

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAKARYA İLİ TOPRAK ÖRNEKLERİNDE DOĞAL
RADYASYON DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ VE
RADON YAYILIM HIZLARININ ÖLÇÜLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem KUŞ

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hakan YAKUT

Şubat 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAKARYA İLİ TOPRAK ÖRNEKLERİNDE DOĞAL
RADYASYON DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ VE
RADON YAYILIM HIZLARININ ÖLÇÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem KUŞ

Enstitü Anabilim Dalı

:

FİZİK

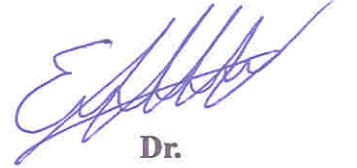
Bu tez 09/02/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr.
Recep Taygun GÜRAY
Jüri Başkanı



Doç. Dr.
Hakan YAKUT
Üye



Dr.
Emre TABAR
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Adem KUŞ

09.02.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında benden yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Hakan YAKUT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması ve tezimin tamamlanması sürecinde bana her konuda destek veren ve hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Emre TABAR'a, Arş. Gör. Dr. Emre DİL'e ve arkadaşım Sedat TÜRKMEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmasında gama spektrometresi ile ölçümlerin yapılması ve verileri elde etmemi sağlayan Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nden Doç.Dr.Müslim Murat Saç, Arş.Gör.Dr.Mutlu İÇHEDEF ve Arş.Gör. Caner TAŞKÖPRÜ'ye teşekkür ederim.

Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı'na 2015-50-01-047 nolu yüksek lisans tez projesi kapsamında verdiği destekten ötürü teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini üzerimden eksik etmeyen, her zaman maddi ve manevi olarak yardımlarını esirgemeyen dedem ve anneannem başta olmak üzere aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Kısa Literatür Özeti	2
BÖLÜM 2.	
GENEL BİLGİLER	14
2.1. Topraktaki Radyonüklid İçeriği Hakkında Genel Bilgiler.....	14
2.1.1. Uranyum-238	15
2.1.2. Toryum-232	16
2.1.3. Potasyum-40	16
2.1.4. Radyum-226	16
2.1.5. Radon-222	17
2.2. Topraklarda Radon Yayılımı Hakkında Genel Bilgiler	19
2.2.1. Radon gazının yerkabuğundaki hareketi	23
2.2.2. Radon gazının göçü	26
2.2.3. Radon gazının göçünü sağlayan mekanizmalar	26

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE METOD	27
3.1. Çalışma Alanı ve Jeolojisi	27
3.2. Toprak Örneklerindeki Doğal Radyonüklid Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntem	32
3.2.1. Gama spektrometresi metodu ve NaI(Tl) dedektörü	32
3.2.2. NaI(Tl) dedektörü ile ölçümlerin yapılışı	37
3.2.3. Aktivitelerin belirlenmesi ve doz hesabı	43
3.3. Topraktan Radon Yayılım Hızı Ölçümünde Kullanılan Yöntemler	44
3.3.1. Katı hal nükleer iz kazıma dedektör metodu	44
3.3.2. Kapalı kutu metodu (sealed can technique) ile radon yayılım hızı tayini	48
3.4. Doğal Radyonüklid Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi için Örneklerin Toplanması ve Ölçüme Hazırlanması	53
3.5. Topraktan Radon Yayılım Hızı Ölçümleri için Örneklerin Toplanması ve Ölçüme Hazırlanması	54

BÖLÜM 4.

SONUÇLAR	57
4.1. Toprakta Doğal Radyonüklid Aktivite Konsantrasyonu Ölçüm Sonuçları	57
4.2. Kuzey Sakarya Bölgesi Topraklarında Radon Yayılım Hızı Ölçüm Sonuçları	67
4.3. Güney Sakarya Bölgesi Topraklarında Radon Yayılım Hızı Ölçüm Sonuçları	75

BÖLÜM 5.

TARTIŞMA ve ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	91
EKLER	101
ÖZGEÇMİŞ	109

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AED	: Yıllık etkin doz eşdeğeri
Bq	: Becquerel (radyoaktivite birimi)
C	: Karbon atomu
C_{Ra}^{eff}	: Etkin radyum konsantrasyonu
Ci	: Curie (radyoaktivite birimi)
C_{Rn}^{ind}	: Toprakta yayılan radonun kapalı alana radon konsantrasyonu katkısı
C_K	: Potasyum aktivite konsantrasyonu
C_{Ra}	: Radyum aktivite konsantrasyonu
C_{Rn}	: Radon aktivite konsantrasyonu
C_{Th}	: Toryum aktivite konsantrasyonu
D	: Dış ortam gama doz oranı
E_A	: Yüzey radon yayılım hızı
E_M	: Kütle radon yayılım hızı
eTh	: Eşdeğer toryum konsantrasyonu
eU	: Eşdeğer uranyum konsantrasyonu
EURATOM	: Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu
eV	: Elektron-Volt
Gy	: Gray (soğrulan doz birimi)
GM	: Geometrik ortalama
H	: Hidrojen
H_{ex}	: Tehlike indeksi
HV	: Yüksek voltaj
ICRP	: Uluslararası Radyolojik Korunma Komitesi
k_f	: Kalibrasyon faktörü

K_K	: Potasyumun kalibrasyon faktörü
K_{Ra}	: Radyumun kalibrasyon faktörü
K_{Th}	: Toryumun kalibrasyon faktörü
MCA	: Çok kanallı analizör
MDA	: Minimum dedekte edilebilen aktivite
NaI(Tl)	: Talyum katkılı sodyum iyodür dedektörü
NRPB	: İngiltere Milli Radyasyondan Korunma Komitesi
PHS	: ABD Halk Sağlığı Servisi
ppm	: Milyonda bir
Ra_{eq}	: Eşdeğer radyum içeriği
S	: Yüzey alanı
SD	: Standart sapma
S_r	: İç yüzey alanı
Sv	: Sievert (eşdeğer doz birimi)
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
T_e	: Etkin ışınlanma süresi
$t_{1/2}$: Yarı ömür
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi
V_a	: Kapalı kutudaki hava boşluğunun hacmi
V_r	: Kutunun hacmi
V_s	: Kutudaki örneğin hacmi
WL	: Çalışma seviyesi
WLM	: Aylık çalışma seviyesi
ρ	: İz yoğunluğu
λ_e	: Etkin bozunma sabiti
λ_b	: Geri difüzyon sabiti
λ_{Rn}	: Radonun bozunma sabiti
α_x	: Geri difüzyon etkisinin düzeltme terimi
μ_B	: Art-ortam sayım hızı
τ	: Ortalama yarı ömür
φ	: Havanın değişim oranı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. ^{220}Rn ve ^{222}Rn izotoplarının bozunma zincirleri	18
Şekil 2.2. Radon difüzyonunun şematik gösterimi	20
Şekil 2.3. Topraktaki radon geçirgenliği	22
Şekil 2.4. Geri tepme olayı	24
Şekil 3.1. Sakarya ili jeoloji haritası	31
Şekil 3.2. Sakarya ili ve ilçeleri haritası	32
Şekil 3.3. Gama spektrometre sistemi	34
Şekil 3.4. NaI(Tl) dedektöründe radyasyon ölçümünün şematik gösterimi	35
Şekil 3.5. Gama spektrometre sisteminin elektronik üniteleri	36
Şekil 3.6. Gama spektrometresinin enerji kalibrasyonu	37
Şekil 3.7. Diğer kanallardan U, Th ve K kanallarına gelen katkılar	39
Şekil 3.8. Gama spektrometre sistemindeki a) Potasyum b) Uranyum ve c) Toryum kanalları	41
Şekil 3.9. Ağır yüklü parçacıkların içinden geçtikleri polimerin molekül zincirlerini kırması	45
Şekil 3.10. Polimer dedektörlerde gizli iz oluşumunu açıklamak için Huygens kuralının uygulanması	47
Şekil 3.11. İzlerin banyo süreci boyunca aldığı şekiller	48
Şekil 3.12. Toprak örneklerinde radon konsantrasyonu, radyum içeriği ve radon yayılm hızının ölçümü için kullanılan deney düzeneği	49
Şekil 3.13. Çalışma alanı ve örnekleme noktalarının lokasyon haritası	53
Şekil 3.14. Kuzey Sakarya toprak örnekleme istasyonlarının lokasyon haritası	56
Şekil 3.15. Güney Sakarya toprak örnekleme istasyonlarının lokasyon haritası	56
Şekil 4.1. Çalışma bölgesinde ^{226}Ra spesifik aktivite dağılımlarını gösteren kontur haritası	58

Şekil 4.2. Çalışma bölgesinde ^{232}Th aktivite konsatrasyonu dağılımlarını gösteren kontur haritası	58
Şekil 4.3. Çalışma bölgesinde ^{40}K aktivite konsatrasyonu dağılımlarını gösteren kontur haritası	59
Şekil 4.4. Sakarya toprak örneklerindeki a) radyum eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}) b) dış tehlike indeksi (H_{ex}) c) toplam soğrulan doz oranı (D) ve d) yıllık etkin doz eşdeğeri (AED)	62
Şekil 4.5. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımları ve radyolojik tehlike indeksleri	63
Şekil 4.6. Toprak örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K arasındaki korelasyonlar a) ^{232}Th - ^{226}Ra , b) ^{40}K - ^{232}Th ve c) ^{40}K - ^{226}Ra	65
Şekil 4.7. Çalışma bölgesinde kütle radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Kuzey Sakarya)	67
Şekil 4.8. Çalışma bölgesinde yüzey radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Kuzey Sakarya)	68
Şekil 4.9. Çalışma bölgesinde etkin radyum içeriği spesifik aktivitesinin dağılımını gösteren kontur haritası (Kuzey Sakarya)	68
Şekil 4.10. Ölçülen yüzey ve kütle radon yayılım hızları üzerinde geri difüzyonun etkisi	71
Şekil 4.11. Kuzey Sakarya'dan toplanan 89 toprak örneğindeki etkin radyum içeriği, kapalı alana katkıda bulunan radon aktivitesi, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının frekans dağılımı	74
Şekil 4.12. Kuzey Sakarya'da yetişkinler için kapalı alana katkıda bulunan radon konsantrasyonu ve karşılık gelen yıllık eşdeğer doz değeri	75
Şekil 4.13. a) Etkin radyum içeriği, b) kütle radon yayılım hızı, c) yüzey radon yayılım hızı ve d) topraktan yayılan radonun bina içi radon konsantrasyonu katkısı	77
Şekil 4.14. Güney Sakarya bölgesindeki kapalı ortama katkı yapan etkin radyum içeriğinin, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ve radon konsantrasyonunun dağılımı	78
Şekil 4.15. Çalışma bölgesinde kütle radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Güney Sakarya)	79

Şekil 4.16. Çalışma bölgesinde yüzey radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Güney Sakarya)	79
Şekil 4.17. Çalışma bölgesinde etkin radyum içeriği spesifik aktivitesinin dağılımını gösteren kontur haritası (Kuzey Sakarya)	80
Şekil 4.18. Güney Sakarya toprak örneklerindeki etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey radon yayılım hızları ve kapalı alana katkıda bulunan toprak gazı radon spesifik aktivitesi	83
Şekil 4.19. Güney Sakarya bölgesi için yıllık etkin doz eşdeğerleri	84

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Çeşitli kaya tiplerinden gelen gama radyasyonu doz oranları	14
Tablo 2.2. Toprakta bulunan doğal radyoizotop konsantrasyonları	15
Tablo 2.3. Çeşitli kayalardaki ortalama uranyum konsantrasyonları	15
Tablo 2.4. Çeşitli ortamlar için radon difüzyon sabitleri	21
Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan gama spektrometre sisteminin kalibrasyon sabitleri	42
Tablo 3.2. Farklı dedektör tipleri için iz kazıma koşulları	46
Tablo 4.1. Sakarya ili topraklarında ölçülen radyonüklidlerin istatistiksel analizi	61
Tablo 4.2. Ortalama aktivite konsantrasyonları, söğrulan gama doz oranları ve yıllık etkin doz eşdeğerlerinin Türkiye ve Dünya’da yürütölen diğör çalışmalarda elde edilen veriler ile karşılaştırması	66
Tablo 4.3. Kuzey Sakarya bölgesi toprak örneklerindeki etkin radyum içeriğii değörleri (değöşim, ortalama ve standart sapma)	70
Tablo 4.4. Kuzey Sakarya bölgesi toprak örneklerindeki kütle ve yüzey radon yayılim hızı değörleri (değöşim, ortalama ve standart sapma)	70
Tablo 4.5. Kuzey Sakarya toprak örneklerindeki etkin radyum içeriğii, kütle ve yüzey radon yayılim hızlarının istatistiksel analizi	72
Tablo 4.6. Güney Sakarya bölgesinde kapalı alana katkıda bulunan toprak gazı radon aktivite konsatrasyonu, kütle ve yüzey radon yayılim hızları ile etkin radyum içeriğiiine ait istatistiksel analizler	81
Tablo 4.7. Sakarya’dan toplanan toprak örneklerindeki etkin radyum içeriğii, kütle ve yüzey radon yayılim hızı değörlerinin farklı ölkelerde elde edilen değörler ile karşılaştırması	86

ÖZET

Anahtar kelimeler: Radon, radyum, aktivite konsantrasyonu, LR-115, NaI(Tl), Sakarya

Bu tez çalışmasında, Sakarya ili topraklarında doğal radyoaktivite seviyesini belirleyerek radyolojik risk haritasını oluşturmak için farklı ilçelerden toplanmış toprak örneklerinde doğal radyoaktivite seviyeleri ölçülmüş ve radon yayılım hızları belirlenmiştir. Bu doğrultuda Sakarya'nın değişik bölgelerinden toplanan toprak örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonları NaI(Tl) gama spektrometresi yöntemiyle ölçülerek radyolojik risk endeksleri hesaplanmıştır. Ayrıca kapalı kutu (sealed can) tekniği kullanılarak toprak örneklerindeki kütle ve yüzey radon yayılım hızları, efektif radyum içerikleri ve topraktan radon yayılımı yoluyla kapalı alana katkıda bulunan radon konsantrasyonları da belirlenmiştir. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklidlerin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla $23,2 \text{ Bqkg}^{-1}$, $21,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $371,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ olarak ölçülmüş, kütle ve yüzey radon yayılım hızları ile topraktan yayılan radonun kapalı ortamdaki radon konsantrasyonuna katkılarının ortalama değerleri ise sırasıyla $117,79 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$, $2,41 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve $9,22 \text{ Bqm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar radyolojik risk açısından değerlendirildiğinde soğurulan gama doz oranı (D), yıllık etkin doz eşdeğeri (AED), radyum eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}) ve dış tehlike indeksi (H_{ex}) için ortalama değerlerin sırasıyla $30,93 \text{ nGyh}^{-1}$, $37,93 \text{ }\mu\text{Svy}^{-1}$, $64,14 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $0,18$ olduğu görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen limit değerlerle karşılaştırıldığında, Sakarya topraklarının radyoaktivite açısından güvenli olduğu ve herhangi bir radyolojik tehlike oluşturmadığı anlaşılmaktadır.

NATURAL RADIOACTIVITY LEVELS AND RADON EXHALATION RATES ASSESSMENT IN SOIL SAMPLES FROM SAKARYA

SUMMARY

Keywords: Radon, radium, activity concentration, LR-115, NaI(Tl), Sakarya

In the present study, the natural radioactivity level have been measured and the radon exhalation rates have been determined for the soil samples collected from different locations of city of Sakarya in order to provide a radiological risk map. Regarding to this aim, the activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K natural radionuclides in the soil samples collected from different regions of Sakarya, have been measured by the NaI(Tl) gamma spectroscopy method in order to calculate radiological risk index. Also, the mass and area radon exhalation rates, effective radium contents of the soil samples and indoor radon concentration contributed by radon exhalation from soil have been determined by the using Sealed Can Technique. It has been found that the mean activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K natural radionuclides are $23,2 \text{ Bqkg}^{-1}$, $21,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ and $371,0 \text{ Bqkg}^{-1}$, while the measured radon exhalation rates in terms of mass and area and indoor radon concentration contributed by radon exhalation from soil samples have been found to have average value of $117,79 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$, $2,41 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ and $9,22 \text{ Bqm}^{-3}$, respectively. Evaluated the obtained results in terms of the radiological risk, the average values of the absorbed gamma dose rate (D), the annual effective dose equivalent (AED), radium equivalent activity (Ra_{eq}) and external hazard index (H_{ex}) have been estimated and found to have mean value of $30,93 \text{ nGyh}^{-1}$, $37,93 \text{ }\mu\text{Svy}^{-1}$, $64,14 \text{ Bqkg}^{-1}$ and $0,18$, respectively. When the results obtained in this study are compared to the recommended limit values by the national and international organizations, it is concluded that the soils of Sakarya are safe in terms of the radioactivity and do not produce any radiological hazards.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kozmik ışınlar ve yer kabuğunun oluşumundan bu yana var olan karasal radyonüklidler ile teknolojinin gelişimiyle ortaya çıkan yapay radyasyon kaynakları yaşadığımız çevrede bir radyoaktivite düzeyi oluşturmaktadır. Bu nedenle tüm canlılar, yaşamları boyunca radyasyona maruz kalmaktadır. Karasal radyoaktivite, tüm jeolojik yapılarda az miktarda bulunan ve yarı ömrü Dünya'nın yaşı ile kıyaslanabilecek uzunlukta olan ilkel radyonüklidlerden ileri gelmektedir. Radyolojik çalışmalar açısından esas alınan karasal radyonüklidler ^{238}U , ^{232}Th ve bunların bozunum ürünleri ile ^{40}K radyoaktif çekirdeğidir. Doğal radyonüklidlerin bozunum ürünleri içerisinde yer alan radon gazı, dünya genelinde çevresel radyoaktivite çalışmalarında özel ilgi görmektedir. Bunun nedeni, tüm doğal radyoaktif kaynaklardan alınan yıllık efektif doza radon ve bozunum ürünlerinin (^{214}Po ve ^{218}Po) katkısının %50'den fazla olmasıdır. Bu nedenle doğal radyoaktivitenin radyolojik etkileri ilkel radyonüklidlerden yayınlanan gama ışınlarıyla vücudun ışınlanması ile, solunum yoluyla alınan radon ve ürünlerinden yayılan alfa parçacıklarının akciğerlerde oluşturduğu radyoaktif zararlardan ileri gelmektedir [1].

Doğal radyoaktivite konsantrasyonları ile topraktaki radon gazı dağılımı pek çok faktöre bağlı olmakla birlikte esas olarak jeolojik ve coğrafi koşullara göre bölgeden bölgeye farklılıklar göstermektedir. Genellikle granit gibi magmatik kaya tipinin hakim olduğu bölgelerde yüksek radyoaktivite düzeyleri gözlenirken, jeolojik yapısı kireç taşı gibi tortul kayalardan oluşan bölgelerde ise düşük radyoaktivite gözlenmektedir [1].

Bir bölgenin radyoaktivite seviyesinin bilinmesi ve bu seviyedeki değişimlerin takibi, o bölgede yaşayan insanların doğal ve yapay radyoaktivite kaynaklarından dolayı maruz kaldıkları radyasyon dozunun belirlenmesi ve gerekli durumlarda önlemlerin alınabilmesi için büyük önem arz etmektedir [1].

İnsanların doğal kaynaklardan aldıkları radyasyon dozlarını belirlemeye yönelik çalışmalar; Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), Uluslararası Radyolojik Korunma Komitesi (ICRP), Avrupa Atom Enerjisi Topluluğu (EURATOM) ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) gibi uluslararası ve milli kuruluşlar tarafından yapılmaktadır.

Dünya genelinde ve ülkemizde çevresel radyoaktivite araştırmalarına olan ilgi artmakla birlikte Sakarya ilinde bugüne kadar kapsamlı bir çalışma yapılmamıştır. Bu gerçeği göz önünde bulundurarak planlanan bu çalışma, üç ana amaca sahiptir. İlk olarak Sakarya topraklarındaki doğal radyoaktivite seviyesi belirlenerek radyoloji haritası oluşturulacaktır. İkinci olarak radon riskinin değerlendirilebilmesi için topraktan yayılan radonun yayılım hızı ölçülerek radon kaynakları belirlenecektir. Son olarak da Sakarya'da yaşayan halkın toprakta bulunan doğal radyonüklidlerden aldıkları yıllık etkin dozlar, doz hızları ve dış tehlike indisleri belirlenerek sağlık açısından risk değerlendirmesi yapılacaktır (D, AED ve H_{ex}).

1.1. Kısa Literatür Özeti

Son yıllarda dünyada kapalı kutu tekniği (Can Technique) ve LR-115 ya da CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri (SSNTD) kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin; Hindistan'da 2003 yılında Sharma ve arkadaşları [3], 2005 yılında S.Singh ve arkadaşları [4], 2008 yılında H.Singh ve arkadaşları [5], Prasad ve arkadaşları [6], 2009 yılında Gusain ve arkadaşları [7], J.Singh ve arkadaşları [8], 2011 yılında Chauhan [11], Khan [12], 2012 yılında Verma ve arkadaşları [13], Zubair ve arkadaşları [14], Khan ve arkadaşları [15], 2013 yılında Kumar [19], Baruah ve arkadaşları [20], Mahur ve arkadaşları [21], 2014 yılında

Chauhan ve arkadaşları [23], Kumar ve Narang [24], 2015 yılında Sundar ve arkadaşları [25], Mehta ve arkadaşları [26], Menon ve arkadaşları [27], Mısır'da 2012 yılında El-Farrash ve arkadaşları [16], 2013 yılında El-Zaher [18], Pakistan'da 2010 yılında Mujahid ve arkadaşları [9], 2011 yılında Rafique ve arkadaşları [10] ve Libya'da 2013 yılında Saad ve arkadaşları tarafından [17] kapalı kutu tekniği kullanılarak toprakta radon gazı araştırmaları yapılmıştır.

Ülkemizde de son yıllarda Baykara ve arkadaşları tarafından (2005 ve 2006) Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Hattı civarında [29, 30], Mutuk ve arkadaşları tarafından (2014) Kızılırmak Deltasında [44], Tabar ve arkadaşları tarafından (2013) İzmir'de [42], Baldık ve arkadaşları tarafından (2011) Karabük'de [38] ve Yakut ve arkadaşları tarafından (2016) Güney Sakarya'da [46] yapılan çalışmalarda kapalı kutu tekniği kullanılarak topraktaki radon gazının aktivite konsantrasyonu ölçülmüştür.

Sharma ve arkadaşlarının (2003), Hindistan'ın Himachal Pradesh şehrinin Kangra bölgesi topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde etkin radyum içeriğinin $11,54-26,71 \text{ Bqkg}^{-1}$, yüzey yayılım (eksalasyon) hızının $502,12-1162,64 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve kütle yayılım hızının ise $15,16-35,11 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir [3].

Singh ve arkadaşlarının (2005), Hindistan'ın Bathinda bölgesi topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde uranyum içeriğinin $0,83-3,68 \text{ mgkg}^{-1}$, radyum konsantrasyonunun $5,70-25,45 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve radon konsantrasyonunun ise $1997,08-5349,19 \text{ Bqm}^{-3}$ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yüzey yayılım hızının $246,3-1100,0 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve kütle yayılım hızının ise $7,17-31,98 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği ölçülmüştür [4].

Singh ve arkadaşlarının (2008), Hindistan'ın Haryana ve Punjab bölgesi topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde, Haryana bölgesinde radon yüzey yayılım hızının 102,91-382,04 $\text{mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, kütle yayılım hızının ise 3,11-11,54 $\text{mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği, Punjab bölgesinde ise radon yüzey yayılım hızının 34,11-292,20 $\text{mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve kütle yayılım hızının ise 1,03-8,83 $\text{mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği belirlenmiştir [5].

Prasad ve arkadaşlarının (2008), Hindistan'ın Kumaun Lesser Himalayas bölgesi topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde etkin radyum içeriğinin 13,8-298,9 Bqkg^{-1} , radon konsantrasyonunun 0,4-25,78 kBqm^{-3} ve radon yayılım hızının ise $(0,39 - 8,21) \times 10^{-2}$ $\text{mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği görülmüştür [6].

Gusain ve arkadaşları tarafından (2009), Garhwal Himalaya (Hindistan) bölgesi topraklarında LR-115 nükleer iz dedektörleri ve NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan ölçümlerde radyum ve toryum konsantrasyonlarının sırasıyla 24,2-146,0 Bqkg^{-1} ve 8,8 Bqkg^{-1} -177,8 Bqkg^{-1} aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Radon yayılım hızının ise $(0,43 - 20,10) \times 10^{-2}$ $\text{mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ değerleri arasında değiştiği bulunmuştur [7].

Singh ve arkadaşlarının (2009), Hindistan'ın Kala Amb, Haryana ve Himachal Pradesh bölgesi topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde etkin radyum içeriğinin 5,30-31,71 Bqkg^{-1} aralığında, yüzey ve kütle yayılım hızlarının sırasıyla 216,87-1298,0 $\text{mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$, 6,15-36,80 $\text{mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği bulunmuştur [8].

Mujahid ve arkadaşları tarafından (2010), Güney Punjab (Pakistan) bölgesinde CN-85 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada, radon konsantrasyonu 34,0 Bqm^{-3} -260,0 Bqm^{-3} değerleri arasında bulunurken, radon yayılım hızı ise 38,0-288,0 $\text{mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ değerleri arasında bulunmuştur [9].

Rafique ve arkadaşları tarafından (2011), Keşmir (Pakistan) şehrinde CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada radon konsantrasyonunun $66,0 \text{ Bqm}^{-3}$ - $125,0 \text{ Bqm}^{-3}$, radon yayılım hızının ise $171,0$ - $344,0 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan bir çalışmada da eşdeğer radyum içeriği $45,9 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $197,1 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında bulunmuştur. Radyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının sırasıyla $14,0$ - $47,0 \text{ Bqkg}^{-1}$, $26,0$ - $75,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $268,0$ - $679,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla $34,7$ - $94,8 \text{ nGyh}^{-1}$ ve $0,17$ - $0,47 \text{ mSvy}^{-1}$ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. H_{ex} değerinin ise $0,19$ ile $0,53$ arasında değiştiği belirlenmiştir [10].

Chauhan tarafından (2011), Hindistan'ın Aravali tepelerinde LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan ölçümlerde radon konsantrasyonunun $806,0 \text{ Bqm}^{-3}$ - $979,0 \text{ Bqm}^{-3}$, yüzey yayılım hızının $493,0$ - $599,0 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve kütle yayılım hızının ise $23,1$ - $28,6 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği ölçülmüştür [11].

Khan ve arkadaşlarının (2011), Hindistan'ın Etah bölgesi topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde radyum içeriğinin $27,87$ - $45,14 \text{ Bqkg}^{-1}$, yüzey yayılım hızının $(0,26 - 0,42) \times 10^{-3} \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve kütle yayılım hızının ise $(0,01 - 0,16) \times 10^{-3} \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği ölçülmüştür [12].

Verma ve arkadaşlarının (2012), Farrukhabad bölgesi (Uttar Pradesh, Hindistan) topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde radyum içeriğinin $5,39 \text{ Bqkg}^{-1}$ - $34,56 \text{ Bqkg}^{-1}$, yüzey yayılım hızının $(0,06 - 0,11) \times 10^{-3} \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve kütle yayılım hızının ise $(0,02 - 0,11) \times 10^{-3} \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği ölçülmüştür [13].

Zubair ve arkadaşlarının (2012), Bulandshahr bölgesi (Uttar Pradesh, Hindistan) topraklarında LR-115 katı hal plastik nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan ölçümlerde etkin radyum içeriğinin $9,2-18,7 \text{ Bqkg}^{-1}$, kütle yayılım hızının $15,1-30,7 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ve yüzey yayılım hızının ise $394,12-798,34 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği ölçülmüştür [14].

Khan ve arkadaşları tarafından (2012), Kuzey Hindistan topraklarında LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yaptıkları bir çalışmada radyum içeriğinin $8,11-112,83 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında, kütle ve yüzey yayılım hızlarının sırasıyla $(0,03 - 0,66) \times 10^{-3} \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $(0,08 - 1,71) \times 10^{-2} \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği bulunmuştur [15].

El-Farrash ve arkadaşları tarafından (2012), Mısır'da CR-39 ve LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada uranyum ve toryum konsantrasyonlarının sırasıyla $1,91-13,59 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $3,71-10,26 \text{ Bqkg}^{-1}$ arasında değerler aldığı belirlenmiştir [16].

Saad ve arkadaşları tarafından (2013), Bingazi ve Al-Marj (Kuzey Libya) bölgesi topraklarında CR-39 katı hal plastik nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan ölçümlerde Bingazi bölgesi için radon konsantrasyonu ve eşdeğer radyum içeriğinin sırasıyla $31,1-469,0 \text{ Bqm}^{-3}$ ve $1,5-23,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında değişirken, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ise sırasıyla $1,16-17,40 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $30,6-460,9 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ değerleri arasında değiştiği bulunmuştur. Bunun yanı sıra yıllık etkin doz miktarının ise $3,61-54,36 \mu\text{Svy}^{-1}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Al-Marj bölgesi için ise radon konsantrasyonu ve eşdeğer radyum içeriği sırasıyla $59,3-515,8 \text{ Bqm}^{-3}$ ve $2,9-25,3 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında değişirken, kütle ve yüzey radon yayılım hızları ise sırasıyla $2,2-61,0 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $58,3-506,9 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ değerleri arasında değişmektedir. Ayrıca yıllık etkin doz miktarının ise $6,87-59,77 \mu\text{Svy}^{-1}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir [17].

El-Zaher tarafından (2013), Mısır'ın Alexandria şehrinde LR-115 nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada radon konsantrasyonu $5,72 \text{ Bqkg}^{-1}$ ile $157,99 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında bulunurken, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ise sırasıyla $8,31-233,70 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $0,48-15,37 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ arasında değiştiği bulunmuştur [18].

Kumar ve arkadaşları tarafından (2013), Dharamsala bölgesi (Himalaya, Hindistan) topraklarında LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada radon ve toron konsantrasyonlarının sırasıyla $1593,0-13570,0 \text{ Bqm}^{-3}$ ve $223,0-2920,0 \text{ Bqm}^{-3}$ arasındaki değerlerde değiştiği görülmektedir [19].

Baruah ve arkadaşları tarafından (2013), Hindistan'ın Assam bölgesinde LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan ölçümlerde radyum konsantrasyonunun $2,85 \text{ Bqkg}^{-1}$ 'den $4,37 \text{ Bqkg}^{-1}$ 'e, yüzey yayılım hızının $62,66 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 'den $96,22 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 'e ve kütle yayılım hızının ise $1,78 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ 'den $2,73 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ 'e değiştiği ölçülmüştür [20].

Mahur ve arkadaşları tarafından (2013), Hindistan'ın Dadri bölgesinde gama spektrometresi tekniği ve LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan ölçümlerde radyum, toryum, potasyum ve radon konsantrasyonları ile eşdeğer radyum içeriği sırasıyla $32,2-120,9 \text{ Bqkg}^{-1}$, $19,3-44,6 \text{ Bqkg}^{-1}$, $195,4-505,4 \text{ Bqkg}^{-1}$, $177,5-583,4 \text{ Bqm}^{-3}$ ve $1,5-23,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ değerleri arasında değişirken, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ise sırasıyla $2,5-8,1 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $63,9-210,2 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ değerleri arasında değiştiği bulunmuştur, Bunun yanı sıra soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla $34,6-101,3 \text{ nGyh}^{-1}$ ve $0,04-0,12 \text{ mSvy}^{-1}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca H_{ex} değeri ise $0,2$ ile $0,6$ arasında bulunmuştur [21].

Dhawal ve arkadaşları tarafından (2013), Hindistan'ın Maharashtra bölgesinde gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan ölçümlerde uranyum, toryum, potasyum konsantrasyonlarının ve eşdeğer radyum içeriğinin sırasıyla $8,69-93,78 \text{ Bqkg}^{-1}$, $21,36-115,05 \text{ Bqkg}^{-1}$, $35,07-611,65 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $47,87-289,29 \text{ Bqkg}^{-1}$

arasında değiştiği bulunmuştur. Bunun yanı sıra, soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla 22,67-135,63 nGyh⁻¹ ve 0,14-0,83 mSvy⁻¹ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca H_{ex} değerinin de 0,13-0,78 arasında değerler aldığı görölmektedir [22].

Chauhan ve arkadaşları tarafından (2014), Hindistan'ın Shivalik bölgesinde LR-115 katı hal nükleer plastik iz dedektörleri kullanılarak yapılan ölçümlerde radyum, toryum, potasyum konsantrasyonlarının ve eşdeğer radyum içeriğinin sırasıyla 31,0-63,0 Bqkg⁻¹, 53,0-78,0 Bqkg⁻¹, 472,0-630,0 Bqkg⁻¹ ve 143,0-215,0 Bqkg⁻¹ değerleri arasında değiştiği bulunmuştur. Bunun yanı sıra soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla 66,0-87,0 nGyh⁻¹ ve 0,08-0,11 mSvy⁻¹ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir [23].

Kumar ve Narang tarafından (2014), Hindistan'ın Pathankot bölgesinde LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada radon konsantrasyonunun, yüzey ve kütle yayılım hızlarının sırasıyla 1,39-5,31 Bqkg⁻¹, 53,39-216,96 mBqm⁻²h⁻¹ ve 1,62-6,55 mBqkg⁻¹h⁻¹ değerleri arasında değiştiği bulunmuştur [24].

Sundar ve arkadaşları tarafından (2015), Hindistan'ın Kalpakkam bölgesinde NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonları sırasıyla 14,0-22,0 Bqkg⁻¹, 34,0-1093,0 Bqkg⁻¹ ve 37,0-570,0 Bqkg⁻¹ arasında değerler alırken, eşdeğer radyum içeriği de 83,0-1574,0 Bqkg⁻¹ arasında değerler almaktadır. Ayrıca soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla 40,0-600,0 nGyh⁻¹ ve 0,05-0,81 mSvy⁻¹ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. H_{ex} değeri ise 0,22 ile 4,25 arasında değişmektedir [25].

Mehta ve arkadaşları tarafından (2015), Hindistan'ın Mohali bölgesinde LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada radon eşdeğer içeriğinin 8,9-71,4 Bqm⁻³, kütle yayılım hızının 0,32-2,6 mBqm⁻²h⁻¹ ve yüzey yayılım hızının ise 7,3-58,2 mBqkg⁻¹h⁻¹ aralığında değiştiği ölçölmüştür [26].

Menon ve arkadaşları tarafından (2015), Hindistan'ın Tamil Nadu bölgesinde LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada radon yayılım hızını $0,07-3,44 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ arasında değerler almaktadır [27].

Yarar ve arkadaşları tarafından (2005), Dikili ve Tekirdağ'da CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri ve gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum ve radon konsantrasyonlarının $36,0-287,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $36,12-285,75 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında değiştiği bulunmuştur [28].

Baykara ve arkadaşlarının (2005), Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Hattı bölgesinde CR-39 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde radyum içeriği $0,02-0,80 \text{ Bqkg}^{-1}$ arasında değişirken, radon içeriğinin $0,31-8,10 \text{ Bqkg}^{-1}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Radon yayılım hızının değeri ise $13,3-400,7 \text{ mBqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ arasında bulunmuştur [29].

Baykara ve Doğru tarafından (2006), Doğu Anadolu Fay Hattı yakınlarında CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri ve NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada uranyum içeriğinin $12,4-138,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ arasında değerler aldığı görülmüştür [30].

Bozkurt ve arkadaşları tarafından (2007), Şanlıurfa'da gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum ve potasyum konsantrasyonlarının sırasıyla $18,9-44,0 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $144,1-401,1 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca soğrulan ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla $52,6-71,7 \text{ nGyh}^{-1}$ ve $64,5-84,32 \text{ mSvy}^{-1}$ arasında değiştiği gözlemlenmiştir [31].

Kam ve Bozkurt tarafından (2007), Kastamonu'da CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının ortalama değerlerinin sırasıyla $32,93 \text{ Bqkg}^{-1}$, $27,17 \text{ Bqkg}^{-1}$ ve $431,43 \text{ Bqkg}^{-1}$ olduğu bulunmuştur. Bu değerlere ek olarak soğrulan doz miktarının ortalama değerinin ise $52,76 \text{ nGyh}^{-1}$ olduğu hesaplanmıştır [32].

Kurnaz ve arkadaşları tarafından (2007), Fırtına vadisinde (Rize) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum konsantrasyonu 15,29-188,26 Bqkg⁻¹ değeri arasında bulunmuştur. Uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının ortalama değerleri sırasıyla 50,0 Bqkg⁻¹, 42,0 Bqkg⁻¹ ve 643,0 Bqkg⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla 19,12-149,58 nGyh⁻¹ ve 143,66-1244,75 µSvy⁻¹ arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Eşdeğer radyum içeriği 44,92-385,85 Bqkg⁻¹ arasında değişirken, H_{ex} değeri ise 0,12 ile 1,04 arasında bulunmuştur [33].

Baykara ve arkadaşlarının (2008), Doğu Anadolu Fay Hattı bölgesinde CR-39 katı hal plastik nükleer iz dedektörlerini kullanarak yaptıkları ölçümlerde radon konsantrasyonunun 1258,0-3588,0 Bqm⁻³ aralığında değiştiği belirlenmiştir [34].

Değerlier ve arkadaşları tarafından (2008), Adana'da gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum, uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının sırasıyla 0,2-104,1 Bqkg⁻¹, 0,6-80,9 Bqkg⁻¹, 0,6-56,9 Bqkg⁻¹ ve 9,6-814,2 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının da sırasıyla 10,0-463,0 nGyh⁻¹ ve 1,9-105,3 µSvy⁻¹ aralığında değiştiği hesaplanmıştır [35].

Baykara ve Doğru tarafından (2009), Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Hattı yakınlarında NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada Doğu Fay Hattı için uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonu değerleri sırasıyla 12,4-25,11 Bqkg⁻¹, 13,2-195,5 Bqkg⁻¹ ve 140,4-963,1 Bqkg⁻¹ arasında değişirken, Kuzey Anadolu Fay Hattı için ise bu değerlerin yine sırasıyla 20,8-179,4 Bqkg⁻¹, 3,3-115,6 Bqkg⁻¹ ve 255,4-978,4 Bqkg⁻¹ arasında değiştiği gözlemlenmiştir [36].

Taşkın ve arkadaşları tarafından (2009), Kırklareli’nde gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum, uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının sırasıyla 5,0-111,0 Bqkg⁻¹, 6,0-73,0 Bqkg⁻¹, 7,0-151,0 Bqkg⁻¹ ve 87,0-2084,0 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği bulunmuştur. Soğrulan doz miktarının ise 28,0-283,0 nGyh⁻¹ arasında değiştiği belirlenmiştir [37].

Baldık ve arkadaşları tarafından (2011), Karabük’te CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri ve NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum, toryum ve potasyum konsantrasyonları sırasıyla 13,0-31,0 Bqkg⁻¹, 14,0-34,0 Bqkg⁻¹ ve 204,0-572,0 Bqkg⁻¹ aralığında değerler alırken, soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının ise sırasıyla 25,3-58,7 nGyh⁻¹ ve 31,0-72,0 µSvy⁻¹ aralığında değerler aldığı görülmektedir [38].

Çetiner ve arkadaşları tarafından (2011), Çanakkale’de gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının sırasıyla 383,0-850,6 Bqkg⁻¹, 741,0-28894,0 Bqkg⁻¹ ve 624,0-2176,0 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği bulunmuştur. Bu değerlere ek olarak soğrulan doz miktarının da 0,13-3,51 µGyh⁻¹ arasında değiştiği gözlemlenmiştir [39].

Küçükömeroğlu ve arkadaşları tarafından (2011), Artvin ve Ardahan’da CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada Artvin için uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonları sırasıyla 10,0-34,0 Bqkg⁻¹, 14,0-36,0 Bqkg⁻¹ ve 244,0-561,0 Bqkg⁻¹ arasında değişirken, bu değerlerin Ardahan için yine sırasıyla 30,0-47,0 Bqkg⁻¹, 27,0-33,0 Bqkg⁻¹ ve 228,0-381,0 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca Artvin ve Ardahan için soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla 25,0-57,0 nGyh⁻¹ ve 31,0-70,0 µSvy⁻¹ aralığında olduğu bulunmuştur [40].

Karadeniz ve Yaprak tarafından (2011), İzmir’de gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının

sırasıyla 14,0-51,0 Bqkg⁻¹, 17,0-79,0 Bqkg⁻¹, ve 308,0-879,0 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği hesaplanmıştır [41].

Tabar ve arkadaşları tarafından (2013), İzmir'in Dikili bölgesinde NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği ve LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada radon konsantrasyonu 98,0-8594,0 Bqm⁻³ değerleri arasında bulunmuştur. Uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının ortalama değerlerinin sırasıyla 28,7 Bqkg⁻¹, 17,6 Bqkg⁻¹ ve 579,2 Bqkg⁻¹ olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının da sırasıyla 31,4-78,9 nGyh⁻¹ ve 38,4-96,8 μSvy⁻¹ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir [42].

Kurnaz tarafından (2013), şebinkarahisar'da (Giresun) NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonu değerleri sırasıyla 11,3-405,2 Bqkg⁻¹, 9,5-749,1 Bqkg⁻¹ ve 53,6-2489,9 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği bulunmuştur. Bunun yanı sıra, soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarları ise sırasıyla 18,8-677,2 nGyh⁻¹ ve 23,0-830,0 μSvy⁻¹ arasında değişmektedir [43].

Aközcan ve arkadaşları tarafından (2014), Kırklareli'nde NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan çalışmada radyum, uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarının sırasıyla 11,42-90,73 Bqkg⁻¹, 12,82-101,7 Bqkg⁻¹, 5,16-73,34 Bqkg⁻¹ ve 1,85-5,39 Bqkg⁻¹ arasında değiştiği belirtilmiştir [44].

Mutuk ve arkadaşları tarafından (2014), Kızılırmak deltasında (Bafra) NaI(Tl) gama spektrometresi tekniği kullanılarak yapılan ölçümlerde uranyum, toryum, potasyum konsantrasyonlarının sırasıyla 2,6-67,3 Bqkg⁻¹, 2,7-83,8 Bqkg⁻¹ ve 32,6-1247,2 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği bulunmuştur. Ayrıca soğrulan doz ve yıllık etkin doz miktarlarının sırasıyla 5,1-122,0 nGyh⁻¹ ve 6,3-150,0 μSvy⁻¹ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Hesaplanan H_{ex} değeri ise 0,13-0,78 değerleri arasında bulunmuştur [45].

Yakut ve arkadaşları tarafından (2016), Güney Sakarya bölgesinde LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılan çalışmada etkin radyum içeriği değerinin $3,77-26,69 \text{ Bqkg}^{-1}$, kütle ve yüzey yayılım hızlarının ise sırasıyla $35,76-253,15 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $0,73-5,18 \text{ Bqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği ortaya konulmuştur [46].

Bu tez çalışmasında, Sakarya ili ve ilçelerinden toplanan 176 toprak örneğinin, LR-115 katı hal nükleer iz dedektörleri ile radon içeriklerinin tayin edilmesi ve NaI(Tl) gama dedektörü (gama spektrometresi tekniği) ile ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları tayin edilerek, bunlardan kaynaklanan doz değerlerinin hesaplanması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, Sakarya ili topraklarının kapsamlı radyoaktivite haritasının çıkarılması amacıyla tüm ilçelerden toplanan toprak örnekleri Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarına getirilerek analize uygun hale getirilmiştir. Literatürde son zamanlarda sıklıkla kullanılan Kapalı Kutu (Sealed Can) Tekniğiyle örneklerin radon yayılım hızları (kütle ve yüzey) ve etkin radyum içerikleri ölçülmüştür. Aynı zamanda örneklerin önemli bir kısmı da ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları tayin edilmek üzere Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'ne gönderilmiştir. Ölçüm sonuçları kullanılarak çalışma bölgesinde yaşayan insanların aldıkları yıllık etkin doz seviyesi hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, Dünya'da ve Türkiye'de yapılmış literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmeler yapılmıştır. Bu tez çalışması, Sakarya'daki topraklarda radyoaktivite ile ilgili yapılmış en kapsamlı çalışmalardan biri olup, yapılan çalışmanın sonuçları uluslararası düzeyde taranan ve SCI indeksli dergilere gönderilmiştir. İki makale 2016 yılında "AIP Conference Proceedings" ve "Indoor and Built Environment" dergilerinde bir makale ise 2017 yılında "Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry" dergisinde yayınlanmış olup bir makale de SCI indeksli bir dergilerde inceleme altındadır.

BÖLÜM 2. GENEL BİLGİLER

2.1. Topraktaki Radyonüklid İçeriği Hakkında Genel Bilgiler

Topraktaki radyoaktivitenin en önemli kısmı toprak ve kayalardaki radyonüklidlerden (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K) ileri gelmektedir. Dünyadaki bu doğal radyoaktivite konsantrasyonları bölgeden bölgeye değişmekte olup dünyadaki background radyoaktivite seviyesini belirlemektedir. Fay kırıklarının olduğu ve termal suların bulunduğu çevrelerde doğal radyoaktivite konsantrasyonları diğer bölgelere nazaran daha yüksektir [47].

Yerkabuğundaki doğal radyoaktivite düzeyi, toprağın jeolojik kökenine, toprak ve kayalardaki granit yapı miktarına ve volkanik alanlara göre değişiklik göstermektedir [47]. Doğal radyonüklidler daha çok granit, volkanik, tortul ve fosfat kayalarda yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır. Volkanik kayaların aktiviteleri tortul kayalardan daha fazladır. Bu durum Tablo 2.1.'de görülmektedir [48].

Tablo 2.1. Çeşitli kaya tiplerinden gelen gama radyasyonu doz oranları [48]

Kaya Tipleri	Doz oranları ($\mu\text{Sv/yıl}$)			
	Ra-226	U-238	Th-232	K-40
Volkanik kayalar	240	260	370	350
Tortul kayalar				
Kumtaşı	130	77	180	150
Kireçtaşı	200	77	310	360
Kalkerli	77	84	40	40

Topraktaki radyoaktivite, bulunduğu yer ve toprak derinliğine göre önemli farklılıklar göstermektedir. Topraktaki doğal radyoizotoplar (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{226}Ra) toprakta bulunma oranlarına bağlı olarak, o çevrenin doğal radyasyon temel seviyesini belirlemekte ve belli oranlarda insanların doğal radyasyona maruz kalmalarına sebep olmaktadır. Tablo 2.2.'de topraktaki doğal radyoizotopların konsantrasyonları verilmiştir [48].

Tablo 2.2. Toprakta bulunan doğal radyoizotop konsantrasyonları (Bq/kg) [1]

Doğal Radyoizotop Konsantrasyonu (Bq / kg)				
Doğal radyoizotoplar	K-40	U-238	Ra-226	Th-232
Değişim Aralığı	140 -850	16 -110	17- 60	11- 64
Ortalama	400	35	35	30

2.1.1. Uranyum-238 (^{238}U)

Doğal olarak oluşan uranyum üç farklı izotopa sahiptir; bunlar ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 'dir ve ağırlığının %99,27'sini ^{238}U , %0,72'sini ^{235}U ve %0,55'ini ^{234}U oluşturur. ^{238}U 'in yarı ömrü $4,47 \times 10^9$ yıldır. 14 ana çekirdeğin başı olan ve alt serilere bölünen ^{238}U , tüm kayalarda ve topraklarda bulunmaktadır. Tablo 2.3.'te toprak ve kaya çeşitlerinin tipik uranyum radyoaktivite konsantrasyonları verilmiştir [48].

Tablo 2.3. Çeşitli kayalardaki ortalama uranyum konsantrasyonları [48]

Kaya Tipleri	Uranyum Konsantrasyonu (ppm)
Volkanik kayalar	3,0
Fosfat kayalar (Florida)	120,0
Fosfat kayalar (Kuzey Afrika)	20-30
Granit	4,0
Kireçtaşı	1,3
Tortul kayalar	1,2

Sularda uranyumun bulunması, onunla temas halinde olan toprak veya kayalardan ileri gelmektedir. Atmosferde, uranyum kaynağının varlığı topraktan gelen toz parçacıklarının havada asılı kalmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda uranyumun varlığı, radon gazlarının da bir habercisi olmaktadır [48].

2.1.2. Toryum-232 (^{232}Th)

^{232}Th , doğada bulunan dört toryum izotopundan en yaygın olanıdır. Radyoaktif olan α parçacıklarını yaymakta olup uzun bir yarı ömre ($1,4 \times 10^{10}$ yıl) sahiptir. Toryum tabiiatta uranyumdan yaklaşık üç kat daha fazla bulunmaktadır. Değişik tarihlerde yaptığı açıklamalarda Prof. Dr. Engin ARIK, dünyadaki bilinen 1,3 milyon ton toryum rezervinin 800000 tonunun Türkiye’de bulunduğunu, “Türkiye, sonsuza kadar enerji ihtiyacını karşılayacak bir hazinenin üstünde oturuyor” ifadesi ile belirtmiştir [48].

2.1.3. Potasyum-40 (^{40}K)

Doğada doğal olarak bulunan potasyumun üç izotopundan sadece ^{40}K kararsızdır. Yarı ömrü $1,28 \times 10^9$ yıldır. Doğal potasyum, toprakta yüksek miktarda bulunduğu için doğal gama radyasyon dozunun önemli bir kesimini oluşturur. Potasyum vücutta yaşamsal öneme sahip bir elementtir. Yetişkin bir insan için ortalama aktivitesi, kilogram olarak vücut ağırlığı başına 2 gramdır [48].

2.1.4. Radyum-226 (^{226}Ra)

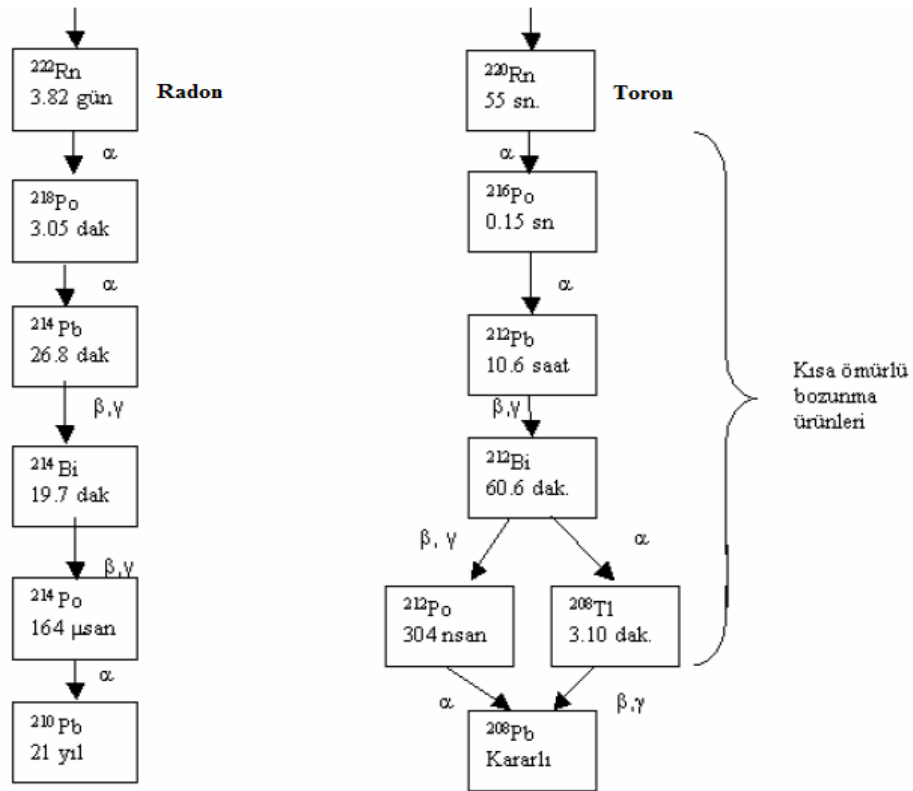
^{226}Ra , 1898 yılında Fransız fizikçiler Pierre Curie ve eşi Marie Curie tarafından bulunan, atom numarası 88, atom ağırlığı 226,05 olan bir elementtir. Bir α yayınlayıcısı olan radyumun yarı ömrü 1600 yıldır. Radyumun temel kaynağı uranyum ve toryumdur. Bu nedenle toprakta, kayalarda, yapı malzemelerinde, su ve gıdalarda bulunmakta ve oldukça geniş bir dağılım göstermektedir. Radyum ve ürünleri insanların dış ve iç ışınlanmalarına neden olan doğal kaynakların en önemlilerindedir. Radyum vücuda alındığında kemiklerde

birikerek omuriliği sürekli olarak ışınlatabilmektedir. Radyum, uzun yarı ömürlü olması nedeniyle, radon (^{222}Rn) oluşumunda üreteç görevi görmektedir [48].

2.1.5. Radon-222 (^{222}Rn)

Radon, 1900 yılında Friedrich Ernst Dorn tarafından keşfedilmiş ve havadaki varlığı, ilk olarak 1901 yılında Elsterve Geitel tarafından bulunmuştur. F.E.Dorn bugünkü adıyla radona parıldayan manasına gelen niton adını vermiştir. 1923 yılına kadar bu adla anılan elemente radyumdan sonra keşfedildiği için radon denilmiştir. Radon, periyodik tabloda asal gazlar (soygazlar) grubu denilen 8A grubunda, 6. periyotta bulunmaktadır ve son keşfedilen asal gazdır. Normal sıcaklık ve atmosfer basıncında gözle görülemeyen, renksiz, tatsız ve kokusuz bir gazdır [49]. Radonun erime noktası $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($202,15\text{ }^{\circ}\text{K}$, $-95,8\text{ }^{\circ}\text{F}$), kaynama noktası ise $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($211,35\text{ }^{\circ}\text{K}$, $-79,24\text{ }^{\circ}\text{F}$)'dir. Bütün dünyada yalnız 100 ton, toprakta ise ortalama 1 pCi/L civarında bulunmaktadır. Radon donma sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar soğutulursa, sıcaklık düşüşüyle orantılı bir şekilde sarılığı artan parlak bir görünüm almaktadır [50]. Radon gazı elektrik iletkenliği hiç olmayan ve ısı iletkenliği de $3,64 \times 10^{-5}\text{ W/cmK}$ gibi çok düşük bir değere sahip olan bir asal gazdır. Radonun atomik yarıçapı $1,34 \times 10^{-10}\text{ m}$ ve atomik kesitinin alanı $0,72 \times 10^{-24}\text{ cm}^2$ 'dir [49]. Havadan 7,5 kez, hidrojenen ise 100 kez daha ağırdır ve tek atomlu şekilde bulunur. Bu yüzden kağıt, deri, plastik, boya ve yapı malzemeleri gibi materyallere kolayca nüfuz eder. Elektron ilgisinin düşük ve iyonlaşma enerjisinin yüksek olması nedeniyle ^{222}Rn izotopu diğer elementlerle kolayca bağ yapamaz. Ancak elektron ilgisi yüksek olan bazı atomlarla etkileşip kararlı bileşikler yapabilir. Suda ve organik çözücülerde iyi çözünür, çözünürlüğü artan sıcaklıkla azalır; sudaki çözünürlüğü $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de sırasıyla 510, 220 ve $130\text{ cm}^3/\text{L}$ 'dir [51].

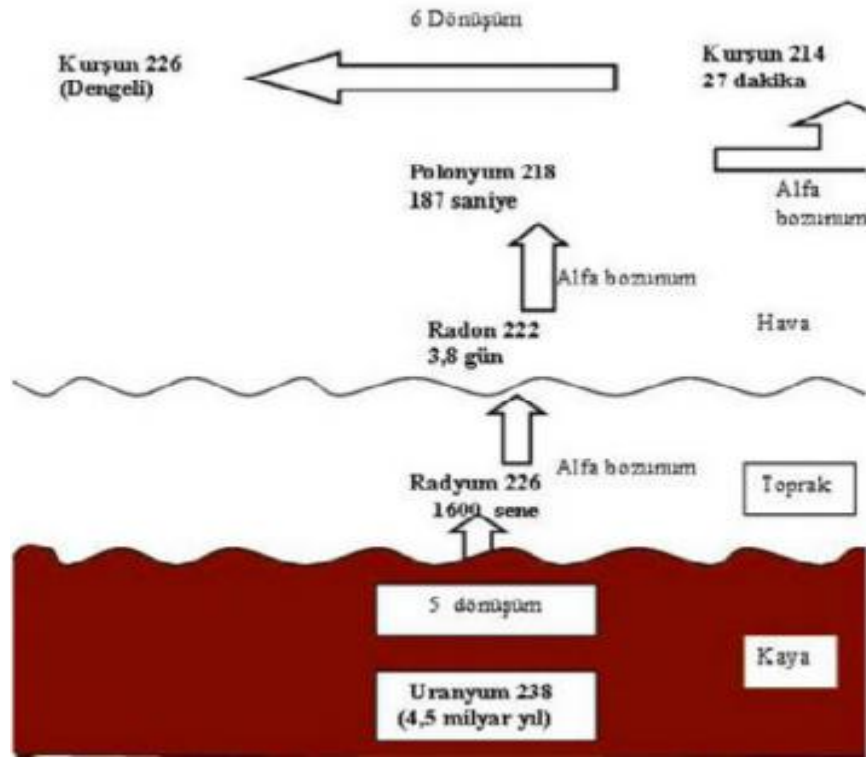
Radon elementinin çok çeşitli yarı ömürlere sahip 33 tane izotopu vardır. Bunlardan 3 tanesi doğal radyoaktif bozunum zincirleri içerisinde yer alır (^{219}Rn , ^{220}Rn ve ^{222}Rn). ^{222}Rn , radon elementinin en uzun yarı ömürlü izotopudur [52]. Uranyumun doğada en çok bulunan izotopu ve en ağır doğal radyoaktif element olan ^{238}U 'in bozunum zinciri içerisinde yer almaktadır. Radonun bozunması ile kısa ömürlü radon ürünleri olan ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po meydana gelir. Özellikle radon gazı bozunduğu zaman oluşan ^{218}Po atomları, iyonize halde, hava içindeki herhangi bir parçacığa tutunma eğiliminde olduğundan, ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po atomlarının pek çoğu oluştuklarında bir parçacığa tutunmuş haldedirler [53]. Diğer iki izotop ise, ^{232}Th ve ^{235}U serilerine ait ürünlerdir. Bu izotoplar sırasıyla 55,1 saniye ve 3,96 saniye yarı ömürlüdürler. ^{220}Rn (toron) ve ^{219}Rn (aktinon) kısa yarı ömürleri nedeniyle çok çabuk yok olacağından doğadaki radon radyasyonunun hemen hemen tamamı 3,82 gün yarı ömürlü ilk izotopun sonucudur. ^{222}Rn izotoplarının bozunma zinciri ve izotopların yarı ömürleri Şekil 2.1.'de verilmiştir [52].



Şekil 2.1. ^{220}Rn ve ^{222}Rn izotoplarının bozunma zincirleri [49].

2.2. Topraklarda Radon Yayılımı Hakkında Genel Bilgiler

Radon, özellikle inşaat yapı malzemesi olarak kullanılan taş, toprak, çimento ve kaynak sularında doğal olarak bulunabilmekte ve sürekli ortama serbest olarak yayılabilmektedir. Radyumun toprakta bozunmasıyla oluşan radon, kayaçlardaki kırıklardan ve toprak taneciklerinin arasından hava dolu gözeneklere kaçarak bu yolla atmosfere geçebilmektedir. Radon gazının atmosfere geçmesini kontrol altında tutan en önemli değişkenler; toprağın nem oranı, topraktaki gözenek büyüklüğü ve toprağın hava ve suyu geçirgenliğidir. Killi toprakların, kumlu ve çakıllı topraklara nazaran radon geçirgenliği daha azdır. Bunun yanı sıra, yapılan araştırmalar, metamorfik ve volkanik kayaçların radyoaktif madde içeriğinin tortul kayaçlardan fazla olduğunu göstermiştir. Uranyum yer kabuğunda 2 ppm ile 4 ppm arasında çok denebilecek miktarda bulunur. Genellikle, Tungsten, Arsenik, Molibden ve Berilyum ile beraber bulunmaktadır. Yüksek oranda silis içeren granit gibi volkanik kayaçlarda 6 ppm gibi daha yüksek yoğunluklarda bulunur. Silis miktarı az olan ama demir, magnezyum, alüminyum içeriği çok olan kayaçlar 1 ppm'den de az uranyum içerirler. Yerkabuğunun alkali içeriğinin fazla olduğu bölgelerde bazen uranyum miktarı 100 ppm bile olabilmektedir. Kayaçlarda bulunan bu uranyumun bozunması sonucunda zincirin bir parçası olan radyum difüzyona uğrayarak daha üst katmanlardaki toprağa karışır. Uzun ömürlü olan radyum da toprak içinde sürekli bozunup ^{222}Rn atomlarının toprak parçacıkları ve mineralleri arasında serbest kalmasını sağlar. Topraktaki ve havaya sızan radon gazı miktarı toprak özelliklerine ve basınca bağlıdır [54].



Şekil 2.2. Radon difüzyonunun şematik gösterimi [55].

Radonun değişik bölgelerde salınım bakımından farklılık gösterdiği bilinmektedir. Aynı yerleşim bölgesinde bile, zamana bağlı olarak değişim söz konusudur. Radon konsantrasyonları için coğrafi yerleşim önemlidir. Kutup bölgesi gibi radon çıkışını sağlayan toprağın azaldığı yerleşim bölgelerinde, radon konsantrasyonları düşüktür [53].

Toprakta radon salınımı üç temel yolla meydana gelir [52];

Yayıma (emanasyon): Radon atomu, radyumlu kayadan bir alfa parçacığıyla yayınlanır. Katıdan radon geçişi yayılma olarak bilinen bir işlemdir ve yayılma gücü, katıdan kaçan radon atomlarının sayısının katıdaki radyum bozunumuyla oluşan radon atomlarının sayısına oranı olarak tanımlanır. Bu nicelik, yayılma sabiti, kaçma oranı ve yayılma yüzdesi olarak bilinir. Malzemenin belli bir tipi için ölçülen bir değerdir ve kuvvetli bir şekilde test koşullarının fonksiyonudur. Bir malzemenin yayılma sabiti, yüksek radon konsantrasyonlarını tahmin etmede önemli bir faktördür [52].

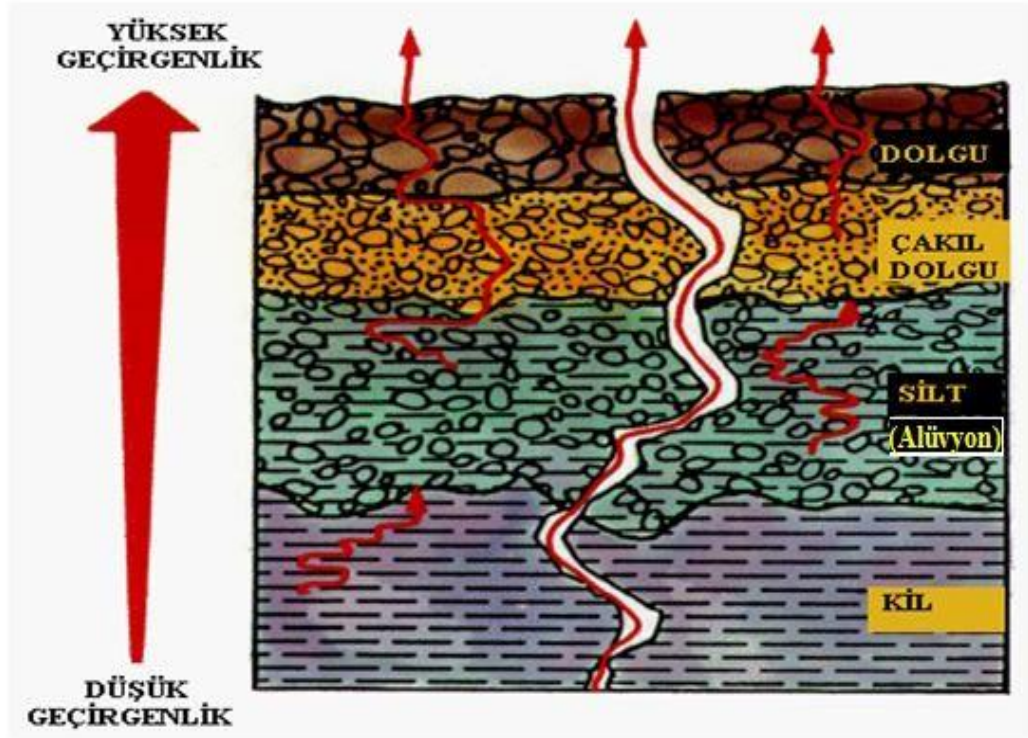
Tablo 2.4. Çeşitli ortamlar için radon difüzyon sabitleri [52]

Ortam	Ortalama Mesafe		Difüzyon Sabiti cm^2s^{-1}
	Rn-222 (cm)	Rn-220 (cm)	
Hava	220	2,85	10^{-1}
Toprak gözeneği	155	2,0	5×10^{-1}
Su	2,2	0,0285	10^{-5}
Doymuş toprak gözeneği	1,55	0,020	5×10^{-6}

Difüzyon: Gaz ya da sıvıya (moleküler difüzyon) radon geçişidir. Radon standart difüzyon kurallarına uyar, bu yüzden akı, konsantrasyon gradyenti ile orantılıdır. Çeşitli ortamlar için radon difüzyon sabitleri Tablo 2.4.'de verilmiştir [52].

Konveksiyon: Konveksiyon, meteorolojik şartlar ve tektonik aktivitenin neden olduğu basınç farklılıkları ile gerçekleşir. Tablo 2.4.'de farklı ortamlardaki radon izotoplarının ortalama difüzyon uzaklıkları verilmiştir [52].

Radon gaz olması sebebiyle kaya ve toprakta bulunan uranyum ve radyumdan daha fazla hareketliliğe sahiptir. Radon, toprak ve kayalardan kayalardaki açıklıklara ve kırıklara ve toprağın tanecikleri arasındaki gözenek boşluklarına kaçarak kolay bir şekilde ayrılır (Şekil 2.3.) [52].



Şekil 2.3. Topraktaki radon geçirgenliği [53].

Toprak boyunca radon hareketinin yönü ve hızı, gözenek boşluklarındaki mevcut su miktarına (toprak nem içeriği) ve topraktaki gözenek boşluğu yüzdesine (gözenekliliğe) bağlıdır. Radon, çamur gibi geçirgeniz topraklardan ziyade iri taneli kum ve çakıl gibi geçirgen topraklar boyunca daha kolay hareket eder. Toprak ya da kayadaki kırıklar, radonun daha çabuk hareket etmesine izin verir [52].

Kristal katılarda radon için difüzyon sabitleri son derece küçüktür ve radon, kristal boyutuna bakmaksızın herhangi bir uzaklığa erişmeden önce bozunacaktır. Gözenekli alanlardaki suyun varlığı radon göçünü azaltır. Radon suda, havadaki radondan daha yavaş hareket eder. Çünkü sudaki radon difüzyon sabiti, havadaki değerlerin yaklaşık üç katından daha küçüktür. Katılardaki radonun moleküler difüzyon geçişi, radonun kısa yarı ömrü nedeniyle sınırlıdır. Difüzyon ile göç, çakılda yaklaşık 5 m'den, doymun çamurda ya da kilde yaklaşık 2 cm'ye değişir ve 1 metreden daha büyük mesafelerde difüzyon büyük olasılıkla mümkün değildir. Su, havaya göre toprak gözenekleri ve kaya kırıkları boyunca daha yavaş

bir şekilde akma eğiliminde olduğu için radon, bozunmadan önce kuru topraklardan ziyade ıslak toprakta daha kısa mesafelere gider [52].

Bu nedenlerden dolayı, dağ yamaçları, kanyon ağzı ve kırılan ya da mağara içeren kayalar gibi kuru, yüksek bir şekilde geçirgen toprak ve kayalıklı bölgelerdeki binalar, yüksek seviyeli bina içi radon konsantrasyonuna sahip olabilirler. Topraktaki ya da kırıldaki havanın radon içeriği normal aralıkta (200-2000 pCi/L) olsa bile bu bölgelerin geçirgenliği, radonun bozunmadan hava ile birlikte daha büyük mesafelere taşınmasına izin verir ve böylece yüksek bina içi radonuna katkıda bulunur [52].

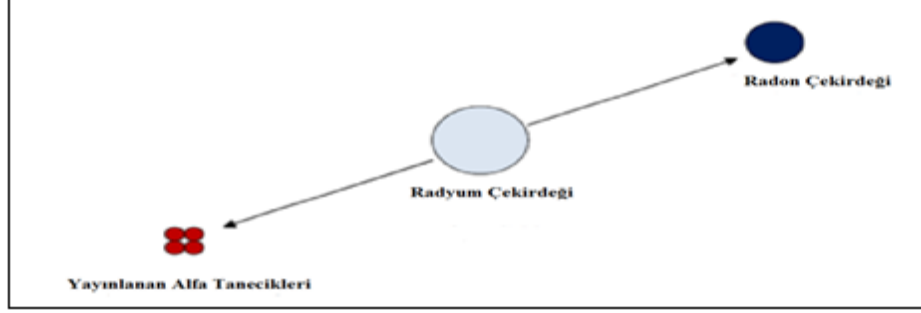
Topraktan radon salınımı [53];

- Topraktaki radyum konsantrasyonuna,
- Toprağın gözenekliliğine, geçirgenliğine ve nem içeriğine,
- Toprağın durumuna (kuruluk, suyla tıkanmış olma, donma, karla örtülü olma),
- Meteorolojik koşullara (toprak ve hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgar hızı, rüzgarın yönü),
- Bölgenin yüksekliğine bağlıdır.

2.2.1. Radon gazının yerkabuğundaki hareketi

Toprakta oluşan radon atomlarının tamamı, olduğu yerdeki toprak taneciğinin gözenek hacmi içerisine geçemez. Toprak taneciklerinden gözenek hacmine kaçabilen radon atomları belli bir orandadır. Bu orana emanasyon kesri ya da emanasyon gücü denilmektedir. Emanasyon kesri; doğrudan geri tepme, dolaylı olarak geri tepme ve difüzyon oranı olarak ifade edilen üç parametreden oluşmaktadır. Bu parametreler, geri tepmiş olan radon atomlarının menzillerine bağlıdır.

Bir radyum atomunun, alfa parçacığı yayarak radona bozunumu esnasında enerji açığa çıkar. Bu enerjinin büyük bir kısmı yayınlanan alfa parçacığına aktarılırken, geri kalan kısmı oluşmuş olan radon atomuna aktarılır ve ona hareket kabiliyeti kazandırır. Bu durum, bir silahtan çıkan merminin hareketine benzemektedir [54].



Şekil 2.4. Geri tepme olayı [56].

Açığa çıkan enerji tipik bir kimyasal bağ enerjisinin 10^4 - 10^5 katı civarındadır. Bu sayede geri tepen radon atomu, mineralin veya toprak taneciğinin yapısı içerisinde hareket edebilir ve 20-70 nm arasında bir menzile sahip olabilir. Bu hareket sırasında radon atomu toprak tanecikleri arasındaki gözenek hacmine geçebilir. Eğer gözenek hacmi içinde sıvı varsa, radon atomu sıvıda çözünür, difüzyon mekanizması sayesinde de gözenekler boyunca yer değiştirebilir. Gözeneklerin içerisindeki sıvı varlığı, emanasyon gücünün doğrudan geri tepme kesrini arttırmaktadır. Geri tepme enerjisine sahip bir radon atomu, komşu toprak taneciği ile olduğu tanecik arasındaki gözenek mesafesini geçebilirse, komşu taneciğin materyal yüzeyine nüfuz eder, burada soğrulur ve bu durum materyal yüzeyini eriterek, büyüklüğü geri tepen radonun enerjisiyle orantılı bir oyuğun oluşmasını sağlar. Erimiş olan oyuğun materyali soğumadan önce, geri tepmekte olan radon atomunun gözeneğe geri kaçma ihtimali bulunmaktadır. Bu duruma dolaylı geri tepme oranı denilmektedir [54].

Oyuğun derinliği, materyal içinde soğrulan geri tepme enerjisinin oranına bağlıdır. 1971 yılında oyuğun çapının yaklaşık 1 nm ve derinliğinin 10 nm olduğu tespit edilmiştir. Pek çok doğal madde içindeki emanasyon gücünün, radon izotoplarının madde boyunca yaptıkları difüzyondan dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir. Difüzyon oranı, geri tepme mesafesine bir tek tanecikle başlayıp, aynı tanecikle bu mesafeyi bitiren radon atomlarınca oluşturulmaktadır. Bu olayın ardından radon atomları moleküler difüzyon mekanizması sayesinde gözeneklere göç eder. Toprak zerreciğinin boyutu ve geometrisi, ortamdaki nem ve sıcaklık değerleri gibi etmenler emanasyon gücüne etki eden temel parametrelerdir. Zerrecik boyutu ve şekli radyumun bozunmasıyla oluşan radon atomlarının gözenek hacmi içine girebilecek durumda olanların oranının belirlenmesinde kullanılır. Toprak zerreciklerinin yüzey alanlarının hacimlerine oranı (spesifik yüzey alanı) zerreciklerin boyutuyla ters orantılıdır. Yani radonun emanasyon gücü spesifik yüzey alanı arttıkça doğrusal olarak artar. Yapı malzemelerinden ve topraktan yayılan radonun emanasyon gücüne nemin etkisi oldukça fazladır. Kuru kaynak materyallerinin emanasyon katsayısının nemli kaynaklara göre daha düşük olduğu bilinmektedir. Nem içerisinde bulunan su molekülleri radon atomunun geri tepme uzaklığını kısaltır. Bu durum, geri tepen radonun menziline havadakine oranla oldukça azaltır. Bir kısmı su ile dolu gözenekleri olan toprak zerreciğindeki radon atomunun, geri tepme mesafesini gözenekte bitirebilme ihtimali, kuru tanecikte bulunan radon atomuna göre daha fazladır. Bir kısmı neme doymuş gözeneklerde bulunan radon atomu daha hızlı şekilde gözenek içindeki havaya karışabilir. Nem, toprak zerreciğinin boyutu ve geometrisi gibi sıcaklık da emanasyon gücünü etkileyen bir parametredir. Stranden ve arkadaşlarının 1984 yılında yaptıkları bir çalışmada, toprak numunesindeki radonun gaz hale geçme hızının sıcaklığın 5 °C'den 50 °C'ye değiştiğinde %55 arttığını gözlemlemiş ve sıcaklık arttıkça gaz hale geçen radon miktarındaki artışın, radonun toprak zerreciklerindeki fiziksel soğrulmasının azalışından olabileceğini ifade etmişlerdir [54].

2.2.2. Radon gazının göçü

Radyum atomlarının bozunmasıyla oluşarak, toprak taneciklerinin gözenek hacmine geçebilen radon ve izotoplarının topraktan atmosfere doğru göçü bazı önemli parametrelerin değişimine bağlıdır. İzotopların yarı ömürleri, toprak taneciklerinin gözeneklerinde mevcut olan akışkanların (su, hava, diğer gazlar) içerikleri, izotoplara ait difüzyon katsayıları, atmosfer basıncı, izotopların gözenek hacmindeki farklı akışkan fazları için dağılımı, radon gazının olduğu toprak zerreciğinden atmosfere olan göçünde öne çıkan bazı etmenlerdir [54].

2.2.3. Radon gazının göçünü sağlayan mekanizmalar

Radonun topraktaki göçünde difüzyon mekanizması çok önemli bir rol oynar. Radon atomlarının toprak tanecikleri arasındaki gözenek hacmini dolduran sıvıya göre hareketleri moleküler difüzyon mekanizması olarak ifade edilir. Gözenekte bulunan sıvının gözenek ortamında hareket ederek radon ve izotoplarını taşıması olayı ise transport mekanizması olarak bilinir. Hem moleküler difüzyon hem de transport mekanizmaları radon gazının topraktaki göçünde aynı anda etkili olabilir. Toprak taneciklerinin gözenek hacmi içerisinde bir akışkanın varlığı, radon izotoplarının absorblanmasını engelleyebilir ve emanasyon sürecini hızlandırabilir. Radyumun bozunmasıyla açığa çıkan radon atomu geri tepme enerjisini kaybederse, ortamda bulunan akışkan tarafından absorbe olur ve moleküler difüzyon katsayısı düşer. Bu durum radon atomlarının atmosfere göç olayını önler. Radon atomlarının gözenek hacmindeki akışkana göre hareketini açıklayan difüzyon teorisi, bu hareketi bozunma sabiti ile sınırlandırmaktadır. Radon gazının ortalama ömrü 5,5 gün olup porozitesi yüksek topraklarda difüzyon mesafesi yaklaşık 1,5 m'dir. Difüzyon mekanizmasıyla pek çok kez taşınan radon atomlarının topraktaki menzilleri 10-15 m civarındadır. Bu nedenle 100 m ve daha derinden gelen radon atomlarının hareketlerinin açıklanması difüzyon teorisi ile değil radonun transportuyla yapılabilmektedir [54].

BÖLÜM 3. MATERYAL ve METOD

3.1. Çalışma Alanı ve Jeolojisi

Sakarya, 4817 km²'lik yüzey alanı ve 953181 kişilik nüfusuyla Türkiye'nin en büyük şehirlerinden biridir [57]. Şehir tektonik olarak aktif olan Kuzey Anadolu Fay Hattı ve onun alt fay kolları üzerinde bulunmaktadır. Bu nedenle, araştırma bölgesi jeolojik açıdan önemlidir [58].

Sakarya ilinin yüzey şekilleri sade bir özellik gösterir. Bunları üç kısımda incelemek mümkündür; a) Kuzeydeki tepelik alan, b) Ortada Adapazarı Ovası veya Akova diye anılan düzlük, c) Güneydeki engebeli topraklar [59].

Akova, Sakarya'nın en büyük ovasıdır. Akova "Adapazarı Ovası" olarak da adlandırılmaktadır. Aşağı Sakarya Vadisi'nde Sapanca Gölü ile Adapazarı'nın doğusunda yer alır. Doğuda Keremali Dağı'nın eteklerine dek uzanan Akova, Marmara Bölgesi'nin en büyük ovalarından biridir. Sakarya Irmağı'nın taşıdığı kalın bir alüvyon tabakasıyla kaplı olduğundan çok verimlidir. Ovayı güneyden kuzeye doğru akan Sakarya Irmağı ve doğudan kuzeye doğru akan Mudurnu Çayı sulamaktadır [59].

Aşağı Sakarya Vadisi'nin Akova'dan sonra ikinci büyük tarım alanı, Pamukova'dır. İl topraklarında hızla genişleyen Sakarya Vadisi'nde alüvyonların birikmesiyle oluşmuş verimli bir ovadır. Pamukova, Adapazarı Ovası'na göre daha yüksek olduğundan, Sakarya Irmağı, burada daha hızlı akar. Irmak derinden aktığı için yatağı değişmemektedir. Taban suyu Akova'ya göre daha düşüktür [59].

Akova'nın kuzeyinde yer alan Söğütlü Ovası ilin en çukur tarım alanıdır. Taban suyunun yer yer yüzeye çıkması ve Sakarya Nehri'nin taşkınları nedeniyle ovanın bazı kısımları sazlık ve bataklık durumundadır. Söğütlü Ovası'nda toprakların tarıma elverişli duruma getirilmesi amacıyla yoğun drenaj çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarla ovanın kimi yerinde taban suyunun düzeyi düşürülmüş, bataklıkların bir bölümü kurutulmuştur. Sakarya ilinde bu büyük ovalardan başka Sakarya Vadisi ile bu vadinin tabanlarında yer yer küçüklü büyüklü tarım alanları vardır. Bu alanlar alüvyol toprakla kaplı olduklarından verimleri oldukça yüksektir [59].

Sakarya'da yeryüzü şekillerinin dağılımında platolar önemli bir yer kaplar. İl alanının %44,3'ünü oluşturan platolar yer yer ormanlarla kaplıdır. İlin en önemli platosu batıdan il topraklarına girerek Sakarya vadisine kadar sokulan Kocaeli platosudur. Sakarya'da Kocaeli platosu dışında kalan platolar genellikle Samanlı dağlarıyla Çamdağı kütesinin Hendek, Akyazı, Sapanca'ya doğru uzanan kesimlerinde dizilmiş durumdadır [59].

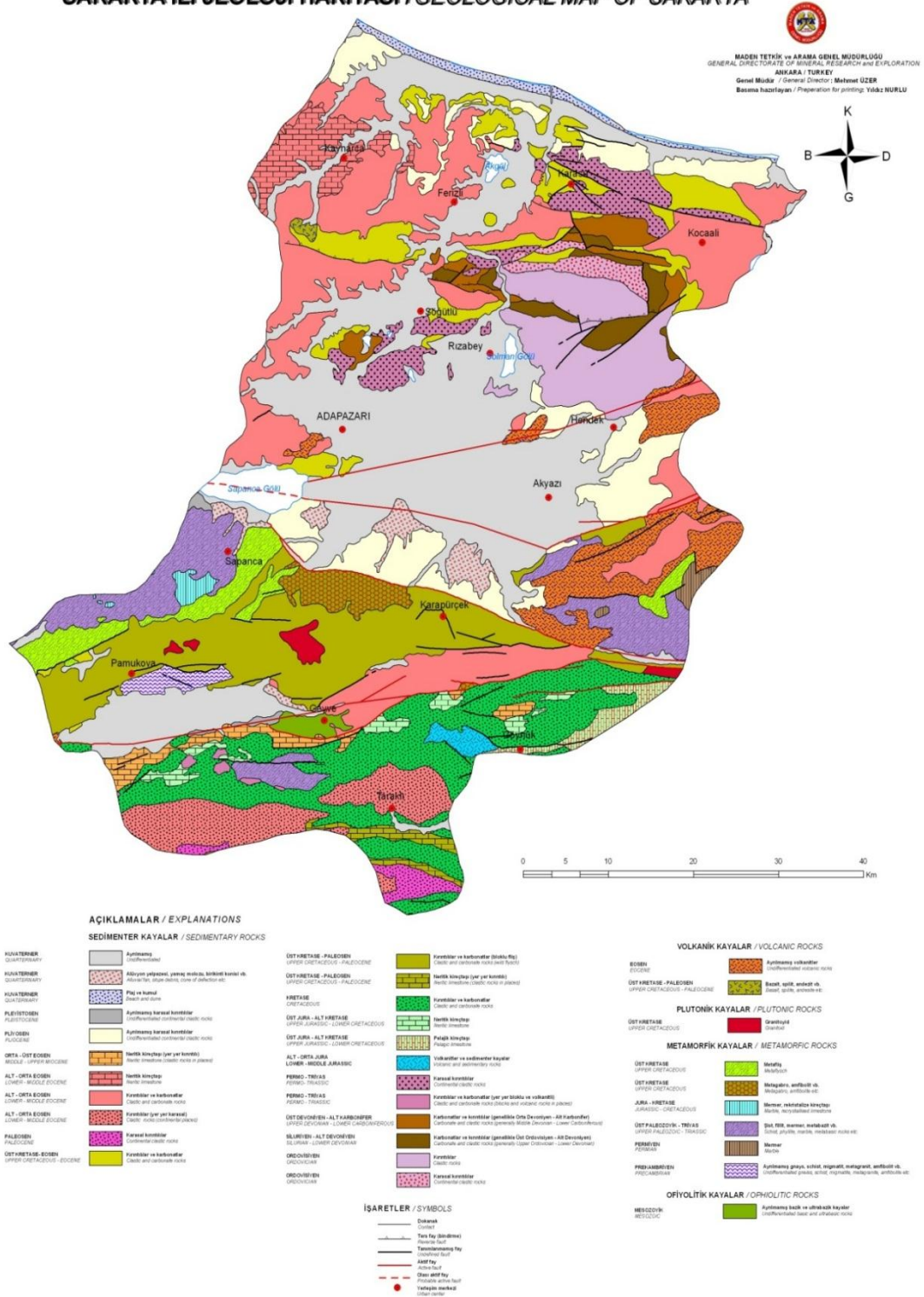
Sakarya ili toprakları Kuzey Anadolu fay sistemi üzerinde, yer kabuğunun yıkıcı depremlerle sarsıldığı bir kuşakta yer alır. Güneydeki dağlık birimin çekirdeğini I. zamanın yaşlı billurlu şistleri ve onları örten Kretase oluşukları oluşturur. Yer yer andezit bileşiminde volkanik kayalar görülür. Faylarla sınırlanmış bir çöküntü alanı olan Adapazarı ovasının çevresinde Pliosen çökelleri ve orta kesiminde kalınlığı 100 m'yi aşan genç alüvyonlar yer alır. Kuzeydeki alçak platoların yapısında en geniş yeri I. zamanın kayaları ile Eosen filisleri kaplar [58].

Sakarya ili Hersiniyen ve Alp orojenezlerinin etkisi altında kalmıştır. Silüriyen ve Devoniyen yaşlı sedimantasyonla beraber ilk kıvrılma hareketleri Hersiniyen orojenezi etkisi altında olmuştur. Birimler kıvrımlanmaya uğramış ve genel olarak eksen dağılım yönleri kuzey istikametinde gelişmiştir. Devrilme ve yatımlar güneye doğrudur. Güney sahada metamorfizma etkisi kendini göstermiş, kuzey bölgede ise metamorfizma etkileri yok denecek kadar az olmuştur. Bölgede Alp Orojenizine bağlı hareketlerin Kuaternere kadar devam ettiği görülmektedir. Bu

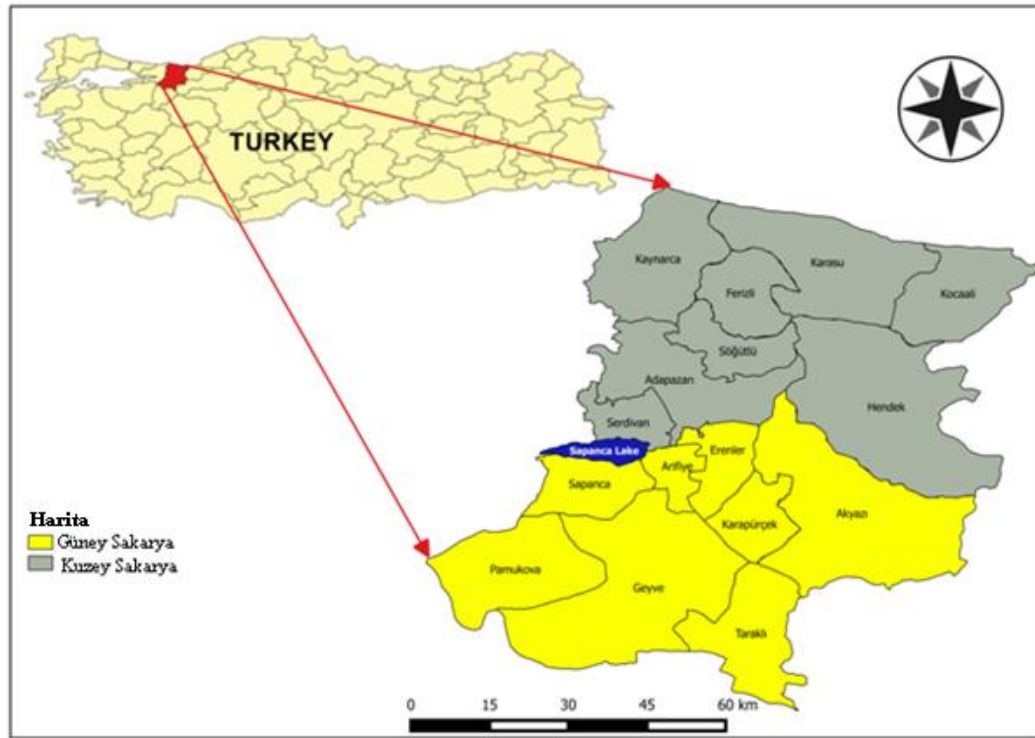
zaman zarfında çökeller tektonik hareketler neticesinde kıvrımlanmaya uğramışlardır. Eosen ve Neojende bölge, tektonik olarak oldukça aktif bir dönem geçirmiştir. Etkin tektonizma neticesinde, Adapazarı Ovası çökmeye uğramış ve Kuzey Anadolu Fay Sistemi bu zamanda ortaya çıkmıştır. Bu fay zonuna paralel irili ufaklı birçok fay oluşmuştur. Bu faylar incelendiğinde güney blokların çöktüğü veya kuzey blokların yükseldiği görülmektedir. Ferizli Mağara Köyü uzanımında olan fay hattındaki fayların, Paleozoik yaşlı birimlerin üzerine bindirdiği görülmektedir. Kuzey Anadolu Fay Zonu, oluşumundan itibaren sürekli aktivitesini korumuş ve Adapazarı ovasının çökmesine sebep olmuştur. Bu özelliğinden dolayı ova devamlı çöken sübsidans havza ortamı haline gelmiştir. Şehir, tamamen nehir çökelleri üzerindedir. İzmit körfezinden itibaren Adapazarı'na ve buradan da Hendek'e kadar uzanan bir çöküntü sahası içinde bulunmaktadır. Bu ova Sakarya Irmağı, Çark Suyu, Mudurnu Çayı ve Uludere gibi suların getirip biriktirdiği kalın alüvyondan ibarettir. Adapazarı'nın güneyinde doğudan-batıya doğru sıralanan tepeleri Kretase filisleri teşkil etmektedir. Batıda ise, bu formasyonlar üzerine Eosen yaşlı kireç taşlarının geldiği görülür. Ovanın kuzey kenarında dik falezlerle yükselen tepeler, Devoniyen'e ait kırmızı renkli killi şist ve kum taşlarından oluşmuştur. Daha yukarılarda bu tabakalar Üst Kretase yaşlı kireç taşları ile örtülüdür. Ovanın güney ve kuzeyinde aynı düzeydeki tabakaların ve jeolojik yapının başka başka olması Adapazarı'nın bir tektonik çöküntü (graben) içerisinde bulunduğunu ve kuzey sınırını teşkil eden dik falezlerde doğu-batı doğrultusunda bir dislokasyon hattına karşılık geldiğini göstermektedir. Bu fay çizgisi Taşlı geçit ile Çingene bayırı arasında açıkça görülür. Alüvyon içinde yeraltı suyu çok yüksek seviyede, bazı kısımlarda ise, bataklık durumundadır. I. derecede tehlikeli deprem bölgesindedir. Kuzey Anadolu Deprem Hattı üzerindedir. Zeminin, genç nehir çökellerinden ibaret olması ve yeraltı suyunun da yüksekte bulunması nedeniyle deprem şiddetini arttırıcı rol oynayacağı bilinmelidir. Tarihi depremlerden etkilenmiş bulunan Adapazarı, son yıllarda şiddetli depremler geçirmiştir [58].

Toprak yapısı bölgenin genelinde kil ve kum içerirken, yeraltı kaya yoğunluğu çok yaygın değildir. Sakarya ili jeoloji ve ilçeleri haritaları sırasıyla Şekil 3.1. ve 3.2.'de verilmiştir [60]. Çalışma alanı toplamda 3022,6 km²'lik bir alandır ve çalışma bölgesi Kuzey ve Güney Sakarya bölgelerine ayrılmıştır. Kuzey Sakarya'da Söğütü, Ferizli, Kaynarca, Karasu, Kocaali, Hendek, Serdivan ve Adapazarı ilçeleri, Güney Sakarya'da ise Sapanca, Arifiye, Erenler, Pamukova, Geyve, Karapürçek, Akyazı ve Taraklı ilçeleri bulunmaktadır. Kuzey Sakarya ilçelerinden 89 adet toprak örneği, Güney Sakarya'dan ise 87 adet toprak örneği alınmıştır. Toprak örneklerinin alındığı noktaların koordinatları ve ilçelere göre dağılımları Ek A., Ek B., Şekil 3.13., Şekil 3.14. ve Şekil 3.15.'te verilmiştir.

SAKARYA İLİ JEOLJİ HARİTASI / GEOLOGICAL MAP OF SAKARYA



Şekil 3.1. Sakarya ili jeoloji haritası [60].



Şekil 3.2. Sakarya ili ve ilçeleri haritası.

3.2. Toprak Örneklerindeki Doğal Radyonüklid Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntem

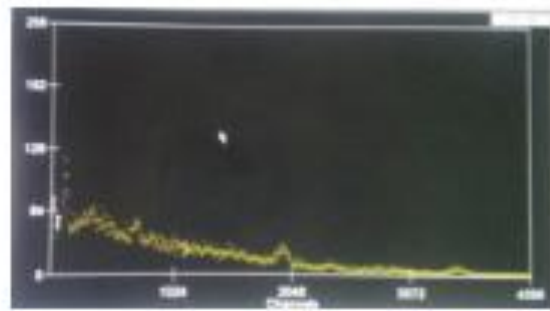
3.2.1. Gama spektrometresi metodu ve NaI(Tl) dedektörü

Daha önce de belirttiğimiz gibi canlılar, doğal ve yapay kaynaklar sebebiyle radyasyona maruz kalmaktadır. Maruz kalınan çevresel kaynaklı radyasyonun hangi maddelerden kaynaklandığını bulmak ve alınan doz miktarını hesaplamak son derece önemlidir. Diğer bir deyişle; çevredeki maddelerin radyoaktif olup olmadığını belirlemek, radyoaktif ise hangi elementten kaynaklandığını ve aktivitesinin ne olduğunu bulmak nükleer fiziğin önemli bir konusudur. Bu tip bir analiz, gama spektrometre sistemi kullanılarak yapılabilir [61].

Gama spektrometresi, çevre örneklerinin analizinde yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. En yaygın olarak kullanılanları germanyum ve silisyumdan yapılmış olanlardır ama selenyum gibi elementler, bakır oksit, galyum arsenik, indiyum fosfor ve kurşun sülfür gibi bileşikler de sıklıkla kullanılır. Bu tez çalışmamızda

toprak örneklerinin gama spektrometrik analizleri, talyum katkılı sodyum iyodür (NaI(Tl)) sintilasyon dedektörlü gama spektrometresi sistemi kullanılarak yapılmıştır.

Günümüzde en fazla kullanılan sintilatör NaI(Tl)'dür. NaI(Tl)'de kullanılan iyotun atom numarası büyük olduğundan, gama ışınlarının dedeksiyonunda yüksek verim sağlanır. Saf NaI kristaline 10^{-3} mol kadar talyum, aktivatör olarak ilave edilir. Bu yapı NaI(Tl) kristali olarak adlandırılır. Bu sintilatörlerin en iyi çözünürlüğü 3×3 inch boyutlarında bir kristal ile ^{137}Cs radyoaktif kaynağından alınan 662 keV enerjili gama radyasyonu için %7,5 ile %8,5 aralığında değişir. Bu kristaldeki ışık azalma sabiti, yaklaşık 0,25 μs civarındadır. Aynı zamanda tipik bir yüke duyarlı ön yükselteçten 0,5 s civarında yükselme zamanına sahip çıkış pulsu elde edilir. Bu yüzden NaI dedektörleri yüksek aktivite içeren ölçümler için plastik dedektörler kadar verimli değildir. Çünkü bu tür ölçümler kısa çözümleme zamanı gerektirir [62]. Higroskopik (su moleküllerini difüze edebilen) olduğu için açık havaya maruz bırakılırsa su soğurarak bozulur ve bu nedenle bir kılıf içerisinde kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sayım hızları için de uygun değildir [63].



Şekil 3.3. Gama spektrometre sistemi [63].

NaI(Tl)'ün en dikkate değer özelliği, onun mükemmel parıltı vermesidir. Rutin gama ışını spektroskopisi için standart sintilasyon materyalleri gibi kabul edilir. Kristal, bir dereceye kadar kırılmandır ve kolayca mekanik veya termal şok ile zarar görebilir. NaI(Tl)'de sintilasyon bozulma zamanı, bir dereceye kadar yüksek sıcaklıklarda daha hızlı tepki vermesi ile sıcaklığın bir fonksiyonu şeklindedir.

NaI(Tl) kristalinin avantajları,

- Yoğunluğu $3,67 \text{ gcm}^{-3}$, katkı maddesi olan iyodun atom ağırlığı 53 olup; gama ve x-ışınlarını iyi soğurur.
- Yaklaşık 30 eV enerji soğurmasında bir görünür ışık fotonu salar.

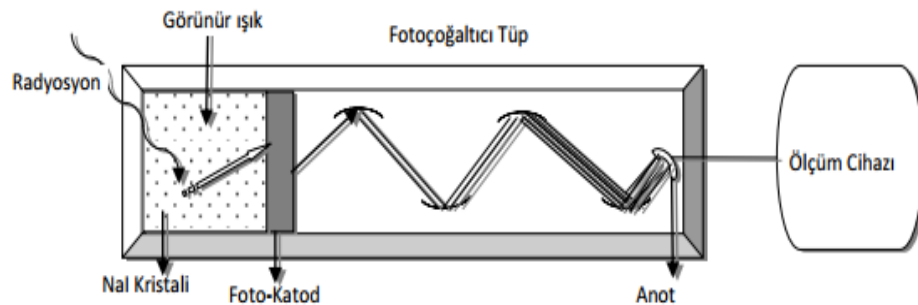
- Kendi içinde soğurmayla (self-absorbsiyonla) sebep olunan sintilasyon kaybını en aza indirir.
- Kristal içinde soğurduğu radyasyon enerjisiyle orantılı sintilasyon çıkarır.

Bu avantajlara karşılık NaI(Tl) kristalinin dezavantajları,

- Mekanik ve termal darbelere karşı dayanıksız olup kolayca kırılabilir.
- NaI(Tl) kristali hidroskopik olup, nemli ve rutubetli ortamlarda kaldığı sürece kristal içinde sarı lekeler oluşur ki bu da kristalin verimini azaltır [64].

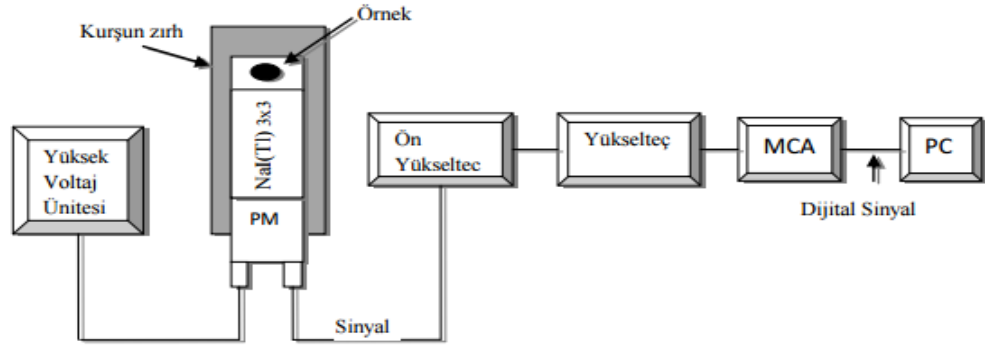
Gama spektrometresinin bazı üstünlükleri şöyle özetlenebilir:

1. Ekonomiktir, aynı örnekte farklı radyoaktif çekirdekler ayrı ayrı ve aynı anda analiz edilebilir.
2. Malzeme ve zaman kaybına sebep olan kimyasal ayırma işlemleri gerektirmediğinden hızlıdır.
3. Ölçümlerdeki yüksek kararlılık, bilgi işlemedeki doğruluk ve analiz edilen bilgilerin güvenilirlik düzeyleri yüksektir.
4. Düşük tayin sınırı sebebiyle özellikle çevre örnekleri analizinde kullanılırlar [62].



Şekil 3.4. NaI(Tl) dedektöründe radyasyon ölçümünün şematik gösterimi [62].

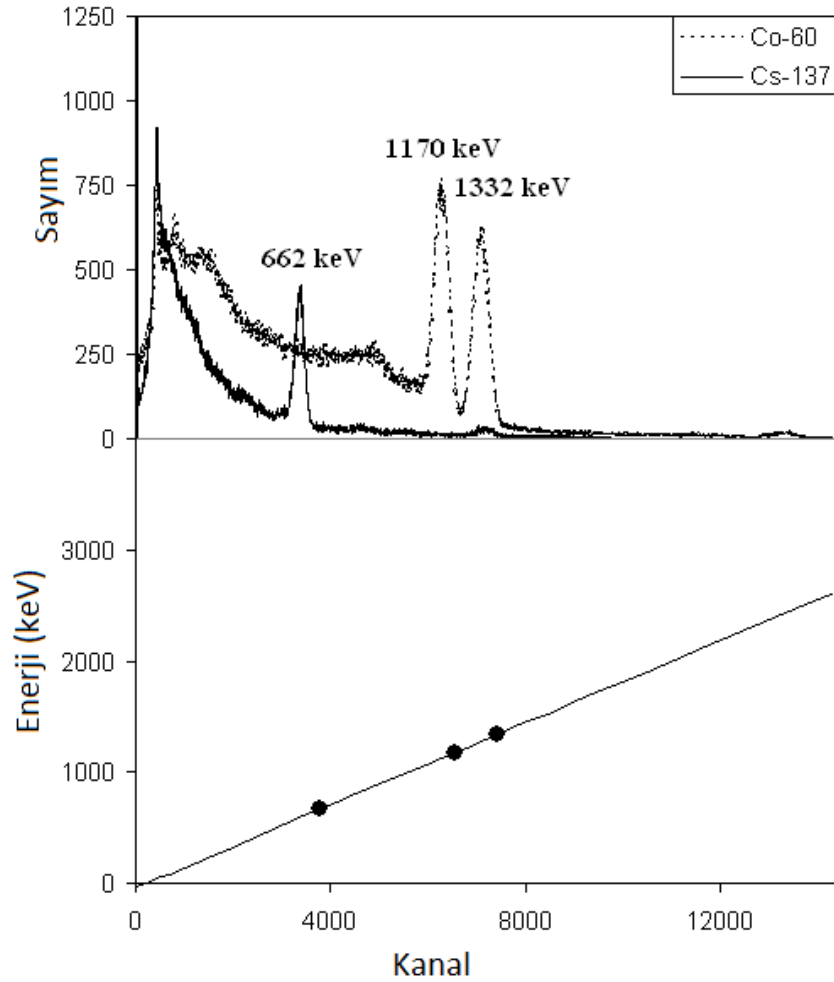
Bir NaI(Tl) dedektörlü gama spektrometre sistemi, Yüksek voltaj ünitesi (HV), ön yükselteç, yükselteç, çok kanallı analizör (MCA) ve bilgisayar (PC)'dan oluşur.



Şekil 3.5. Gama spektrometre sisteminin elektronik üniteleri [62].

Güç kaynağı (HV), dedektörün çalışması için gerekli olan gerilimi sağlar. Ön yükselteç (Preamplifikatör), dedektörden gelen göreceli olarak küçük sinyali büyütme, dedektör ve sonraki bileşenler arasında direnç seviyesini ayarlamak, sinyal şeklini ayarlamak ve biçimlendirmek amacıyla kullanılır. Yükselteç (Amplifikatör), önyükselteçten gelen sinyallerin analizini yapabilmek için sinyalleri yükseltir ve enerji ayrılmasını sağlayacak şekillendirmeyi yapar. Yükselticinin çıkış sinyalleri ise çok kanallı analizör (MCA) sistemi ile analiz edilir. Burada her sinyal dijital hale çevrilir, genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her kanal belirli bir enerjiye karşılık gelerek sayım süresince biriktirilen sinyallerle pikler elde edilir. Çok kanallı analizörde gelen sinyallerin birikmesiyle oluşan pikler de, bilgisayar ekranında spektrum olarak görüntülenir [62].

Gama spektroskopisi cihazında enerji kalibrasyonu, ölçüm cihazının verdiği sinyallerin enerjileri bilinen radyoaktif kaynakların pikleri yardımıyla cihaza tanıtılması işlemidir. Kalibrasyon işleminde kullanılan kaynakların spektrumunda oluşturduğu piklerin tepe noktalarına göre, o enerjideki piklerin hangi kanallarda olduğu tespit edilmektedir [62].



Şekil 3.6. Gama spektrometresinin enerji kalibrasyonu [62].

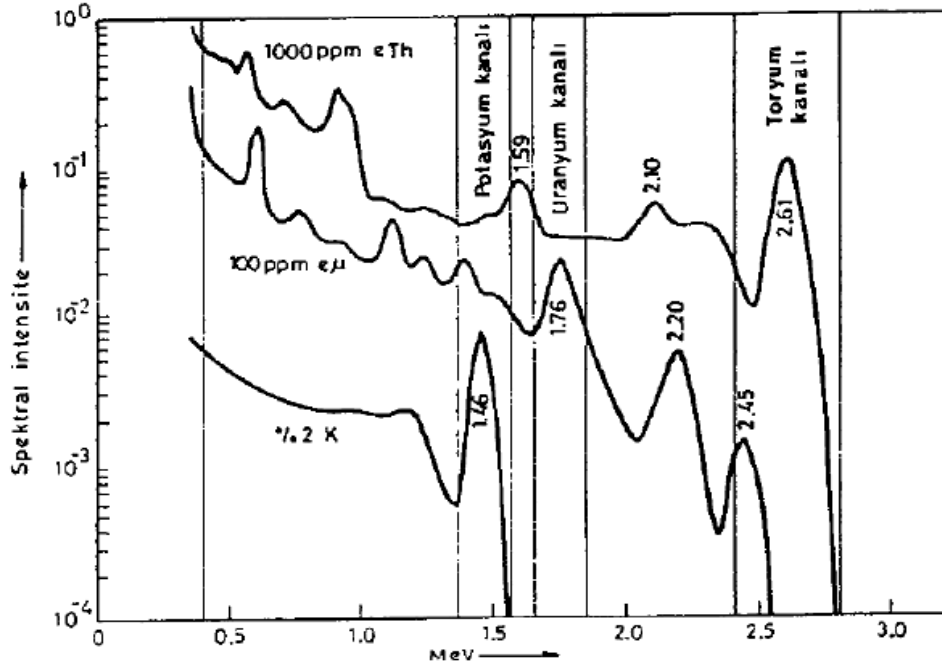
3.2.2. NaI(Tl) dedektörü ile ölçümlerin yapılışı

Herhangi bir örnekteki radyoaktif elementlerin yayımladığı gama ışınlarını enerjilerine ayırarak algılama esasına dayanan gama spektroskopisi, radyonüklit kimliklerinin belirlenmesinde ve kantitatif tayinde birçok analitik ve nükleer tekniğe tercih edilerek kullanılan çok yönlü, basit, hızlı ve pratik bir radyometrik tekniktir. Radyometrik tekniklerin bütün avantajlarına sahip olan bu sintilasyon, gama spektroskopisiyle çevresel materyallerin U ve Th içeriğinin belirlenmesinde kullanılırken, bu çalışmalar her iki radyoaktif serinin gama ışını yayıcı ürün nüklitleri üzerine kurulmuştur. Çünkü ^{238}U ve ^{232}Th 'nin gama spektrometrik ölçümlerde doğrudan dedekte edilmesini sağlayacak kendilerine ait karakteristik gamaları yoktur, ancak bozunum zincirlerindeki birçok ürün gama vericidir.

^{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. Radyoaktif denge kısaca; ürün çekirdeğin yarı ömrünün ana çekirdeğe göre çok kısa olduğu durumda, belli bir süre sonra ana ve ürün çekirdeklerin aktivitelerinin birbirine eşit olmasıdır. Ürün aktivitesi kullanılarak kantitatif analiz yapılan bu yöntemde bulunan U ve Th konsantrasyonları, eşdeğer uranyum (eU) ve eşdeğer toryum (eTh) olarak ifade edilir. Ölçümlerde ^{40}K 'ın kendi karakteristik gaması (1460,75 keV) kullanıldığından bulunan %K konsantrasyonu doğrudan potasyum içeriğini vermektedir.

Herhangi bir jeolojik örnek matrisi içinde, genelde U, Th ve K radyoelementleri değişik konsantrasyonlarda ve bir arada bulunurlar. NaI(Tl) sintilasyon dedektörlerinin sınırlı ayırma gücü nedeniyle, bu primordial (Dünya'nın oluşumundan bu yana var olan) radyonüklitler için seçilen gama enerjileri (2,6 MeV, 1,76 MeV, 1,46 MeV), sintilasyon gama spektroskopisiyle yapılan ölçümlerdeki konsantrasyon hesabında doğrudan kullanılamazlar. Böyle bir örneğin sintilasyon gama spektrumunda, bu radyonüklitlerin birbirlerine olan katkılarının uygun faktörlerle çıkartılması gerekmektedir.

Potasyum spektrumu, tek enerjili bir gama kaynağına karşı NaI(Tl) detektörünün tipik bir cevabıdır. ^{40}K pikinin enerjisi 1,461 MeV'dir ve alçak enerji süreklilik bölgesi 1,461 MeV gama ışınının Compton uzantısıdır. Uranyum spektrumu, çok sayıda ürün çekirdekten gelen birçok gama ışını içerir. Uranyum tayinlerinde intensitesi (yoğunluğu) yüksek ve girişim etkilerinden uzak olması nedeni ile ^{214}Bi 'den gelen 1,76 MeV enerjili gama piki kullanılır. Toryum spektrumu da ürün nüklitlerinin bozunmasıyla oluşan birçok gama ışını pikine sahiptir. Bunlardan en önemlisi yüksek intensitesi ve girişimlerden uzak olması nedeni ile ^{208}Tl 'dir ve bu pik, örnek içindeki Th konsantrasyonunun kantitatif tayininde kullanılır. Çevresel materyallerde U, Th ve K tayini yapmak için spektrumlarda yukarıda sözü edilen gama enerjilerine karşılık gelen enerji aralıkları (kanallar) belirlenir (Şekil 3.7.) [65].



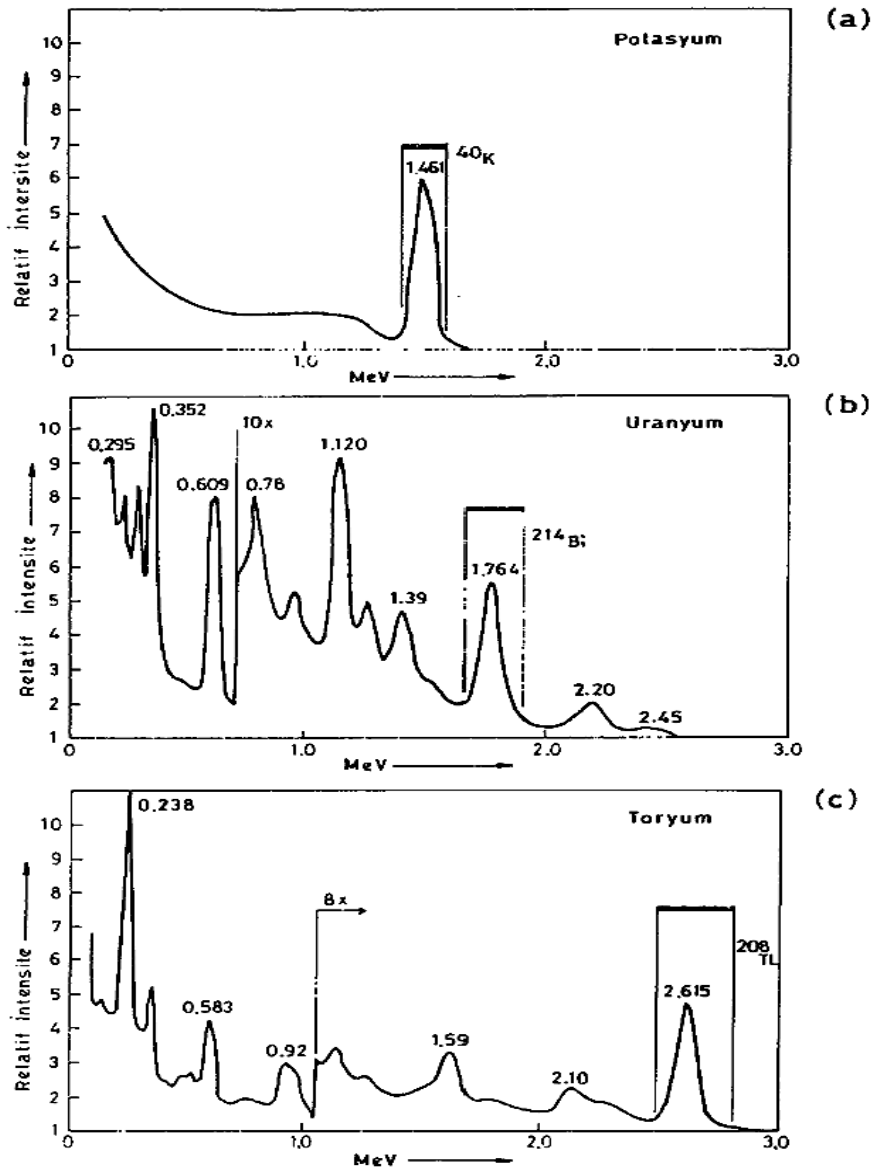
Şekil 3.7. Diğ er kanallardan U, Th ve K kanallarına gelen katkı lar [65].

Potasyum kanalı; potasyum kanallarındaki sayımların çoğ u art-ortamdan kaynaklanmaktadır. Sistemin bulunduğ u odadaki ortamdan potasyum kanalına gelen katkı lar %65 dolayındadır. Toryum ve uranyumdan gelen katkı lar ise %15-20 arasındadır. Bu kanallardaki sayımlar doğ rudan konsantrasyon hesabında kullanılmaz. Uranyum, toryum ve potasyum konsantrasyonlarını saptamak için, seçilen kanallardaki katkı ları uygun faktörlerle çıkarmak gerekir. Bu katkı oranlarını geometriye ve spektrometrenin çeşitli ayarlarına bağı lı olarak veren faktörlere “Sıyırma (Stripping) oranları” denir. Net sayımlardan %K, ppm eU, ppm eTh olarak konsantrasyona geçmeyi sağ layan faktörlere de “Duyarlılık faktörleri” denir (Şekil 3.8. (a)).

Uranyum kanalı; spektrumda uranyum için seçilen kanallara toryumdan ihmal edilemeyecek katkı lar gelir. Uranyumu saptamakta kullanılan ^{214}Bi ’ün 1,76 MeV gama piki, toryum serisinden ^{208}Tl ’in 2,61 MeV enerjili gamasınının 2,10 MeV tek kaçak piki ve 1,59 MeV çift kaçak piki arasına düş er. Bunlardan baş ka toryum serisinde ^{228}Ac ’in 1,588 MeV enerjili gaması da uranyum kanalındaki sayımlara katkı da bulunur (Şekil 3.8. (b)).

Toryum kanalı; toryum için seçilen kanallardaki sayıların %86'sı toryumdan, %2'si uranyumdan, ($^{214}\text{Bi} \rightarrow 2,42 \text{ MeV}$) geri kalanı da art-ortamdan gelmektedir. Bu yüzden toryum kanallarındaki sayımlar, art-ortam düzeltilmesi yapılarak doğrudan Th konsantrasyonu hesabında kullanılmaktadır (Şekil 3.8. (c)) [66].

Bu doğrultuda, seçilen enerji aralığına (kanallara) düşen net sayımı, dolayısı ile örnek konsantrasyonunu hesaplamak için o enerji aralığına diğer radyoelementlerden gelen gama ışınlarının etkisinin çıkarılması gerekir. Bu katkı oranlarını geometriye ve spektrometrenin çeşitli ayarlarına bağlı olarak veren Sıyırma (Stripping) Oranları ve net sayımlardan K (%), U (ppm), Th (ppm) olarak konsantrasyona geçmeyi sağlayan Duyarlılık (Sensitivite) Faktörleri'nin nasıl saptanacağına ilişkin yöntem, ilgili literatürlerde geniş şekilde verildiğinden burada kısaca değinilmiş ve Tablo 3.1. altında özetlenmiştir. Çalışmada kullanılan sintilasyon, gama spektrometre sistemi, 3x3 inch NaI(Tl) sintilasyon detektörü, fotoçoğaltıcı tüp, tüp ayağı ve ön yükseltici, Ortec-456 yüksek voltaj kaynağı ve PC bazlı MCA (8 K, Wilkinson ADC)'den oluşmuş ve 75 mm kurşun ile zırhlanmıştır [65].



Şekil 3.8. Gama spektrometre sistemindeki (a) Potasyum (b) Uranyum ve (c) Toryum kanalları [65].

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan gama spektrometre sisteminin kalibrasyon sabitleri [65]

Duyarlılık Faktörü		
$K_1 = \frac{C(Th)}{Th(ppm)}$	$C(Th)_{net} =$ Toryum kanallarındaki net sayım Th(ppm)= Standardın ppm olarak Th içeriği	$K_1 = 0,035 cps/ppm$
$K_2 = \frac{C(U)}{U(ppm)}$	$C(U)_{net} =$ Uranyum kanallarındaki net sayım U(ppm)= Standardın ppm olarak U içeriği	$K_2 = 0,012 cps/ppm$
$K_3 = \frac{C(K)}{\%K}$	$C(K)_{net} =$ Potasyum kanallarındaki net sayım %K= Standardın % olarak potasyum içeriği	$K_3 = 0,12 cps/ppm$
Sıyırma Oranları		
$\alpha = \frac{Toryumdan\ uranyuma\ gelen\ katkı}{Toryum\ net\ sayımı\ (Th_{net})}$		$\alpha = 0,70$
$\beta = \frac{Toryumdan\ potasyuma\ gelen\ katkı}{Toryum\ net\ sayımı\ (Th_{net})}$		$\beta = 0,90$
$\gamma = \frac{Uranyumdan\ potasyuma\ gelen\ katkı}{Uranyum\ net\ sayımı}$		$\gamma = 1,26$
eU, eTh ve %K Konsantrasyonlarının Tayini		
$C(Th)=Th_{net}/K_1$		
$C(U)=1/K_2(U_{net}-\alpha.Th_{net})$		
$C(K)=1/K_3[K_{net} - \gamma(U_{net} - \alpha.Th_{net}) - \beta.Th_{net}]$		

Çalışılan laboratuvar koşullarında (iyi bilinen art-ortam) sistem tarafından algılanabilecek minimum dedekte edilebilen aktiviteler (MDA) aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.1) yardımıyla hesaplanmıştır [65].

$$MDA = \frac{2,79+3,29\sqrt{\mu_B}}{K} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte verilen μ_B , art-ortam sayım hızı ve K, kullanılan gama spektrometre sisteminde, sayımlardan ppm/Bqkg⁻¹ olarak konsantrasyon/aktiviteye geçmeyi sağlayan kalibrasyon faktörleridir (K_{Ra} , K_{Th} ve K_K).

Currie (1968) kriterlerine dayalı olarak, sintilasyon gama spektrometre sisteminin 100 ml örnek geometrisi ve 30000 s için ölçebileceği minimum dedekte edilebilen aktiviter (MDA): ^{226}Ra için 10 Bqkg^{-1} , ^{232}Th için 10 Bqkg^{-1} ve ^{40}K için 50 Bqkg^{-1} 'dir [65].

3.2.3. Aktivitelerin belirlenmesi ve doz hesabı

Çalışma alanında toprak yüzeyinden 1 metre yükseklikte, topraktaki doğal radyonüklidlerden yayımlanan gama ışınlarından kaynaklı gama doz oranları (D) (Denklem 3.2);

$$D(\text{nGyh}^{-1}) = 0,462C_{Ra} + 0,604C_{Th} + 0,0417C_K \quad (3.2)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır [1]. Burada $0,462 \text{ nGyh}^{-1}$, $0,604 \text{ nGyh}^{-1}$ ve $0,042 \text{ nGyh}^{-1}$ sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için doz dönüşüm faktörleridir. C_{Ra} , C_{Th} ve C_K ise sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için aktivite konsantrasyonlarını tanımlar. Yıllık etkin doz eşdeğeri (AED) ise (Denklem 3.3);

$$AED = D(\text{nGyh}^{-1}) \times 8760 \text{ h} \times 0,2 \times 0,7 \text{ SvGy}^{-1} \times 10^{-3} \quad (3.3)$$

ile hesaplanır. Burada D gama doz oranı, (8760 saat) ışınlanma süresi, 0,2 sayısı insanların bir gününün ortalama %20'sini dış ortamda geçirdikleri düşünülerek getirilmiş bir katsayı ve $0,7 \text{ SvGy}^{-1}$ ise doz dönüşüm katsayısıdır [1].

Toprakta ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K dağılımı homojen değildir. Doğal radyonüklidlerin spesifik aktivitelerinin ortalama değerleri, radyasyon zararının tam bir göstergesi değildir. Bu nedenle 370 Bqkg^{-1} ^{226}Ra 'nın, 259 Bqkg^{-1} ^{232}Th 'nin ve 4810 Bqkg^{-1} ^{40}K 'in eşit miktarda gama radyasyon dozu ürettiği varsayılarak, daha genel bir indeks olan radyum eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}) aşağıdaki bağıntı (Denklem 3.4) ile hesaplanır [67].

$$Ra_{eq}(\text{Bqkg}^{-1}) = C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,07C_K \quad (3.4)$$

Burada C_{Ra} , C_{Th} , and C_K sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th , ve ^{40}K 'ın ($Bqkg^{-1}$ biriminde) ortalama aktivite konsantrasyonlarıdır. Yıllık gama radyasyon dozunu 1,5 nGy değeri ile sınırlandırmak için araştırılan her bir örneğin dış tehlike indeksi (Denklem 3.5);

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1 \quad (3.5)$$

ile hesaplanır. Radyasyon tehlikesini zararsız düzeyde tutmak için bu indeks 1 değerinden daha düşük olmak zorundadır [68].

3.3. Toprakten Radon Yayılım Hızı Ölçümünde Kullanılan Yöntemler

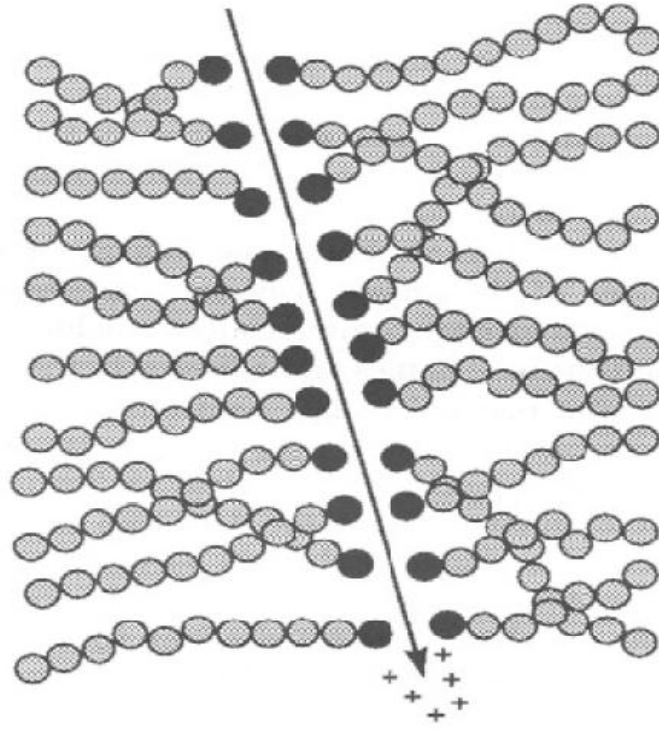
3.3.1. Katı hal nükleer iz kazıma dedektör metodu

Nükleer iz kazıma dedektörleri temel olarak mineral, kristal, plastik içeren, elektriksel olarak yalıtılmış katı materyallerdir. Nükleer iz kazıma dedektörlerinden ağır yüklü parçacıkların geçişi, dedektör materyalinde geçtikleri yollar boyunca hasarlara neden olmaktadır. Bu hasarlara gizli iz adı verilir. Gizli izler, dedektörlere kimyasal veya elektrokimyasal iz kazıma yöntemleri uygulandığında optik mikroskop altında görülebilecek boyutlara ulaşmaktadır.

Alfa parçacıklarının ölçümü için en uygun dedektör materyali, polimerik plastiklerdir. Çünkü polimerik plastikler basit, ucuz, dayanıklı, kararlı, yüksek duyarlılığa sahip ve kolay kullanılabilir yapıdadırlar. Polimer dedektörler genellikle ^{220}Rn , ^{222}Rn ve ürünlerinin ölçümleri için kullanılmaktadırlar. Yaygın olarak kullanılan polimer dedektörler, selüloz nitrat (LR-115), polyallyl di-glycol karbonat (CR-39) ve bisphenol A polikarbonat (makrofol)'dür. LR-115 ve CR-39, makrofol göre daha yüksek duyarlılıktadır [69].

İz oluşumu: İyonize parçacıklar katı materyal boyunca ilerlerken iyonizasyon ve eksitasyon ile enerjilerini ortama aktarırlar. Parçacığın materyal içinde enerji kaybı lineerdir ($\frac{dE}{dx}$). Lineer enerji kaybı parçacık karakteristiklerine (kütle, yük ve

enerji) ve kullanılan materyale bağılı bir fonksiyondur. Enerji kaybı kritik değerin üzerine çıktığında dedektör materyali üzerinde lokal şekil değişiklikleri oluşmaya başlar. Bu şekil değiştirmeler polimerlerde moleküler zincirlerin kopması veya parçacık yolu boyunca oldukça reaktif olan yeni kimyasal bileşenlerin oluşması şeklinde açıklanabilir. Oluşan şekil değiştirmeler neticesinde çapı 1–10 nm arasında değişen gizli izler oluşur [69].



Şekil 3.9. Ağır yüklü parçacıkların içinden geçtikleri polimerin molekül zincirlerini kırması [69].

Gizli izler, boyutları nedeni ile ancak elektron mikroskopları altında görülebilir. Bunun yanı sıra, eğer dedektörler uygun sıcaklık ve konsantrasyondaki kazıyıcı çözelti, çoğunlukla basit alkali (örneğin NaOH veya KOH) veya asit (örneğin HF veya HNO₃) ile banyo edilirse, gizli izlerin çapları birkaç μm 'ye kadar genişlemekte ve izler optik mikroskop altında görülebilmektedir.

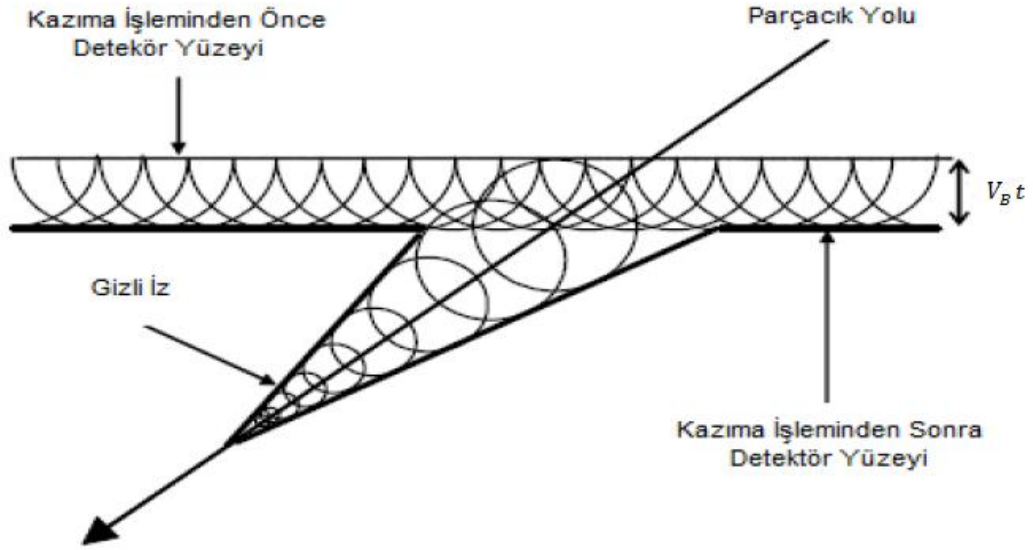
Kimyasal iz kazıma: Dedektör filmlerinin uygun sıcaklıktaki çözelti içerisinde belirli süreler boyunca banyo işlemine tabi tutulmasıdır. Kullanılan çözeltinin cinsi, molaritesi, sıcaklığı ve banyo süresi tercih edilen dedektörlerin özelliklerine göre değişmektedir [69].

Kimyasal iz kazıma, gizli izin kimyasal reaktivitesinin, iz etrafındaki hasar görmemiş dedektör materyalinin reaktivitesinden daha yüksek olması esasına dayanır. Polimere kazıyıcı çözelti etki ettiğinde, polimer yüzeyi V_B hızı ile kazınırken, gizli iz V_T hızı ile kazınmaktadır. V_B hasara uğramayan dedektör materyalinin kazınma hızıdır ve yalnızca dedektörün yapısı ile kazıma koşullarına (sıcaklık, konsantrasyon ve zaman) bağlıdır. V_T ise iz kazıma hızıdır ve gelen parçacığın karakteristiklerine (yük, kütle, enerji kaybetme oranı) bağlıdır.

Tablo 3.2. Farklı dedektör tipleri için iz kazıma koşulları [69]

Dedektör Tipi	Dedektör Materyali	Kazıma Sıcaklığı	Kazıma Konsantrasyonu	Kazıma Süresi
LR-115	Selüloz Nitrat	60 °C	%10 2,5 N	2 saat
Tip- II			NaOH	
CR-39 (500 µm)	Polikarbonat	70 °C	%25 6,25 N	12 saat
CN-85	Selüloz Asetat	60 °C	%10 2,5 N	20-30 dakika
			NaOH	

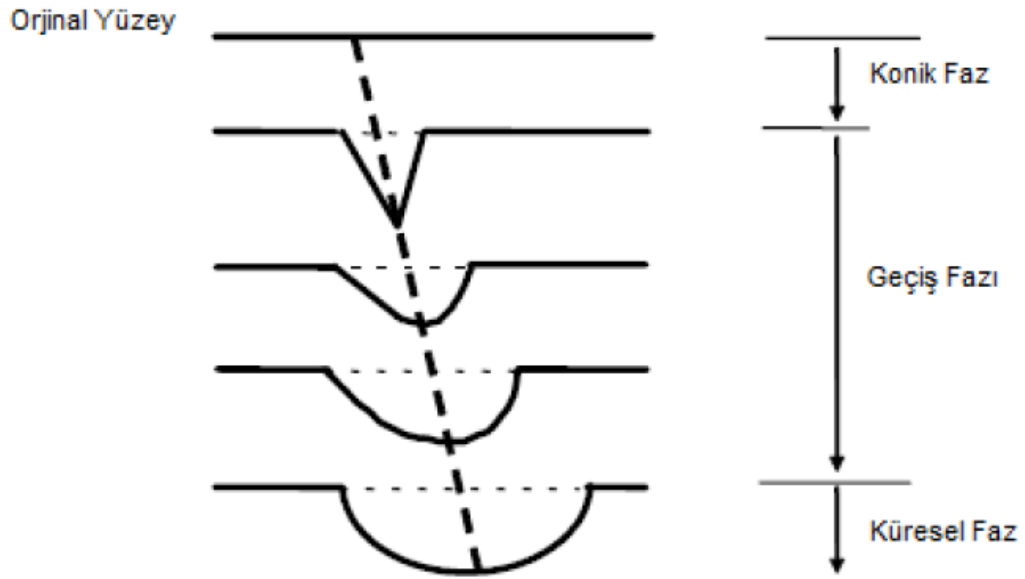
V_B ve V_T 'nin sabit ve izotropik olduğu kabul edilirse, iz oluşumu Huygens kuralının uygulanması ile Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi basit bir biçimde açıklanabilir. Bir t kazıma süresinde dedektörün yüzeyini saran kazıma yarı kürelerinin (yarıçapları $V_B t$ olan tüm elemanter yarı küreler) içi dedektörün yeni yüzeyini verirken, seçilen kimyasal kazıyıcı parçacık yolu boyunca konik kazıma profili oluşturacaktır [69].



Şekil 3.10. Polimer dedektörlerde gizli iz oluşumunu açıklamak için Huygens kuralının uygulanması [69].

Dedektör üzerine gelen bütün yüklü parçacıklar, kazınabilecek nitelikte iz oluşturmaz. Ancak belirli bir kritik açıdan daha büyük açılarla gelen yüklü parçacıklar kazınabilen iz oluştururlar.

İzlerin şekli kazıma işlemi süresince üç fazda değişim göstermektedir (Şekil 3.11.). Bunlar konik faz, geçiş fazı ve küresel fazdır. Kazınan izin aldığı son şekil kimyasal kazımanın bittiği ana bağlıdır. Konik faz, iz kazıma hasarlı yolun bitimine ulaşana kadar sürer. Bu fazda izin şekli koniktir, açık yüzey ise eliptiktir. Konik faz bittiğinde geçiş fazı başlar. Geçiş fazında izin alt tarafı dairesel iken açık yüzeyi hala eliptiktir. Kazıma hızı her doğrultuda materyal kazıma hızına eşittir. İz küresel, açık yüzey ise dairesel olduğunda küresel faza ulaşılmış olur [69].



Şekil 3.11. İzlerin banyo süreci boyunca aldığı şekiller [69].

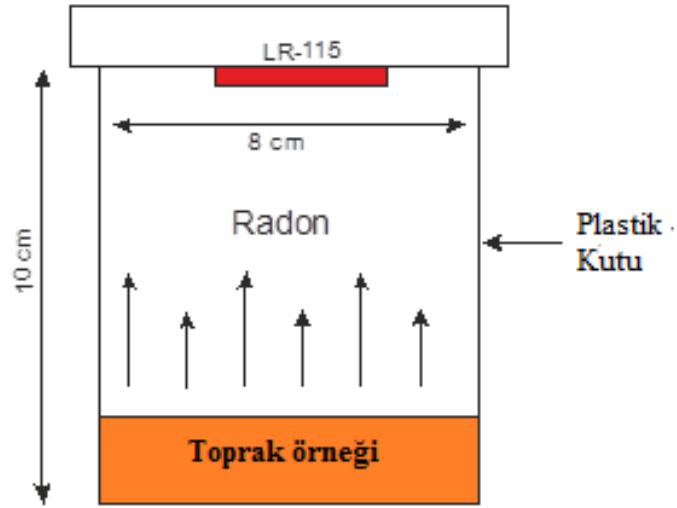
3.3.2. Kapalı kutu metodu (sealed can tekniği) ile radon yayılım hızı tayini

Kapalı kutu tekniği (Sealed Can Technique) ilk olarak 1980 yılında Falah Abu-Jarad ve arkadaşları tarafından kullanılmıştır [70]. Adından da anlaşılacağı üzere bu teknik kapalı bir kutu (belirli bir yükseklik ve genişliğe sahip) ve katı hal plastik nükleer iz dedektörleri olarak adlandırılan (LR-115 ve CR-39) film dedektörlerin beraber kullanılmasıyla oluşturulur. Bu teknikte kapalı kaptaki oluşturulan hacim içerisindeki radonun ölçümü amaçlanmaktadır. Sistemin çalışması şu şekilde olur; kabın tabanına ölçümü yapılmak istenen materyal (toprak, kum, yapı malzemeleri, gübre vb.) konulduktan sonra kabın kapağının alt yüzeyine belirli boyutlarda kesilmiş LR-115 veya CR-39 katı hal nükleer iz dedektörleri yerleştirilip, kabın ağzı hiçbir gaz çıkışı olmayacak şekilde kapatılır ve yalıtılır.

Yapılacak ölçüme göre ilgili materyal bu kaplar içerisinde belirli bir süre bekletilir ve materyalden ayrılıp kutu içerisinde birikecek olan radon ve ürünlerinden yayılan α parçacıkları kullanılan katı hal nükleer iz dedektörleri aracılığıyla kaydedilir. Daha sonra bu filmler iz kazıma işlemine tabi tutularak gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra materyale ait radyum konsantrasyonu,

radon konsantrasyonu, kütle ve yüzey radon yayılım hızları bulunabilir. Kapalı kutu tekniği oldukça pratik ve ucuz bir yöntemdir. Ayrıca kullanımının basit olmasından ve ölçümler için elektronik bir cihaza ihtiyaç duyulmamasından dolayı radon gazı ölçümlerinde sıkça kullanılır.

Bu tez çalışmasında, toprak örneklerinin radon yayılım hızı, radon konsantrasyonu ve etkin radyum içeriğinin ölçümü için “Kapalı Kutu Tekniği (Sealed Can Tekniği)” kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.12.’de gösterilmiştir. Böyle bir sistemde radon yayılım hızı, örnek miktarına, kutunun çapına ve geometrisine bağlıdır.



Şekil 3.12. Toprak örneklerinde radon konsantrasyonu, radyum içeriği ve radon yayılım hızının ölçümü için kullanılan deney düzeneği.

Yukarıdaki şekilde kapalı kutunun kapağına LR-115 Tip-II katı hal plastik iz dedektörleri (2x2cm) yerleştirilerek kapların ağzı sıkıca kapatılmıştır. Daha sonra, radon gazı kaçışını önlemek için silikonla sıkıca kaplanmış ve kaplar 3 ay süreyle kapalı tutulmuştur [17]. Kapalı kutuda radyoaktif denge sağlandıktan sonra, radondan yayılan alfa parçacıkları, toprak örneklerinin radyum içeriğini ($Bqkg^{-1}$) belirlemek için kullanılmıştır. Kutular kapatıldıktan sonra, aşağıdaki ifadeye göre (Denklem 3.6) radon aktivitesi zamanla (T) artar [12];

$$C_{Rn} = C_{Ra} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Rn} \cdot T}) \quad \dots \quad (3.6)$$

Toprak örneklerindeki radyum konsantrasyonu ise (Denklem 3.7);

$$C_{Ra} = \frac{\rho \cdot h \cdot A}{k \cdot T_e \cdot M} \quad (3.7)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanır [3]. Burada ρ iz yoğunluğu (izcm^{-2}), h toprak örneği ve dedektör arasındaki mesafe (cm), k ($\text{Bqm}^{-3}\text{iz}^{-1}\text{cm}^2\text{h}$) kalibrasyon faktörü, A kutunun dik kesitinin yüzey alanı (cm^2), M toprak örneklerinin kütlesi (kg), T_e (h) ise etkin ışınlanma zamanıdır. Kutudaki dedektörler ^{222}Rn konsantrasyonunu sıfır başlangıç aktivitesinden denge aktivitesine kadar kaydetmektedir. Bu nedenle, etkin ışınlanma süresini belirlemek gerekir [18]. Etkin ışınlanma süresi T_e aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.8) kullanılarak hesaplanır:

$$T_e = [T - \tau(1 - e^{-\lambda_{Rn} \cdot T})] \quad (3.8)$$

Burada λ_{Rn} , ^{222}Rn 'nin bozunma sabiti, τ ortalama ömür ($\tau = \frac{1}{\lambda_{Rn}}$) ve T ise gerçek ışınlanma süresidir.

Kapalı kutu tekniği, aşağıdaki eşitlikler (Denklem 3.9 ve Denklem 3.10) kullanılarak topraktaki radon yayılım hızlarını belirlemede de kullanılabilir [5, 10, 71, 72]:

$$E_M = \frac{C_{Rn} \cdot T \cdot \lambda_{Rn} \cdot V}{M \cdot T_e} \quad (3.9)$$

$$E_A = \frac{C_{Rn} \cdot T \cdot \lambda_{Rn} \cdot V}{A \cdot T_e} \quad (3.10)$$

Burada V kutunun hacmini (cm^3), E_M ve E_A ise sırasıyla kütle ve yüzey radon yayılım hızlarını belirtmektedir. Yüzey radon yayılım hızı, toprak örneklerinden yayılan radon gazını ifade eder [17].

Basit ve düşük maliyetli bir teknik olarak, radon yayılım hızlarının belirlenmesinde kapalı kutu tekniği oldukça kullanışlıdır. Bununla birlikte, ölçülen yayılım hızının doğruluğunu, kaçaklar ve geri difüzyon mekanizması azaltıcı yönde etkileyebilmektedir [72]. Toprak örneği uzun bir süre kutuda kapalı kaldığından, numune etrafındaki radon konsantrasyonu artarken, malzemenin gözenekli yapısından dolayı, radon atomları malzemeye geri difüze olurlar. Bunun sonucunda, kutunun içindeki radon denge konsantrasyonu azalır. Bu olay, gerçek radon yayılım hızının azalmasına neden olan geri difüzyon olarak bilinmektedir [72, 73].

Eğer 3.9. ve 3.10. denklemlerindeki bozunum sabiti, etkin bozunum sabiti $\lambda_e = \lambda_{Rn} + \lambda_b$ ile değiştirilirse, geri difüzyon etkileri hesaba katılabilir. λ_b geri difüzyon sabiti (Denklemler 3.11) [74, 75];

$$\lambda_b = \frac{\alpha S}{V_a} = \frac{\lambda_{Rn} V_s}{V_a} \quad (3.11)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada, α geri difüzyon etkisinin düzeltme terimidir. S , örneğin yüzey alanı (m^2), V_a kapalı kutudaki hava boşluğunun hacmi (m^3) ve V_s ise örneğin hacmidir. Bu formül, sadece örneğin kalınlığı x , radon difüzyon yolundan daha az ise geçerlidir [72, 76].

Kapalı ortamdaki radon aktivitesi ile toprak gazı radon arasında pozitif bir ilişki olduğu bilinmektedir. Toprak örneklerindeki radon yayılım hızı kullanılarak, topraktaki radon aktivite konsantrasyonunun bina içi radon konsantrasyonuna katkısı aşağıdaki ifade (Denklemler 3.12) ile hesaplanabilir [17, 77];

$$C_{Rn}^{ind} = \frac{E_A \cdot S_r}{V_r \cdot \varphi} \quad (3.12)$$

Burada $\varphi = 0,5 \text{ h}^{-1}$ havanın akış oranı, S_r ve V_r sırasıyla kapalı ortamın alanı ve hacmi olup, söz konusu kapalı ortamın $\frac{S_r}{V_r} = 2,0 \text{ m}^{-1}$ oranına sahip bir boşluk olduğu kabul edilir [17].

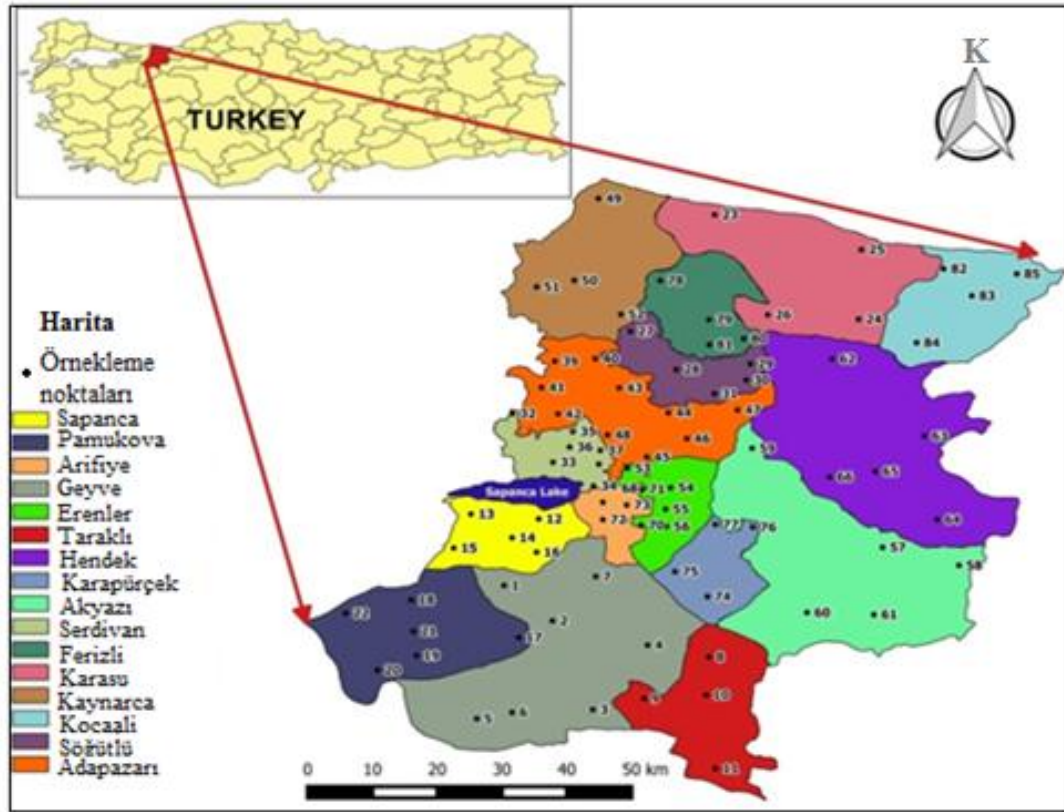
Radondan kaynaklanan radyasyon zararları, etkin dozlardan tahmin edilebilir. Radon etkin dozunun hesaplanması için birkaç yöntem kullanılabilir. Bu çalışmada, radondan ve onun ürünlerinden kaynaklanan etkin radyasyon dozları ICRP-1993'e göre hesaplanmıştır [78]. Burada, ürün konsantrasyonu $Bq\,m^{-3}$ yerine çalışma seviyesi (WL) biriminde ifade edilir. Aylık çalışma düzeyi (WLM), bir insanın 170 saat (1 ay) boyunca 1 çalışma düzeylik (WL) ürün konsantrasyonuna maruz kalması olarak tanımlanır. Yıl başına WLM'yi hesaplamak için, Nazaroff ve Nero tarafından [77] önerilen bir yöntem kullanılmıştır;

$$(WLM)y^{-1} = \frac{t.n.F.C_{Rn}^{ind}}{(170).(3700)} \quad (3.13)$$

Burada C_{Rn}^{ind} bina içi radon aktivitesine katkı veren toprak gazı radon konsantrasyonu ($Bq\,m^{-3}$), $t=8760$ saat, $1/3700$ dönüşüm katsayısı ($WL/Bq\,m^{-3}$) ve 170 saattir. n, kapalı alanda geçirilen zamanı tanımlarken, F radon ve bozunum ürünleri arasındaki kapalı alan denge faktörünü tanımlar. $n=0,8$ ve $F=0,4$ değerleri kullanılmıştır [1]. Ayrıca radondan kaynaklanan etkin dozu tahmin etmek için, ICRP (1987) tarafından önerilen $6,3$ mSv/WLM dönüşüm faktörü kullanılmıştır [79].

3.4. Doğal Radyonüklid Aktivite Konsantrasyonlarının Belirlenmesi için Örneklerin Toplanması ve Ölçüme Hazırlanması

Toprak örnekleri, Sakarya ilinin 16 ilçesinden toplamda 85 noktadan kareyaj yöntemiyle toplanmıştır. Örnekleme noktalarının lokasyonları ve bölgedeki dağılımları Şekil 3.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Çalışma alanı ve örnekleme noktalarının lokasyon haritası.

Örnekleme noktalarının konumları (lokasyonları) GPS sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Her bir örnekleme noktası 2mx2m alan içerisinde olacak şekilde işaretlenmiştir. Toprak örnekleri rastgele işaretlenmiş bu alan içerisinde alınmış ve tipik bir örnek elde etmek için birbirleri ile karıştırılmıştır. Toplama işleminden sonra, örnekler içerisindeki nemi gidermek için 80 °C'de 24 saat boyunca elektrikli bir fırında kurutulmuş ve daha sonra öğütülüp homojenize edildikten sonra 2 mm örgülü bir elek ile elenmiştir.

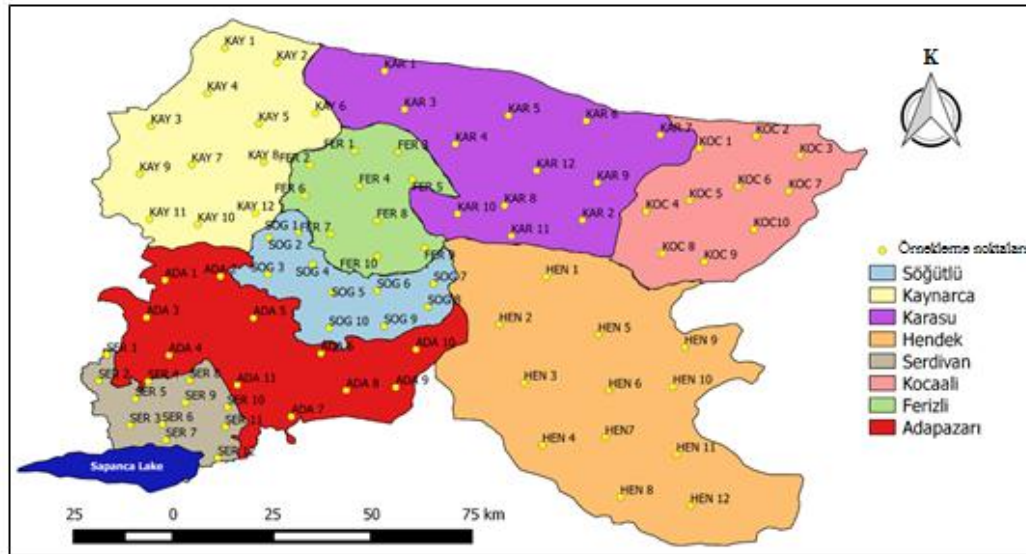
Doğal radyoaktivite ölçümü için her bir kurutulmuş örnek 100 cm³'lük plastik silindirik kutulara doldurulmuştur. Sıkıca kapatılan kutular radon ve kısa yarı ömürlü bozunum ürünleri arasındaki radyoaktif dengenin sağlanması için yaklaşık 40 gün bekletilmiştir [80].

Toprakta 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. ⁴⁰K kendi yaydığı gama ışınlarıyla ölçülürken, ²³²Th ve ²²⁶Ra radyonüklidleri çok düşük bir olasılıkla düşük enerjili gama ışını yaydıklarından kendi gama ışınlarıyla ölçümlerini yapmak pek mümkün değildir. Bununla birlikte, ²³²Th ve ²²⁶Ra'nın bozunum ürünlerinin gama ışını aktivitelerini ölçmek mümkündür [37, 38, 80-86]. ²²⁶Ra'nın aktivite ölçümü ²¹⁴Pb'den yayılan 1,76 MeV'lik gama ışınlarıyla, ²³²Th'nin aktivitesi ²⁰⁸Tl'den yayılan 2,62 MeV'lik gama ışınlarıyla, ⁴⁰K'ın aktivitesi ise 1,46 MeV'lik kendi gama ışınlarıyla belirlenmiştir. Her bir örnek için üç kez sayım yapılmıştır. Standart örnekler ²²⁶Ra (118 ppm), ²³²Th (600 ppm) ve ⁴⁰K (%52,45) için sistem kalibrasyonu yapılmış ve dedektör verimi aynı standart örnekler ile belirlenmiştir. Fotopik etkisi %2,6 ²²⁶Ra, %2,3 ²³²Th ve %3,1 ⁴⁰K olan bir dedektör kullanılmıştır [80].

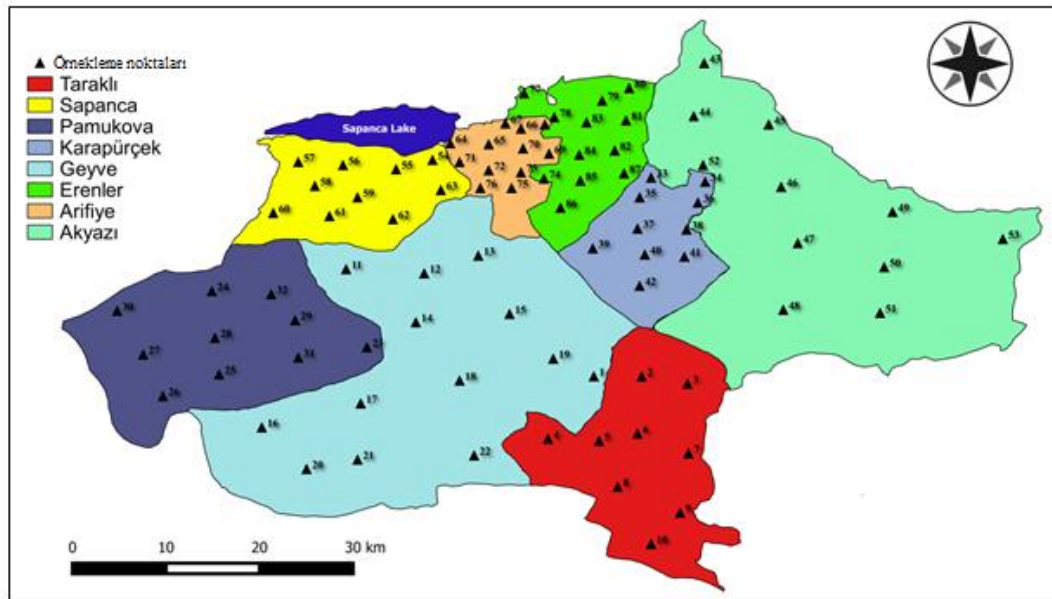
3.5. Toprakta Radon Yayılım Hızı Ölçümleri için Örneklerin Toplanması ve Ölçüme Hazırlanması

Sakarya'nın kuzey bölgesinden 89 ve güney bölgesinden 87 toprak örneği, önce toprak yüzeyