi bileşikler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmamızda, yapı malzemesi örneklerinin gama spektrometrik analizleri, talyum katkılı sodyum iyodür (NaI(Tl)) sintilasyon dedektörlü gama spektrometresi sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu tür bir analiz, radyoaktif maddelerin tespiti ve bu maddelerin kaynaklarının belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Diğer bir deyişle, çevresel örneklerin radyoaktivite düzeyinin ölçülmesi, nükleer fizik disiplininin temel konularından birini teşkil etmektedir.

Günümüzde en çok tercih edilen sintilatör NaI(Tl)'dür. Sodyum iyodür (NaI) dedektörleri, gama ışınlarını algılamak için kullanılan bir sintilasyon dedektörüdür. Sintilasyon, yüksek enerjili radyasyonun bir malzeme içinde kısa süreli bir ışık parlaması (foton) üretmesi sürecidir. NaI kristalleri, talyum (Tl) katkısıyla optimize

edilerek bu ışık parlamalarını görünür spektruma kaydırır ve algılanabilir hale getirir (Kim vd., 2018).

NaI(Tl) dedektörleri, gama ışınlarının NaI kristaline çarptığında enerjilerini kaybetmesiyle sintilasyon ışığı üretir. Bu süreçte oluşan ışık fotonları, fotomultiplier tüp (PMT) adı verilen bir cihazla elektrik sinyaline dönüştürülür. PMT, bir ışık sinyalini elektriksel sinyale çeviren ve bu sinyali güçlendiren bir cihazdır. Fotomultiplier, sintilasyondan gelen zayıf ışık sinyallerini çok daha güçlü bir elektrik sinyaline dönüştürmektedir (Singh vd., 2020).

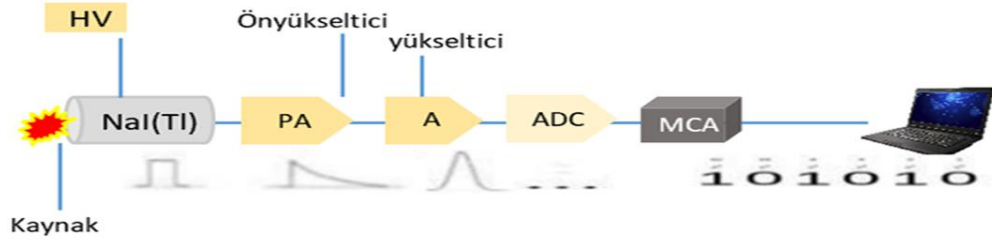
Talyum katkısı, sintilasyon sürecini optimize ederek ışık verimini artırır ve ışığın görünür spektruma kaymasını sağlar. Bu, fotomultiplier tüplerin daha etkili bir şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır. Bu özellik, NaI(Tl) dedektörlerini diğer sintilatörlerden ayıran önemli bir avantajdır. NaI(Tl) dedektörleri, yüksek ışık verimliliği ve geniş enerji aralığında çalışabilme özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu dedektörler, gama ışınlarının enerjisini hassas bir şekilde belirlemek için kullanılmaktadır. Enerji çözünürlüğü, radyasyonun farklı enerjilerde nasıl algılandığını ifade eden NaI(Tl) dedektörlerinin bu konuda oldukça başarılı olduğu belirtilmektedir (Park vd., 2020).

NaI(Tl) dedektörleri, medikal görüntülemede (örneğin SPECT taramaları), nükleer araştırmalarda, çevresel radyasyon izleme ve güvenlik uygulamalarında kullanılmaktadır. Özellikle gama ışınlarının enerji tayininde etkili bir şekilde işlev görmektedir (Kolanoski ve Wermes, 2020).

Geliştirilen ultra saf NaI(Tl) dedektörleri, karanlık madde araştırmaları gibi hassas uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yeni nesil dedektörler, daha düşük radyoaktivite seviyeleri ve yüksek ışık verimi sunmaktadır (Park vd., 2020).

NaI(Tl) dedektörlerinin avantajları arasında düşük maliyet, yüksek ışık verimi ve geniş enerji aralığında çalışma özellikleri bulunmaktadır. Ancak sınırlamaları arasında düşük sıcaklık dayanımı ve nispeten düşük radyasyon sertliği yer almaktadır. Yeni malzeme teknolojileri bu sınırlamaları aşmayı hedeflemektedir (Kadum vd., 2013).

Modüler NaI(Tl) dedektör tasarımları ve yeni katkı maddeleri üzerinde yapılan çalışmalar, dedektörlerin daha geniş uygulama alanlarında kullanılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle enerji çözünürlüğü ve ışık veriminde önemli gelişmeler sağlanmaktadır (Deilami vd., 2024).

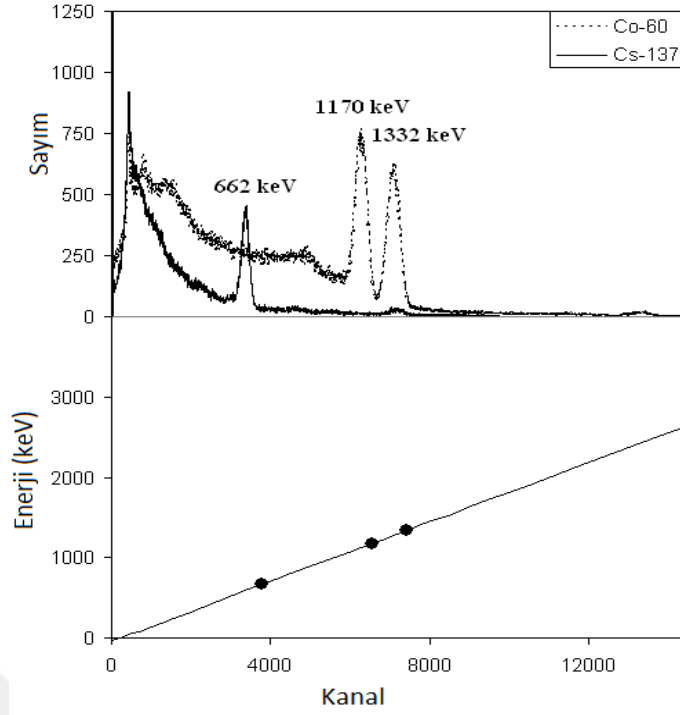


Şekil 3.3. Gama spektrometre sisteminin elektronik üniteleri.

Bir gama spektrometre sisteminin NaI(Tl) dedektörlü elektronik üniteleri, Yüksek gerilim ünitesi (HV), önyükseltici (PA), yükseltici (A), analog dijital çevirici (ADC), çok kanallı analizör (MCA) ve bilgisayar (PC)'dan oluşmaktadır.

Güç kaynağı (HV), dedektörün işleyişi için hayati öneme sahip olan gerilimi sağlamaktadır. Ön yükselteç (Preamplifikatör), dedektör tarafından üretilen görece zayıf sinyalleri yükseltmek ve sonrasında gelen bileşenlerin işleme alabileceği bir seviyeye ulaştırmak amacıyla devreye girer. Yükselteç (Amplifikatör), önyükselteçten gelen göreceli olarak küçük sinyallerin genliğini arttırarak analiz için daha uygun hale getirir. Çok kanallı analizör (MCA) sistemi, sinyallerin derinlemesine incelenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Sistem, her bir çıkış sinyalini dijital formata dönüştürerek, genlik değerleri doğrultusunda belirlenmiş hafıza kanallarında saklar. Her bir kanal, belirli bir enerji seviyesine karşılık gelmekte olup, sayım süresi boyunca toplanan sinyallerle karakteristik pikler oluşturur. Bu pikler, bilgisayar ekranında bir spektrum olarak betimlenir ve detektörden elde edilen çeşitli enerji seviyelerine dayanan sinyallerin kapsamlı bir analizini mümkün kılar.

Gama spektroskopisi cihazlarının enerji kalibrasyonu, radyoaktif kaynakların kullanılmasıyla gerçekleştirilen, ölçüm cihazının ürettiği sinyallerin enerji seviyelerinin belirlenmesine olanak tanıyan bir süreçtir. Bu aşamada, kaynakların spektrumunda oluşturduğu piklerin en yüksek noktalarının analiz edilmesi yoluyla, hangi enerjideki piklerin hangi kanallara denk geldiği ortaya konulmaktadır. (Kılıçaslan S, 2016)



Şekil 3.4. Gama spektrometresinin enerji kalibrasyonu

3.1.2.2. NaI(Tl) dedektörü ile ölçümlerin yapılışı

Gama spektroskopisi, belirli bir örnekte var olan radyoaktif elementlerin yayımladığı gama ışınlarını enerji düzeylerine ayırarak algılamaya dayanır. Bu yöntem, radyonüklitlerin kimliklerinin tespitinde ve kantitatif analizlerde birçok analitik ve nükleer teknikten daha fazla tercih edilen, çok yönlü, hızlı ve pratik bir radyometrik tekniktir. Radyometrik tekniklerin sunduğu tüm avantajları barındıran bu sintilasyon, gama spektroskopisi vasıtasıyla çevresel materyallerin uranyum (U) ve toriyum (Th) içeriklerinin belirlenmesinde kullanılmakta olup, bu süreç her iki radyoaktif serinin gama ışını yayıcı ürün nüklitleri üzerine temellendirilmiştir. Zira, ^{238}U ve ^{232}Th 'nin gama spektrometrik ölçümlerde doğrudan tespit edilmesini sağlayacak kendine özgü karakteristik gamaları bulunmamaktadır; ancak, bozunum zincirlerinde yer alan birçok ürün gama verici özellik göstermektedir.

Uranyum ve toriyumun bozunum ürünleri ile radyoaktif dengede olduğu varsayılarak, ^{238}U serisinde ^{214}Bi 'ün 1.76 MeV, ^{232}Th serisinde ^{208}Tl 'in 2.6 MeV ve ^{40}K 'ın 1.46 MeV yüksek enerjili gamaları kullanılmaktadır. (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007; Özken, 2011; Çam et al., 2013)

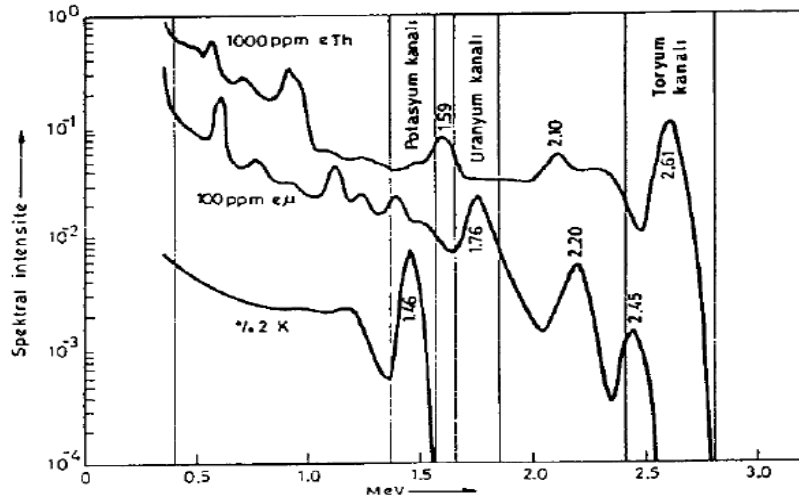
^{238}U serisinde ^{214}Bi 'ün 1764,49 keV, ^{232}Th serisinde ^{208}Tl 'in 2614,53 keV ve ^{40}K 'ın 1460,75 keV yüksek enerjili gamaları üzerine yapılan çalışmalarda, uranyum ve toryumun bozunum ürünleriyle radyoaktif dengede olduğu varsayımı yapılmaktadır.

Uranyum ve toryumun mevcut gama radyasyonları yerine, bu elementlerin radyoaktif bozunma ürünlerinin gama radyasyonları kullanılmaktadır. Elde edilen U ve Th konsantrasyonları, eşdeğer uranyum (eU) ve eşdeğer toryum (eTh) olarak adlandırılmaktadır. Analizlerde ^{40}K 'ın kendi belirgin gaması (1460,75 keV) kullanıldığından bulunan %K konsantrasyonu net bir şekilde potasyum içeriğini vermektedir. (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007).

Radyoelementlerin varlığı, jeolojik örnek matrislerinde çeşitli konsantrasyonlar şeklinde kendini göstermekte olup, bu bağlamda Uranyum, Toryum ve Potasyum en dikkat çekici elementler arasında yer almaktadır. NaI(Tl) sintilasyon dedektörlerinin sınırlı ayırma kapasitesi, bu radyoelementlerin belirli gama enerjilerinin (2.6 MeV, 1.76 MeV, 1.46 MeV) doğrudan konsantrasyon hesaplamalarına dahil edilmesini güçleştirmektedir. Bu durum, sintilasyon gama spektroskopisi ile gerçekleştirilen ölçümlerde dikkate alınması gereken kritik bir unsur olup bu radyonüklitlerin birbirlerine olan katkılarının uygun faktörlerle çıkartılması gerekmektedir. (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007). Uranyum, toryum, potasyum konsantrasyonlarını tespit etmek için belirlenen kanallardaki katkılar uygun faktörlerle çıkarmak gerekir. Bu katkı oranların geometriye ve spektrometrenin farklı ayarlarına ilişkili olarak veren unsurlara Sıyırma (Stripping) Oranları denir. Net sayımlardan %K, ppmU, ppmTh olarak konsantrasyona geçmeyi mümkün kılan faktörlere de Duyarlılık (Sensitivite) Faktörleri denir. (Çavaş M.,2006)

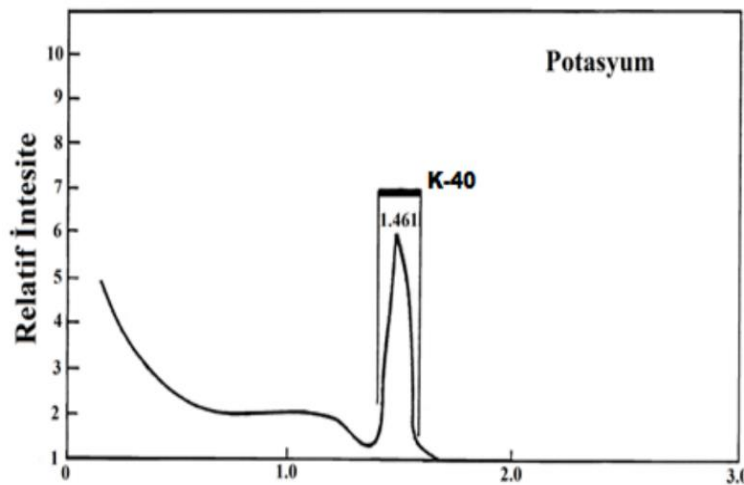
Potasyum spektrumu, NaI (Tl) dedektörünün standart bir yanıtı olarak tek enerjili bir gama kaynağına denk gelmektedir. Potasyumun ^{40}K pikinin enerjisi, 1.461 MeV düzeyinde gama ışınının Compton uzantısını temsil etmektedir. Uranyum spektrumuna gelindiğinde ise, sayıca fazla ürün çekirdeklerinden kaynaklanan gama ışınlarının yanı sıra, girişim etkilerinden uzak olması ve intensitesi (yoğunluğu) yüksek nedeni ile ^{214}Bi 'den gelen 1.76 MeV enerjili gama pikinin analizi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Toryum spektrumu da ise ürün nüklitlerinin bozunmasıyla oluşan birçok gama ışınlarının yanı sıra, yüksek intensitesi ve girişimlerden uzak olması nedeni ile ^{208}Tl 'den gelen bu pik, örnek içindeki Th konsantrasyonunun kantitatif tayininde kullanılır. Jeolojik materyallerde U, Th ve K analizi yapmak için spektrumlarda

yukarıda bahsedilen gama enerjilerine denk gelen enerji aralıkları (kanallar) saptanır. (Şekil 3.4.) (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007; Özken, 2011; Çam et al.,2013)



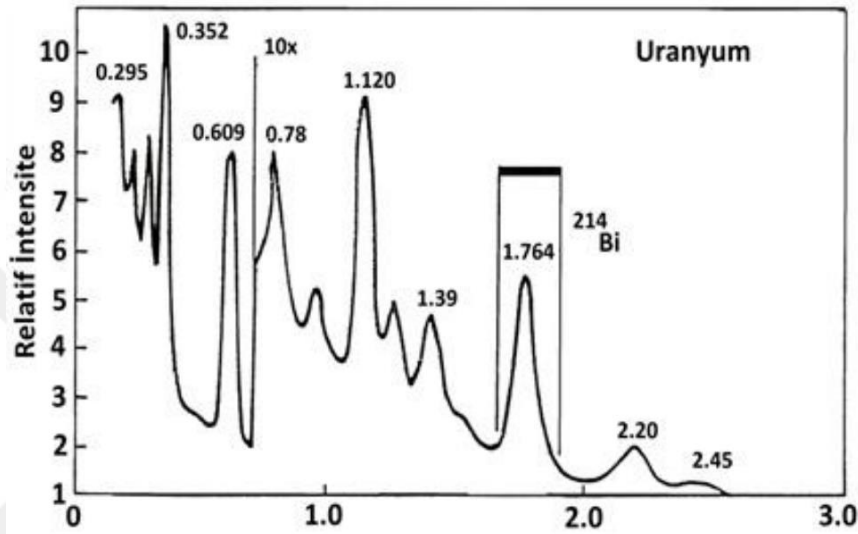
Şekil 3.5. Diğ er kanallardan U, Th ve K kanallarına gelen katkı lar (Yaprak, 1995; Canbaz, 2007; Özken, 2011; Çam et al.,2013)

Potasyum kanalı; Potasyum kanalındaki sayımların büyük bir kısmı art-ortamdan gelir Sistemin bulunduğu odadaki ortamdan potasyum kanalına gelen katkı lar %65 civarındadır (Şekil 3.5). Toryum ve uranyumdan gelen katkı lar ise %15-20 aralığındadır. Potasyum kanallarındaki sayımlar da doğ rudan konsantrasyon hesabında kullanılmazlar potasyum kanallarındaki sayımların çoğ u art-ortamdan kaynaklanmaktadır.



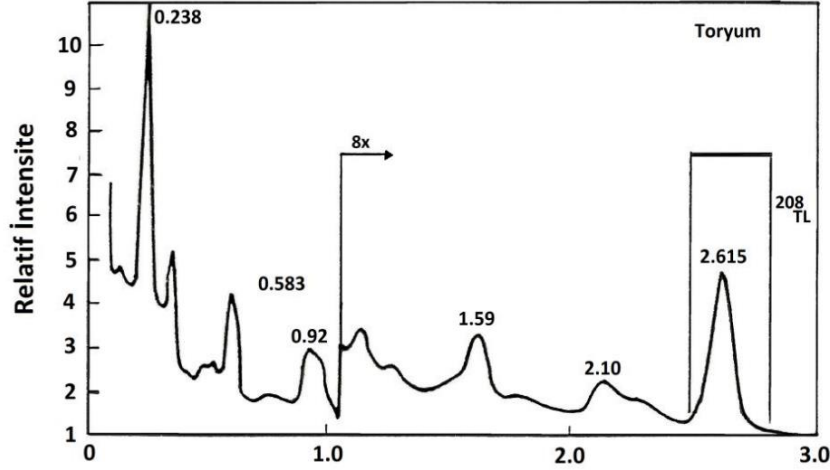
Şekil 3.6. ^{40}K sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011).

Uranyum kanalı; Spektrumda uranyum için belirlenen kanallara toryum'dan kayda değer ölçüde katkılar gelir. Uranyumu belirlemede kullanılan ^{214}Bi 'ün 1.76 MeV gama piki toryum serisinden ^{208}Tl 'in 2.61 MeV enerjili gamasının 2.10 MeV tek kaçak piki ve 1.59 MeV çift kaçak piki arasına düşer (şekil 3.6). Bunlardan başka toryum serisinde ^{228}Ac 'in 1.588 MeV enerjili gaması da uranyum kanalındaki sayımlara katkıda bulunur. Bu nedenle uranyum kanallarındaki sayımlar uranyum konsantrasyonu hesabında direkt olarak kullanılmaz (Yaprak, 1995; Özken, 2011).



Şekil 3.7. ^{238}U sentilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011)

Toryum kanalı; Toryum için tespit edilen kanallardaki sayımların %86'sı toryumdan %2'si uranyumdan kalanı da art-ortamdan gelmektedir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi uranyum spektrumunda bulunan ^{214}Bi 'ün 2.42 MeV enerjili gama pikinden bu kanala az bir katkı gelir (Yaprak, 1995; Özken, 2011).



Şekil 3.8. ^{232}Th sintilasyon gama spektrumu ve seçilen enerji aralığı (Yaprak, 1995; Özken, 2011)

Sıyırma oranları aşağıda belirtildiği gibi hesaplanır;

(Denklem 3.1, Denklem 3.2., Denklem 3.3.)

$$\alpha = \frac{\text{Toryumdan uranyuma gelen katkı}}{\text{Toryum net sayımı } (Th_{net})} \quad (3.1.)$$

$$\beta = \frac{\text{Toryumdan potasyuma gelen katkı}}{\text{Toryum net sayımı } (Th_{net})} \quad (3.2.)$$

$$\gamma = \frac{\text{Uranyumdan potasyuma gelen katkı}}{\text{Uranyum net sayımı}} \quad (3.3.)$$

Duyarlılık faktörleri aşağıda belirtildiği gibi hesaplanır;

$$K_1 = \frac{C(\text{Th})}{Th(\text{ppm})} \quad (3.4.)$$

$$K_2 = \frac{C(\text{U})}{U(\text{ppm})} \quad (3.5.)$$

$$K_3 = \frac{C(\text{K})}{\%K} \quad (3.6.)$$

$C(\text{Th})$ = Toryum kanallarındaki net sayım

$Th(\text{ppm})$ = Standardın ppm olarak Th içeriği

$C(\text{U})$ = Uranyum kanallarındaki net sayım

$U(\text{ppm})$ = Standardın ppm olarak U içeriği

$C(\text{K})$ = Potasyum kanallarındaki net sayım

$\%K$ = Standardın % olarak potasyum içeriği

Geçerli standartlar ile duyarlılık faktörleri ve sıyırma oranları saptandıktan sonra, örnek içindeki eU, eTh ve %K konsantrasyonlarına aşağıdaki adımlar izlenerek geçilir (Yaprak, 1995; Özken, 2011).

$$e(Th)=C(Th)/K_1 \quad (3.7.)$$

$$e(U)=1/K_2[C(U) -\alpha.C(Th)] \quad (3.8.)$$

$$C(K)=1/K_3[C(K)-\gamma[C(U)-\alpha.C(Th)]-\beta C(Th)] \quad (3.9.)$$

Currie esaslarına göre gama spektrometre sisteminin tespit edebileceği minimum saptanabilir aktiviteler (MDA) aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Currie, 1968; Canbaz Öztürk, 2015)

$$MDA = \frac{2,79+3,29\sqrt{\mu_B}}{K} \quad (3.10)$$

Bu eşitlikte; μ_B tabii art-ortam sayım hızı ve K kullanılan gama spektrometre sisteminde, ölçümlerde $Bqkg^{-1}$ olarak aktiviteye geçmekte kullanılan kalibrasyon faktörleridir (K_{Ra} , K_{Th} , K_K) (Yaprak, 1995; Canbaz Öztürk, 2015). (3.10) denkleminde yararlanarak gama spektrometre sisteminin 30 000 s'de ölçebileceği MDA'lar; ^{238}U için $10 Bqkg^{-1}$, ^{232}Th için $10 Bqkg^{-1}$ ve ^{40}K için $50 Bqkg^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

3.1.2.3. Radyolojik risk parametrelerinin hesaplanması

Çalışma alanından toplanan yapı malzemeleri içindeki radyoaktif elementlerin orantılı dağılmaması sebebiyle ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite değerlerini ve bunların radyasyon riskini göstermek amacıyla kullanılan ortak radyolojik parametreye Radium eşdeğer aktivitesi $Bqkg^{-1}$ denir ve bu değer aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır. (Zuhur. S 2014, Asaduzzaman, K., Mannan, F., Khandaker, M., Farook, M.S. ve Elkezza, A., 2015)

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43 \times A_{Th} + 0,077A_K \quad (3.11)$$

Burada ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ($Bqkg^{-1}$ biriminde) ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla A_{Ra} , A_{Th} ve A_K ifade edilir. (3.11) bağıntısında Ra_{eq} radyasyon zarar indeksi; $370 Bqkg^{-1}$ ^{226}Ra , $259 Bqkg^{-1}$ ^{232}Th ve $4810 Bqkg^{-1}$ ^{40}K radyonüklitinin aynı miktarda gama dozu ürettiği varsayımına dayanmaktadır. Radyolojik risk açısından Ra_{eq} aktivitesinin $370 Bqkg^{-1}$ 'i tavsiye edilir. (UNSCEAR, 1988).

^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivitesine bağlantılı olarak yayılan gama dışındaki (D_{out}) ve yapı içindeki D_{in} (nGy.h^{-1}) soğrulma oranını ve gama soğrulma dozunu hesaplamak için aşağıda verilen eşitlik kullanılır.

$$D_{\text{out}} = 0,92 \times A_{\text{Ra}} + 1,1 \times A_{\text{Th}} + 0,08 \times A_{\text{K}} \quad (3.12)$$

Burada yapı malzemelerinden kaynaklanan havada absorblanan gama dozu için doz dönüşüm katsayıları kullanılır. 0,92, 1,1 ve 0,08 sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için doz dönüşüm katsayılarıdır. Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Bazı yapı malzemelerinde doz hesabında kullanılan doz dönüşüm katsayıları (EC, 1999)

Işınlanmaya neden olan bir binadaki yapılar	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Zemin, Tavan ve duvarlar(Bütün yapılar)	0,92	1,1	0,08
Zemin ve duvarlar(tahta kaplama)	0,67	0,78	0,057
Sadece zemin(beton zeminli tahta ev)	0,24	0,28	0,020
Yüzeysel malzeme: duvarlardaki kiremit ya da taş	0,12	0,14	0,0096

Yapı içinde soğrulan doz oranı dışarıdan fazla olması nedeniyle iç soğurma oranını bulmak için;

$$D_{\text{in}} = 1,4 \times D_{\text{out}} \quad (3.13)$$

Yıllık etkin doz miktarı (AED) ($\mu\text{Sv.y}^{-1}$) nı hesaplamak için (3.13) formülü kullanılarak;

$$\text{AED}(\mu\text{Svy}^{-1}) = D_{\text{in}}(\text{nGyh}^{-1}) \times 8760 (\text{hy}^{-1}) \times 0,7 \text{ SvGy}^{-1} \times 0,8 \times 10^{-3} \quad (3.14)$$

Burada D gama doz oranı, (8760 saat) ışınlanma süresi, 0,8 katsayısı insanların yaşamlarının %80’ini bina içi ortamlarda geçirdiği varsayımı yapılarak geliştirilmiş bir katsayı ve 0,7 Svy^{-1} ise doz dönüşüm katsayısıdır. (UNSCEAR, 1988, 1993, 2000)

(Asaduzzaman, K., Mannan, F., Khandaker, M., Farook, M.S. ve Elkezza, A., 2015)
(Zuhur, S. (2014))

Yapı Malzemelerindeki güvenlik gereksinimlerinin Avrupa komisyonu tarafından tavsiye edilen gereksinimleri karşılandığına karar vermek iç gama indeksinin (I_Y) hesaplanmalıdır. Denklem (3.15) ile hesaplanır.

$$I_Y = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000} \quad (3.15)$$

$I_Y \leq 1$ olması soğrulan yıllık gama dozunun 1 mSv.y^{-1} 'a eşit veya küçük olmasına $I_Y \leq 0,5$ olması ise yıllık soğurulan gama dozunun $0,3 \text{ mSv.y}^{-1}$ 'a eşit veya küçük olduğunu gösterir. Bu dozun 1 mSv.y^{-1} 'dan az olması beklenir.

Tablo 3.2. Aktivite konsantrasyon indeksinin doz kriteri ve kullanılan malzemenin miktarına bağılı olarak değışimi (OECD," Paris,(1979).EC(European Commission), Cenevre,(1999).

Doz kriteri	$0,3 \text{ mSv.y}^{-1}$	1 mSv.y^{-1}
Yığın miktarda kullanılan malzemeler, beton v.b.	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
Kısıtlı kullanımlı yüzeysel ve diğere malzemeler; fayans v.b.	$I \leq 0,2$	$I \leq 6$

Alfa indeksi (I_α) yapı malzemelerinden salınan radon gazının solunmasına bağılı olarak maruz kalınan radyasyonun değeriendirilmesinde kullanılan indekstir.

$$I_\alpha = \frac{A_{Ra}}{200} \quad (3.16)$$

Denklem (3.16) ile bu indeksin değeri hesaplanabilir. Yapı malzemeleri için güvenli I_α değeri, 1'den az olmalıdır.

Yapı malzemelerinden kaynaklanan dış radyolojik riskin belirlenmesi için dış risk indeksi (H_{ex}) kullanılır. Denklem (3.17) ile hesaplanır.

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (3.17)$$

Ekonomik İş birliğı ve Kalkınma Örgütü (OECD) tarafından belirlenen ve uluslararası kabul edilen güvenli H_{ex} değeri, $H_{ex} \leq 1$ olmalıdır. Yapı malzemelerinden yayılan dış radyasyona yıllık maruz kalma limiti $1,5 \text{ mSv.y}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

Dış radyasyona ek olarak, radon ve radonun bozunmasıyla oluşan kısa ömürlü izotoplarda solunum organları için risklidir. Yapı içinde, yapı malzemelerinden salınan radon gazına maruz kalma miktarının belirlenmesinde iç risk indeksi (H_{in}) kullanılır. Denklem (3.18) ile hesaplanır.

$$H_{in} = \frac{ARa}{185} + \frac{ATh}{259} + \frac{AK}{4810} \quad (3.18)$$

OECD tarafından belirlenerek uluslararası kabul edilen güvenli H_{in} değeri 1'in altında olmalıdır.

3.1.3. Doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi için numunelerin ölçüme hazırlanması

Kocaeli ili Gebze ilçesinden toplanan 32 yapı malzemesi numunesi Sakarya Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarına getirilmiştir. Yapı malzemesi numunelerinden toz halinde bulunmayanlar öncelikle toz haline getirilmiştir. Sonrasında elenmiştir.



Şekil 3.9. Bazı numunelerin toz haline getirilmesi ve elenmesi.

Radyonüklid aktivasyon miktarlarının belirlenmesini etkileyen faktörlerden biri olan nemi ortadan kaldırmak için numuneler, laboratuvarda bulunan Etüv' de 110 °C de 24 saat sürede kurutulmuştur. Darası alınmış pvc kaplara konulan ve özdeş kütlede etiketlenen numunelerin radyoaktif dengenin sağlanabilmesi amacı ile ağızları hava geçirmeyecek şekilde geniş bantla bantlanıp sıkıca kapatılmış ve iki ay süreyle bekletilmiştir. Bu süre sonunda ölçümlere başlanmıştır.



Şekil 3.10. Bazı numunelerin kaplara yerleştirilmesi ve etiketlenmesi

Yapı malzemelerindeki radyonüklid aktivite ölçümleri Canberra AMP/TSCA (Model 2015A) Amplifer, Canberra Multipot II ve Genie 2000 spektroskopi yazılımları ile birlikte NaI(Tl) gama sintilasyon dedektörü (Tennelec 3"x3") kullanılarak yapılmıştır. Dış ortam gama radyasyonundan ölçümün etkilenmemesi için, dedektör 7,5 cm kalınlığındaki kurşun zırh ile kaplanmıştır. ^{40}K kendi yaydığı gama ışınlarıyla ölçülürken, ^{232}Th ve ^{226}Ra radyonüklidleri çok düşük bir olasılıkla düşük enerjili gama ışını yaydıklarından kendi gama ışınlarıyla ölçümlerini yapmak pek mümkün değildir. Bununla birlikte, ^{232}Th ve ^{226}Ra 'nın bozunum ürünlerinin gama ışını aktivitelerini ölçmek mümkündür. (Taskin H., Karavus M., Ay P., Topuzoglu A., Hidiroglu S., Karahan G., 2009.) (Baldık R., Aytekin H., Erer M., 2011.)

^{226}Ra 'nın aktivite ölçümü ^{214}Bi 'den yayılan 1,76 MeV'lik gama ışınlarıyla, ^{232}Th 'nin aktivitesi ^{208}Tl 'den yayılan 2,62 MeV'lik gama ışınlarıyla, ^{40}K 'ın aktivitesi ise 1,46 MeV'lik kendi gama ışınlarıyla belirlenmiştir. Her bir örnek için üç kez sayım yapılmıştır. Standart örnekler ^{226}Ra (118 ppm), ^{232}Th (600 ppm) ve ^{40}K (%52,45) için sistem kalibrasyonu yapılmış ve dedektör verimi aynı standart örnekler ile belirlenmiştir. Fotopik etkisi %2,6 ^{226}Ra , %2,3 ^{232}Th ve %3,1 ^{40}K olan bir dedektör kullanılmıştır. (Ichedef M., Sac M.M., Camgoz B., Bolca M., Demirel N., Oruc O.E., 2015)

3.2. SEM ve EDS Analizleri

Bu bölümde, çalışmada yapı malzemesi olarak kullanılan 16 numunenin (Alçı 1, Alçı 2, Ateş Tuğla, Derz 1, Granit 1, Çimento, Dolomit, Gaz Beton, Derz 2, İzolasyon Tuğla 1, Kalsit, Kiremit, Sönmüş Kireç, Seramik, Sıva, Tuğla) mikro yapı özelliklerini

ve kimyasal bileşimlerini değerlendirmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi (EDS) tekniklerinden yararlanılmıştır.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), odaklanmış bir elektron demetinin iletken veya iletken hale getirilmiş örnek yüzeye yönlendirilmesi prensibiyle çalışan, yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme tekniğidir. Elektronların numune yüzeyine çarpması sonucunda ortaya çıkan ikincil elektronlar, geri saçılmış elektronlar ve karakteristik X-ışınları gibi çeşitli sinyaller, numunenin yüzey yapısı hakkında detaylı bilgi sağlar (Goldstein et al., 2003).

SEM ile elde edilen görüntüler, nanometre düzeyinde detay çözümlemesine imkân verir. Bu teknik, özellikle malzemelerin yüzey morfolojisinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik, metal, polimer ve kompozit malzemelerin yanı sıra biyolojik örneklerde de SEM, mikroyapısal karakterizasyon açısından vazgeçilmezdir (Duncumb & Pawley, 2006).

EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), SEM cihazlarına entegre olarak çalışan, örnek yüzeydeki elementel bileşimin belirlenmesini sağlayan analitik bir yöntemdir. Yüksek enerjili elektronların atomlarla çarpışması sonucunda ortaya çıkan karakteristik X-ışınlarının ölçülmesiyle çalışır. Bu X-ışınları, her elemente özgü enerji seviyelerine sahip olduğundan, analiz edilen bölgedeki elementlerin kimyasal tanımlanması yapılabilir (Friel, 2003).

EDS sistemleri, noktasal analiz, çizgi tarama ve yüzey haritalama modlarıyla çalışarak element dağılımını detaylı biçimde ortaya koyar. Bu teknik; metal alaşımlarında faz dağılımının, seramiklerde katkı maddelerinin ya da polimer kompozitlerde dolgu malzemelerinin analizi için uygundur. Ancak düşük atom numarasına sahip elementlerde (örneğin $Z < 5$) hassasiyet sınırlı olabilir (Williams & Carter, 2009).

SEM ve EDS sistemlerinin eş zamanlı kullanımı hem yüzey yapısının hem de kimyasal bileşimin aynı anda analiz edilmesine olanak tanır. Bu kombinasyon sayesinde, bir numunenin mikroyapısı incelenirken aynı bölgedeki elementel bileşim de tespit edilebilir. Örneğin, çimento esaslı malzemelerde C-S-H fazının mikroyapısal görünümü SEM ile analiz edilirken, içeriğindeki kalsiyum ve silisyum oranı EDS ile saptanabilir. Bu bütüncül analiz yaklaşımı; malzeme karakterizasyonu, yüzey modifikasyonu çalışmaları ve biyomalzeme analizlerinde son derece faydalıdır.

3.3. Yapı Malzemelerinde Radyasyon Soğurma

Radyasyon soğurma deneylerinde kullanılmak üzere Gebze bölgesinden temin edilen yapı malzemeleri, ölçüm sistemine uygun şekilde belirli boyut ve kalınlıklarda kesilmiştir. Numuneler arasında granit, mermer, gaz beton, seramik, ateş tuğlası, tuğla, izolasyon tuğla ve kiremit gibi farklı yapı malzemeleri yer almaktadır. Her bir numunenin kalınlığı, hesaplamalarda kullanılmak üzere dijital kumpas aracılığıyla yüksek hassasiyetle ölçülerek kaydedilmiştir. Farklı kalınlıklarda hazırlanan bu malzemelerden bazı örnekler Şekil 3.11 ‘de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil.3.11. Farklı Kalınlıkta bazı yapı malzemesi örnekleri (Ateş Tuğla, İzolasyon Tuğla, Granit1, Granit2, Granit3, Seramik)

Çalışmanın bu bölümünde toplanan yapı malzemesi örneklerini gama radyasyonları için toplam doğrusal zayıflatma katsayısı (μ , cm^{-1}) araştırılmıştır. Yapı malzemelerinin radyasyon soğurma ölçümleri Sakarya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Laboratuvarı’nda bulunan NaI (Tl) detektörü ile yapılmıştır. Ölçümlerde 1173 keV ve 1332 keV enerjili gama ışınları yayan ^{60}Co radyoaktif kaynağı kullanılmıştır.

Araştırmada ele alınan yapı malzemelerinin gama radyasyonu soğurma özellikleri incelenmiş ve buna ilişkin (μ) toplam doğrusal zayıflatma katsayıları belirlenmiştir.

Bir radyasyon demetinin bir maddeyle karşılaştıktan sonraki zayıflatılmış demetin şiddeti Denklem 3.19'daki Beer-Lambert Yasası'na değişmektedir.

Bu yasa kapsamında toplam zayıflatma katsayısı,

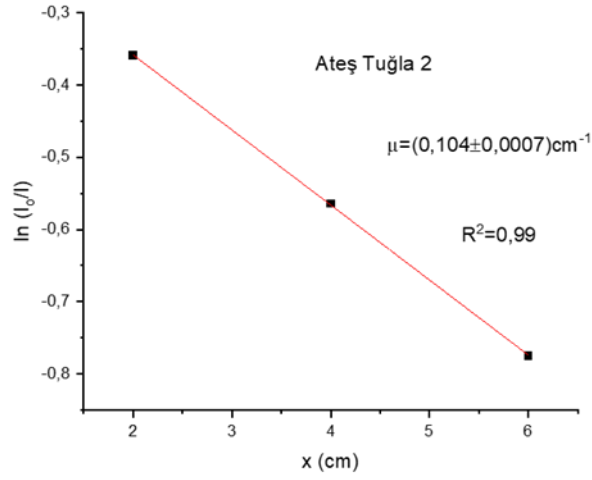
$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} \quad (3.19)$$

Denklemiyle hesaplanmaktadır. Burada x değeri soğurucu maddenin kalınlığı (cm cinsinden) , I_0 ve I ise zayıflatılmamış ve maddeyi geçtikten sonra zayıflatılmış radyasyon demeti şiddetlerini ifade etmektedir.

Deneylerde ilk olarak referans ölçümünü temsil eden I_0 ile ifade edilen değerler belirlenmiştir. Bu aşamada, dedektör ile radyoaktif kaynak arasına herhangi bir yapı malzemesi yerleştirmeden, belirli bir süre (420 s) boyunca kaynaktan yayılan gama radyasyonunun şiddeti ölçülmüştür. Elde edilen bu I_0 değeri, tüm yapı malzemeleri için başlangıç referansı olarak kullanılmıştır.

Devamında, gama ışınlarını zayıflatma potansiyeli incelenecek olan yapı malzemeleri kaynak ile dedektör arasına yerleştirilmiş ve bu malzemelerden geçen zayıflamış ışınların şiddetini temsil eden I değeri ölçülmüştür. Her yapı malzemesi için kaynak – detektör ve kaynak – numune mesafeleri sabit tutulmuş, ayrıca tüm ölçüm süreleri eşitlenerek deneysel koşulların tutarlılığı sağlanmıştır. (Akkurt, vd., 2010b). Ölçümler sırasında, ^{60}Co kaynağı kullanılarak 1173 ve 1332 keV enerjilerine ait piklere odaklanılmıştır. Bu pikler, ölçüm verilerinde ideal Gauss dağılımına uymaktadır. Elde edilen spektrumlarda bu piklerin altında kalan alanlar, MAESTRO-32 analiz yazılımı yardımıyla sayısal olarak hesaplanmıştır. Bu alanlar, Denk. (3.19)'da ifade edilen enerjiye karşılık gelen radyasyon şiddetlerini temsil etmektedir.

Denk. 3.19' da yer alan bir diğer değişken olan numune kalınlığı, 1/100 cm duyarlılığa sahip kumpas aracılığıyla ölçülmüştür. Yapı malzemesi örneklerinin toplam zayıflatma katsayılarının belirlenmesinde ise grafik yöntemi adı verilen yönteme başvurulmuştur. Buna kapsamda, her bir yapı malzemesi türü için en az iki farklı kalınlıkta örnek kullanılarak ölçümler tekrarlanmış ve bu ölçümlerden elde edilen verilerle zayıflatma katsayıları hesaplanmıştır. $\ln(I_0/I)$ değerlerinin ilgili yapı malzemesine ait x kalınlıklarına karşı grafiği çizilmiş; elde edilen veri noktaları üzerine en uygun doğru yerleştirilmiştir. Bu doğrunun eğimi, söz konusu yapı malzemesi için toplam doğrusal zayıflatma katsayısı (μ) olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemin uygulama sürecine ait örnek bir grafik Şekil 3.12' de sunulmaktadır. (Akkurt, vd., 2006; 2010'a).



Şekil 3.12. μ katsayısının grafiksel analiz yoluyla belirlenmesi

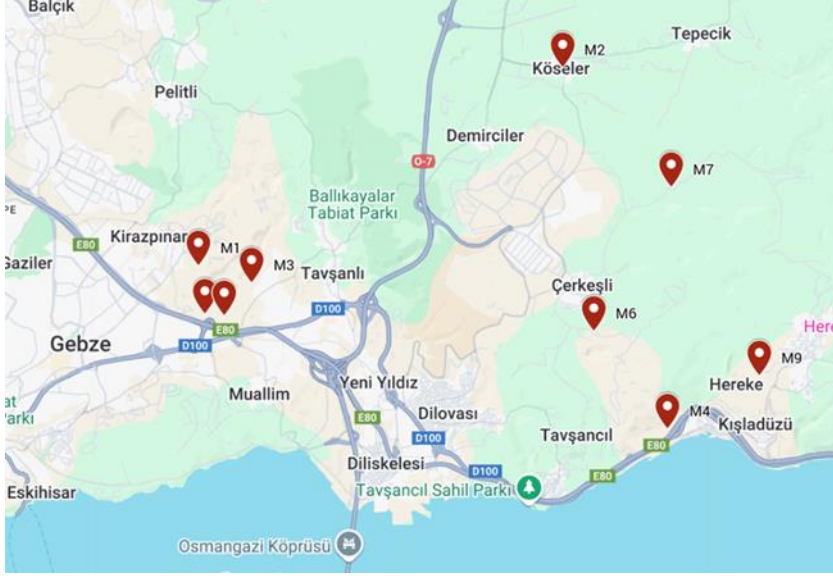
3.4. Toprak Numunelerinde Radon ve Radyum Analizi

Bu tez kapsamında, Gebze bölgesinde yapı malzemesi olarak kullanılan bazı hammaddelerin temin edildiği maden sahalarının çevresinden alınan toprak örnekleri üzerinde Kapalı Kutu Yöntemi uygulanarak, radon yayılım hızı, etkin radon konsantrasyonu ve radyum içeriği belirlenmiştir.

3.4.1. Çalışma alanı

Bu çalışmada kullanılan toprak numuneleri, Kocaeli ili Gebze merkez ve çevresinde bulunan yapı malzemesi üretiminde hammadde olarak kullanılan maden sahalarından temin edilmiştir. Numune alma bölgeleri, hem sanayi yoğunluğunun bulunduğu alanları hem de daha kırsal karakterli çevre köyleri kapsamaktadır. Bu kapsamda; Gebze merkez, Kirazpınar, Tavşanlı, Çerkeşli, Dilovası, Hereke, Körfez ve Köşeler gibi farklı bölgelerden toprak örnekleri toplanmıştır.

Seçilen bu bölgeler, bölgedeki yapı malzemesi üretim potansiyelini temsil etmekte olup, alınan örneklerin yer seçiminde aktif maden ocaklarının faaliyette olduğu sahalar esas alınmıştır. Toplanan örnekler, LR-115 katı hal iz dedektörleri kullanılarak radon yayılım hızı ve efektif radyum aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik deneysel analizlerde kullanılmıştır. Arazi çalışmaları sırasında her numune noktasının konumu harita üzerinde işaretlenmiş (Şekil 3.13) ve bu konumlar analizlerin mekânsal dağılımını değerlendirmek amacıyla belgelenmiştir.



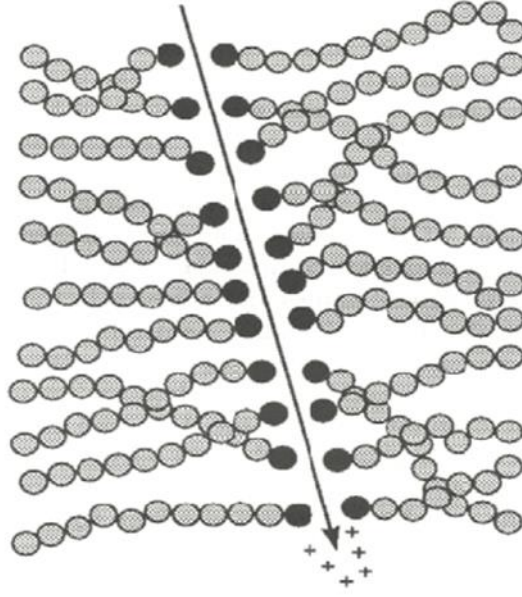
Şekil 3.13. Toprak numunesi alınan bölgelerin harita üzerindeki konumu

3.4.2. Katı hal iz dedektörleri ile kapalı kutu yöntemi kullanılarak radon ölçümü

Radon gazı, toprak ve kayalarda bulunan uranyum ve toryum elementlerinin bozunma ürünüdür ve önemli bir iç ortam hava kirleticisi olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, çevresel radon ölçümleri büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, katı hal nükleer iz dedektörleri (SSNTD) kullanılarak kapalı kutu (sealed can) yöntemi ile toprak örneklerinden radon ölçümleri yapılmıştır (Abu-Jarad et al., 1980; ICRP, 1993).

Katı hal nükleer iz dedektörleri (SSNTD), radon gibi alfa yayıcıların tespiti amacıyla kullanılan pasif dedektörlerdir. Bu dedektörler, genellikle plastik esaslı polimerlerden üretilmiştir ve alfa parçacıkları yüzeylerine çarptığında mikroskobik boyutlarda izler bırakır. Bu izler, kimyasal çözeltilerle kazıma işlemi sonucu görünür hale getirilerek optik mikroskop altında sayılabilir (Nikezic & Yu, 2004; Tommasino ve Furlan, 1980). En yaygın kullanılan dedektörler arasında LR-115 (selüloz nitrat), CR-39 (polikarbonat) ve makrofol yer alır. LR-115 dedektörleri düşük enerjili alfa parçacıklarına duyarlıdır ve kapalı kutu yönteminde tercih edilen dedektör tiplerinden biridir (Tabar, 2010).

Alfa parçacığının enerji transferi sırasında, dedektörün polimer zincirinde moleküler kopmalar veya kimyasal bileşen değişiklikleri meydana gelir. Bu etkileşimler, yapısal deformasyon oluşturur ve bu deformasyonlar film üzerinde taklaşık 1 ila 10 nanometre boyutlarında, çıplak gözle görülemeyen izlerin oluşmasına neden olur. Bu izler daha sonra uygun kimyasal işlemlerle görünür hale getirilerek sayısal analizde kullanılır.



Şekil 3.14. Polimer zincirin yüksek enerjili parçacıklar tarafından hasara uğraması.

Görselde yer alan yatay çizgiler, katı hal iz dedektörlerinin polimer yapıdaki atom düzenini temsil etmektedir. Şeklin üst kısmından aşağıya inen merkezi yol, alfa parçacığının polimer yapı içerisindeki ilerleme rotasını göstermektedir. Bu yol boyunca yer alan (+) sembolleri, alfa parçacığının geçişi sırasında dedektör yapısını iyonize ettiğini ve bu etkileşimlerin mikroskobik hasar oluşturduğunu ifade etmektedir. Bu görsel, yüksek enerjili ve büyük kütleli alfa parçacıklarının polimer dedektör malzemesi ile etkileşimi sonucunda iz oluşumunun nasıl gerçekleştiğini kavramsal düzeyde açıklamaktadır (Durrani & Bull, 1987).

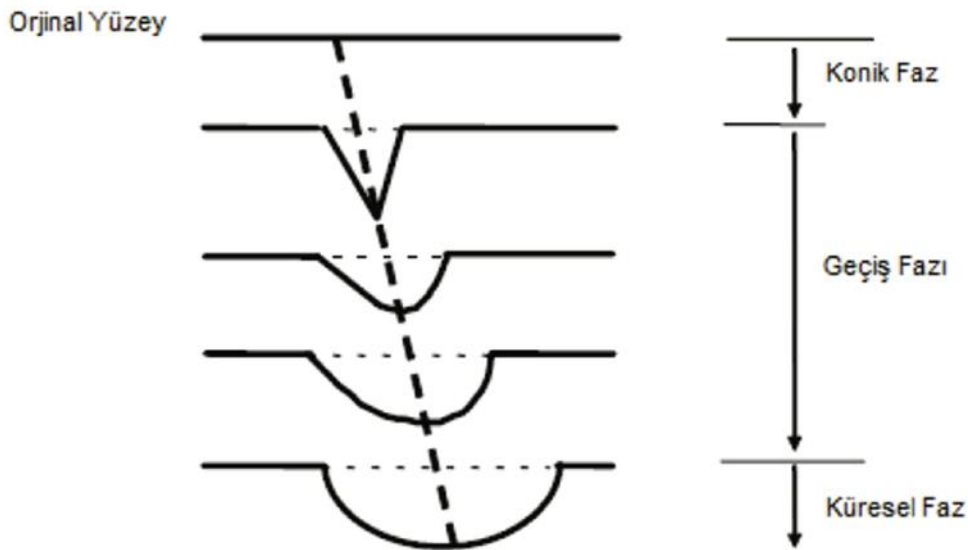
İz kazıma sürecinde, bu mikroskobik bozulmaların görünür hale gelebilmesi için kimyasal çözeltiler kullanılmaktadır. Yaygın olarak NaOH veya KOH gibi bazik çözeltiler ya da HF ve HNO₃ gibi asidik ortamlar tercih edilmektedir. Bu işlem sayesinde daha önce gözle seçilemeyen izler mikron (μm) boyutlarına kadar büyütülerek optik mikroskop altında analiz edilebilecek duruma getirilir.

Deneylerde kullanılacak kimyasal çözelti tipi, iz dedektörünün türüne ve uygulanacak yönteme bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, LR-115 tipi filmle gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle %10 oranında 2,5 N'lik sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi tercih edilmekte ve kazıma işlemi yaklaşık 60 °C sıcaklıkta, iki saatlik süreyle uygulanmaktadır.

Bu kimyasal kazıma yöntemi, dedektör yüzeyinde deformasyon oluşmuş bölgelerin, bozulmamış alanlara göre daha hızlı çözünmesine dayalıdır. Böylece, alfa

parçacıklarının geçtiği güzergâhlarda meydana gelen izler belirgin hâle getirilerek mikroskobik analiz için uygun duruma getirilmiş olur.

Kimyasal iz kazıma süreci sırasında, dedektör filmleri özel çözeltilere daldırılır ve bu işlem, hasar görmüş alanlar ile sağlam bölgeler arasındaki çözünme hızlarındaki farklılık esas alınarak gerçekleştirilir. Kazıma hızı, film yüzeyinin maruz kaldığı alfa parçacığı etkisine göre değişkenlik gösterir. VB sembolü, alfa parçacığıyla etkileşime girmemiş yani yapısal bütünlüğü korunmuş yüzeylerin kazınma hızını belirtirken, VT ise iyonizasyon ve enerji kaybı nedeniyle deformasyona uğramış bölgelerdeki kazıma hızını ifade eder. VB ve VT değerleri; çözeltinin sıcaklığına, derişimine ve etkileşim süresine bağlı olarak değişebilir. Özellikle VT değeri, gelen parçacığın kinetik enerjisine, elektrik yüküne ve kütlesine göre farklılık gösterebilir.



Şekil 3.15 .Polimer dedektör yüzeyinde oluşan iz yapısının evreleri; konik faz, geçiş fazı ve küresel faz.

Şekilde görüldüğü gibi, iz gelişimi üç farklı morfolojik fazdan oluşur:

- Konik faz, yüzey yakınındaki hasarlı bölgenin hızlı çözünmesiyle oluşur,
- Geçiş fazı, kazıma hızlarının dengelendiği ara bölgedir,
- Küresel faz ise iz yapısının son şeklini aldığı ve optik mikroskopla gözlemlenebilecek boyutlara ulaştığı fazı temsil eder.(Nikezic ve Yu, 2004)

3.4.2.1. Kapalı kutu tekniği ile radon ölçüm yöntemi ve yayılım hızlarının tespiti

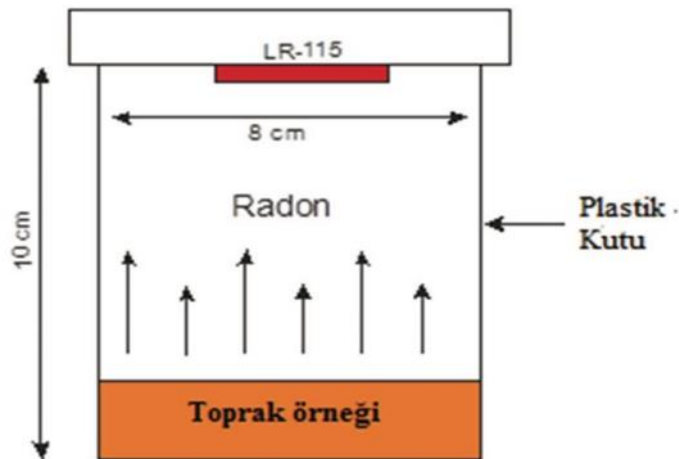
Sealed Can Tekniği olarak bilinen kapalı kutu yöntemi, ilk defa 1980 yılında Abu-Jarad ve çalışma arkadaşları tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bu yöntem, belirli

hacim ve yüksekliğe sahip bir kap içerisinde, LR-115 veya CR-39 gibi katı hal nükleer iz dedektörlerinin birlikte kullanılması prensibine dayanır. Bu teknikte, kapalı ortamda biriken radon gazının etkin biçimde ölçülmesi hedeflenmektedir. Uygulamada, analiz edilmek istenen örnek materyal — toprak, gübre, yapı elemanı veya kum gibi — kabın tabanına yerleştirilir. Kapak kısmının iç yüzeyine ise önceden hazırlanmış dedektör filmleri uygun boyutlarda kesilerek monte edilir. Kabın kapağı hava sızdırmayacak şekilde kapatılır ve ortamla teması tamamen kesilir. (Abu-Jarad vd., 1980).

Örnek, belirli bir süre boyunca bu sızdırmaz kap içerisinde bekletilir. Bu süreçte malzemeden yayılan radon ve bozunma ürünleri, dedektör yüzeyinde alfa izleri oluşturur. Süreç sonunda, dedektörler kutudan çıkarılarak kimyasal kazıma işlemine tabi tutulur ve oluşan izler değerlendirilerek radyum içeriği, radon konsantrasyonu ile kütle ve yüzeye bağlı salım hızları hesaplanır. Bu yöntem, düşük maliyetli olması, kolay uygulanabilirliği ve herhangi bir elektronik cihaz gerektirmemesi nedeniyle çevresel radon ölçümlerinde sıkça tercih edilmektedir. (Abu-Jarad vd., 1980).

Bu çalışmada, radon gazının salınım hızı, yoğunluğu ve etkin radyum konsantrasyonunun belirlenmesinde LR-115 tipi dedektör filmleri ile kapalı kutu yöntemi kullanılmıştır. Deneye ait düzenek Şekil 3.16’da şematik olarak sunulmuştur.

Bu tür bir yöntemde; kullanılan numunenin miktarı, kutunun çapı ve içine yerleştirilen örneğin hacmi, ölçülen radon salım hızı üzerinde doğrudan etkili parametrelerdendir (Abu-Jarad et al., 1980). Bu nedenle, deney düzeneği tasarlanırken bu değişkenler dikkatle optimize edilmiştir.



Şekil 3.16. Kapalı Kutu Tekniği şematik gösterimi.

Deney düzeneğinde, sızdırmazlık sağlanmış kutuların iç kısmına, kapağın alt yüzeyine LR-115 katı hal iz dedektörleri 1,5 cm x 1,5 cm boyutlarında yerleştirilmiştir. Radon gazının sistem dışına sızmasını önlemek amacıyla kutunun kapak bölgesi silikon malzeme ile tamamen yalıtılmıştır. Deney örnekleri, bu düzenek içerisinde 90 gün süreyle bekletilmiştir (Abu-Jarad et al., 1980). Bu bekleme süresi boyunca, numune içerisindeki radonun bozunması sonucu yayılan alfa parçacıkları, dedektör yüzeyine etki etmiş ve oluşan iz yoğunlukları aracılığıyla topraklardaki radyum miktarının Bq/kg cinsinden hesaplanmasına olanak sağlamıştır. Teorik olarak, kutu kapatıldıktan sonra sistemde zamanla biriken radon aktivitesinin, maruz kalma süresi (T) ile doğru orantılı olarak arttığı kabul edilir. Bu ilişki, deneysel hesaplamalarda kullanılan denklemlerden biri olan (3.20.) numaralı ifade ile desteklenmektedir. Radyoaktif denge sağlandığında, dedektörlerde tespit edilen alfa parçacıkları yardımıyla toprak örneklerinin etkin radyum içeriği güvenilir biçimde tayin edilebilmektedir (Khan et al., 2011).

Toprak örneklerindeki radon konsatrasyonu aşağıdaki ifadeyle hesaplanmaktadır:

$$C_{Rn} = C_{Ra}(1 - e^{-\lambda_{Rn} \cdot T}) \quad (3.20)$$

Toprak içerisindeki etkin radyum konsantrasyonu ise şu denklemle belirlenir:

$$C_{Ra} = \frac{\rho \cdot h \cdot A}{k \cdot T_e \cdot M} \quad (3.11)$$

Bu formüldeki değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

ρ (izcm⁻²) : Yüzeydeki İzlerin yoğunluğu

h (cm) : Toprak örneği ile dedektör arasındaki mesafe

A (cm²) : Kutunun taban yüzey alanı

k (Bqm⁻³iz⁻¹cm²h) : Kalibrasyon katsayısı

T_e (h) : Etkin ışınlama süresi

M (kg) : Toprak örneğinin kütlesi

Kutu içine yerleştirilen dedektörler ²²²Rn gazının başlangıçtaki sıfır yoğunluktan denge haline ulaşana kadar geçen sürede yayılan aktiviteyi kaydetmektedir. Bu nedenle, etkin ışınlama süresinin doğru şekilde tespit edilmesi büyük önem taşır. Bu süre, aşağıdaki eşitlikten yararlanılarak hesaplanabilir.

$$T_e = [T - \tau(1 - e^{-\lambda_{Rn}.T})] \quad (3.22)$$

Bu denklemde λ_{Rn} , ^{222}Rn 'nin bozunma sabitini, τ ise ortalama ömürü ($\tau = \frac{1}{\lambda_{Rn}}$) temsil eder. T değeri ise gerçek ışınlama süresi olarak ifade edilir.

Kapalı kutu tekniğinde, belirli hacme sahip kapalı ortam içerisinde radon ve toron gazları ile onların bozunma ürünlerinin radyoaktif dengeye ulaştığı kabul edilir. Hava ortamında, çok kısa yarı ömrü nedeniyle ^{216}Po dışında kalan tüm kısaömürlü bozunma ürünlerinin kap içinde birikmesi beklenir. Ancak bazı izotoplar (örneğin ^{220}Rn ve ^{216}Po) oldukça kısa yarı ömürleri nedeniyle homojen bir dağılım göstermeyebilir.

^{216}Po 'nun bozunmasıyla oluşan ^{212}Po ve ^{212}Bi izotopları, genellikle kapalı kutunun iç yüzeyine düzensiz, yani homojen olmayan bir şekilde dağılmaktadır. Dedektör yüzeyinde gözlemlenen ^{222}Rn iz yoğunluğunun, bu kısa ömürlü kız ürünlerin birikimiyle ilişkili olduğu belirlenmiştir. Topraktan radon gazının salınması sonucu SSNTD tipi dedektör yüzeyine ulaşan alfa parçacıkları, örnek içerisinde bulunan havadaki radonun varlığına işaret eder.

Radon atomlarının bozunması sırasında yok olmasıyla birlikte, belirli bir zaman aralığında sistemdeki toplam atom sayısı $N(t)$ ile ifade edilir. Bu sayının zamana bağlı değişim hızı, aşağıdaki diferansiyel denklem aracılığıyla modellenmektedir.

$$\frac{dN(t)}{dt} = EA - \lambda N(t) \quad (3.23)$$

Diferansiyel denklemde tanımlanan bazı değişkenlerin açıklamaları şu şekildedir:

$N(t)$: t anındaki kutudaki toplam radon atomların sayısı

E : Eksalasyon oranı ($\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$)

A : Kutunun enine kesit alanı (örneğin temas eden taban kesiti),

λ : Radonun bozunma katsayısı (h^{-1})

Eğer başlangıçta sistemde radon bulunmadığı kabul edilirse ($N(0) = 0$), bu durumda (3.23) numaralı denklemin çözümü aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$N(t) = \frac{EA}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (3.24)$$

Bu denklemde kullanılan diğer parametrelerin tanımları şu şekildedir:

$V(m^3)$: Kapalı kutunun içindeki hava hacmi,

$C(t)$: t zamanda, kutunun içindeki radon gazının radyoaktif konsantrasyonu (Chen vd., 1993; Morawska, 1989).

Radon konsantrasyonunun zamana bağlı dağılımı şu denklemle verilmektedir:

$$C(t) = \frac{EA}{\lambda V} [1 - e^{-\lambda t}] \quad (3.25)$$

Katı hal nükleer iz dedektörleri, silindirik kutular içerisinde belirli bir hacimde ve belirli bir süre boyunca gerçekleşen alfa bozunumlarının toplamına maruz kalan alfa ışını miktarını ölçmektedir. Bu nedenle, dedektörler üzerinde oluşan iz yoğunluğu, kutu içerisindeki radon gazının konsantrasyonu ile orantılıdır. Bu ilişki, aşağıdaki matematiksel model ile ifade edilmektedir:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = KC(t) \quad (3.26)$$

Bu denklemde kullanılan değişkenler şu şekilde tanımlanır:

$\rho(t)$: t zamanda tespit edilen İz yoğunluğu,

K : Kalibrasyon faktörü (α izleri. $cm^{-2}gün^{-1}/Bqm^{-3}$)

(3.25) ve (3.26) numaralı bağıntılar birlikte kullanılarak, zamanla iz yoğunluğunun nasıl değiştiği belirlenebilir.

$$\rho = K \int_0^T C(t)dt = \frac{KAE}{\lambda V} \int_0^T (1 - e^{-\lambda t})dt \quad (3.27)$$

İz yoğunluğu için başlangıç koşulu $\rho(0)=0$ alınarak yapılan integral çözümüne göre, aşağıdaki bağıntıya ulaşılır:

$$\rho = K \frac{AE}{\lambda V} [t - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})] \quad (3.28)$$

Bu ifade, zamanla biriken iz yoğunluğunun radon aktivitesiyle nasıl ilişkili olduğunu gösterir. Radon gazının yüzey alanına bağlı olarak salınma hızı (yüzey eksalasyon oranı) aşağıdaki eşitlik ile tanımlanabilir:

$$E_s = \frac{CV\lambda}{AT_{eff}} \quad (3.29)$$

Bu denklemdeki değişkenlerin anlamları şu şekildedir:

$E_s (Bqm^{-2}h^{-1})$: Yüzey radon eksalasyon oranı

$C (Bqm^{-3}h)$: İntegre radon konsantrasyonu

$V (m^3)$: Kutunun efektif iç hacmi

$t (h)$: Radona maruz kalma süresi

$A (m^2)$: Kutunun kesit alanını (eksalasyonun gerçekleştiği yüzey)

Benzer hesaplamalarla, radonun kütleye bağlı eksalasyon oranı (E_M) da benzer bir matematiksel yapı kullanılarak elde edilebilir.

$$E_M = \frac{CV\lambda}{MT_{eff}} \quad (3.30)$$

E_M : Kütleye bağlı radon eksalasyon oranı,

M : Numune kütlesi

Denklem (3.29) ve (3.30)'de yer alan $C(t)$ dışındaki terimler bilinen parametrelerdir. $C(t)$ değeri ise deneysel olarak, Selüloz Nitrat esaslı LR-115 Tip II dedektörleri kullanılarak radon dozimetrisinde ölçülebilmektedir. Elde edilen $C(t)$ verisi, söz konusu denklemlerde yerine konularak radonun eksalasyon oranları hesaplanabilir. Toprakten yayılan radon gazı genellikle yüzeye bağlı olarak salındığından, yüzeysel eksalasyonla ilişkilendirilir. Kapalı kutu yöntemi, hem ekonomik hem de uygulama kolaylığı sağladığı için bu tür analizlerde sıkça tercih edilmektedir. Ancak, ölçüm süresince yaşanabilecek sızıntılar ya da radonun geri difüzyon mekanizması gibi etmenler, salınım oranlarının doğruluğunu olumsuz etkileyebilir (Saad et al., 2013).

Toprak kaynaklı radon salınımı ile iç ortam hava aktivitesi arasında anlamlı bir ilişki olduğu bilinmektedir. Toprak örneklerinden elde edilen radon salınım oranları kullanılarak, bu değerlerin bina içi radon birikimine olan katkıları aşağıdaki formülle belirlenebilir:

$$C_{Rn}^{ind} = \frac{E_A S_r}{V_r \varphi} \quad (3.31)$$

Bu formülde kullanılan değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanır;

$\varphi = 0,5 h^{-1}$: Havanın akış oranı

S_r : Kapalı ortamın alanı

V_r : Hacim

Çalışmada ele alınan iç ortamın alan/hacim oranı $\frac{S_r}{V_r} = 2,0 m^{-1}$ olarak kabul edilmiştir. Radon gazı ve bozunma ürünlerinin neden olduğu ileri düzey radyolojik

etkilerin değerlendirilmesi için yıllık etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, ^{222}Rn 'un ve onun bozunma zincirindeki kısa ömürlü ürünlerin katkısıyla oluşan toplam doz, ICRP'nin 1993 tarihli teknik raporuna göre değerlendirilmiştir (ICRP, 1993).

Bu bölümde, radon ürünlerinin yoğunluğu Bq/m^3 birimi yerine, çalışma düzeyi (Working Level – WL) olarak ifade edilmiştir. Buna göre, otuz günlük (yaklaşık bir aylık) sürede 170 saatlik bir çalışma periyodu süresince, bir bireyin bir çalışma seviyesi (WLM) kadar radon ürünlerine maruz kalması esas alınmıştır.

Bu çalışmada, radon ürünlerinin konsantrasyonu Bq/m^3 cinsinden değil, çalışma düzeyi birimi olan WL (Working Level) ile ifade edilmiştir. Otuz günlük süre boyunca (yaklaşık bir ay), bir bireyin 170 saat boyunca 1 WL ürün konsantrasyonuna maruz kalması durumu, bir çalışma seviyesi (WLM) olarak tanımlanır. Yıllık maruziyet düzeyini ifade eden WLM/y değeri, Nazaroff ve Nero'nun önerdiği hesaplama yöntemiyle aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$(\text{WLY})\text{y}^{-1} = \frac{t.n.F.C_{\text{Rn}}^{\text{ind}}}{170.3700} \quad (3.32)$$

Bu formülde

- $C_{\text{Rn}}^{\text{ind}}$ İç ortamdaki radon aktivitesine katkıda bulunan toprak kaynaklı radon konsantrasyonu (Bq/m^3)
- $t = 8760$ saat: Bir yıl içindeki toplam süre
- $1/3700$: Dönüşüm katsayısı ($\text{WL/Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
- 170 saat: Aylık çalışma süresi
- n : Hava değişim oranı (0,8)
- F : Radon dengesizlik faktörü (0,4)

Bu çalışmada, radonun neden olduğu yıllık etkin doz hesaplamalarında ICRP'nin 1987 tarihli rehberinde önerilen $6,3 \text{ mSv/WLM}$ dönüşüm faktörü esas alınmıştır (ICRP, 1987).

3.4.3. Toprak numunelerinin analizi

Bu çalışma kapsamında, Kocaeli ili Gebze merkez ve çevresindeki çeşitli maden sahalarından toplam 9 adet toprak numunesi alınmıştır. Her bir örnek, numunenin alındığı noktaya ilişkin koordinat bilgisi, tarih ve çevresel koşullarla birlikte detaylı biçimde kayıt altına alınmıştır. Numune alma işlemi sırasında, öncelikle yüzeydeki

bitki örtüsü ve taşlar uzaklaştırılmış, ardından yaklaşık 15–20 cm derinliğinde “V” şeklinde bir çukur açılarak her biri 1–1,5 kg arasında değişen miktarlarda toprak örneği alınmıştır.

Toprak örnekleri, dış ortamla teması engellemek amacıyla ağızları kilitli torbalara yerleştirilmiş ve etiketleme yapılarak saklanmıştır. Deneysel işlem öncesinde, numuneler 2 mm gözenekli elek ile elenmiş, taş ve yabancı cisimlerden arındırılmıştır. Ardından, örneklerdeki nem oranını minimize etmek amacıyla topraklar, 110 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Hazırlanan örnekler, analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi bünyesinde yer alan Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarına getirilmiştir.

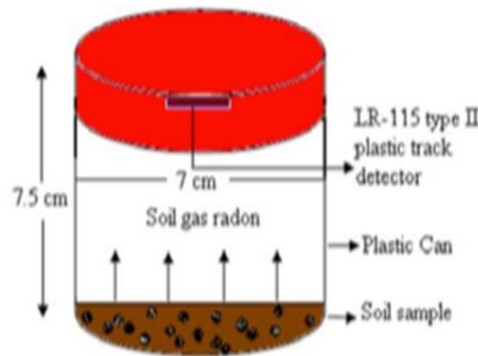


Şekil 3.17.Kurutulmuş ve öğütülmüş Toprak Örneklerine Ait Temsili Görsel.

Hazırlanan toprak örnekleri, her biri 125 gram olacak şekilde hassas terazide tartılmış ve ardından her numune, 500 ml hacmindeki kaplara ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Bu işlem, tüm örneklerde aynı standartta uygulanmıştır.

Deney düzeneğinde dikkat edilmesi gereken en önemli aşamalardan biri, LR-115 Tip II dedektör filmlerinin yerleştirilmesidir. Bu aşamada, filmler 1.5 cm x 1,5 cm boyutlarında kesilerek plastik kutuların iç kapağına, toprak örneğine dönük olacak biçimde sabitlenmiştir. Üst kapak hava geçirmez şekilde kapatıldıktan sonra,

sızdırmalığı sağlamak amacıyla çevresi silikon malzeme ile izole edilmiştir. Bu hazırlığın ardından kutular 90 gün boyunca sabit ortamda beklemeye alınmıştır.



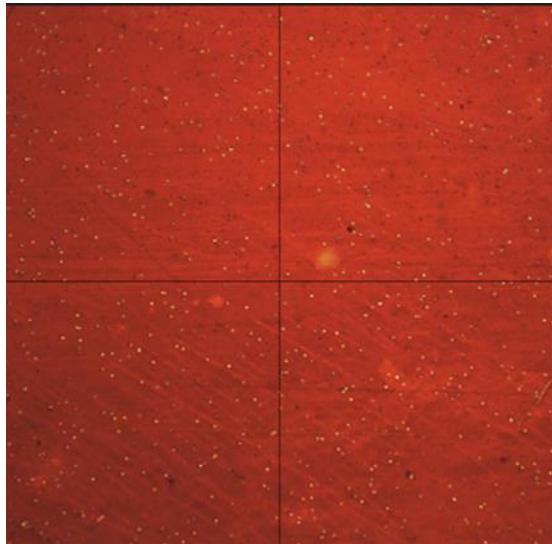
Şekil 3.18. Kapalı kutu yöntemine ait şematik gösterim.

Şekil.3.18’de, LR-115 tipi dedektör filmlerinin plastik kapak içine yerleştirildiği, radon gazının topraktan salınıp filmle etkileşime geçtiği deney düzeneği şematik olarak sunulmaktadır. Bekleme süresi boyunca, toprak içerisinde bulunan radyumun bozunmasıyla açığa çıkan radon gazı ve türevleri, LR-115 dedektör filmleriyle etkileşime girerek mikroskobik izlerin oluşmasına neden olmuştur. Ancak bu izler, çıplak gözle fark edilemeyecek kadar küçük boyutlara sahip olduğu için, görünür hale getirilmeleri amacıyla kimyasal iz kazıma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde her bir film için 25 ml’lik %10 oranında sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi hazırlanmış; bu da 2,5 gram NaOH içerdiği anlamına gelir. Deney düzeneğinde 90 gün süreyle bekletilen LR-115 filmleri, 2,5 N NaOH çözeltisinde 60 °C sıcaklıkta yaklaşık 90 dakika (1,5 saat) boyunca iz kazıma işlemine tabi tutulmuştur. Kazıma sürecinin ardından, filmler yaklaşık 15-20 dakika boyunca saf suda durularak temizlenmiş ve böylece mikroskop altında gözlenebilecek netlikte izler elde edilmiştir.



Şekil 3.19. İz kazıma işlemi sırasında kullanılan deney düzeniğine ait görsel.

Deneyin son aşamasında, LR-115 Tip II dedektör filmleri üzerindeki alfa parçacıklarının oluşturduğu iz yoğunluğu (iz/cm^2), 100 kat büyütme özelliğine sahip bir optik mikroskop aracılığıyla analiz edilmiştir. Görsel verilerin değerlendirilmesinde ise ImageJ yazılımı kullanılarak sayısal iz yoğunlukları belirlenmiştir.



Şekil.3.20. İmageJ programı aracılığıyla elde edilen izlerin mikroskopik görüntüsü.

Yürütülen deneysel çalışma sonucunda elde edilen iz yoğunluğu değerlerinin uluslararası verilerle karşılaştırılabilir olması amacıyla, TENMAK ÇNAEM

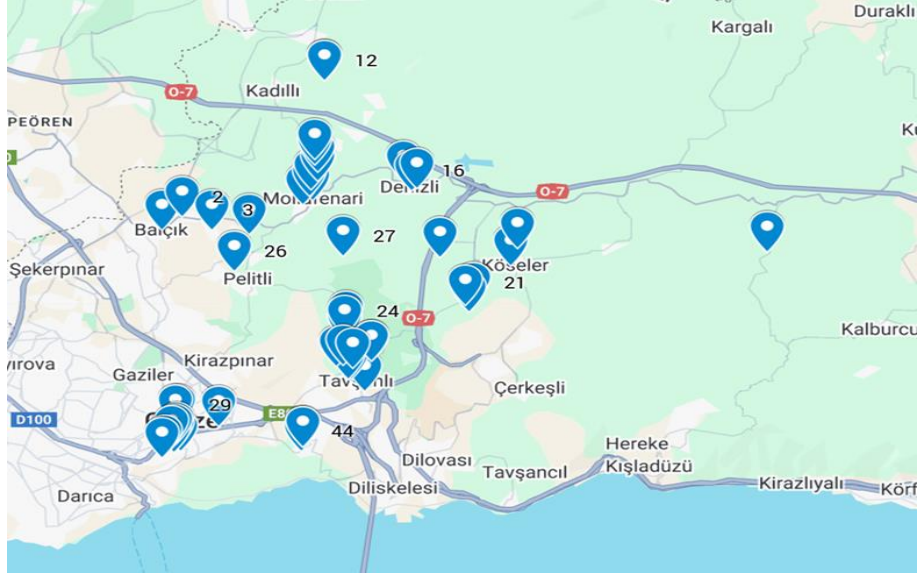
tarafından önerilen katsayı yardımıyla dönüştürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu dönüşüm sayesinde, iz/cm^2 cinsinden elde edilen sonuçlar, Bq/m^3 birimine çevrilerek aktivite değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu verilerden, etkin ^{226}Ra konsantrasyonu (Bq/kg), yüzey ve kütleyle bağlı radon eksalasyon oranları ; sırasıyla denklem (3.21), (3.29) ve (3.30) kullanılarak belirlenmiştir.

3.5. Su Numunelerin Radon Analizi

3.5.1. Çalışma bölgesi

Çalışmanın bu kısmında incelenen bölge, Kocaeli ilinin Gebze ilçesi ve çevresindeki kırsal yerleşim alanlarını kapsamaktadır. Su örnekleri, Gebzenin merkez mahallelerinden Tatlıkuyu ve Hacıhalil ile birlikte, kırsal karakterdeki Muallimköy, Tavşanlı, Demirciler, Pelitli, Kadıllı, Cumaköy, Denizli, Köseler, Tepecik, Balçık ve Mollafenari köylerinden toplanmıştır. Bu yerleşim alanları; içme, kullanma ve yer altı suyu kaynaklarını temsil etme potansiyelleri, ayrıca doğal ve beşerî su kaynaklarına yakınlıkları göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Bölge, Marmara Bölgesi'nin aktif tektonik zonlarından birinde yer almakta olup, farklı yaş ve kökene sahip kayaç birimlerinin bir arada bulunduğu karmaşık bir jeolojik karakter sergilemektedir. Yer yer görülen kireçtaşı gibi karstik yapılar, yer altı suyu dolaşımı üzerinde etkili olmaktadır. Jeolojik birimlerin fiziksel yapısı, bölgedeki yer altı suyu hareketi ve taşınım mekanizmaları üzerinde doğrudan etkili olup, su örneklerinde ölçülen radyoaktivite düzeylerinin yorumlanmasında önemli bir parametre olarak ele alınmıştır. (Karaman, N.S. (2010)) Bu doğrultuda, örnekleme yapılan tüm noktaların coğrafi konumları Şekil.3.21' de sunulmuştur.



Şekil 3.21.Gebze ve çevre köylerinden alınan su numunelerine ait konumların harita üzerindeki dağılımı.

Tablo 3.3. Numune alınan bölgeler ve koordinatları.

Bölge	Koordinat
Tatlıkuyu	Enlem: 40.7995 Boylam: 29.4391
Hacıhalil	Enlem: 40.8021 Boylam: 29.4307
Muallimköy	Enlem: 40.8050 Boylam: 25.5094
Tavşanlı	Enlem: 40.7982 Boylam: 29.5274
Demirciler	Enlem: 40.8143 Boylam: 29.5482
Pelitli	Enlem: 40.8145 Boylam: 29.5227
Kadıllı	Enlem: 40.8211 Boylam: 29.5561
Cumaköy	Enlem: 40.8225 Boylam: 29.5582
Denizli	Enlem: 40.8195 Boylam: 29.5501
Köseler	Enlem: 40.8207 Boylam: 29.5452
Tepecik	Enlem: 40.8272 Boylam: 29.5539
Balçık	Enlem: 40.8233 Boylam: 29.5186
Mollafenari	Enlem: 40.8292 Boylam: 29.5297

3.5.2. RAD-7 Radon ölçüm cihazı özellikleri

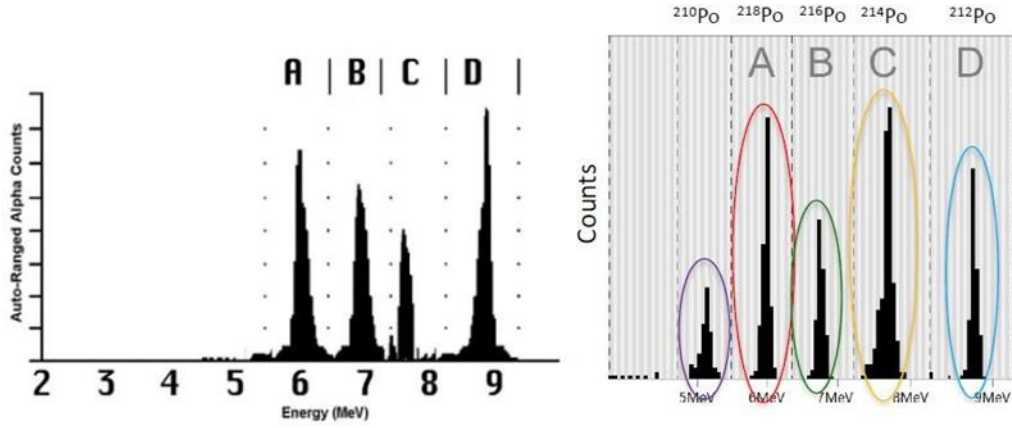
Çalışmada, doğal kaynak suları, yer altı suları ve yüzey suları gibi farklı içme suyu türlerinden toplanan örnekler kullanılacaktır. Her bir örnek, 500ml hacmindeki steril şişelere alınarak Gebze ve çevresindeki çeşitli bölgelerden temin edilmiştir. Elde edilen su örneklerindeki radon konsantrasyonları DurrIDGE Co, (ABD) firmasına ait, RAD H2O ünitesine entegre edilmiş RAD7 radon detektörü ile belirlenmiştir. (DurrIDGE Company, 1997)



Şekil 3.22. RAD-7 radon detektörü (Durrige Company,1997).

RAD-7 cihazı, yüksek hassasiyette ve hızlı veri okuma kapasitesine sahip bir dedektör olup, yaklaşık 5kg ağırlığı sayesinde taşınabilirliği kolaydır. Cihazın ölçüm aralığı 0,004-750 BqL-1 olup, $\pm\%5$ doğruluk payı ile sonuç vermektedir. Kimyasal reaktif kullanımına gerek duyulmaması, bu sistemi hem kullanıcı sağlığı açısından hem de çevre dostu bir hale getirmektedir. Ayrıca zararlı kimyasallarla çalışmayı da ortadan kaldırmaktadır. Böylece radyoaktif maddelerle temasa gerek kalmadan etkili radon ölçümleri gerçekleştirebilmektedir. Cihaz görseli Şekil 3.22.'de sunulmuştur.

RAD-7 cihazı, alfa parçacıklarını algılamak amacıyla katı hal tipi dedektörlerden faydalanmaktadır. Katı hal dedektörleri, genellikle silikon esaslı olup, alfa radyasyonu doğrudan elektrik sinyaline dönüştürme kapasitesine sahiptir. Bu dedektörlerin temel avantajı, yüksek hassasiyetleri sayesinde bir alfa parçacığının enerjisinin elektronik olarak tespit edilebilmesidir. Bu sayede radonun hangi bozunma ürününden (örneğin Po-218, Po-214 vb.) kaynaklandığı belirlenmektedir. RAD-7 cihazıyla yapılan ölçümlerde, algılanan radyasyonun hangi radon izotopuna ait olduğuna dair spektrum grafiklerine ulaşabilmekte ve bu grafikler Şekil 3.23.'de örneklenmektedir. Alfa spektroskopisi olarak bilinen bu yöntem özellikle hava örnekleme (sniffing) veya doğrudan numune alma gibi uygulamalarda oldukça etkilidir. Radonun yanı sıra, numunenin belirli bir süre(yaklaşık bir hafta) bekletilmesi durumunda radyoaktif bozunma zincirindeki radyoaktif radyoizotopların, özellikle radyumun da tayini mümkün hale gelmektedir.



Şekil 3.23. RAD-7 ile elde edilen radon bozunma ürünlerine ait alfa spektrum grafikleri (DurrIDGE Company, 1997).

Şekil 3.23.'te sunulan spektrumda A sütunundaki sinyallerin ^{218}Po 'den izotopundan yayılan 6 MeV enerjili ve ^{212}Bi izotopundan gelen 6,05 MeV enerjili alfa parçacıklarına ait olduğu belirlenmiştir. B sütunundaki sayım ise ^{216}Po 'den gelen 6.78 MeV enerjili alfalara aittir. C sütununda yer alan sayımlar, ^{214}Po izotopuna ait 7,69 MeV enerjili alfa partiküllerinden kaynaklanmaktadır. D sütunundaki veriler ^{212}Po 'den gelen 8,78 MeV enerjili alfa yayılımına işaret etmektedir. Bu bağlamda A-B-C-D sütunları tek bir spektrum üzerinde ifade edilmiş ve spektrum yorumları bu sıralamaya göre gösterilmiştir. Ancak ölçümler sırasında tüm bu izotoplara ait sinyallerin aynı anda elde edilmesi oldukça nadir bir durumdur. Genellikle A spektrumunda gözlenen değer yeni radon (^{222}Rn) olarak, C sütunundaki zirve ise eski radona karşılık gelir. Ayrıca cihazın B spektrumunda tespit ettiği sinyal genellikle (^{220}Rn) toron olarak adlandırılırken, D sütunundaki zirve ise eski toronun bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.

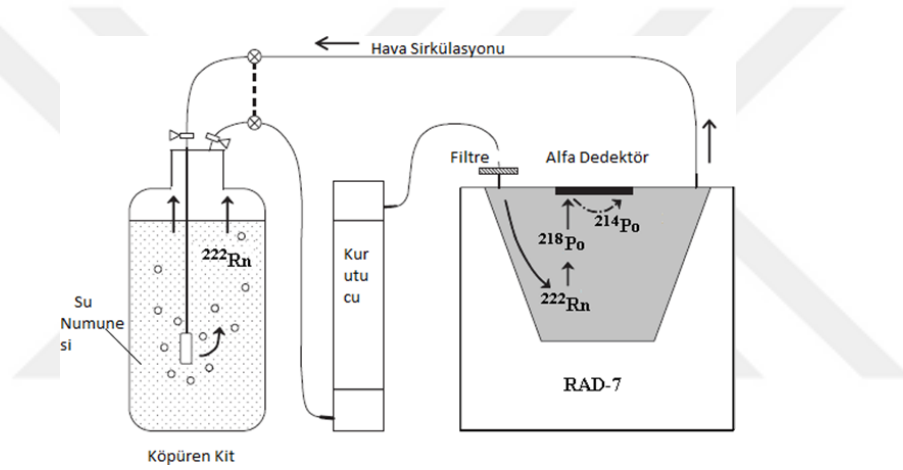
3.5.3. Numune hazırlama ve radon ölçüm düzeneği

Çalışmada kullanılan su örnekleri, Kocaeli ili Gebze ilçesine bağlı Tatlıkuyu ve Hacıhalil mahallelerinin yanı sıra Muallimköy, Tavşanlı, Demirciler, Pelitli, Kadılı, Cumaköy, Denizli, Köseler, Tepecik, Balçık ve Mollafenari köylerinden temin edilmiştir. Her bir bölgeden alınan örnekler, 500 mL hacminde örnekleme şişelerine doldurulmuş ve mevcut radon gazının kaybını en aza indirmek amacıyla, suyun havayla temasını sınırlayacak şekilde dikkatle toplanmıştır.

Numunelerin toplanmasında örnekleme düzenekleri kullanılmış ve bu işlem sırasında şişeler, numune alınmadan önce saf su ile durulanarak radon bulaşı riski minimize edilmiştir. Eğer kaynağın derinliği uygunsa, su örnekleri doğrudan çözünmüş radon

gazının korunmasına imkân tanıyacak şekilde daldırma yöntemiyle alınmıştır. Bu yöntemde, şişe tamamen su altında doldurularak köpürmeden kapatılmış ve dış ortamla temas ettirilmeden sıkıca kapaklanmıştır. Toplanan numunelerin üzerine numara verilmiş ve numunelere ilişkin alınan tarih, bölge adı, ilçe, mahalle ya da köy ismi gibi bilgiler özenle kaydedilmiştir.

Toplanan su örnekleri, sarsılmadan ya da köpürmeye maruz kalmadan, en geç 48 saat içerisinde Sakarya Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarına ulaştırılmıştır. Ölçümler, RAD-7 radon detektörüne bağlı RAD H₂O aksesuarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, 250 ml hacmindeki cam şişelere yerleştirilen numuneler, cihazda tanımlı olan WAT 250 protokolüne uygun şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 3.25. RAD7 sistemine bağlı RAD H₂O aksesuarının çalışma şeması (DurrIDGE Company,1997).

RAD7 cihazına bağlı RAD H₂O aksesuarı ile gerçekleştirilen ölçümlerde, küçük hacimli bir şişe (yaklaşık 40–250 mL) ve kapalı bir hava sirkülasyon sistemi kullanılmıştır. Numune kabı, Şekil 3.25’de gösterildiği şekilde RAD7 radon dedektörüne bağlanmıştır. Cihazın pompası çalıştırıldığında, sistem içerisindeki hava sirküle edilerek su örneği köpürtülür ve böylece çözünmüş halde bulunan radon gazının sıvı fazdan gaz fazına geçerek sistemin üst kısmına taşınması sağlanır. Yaklaşık 5 dakikalık bir havalandırma süresi sonunda numunede çözünmüş radonun %94’ten fazlası serbest hale geçmiş olur. Bu sürecin ardından cihaz, 5 dakikalık aralıklarla ölçümler alacak şekilde çalıştırılır. Her ölçüm periyodunda, sistemdeki radon konsantrasyonu cihazın dahili termal yazıcısı aracılığıyla otomatik olarak raporlanır. Toplamda 30 dakikalık ölçüm süresi sonunda, cihaz beş ayrı değer sunar

ve bu değerlerin ortalaması numunedeki radon miktarını temsil eder. Böylece, numunedeki çözünmüş radon konsantrasyonu yüksek doğrulukla belirlenmiş olur.

RAD H₂O sistemi; araştırma laboratuvarlarında, eğitim kurumlarında ve saha çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihaz, sintilasyon sayıcılarına kıyasla daha hassas ve güvenilir ölçümler sağlayabilmektedir. Ayrıca düşük ölçüm sınırına sahip olması sayesinde (1 günlük LLD ≈ 370 Bq/m³) düşük radon düzeylerinin tespit edilmesine de imkân tanır.



Şekil 3.26. Su Numunelerinin RAD-7 H₂O dedektörüne bağlanması(Durrige Company,1997).

RAD-7 cihazı ile ölçüm yapılmadan önce, cihazın kendi yapısında bulunabilecek artan radon birikimlerini sınırlamak amacıyla, dedektörün maksimum %9 düzeyinin altına inmesi hedeflenir. Bu amaçla dedektör, “purge” moduna alınarak yaklaşık 10–15 dakika boyunca çalıştırılır. Ardından, yeni ölçüm öncesinde sistemdeki artık radonun uzaklaştırılması için silika jel içeren nem tutucu filtreler kullanılır. Bu özel jeller, yalnızca nemi tutmakla kalmaz, aynı zamanda radon gazını da absorbe edebilme özelliğine sahiptir. Söz konusu jel, önceki ölçümlerden kalan ya da dedektör sisteminde birikmiş radon seviyelerinin önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlar. Bu uygulama, olası ölçüm hatalarının önlenmesi açısından kritik bir ön hazırlık aşamasıdır. Nem seviyesi uygun değerlere ulaştığında, cihaz yeni numune ile ölçüme hazır hale gelir ve radon analizi başlatılabilir.(Eser,2022)



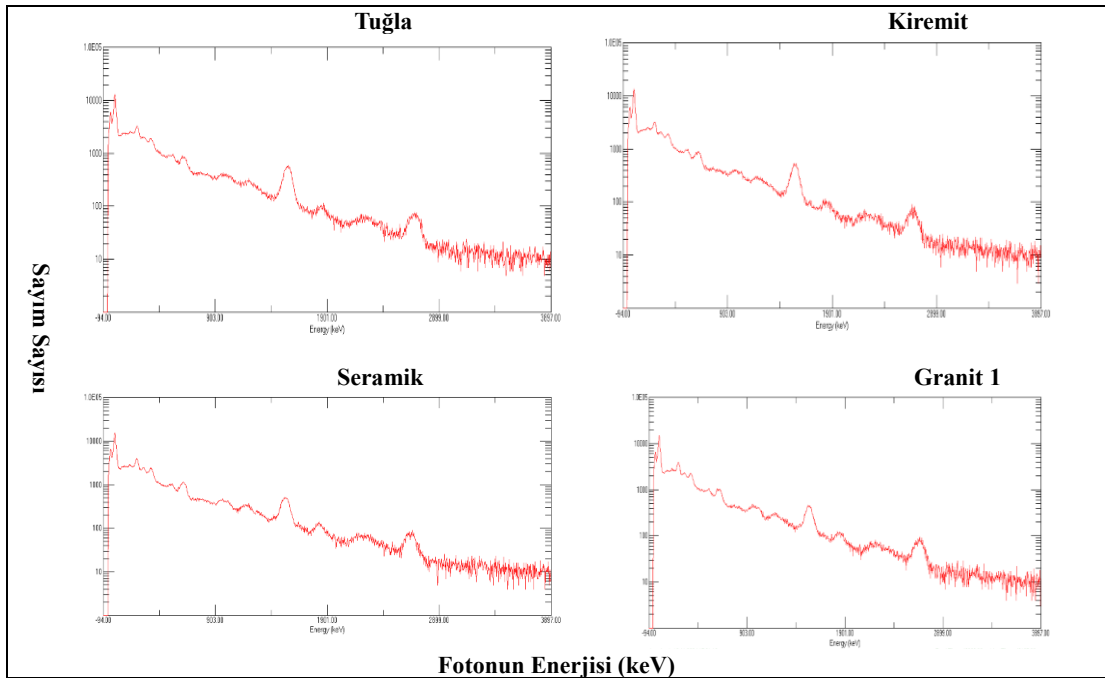
4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Yapı Malzemelerinde Doğal Radyoaktivite Bulguları

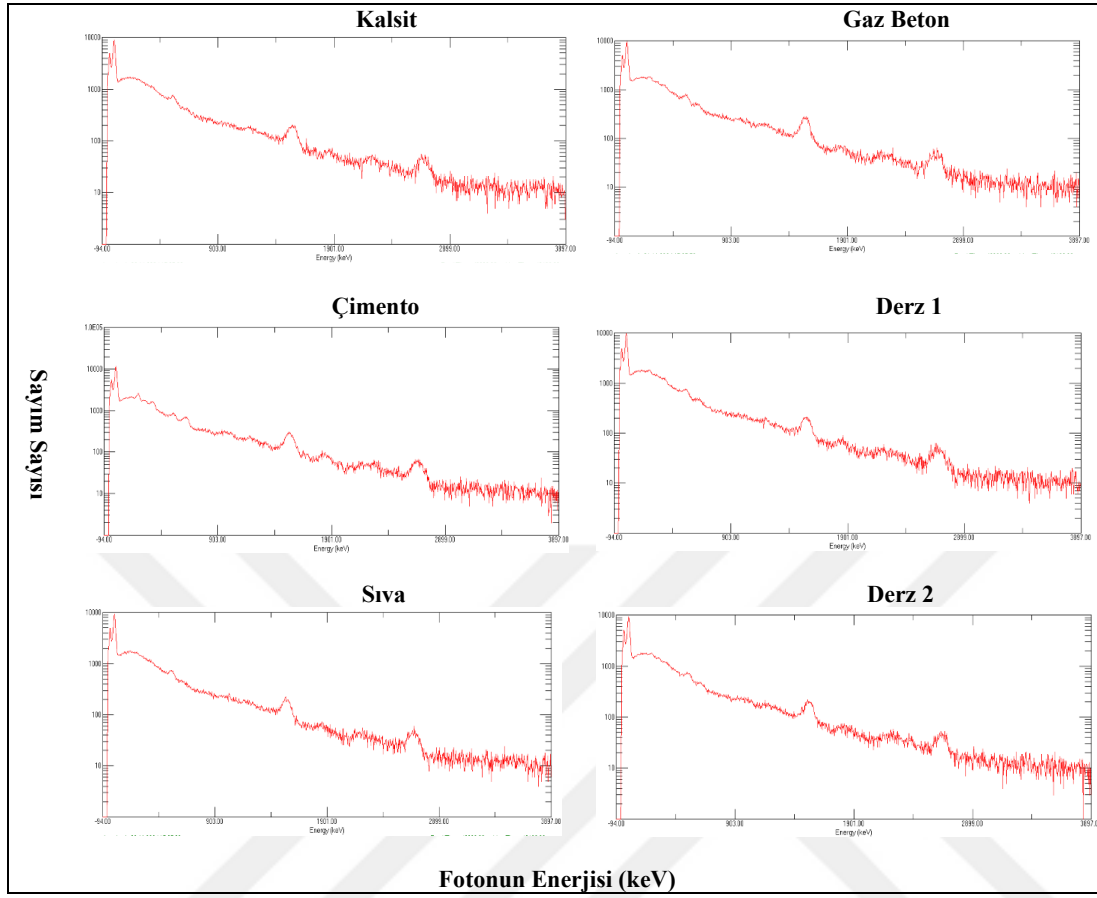
Yapı malzemelerinde bulunan doğal radyoaktivite seviyelerinin incelendiği ve insan sağlığı açısından yapı malzemelerinin radyolojik risk parametrelerinin incelendiği bu çalışmada toplam 32 örnekte; (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite konsantrasyonları bulunmuş, doğal radyoaktivite konsantrasyonlarına bağlı olarak risk parametreleri hesaplanmış ve istatistiksel veri analizi yapılmıştır.

4.1.1. Aktivite ölçüm çıkarımları

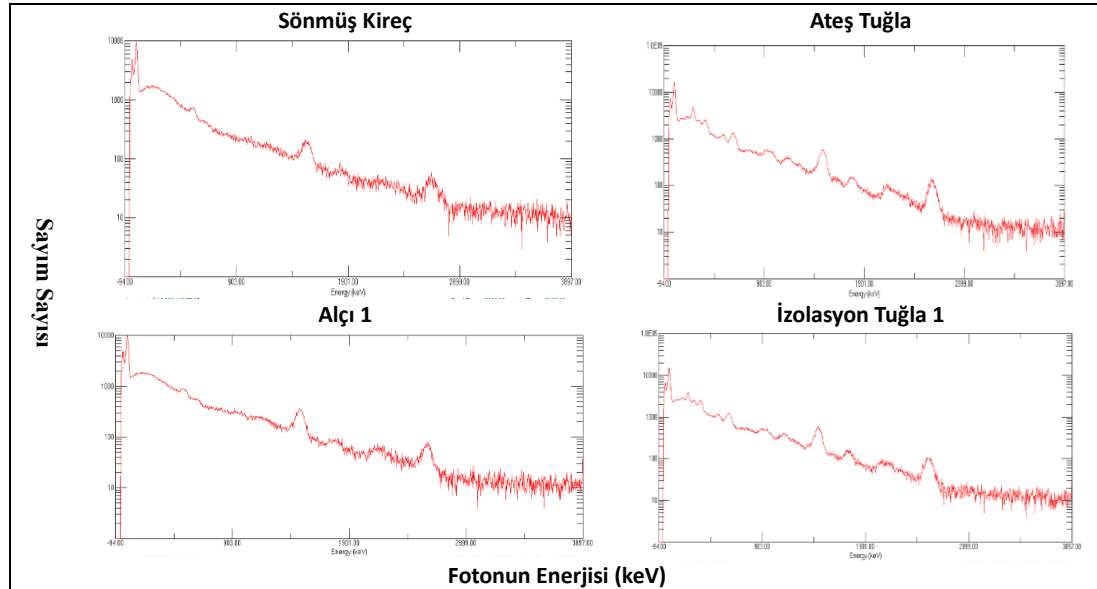
Bu bölümde, her yapı malzemesi numunesi için elde edilen gama spektrumları sunulmaktadır. Grafikler, NaI (Tl) dedektörü ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilmiş olup, yatay ekseninde foton enerjisi (keV) ve dikey ekseninde bu enerjiye karşılık gelen sayım sayısı (count) gösterilmektedir. Spektrumlar aracılığıyla doğal radyonüklidler olan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ya ait karakteristik gama pikleri tespit edilmiş ve her bir numunenin radyonüklid içeriği bu verilere dayanarak değerlendirilmiştir. İlgili gama spektrumları aşağıda Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 olarak gösterilmiştir.



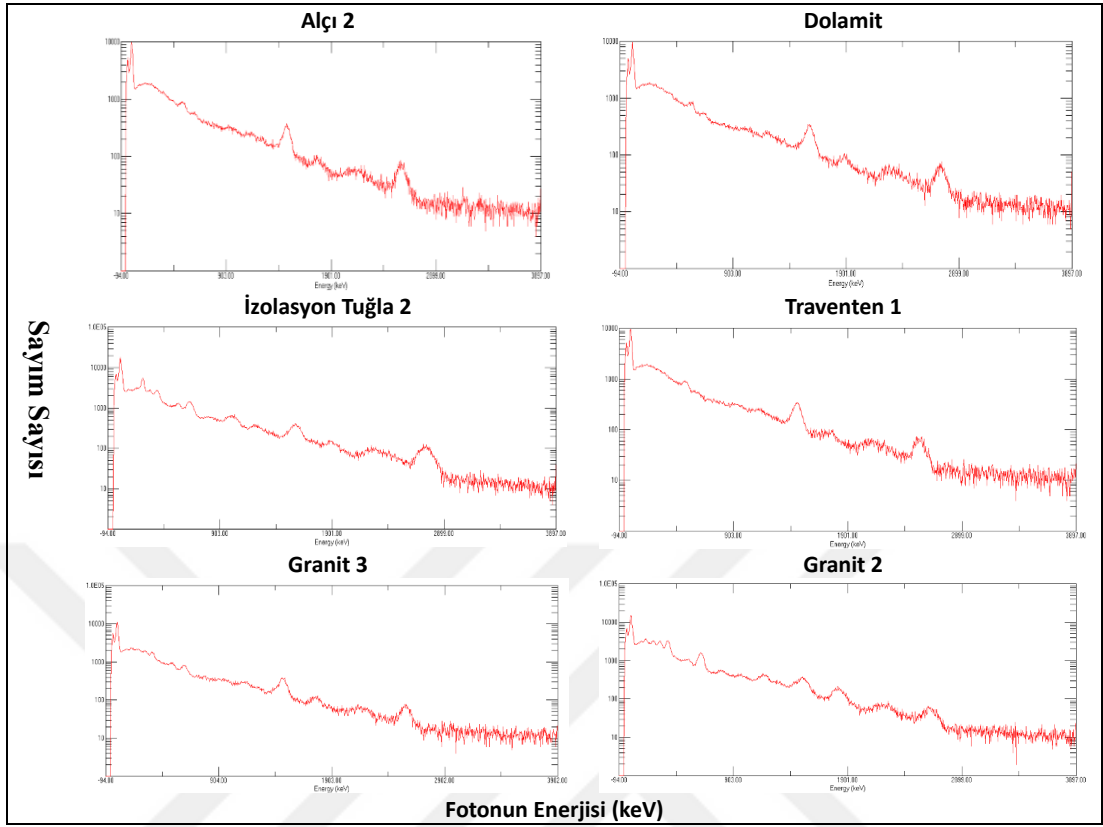
Şekil 4.1. Yapı malzemerleri örneklerine ait gama spektrumları



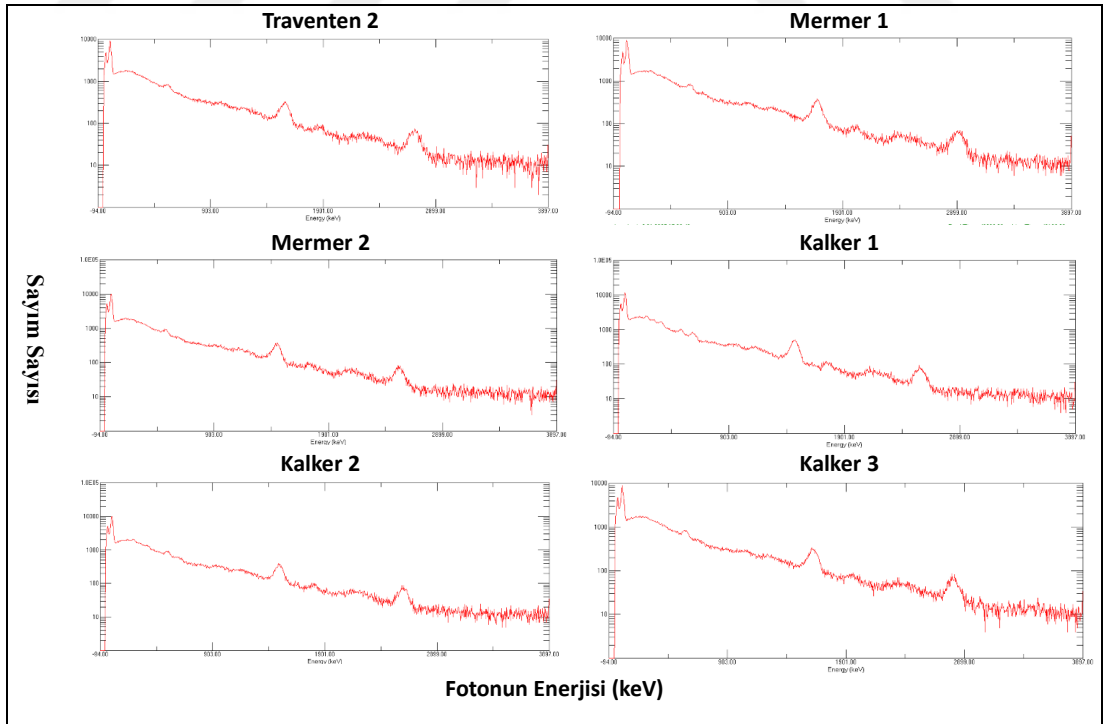
Şekil 4.1. (Devamı) Yapı malzemerleri örneklerine ait gama spektrumları



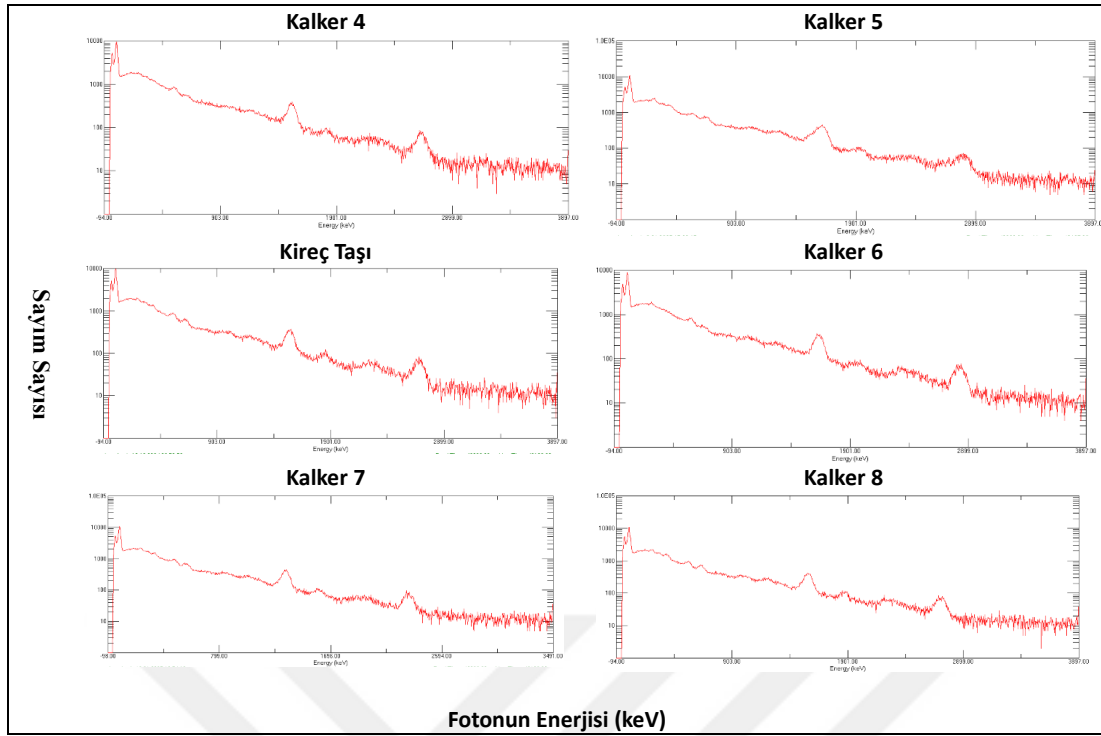
Şekil 4.2. Yapı malzemesi örneklerine ait gama spektrumları.



Şekil 4.2.(Devamı) Yapı malzemesi örneklerine ait gama spektrumları.



Şekil 4.3. Yapı malzemesi örneklerine ait gama spektrumları.



Şekil 4.3. (Devamı) Yapı malzemesi örneklerine ait gama spektrumları.

Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ‘de görüldüğü üzere örneklerin gama spektrumları için doğal radyonüklid aktivite ölçümleri ^{238}U (^{214}Bi) için 1760 keV, ^{40}K için 1460 keV ve ^{232}Th (^{208}Tl) için 2615 keV enerjilerine sahip gama piklerinin altındaki alanlar kullanılmıştır. Örneklerle yapılan tüm işlemler boş örnek kabı içinde gerçekleştirilmiş ve sonucu çıkarılarak net alanlar hesaplanmıştır. Bu net alanlardan yararlanarak aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır.

4.1.2. Aktivite değerlerinin hesaplanması

Aktivite;

$$A(Bq.kg^{-1}) = \frac{N.P.A.}{\varepsilon.y.t.m} \quad (4.1.)$$

Denklemleri ile hesaplanır. (Beretka vd., 1985).

Burada;

NPA: Net pik alanı, numune sayımından elde edilen alandan boş numune kabı sayımından elde edilen alanın çıkarılması ile bulunur.

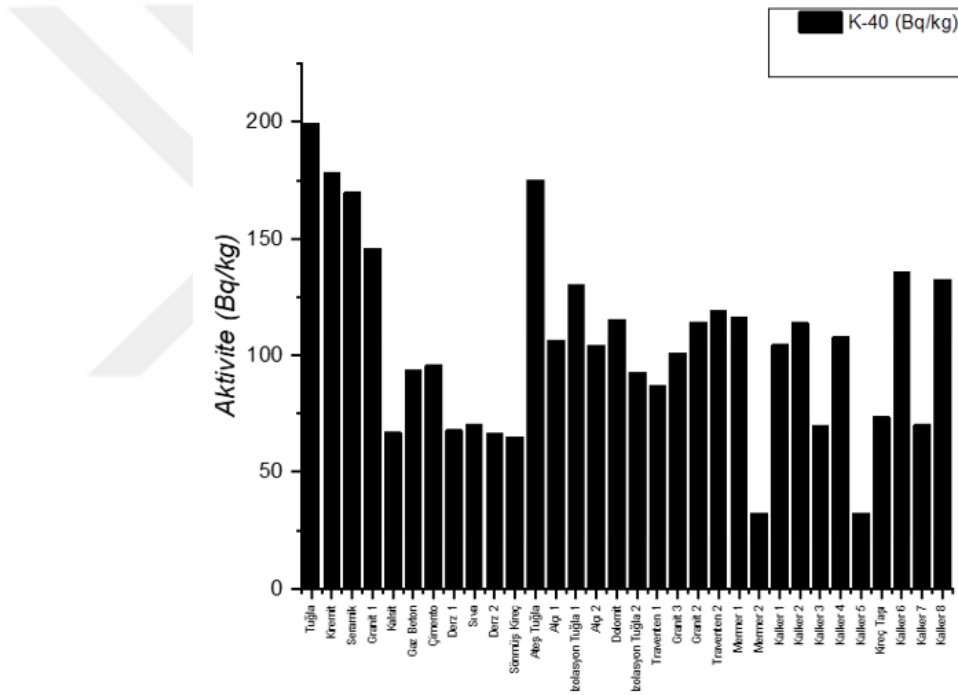
ε : Dedektörün verimi aktivitesi belli olan radyoaktif kaynaklar kullanılarak yapılabilir. Bu amaçla mevcut 1 μCi aktiviteli ve 5,27 yıl yarı-ömürlü ^{60}Co radyoaktif kaynağı kullanılarak yapılmıştır.

γ : İlgili nüklidin gama yayınlama olasılığı, ^{232}Th (^{208}Tl) için %35,9, ^{238}U (^{214}Bi) için %14,7, ^{40}K için %10,7 dir.

t: Sayım süresi (s)

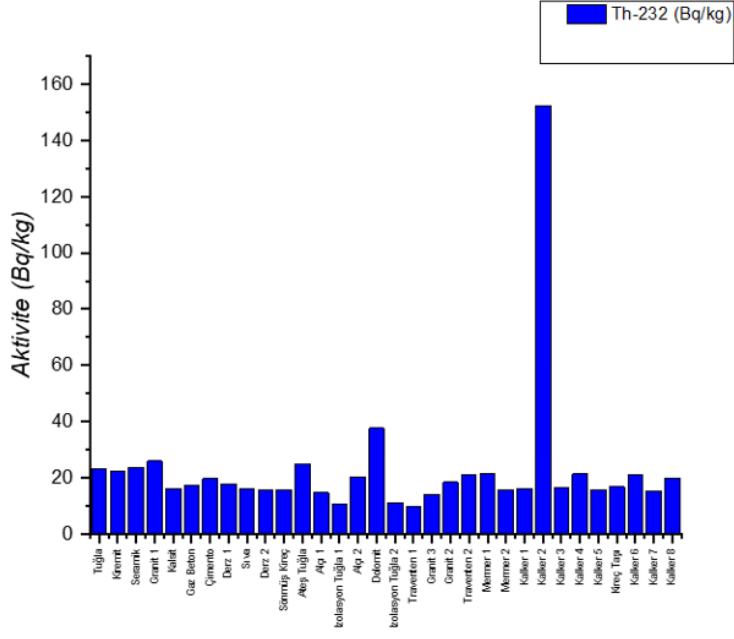
m: Kütle (kg)

Bu çalışmada, yapı malzemelerine ait ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklidlerine ilişkin aktivite konsantrasyonları hesaplanmış ve elde edilen veriler aşağıda Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ da sunulmuştur. Şekillerde her bir numuneye ait radyonüklid aktiviteleri ayrı ayrı gösterilerek, malzeme türleri arasındaki karşılaştırmalar görsel olarak desteklenmiştir.



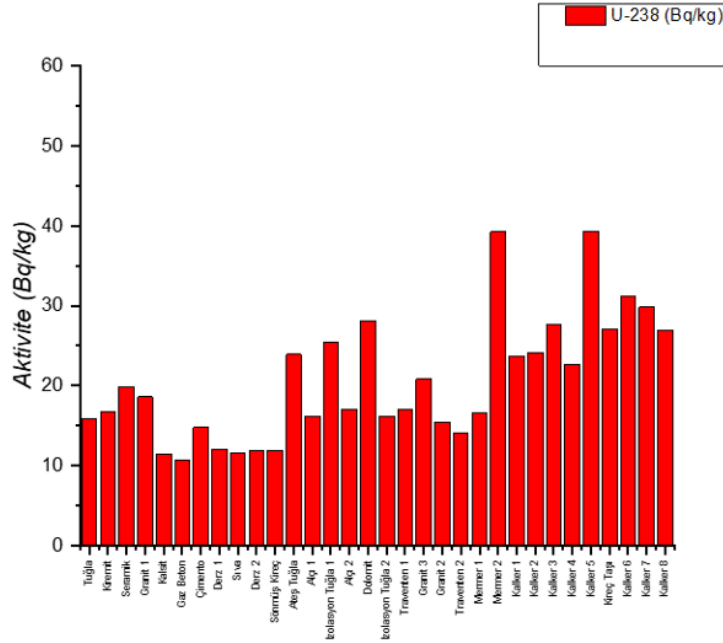
Şekil 4.4. ^{40}K aktivite sonuçları

Şekil 4.4.de görüldüğü gibi ^{40}K ın en yüksek aktivite değerine sahip olan tuğla numunesidir.



Şekil 4.5. ^{232}Th ölçüm sonuçları

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi ^{232}Th ın en yüksek aktivite değerine sahip olan izolasyon Kalker 2 numunesidir.



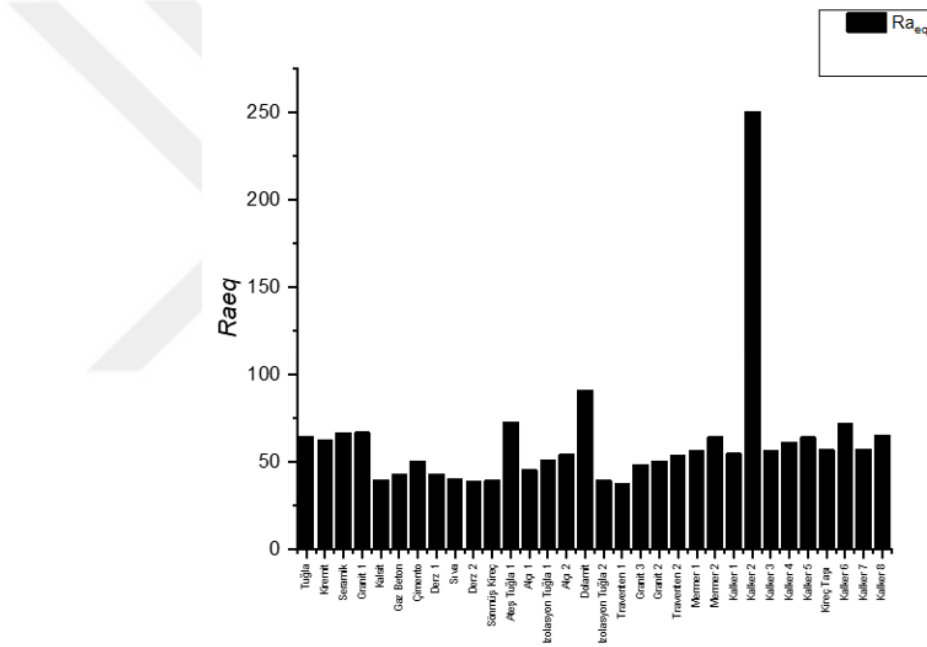
Şekil 4.6. ^{238}U ölçüm sonuçları

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi ^{238}U ın en yüksek aktivite değerine sahip olan Kalker 5 numunesidir.

Aktivite konsantrasyonlarının ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K için dünya ortalaması sırasıyla 50 Bq/kg, 50 Bq/kg ve 500 Bq/kg dir. Ölçümü yapılan tüm numunelerde aktivite konsantrasyonları bu değerlerin altında çıkmıştır.

4.1.3. Radyum eşdeğer aktivitesi

Radyoaktif elementlerin yapı malzemeleri içerisinde eşit oranda bulunmaması nedeniyle ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K aktivite değerlerinin radyasyon risk farkındalığını arttırmak amacıyla tercih edilen genel bir değişkendir. Denklem 3.11’ de belirtildiği gibi hesaplamalar tüm numuneler için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’ de R_{eq} sonuçlarına ilişkin grafik verilmiştir. R_{eq} aktivitesinin 370 Bq/kg’ ı aşılması beklenmektedir. (OECD, 1979; Ngachin vd., 2007)



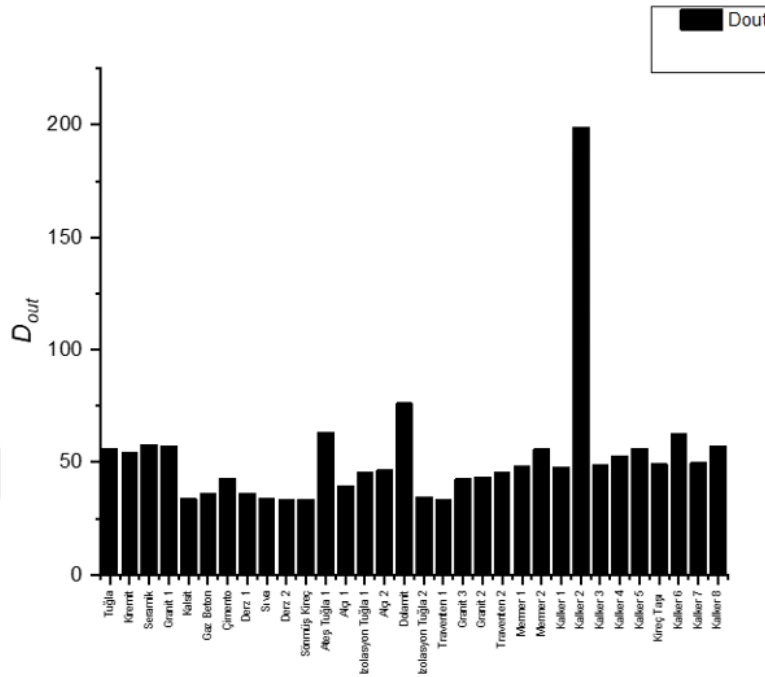
Şekil 4.7. Radyum Eşdeğer Aktivitesi sonuçları

Tüm numunelerin R_{eq} (Radyum Eşdeğer Aktivite) ölçümleri 370 Bq/kg değerinin altında çıkmıştır.

4.1.4. Soğurulan doz oranı

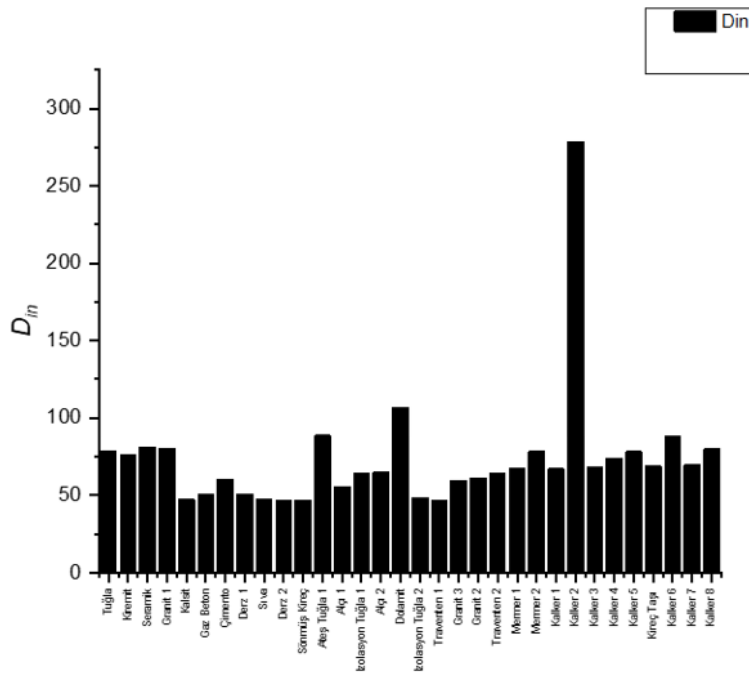
Soğurulan Doz oranı oda ebatları 5 mx 2,8 mx 4 m. olan, zemin ile tavan ve duvarların yapılarının özkütlesi 2.350 kg/m^3 olan 20 cm kalınlığa sahip normal oda merkezi için tespit edildi. Bu çarpanlar ^{232}Th için 1,1 nGy/h başına Bq/kg, ^{226}Ra için 0,92 nGy/h başına Bq/kg, ve ^{40}K için 0,080 nGy/h başına Bq/kg olarak hesaplanmıştır. (Turhan vd, 2008; Hizem vd., 2005 Kumar vd, 1999; Markkanen, 1995,) Denklem (3.12) den

yararlanarak yapı dışındaki soğurma oranları (D_{out}) hesaplanmıştır. Şekil 4.8 'de D_{out} sonuçlarına ilişkin grafik sunulmuştur.



Şekil 4.8. Yapı dışında soğurulan doz oranı (D_{out}) sonuçları

Absorblanmış doz hızı bina dışında en yüksek Kalker 2 numunesinde bulunurken, en düşük değer Derz 2 numunesinde bulunmuştur.

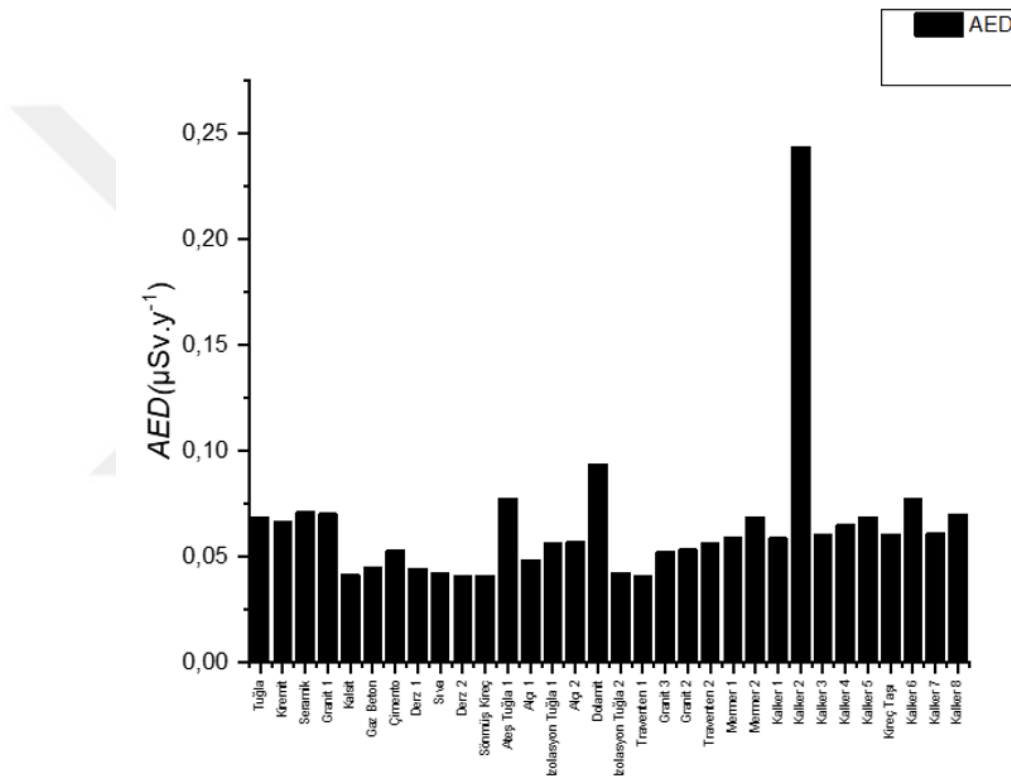


Şekil 4.9. Yapı içinde soğurulan doz oranı (D_{in}) sonuçları

Absorblanmış doz hızı bina içinde en yüksek Kalker 2 numunesinde bulunmuşken en düşük Derz 2 örneğinde bulunmuştur.

4.1.5. Yıllık etkin doz miktarı

Yıllık Etkin Doz Miktarı (ADE) ($\mu\text{Sv.y}^{-1}$); insanların çeşitli radyasyon kaynaklarından yayımlanan ışınlarla ve ya tükettiği gıda, soluduğu havadaki radyonüklitleri vücuduna almasıyla bir yıl süresince edindiği toplam radyasyon dozunu ifade etmektedir. Tüm numuneler için Denklem (3.14) e göre hesaplanmıştır. Hesaplanan (ADE) sonuçları Şekil 4.10 ' da verilmiştir.



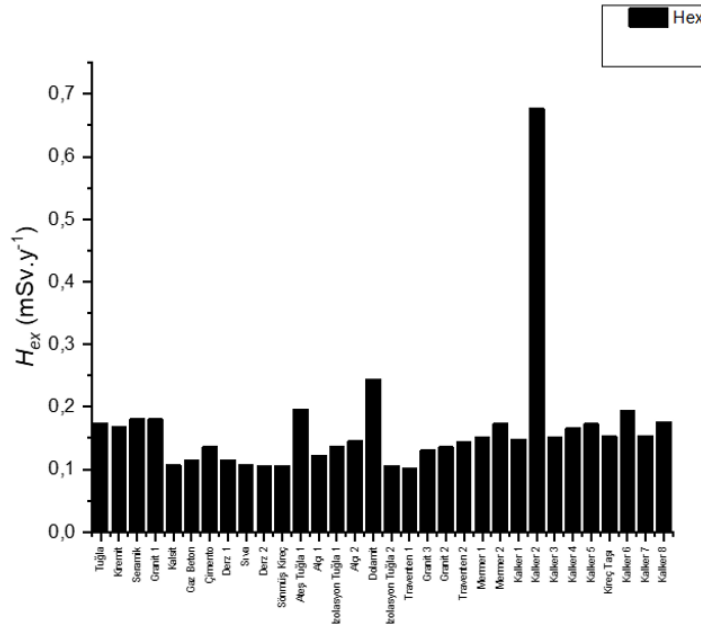
Şekil 4.10. Yıllık etkin doz miktarı (ADE) sonuçları

Bina içi ve bina içinde jeolojik kökenli dış ışınlanma aralık değerleri yıllık etkin doz miktarı 0,3 – 0,6 mSv/y olarak ifade edilmiştir (TAEK). Gebze ilçesi ve çevresinde 32 sıklıkla tercih edilen yapı malzemelerinden meydana gelen yıllık etkin doz değerleri değişim aralığı içerisinde bulunmaktadır.

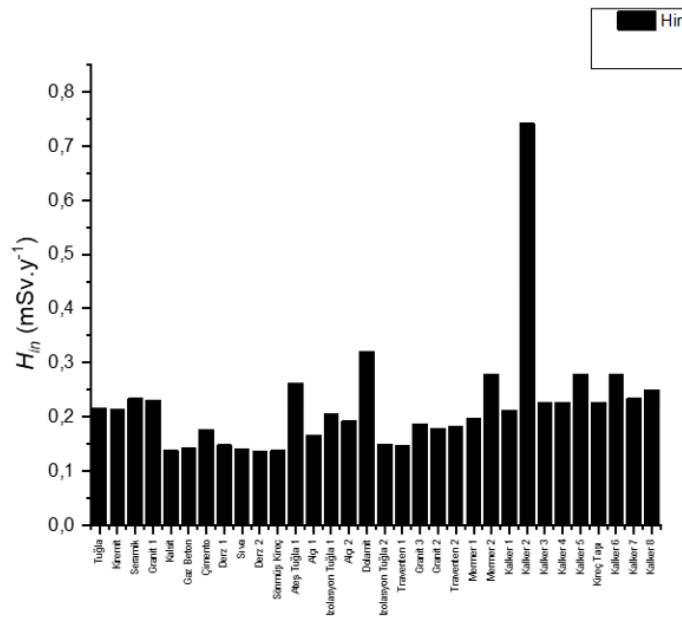
4.1.6. Dış ortam tehlike indeksi, iç ortam tehlike indeksi

Dış ortam Tehlike indeksi (H_{ex}) ve İç ortam tehlike indeksi (H_{in}) denklem (3.17) ve denklem (3.18) e göre hesaplanmıştır. Bu değerler OECD tarafından belirlenen ve

dünyaca kabul edilen $H_{ex} \leq 1$ ve $H_{in} \leq 1$ olmalıdır. Şekil 4.11’ de (H_{ex}) Şekil 4.12’ de (H_{in}) sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.11. Dış ortam tehlike indeksi (H_{ex}) sonuçları



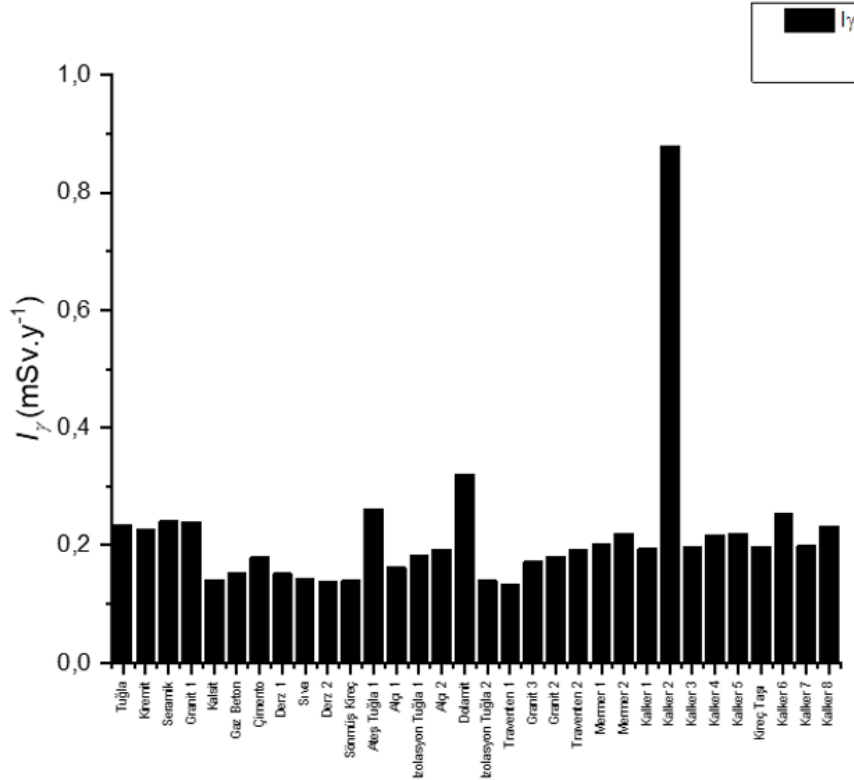
Şekil 4.12. İç ortam tehlike indeksi (H_{in}) sonuçları

Gebze ilçesi ve çevresinde 32 sıklıkla tercih edilen yapı malzemelerinde dış ortam tehlike indeksi ve iç ortam tehlike indeksi OECD tarafından belirlenen 1 sınır değerinin altında bulunmuştur.

4.1.7. Gama indeksi, Alfa indeksi

Gama indeksi, Alfa İndeksi değerleri numuneler için Denklem (3.15) ve Denklem (3.16)' a göre hesaplanmıştır.

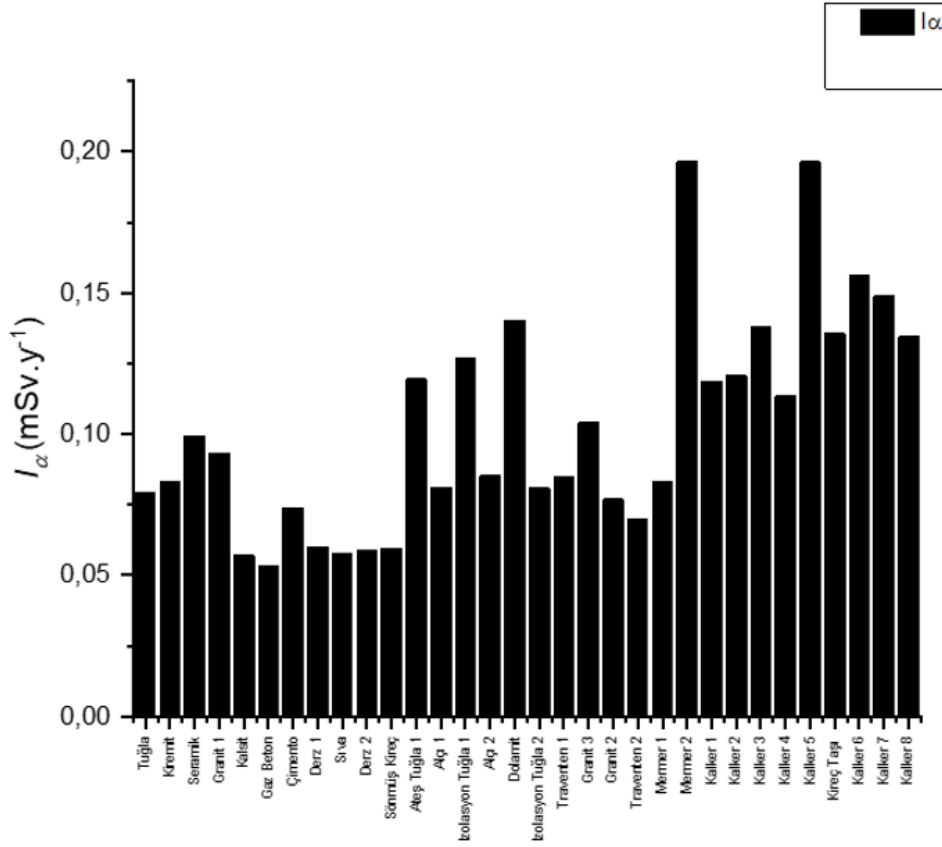
Gama indeksi (I_γ) malzemenin Avrupa komisyonu tarafından belirlenen kriterleri karşıladığını belirlemek için hesaplanan bir değerdir ve $I_\gamma \leq 0,5$ olmalıdır. Gama indeksi sonuçları Şekil 4.13' te verilmiştir.



Şekil 4.13. Gama indeksi (I_γ) sonuçları

Gebze ilçesi ve çevresinde 32 sıklıkla tercih edilen yapı malzemelerinde gama indeksi (I_γ) değerleri genel olarak 0,5 sınırının altında hesaplanmış olup, yalnızca bir örnekte (Kalker 2) bu sınırın aşıldığı gözlemlenmiştir.

Alfa indeksi (I_α) malzemelerden ortaya çıkan radon gazının solunum sistemine girişi nedeniyle karşı karşıya kalınan radyasyonun araştırılmasında kullanılan değerdir ve $I_\alpha < 1$ olmalıdır.



Şekil 4.14. Gama indeksi (I_{α}) sonuçları

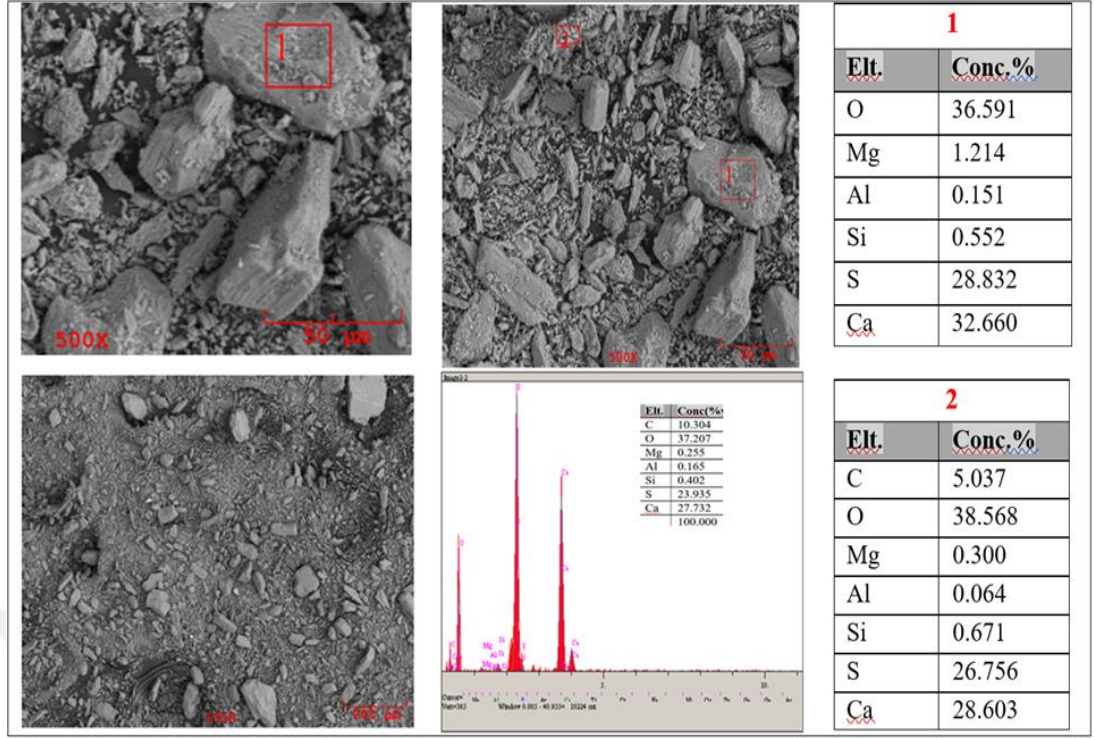
Gebze ilçesi ve çevresinde 32 sıklıkla tercih edilen yapı malzemelerinde alfa indeksi (I_{α}) 1 sınır değerinin altında bulunmuştur.

4.2. SEM ve EDS Bulguları

Bazı numuneler (Alçı 1, Alçı 2, Ateş Tuğla, Derz 1, Granit 1, Çimento, Dolomit, Gaz Beton, Derz 2, İzolasyon Tuğla 1, Kalsit, Kiremit, Sönmüş Kireç, Seramik, Sıva, Tuğla) için farklı noktalardan alınan SEM görüntüleri aracılığıyla yüzey yapıları karşılaştırılmış; bu noktalara ait EDS spektrumları ve analiz tabloları ile malzeme içeriğine ait detaylı bilgiler elde edilmiştir. Bu analizler, malzemelerin hem yapısal homojenliğini hem de potansiyel faz dağılımını anlamada önemli veriler sunmuştur.

4.2.1. Alçı 1

Alçı 1 numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.15. Alçı 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

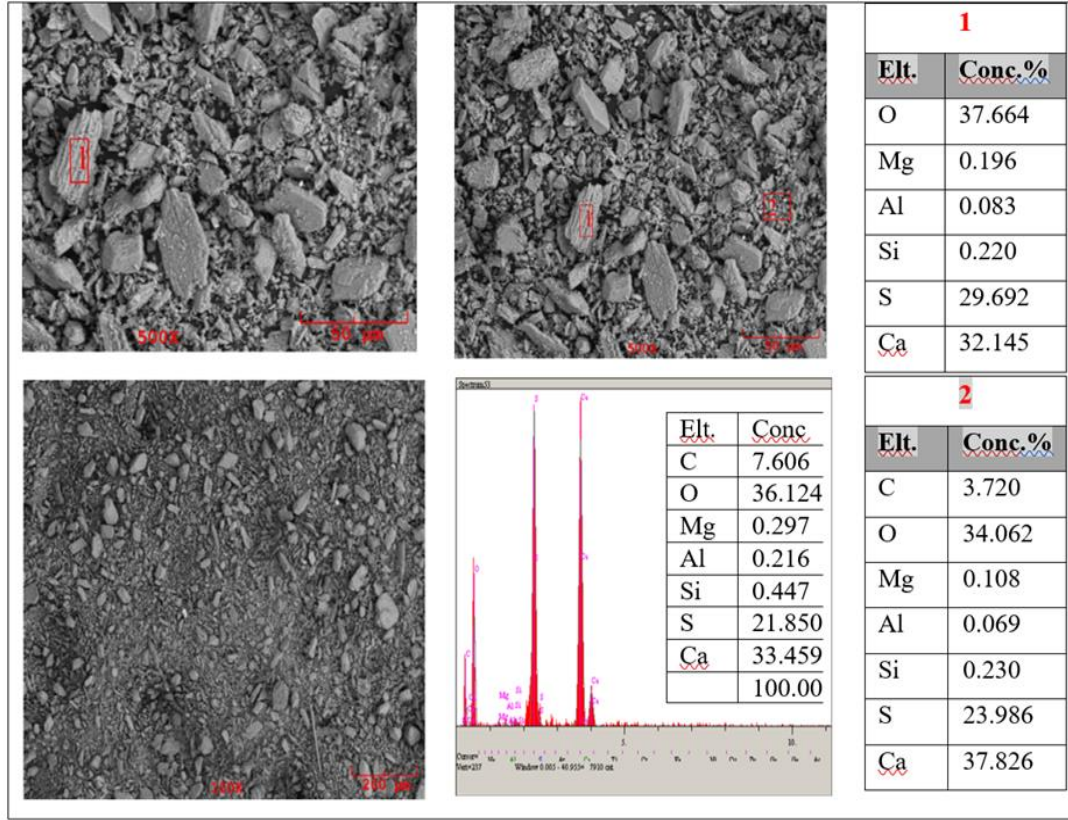
Yapılan SEM görüntülemeleri sonucunda Alçı 1 numunesinin yüzey morfolojisi detaylı olarak incelenmiş; farklı bölgelerden alınan EDS analizleriyle elementel bileşim değerlendirilmiştir. Numunenin 1 numaralı bölgesinde yapılan analizlerde, en yüksek oranlarda Oksijen (%36,59), Kalsiyum (%32,66) ve Kükürt (%28,83) tespit edilmiştir. Bu üç elementin yoğunluğu, numunenin büyük ölçüde kalsiyum sülfat (CaSO_4) içerdiğini göstermektedir. Ayrıca düşük oranlarda Magnezyum (%1,21), Alüminyum (%0,15) ve Silisyum (%0,55) da saptanmıştır. 2 numaralı bölgeye ait analizde ise Oksijen (%38,57), Kalsiyum (%28,60) ve Kükürt (%26,76) benzer oranlarda tespit edilmiş olup, yine alçı karakteristiği gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu bölgedeki Karbon (%5,04) varlığı ise ölçüm alınan yüzeyde organik kalıntılar veya karbonatlı bileşiklerin bulunabileceğine işaret etmektedir.

Elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları, numunenin yüksek oranda Ca, S ve O içerdiğini göstermektedir. Bu bulgular, literatürde alçı bileşiminin temel olarak kalsiyum sülfat dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) formunda bulunduğunu belirten çalışmalarla ve Türk Standardı Enstitüsü'nün yapı alçıları için öngördüğü kimyasal bileşimle uyumludur (TSE, 2010; Mandal & Mandal, 2007)

4.2.2. Alçı 2

Alçı 2 numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı

biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



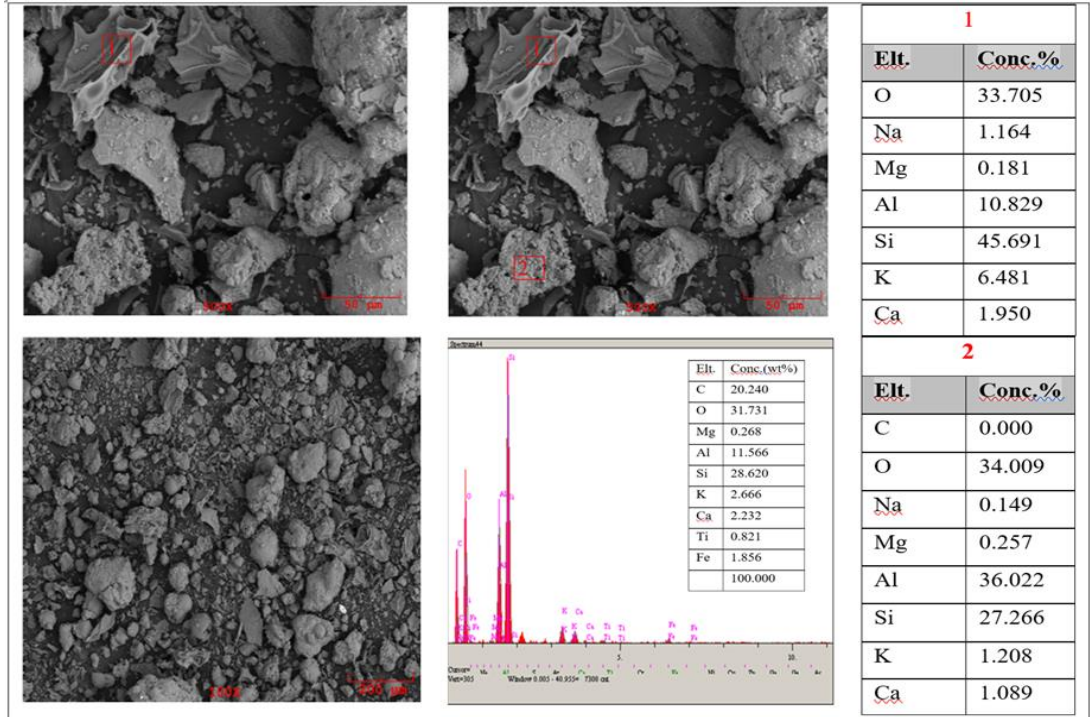
Şekil 4.16. Alçı 2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

Alçı 2 numunesine ait SEM görüntülemeleri sonucunda yüzey yapısındaki kristal morfolojisi detaylı olarak incelenmiş; belirlenen bölgelerden alınan EDS analizleriyle elementel bileşimler değerlendirilmiştir. 1 numaralı bölgedeki ölçümde en yoğun olarak Oksijen (%37,66), Kalsiyum (%32,15) ve Kükürt (%29,69) elementleri tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak çok düşük oranlarda Magnezyum (%0,20), Alüminyum (%0,08) ve Silisyum (%0,22) gibi elementler de belirlenmiştir. 2 numaralı bölgedeki analizde benzer şekilde yüksek oranda Oksijen (%36,12), Kalsiyum (%33,46) ve Kükürt (%21,85) tespit edilmiştir. Bu veriler, numunenin kalsiyum sülfat (CaSO_4) esaslı bir yapıya sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. 3 numaralı bölgede ise Oksijen (%34,06), Kalsiyum (%37,83) ve Kükürt (%23,99) ön plana çıkmaktadır. Ayrıca bu bölgedeki Karbon oranının (%3,72) diğer bölgelere göre daha yüksek olması, muhtemelen yüzeyde organik kalıntıların veya karbonatlı bileşiklerin varlığını işaret etmektedir.

Genel olarak, Alçı 2 numunesinde elde edilen SEM-EDS analiz sonuçları, yoğun Ca, S ve O elementlerinin varlığıyla birlikte numunenin mineralojik olarak alçı (kalsiyum sülfat dihidrat) içerikli olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, alçının karakteristik bileşimini tanımlayan ulusal ve uluslararası literatürle ve Türk Standardı Enstitüsü'nün yapı alçıları için belirlediği kimyasal içerik ile uyumludur (TSE, 2010; Mandal & Mandal, 2007).

4.2.3. Ateş tuğla

Ateş Tuğla numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.17. Ateş Tuğla numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

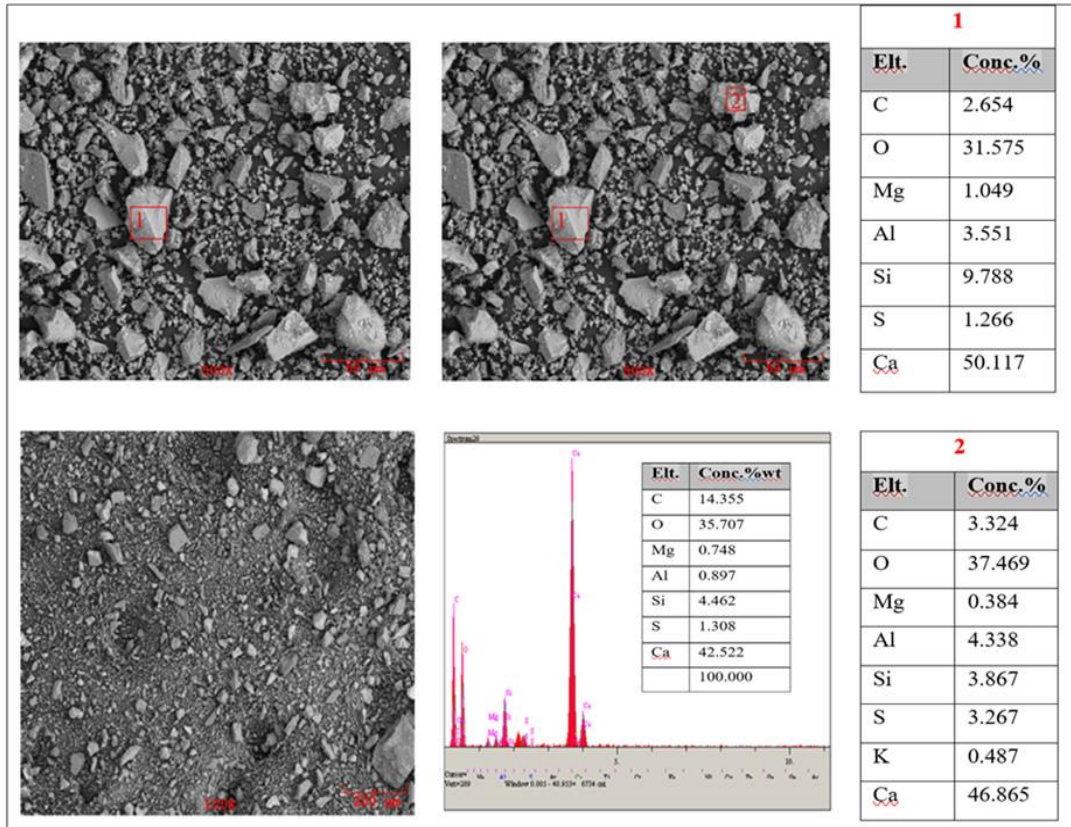
Ateş tuğla numunesinin yüzey yapısı SEM görüntüleri ile incelenmiş ve belirlenen bölgelerden alınan EDS analizleri ile elementel bileşimi detaylandırılmıştır. 1 numaralı bölgeden elde edilen veriler, numunenin yüksek oranda Oksijen (%33,71), Alüminyum (%10,83) ve Silisyum (%45,69) içerdiğini göstermektedir. Ayrıca Sodyum (%1,16), Kalsiyum (%1,95), Potasyum (%6,48) ve düşük oranlarda Magnezyum (%0,18) elementlerine de rastlanmıştır. Bu bileşim, ateş tuğlanın genellikle alüminyum silikat esaslı seramik bir malzeme olduğunu doğrular

niteliktedir. 2 numaralı bölgede ise benzer şekilde yüksek düzeyde Silisyum (%28,62) ve Alüminyum (%21,57) saptanmış olup, oksijen ile birlikte bunlar numunenin yapısal iskeletini oluşturmaktadır. Aynı bölgede Kalsiyum (%2,33), Potasyum (%2,66), Demir (%1,86) ve iz miktarda diğer elementler de tespit edilmiştir. 3 numaralı analizde ise Silisyum (%27,27) ve Alüminyum (%36,02) en baskın bileşenler olup, bu değerler ateş tuğlanın refrakter (ısıya dayanıklı) özelliklerini sağlayan yüksek alümina ve silika içerdiğini göstermektedir.

Elde edilen bu SEM-EDS analiz sonuçları, literatürde ateş tuğlaların genellikle yüksek Al_2O_3 ve SiO_2 içeriğine sahip olduklarını belirten çalışmalarla uyumludur. Bu tür malzemeler, ısıya dayanıklılık, kimyasal direnç ve mekanik sağlamlık açısından tercih edilen seramik esaslı ürünlerdir (Rout et al., 2009; Işık et al., 2018).

4.2.4. Derz 1

Derz 1 numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.18. Derz 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

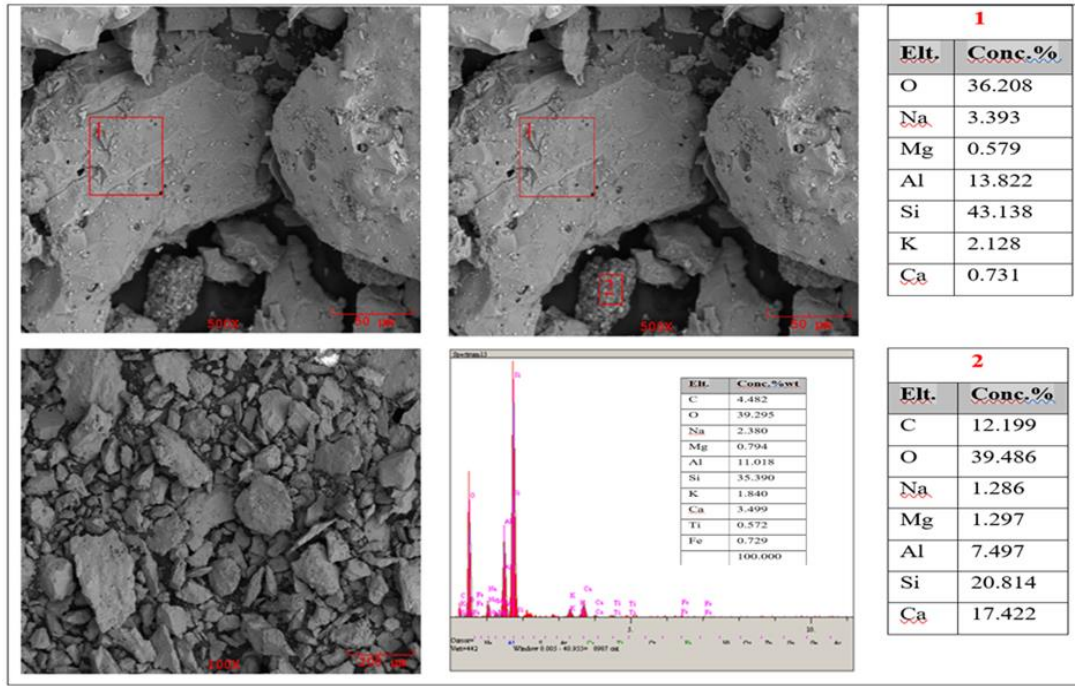
Derz 1 malzemesine ait yüzey morfolojisi, SEM görüntüleme ile detaylı şekilde incelenmiş; belirlenen bölgelerden elde edilen EDS analizleri ile elementel bileşimi değerlendirilmiştir. 1 numaralı bölgeye ait analizde en yüksek oranda Kalsiyum (%50,12), Oksijen (%31,58) ve Silisyum (%9,79) elementlerinin bulunduğu görülmektedir. Bu bölge ayrıca düşük seviyelerde Karbon (%2,65), Alüminyum (%3,55), Magnezyum (%1,05) ve Kükürt (%1,27) de içermektedir. Bu bileşim, çimento esaslı katkıların yanı sıra silikat ve alüminat içeriğinin varlığına işaret etmektedir.

2 numaralı bölgede ise benzer şekilde Kalsiyum (%46,87) ve Oksijen (%37,47) oranları dikkat çekerken, Alüminyum (%4,34), Silisyum (%3,87) ve Kükürt (%3,27) bileşenleri de önemli oranlarda gözlemlenmiştir. Bu bölgedeki Karbon oranının (%3,32) biraz daha yüksek olması, muhtemelen bağlayıcı katkıların veya karbonat yapılarının etkisini göstermektedir.

Elde edilen bu SEM-EDS analiz sonuçları, derz numunesinin esas olarak kalsiyum oksit (CaO) ve silikat-alüminat bileşenleri içerdiğini ve çimento esaslı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, derz dolgularının genel yapısal bileşimini tanımlayan literatürle örtüşmektedir. Özellikle kalsiyum ve silisyumun baskınlığı, hidratlanmış çimento fazları (C-S-H) ile uyumludur ve derz malzemesinin mekanik dayanımını sağlayan temel fazlara karşılık gelmektedir (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

4.2.5. Granit 1

Granit 1 numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.19. Granit 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

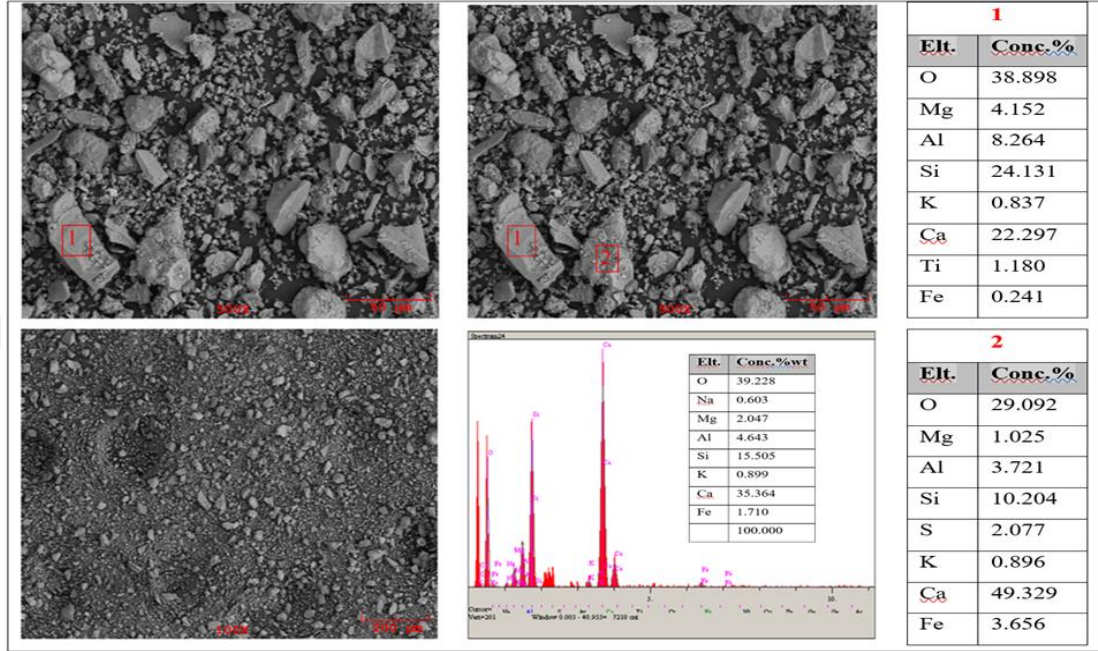
Granit 1 numunesinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleriyle detaylı biçimde incelenmiş, belirlenen bölgelerden elde edilen EDS verileriyle elementel bileşim analiz edilmiştir. 1 numaralı bölgede yapılan analizde en yoğun bulunan elementler sırasıyla Silisyum (%43,14), Oksijen (%36,21) ve Alüminyum (%13,83) olup, bu bileşim tipik bir granit yapısı ile büyük ölçüde uyumludur. Ayrıca Sodyum (%3,39), Magnezyum (%0,58) ve Kalsiyum (%0,73) gibi elementler düşük oranlarda tespit edilmiştir. Bu veriler, kuvars, feldspat ve mikadan oluşan klasik granitik mineral birleşimini desteklemektedir.

2 numaralı analiz bölgesinde ise Silisyum (%20,81), Oksijen (%39,86) ve Alüminyum (%7,50) oranları dikkat çekmektedir. Bu bölgedeki Kalsiyum (%17,42) oranı ise granit içerisindeki kalsiyumlu plajiyoklaz fazlarının yoğunluk göstergesi olabilir. Ek olarak Karbon (%12,20) ve Magnezyum (%1,30) varlığı, yüzeydeki ikincil minerallerin veya çevresel etkileşimle oluşan birikimlerin göstergesi olabilir.

Elde edilen bu SEM-EDS verileri, granitin temel bileşenlerinden biri olan silika (SiO_2) ile birlikte alüminyum silikatlar (ör. feldspatlar, mika) ve kayaç içi aksesuar minerallerin varlığını ortaya koymaktadır. Literatürde granitik kayaçların başlıca Si, Al, O içerdiği; ayrıca Na, Ca, Mg gibi elementlerin feldspat grubu minerallerde bulunduğu ifade edilmektedir (Deer et al., 2013; Best, 2003).

4.2.6. Çimento

Çimento numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgeden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.20. Çimento numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

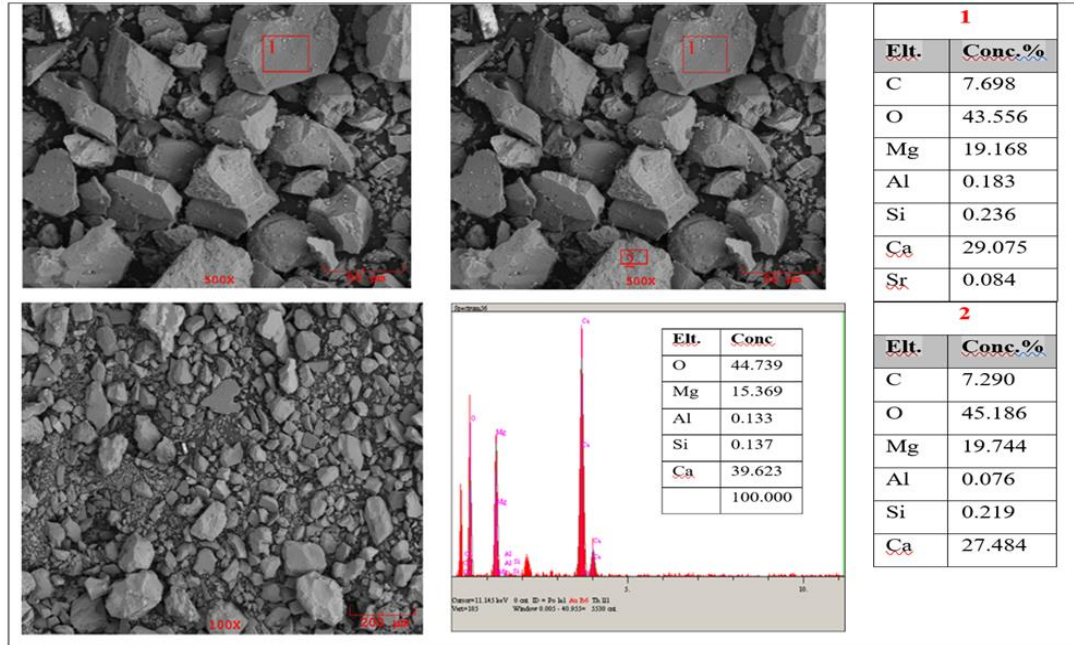
Çimento numunesinin yüzey morfolojisi, yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleri ile analiz edilmiş; belirli bölgelerden elde edilen EDS verileriyle elementel bileşim ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. 1 numaralı analiz bölgesinde en yüksek oranda Oksijen (%38,99) ve Kalsiyum (%22,30) tespit edilmiş, bunu Alüminyum (%8,26) ve Magnezyum (%4,15) gibi elementler takip etmiştir. Ayrıca Silisyum (%0,84) ve Titanyum (%1,18) gibi çimento katkılarında rastlanan elementler düşük oranlarda saptanmıştır. Bu bölgedeki bileşim, portland çimentosunun temel bileşenleri olan kalsiyum alüminatlar ve kalsiyum silikatlara işaret etmektedir.

2 numaralı bölgeye ait analizde ise özellikle Kalsiyum (%49,33) ve Oksijen (%29,09) oranları dikkat çekmekte; buna ek olarak Silisyum (%10,20), Alüminyum (%3,72) ve Magnezyum (%1,03) da önemli düzeyde tespit edilmiştir. Bu bölgedeki Demir (%3,66) ve Kükürt (%2,08) varlığı ise çimento içerisindeki ikincil fazlara veya katkı minerallerine bağlı olabilir. Genel olarak elde edilen bu SEM-EDS bulguları, numunenin tipik portland çimentosu karakteristiği taşıdığını göstermektedir. Yüksek

orandaki Ca, Si ve Al içerikleri, çimentonun bağlayıcılık özelliğini sağlayan C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) ve C-A-H (kalsiyum alüminat hidrat) fazları ile uyumludur. Literatürde de çimento esaslı malzemelerin, benzer elementel bileşimler gösterdiği, bu fazların dayanım ve hidratasyon özelliklerini belirlediği bildirilmektedir (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

4.2.7. Dolomit

Dolomit numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Üç farklı bölgeden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumları ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.21. Dolomit numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

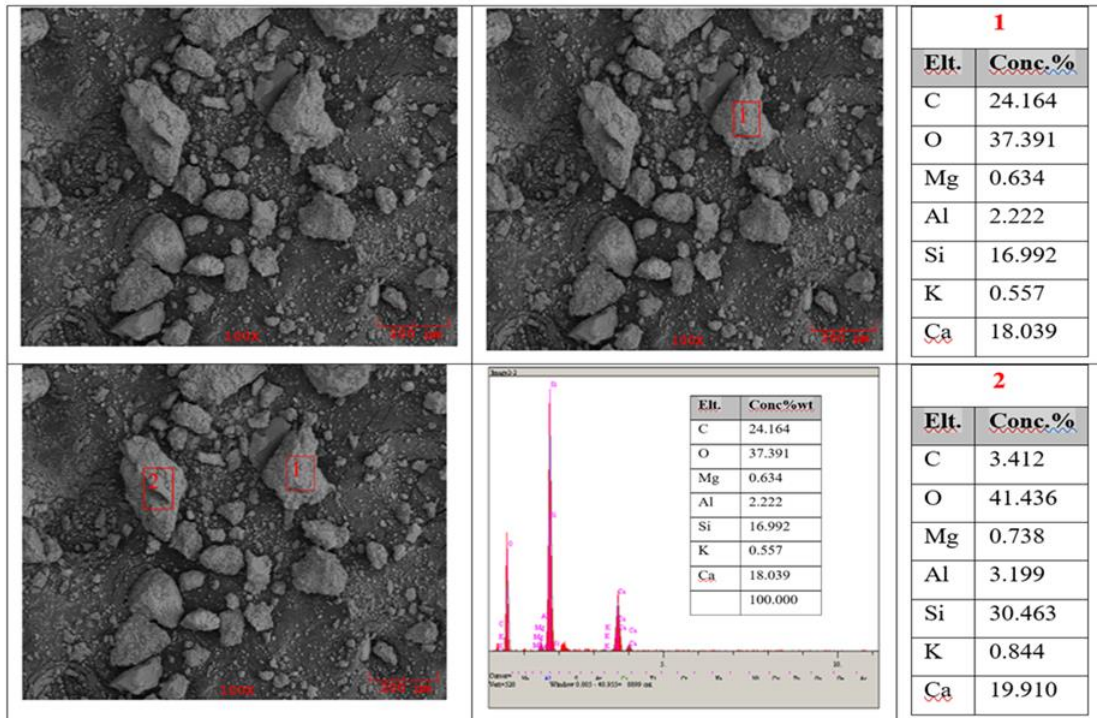
Dolomit numunesine ait yüzey yapısı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı olarak incelenmiş, üç farklı bölgeden alınan enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) verileriyle elementel bileşimi belirlenmiştir. 1 numaralı analiz bölgesinde en yüksek oranlarda Oksijen (%43,56), Kalsiyum (%29,08) ve Magnezyum (%19,17) tespit edilmiştir. Bu oranlar, tipik bir $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomit) yapısını yansıtmaktadır. Ayrıca düşük seviyelerde Karbon (%7,70), Alüminyum (%0,18), Silisyum (%0,24) ve Kükürt (%0,08) varlığı da gözlemlenmiştir. 2 numaralı bölgede de benzer şekilde yüksek oranda Oksijen (%44,74), Kalsiyum (%39,62) ve Magnezyum (%15,37) tespit edilmiştir. Bu bölgedeki Karbon oranı (%6,00) da karbonat yapıyı destekler

niteliktedir. 3 numaralı analizde ise Oksijen (%45,19), Magnezyum (%19,74) ve Kalsiyum (%27,48) oranlarının öne çıktığı, ayrıca Karbon (%7,29) ve eser miktarda Alüminyum (%0,08) ve Silisyum (%0,22) bulunduğu belirlenmiştir.

Tüm bu veriler, dolomit minerallerinin kimyasal yapısına özgü olan Ca, Mg, C ve O elementlerinin ağırlıklı olduğunu açık biçimde göstermektedir. Literatürde de dolomit bileşimi genellikle kalsiyum ve magnezyum karbonat yapısında olup, %20–23 Mg, %30 civarı Ca ve yüksek oranda O ve C içerdiği bildirilmiştir (Tanner, 1998; Chang et al., 1996). Bu bakımdan elde edilen analiz sonuçları, numunenin dolomit esaslı bir yapıya sahip olduğunu güçlü şekilde desteklemektedir.

4.2.8. Gaz beton

Gaz Beton numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.22. Gaz Beton numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

Gaz beton numunesinin yüzey yapısı, SEM görüntüleri aracılığıyla detaylı biçimde incelenmiş ve belirlenen bölgelerden elde edilen EDS verileriyle elementel bileşimi analiz edilmiştir. 1 numaralı analiz bölgesinde en yüksek oranda Oksijen (%37,39) ve

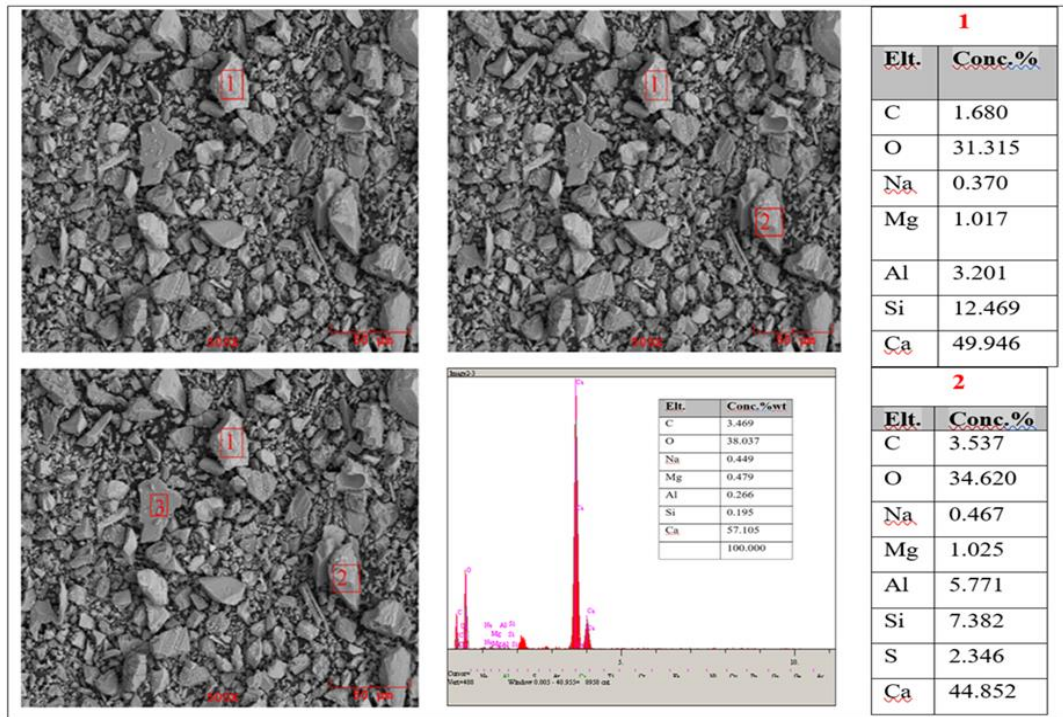
Karbon (%24,16) saptanmış, bu elementleri Silisyum (%16,99) ve Kalsiyum (%18,04) takip etmiştir. Ayrıca düşük düzeyde Alüminyum (%2,22), Magnezyum (%0,83) ve Potasyum (%0,56) da belirlenmiştir. Bu bileşim, gaz betonun gözenekli yapısını oluşturan kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) ve silis katkıları ile uyumludur.

2 numaralı analiz bölgesinde ise Silisyum oranı %30,46 ile oldukça yüksek bulunmuş; bu duruma Oksijen (%34,12) ve Kalsiyum (%19,91) içeriği eşlik etmiştir. Aynı bölgede Alüminyum (%3,20) ve Magnezyum (%0,74) gibi bağlayıcı fazlarda yer alan elementler de dikkat çekmektedir. Bu bileşim, özellikle kuvars katkısı ve kalsiyum içeren çimento esaslı bağlayıcıların bir arada bulunduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen SEM-EDS verileri, gaz beton numunesinin temel olarak silisyum (Si), kalsiyum (Ca), oksijen (O) ve alüminyum (Al) içeren bileşenlerden oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu yapı, literatürde de belirtildiği gibi, gaz betonun kimyasal olarak büyük oranda SiO_2 ve CaO içeren, yüksek gözeneklilik sağlayan ve hafif yapıli malzeme özelliği taşıyan bir yapı malzemesi olduğunu desteklemektedir (Hilal et al., 2015; Narayanan & Ramamurthy, 2000).

4.2.9. Derz 2

Derz 2 numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.23. Derz 2 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

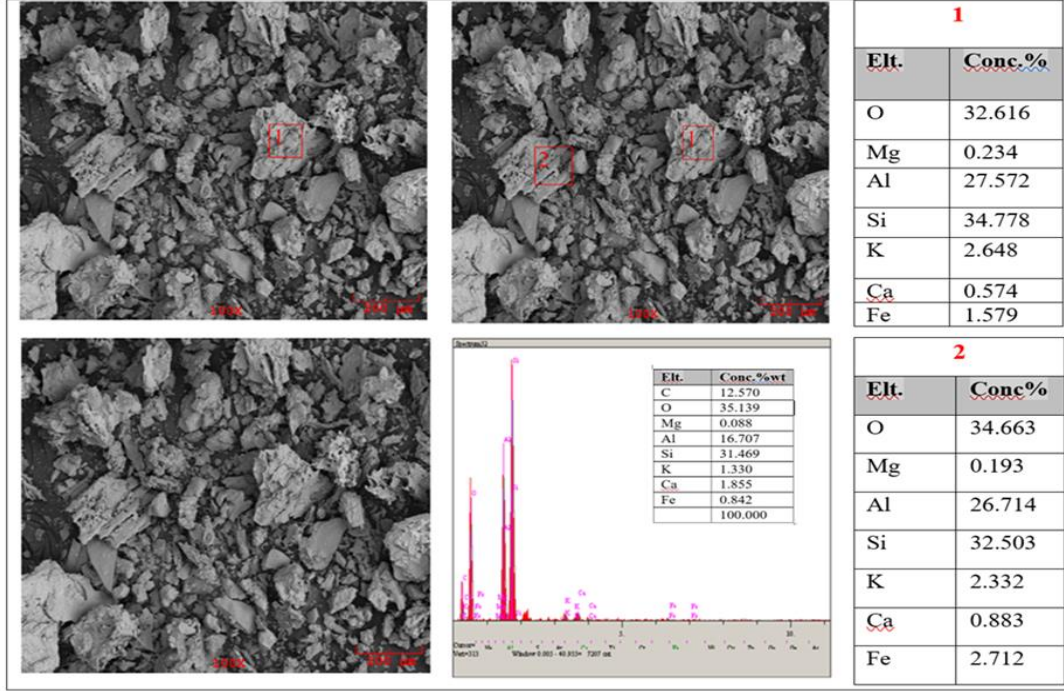
Derz 2 numunesinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleriyle incelenmiş; seçilen bölgelerden elde edilen EDS verileriyle elementel bileşim detaylandırılmıştır. 1 numaralı analizde en yüksek oranda Kalsiyum (%49,95) ve Oksijen (%31,32) tespit edilmiş, bunları Alüminyum (%3,20), Karbon (%1,68), Magnezyum (%1,02) ve eser miktarda Sodyum (%0,37) izlemiştir. Bu dağılım, çimento esaslı bağlayıcının yanı sıra dolgu ve katkı bileşenlerinin varlığına işaret etmektedir.

2 numaralı analizde ise dikkat çekici şekilde Kalsiyum (%44,85), Oksijen (%34,62) ve Silisyum (%7,38) öne çıkarken, Alüminyum (%5,77), Kükürt (%2,35) ve Magnezyum (%1,03) gibi çimento fazlarında sıkça rastlanan elementler de tespit edilmiştir. Bu bölgedeki Karbon oranı (%3,54), muhtemelen karbonatlaşma ürünleri veya organik bağlayıcı katkılarıyla ilişkilidir.

Elde edilen bu sonuçlar, derz dolgu malzemesinin büyük ölçüde kalsiyum oksit, alüminyum silikat ve silika içerdiğini göstermektedir. Bu bileşim, çimento esaslı yapısal derzlerde yaygın olan C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) ve C-A-H (kalsiyum alüminat hidrat) fazları ile uyumludur. Literatürde, bu fazların çimento bazlı derz malzemelerine dayanım ve dayanıklılık sağladığı belirtilmektedir (Taylor, 1997; Hewlett & Liska, 2019).

4.2.10. İzolasyon tuğla 1

İzolasyon Tuğla 1 numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.24. İzolasyon Tuğla 1 numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

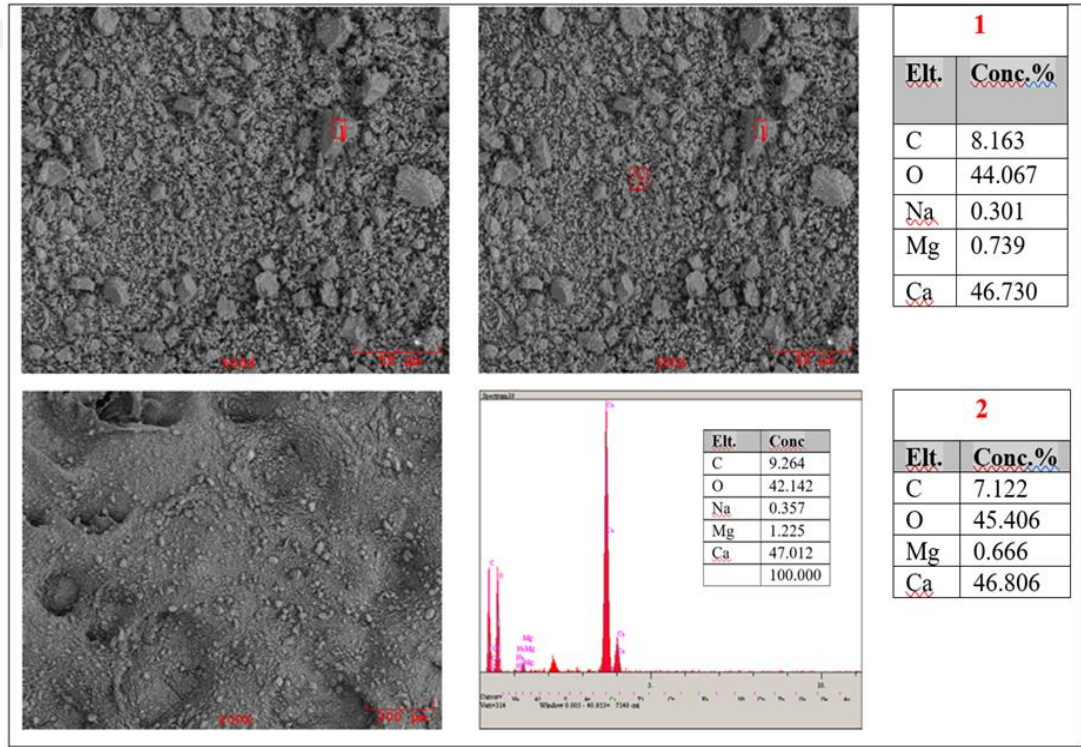
İzolasyon Tuğla 1 numunesinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleriyle incelenmiş, belirli bölgelerden elde edilen EDS analizleri ile elementel bileşim detaylandırılmıştır. 1 numaralı bölgede en yüksek oranlarda Silisyum (%34,78) ve Oksijen (%32,62) tespit edilmiş, bunları Alüminyum (%27,57) ve daha düşük düzeylerde Potasyum (%2,65), Kalsiyum (%1,57) ve Magnezyum (%0,23) izlemiştir. Bu kompozisyon, alümina-silika esaslı ısı yalıtım tuğlalarının tipik yapısal özelliklerini yansıtmaktadır.

2 numaralı bölgede de benzer şekilde yüksek Silisyum (%32,50) ve Alüminyum (%26,71) oranları gözlemlenmiş olup, Oksijen (%34,66) ile birlikte bu değerler numunenin ağırlıklı olarak alüminyum silikat içerdiğini göstermektedir. Aynı bölgede ayrıca Demir (%2,71), Kalsiyum (%0,88) ve Potasyum (%2,33) da belirlenmiştir. Demir varlığı, bu tür izolasyon malzemelerinde düşük seviyeli oksit katkılarının izini işaret ediyor olabilir.

Bu bulgular, literatürde yalıtım tuğlaları için tanımlanan tipik bileşenlerle örtüşmektedir. $Al_2O_3-SiO_2$ sistemine dayalı izolasyon tuğlaları, ısıya dayanıklı yapıları sayesinde yüksek sıcaklıklarda mekanik kararlılık sağlar ve hafiflikleri ile tercih edilir. Elde edilen SEM-EDS sonuçları da bu tür tuğlaların alümina ve silika zengin yapısını doğrular niteliktedir (Kingery et al., 1976; Rout et al., 2009).

4.2.11. Kalsit

Kalsit numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.25. Kalsit numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

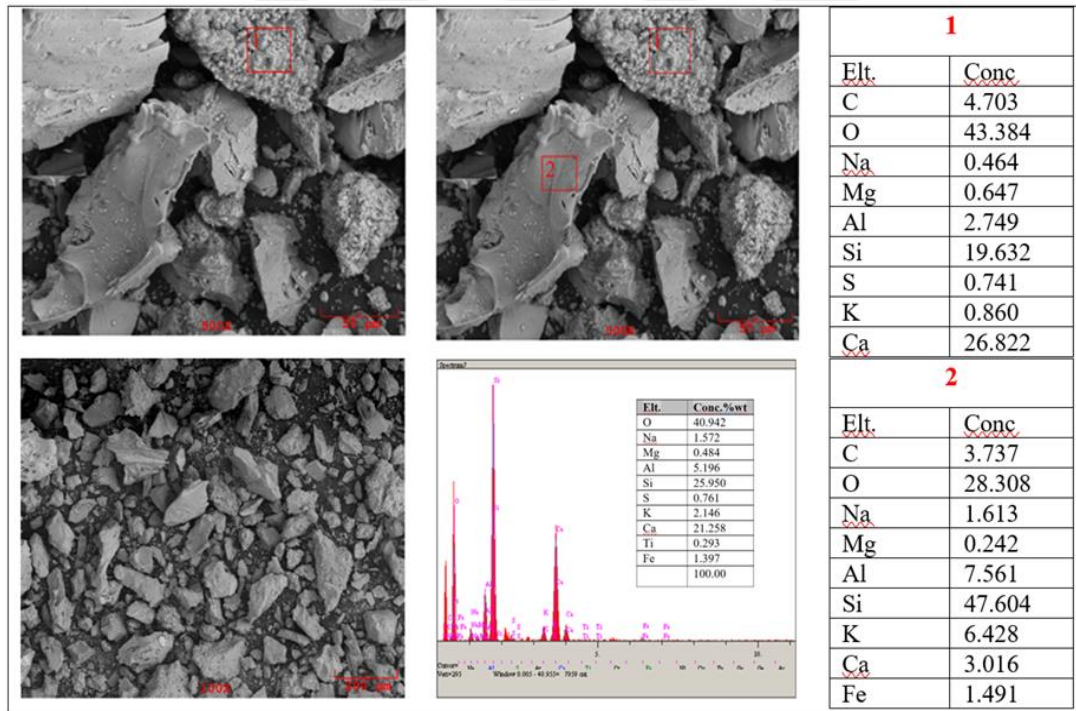
Kalsit numunesinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleriyle incelenmiş, farklı bölgelerden alınan EDS verileriyle elementel bileşimi detaylandırılmıştır. 1 numaralı analizde yüksek oranlarda Kalsiyum (%46,73) ve Oksijen (%44,07) tespit edilmiş; bunlara ek olarak Karbon (%8,16), Magnezyum (%0,74) ve Sodyum (%0,30) gibi elementler de daha düşük oranlarda gözlemlenmiştir. Bu bileşim, kalsit mineralinin karakteristik yapısını oluşturan $CaCO_3$ formülünü destekler niteliktedir. 2 numaralı bölgede de benzer şekilde Kalsiyum (%46,81) ve Oksijen (%45,41) öne çıkarken,

Karbon (%7,12) ve Magnezyum (%0,67) gibi elementler iz seviyelerde tespit edilmiştir. Her iki bölgede de Ca, O ve C'nin baskınlığı, numunenin yüksek saflıkta kalsiyum karbonat içerdiğini göstermektedir.

Elde edilen bu sonuçlar, doğal kalsit mineralinin tipik bileşimi ile büyük oranda örtüşmektedir. Literatürde CaCO_3 yapısının yaklaşık %56 CaO ve %44 CO_2 (karbon ve oksijen) bileşenlerinden oluştuğu, ayrıca eser miktarda Mg, Na gibi elementlerin yer değiştirme yoluyla yapıya dahil olabileceği belirtilmektedir (Plummer & Busenberg, 1982; Faure, 1998).

4.2.12. Kiremit

Kiremit numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.26. Kiremit numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

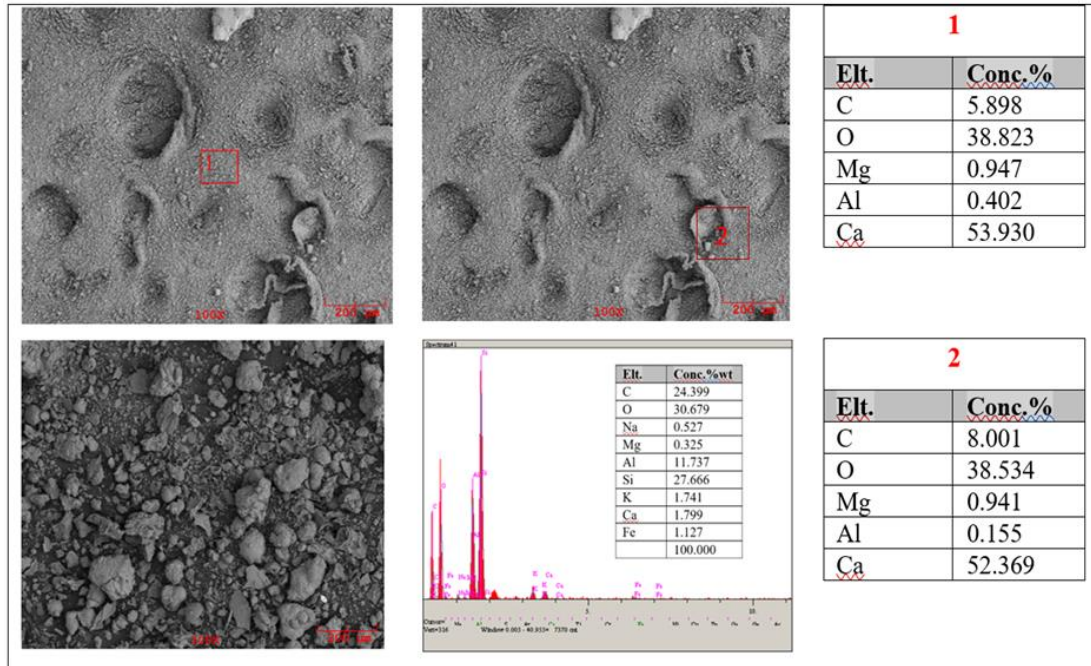
Kiremit numunesine ait yüzey yapısı SEM görüntüleriyle analiz edilmiş, farklı bölgelerden elde edilen EDS verileri ile elementel bileşim detaylandırılmıştır. 1 numaralı bölgede yapılan analizde, en yoğun bulunan elementler Oksijen (%43,38), Silisyum (%19,63) ve Kalsiyum (%26,82) olup, bu bileşim pişmiş kil esaslı yapı malzemelerinin karakteristik bileşimini yansıtmaktadır. Aynı bölgede Alüminyum

(%2,75), Karbon (%4,70), Potasyum (%0,86), Magnezyum (%0,65) ve eser miktarda Sodyum (%0,46) tespit edilmiştir.

2 numaralı bölgede ise Silisyum (%47,60) ve Oksijen (%40,59) oranları oldukça yüksek bulunmuş; bunlara ek olarak Alüminyum (%7,56), Potasyum (%6,43) ve Kalsiyum (%3,02) gibi elementler dikkat çekmiştir. Bu bileşim, kil minerallerinin pişirilmesiyle oluşan alüminosilikat esaslı seramik yapı ile uyumludur. Ayrıca Demir (%1,49) ve Sodyum (%1,61) varlığı, bu tür malzemelerde sıklıkla rastlanan doğal mineral safsızlıklarıyla açıklanabilir. Elde edilen SEM-EDS sonuçları, pişmiş kil bazlı seramik ürünlerin bileşimini açıklayan literatürle örtüşmektedir. Özellikle yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ içerikleri, kiremit gibi yapı seramiklerinde dayanım ve termal kararlılığı sağlayan temel fazlar olarak tanımlanır. Potasyum ve sodyum gibi alkali elementler ise cam faz oluşumuna katkı sağlayarak sinterleme sürecine olumlu etki eder (Kingery et al., 1976; Işık & Duman, 2021).

4.2.13. Sönmüş kireç

Sönmüş Kireç numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.27. Sönmüş Kireç numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

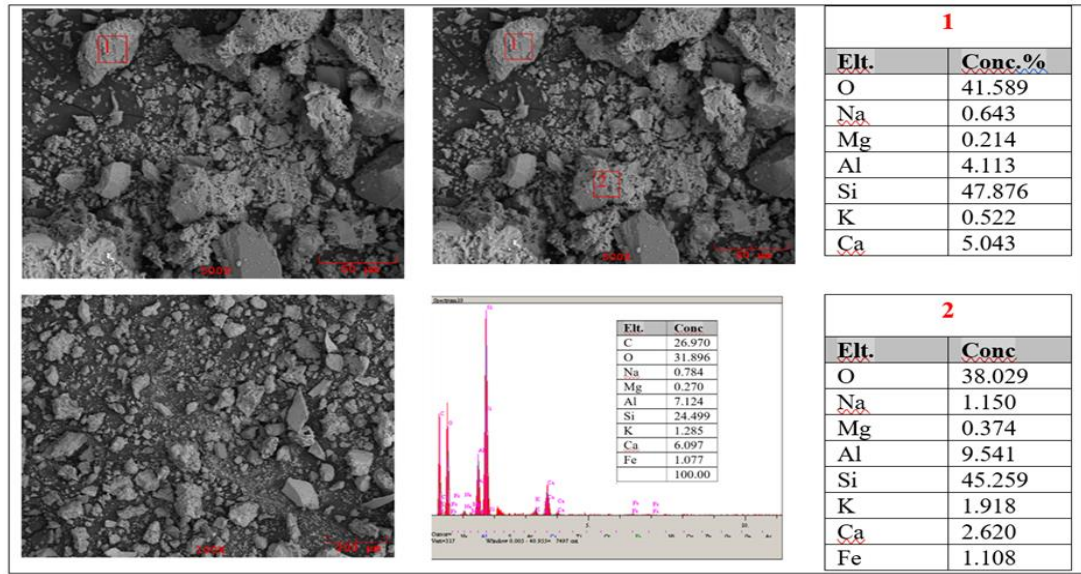
Sönmüş kireç numunesinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleriyle incelenmiş ve belirlenen bölgelerden alınan EDS analizleri ile kimyasal bileşim detaylandırılmıştır. 1 numaralı analiz bölgesinde en yüksek oranda Kalsiyum (%53,93) ve Oksijen (%38,82) tespit edilmiştir. Ayrıca Karbon (%5,90), Magnezyum (%0,95) ve Alüminyum (%0,40) da düşük oranlarda gözlemlenmiştir. Bu dağılım, Ca(OH)_2 (kalsiyum hidroksit) esaslı bir yapı malzemesi olduğunu doğrulamaktadır.

2 numaralı analiz bölgesinde de benzer şekilde Kalsiyum (%52,37) ve Oksijen (%38,53) ön plana çıkmakta; Karbon (%8,00) ve Magnezyum (%0,94) ise yüzeyde mevcut diğer bileşenleri göstermektedir. Söz konusu bileşim, özellikle kalsiyum esaslı bağlayıcıların karbonatlaşma eğiliminde olduğunu ve yüzeyde CaCO_3 benzeri fazların oluşabileceğini düşündürmektedir.

Sönmüş kireç (Ca(OH)_2), özellikle harç ve sıva gibi yapı malzemelerinde bağlayıcı olarak kullanılan bir maddedir. EDS analiz sonuçları, literatürde de belirtildiği üzere, bu malzemenin yüksek oranda Ca ve O içerdiğini ve çevresel koşullarda karbonatlaşarak CaCO_3 fazlarına dönüşebileceğini göstermektedir (Taylor, 1997; Plank et al., 2020). Ayrıca yüzeyde tespit edilen karbon miktarları, bu dönüşümün başladığını işaret etmektedir.

4.2.14. Seramik

Seramik numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



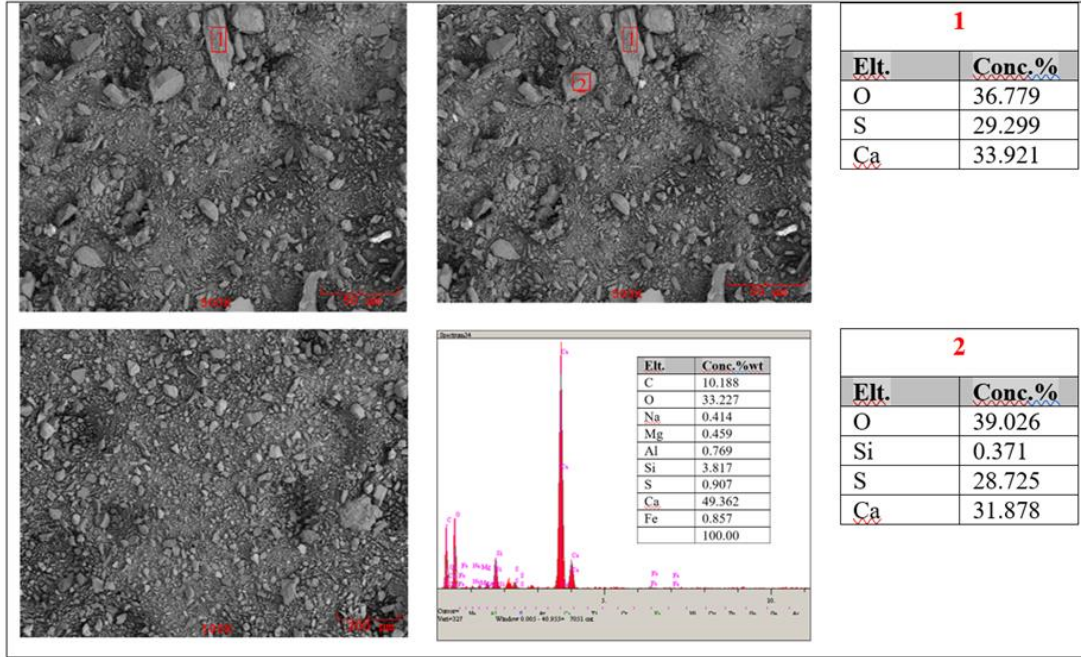
Şekil 4.28. Seramik numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

Seramik numunesine ait yüzey morfolojisi SEM görüntüleri ile detaylı şekilde incelenmiş, belirlenen bölgelerden elde edilen EDS analizleri ile elementel bileşim değerlendirilmiştir. 1 numaralı analiz bölgesinde Silisyum (%47,88) ve Oksijen (%41,59) en yüksek oranlarda gözlemlenmiş; bunları Alüminyum (%4,11) ve Kalsiyum (%5,04) takip etmiştir. Ayrıca iz miktarda Sodyum (%0,64), Magnezyum (%0,21) ve Potasyum (%0,52) elementleri de tespit edilmiştir. Bu bileşim, pişmiş kil esaslı seramik yapıların karakteristik alüminosilikat yapısını yansıtmaktadır. 2 numaralı bölgede de benzer şekilde Silisyum (%45,26) ve Oksijen (%38,03) başta gelirken, Alüminyum (%9,54) oranı bu bölgede daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca Kalsiyum (%2,62), Potasyum (%1,92), Sodyum (%1,15) ve Demir (%1,11) gibi katkı elementleri de gözlemlenmiştir. Bu dağılım, camsı faz içeren pişmiş seramiklerdeki mineral çeşitliliğiyle örtüşmektedir.

Sonuçlar, literatürde seramik malzemelerin mikro yapılarında baskın olarak yer alan SiO_2 ve Al_2O_3 bileşiklerini doğrular niteliktedir. Özellikle feldspat, kuvars ve kil esaslı hammaddelerle hazırlanan yapı seramiklerinde, sinterleme sonrası bu elementlerin oluşturduğu fazlar malzemenin mekanik dayanımı ve termal kararlılığı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Murat et al., 2022; Mohammadi & Behnia, 2021; Gualtieri & Ferrari, 2023). Ayrıca, Ramasamy ve Sundararajan (2020), geleneksel kırmızı kil bazlı seramiklerde benzer SEM-EDS dağılımlarına ulaşmış ve bu yapıların inşaat sektöründe dayanıklı yüzey kaplama malzemesi olarak uygunluğunu vurgulamıştır.

4.2.15. Sıva

Sıva numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.29. Sıva numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

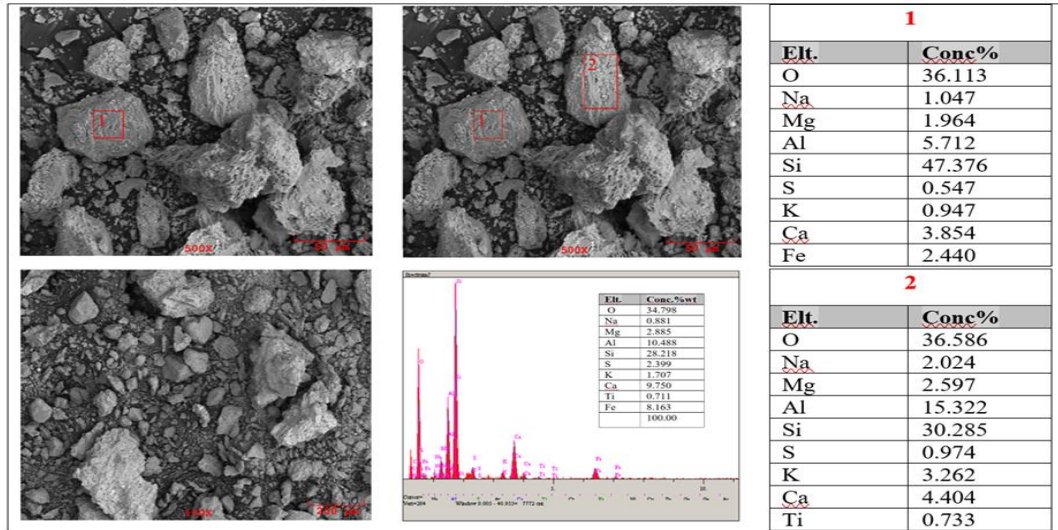
Seramik numunesine ait yüzey morfolojisi SEM görüntüleri ile detaylı şekilde incelenmiş, belirlenen bölgelerden elde edilen EDS analizleri ile elementel bileşim değerlendirilmiştir. 1 numaralı analiz bölgesinde Silisyum (%47,88) ve Oksijen (%41,59) en yüksek oranlarda gözlemlenmiş; bunları Alüminyum (%4,11) ve Kalsiyum (%5,04) takip etmiştir. Ayrıca iz miktarda Sodyum (%0,64), Magnezyum (%0,21) ve Potasyum (%0,52) elementleri de tespit edilmiştir. Bu bileşim, pişmiş kil esaslı seramik yapıların karakteristik alüminosilikat yapısını yansıtmaktadır.

2 numaralı bölgede de benzer şekilde Silisyum (%45,26) ve Oksijen (%38,03) başta gelirken, Alüminyum (%9,54) oranı bu bölgede daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca Kalsiyum (%2,62), Potasyum (%1,92), Sodyum (%1,15) ve Demir (%1,11) gibi katkı elementleri de gözlemlenmiştir. Bu dağılım, camsı faz içeren pişmiş seramiklerdeki mineral çeşitliliğiyle örtüşmektedir. Sonuçlar, literatürde seramik malzemelerin mikro yapılarında baskın olarak yer alan SiO_2 ve Al_2O_3 bileşiklerini doğrular niteliktedir. Özellikle feldspat, kuvars ve kil esaslı hammaddelerle hazırlanan yapı seramiklerinde,

sinterleme sonrası bu elementlerin oluşturduğu fazlar malzemenin mekanik dayanımı ve termal kararlılığı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Murat et al., 2022; Mohammadi & Behnia, 2021; Gualtieri & Ferrari, 2023). Ayrıca, Ramasamy ve Sundararajan (2020), geleneksel kırmızı kil bazlı seramiklerde benzer SEM-EDS dağılımlarına ulaşmış ve bu yapıların inşaat sektöründe dayanıklı yüzey kaplama malzemesi olarak uygunluğunu vurgulamıştır.

4.2.16. Tuğla

Tuğla numunesine ait yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM-EDS analizi ile değerlendirilmiştir. Farklı bölgelerden alınan SEM görüntüleri ile yüzey yapısı detaylı biçimde incelenmiş, bu bölgelere ait EDS spektrumu ve elementel analiz tabloları sunulmuştur.



Şekil 4.30. Tuğla numunesine ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları.

Tuğla numunesinin yüzey morfolojisi SEM görüntüleri ile değerlendirilmiş; belirlenen bölgelerden alınan EDS analizleri ile kimyasal bileşim belirlenmiştir. 1 numaralı analiz bölgesinde Silisyum (%47,38) ve Oksijen (%36,11) en yüksek oranlarda bulunmuş, bu bileşenleri Alüminyum (%5,71), Kalsiyum (%3,85), Magnezyum (%1,96) ve Sodyum (%1,05) takip etmiştir. Ayrıca iz miktarda Potasyum (%0,95) ve Demir (%2,44) de gözlemlenmiştir. Bu dağılım, pişmiş kil bazlı tuğlalarda yaygın olarak rastlanan alüminosilikat esaslı seramik yapıyı yansıtmaktadır.

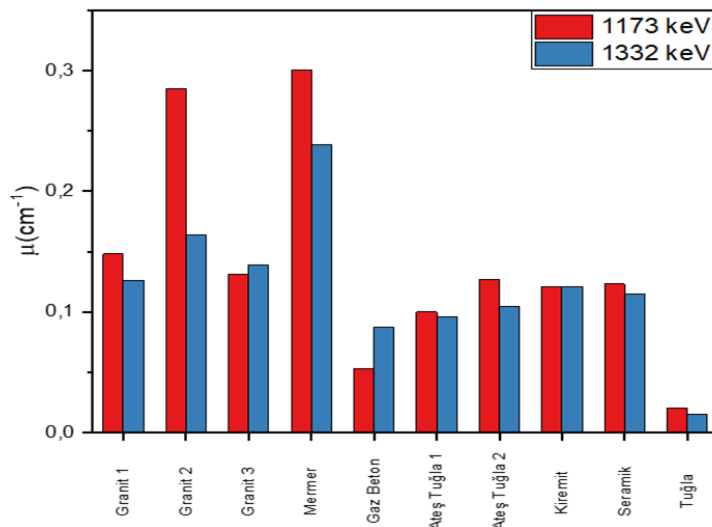
2 numaralı bölgede Silisyum (%30,29) ve Oksijen (%36,59) yine başlıca bileşenler olarak öne çıkarken, Alüminyum (%15,32) oranı oldukça yüksek bulunmuştur. Bunun yanı sıra Potasyum (%3,26), Kalsiyum (%4,40) ve Magnezyum (%2,92) gibi

yapıtaşları da belirlenmiştir. Titanyum (%0,73) ve Sülfür (%0,97) gibi katkı elementlerinin varlığı, mineral safsızlıkların ya da üretim sırasında eklenen bileşenlerin bir sonucu olabilir.

Elde edilen bu veriler, tuğla numunesinin bileşiminin kil esaslı ve yüksek oranda SiO_2 – Al_2O_3 içerikli bir seramik malzeme olduğunu göstermektedir. Literatürde de belirtilen şekilde, bu tür seramik yapı elemanlarında feldspat, kaolinit, kuvars gibi hammaddelerden gelen silika ve alümina, sinterleme sonrası camsı ve kristal fazlar oluşturarak malzemeye dayanıklılık kazandırmaktadır (Murat et al., 2022; Gualtieri & Ferrari, 2023; Işık & Duman, 2021). Ayrıca Mohammadi & Behnia (2021), benzer bileşimlerin feldspat katkılı yapı seramiklerinde özellikle termal kararlılık ve mukavemet açısından önemli rol oynadığını belirtmiştir.

4.3. Yapı Malzemelerinde Radyasyon Soğurma Bulguları

Bu kısımda, yapı malzemelerinin radyasyon soğurma özelliklerine ilişkin deneysel bulgular değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, Gebze bölgesine ait 10 yapı malzemesine ilişkin doğrusal zayıflama katsayısı sonuçları Şekil 4.31’de sunulmuştur. Bu şekilden, kullanılan gama ışını enerjilerine bağlı olarak yapı malzemelerinin toplam doğrusal zayıflama katsayılarında meydana gelen değişimler açıkça gözlemlenmektedir.

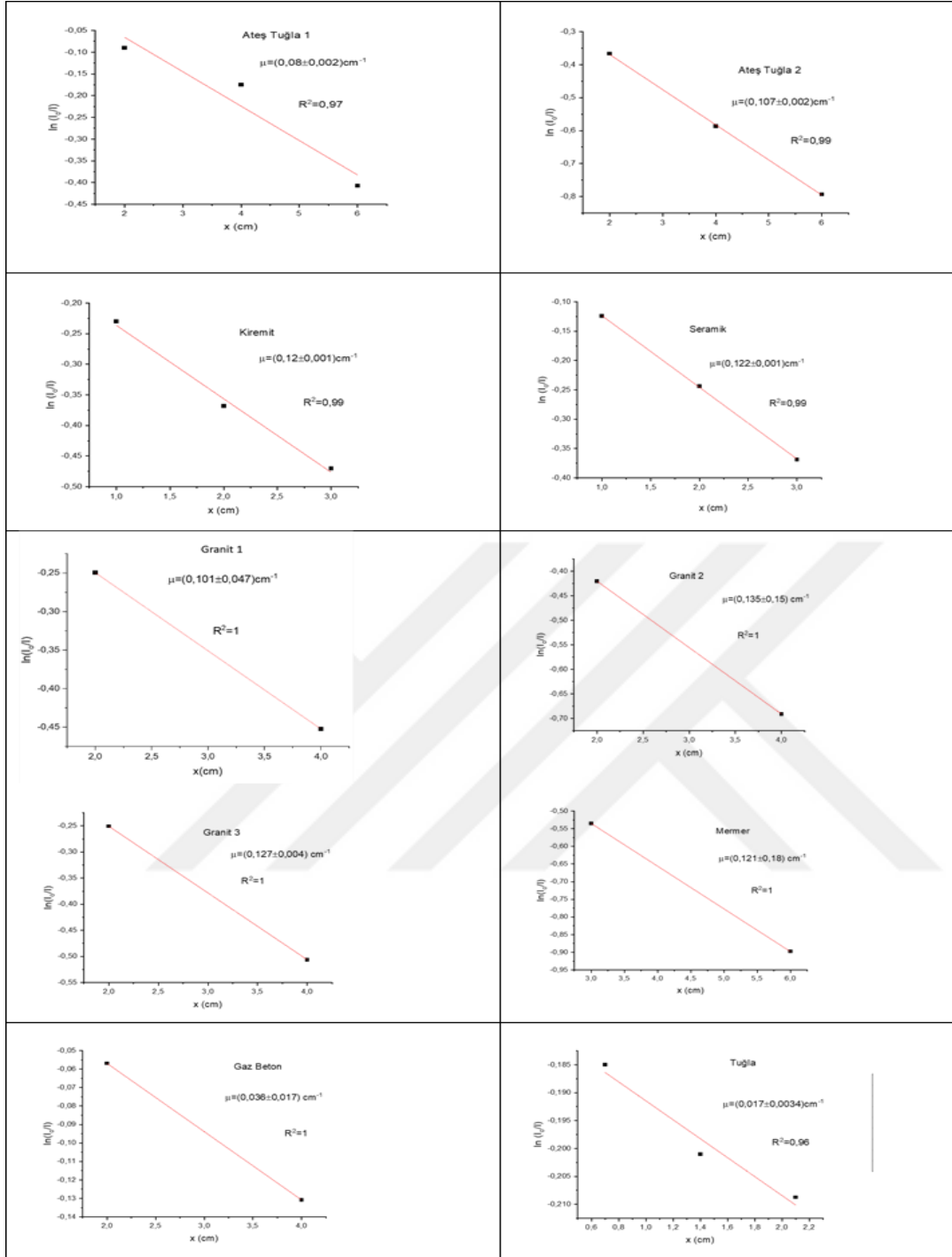


Şekil 4.31. Gebze bölgesinden alınan yapı malzemelerinin μ katsayısı değerleri

Şekil 4.31’ de görüldüğü üzere, Gebze bölgesine ait yapı malzemeleri arasında en yüksek doğrusal zayıflama katsayısı 1173 keV enerjisi için Mermer numunesinde, 1332 keV enerjisi için ise yine Mermer ve Granit 2 numunelerinde ölçülmüştür. En düşük μ değeri ise her iki enerji seviyesinde de Tuğla numunesinde tespit edilmiştir. Bu sonuçlar yapı malzemelerinin radyasyona karşı zayıflama yeteneklerinin hem bileşimlerine hem de gama enerjisine bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. (Damla,2009)

Şekil 4.32. Gebze bölgesinden elde edilen yapı malzemelerine ait doğrusal zayıflatma katsayısı (μ) değerlerinin gama foton enerjisine bağlı olarak değişimi, doğrusal uyum eğrileri ve hata oranlarıyla birlikte gösterilmiştir.





Şekil 4.32. Gebze bölgesi yapı malzemelerinin μ katsayısı değerlerinin enerjiye bağlı değişimi

Şekil 4.32’de yer alan grafiklerde, Gebze bölgesinden temin edilen yapı malzemelerine ait doğrusal zayıflama katsayısı (μ) ile enerji arasındaki ilişki incelenmiştir. Elde edilen veriler, tüm numunelerde μ değerlerinin enerji artışı ile birlikte azaldığını ve bu azalmanın doğrusal bir eğilim gösterdiğini ortaya koymaktadır. Her bir malzeme için

hesaplanan R^2 katsayısının 0,96'nın üzerinde olması, bu ilişkiyi yüksek doğrulukla yansıttığını göstermektedir.

4.4. Toprak Numunelerine Ait Bulgular

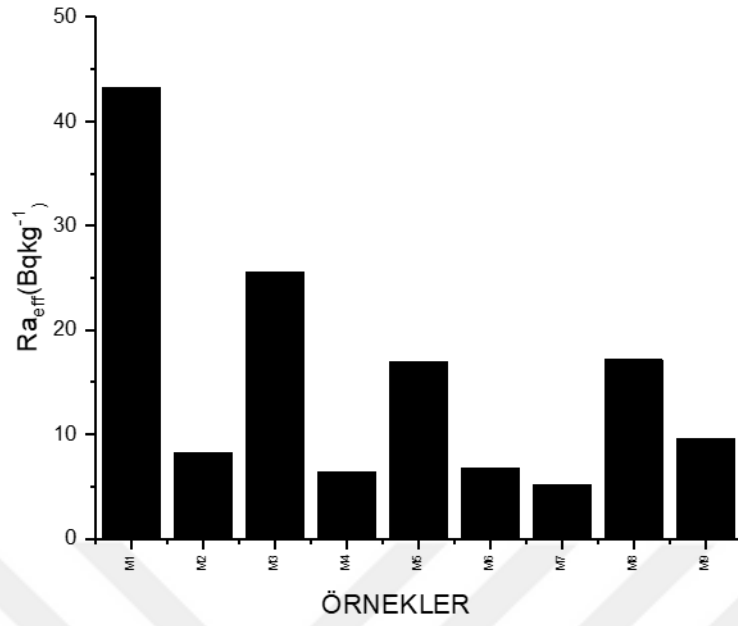
Kocaeli ili Gebze ilçesi ve çevresinde, maden sahalarına yakın bölgelerden toplanan toprak numunelerine ait analiz sonuçlarına göre; bazı örneklerde radon konsantrasyonlarının yüksek seviyelerde olduğu, bazı örneklerde ise daha düşük değerler kaydedildiği belirlenmiştir. Bu durum, maden sahalarına ait jeolojik yapıların ve toprak özelliklerinin radon gazı salınımı üzerindeki etkilerinin farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.1' de Gebze ve çevresinde kodlanarak isimlendirilen dokuz farklı noktadan elde edilen ölçümlere ait sonuçlar, kütle ve yüzey radon yayılım oranları ile birlikte etkin radyum içeriği açısından verilmiştir:

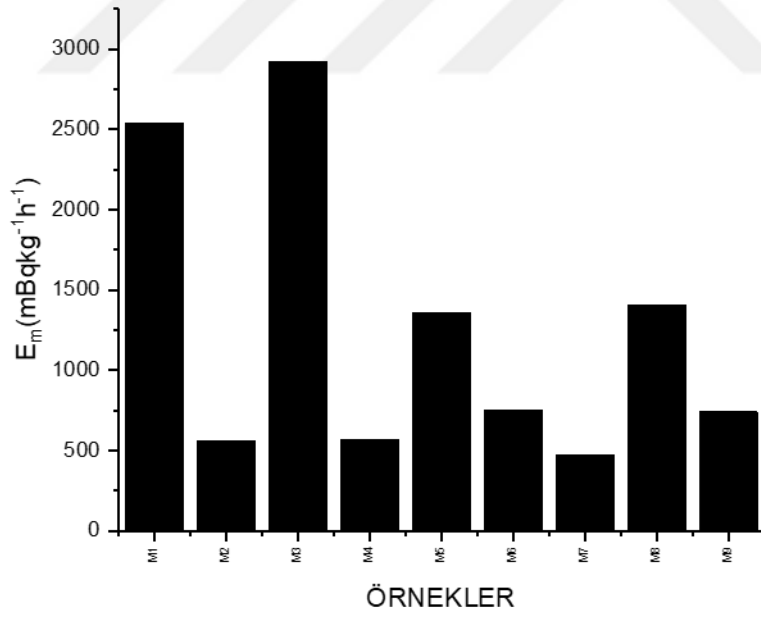
Tablo 4.1. Gebze bölgesinde alınan numune örneklerinin kütle ve yüzey radon yayılım oranları ile etkin radyum konsantrasyonu

Nokta	C_{Rn} (Bqm ⁻³)	C_{Ra} (Bqkg ⁻¹)	E_M (mBqkg ⁻¹ h ⁻¹)	E_s (Bqm ⁻² h ⁻¹)	Contributo indoor R_n (Bqm ⁻³)
M1	13500,92	43,20	2539,61	28,21	252,45
M2	2583,67	8,27	559,38	3,57	55,60
M3	7976,66	25,53	2921,92	18,66	290,45
M4	2014,89	6,45	569,72	0,53	56,63
M5	5303,19	16,97	1360,06	2,07	135,19
M6	2104,70	6,74	751,16	4,43	74,67
M7	1616,52	5,17	470,38	0,76	46,76
M8	5363,06	17,16	1407,06	1,31	139,87
M9	3000,46	9,60	741,14	1,88	73,67
Minimum	1616,52	5,17	470,38	0,53	46,76
Maksimum	13500,92	43,20	2921,92	28,21	290,45
Ortalama	4829,34	15,45	1257,82	6,82	125,03
Standart Sapma	3867,59	12,38	904,85	9,79	89,94

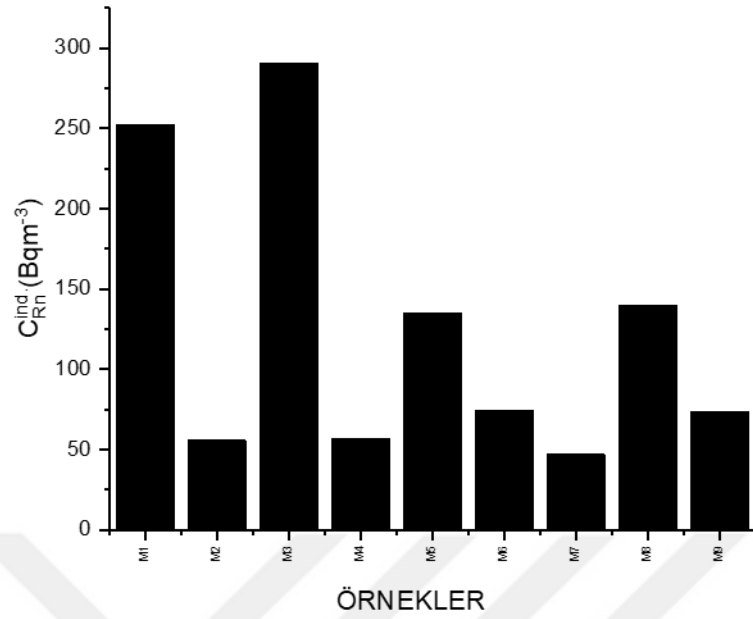
Şekil 4.33'de ²²⁶Ra konsantrasyonu, Şekil 4.34'de radon eksalasyon oranı (E_m), Şekil 4.35'de radon yoğunluğu ve Şekil 4.36'da yüzeye bağlı eksalasyon oranlarına (E_s) ilişkin veriler, aşağıda sunulmuştur.



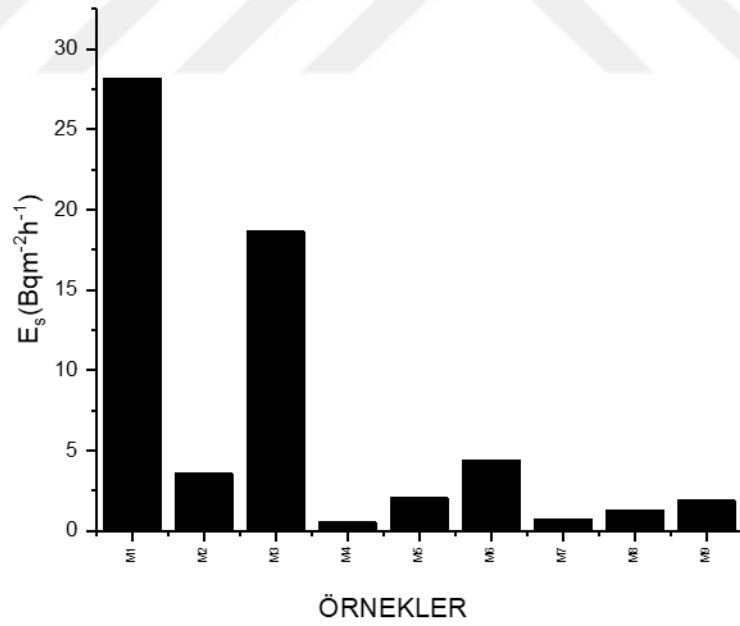
Şekil 4.33. Örneklerde ölçülen ^{226}Ra konsantrasyonlarının ($Bq.kg^{-1}$) dağılımı



Şekil 4.34. Radon eksalasyon oranlarının $E_m(mBq.kg^{-1}.h^{-1})$ grafiği.



Şekil 4.35. Radon yoğunluklarının dağılımı. ($Bq.m^{-3}$)



Şekil 4.36. Yüzeye bağlı radon eksalasyon oranlarının $E_s(Bq.m^{-3})$ grafiği.

Gebze ve çevresindeki çeşitli maden alanlarının yakın çevresinden alınan toprak örneklerine ait radon ölçümleri incelendiğinde, iç ortama katkı yapan radon konsantrasyonlarının $46,76 Bq/m^3$ ile $290,45 Bq/m^3$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu değerler, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO, 2009) iç ortam havası için önerdiği 100

Bq/m³ sınır değerinin bazı numunelerde aşıldığını ve özellikle M3 örneğinde tespit edilen 290,45 Bq/m³'lük değer 300 Bq/m³'lük üst sınıra oldukça yakın olduğunu ortaya koymaktadır. Ortalama radon konsantrasyonunun 125,03 Bq/m³ olması, bazı bölgelerdeki toprakların iç ortam hava kalitesi üzerinde risk oluşturabileceğini göstermektedir. Aynı bölgelerde yapı hammaddesi olarak kullanılan kayalara yönelik daha önce gerçekleştirilen gama spektrometrik analizlerde, radium eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}) değerlerinin, uluslararası kabul edilen sınırların altında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, yapı malzemesi olarak kullanılan kayaların kendisinin doğrudan radyolojik risk taşımadığını, ancak çevredeki toprakların radon salınım potansiyeli bakımından izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. (UNESCAR,2000)

Elde edilen ²²⁶Ra konsantrasyonları, radon eksalasyon oranları (E_m), yüzeye bağlı eksalasyon değerleri (E_s) gibi parametreler, literatürde Türkiye'de ve farklı ülkelerde yapılmış benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4.2. Dünya genelinde yapılan çalışmaların değerlendirmesi.

C _{eff} Ra (Bqkg ⁻¹)	E _m (mBqkg ⁻¹ h ⁻¹)	E _s (Bqm ⁻² h ⁻¹)	Çalışma (Ref., Yer)
11,54–26,71	15,16–35,11	502,12–1162,64	Sharma vd. (2003), Hindistan
0,02–0,80	—	13,3–400,7	Baykara vd. (2005), Türkiye
5,70–25,45	7,17–31,98	246,3–1100,0	Singh vd. (2005), Hindistan
13,8–298,9	(0,39–8,21)×10 ⁻²	—	Prasad vd. (2008), Hindistan
5,30–31,71	6,15–36,80	216,87–1298,0	Singh vd. (2009), Hindistan
806–970	23,1–28,6	493–599	Chauhan (2011), Hindistan
66–125	—	171–344	Rafique vd. (2011), Pakistan
8,11–112,83	0,03–0,66	0,8–17,1	Khan vd. (2012), Hindistan
5,59–34,56	(0,02–0,11)×10 ⁻³	(0,06–0,11)×10 ⁻³	Verma vd. (2012), Hindistan
59,3–515,8	2,2–61,0	58,3–506,9	Saad vd. (2013), Libya (Al-Marj)
31,1–469,0	1,16–17,40	30,6–460,9	Saad vd. (2013), Libya (Bingazi)
1,61–6,55	—	53,39–216,96	Kumar ve Narang (2014), Hindistan
0,17–15,18	—	—	Taşköprü (2014), Türkiye
3,77–26,69	0,73–5,18	35,76–253,15	Tabar vd. (2018), Türkiye
0,80–62,43	—	26,32–526,4	Pişkin (2017), Türkiye
46–251	—	—	Gürleyen (2017), Türkiye
463,4–587,1	—	—	Sağlam (2019), Türkiye
-	0,31–2,31	0.008–0.058	Singh et al. (2019), Hindistan
0,34–14,23	27,32–1132,71	0,65–24,25	Yaşar (2020), Türkiye
37,35–46,02	—	—	Alemy (2023), Türkiye
5,17–43,20	470,38–2921,92	0,53–28,21	Bu çalışma (2025), Gebze–Türkiye

4.5. Su Numunelerine Ait Bulgular

Çalışmanın bu bölümünde, Marmara Bölgesi'nde yer alan Kocaeli ili Gebze ilçesinin merkezi ile birlikte Balçık, Mollafenari, Cumaköy, Kadıllı, Denizli, Köşeler, Tepecik, Demirciler, Tavşanlı, Pelitli, Muallimköy ve Ballıkayalar gibi çevre yerleşimlerden toplam 60 adet su numunesi alınarak analiz edilmiştir. Örnekler; dere, kuyu, baraj ve evsel kullanım sularını temsil eden farklı kaynaklardan alınmış, 500 ml hacmindeki şişelere dikkatli şekilde doldurulmuş ve sarsıntı ya da çalkalanmaya maruz kalmadan Sakarya Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarı'na taşınmıştır. Numuneler, alınmalarını takiben 24 ila 48 saat içerisinde laboratuvara ulaştırılmış ve burada Şekil 3.22'de gösterilen RAD-7 elektronik radon dedektörü sistemi ile ^{222}Rn aktivite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numunenin alınması ile ölçüm işlemi arasında belirli bir zaman geçmiş olması nedeniyle, sudaki radon atomlarında doğal bozunma meydana gelmiştir. Bu nedenle, analiz sonuçlarının gerçeğe en yakın şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla, ölçüm öncesinde bozunma düzeltme faktörü (DCF) hesaplanmıştır. Böylece, radonun örnekleme ile ölçüm arasındaki süre boyunca gösterdiği azalma dikkate alınarak nihai sonuçlar düzeltilmiş ve yorumlanmıştır.

Suyun örneklendiği andan itibaren ölçüm yapılana kadar geçen süre göz önünde bulundurularak, radon bozunması için düzeltme katsayısı (DCF) hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan ifade aşağıdaki gibidir:

$$\text{DCF}=\exp(T/\tau) \quad (4.2)$$

Bu bağıntıda; T, örnek alımı ile ölçüm arasındaki geçen süreyi (saat cinsinden), τ ise ^{222}Rn izotopunun ortalama ömrünü (132,4 saat) ifade etmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada, su örneklerinin alındığı Kocaeli ilinin Gebze ilçesi ve çevresinden toplanan örneklerle verilen numaralar, numune alınan noktaların koordinat bilgileri, örnek alım ve ölçüm zamanları arasındaki geçen süre detaylı biçimde kaydedilmiştir. Ayrıca, her bir örnek için alınma ve laboratuvara ulaştırılarak ölçüme başlanma süreci dikkate alınarak, bozunmaya bağlı düzeltme faktörleri hesaplanmış ve Tablo 4.3. içerisinde sunulmuştur.

Tablo 4.3. Ölçülen suların koordinatları, numune alma ve ölçüm zamanları arasındaki geçen süre ile DCF bozunum faktörü değerleri.

Örnek ID	Koordinatlar	Geçen Süre (saat)	DCF
1	K 40.87511422°,D 29.4312581°	101,17	2,15
2	K 40.8802378° , D 29.4390784°	103,25	2,18
3	K 40.8752973° ,D 29.4516983°	96,03	2,07
4	K 40.8865835° ,D 29.4928528°	96,58	2,07
5	K 40.0824816° , D 29.3176925°	99,43	2,12
6	K 40.88498622°,D 29.48858386°	79,65	1,83
7	K 40.8881224° , D 29.4914952°	96,73	2,08
8	K 40.8906661°,D 29.4924067°	93,68	2,03
9	K 40.8937207°,D 29.4945591°	102,75	2,17
10	K 40.8973559°,D 29.4946864°	77,93	1,80
11	K 40.8999412°,D 29.4935838°	94,25	2,04
12	K 40.9322889°,D 29.4978646°	79,35	1,82
13	K 40.9323094°,D 29.49748°	75,25	1,77
14	K 40.902271°,D 29.493154°	75,70	1,77
15	K 40.8938735°,D 29.53009°	80,85	1,84
16	K 40.890368°,D 29.533361°	76,48	1,78
17	K 40.891333°,D 29.53549°	72,57	1,73
18	K 40.86145°,D 29.5736546°	129,33	2,66
19	K 40.8682209°,D 29.576905°	130,18	2,67
20	K 40.8668715°,D 29.679165°	141,92	2,92
21	K 40.847537°,D 29.5584804°	142,87	2,94
22	K 40.844166°,D 29.556402°	125,13	2,57
23	K 40.846407°,D 29.55516°	121,58	2,51
24	K 40.836449°,D 29.506604°	147,77	3,05
25	K 40.873323°,D 29.466566°	143,82	2,96
26	K 40.859315°,D 29.46085°	146,73	3,03
27	K 40.865229°,D 29.505064°	174,47	3,73
28	K 40.864943°,D 29.545031°	117,75	2,43
29	K 40.800642°,D 29.437819°	173,15	3,70
30	K 40.800616°,D 29.436253°	154,30	3,21
31	K 40.7912138°,D 29.4388533°	173,50	3,71
32	K 40.7913495°,D 29.4334633°	218,47	5,21
33	K 40.7925306°,D 29.4355902°	155,38	3,23
34	K 40.7916938°,D 29.4367458°	243,82	6,31
35	K 40.7917507°,D 29.4379084°	151,72	3,15
36	K 40.7907308°,D 29.4383462°	242,77	6,26
37	K 40.7940505°,D 29.4373344°	153,00	3,18
38	K 40.7918081°,D 29.4373041°	168,28	3,56
39	K 40.7905509°,D 29.436012°	218,77	5,22
40	K 40.87511422°,D 29.4312581°	171,87	3,66
41	K 40.7935836°,D 29.4362171°	198,12	4,47
42	K 40.79326935°,D 29.4347994°	100,97	2,14
43	D 29.4321351°,K 40.7893321°	150,50	3,12
44	K 40.7883282°,D 29.4312387°	239,30	6,09
45	K 40.7911321°,D 29.4880121°	173,70	3,71
46	K 40.7925671°,D 29.4885406°	195,58	4,38

Tablo 4.3.(Devamı) Ölçülen suların koordinatları, numune alma ve ölçüm zamanları arasındaki geçen süre ile DCF bozunum faktörü değerleri.

47	K 40.7925598°,D 29.4884939°	97,60	2,09
48	K 40.8174436°,D 29.5087217°	172,03	3,67
49	K 40.8137274°,D 29.514149°	123,93	2,55
50	K 40.81869°,D 29.5084918°	215,23	5,08
51	K 40.8187°,D 29.507121°	152,85	3,17
52	K 40.825401°,D 29.5086417°	240,58	6,15
53	K 40.8233739°,D 29.5024412°	75,25	1,77
54	K 40.8331747°,D 29.5059137°	240,97	6,17
55	K 40.8331758°,D 29.5057292°	241,67	6,20
56	K 40.8352436°,D 29.5060758°	163,95	3,45
57	K 40.8236491°,D 29.5051723°	92,28	2,01
58	K 40.8253006°,D 29.5166573°	93,73	2,03
59	K 40.8253992°,D 29.5169475°	237,52	6,01
60	K 40.8225932°,D 29.509453°	168,48	3,57

Tablo 4.3’ de görüldüğü üzere, ölçümler doğrudan değil, belirli bir süre sonra yapılmış ve ölçüm zamanlarına karşılık gelen DCF düzeltme katsayıları belirlenmiştir. Ölçümler öncesinde, RAD-7 cihazı ve (H₂O) aksesuarı kullanılarak, her biri 250 mL hacminde olan şişelere dört adet radon aktivitesi ölçümü alınmıştır. Her bir örnek için gerçekleştirilen bu ölçümlerden ortalama radon aktiviteleri (Bq/L) elde edilmiş ve bu değerler minimum-maksimum sınırlarıyla kaydedilmiştir. Ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla, RAD-7 cihazının ölçüm esnasında kaydettiği veriler bilgisayara aktarılmış ve CAPTURE v6.2.4 yazılımı kullanılarak DCF (bozunum düzeltmesi) faktörleri uygulanmıştır. Bu doğrultuda, düzeltilmiş sonuçlar Tablo 4.4’de ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

Tablo 4.4. Ölçülen suların ortalama radon aktiviteleri, standart sapmaları ve DCF düzeltmeleri yapılmış değerleri.

Örnek ID	Ort. Rn Aktivitesi, Bq/L	Standart Sapma (SD)	Ort. Rn (Bq/L) xDCF	SD x DCF
1	0,60	0,32	1,28	0,69
2	12,00	1,87	26,17	4,08
3	2,47	0,81	5,10	1,68
4	0,86	0,45	1,78	0,93
5	1,94	0,57	4,11	1,21
6	0,15	0,08	0,27	0,14
7	0,82	0,43	1,71	0,90
8	3,28	0,62	6,66	1,25
9	1,80	0,49	3,91	1,06
10	1,67	1,45	3,01	2,61
11	6,04	1,20	12,31	2,45
12	0,37	0,09	0,68	0,15
13	0,00	0,00	0,00	0,00
14	4,80	1,58	8,50	2,80
15	10,70	1,45	19,71	2,67
16	2,39	0,40	4,26	0,72
17	2,71	1,72	4,69	2,98
18	0,45	0,15	1,18	0,39

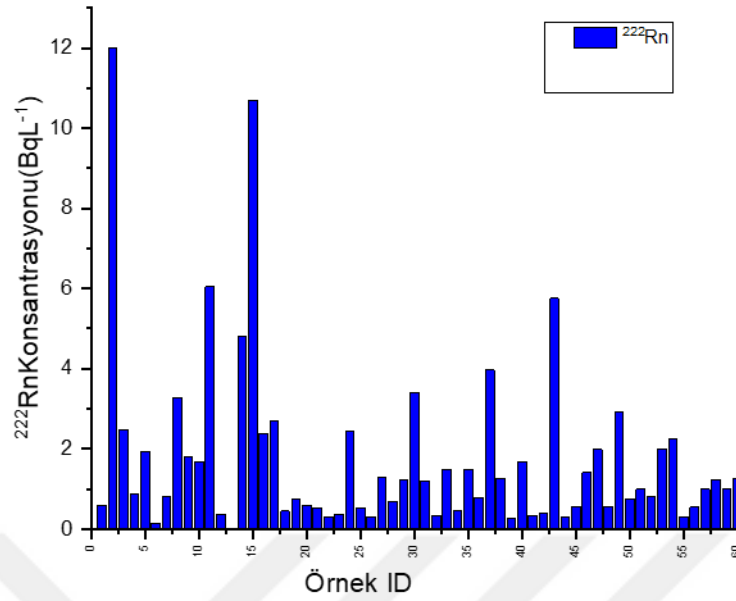
Tablo 4.4.(Devamı) Ölçülen suların ortalama radon aktiviteleri, standart sapmaları ve DCF düzeltmeleri yapılmış değerleri.

19	0,74	0,17	1,98	0,45
20	0,59	0,32	1,73	0,94
21	0,52	0,19	1,53	0,56
22	0,30	0,21	0,76	0,54
23	0,37	0,15	0,93	0,37
24	2,43	0,41	7,42	1,24
25	0,52	0,19	1,54	0,57
26	0,30	0,15	0,90	0,45
27	1,30	0,43	4,86	1,60
28	0,69	0,31	1,69	0,75
29	1,23	0,33	4,55	1,23
30	3,41	0,27	10,94	0,86
31	0,60	0,32	4,41	1,20
32	0,33	0,19	1,74	0,97
33	1,49	0,39	4,82	1,25
34	0,45	0,26	2,81	1,63
35	1,49	0,58	4,69	1,83
36	0,78	0,33	4,88	2,06
37	3,97	0,97	12,61	3,06
38	1,26	0,44	4,49	1,58
39	0,26	0,14	1,36	0,75
40	1,67	0,52	6,12	1,90
41	0,33	0,37	1,49	1,66
42	0,41	0,19	0,87	0,40
43	5,75	0,38	17,92	1,19
44	0,30	0,12	1,81	0,74
45	0,56	0,14	2,07	0,53
46	1,41	0,43	6,18	1,87
47	1,98	0,75	4,14	1,57
48	0,56	0,19	2,04	0,68
49	2,91	0,50	7,42	1,28
50	0,74	0,21	3,77	1,07
51	1,00	0,07	3,17	0,23
52	0,82	0,15	5,03	0,92
53	1,99	0,31	3,51	0,55
54	2,26	0,33	13,95	2,02
55	0,30	0,15	1,84	0,92
56	0,54	0,17	1,88	0,58
57	1,00	0,74	2,01	1,49
58	1,23	0,22	2,50	0,45
59	1,00	0,33	6,01	1,97
60	1,26	0,19	4,50	0,69

Toplanan 60 adet su numunesi içerisinde, 13 (Kadıllı Köyü) numaralı numunenin radon konsantrasyonu ölçülememiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 4.37’de sunulmuştur.

Yapılan değerlendirmelere göre:

- En yüksek radon aktivitesi, 12,00 Bq/L değeriyle Balçık Köyü’nden alınan 2 numaralı numunede gözlemlenmiştir.
- En düşük radon aktiviteleri ise, 0,30 Bq/L ile Demirciler Köyü (22 numaralı numune), Pelitli Köyü (26 numaralı numune) ve Muallimköy (44 numaralı numune) örneklerinde kaydedilmiştir.



Şekil 4.37. Su numunelerinde ölçülen ²²²Rn radon konsantrasyonlarının değişimi.

4.5.1. Farklı su türlerinde ölçülen radon aktivite düzeylerinin karşılaştırılması

Radon aktivitesinin hesaplandığı su örnekleri şu şekilde gruplandırılmıştır: Numune numaraları 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 19, 20, 24, 25, 29, 30, 58 olanlar kaynak sularından alınmıştır. 1, 2, 9, 10, 14, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 60 numaralı örnekler yüzey sularından, 44, 45, 56, 57, 59 numaralı örnekler ise kuyu sularından toplanmıştır. Üç farklı su tipine ait numuneler üzerinden gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına göre değerlendirme yapılmıştır.

Radon aktivitesi hesaplanan su numunelerinden; 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 19, 20, 24, 25, 29, 30, 58 numaralı olanlar kaynak sularından alınmış, 1, 2, 9, 10, 14, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 60 numaralı olanlar yüzey sularından alınmış, 44, 45, 56, 57, 59 numaralı olanlar ise kuyu sularından alınmıştır. Üç farklı su tipine ait numuneler üzerinden gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına göre değerlendirme yapılmıştır.

Kaynak sularından elde edilen numunelerde belirlenen en düşük radon aktivitesi 0,37 BqL⁻¹, yüzey sularında 0,30 BqL⁻¹ ve kuyu sularında ise yine 0,30 BqL⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Kaynak suyu örneklerinde ölçülen en yüksek radon aktivitesi 10,70 BqL⁻¹ iken, yüzey sularında bu değer 12 BqL⁻¹, kuyu sularında ise 1 BqL⁻¹ olarak

belirlenmiştir. Kaynak sularındaki radon aktivitesinin ortalaması $2,17 \text{ BqL}^{-1}$, yüzey sularında $1,7 \text{ BqL}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Genel değerlendirmeye göre, kaynak suyu örneklerinin ortalama radon aktivitesi, yüzey suyu örneklerinden daha yüksektir. Bu farklılığın nedeni, kaynak sularının doğrudan ve gecikmeden toplanması iken, yüzey sularının açık alanda uzun süre beklemesi ve atmosferle temas etmesi sonucu bünyelerindeki radon miktarını zamanla kaybetmeleri olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, yüzey sularında ölçülen radon aktivitesinin düşmesine neden olmuştur. Alınan yeraltı ve yüzey sularının minimum ile maksimum ölçüm değerleri, ulusal ve uluslararası düzeyde yapılmış diğer araştırmaların sonuçlarıyla birlikte Tablo 4.5'te yer almaktadır.

Tablo 4.5. Ulusal ve Uluslararası Değerler

^{222}Rn Activity (BqL^{-1})				
Kaynak	Kuyu	Musluk	Çalışmalar	Yer
0,1-576	-	0-2	Horvath et al. (2000)	Venezuela
10,82	-	-	Damla et al. (2005)	Karedeniz
53,4-292,5	-	-	Song ve diğ. (2005)	Çin
2,02-93,79	-	-	Radolic ve diğ. (2005)	Hırvatistan
0,207	0,303	-	Barış et al. (2006)	İzmir
0,085-44,57	-	-	Akkurt (2006)	Afyon
22,68	-	-	Özdemir et al. (2006)	Afyon
1,0-5,4	-	-	Kumru et al. (2006)	Denizli
0,13-0,90	-	1,02-3,30	Baykara et al. (2006)	NAFZ ²
0,46-49,6	0,91-19,88	-	Abdallah et al. (2007)	Lübnan
2,11-120	1,12-40,3	0,31-24,3	Somlai et al. (2007)	Macaristan
2-129,3	0,6-112,6	-	Cosma et al. (2008)	Romanya
0,39-1,17	-	0,42-2,4	Öner et al. (2009)	Amasya
0,13-1,20	-	0,48-1,30	Yiğitoğlu et al. (2010)	Tokat
54-297	-	-	Nikolopoulos et al. (2010)	Yunanistan
0,39-19,21	-	0,31-13,14	Yalçın et al. (2011)	Kastamonu
0,74-59,65	1,98-20,8	1,49-9,01	Yakut et al. (2013)	Sakarya
4,31-15,44	-	0,32-21,30	Koray et al. (2014)	Zonguldak
1,4-105	-	-	Fonollosa, et al. (2016)	İspanya
^{222}Rn Activity (BqL^{-1})				
Kaynak	Kuyu	Musluk	Çalışmalar	Yer
0,43-0,69	-	0,16-0,69	Erdoğan et al. (2016)	Osmaniye
2,8-46,62	-	8,33-8,51	Kumar et al. (2017)	Hindistan
-	-	0,10-2,89	Sola et al. (2017)	Tayland
0,041-0,69	0,28-9,5	-	Karataşlı et al. (2017)	Mersin
6,23-11,35	-	-	Duran et al. (2017)	Karadeniz
1,85-99,27	-	-	Erdoğan et al. (2017)	Konya
1,7-117 (RAD7)	-	2,5-49(RAD7)	Prasad et al. (2018)	Hindistan
2,1-277 (RnDuo)	-	13,5-61 (RnDuo)	-	-
6,2-20,10	9,1-23,6	-	Khan, F. et al. (2018)	Pakistan
0,334-7,810	-	-	Yamaç et al. (2018)	İzmit
1,47-14,76	-	0,83-1,63	Doğan et al. (2018)	İstanbul

Tablo 4.5.(Devamı) Ulusal ve Uluslararası Değerler

280-2164	29-3090	-	Sobakin (2018)	Yakutistan
10-28	0,4-20	-	Kaur et al. (2019)	Hindistan
14-1385	-	-	Martins, L et al. (2019)	Portekiz
0,246-34,36	0,86-16,12	-	Khan, A. R.et al. (2019)	Pakistan
0,704-76,24	-	-	Özer et al. (2019)	Bursa
0,34-341	-	-	Marković et al. (2020)	Kosova
-	21,59 - 27,93	16,23-24,71	Ajibola et al. (2021)	Nijerya
	-	-	Bozkurt and Ertürk (2022)	Kapadokya
1270-66,400	-	-	Doung et al. (2023)	K.Vietnam
0,37-10,7	0,30-1	0,30-12	Bu çalışma	Kocaeli/Gebze

4.5.2. Ölçülen su numunelerinin insan sağlığı üzerindeki etkileri

Bireylerin yaş gruplarına bağlı olarak yıllık su tüketim miktarları ve yıllık solunumla alınan hava hacimleri değişkenlik göstermektedir. Bu durum, radon içeren içme sularının tüketilmesi ve sudan atmosfere yayılan radonun solunması ile alınan dozların da yaş gruplarına göre farklılık arz etmesine yol açmaktadır. Çalışmada yaş grupları Yetişkin, Çocuk ve Bebek olarak sınıflandırılmıştır. Çeşitli yaş gruplarında içme suyu yoluyla radyonüklid alımına bağlı olarak hesaplanan doz miktarları, UNSCEAR'ın 2000 yılı raporunda belirtilen dönüşüm katsayıları (UNSCEAR 2000a) kullanılarak hesaplanmış; ayrıca Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO 2011) 2011 yılı raporundaki su tüketim değerleri temel alınmıştır. Farklı yaş gruplarına yönelik belirlenen bu dönüşüm faktörleri ve günlük su tüketim miktarları Tablo 4.6' da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Yaş gruplarına göre yıllık su alım ve solunum oranları ile doz dönüşüm katsayıları(Kaur. Et al 2019)

Yaş grupları	Bebekler	Çocuklar	Erkekler				Kadınlar			
Faktörler	0-6 ay	1-3 yaş	4-8 yaş	9-13 yaş	14-18 yaş	Yetişkin	9-13 yaş	14-18 yaş	yetişkin	Referanslar
Vücut Kütlesi (kg)	6	12	20	36	61	70	37	54	57	DRIs(2005)
Nefes Oranı (m ³ h ⁻¹)	0,11	0,22	0,35	0,56	0,72	0,78	0,56	0,64	0,61	ICRP(2002)
İçme Oranı (Ly ⁻¹)	200	260	300	350	600	730	350	600	730	WHO(2011)
DCF										
Ing(Rn) (μSvBq ⁻¹)	0,023	0,0059		0,0035			0,0035			UNSCEAR(200b)
Maruz kalma per. (year)	-	6		30			30			USEPA(2001)
Maruz kalma sıklığı (gy ⁻¹)	350	350		350			350			USEPA(2001)

Tablo 4.6.(Devamı) Yaş gruplarına göre yıllık su alım ve solunum oranları ile doz dönüşüm katsayıları(Kaur. Et al 2019)

Yaş grupları	Bebekler	Çocuklar	Erkekler	Kadınlar	
Maruziyet süresi (hy ¹)	8760	8760	8760	8760	WHO(2011)
Ort. Ömür (yıl)	65	65	65	65	WHO(2011)
Ort. Süre(gün)	23,725	23,725	23,725	23,725	

Bir kişinin içme suyu yoluyla maruz kaldığı doz katsayıları (AED_{inh} , $\mu Sv \cdot y^{-1}$ biriminde), radyoaktif çekirdeklerin aktivite konsantrasyonları ve yıllık su tüketim miktarları kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar, Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) tarafından 1993, 2000 ve 2008 yıllarında yayımlanan raporlarda önerilen yöntemlere dayanmaktadır (UNSCEAR 2008).Yıllık içme suyu kaynaklı radon dozu aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$D_{içme}^{Rn} = A_{Rn} \times W_{in} \times D_f^i \quad (4.3)$$

Burada;

A_{Rn} sudan ölçülen radon aktivitesini (BqL^{-1})

W_{in} bireyin yıllık içme suyu tüketimi ($Lyıl^{-1}$) (WHO 2011)

D_f^i mide yoluyla alınan dozun dönüşüm katsayısıdır.($SvBq^{-1}$)(UNSCEAR 2000a).

Öte yandan, sudan havaya geçen radonun solunması yoluyla alınan yıllık etkindoz

$D_{solunma}^{Rn}$ veya AED_{inh} , $\mu Sv \cdot y^{-1}$ biriminde) ise şu şekilde hesaplanmaktadır (UNSCEAR 2000):

$$D_{solunma}^{Rn} = A_{Rn} \times R_w \times F \times T \times D_f^S \quad (4.4.)$$

Burada;

D_f^S : Solunum yoluyla alınan doz için dönüşüm katsayısı olup $9 nSv m^3 h^{-1} Bq^{-1}$ olarak alınmıştır.

R_w : Havadaki radon ve sudaki radon arasındaki oran (10^{-4})

F : Radonun bozunma ürünleri arasındaki denge faktörü (0,4)

T: Yıllık kişi başı iç ortamda bulunma süresi (7000 hy^{-1}) olarak tanımlanmıştır. (UNSCEAR, 1993).

Tablo 4.6 ‘da sunulan verilere göre, farklı yaş gruplarının yıllık ortalama su tüketim miktarları ve solunum hacimleri dikkate alınarak, radon aktivitelerinin etkisiyle oluşan içme ve solunum kaynaklı yıllık efektif dozlar hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, Tablo 4.7’de ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.

Tablo 4.7. Ölçümü yapılan suların, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunmasından kaynaklanan değişik yaş gruplarındaki yıllık efektif dozlar.

Numune Alınan İlçe Bilgisi ve Ölçüm Değerleri				İçme Kaynaklı Doz		
İlçe	Örnek ID	Ort.Rn(Bq/L) xDCF	SDxDCF	Yetişkin ≥17 yaş μSv/y	Çocuk 2-16 yaş μSv/y	Bebek ≤1 yaş μSv/y
Gebze	1	1,28	0,69	2,24	2,33	4,41
Gebze	2	26,17	4,08	45,80	47,64	90,30
Gebze	3	5,10	1,68	8,93	9,28	17,60
Gebze	4	1,78	0,93	3,11	3,24	6,14
Gebze	5	4,11	1,21	7,19	7,48	14,18
Gebze	6	0,27	0,14	0,48	0,49	0,94
Gebze	7	1,71	0,90	2,99	3,11	5,89
Gebze	8	6,66	1,25	11,65	12,11	22,96
Gebze	9	3,91	1,06	6,84	7,12	13,49
Gebze	10	3,01	2,61	5,27	5,49	10,40
Gebze	11	12,31	2,45	21,54	22,40	42,46
Gebze	12	0,68	0,15	1,18	1,23	2,33
Gebze	13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gebze	14	8,50	2,80	14,88	15,47	29,33
Gebze	15	19,71	2,67	34,48	35,86	67,98
Gebze	16	4,26	0,72	7,45	7,75	14,69
Gebze	17	4,69	2,98	8,20	8,53	16,17
Gebze	18	1,18	0,39	2,07	2,15	4,08
Gebze	19	1,98	0,45	3,47	3,61	6,84
Gebze	20	1,73	0,94	3,04	3,16	5,99
Gebze	21	1,53	0,56	2,67	2,78	5,27
Gebze	22	0,76	0,54	1,34	1,39	2,64
Gebze	23	0,93	0,37	1,63	1,69	3,21
Gebze	24	7,42	1,24	12,98	13,50	25,59
Gebze	25	1,54	0,57	2,70	2,80	5,32
Gebze	26	0,90	0,45	1,57	1,64	3,10
Gebze	27	4,86	1,60	8,50	8,84	16,75
Gebze	28	1,69	0,75	2,95	3,07	5,82
Gebze	29	4,55	1,23	7,96	8,28	15,69
Gebze	30	10,94	0,86	19,14	19,90	37,73
Gebze	31	4,41	1,20	7,72	8,03	15,22
Gebze	32	1,74	0,97	3,04	3,17	6,00
Gebze	33	4,82	1,25	8,43	8,77	16,62
Gebze	34	2,81	1,63	4,91	5,11	9,68
Gebze	35	4,69	1,83	8,20	8,53	16,17
Gebze	36	4,88	2,06	8,54	8,88	16,84

Gebze	37	12,61	3,06	22,06	22,95	43,50
Gebze	38	4,49	1,58	7,86	8,17	15,49
Gebze	39	1,36	0,75	2,37	2,47	4,68
Gebze	40	6,12	1,90	10,70	11,13	21,10
Gebze	41	1,49	1,66	2,61	2,71	5,15
Gebze	42	0,87	0,40	1,53	1,59	3,02
Gebze	43	17,92	1,19	31,36	32,61	61,82
Gebze	44	1,81	0,74	3,17	3,29	6,24
Gebze	45	2,07	0,53	3,62	3,76	7,14
Gebze	46	6,18	1,87	10,81	11,24	21,31
Gebze	47	4,14	1,57	7,24	7,53	14,28

Tablo 4.7.(Devamı) Ölçümü yapılan suların, içilmesi ve sulardan havaya karışan radonun solunmasından kaynaklanan değişik yaş gruplarındaki yıllık efektif dozlar.

Gebze	48	2,04	0,68	3,57	3,71	7,03
Gebze	49	7,42	1,28	12,99	13,50	25,60
Gebze	50	3,77	1,07	6,60	6,86	13,01
Gebze	51	3,17	0,23	5,55	5,77	10,94
Gebze	52	5,03	0,92	8,80	9,15	17,35
Gebze	53	3,51	0,55	6,15	6,39	12,12
Gebze	54	13,95	2,02	24,41	25,39	48,12
Gebze	55	1,84	0,92	3,22	3,35	6,36
Gebze	56	1,88	0,58	3,28	3,42	6,47
Gebze	57	2,01	1,49	3,51	3,65	6,93
Gebze	58	2,50	0,45	4,37	4,54	8,61
Gebze	59	6,01	1,97	10,52	10,94	20,75
Gebze	60	4,50	0,69	7,87	8,19	15,52

Ölçümü gerçekleştirilen numuneler arasında:

- En yüksek radon aktivitesi 12 Bq/L,
- En düşük radon aktivitesi 0,30 Bq/L,
- Ortalama radon aktivitesi ise 1,77 Bq/L olarak belirlenmiştir.

Ayrıca, elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak bu suların tüketimi ve kullanımı sonucu insan vücuduna etki eden dozlar hesaplanmıştır. Numunesi alınan suların kullanımı ve tüketimi neticesinde oluşan yıllık efektif dozlar, Şekil 3.2’de sunulmuş olup:

- Yetişkin bireyler için doz değerleri 0,48 μ Sv/yıl ile 45,80 μ Sv/yıl arasında,
- Çocuklar için 0,49 μ Sv/yıl ile 47,64 μ Sv/yıl arasında,
- Bebekler için ise 0,94 μ Sv/yıl ile 90,30 μ Sv/yıl arasında değişim göstermektedir.

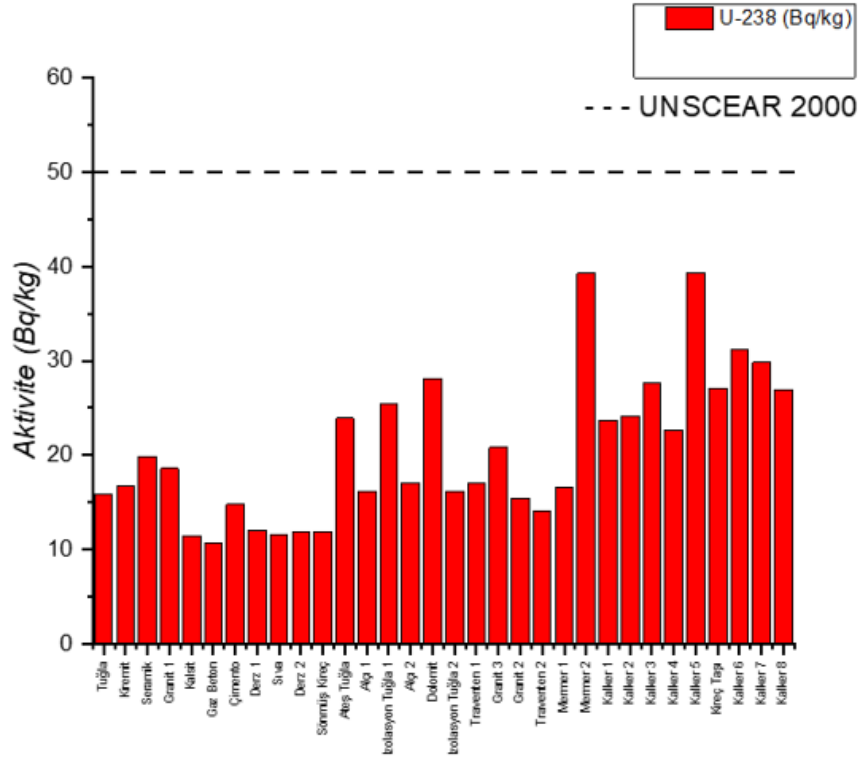
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Türkiye'nin sanayi ve ticaret açısından en yoğun bölgelerinden biri olan Gebze ilçesi, jeolojik çeşitliliği ve maden kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin hammaddelerinden bazılarının temin edildiği bu bölgede, doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi ve çevresel radyolojik risklerin ortaya konulması büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, Gebze ve çevresindeki farklı bölgelerden toplanan yapı malzemesi ve su örnekleri ile maden sahalarından elde edilen yapı malzemesi hammaddeleri ve toprak örnekleri üzerinde doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonları ve radyasyon soğurma özellikleri araştırılmıştır.

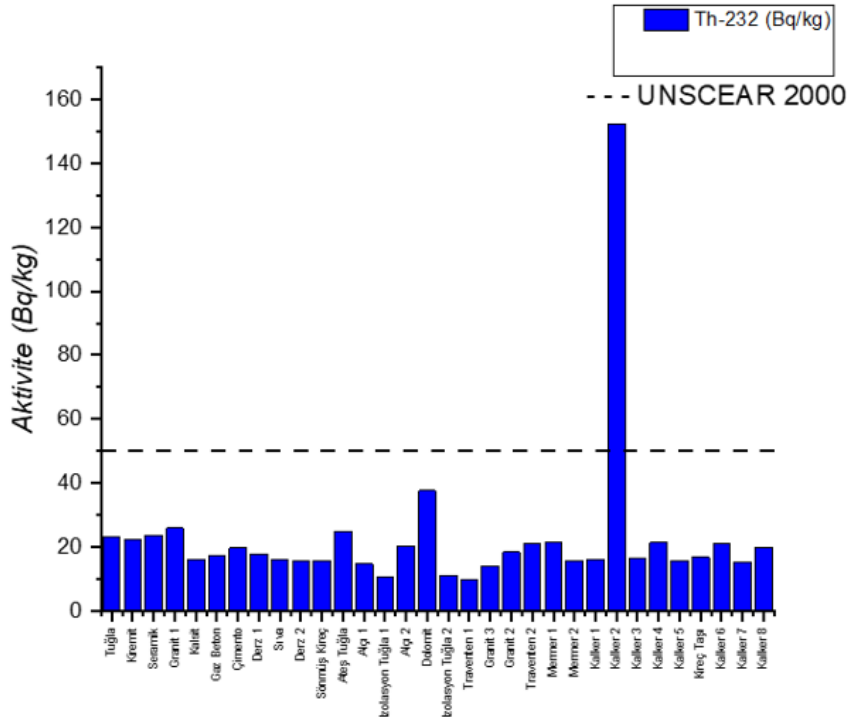
Yapılan ölçümler doğrultusunda;

Gebze İlçesi ve çevresinin farklı bölgelerinden alınan 32 yapı malzemesi örneğindeki doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi amacıyla gama spektrometresi yöntemi kullanılarak ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th aktivite konsantrasyonları saptanmıştır. ^{40}K aktivitesi için 32,326-199,618 Bq/kg aralığında bulunurken, ^{238}U aktivitesi için 10,633-39,276 Bq/kg ve ^{232}Th aktiviteleri ise 9,822-152,288 Bq/kg arasında değişmiştir.

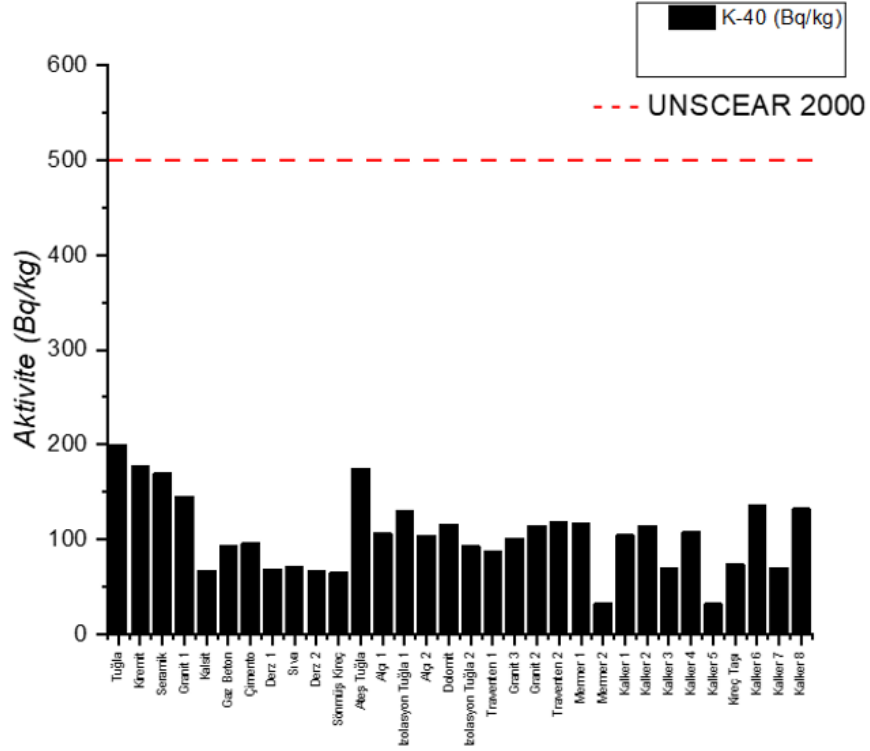
UNSCEAR 2000 raporlarında aktivite konsantrasyonlarının limit değerleri ^{40}K , ^{226}Ra ve ^{232}Th için sırasıyla 500, 50 ve 50 Bq/kg olarak verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen aktivite ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, ^{40}K ve ^{226}Ra aktivitelerinin tüm numunelerde belirlenen limit değerlerin altında kaldığı belirlenmiştir. ^{232}Th aktivitesi açısından ise yalnızca Kalker 2 numunesinde limit değerin aşıldığı tespit edilmiştir. (Şeli 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3)



Şekil 5.1.Ölçülen U-238 aktivite değeri ile limit değerin karşılaştırılması.



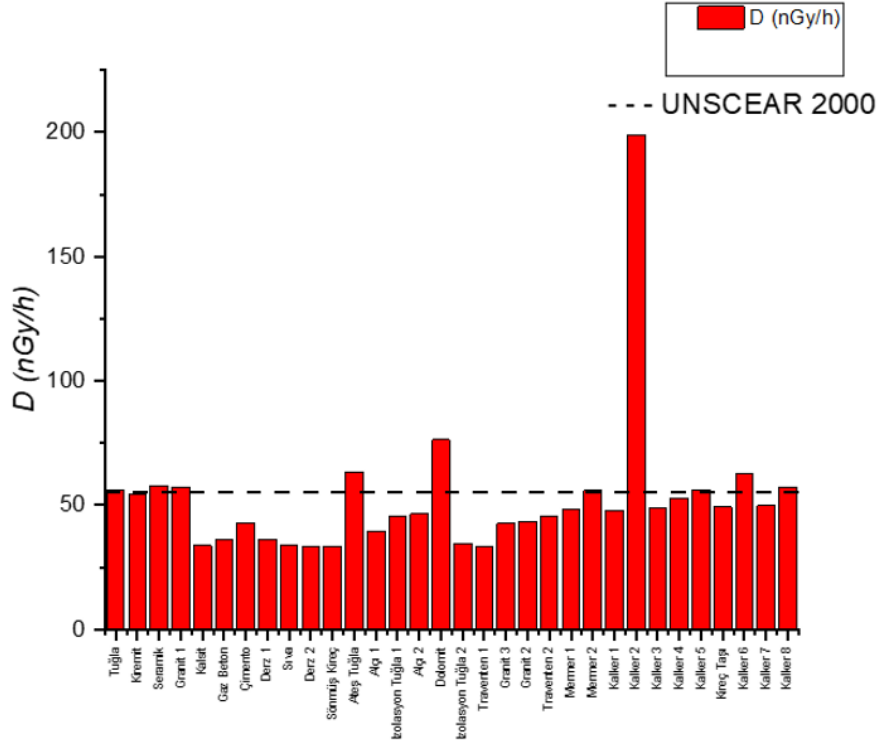
Şekil 5.2.Ölçülen Th-232 aktivite değeri ile limit değerin karşılaştırılması.



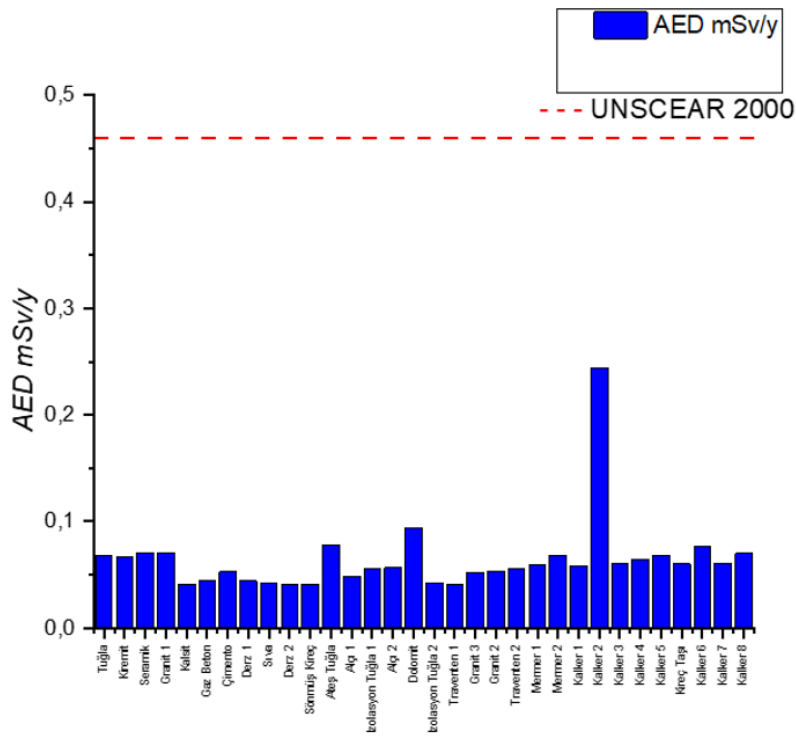
Şekil 5.3.Ölçülen K-40 aktivite değeri ile limit değerin karşılaştırılması.

Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen aktivite değerleri kullanılarak hesaplanan absorbelenmiş doz hızı sonuçları, 33,2-198,83 nGy/h aralığında değişim göstermiştir. Yıllık etkin doz eşdeğeri ise 0,041-0,244 mSv/y aralığında bulunmuştur. UNSCEAR 2000 raporlarına göre, absorbelenmiş doz hızı için belirlenen sınır değer 55 nGy/h, yıllık etkin doz eşdeğeri için ise 0,460 mSv/y olarak bildirilmiştir.

Bu kapsamda yapılan değerlendirmede, bazı numunelere ait absorbelenmiş doz hızı değerlerinin belirlenen limitin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, yıllık etkin doz eşdeğeri açısından elde edilen tüm sonuçların sınır değerlerin altında kaldığı görülmüştür. Ölçülen absorbelenmiş doz hızı ve yıllık etkin doz eşdeğeri değerlerinin limitlerle karşılaştırılması Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.' de sunulmuştur.



Şekil 5.4. Absorblanmış doz hızının limit değeri ile karşılaştırılması

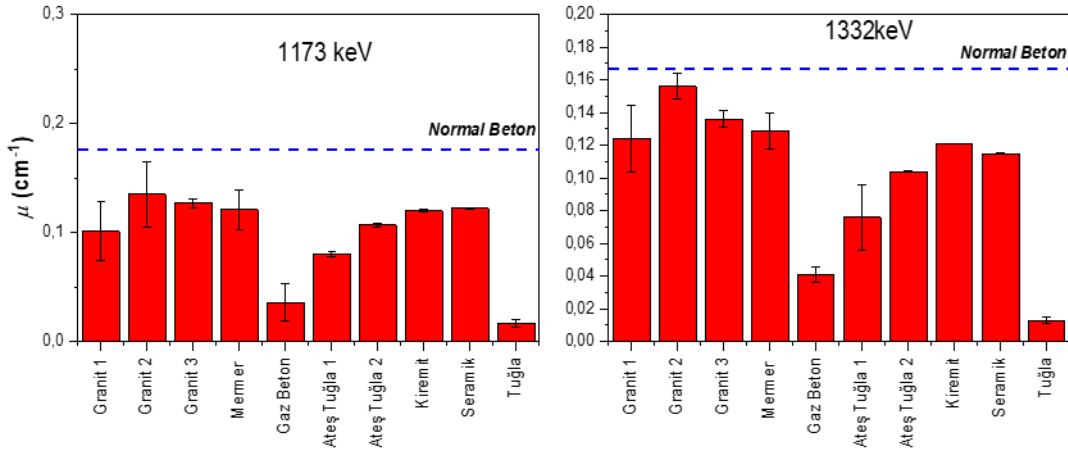


Şekil 5.5. Yıllık etkin doz eşdeğerinin limit değeri ile karşılaştırması

Bu malzemeler için radyoaktif risk parametreleri olan; Radium eşdeğer aktivitesi (R_{eq}), Bina içi soğurulan doz oranı (D_{in}), Bina dışı soğurulan doz oranı (D_{out}), Yıllık etkin doz miktarı (AED), iç ve dış risk indeksleri (H_{in} , H_{ex}), Gama İndeksi (I_γ), Alfa İndeksi (I_α) parametreleri hesaplanmış ve UNSCEAR (2000) tarafından belirlenen sınır değerleri içerisinde bulunmuştur. Dolayısıyla, ölçülen yapı malzemelerinin güvenli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

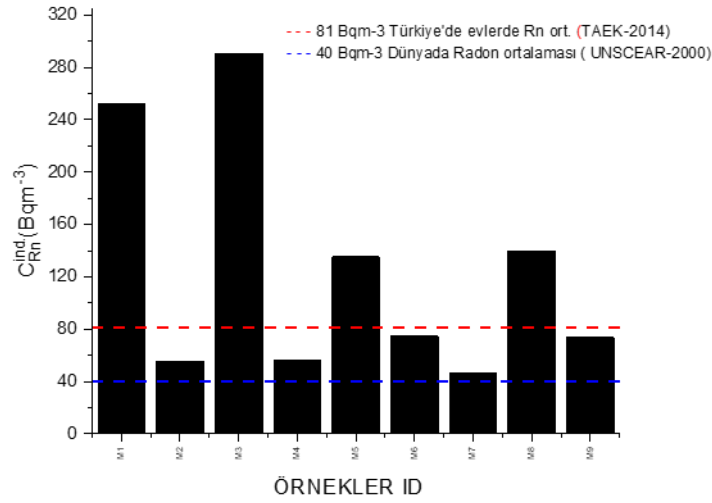
Yapı malzemelerinin yüzey morfolojileri ve elementel bileşimleri, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDS (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) teknikleri aracılığıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, her bir yapı malzemesinin kendine has kimyasal içerik ve mikro yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle kiremit, tuğla, seramik, çimento, dolomit, kalsit ve sönmüş kireç gibi malzemelerdeki Si, Al, Ca, O ve Mg gibi temel elementler, bu yapıların bilinen mineralojik ve teknolojik özellikleriyle uyum göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürde yer alan verilerle yüksek derecede örtüşmekte olup kullanılan üretim yöntemlerinin ve malzeme bileşimlerinin güncel bilimsel bulgularla paralellik gösterdiğini ve analizlerin güvenilirliğini desteklemektedir.

Yapı malzemesi örneklerinin radyasyon zayıflatma özelliklerini belirlemek amacıyla toplam doğrusal zayıflama katsayıları (μ , cm^{-1}) hesaplanmıştır. Deneylerde 1173 keV ve 1332 keV enerjili gama ışınları kullanılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda, 1173 keV enerjili gama ışını için zayıflama katsayısının 0,08–0,135 cm^{-1} ; 1332 keV enerjili gama ışını için ise 0,013–0,156 cm^{-1} aralığında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek zayıflama katsayısı 1173 keV enerjisinde Granit 2 numunesinde, 1332 keV enerjisinde ise yine Granit 2 numunesinde ölçülmüştür. Elde edilen zayıflama katsayıları, literatürde normal betonlar için bildirilen (Akkurt ve Akyıldırım, 2012) değerlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 5.6' da görüldüğü üzere, yapı malzemeleri için elde edilen zayıflama katsayıları, normal betonlara kıyasla daha düşük bulunmuştur. Bu durum, çalışmada incelenen yapı malzemelerinin, normal betona göre gama ışınlarına karşı daha sınırlı bir soğurma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.



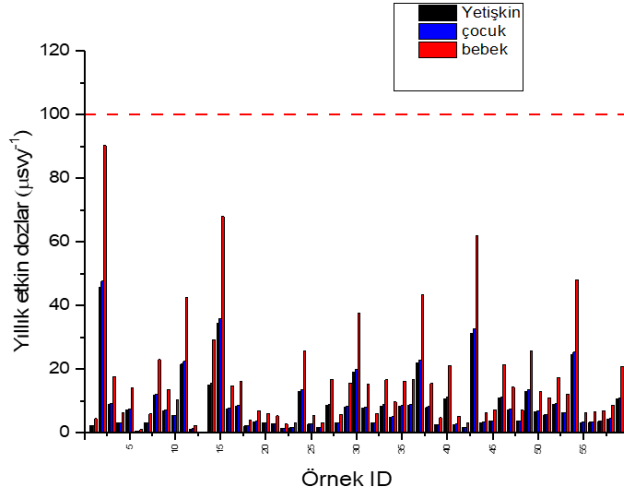
Şekil 5.6. Yapı malzemelerinin ve normal betonun doğrusal zayıflama katsayılarının karşılaştırılması

Gebze bölgesinde, maden sahalarına yakın farklı alanlardan toplanan toprak numuneleri üzerinde radon konsantrasyonu ölçümleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler hem ulusal hem de uluslararası referans değerler ışığında değerlendirilmiştir. Numunelere ait radon konsantrasyonları, Türkiye'deki ev içi radon ortalaması (81 Bq/m³; TAEK, 2014) ve dünya genelindeki radon ortalaması (40 Bq/m³; UNSCEAR, 2000) ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.7.' de görüldüğü üzere, örneklerin büyük çoğunluğunda radon konsantrasyonlarının dünya ortalamasının üzerinde olduğu, bazı numunelerde ise Türkiye ortalamasının da aşıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, ölçülen tüm radon değerlerinin, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2009) tarafından önerilen 100 Bq/m³'lük ideal eylem sınırını ve 300 Bq/m³'lük teknik üst sınırı aşmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, bölgedeki toprak numunelerinde radon salınımının yerel jeolojik özelliklerden etkilendiğini, ancak mevcut değerlerin sağlık açısından ciddi bir risk oluşturmadığını göstermektedir.



Şekil 5.7. Ölçülen radon konsantrasyonlarının, Türkiye’deki ev iç radon ortalaması (TAEK,2014) ve dünya genelindeki radon ortalaması (UNSCEAR, 2000) değerleri ile karşılaştırılması.

Gebze ve çevresinden toplanan su örneklerine ait yetişkin, çocuk ve bebek bireyler için hesaplanan yıllık etkin doz değerleri incelendiğinde, tüm sonuçların Dünya Sağlık Örgütü’nün (WHO, 2009) belirlediği 100 μ Sv/yıl sınır değerinin altında kaldığı Şekil 5.8.’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Farklı yaş gruplarına (Yetişkin, Çocuk ve Bebekler) ait içme suyu tüketimiyle alınan radon aktivitelerin göre belirlenen yıllık efektif doz değerlerinin örneklere bağlı değişimi.

Ölçülen değerler, ulusal (TAEK, 2014) ve uluslararası (UNSCEAR, 2000; WHO, 2009) referans sınırlarıyla karşılaştırılmış ve genel olarak güvenli aralıkta kaldığı belirlenmiştir. Bu çalışma, yapı malzemeleri, toprak ve su kaynaklarına yönelik doğal

radasyon seviyelerinin incelenmesiyle, bölgesel çevresel risklerin ortaya konulmasına ve literatüre bilimsel veri sunmayı amaçlamıştır.



KAYNAKLAR

- Abu-Jarad, F., Fremlin, J. H., & Bull, R. (1980). A study of radon emitted from building materials using plastic α -track detectors. *Physics in Medicine & Biology*, 25(4), 683.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (Tarihsiz). Kimyasal biyolojik radyolojik nükleer tehditler (kbrn), radyasyon dozları ve etkileri. <https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-dozlari-ve-etkileri> adresinden erişilmiştir.
- Ahmed, E. K., Mahran, H. M., Alrashdi, M. F., & Elsafi, M. (2024). Studying the shielding ability of different cement mortars against gamma ray sources using waste iron and BaO microparticles. *Nexus of Future Materials*, 1(1), 1-5.
- Akbal, S. (2007). *Tektürel olmayan gözenekli bir ortamda doğal taşınım ile ısı ve kütle geçişinin sonlu hacim yöntemi ile sayısal olarak incelenmesi*. [Yayımlanmamış doktora tezi] İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., & Basyigit, C. (2010). Radiation shielding of concrete containing zeolite. *Radiation Measurements*, 45(7), 827-830.
- Akkurt, I. ve Akyıldırım, H. (2012). Pomza içeren betonun 662, 1173 ve 1332 keV gama ışınlarına karşı radyasyon iletimi. *Nükleer Mühendislik ve Tasarım*, 252, 163-166.
- Aksu, S.S., Nazik, A. & Akyıldız, M. (2020). Karacaören (Sandıklı / Afyonkarahisar) bölgesinin jeolojisi ve porfiri cu cevherleşmesinin kökensel araştırması. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 39(1), 82-91.
- Akyüz, E. (2020). *Dünyayı kurtar temiz çevrenin bilimsel sırları*. Astana Yayınları.
- Albandar, H. (2019). Basic modes of radioactive decay. *Use of Gamma Radiation Techniques in Peaceful Applications*, 23.
- Alemy, R. (2023). Bursa İli Orhaneli Ve Keleş İlçelerindeki Toprakların Doğal Radyonüklid Düzeyinin Belirlenmesi (By Bahadır Saygı, Sakarya Üniversitesi, Ankara Üniversitesi, & Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- Alcocer, G., Alcocer, P., & Marquez, C. (2024). Burns by Ionizing and nonionizing radiation. *Journal of Burn Care & Research*, 45(6), 1464-1472.
- Alonso, H., Rubiano, J. G., Guerra, J. G., Arnedo, M. A., Tejera, A., & Martel, P. (2019). Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils. *Science of The Total Environment*, 668, 223-231.

- Altamemi, R. A. A. (2021). *Kastamonu’da tüketilen bazı gıdalardaki radyum, toryum ve potasyum seviyelerinin gama-ışını spektrometrik yöntem ile belirlenmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Andaç, M. (1971). Biga yarımadasında tarihi truva harabelerinin güneyindeki radyoaktif sahil kumlarının mineralojisi ve bunların ana kayaçlarının petrolojisi. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 76(76), 75-79.
- Arda, T. (2021). “SEM ve EDS Uygulamalarıyla Polimer Kompozitlerin Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Asaduzzaman, K., Mannan, F., Khandaker, M., Farook, M.S. ve Elkezza, A., (Assessment of Natural Radioactivity Levels and Potential Radiological Risks of Common Building Materials Used in Bangladeshi Dwellings, Public Library of Science (Plos one 16,10,10,(2015)
- Awadh, S. M. (2020). Geochemistry of radioactive isotopes. *IntechOpen*.
- Awhida, A. A. S. (2017). *Novel method for measurement of radon exhalation from building materials* (Doctoral dissertation, University of Belgrade).
- Aydın, E. (2023). *Türkiye’de ticari olarak satılan şişelenmiş doğal kaynak sularının içerdiği radon gazının aktivite konsantrasyonunun belirlenmesi ve radon kaynaklı radyolojik riskin değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydın, S.Y. (2020). *Kırklareli ili İğneada Bölgesi ve Çevresinde Radyoaktivite Düzeyinin Belirlenmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Azeez, H. N., Kheder, M. H., Slewa, M. Y. ve Sleeman, S. Y. (2018). Radon Concentration Measurement in Ainkawa Region Using Solid State Nuclear Track Detector. *Iraqi Journal of Science*, 59(1C), 45-52.
- Bal, S., & Doğru, M. (2013). Sivrice (Elazığ) fay zonunda radon gazı. *Mus Alparslan University Journal of Science*, 1(2), 191-194.
- Baldık R., Aytekin H., Erer M., Radioactivity measurements and radiation dose assessment due to natural radiation in Karabük (Turkey). *J. Radio. Nucl. Chem.*, 289: 297-302, 2011.
- Ball, T. K., Cameron, D. G., Colman, T., & Roberts, P. D. (1991). Behaviour of radon in the geological environment: a review. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24(2), 169–182.
- Barlaz Us, S. ve Us, K. (2020). Türkiye’de Radyasyon Çalışanlarının Mevzuattan Kaynaklanan Hakları. *Mutlu Toplum Fikri Tıp Dergisi*, 1(1), 23-34.
- Barreto, R. C., Perna, A. F. N., Narloch, D. C., Claro, F. D., Corrêa, J. N., & Paschuk, S. (2019). Determining radium-226 concentration from radon-222 emanation in building materials: A theoretical model. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 7(2), 1-14.

- Baş, S. Y., & Selçuk, S. A. (2019, August). Binalarda radon gazı etkisinin azaltılmasına yönelik alınabilecek önlemler üzerine bir değerlendirme. In *SETSCI-Conference Proceedings* (Vol. 7, pp. 207-212). SETSCI-Conference Proceedings.
- Başdemir S, Yalçın C. (2023). Radon gas estimation from building materials. *SAUJS*, 27(4), 858-864.
- Başığit, C., & Kaçar, A. (2006). Bazı yapı malzemelerinin radyasyon tutuculuk özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 307-310.
- Baykara, O. (2005). Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay Hatlarının Kesişim Bölgesindeki Doğal Radyoaktivitenin Tayini. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Elazığ (Doktora Tezi)
- Baykut, F. (2020). *90Sr/90Y beta kaynağı kullanılarak beta dedektörlerinin kalibrasyonu ile ilgili prosedür oluşturulması* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Türkiye.
- Bayram, İ., Tetik Y.Ö., Kale Ö.A. & Baradan S. (2019, 22-24 Nisan). *Binalarda radon maruziyeti*. [Bildiri Sunumu]. 2. Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi (ENAR). Muğla.
- Baykara, O., Karatepe, Ş., & Doğru, M. (2011). Elazığ, Türkiye'de kullanılan inşaat malzemelerinde doğal radyoaktivite ve radyolojik tehlikelerin değerlendirilmesi. *Radyasyon Ölçümleri*, 46 (1), 153-158.
- Beck, T., Buchröder, H., Foerster, E. ve Schmidt, V. (2006). Interlaboratory comparisons for passive radon measuring devices at BfS. *Radiation Protection Dosimetry*, 45(3), 213-220.
- Bednarik, M., Mizera, A., & Ovsik, M. (2019). The influence of ionizing beta radiation on the flammability index and ignition temperature of thermoplastic materials. *Journal of Materials Technology*, 19(6), 907-915.
- Berkovski, V., Ratia, G. ve Bonchuk, Y. (2018). Individual radiological monitoring after major releases of radionuclides to the environment. *Radiation Protection Dosimetry*, 23(2), 37-48.
- Best, M. G. (2003). *Igneous and Metamorphic Petrology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Bezuidenhout, J. (2019). Estimation of radon potential through measurement of uranium concentrations in granite geology. *South African Journal of Science*, 115(7-8), 1-6.
- Bhatt, K., Vaidya, D., Kaushal, M., Gupta, A., Soni, P., Arya, P., Gautam, A., & Sharma, C. (2020). Microwaves and radiowaves: In food processing and preservation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(9), 85-94.
- Bhattacharya, S. (2021). *Carbon dating*. UG Sem-II, Integrated BS-MS, Indian Association for the Cultivation of Science, Kolkata.
- Baloch, M. A., Qureshi, A. A., Waheed, A., Ali, M., Ali, N., Tufail, M., ... & Khan, H. A. (2012). A study on natural radioactivity in Khewra Salt Mines, Pakistan. *Journal of radiation research*, 53(3), 411-421.

- Bom, A. (2007). *gebze ve yakın çevresinin coğrafi özellikleri ve şehiriçi arazi kullanımı*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Bulut, H. A. & Şahin, R. (2024). Radon, concrete, buildings and human health—a review study, *Buildings (Basel)*, 14(2), 1-29.
- Cameron, C. (1987). A Review of Radon Emanation and Mobilization in Minerals and Rocks. *Geological Studies Journal*, 15(3), 345-360.
- Canbaz Öztürk, B. (2015). Batı Anadolu granit plutonlarında doğal radyoaktivite seviyesinin çok değişkenli istatistik analiz yöntemleri ile incelenmesi. [Yayımlanmamış doktora tezi] Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Cangöl, E., & Şahin, N. (2014). Emzirmeyi etkileyen faktörler ve emzirme danışmanlığı (Factors affecting breastfeeding and breastfeeding counselling). *Zeynep Kamil Tıp Bülteni*, 45(3), 100-105.
- Caşın, M.H. & Kısacık, S. (2018). *Avrupa birliği enerji hukuku ve güvenlik algılamaları*. Çağlayan Kitabevi ve Eğitim Çözümleri Ticaret A.Ş.
- Cavazzini, G. (2019). Radioactive decay as a second-order kinetics transformation process. *Applied Physics Research*, 12(1), 26-35.
- Cengiz, G. B., Aras, İ., Ertap, H. ve Karabulut, M. (2017). Evaluation of natural radioactivity and radiological hazards in some building materials used in Kars. *Fen Bilimleri Dergisi*, 17(8), 406-414.
- Ceylan, F., & Kömürlü, R. (2023). LEED Sertifikalandırma sürecinin örnek bir proje üzerinden tasarım aşamasında değerlendirilmesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 8(1), 199-223.
- Chang, L. L. Y., Howie, R. A., & Zussman, J. (1996). Non-Silicates: Carbonates, Nitrates and Borates (2nd ed.). Geological Society.
- Chauhan R.P., radon exhalation rates from stone and soil samples of Aravali hills in India. *Iran. J. Radiat. Res.*, 9(1): 57-61, 2011.
- Chen, C. J., Weng, P. S., & Chu, T. C. (1993). Radon exhalation rate from various building materials. *Health Physics*, 64(6), 613-619.
- Chen, J. (2023). A review of radon exposure in non-uranium mines—Estimation of potential radon exposure in Canadian mines. *Health Physics*, 124(4), 244–256.
- Chen, S., & Bernard, D. (2020). On the beta decay-induced radiation damage. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 472, 29-38.
- Chung, L. K., Piersma, N. P., & Kearfott, K. J. (2021). Radon kinetics in a basement space measured with different devices. *Health Physics*, 120(5), 582-588.
- Coşkun, Ö. (2011). İyonize radyasyonun biyolojik etkileri. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 13-17
- Çavaş M. NaI(Tl) Dedektörü ile topraktaki radyasyonun ölçümü ve maruz kalınan dozların hesabı y.lisans 2006
- Çevik, U. Ğ. UR, Damla, N., Kobya, AI, Çelik, N., Çelik, A., & Van, AA (2009). Türkiye'de kullanılan kumun doğal radyoaktivitesinin değerlendirilmesi. *Radyolojik Koruma Dergisi*, 29 (1), 61.

- Çolakgil, D., & Tanrivermiş, Y. (2024). Radon gazının gayrimenkul değerine etkisinin araştırılması, farklı ülkelerde radon gazı çalışmaları ve politikaları, Türkiye’de uygulanabilirliği. *Kent Akademisi*, 17(6), 2548-2567.
- Das, B. (2021). Radon induced health effects: A survey report. *Indian Journal of Science and Technology*, 14(5).
- Daşdağ, S. (2010). İyonlaştırıcı radyasyonlar ve kanser. *Dicle Tıp Dergisi*, 37(2).
- Degu Belete, G., & Alemu Anteneh, Y. (2021). General overview of radon studies in health hazard perspectives. *Journal of Oncology*, 2021(1), 6659795.
- Deilami, S., Abbasi, K., Houshyar, A., Izadneshan, H., & Beni, H. M. (2024). A numerical study attitude of compatibility in scintillator detectors through matching pair scintillator-photodiode materials. *Results in Engineering*, 21, 101924.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). An Introduction to the Rock-Forming Minerals (3rd ed.). Mineralogical Society.
- Denman, A. (2008). Applying the Ionising Radiation Regulations to radon in the UK workplace. *Radiation Protection Dosimetry*, 45(3), 153-160.
- Dobrzyńska, M. M., Gajowik, A., & Wieprzowski, K. (2023). Radon–occurrence and impact on the health. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 74(1), 5-14.
- Duong, VH, Dinh, CN, Trung, TC, Quoc, HN, Xuan-Doc, D., Thi, THB, ... & Kovács, T. (2024). Quang Nam-Da Nang bölgesi-Vietnam'ın orta kesimindeki seçilmiş su kaynaklarında 222Rn. *Radyasyon Araştırmaları ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 17 (1), 100756.
- Döker, M. F., & Aydoğdu, M. (2017). Gebze Organize Sanayi Bölgesi’nin Mekânsal Etkileri. *Türk Coğrafya Dergisi*, (69), 1-10.
- Döker, M. F., & Aydoğdu, M. (2019). Gebze’de Şehirselsel Büyümenin Mekânsal-Zamansal Analizi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 17(1), 59-76.
- Dönmez, S. (2017). Radyasyon tespiti ve ölçümü. *Nucl Med Semin*, 3, 172-177.
- Duman, A. (2021). *Sıkıştırılmış saman balyalarıyla oluşturulan modüllerden inşa edilen konutların incelenmesi*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Duncan, V. S. (2019). *Radiation Detection Theory* (No. LA-UR-19-22968). Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).
- Duran, S., Küçükömeroğlu, B., & Taşkın, H. (2020). Fatsa-Sarmaşık kaplıcasında radon konsantrasyonunun belirlenmesi (Ordu İli). *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 63-70.
- Durrani, S. A., & Bull, R. K. (1987). Solid State Nuclear Track Detection. Pergamon Press, Oxford.
- EC(European Commission), (1999). “Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials.”Radiation protection 112. Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, Cenevre

- Erdoğdu M. vd. (2016), Spatial distribution of ^{222}Rn concentrations and dose estimations in various waters, Human And Ecological Risk Assessment 2016, VOL. 22, NO. 4, 927–940.
- Erdoğan, T. (2024). Tıbbi uygulamalarda iyonize radyasyondan korunmanın temel felsefesi ve prensipleri. *Radyasyon Fiziği ve Sağlık Etkileri-1*, 41.
- Erol, İ. (2020). Ülkemiz madencilik sektöründe görölen meslek hastalıklarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Faköltesi Dergisi*, 35(4), 859-872.
- Eser, İ. (2023). İstanbul'un Avrupa yakasındaki sularda radon belirtileri ve yıllık etkin dozların belirlenmesi= İstanbul Avrupa yakası sularında radon ölçümü ve yıllık etkin dozların belirlenmesi (Yüksek Lisans tezi, Sakarya Üniversitesi).
- Faure, G. (1998). Principles and Applications of Geochemistry (2nd ed.). Prentice Hall.
- Fernando, C., Shi, X., Byun, S. H., Seymour, C. B., & Mothersill, C. E. (2018). Relative biological effect of alpha particle radiation on low dose phenomena: lethal mutation, hyper-radiosensitivity and increased radioresistance. *bioRxiv*, 435-487.
- Fişne, A. (2002). *Yeraltı madenlerinde radon gazı konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi ve işçi sağlığı üzerine etkilerinin araştırılması*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Francisca, D. D., Iramina, W. S., Ayres da Silva, A. L. M., & de Tomi, G. (2023). New evaluation method of exposure to radon gas in mining environments. *Minerals*, 13(897).
- Friel, J. J. (2003). Practical Guide to Energy Dispersive X-ray Spectrometry. ASM International.
- Fuhrmann, M., Michaud, A., Salay, M., Benson, C., Likos, W., Stefani, N., Waugh, W., & Williams, M. M. (2019). Lead-210 profiles in radon barriers: Indicators of long-term radon-222 transport. *Applied Geochemistry*, 104, 1-9.
- Gachályi, A., & Gyulai, G. (2014). Personal Radiotoxicological (First Aid) Kit. *AARMS*, 2278-1545.
- García-Toraño, E., Peyres, V., & Salvat, F. (2019). PenNuc: Monte Carlo simulation of the decay of radionuclides. *Computer Physics Communications*, 245, 106849.
- Gazda, L., Połednik, B., Czerwiński, J., Kozak, K., Mazur, J., Grządziel, D., & Dudzińska, M. (2018). Radon hazards in relation to elemental and isotope composition of geological structures in the Lubelskie Voivodeship. *Journal of Ecological Engineering*, 19(2), 1-7.
- Gelgün, S. (2010). *Kütahya ili kapalı mekânlarda radon gazı konsantrasyonu ölçümü* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Giosuè, C., Mobili, A., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H., Ruello, M. L., & Tittarelli, F. (2019). Properties of multifunctional lightweight mortars containing zeolite and natural fibers. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(4), 214-227.

- González-Alonso, M., Naviliat-Cuncic, O., & Severijns, N. (2018). New physics searches in nuclear and neutron β decay. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 104, 165-230.
- Gökoğlan, E., Ekinci, M., Özgenç, E., İlem-özdemir, D., & Aşıkoğlu, M. (2020). Radyasyon ve insan sağlığı üzerindeki etkileri. *Anatolian Clinic the Journal of Medical Sciences*, 25(3), 289-294.
- Gualtieri, A. F., & Ferrari, S. (2023). Advanced characterization of ceramic tiles using XRD and SEM-EDS techniques. *Materials Characterization*, 202, 112572. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112572>
- Gupta, M. ve Chauhan, RP (2011). Yapı malzemelerinden radyasyon dozunun tahmini.
- Gurau, D. (2024). Reviewing the role of the radiological characterization laboratory in nuclear facility decommissioning. *Acta Physica Polonica: A*, 146(2).
- Güdük, Ö., Kılıç, CH., & Güdük, Ö. Radyasyonun zararlı etkileri hakkında hastaların bilgi düzeyinin değerlendirilmesi: bir hastane örneği. *ADYÜ Sağlık Bilimleri Dergisi*, 4(2), 874-889.
- Gürleyen, S. (2017) Farklı Metamorfik Birimlerde Aktif Karbonla Toprak Gazı Radon Ölçümü ve Radon Potansiyelini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Gümüş, A. ve Yalım, H. A. (2019). The Relationship between Soil Gas Radon Concentration Level and the Distance of Sampling Point to Akşehir Fault Zone. *SDÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 14(3), 85-95.
- Hamidalddin, S. H. (2015). Measurements of natural radioactivity of industrial raw materials from the west of Saudi Arabia (Arabian shield). *Journal of Modern Physics*, 6(4), 510-520.
- Heath, M. J. (1991). Radon in the surface waters of southwest England and its bearing on uranium distribution, fault and fracture systems and human health. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24(2), 125-132.
- Hewlett, P. C., & Liska, M. (Eds.). (2019). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Hilal, A. A., Thom, N. H., & Dawson, A. R. (2015). On entrained pore size distribution of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 75, 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.006>
- Hiremath, G. B., SLNGH, V., Ayachit, N. H., & Badiger, N. (2024). Investigation of gamma radiation shielding properties of high-z-doped multilayer pva polymers. *Acta Physica Polonica: A*, 146(3).
- Hong, C., Li, X., Zhao, G., Jiang, F., Li, M., Zhang, S., Wang, H., & Liu, K. (2018). Preparation and multi-properties determination of radium-containing rocklike material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121(5), 052018.
- Horvath, A., Bohus, LO, Urbani, F., Marx, G., Piroth, A., & Greaves, ED (2000). Kuzey Venezuela'daki sıcak su kaynaklarındaki radon konsantrasyonları. *Çevresel radyoaktivite dergisi*, 47 (2), 127-133.

- Huang, P., Gao, H., Su, Q., Zhang, Y., Cui, M., Chai, S., Li, Y., & Jin, Y. (2023). Identification of mixing water source and response mechanism of radium and radon under mining in limestone of coal seam floor. *Science of the Total Environment*, 857, 159666.
- Hussain, R. O., & Hussain, H. H. (2011). Natural occurring radionuclide materials. *Radioisotopes–applications in physical science*, 3-20.
- Hussein, Z. (2017). Measurement of radon exhalation rate and radium activity from building material samples used in Erbil, Iraqi Kurdistan. *Journal of Radiological Science*, 12(3), 45-53.
- IAEA, 2015. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1651Web-62473672.pdf> adresinden erişilmiştir.
- Ichedef M., Sac M.M., Camgoz B., Bolca M., Demirel N., Oruc O.E.(2015), Natural radioactivity levels of great soil groups in Seferihisar geothermal region, Turkey. *Environ. Earth. Sci.*, 74(7): 6283-6292,
- ICRP, 1987. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 50. *Ann. ICRP* 17(4).
- ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65, *Ann. ICRP* 23(2).
- ICRP, 2014. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Ann. ICRP* 43(3).
- Işık, M., Tunalıoğlu, M. S., & Yücel, A. (2018). Fireclay refractory bricks produced from local clay deposits. *Acta Physica Polonica A*, 133(2), 416–418
- Işık, A., & Duman, M. (2021). The effect of firing temperature on the phase composition and properties of clay-based building materials. *Construction and Building Materials*, 272, 121979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121979>
- İnceboz, T. (2009). *Sağlıkta kalite uygulamaları ve ISO 15189: 2007 (tıbbi laboratuvarların akreditasyonu) akreditasyon uygulamalarının öncesi ve sonrası karşılaştırılması* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], Dokuz Eylül Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü
- Jadiyappa, S. (2018). *Radioisotope: applications, effects, and occupational protection* (pp. 19-47). InTech.
- Jalilian, A., Decristoforo, C., Denecke, M., Elsinga, P. H., Hoehr, C., Korde, A., Lapi, S. E. ve Scott, P. (2023). Proceedings of international symposium of trends in radiopharmaceuticals 2023 (ISTR-2023). *EJNMMI Radiopharmaceuticals and Chemistry*, 8(1), 1-15.
- Jasaitis, D., & Pečiulienė, M. (2021). Natural radioactivity and radon exhalation from building materials in underground parking lots. *Applied Sciences*, 11(16), 7475.
- Jin, Y., Zhang, J., & Liu, Q. (2020). Experimental research on the influencing factors of radon concentration measurement in soil. *Open Access Library Journal*, 7(2), 1-10.

- Jiránek, M., & Svoboda, Z. (2017). A new approach to the assessment of radon barrier properties of waterproofing materials. *Radiation Protection Dosimetry*, 178(3), 263–268.
- Ju, Y. J., Ryu, Y., Jang, H., Dong, K., Chung, W., Cho, J. H., Kweon, D., Goo, E., Lee, J. S., Park, C. S. ve Lim, C. (2012). A study on concentration measurements of radon-222 (uranium series) and radon-220 (thoron series) emitted to the atmosphere from tex (cementitious), red brick, and ecocarar among construction materials. *Journal of Korean Physical Society*, 60(8), 1177-1182.
- Judge, S., Coulon, R., Cox, M., Karam, L., Knoll, P., Michotte, C., Msimang, Z. ve Zimmerman, B. (2022). Traceability for nuclear medicine: the status of primary radioactivity standards. *Metrologia*, 59(1), 1-20.
- Kadum, A., Bensaoula, A. H., & Dahmani, B. (2013). Natural radioactivity in red clay brick manufactured in Tlemcen-Algeria, using well-shape NaI (TI) Detector. *Advances in Physics Theories and Applications*, 25, 120-128.
- Kapdan, E. (2009). *Adapazarı merkezi kış dönemi radon ölçüm ve analizleri*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- Kaplan, H. (2010). Nükleer Enerji hammaddelerinin aranması ve arama yöntemleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 2(3), 11-26.
- Karalı, C. (2019). *Akıllı malzemelerin iç mimarlıkta kullanımı Sarıyer Belediye binası örneği*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karaman, N. S. (2010). Gebze ve Dilovasının (Kocaeli) hidrojeolojik incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Karmaker, N., Maraz, K. M., Islam, F., Haque, M. M., Razzak, M., Mollah, M. Z. I., ... & Khan, R. A. (2021). Fundamental characteristics and application of radiation. *GSC Advanced Research and Reviews*, 7(1), 064-072.
- Kaur, M., Kumar, A., Mehra, R. ve Mishra, R. (2019). Hindistan, Jammu ve Keşmir'deki Şivalik Himalayalarındaki su örneklerinde uranyum ve radon alımına bağlı yaşa bağlı yutma ve inhalasyon dozları. Çevresel izleme ve değerlendirme , 191 , 1-17.
- Kavak, K. Ş. (1998). Uzaktan algılamanın temel kavramları ve jeolojideki uygulama alanları. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 21(1), 63-74.
- Kemski, J., Klingel, R., Schneiders, H., Siehl, A. ve Wiegand, J. (1992). Geological structure and geochemistry controlling radon in soil gas. *Radiation Protection Dosimetry*, 45(3), 213-220.
- Khan M.S., Srivastava D.S., Azam A., Study of radium content and radon exhalation rates in soil samples of northern India. *Environ. Earth. Sci.*, DoI. 10.1007/s. 12665-012-1581-7, 2012.
- Kılıçaslan S.(2016), Tokat-Sivas bölgeleri için toprak ve traverten örneklerinde radyoaktivite tayini. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi,

- Kızılkaya, C. (2010). *Fosfin oksit içeren yeni poliimid silika hibrit malzemelerin gaz ayırma özelliklerinin incelenmesi* [Yayımlanmamış doktora tezi] Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kim, Y. S., Kim, J. H., Lee, H. S., & Kim, C. H. (2018). Position-sensitive NaI(Tl) detector module for large-area Compton camera. *Journal of the Korean Physical Society*, 72(1), 26-32.
- Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to Ceramics* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Kolanoski, H., & Wermes, N. (2020). *Particle detectors: fundamentals and applications*. Oxford University Press.
- Kovachev, L. (2022). Radiation forces and confinement of neutral particles into the pulse envelope. *International Journal of Optics*, 11(4), 169943.
- Kritzberger, E. E., & Navarrete, L. (2017). Survey of radioactive items in the home. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 45(4), 253-257.
- Kumar A., Narang S., Estimation of radon exhalation rate and radium content in soil samples of Pathankot district, Punjab using LR-115 plastic detector. *Inter. J. Educ. Appl. Res.*, 4: 23-25, 2014.
- Kuzmanović, P., Todorović, N., Filipović Petrović, L., Mrđa, D., Forkapić, S., Nikolov, J., & Knežević, J. (2020). Radioactivity of building materials in Serbia and assessment of radiological hazard of gamma radiation and radon exhalation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 324, 1077-1087.
- Küçükönder, E. (2021). Kahramanmaraş ilinde bina içi mevsimsel radon gazı aktivitesi ölçümü. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 891-901.
- Küçükönder, E., & Gümbür, S. (2022). Radon gas measurement in water samples in Kahramanmaraş Province of Turkey. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233, 175.
- Kürkçüoğlu, M. E., Akgönül, H. ve Yılmaz, A. (2019). Kömür madenlerinde radon. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18(3), 45-59.
- Kürkçüoğlu, M. E., Öner, Ö., & Koçer, A. A. (2024). Bina içi radon birikimi üzerine bir araştırma. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2), 251-259.
- Kürkçüoğlu, M., & Bayraktar, G. (2014). Süleyman Demirel Üniversitesi'nde bina içi radon konsantrasyonlarının nükleer iz dedektörleri kullanılarak belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(2), 167-183.
- L'Annunziata, M. F. (2020). The atomic nucleus, nuclear radiation, and the interaction of radiation with matter. In *Handbook of Radioactivity Analysis* (pp. 1-243). Academic Press.
- Lerma, B. ve Palù, D. D. (2019). Natural materials. A family on the move, but where is the last stop? *Design Issues*, 35(2), 67-75.
- Leshukov, T., Legoshchin, K., & Larionov, A. (2023). A case study of the radon hazard at the boundary of a coal minefield. *Applied Sciences*, 13(24), 13188.

- Luan, Y. C., Shieh, M. C., Chen, S. T., Kung, H. T., Soong, K. L., Yeh, Y. C., ... & Sun, C. P. (2006). Re-examining the health effects of radiation and its protection. *International Journal of Low Radiation*, 3(1), 27-44.
- Luca, A., Radulescu, I., Ioan, M., Fugaru, V., Teodorescu, C., Barna, C., ... & Tugulan, C. L. (2022). Recent Progress in Radon Metrology at IFIN-HH, Romania. *Atmosphere*, 13(3), 363.
- Maciejewski, P., & Kowalska, A. (2021, November). Two sides of radon-a radioactive and healing component of water and air. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 942, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- Maestre, C. R. ve Iribarren, V. E. (2018). The Radon Gas in Underground Buildings in Clay Soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 1004.
- Maier, A., Wiedemann, J., Rapp, F., Papenfuß, F., Rödel, F., Hehlhans, S., ... & Frey, B. (2020). Radon exposure—therapeutic effect and cancer risk. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 316.
- Mandal, A., & Mandal, S. (2007). Structural and thermal characterization of gypsum and plaster of Paris. *Materials Letters*, 61(28), 5153–5156
- Mao, Y., Zhang, L., Wang, H., & Guo, Q. (2023). The temporal variation of radon concentration at different depths of soil: A case study in Beijing. *Journal of Environmental Radioactivity*, 264, 107200.
- Marakhtanov, M. K., & Okunev, V. (2018). The collective radioactive decay of atomic nuclei initiated by an external mechanical impact. *Journal of Materials Science Research*, 7(2), 34-45.
- Marid, H. A., Jarallah, N. T., & Abduljabbar, H. (2018). Radioactivity effect on the shape of even-even nuclei for uranium and thorium series. *Results in Physics*, 9, 1275-1280.
- Marković, S., Vučković, B., Nikolić-Bujanović, L., Kurilić, SM, Todorović, N., Nikolov, J., ... & Đokić, B. (2020). Kosova'nın kaynak sularında ağır metaller ve radon içeriği. *Bilimsel raporlar*, 10 (1), 10359.
- Morawska, L. (1989). Two ways of determining the ^{222}Rn emanation coefficient. *Health Physics*, 57(3), 481–483.
- Masevhe, L. (2017). *An analytical study of radon concentration in water from some rivers in gauteng using a solid-state α -detector* (Master's thesis, University of Johannesburg).
- McGrath, J. A., Aghamolaei, R., O'Donnell, J., & Byrne, M. A. (2021). Factors influencing radon concentration during energy retrofitting in domestic buildings: A computational evaluation. *Building and Environment*, 194, 107712.
- Miklyaev, P. S., Petrova, T. B., Shchitov, D. V., Sidyakin, P. A., Murzabekov, M. A., Marennyy, A. M., ... & Sapozhnikov, Y. A. (2021). The results of long-term simultaneous measurements of radon exhalation rate, radon concentrations in soil gas and groundwater in the fault zone. *Applied Radiation and Isotopes*, 167, 109460.

- Mizutani, T. (2020). Development of tough hybrid materials by regulated crystallization of hydroxyapatite inspired by bone formation. *Materials Advances*, 5(3), 27-33.
- Mohammadi, A., & Behnia, A. (2021). Effect of feldspar content on microstructure and properties of porcelain insulators. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 2599–2610. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.057>
- Mphaga, K. V., Mbonane, T. P., Utembe, W., & Rathebe, P. C. (2024). Short-term vs. long-term: a critical review of indoor radon measurement techniques. *Sensors*, 24(14), 4575.
- Murat, M., Torkaman, J., & Emamian, H. (2022). Characterization and performance of aluminosilicate-based ceramic materials: Effect of sintering and additive content. *Ceramics International*, 48(10), 14512–14521. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.020>
- Nam, H. S., & Ryu, J. S. (2018). Indoor radon and lung cancer: national radon action plans are urgently required. *Yonsei Medical Journal*, 59(9), 1013-1014.
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 22(5), 321–329. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0)
- Nguyen, V. D., Vu, T., Dang, T., Vu, H. P., & Nguyen, T. C. (2022). Study on the dispersion of radon (^{222}Rn) in geological objects in Bat Xat district, Lao Cai province, Northern Vietnam. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 64(4), 32-35.
- Nikezic, D., & Yu, K. N. (2004). Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 46(3-5), 51-123.
- Norton, F. H. (1974). *Elements of Ceramics* (2nd ed.). Addison-Wesley.
- Nükleer Düzenleme Kurumu. (2013). Kapalı ortamlarda radon ve yapı malzemelerindeki radyoaktiviteye ilişkin kılavuz. <https://webim.ndk.gov.tr/file/3d249666-562f-468c-a07a-eb582e350fbd> adresinden erişilmiştir.
- Ocak, M. E. (2015, 26 Ekim). *Radyokarbon tarihlendirme nasıl yapılır?* TÜBİTAK Bilim Genç. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/radyokarbon-tarihlendirme-nasil-yapilir>
- OECD, (1979). "Organization for Economic Cooperation and Development, Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials," Paris,
- Oyero, O. P. (2022). *Radiological impact assessment of geogenic radon and radionuclide concentrations on residents of selected regions of Kwara State, Nigeria* (Doctoral dissertation, Kwara State University).
- Ozan, S. S., & Ekinci, C. E. (2011). Yapılarda radon fenomeni. *Engineering Sciences*, 6(4), 1590-1602.
- Özcan, E. (2022). *Yeraltı maden ocaklarında farklı parametrelerin radon gazı konsantrasyonu oluşumuna etkisi ve iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- Özer, Y. (2019). Bursa'daki Orhaneli Termik Santrali Çevresindeki Sularda Radon Seviyesinin ve Yıllık Etkin Dozların Belirlenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi
- Özkorucuklu, S., Akyıldırım, H., & Çapalı, V. (2006). Isparta İlinde Radon Yoğunluk Ölçümleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 323-327.
- Özmen, E. (2023, 26-29 Nisan). *Yer altı maden (cebri) havalandırma otomasyon sistemleri*. [Bildiri sunumu]. 15. Ulusal Tesizat Mühendisliği Kongresi. İzmir.
- Öztürk, S. (2024). *Muz ve kivi'nin dielektrik özelliklerinin mikrodalga ve kızılötesi-mikrodalga kombinasyonu ile kurutma karakteristikleri üzerine etkisi*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Palacı, H., Günay, O., & Yazar, O. (2018). Türkiye'deki radyasyon güvenliği ve koruma eğitiminin değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (14), 249-254.
- Papachristodoulou, C., Ioannides, K., Mertzimekis, T., Karamanis, D., & Stamoulis, K. (2020). Assessment of arrangements for the detection of radon emanating from soil. *Hellenic Journal of Nuclear Physics*, 8(2), 44-55.
- Parizel, P. M. (2016). European Society of Radiology (ESR) and American College of Radiology (ACR) report of the 2015 global summit on radiological quality and safety. *Insights into imaging/European Society of Radiology.-Berlin, 2010, currens*, 7(4), 481-484.
- Park, B. J., Choi, J. J., Choe, J. S., Gileva, O., Ha, C., Iltis, A., ... & Shin, K. A. (2020). Development of ultra-pure NaI (Tl) detectors for the COSINE-200 experiment. *The European Physical Journal C*, 80, 1-13.
- Parlak, Y., Uysal, B., Kırar, F. S., Kovan, B., Demir, M., Ayan, A., ... & Güvenliği, T. R. (2020, Ağustos). *Radyasyon güvenliği kılavuzu: genel tanımlar ve nükleer tıp uygulamalarında radyasyondan korunma kuralları*. [Bildiri sunumu]. Nükleer Tıp Seminerleri.
- Prasad Y., Prasad G., Gusain G.S., Choubey V.M., Ramola R.C., Radon exhalation rate from soil samples of South Kumaun Lesser Himalayas, India Radiat. Meas., 43: S369-S374, 2008.
- Pereira, M. A. S. (2021). Modelling the effectiveness of alpha particle radionuclides in clinical settings (Doctoral dissertation, Queen's University Belfast).
- Petermann, E., Bossew, P., & Hoffmann, B. (2022). Radon hazard vs. radon risk - On the effectiveness of radon priority areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 245, 106833.
- Pişkin, A. (2016). *Ofis çalışanlarının radon gazı maruziyetinin nükleer iz dedektör yöntemine göre belirlenmesi ve sağlık üzerine etkileri*. [Yayımlanmamış uzmanlık tezi]. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. Ankara.
- Pişkin, A. (2017). Aydın İli Koçarlı Bölgesi Ve Çevresinde Radon Konsantrasyonlarının Toprak Yapısı Ve Çevresel Parametreler İle Olan İlişkilerinin Belirlenmesi [Phd Dissertation]. In M. M. Saç, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (P. İi).

- Plank, J., Brandl, D., & Sachsenhauser, B. (2020). Influence of carbonation on hydration and microstructure of calcium hydroxide-based materials. *Construction and Building Materials*, 251, 118991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118991>
- Plummer, L. N., & Busenberg, E. (1982). The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂-H₂O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO₃-CO₂-H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(6), 1011–1040. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90056-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90056-4)
- Puchkov, A., Berezina, E., Yakovlev, E., Hasson, N., Druzhinin, S., Tyshov, A. S., Ushakova, E. ve Koshelev, L. S. (2022). Radon Flux Density in Conditions of Permafrost Thawing: Simulation Experiment. *Geoscience Studies*, 72(1), 45-60.
- Radchenko, V., Engle, J. W., Wilson, J. J., Maassen, J. R., Nortier, M. F., Birnbaum, E. R., ... & Fassbender, M. E. (2016). Formation cross-sections and chromatographic separation of protactinium isotopes formed in proton-irradiated thorium metal. *Radiochimica Acta*, 104(5), 291-304.
- Rafique, M., Rehman, H., Malik, F., Rajput, MU, Rahman, SU ve Rathore, MH (2011). Mirpur Azad Keşmir'de kullanılan toprak ve yapı malzemelerinden kaynaklanan radyolojik tehlikelerin değerlendirilmesi; Pakistan.
- Ram, R., Adar, E. M., Yechieli, Y., Yokochi, R., Aeschbach, W., Armon, M., ... & Reznik, I. J. (2024). Deep desert aquifers as an archive for Mid-to Late Pleistocene hydroclimate: An example from the southeastern Mediterranean. *Science of the Total Environment*, 951, 175737.
- Ramasamy, V., & Sundararajan, M. (2020). Microstructural and compositional analysis of red clay ceramic tiles using SEM and EDS. *Construction and Building Materials*, 235, 117439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117439>
- Raptis, C., Savidou, A., & Kritidis, P. (2019). A study of cover materials which influence Rn222 exhalation indoors. *HNPS Proceedings*, 3(1), 1-5.
- Rasmussen, T. V. (2019). Determining the mean year value of radon in the indoor air. *MATEC Web of Conferences*, 28(2), 1-6.
- Ravisankar, R., Suganya, M., Vanasundari, K., Sivakumar, S., Senthilkumar, G., Chandramohan, J., Vijayagopal, P. ve Venkatraman, B. (2011). Measurement of natural radioactivity in common building materials used in Tiruvannamalai, Tamilnadu, India. *Radiation Protection and Environment*, 34(3), 172-176.
- Reilly, D. D., Athon, M. T., Kovarik, L., & Lach, T. (2019). Characterization of slag and metal from uranium bomb reduction: Morphology, speciation, and the search for thorium. *Materials Characterization*, 158, 109948.
- Rizo Maestre, C., & Iribarren, V. E. (2018). The Radon Gas in Underground Buildings in Clay Soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 1004.
- Rout, A. K., Panda, R. N., & Mishra, B. K. (2009). Effect of addition of waste materials on properties of high alumina refractories. *Ceramics International*, 35(5), 1917–1924. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.10.007>

- Roobol, S. J., Kouwenberg, J., Denkova, A., Kanaar, R., & Essers, J. (2019). Large field alpha irradiation setup for radiobiological experiments. *Methods and Protocols*, 2(3), 75.
- Ryan, C. M., Marianno, C. M., Charlton, W. S., Solodov, A. A., Livesay, R. J., & Goddard, B. (2014). Predicting concrete roadway contribution to gamma-ray background in radiation portal monitor systems. *Nuclear Technology*, 186(3), 415-426.
- Saad, AF, Abdallah, RM ve Hussein, NA (2013). SSNTD tekniği ile ölçülen Libya toprak örneklerinden radon ekshalasyonu. *Uygulamalı Radyasyon ve İzotoplar*, 72, 163-168.
- Saber, A., & Aly, H. (2023). Investigation of radionuclide levels and estimation for real emanated radon in rock samples collected from Sinai-Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 14(52), 123-138.
- Saç, M. M., & Camgöz, B. (2005). İzmir'de sismik aktiviteler ile radon konsantrasyonları arasındaki korelasyonun incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(3), 47-54.
- Sağlam, Y. (2019). Geyve, Örencik Ve Doğançay Bölgelerinde Radon Aktivitesinin Belirlenmesi. In F. E. Yamaç & Sakarya Üniversitesi, T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Saleh, G., Yousef, H., Mitwalli, M. ve El Farrash, A. H. (2019). Environmental Radioactivity of Radon and its Hazards in Hamash Gold Mine, Egypt. *Asian Journal of Nuclear Sciences*, 25(4), 110-122.
- Salih, N. F. (2021). Determine the contaminations of radon in the drinking water using NTDs (CR-39) and RAD7 detectors. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(6), 6061-6074.
- Samaila, B., Sagagi, Y. M., & Tampul, H. M. (2023). Exposure and biological impacts assessment of non-ionizing electro-magnetic radiation. *Sci Set J of Physics 2* (1), 01, 11.
- Sandıkçioğlu, A. (2004). *Afyon Deprem Fay hattında üzerinde Bulunan kaplıca Ve Kuyu sularındaki Radon değişiminin ölçümü* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Savaş Şahin, Z.M. (2018). *Radyasyon kaynaklarına ilişkin mevzuata aykırı durumlarda ülkemizde uygulanan yaptırımların incelenmesi, zafiyetlerin tespiti ve giderilmesi için uluslararası mevzuata paralel olacak şekilde öneriler geliştirilmesi* [Yayımlanmamış uzmanlık tezi] Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.
- Sawant, A., Kwak, D., Lee, I., Chung, M., & Choi, E. (2020). Stand-off radiation detection techniques. *Journal of Radiation Detection Research*, 58(2), 123-132.
- Shakir Khan, M., Zubair, M., Verma, D., Naqvi, AH, Azam, A., & Bhardwaj, MK (2011). Plastik iz dedektörleri kullanılarak kentsel konutlardaki iç mekan radonunun incelenmesi. *Çevresel yer bilimleri*, 63, 279-282.
- Segovia-Campos, I., Kanellakopoulos, A., Barrozo, I. J., Fock-Chin-Ming, E., Filella, M., Fontaine, A. B., ... & Ariztegui, D. (2024). Strontium-90 pollution can be bioremediated with the green microalga *Tetraselmis chui*. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 26(3), 622-631.

- Serge, A. B. M., Didier, T. S. S., Samuel, B. G., Kranrod, C., Omori, Y., Hosoda, M., ... & Tokonami, S. (2023). Assessment of radiological risks due to indoor radon, thoron and progeny, and soil gas radon in thorium-bearing areas of the centre and south regions of cameroon. *Atmosphere*, 14(12), 1708.
- Seyis, C. (2015). *Jeolojik, pedolojik ve atmosferik koşulların toprak radon gazının hareketine etkileri*. [Yayımlanmamış doktora tezi] İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Seyyedi, S. A. (2020). Alpha decay and spontaneous fission in superheavy isotopes, $Z=124$, using a density-dependent cluster model. *International Journal of Modern Physics E*, 29(12), 2050096.
- Shahrokhi, A., & Kovacs, T. (2021). Radiological survey on radon entry path in an underground mine and implementation of an optimized mitigation system. *Environmental Science Europe*, 33(66).
- Sharma, D. K., Kumar, A., Kumar, M., & Singh, S. (2003). Study of uranium, radium and radon exhalation rate in soil samples from some areas of Kangra district, Himachal Pradesh, India using solid-state nuclear track detectors. *Radiation Measurements*, 36(1-6), 363-366.
- Sharma, A., Mahur, AK, Yadav, M., Sonkawade, RG, Sharma, AC, Ramola, RC, & Prasad, R. (2015). Doğal radyoaktivite ölçümü, radon ekshalasyon oranı ve Hindistan çimento örneklerinde radyasyon tehlikesi değerlendirilmesi. *Fizik Procedia*, 80, 135-139.
- Shashikumar, T. S., Revanna, S., Ramachandra, M. N., Ashok, G. V., Ningappa, C., & Gowda, S. (2019). Measurement of radon soil gas in and around Bharathinagara, Mandya district. *Radiation Protection Dosimetry*, 187(1), 83-87.
- Shoulong, X., Zhiwei, Q., Yongchao, H., Hanfeng, D., Youjun, H., Fang, Z., ... & Huaiqing, Y. (2022). Ultrawide-range radiation detection based on dynamic identification and analysis of the response of a monolithic active pixel sensor. *Optics Express*, 30(9), 14134-14145.
- Singh S., Kumar M., Mahajan R.M., The study of indoor in dwellings of Bathinda district, Punjab, India and its correlation with uranium and radon exhalation rate in soil. *Radiat. Meas.*, 39: 535-542, 2005.
- Singh, S., Rani, A., & Mahajan, R. K. (2019). Assessment of natural radioactivity levels in building materials, Volume(Issue), pages. (Hindistan)
- Singh, I., Singh, B., Sandhu, B. S., & Sabharwal, A. D. (2020). Comparative study for intermediate crystal size of NaI(Tl) scintillation detector. *Review of Scientific Instruments*, 91(7), 073301.
- Singh, J., Singh, H., Singh, S., Bajwa, B. S., & Sonkawade, R. G. (2009). Comparative study of natural radioactivity levels in soil samples from the Upper Siwaliks and Punjab, India using gamma-ray spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(1), 94-98.
- Singovszka, E. ve Eštoková, A. (2020). Natural radioactivity of bricks in historical buildings in Slovakia. *Journal of Engineering Research and Applications*, 47, 45-54.

- Skekowski, P., Skwira-Chalot, I., & Matulewicz, T. (2018). Measurement of proton-induced radiation in animal tissue. *Acta Physica Polonica B*, 49(4), 681-692.
- Sohrabi, M., & Ebrahiminezhad, F. (2018). Concentration and duration dependence of a new prototype polycarbonate/activated-carbon fabric individual and environmental radon monitor. *Journal of Instrumentation*, 13(11), P11012.
- Sokół, J. M., Kucharek, H., Baliukin, I. I., Fahr, H., Izmodenov, V. V., Kornbleuth, M., ... & Zhang, M. (2022). Interstellar neutrals, pickup ions, and energetic neutral atoms throughout the heliosphere: present theory and modeling overview. *Space Science Reviews*, 218(3), 18.
- Soliyev, T. I., & Muzafarov, A. (2021). Investigation of the causes of violations of the radioactive balance between radionuclides of the uranium decay chain. *International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding*, 8(7), 288-301.
- Somlai, K. et al., 2007, Rn-222 concentrations of water in the Balaton Highland and in the southern part of Hungary, and the assessment of the resulting dose, *Radiation Measurements*, 42, 3, 491-495.
- Soniya, S., Jojo, P. J., & Khandaker, M. (2023). Study of radium content and radon exhalation rates in raw building materials used in southern India. *Physics Open*, 12(1), 100169.
- Soysal, A., & Demiral, Y. (2007). Kapalı ortam hava kirliliği. *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 6(3), 221-226.
- Steger, F., Kunsch, B. ve Buchner, I. (1992). ÖNORM S 5200: Radioactivity in Building Materials (A Standard in Austria to Limit Natural Radioactivity in Building Materials). *Radiation Protection Dosimetry*, 45(1-4), 721-724.
- Sulthanah, A. (2022). Analysis of radon gas exposure in the home on the risk of lung cancer (Narrative Review). *Journal of Community Health and Preventive Medicine*, 2(1), 18-25.
- Syuryavin, A. C., Han, S. ve Lee, S. H. (2020). How to regulate radon: case study of radon exposure in Korea and Indonesia. *Radiation Protection and Safety*, 45(2), 75-82.
- Szajerski, P. (2020). Distribution of uranium and thorium chains radionuclides in different fractions of phosphogypsum grains. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(9), 9678-9689.
- Şahin, M. (2019). Türkiye’de üretilen tütün ürünlerinde 210pb ve 210po radyoaktivite seviyelerinin ve maruz kalınan radyasyon dozunun araştırılması - 210pb uzaklaştırılması için adsorbent geliştirilmesi. [Yayınlanmamış doktora tezi] Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şimşek, C., Gündüz, O., & Elçi, A. (2012). Terkedilmiş Balya (Balıkesir) Pb-Zn maden atıklarının ağır metal ve doğal radyoaktivite içeriği ve çevre kalitesi açısından değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(1), 43-55.
- Tabar, E. (2010). Dikili ve Bergama bölgelerindeki tektonik aktivitenin jeotermal sularda radon ölçümleri ile değerlendirilmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Tabar E., Yakut H. and Ku A., Measurement of the radon exhalation rate and effective radium concentration in soil samples of southern Sakarya, Turkey, INDOOR AND BUILT ENVIRONMENT, 27, 2, 278–288, FEB 2018 (DOI: 10.1177/1420326X16672510)
- Tabatabaei, F. (2012). More about radioactive pollution. *Health Scope*, 1(3), 99-100.
- Tanner, L. H. (1998). Dolomite: A review of chemical and isotopic studies. *Sedimentary Geology*, 113(1-2), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(97\)00092-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(97)00092-3)
- Taskin H., Karavus M., Ay P., Topuzoglu A., Hidirolu S., Karahan G.(2009), Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gama radioactivity in Kırklareli, Turkey. *J. Environ. Radioact.*, 100: 49-53,
- Taşköprü, C. (2014). Küçük Menderes Havzası Topraklarında Radon Difüzyon Katsayılarının Belirlenmesi. In M. M. Saç, Aysun Uğur Görgün, Coşkun Harmanşah, & Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Pp. İ–Xi) [Thesis; Nükleer Bilimler Anabilim Dalı]. Ege Üniversitesi.
- Tatar, Ç., & Özdemir, M. (2022). “SEM ve EDS Teknikleriyle Mikroyapı İncelemeleri”, *Malzeme Bilimi Dergisi*, 7(1), 23-34.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford Publishing
- Tene, T., Gomez, C. V., Usca, G. T., Suquillo, B., & Bellucci, S. (2021). Measurement of radon exhalation rate from building materials: The case of Highland Region of Ecuador. *Construction and Building Materials*, 293, 123282.
- Thabayneh, K. M. (2018). Determination of radon exhalation rates in soil samples using sealed can technique and CR-39 detectors. *Environmental Health Engineering and Management*, 5(4), 234-242.
- Topoyan, Z. (2022). *Sürdürülebilir tekstiller bağlamında doğal boyalar ve deneysel eko tasarım çalışmaları* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü.
- Topsakal, E. Ş. (2015). *Konya'nın Ilgın ilçesinde bulunan Ilgın fay hattı civarındaki yer altı sularında ve toprak gazında radon aktivite seviyelerinin belirlenmesi*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Trevişi, R., Risica, S., D'Alessandro, M., Paradiso, D. ve Nuccetelli, C. (2012). Natural radioactivity in building materials in the European Union: A database and an estimate of radiological significance. *Journal of Environmental Radioactivity*, 105, 11-20.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE), TS EN 13279-1 (2010). Alçı esaslı yapı malzemeleri – Bölüm 1: Tanımlar ve gereklilikler.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. (2014). Çevresel Radyasyon İzleme Raporu 2014. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Yayınları
- Tufaner, F. (2018). Edirne il merkezinde ev içi radon konsantrasyonu ölçümleri. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 1-8.
- Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi. (2000). *Radyasyon güvenliği yönetmeliği*. <https://www.mevzuat.gov.tr/> adresinden erişilmiştir.

- Uludağ, N. (2018). *Şile-kandıra-İzmit bölgesindeki kaynak sularında radon gazının incelenmesi ve Sakarya Üniversitesi radon farkındalık anketi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ulutin, H. C., Çınar, U., & Barişik, T. (2019). Yeraltı maden işletmelerinde radon gazı tehlikesi ve korunma önlemleri. *Turan: Stratejik Arastirmalar Merkezi*, 11(41), 508-512.
- UNSCEAR, (2000)“ Exposure from natural radition sources. Report to general assembly with annexes (Annex B),” New York: United Nations,
- Urrutia-Pereira, M., Chatkin, J. M., Chong-Neto, H. J., & Solé, D. (2023). Radon exposure: a major cause of lung cancer in nonsmokers. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 49(06), e20230210.
- Usikalu, M., Achuka, J., Onumajor, C. A., Akinpelu, A., & Omeje, M. (2019). Radon monitoring: Pathway to environmental sustainability. *Journal of Physics: Conference Series*, 1299(1), 1-8.
- Ünal, S. (2017). *Tekirova (Antalya) ofiyolitleri'nin doğal ve yapay radyoaktivite (Gama) seviyeleri ve insan sağlığı üzerine etkisinin belirlenmesi*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi], Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vahapoğlu, V. (2013). Kauçuk türü malzemeler: sınıflandırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 25-34.
- Verma D., M. S. Khan, M. Zubair, Assessment of effective radium content and radon exhalation rates in soil samples, *J Radioanal Nucl Chem* (2012) 294:267–270
- Vu, N.G., Bui, T.N., Huynh T.N.P. vd. Radiological effects of fly ash as concrete additive: a study in Vietnam. (2021, 3 Eylül), PREPRINT (Version 1) available at Research Square.
- Vural, A. & Kaya, A. (2021). Eskiköy maden sahasının (Gümüşhane, Türkiye) doğal (226ra, 232th ve 40k) ve yapay (137cs) radyoaktivite bulgularına ait ilk değerlendirmeler. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 8(18), 133-150.
- Walczak, K., Olszewski, J., & Zmyślony, M. (2016). Radon permeability of insulating building materials. *Nukleonika*, 61(3), 289-293.
- Wang, C., Xie, D., Yu, C. W., & Wang, H. (2021). Evaluation of the effect of cover layer on radon exhalation from building materials. *Indoor and Built Environment*, 30(9), 1390-1399.
- Watkins, L. (2023). *The economic and health effects of indoor radon* (Doctoral dissertation, Vanderbilt University).
- Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Springer.
- Williams, D. F. (2014). *Essential materials science*. Cambridge University Press.
- World Health Organization (2009). *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*, Geneva.
- World Health Organization. (2011). *WHO handbook on indoor radon: A public health perspective*. World Health Organization.

- Wysocka, M. (2016). Radon problems in mining and post-mining areas in Upper Silesia region, Poland. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 61(3), 307-317.
- Wysocka, M., Nowak, S., Chałupnik, S., & Bonczyk, M. (2022). Radon concentrations in dwellings in the mining area—Are there observed effects of the coal mine closure? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 5214.
- Xia, M., & Ye, Y. (2024). Evaluation of accurate measurement methods for radon exhalation rate with advection effect and application in field. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135339.
- Yakut H., Tabar E., Zenginerler Z., Demirci N., Ertugral F., "Measurement of (RN)-R-222 concentration in drinking water in Sakarya, Turkey", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 157, 3, pp. 397-406, ISSN:0144-8420, DOI: 10.1093/rpd/nct157, DEC, 2013.
- Yalçın, S., Gurler, O., Tarım, U.A., Incirci, F., Kaynak, G. and Gundogdu O. Measurements of radon concentration in drinking water samples from Kastamonu (Turkey). *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 47, 438-445 (2011).
- Yarmoshenko, I., Zhukovsky, M., Onishchenko, A., Vasilyev, A., & Malinovsky, G. (2021). Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 232, 106575.
- Yaşar, Y. E. (2020). *Bursa'nın Orhaneli, Keleş ve Osmangazi ilçelerindeki topraklarda radon yayılım hızlarının ve efektif radyum içeriklerinin belirlenmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yazzie, S. A., Davis, S., Seixas, N., & Yost, M. G. (2020). Assessing the impact of housing features and environmental factors on home indoor radon concentration levels on the Navajo Nation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2813.
- Yıldırım, E. (2020). *Yapım sürecinde bina materyallerinde radon aktivite konsantrasyonlarının ve doz katkılarının hesaplanması* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi] Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yunrui, J., Wanchang, L., Guanhua, L., Hongjian, L., Tao, S., & Juan, Z. (2021). Study on the decay law of γ energy spectrum of radon and its daughters in radon chamber. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 13(5), 121-125.
- Yushardi, B., Supriadi, B., Tresnowati, D. S., & Ridlo, Z. R. (2020). Numerical simulation of mass in core decay of radioactive substance Thorium-232 series. *Journal of Physics: Conference Series*, 1538(1), 012040.
- Zararsız, A., Kaya, N., Yüce, Ü. R., Büyüm, M., & Özen, L. (2013). *Nükleer ve analitik teknikler kullanılarak arkeolojik, jeolojik ve organik kökenli numunelerin tarihlendirilmesi*. Ankara: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.
- Zeyrek, C. (2013). İyonize radyasyon uygulamaları için güvenlik ve korunmaya yönelik genel kavramlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(3), 1-9.

- Zorlu, K., & Karadayı, T. T. (2020). İç mekan hava kalitesinde yapı malzemelerinin rolü. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 193-211.
- Zuhur, S. (2014)The investigation natural radioactivity levels in building materials used in Gaziantep region, M. Sc. Thesis Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ayşe Seda KARTAL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Sakarya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü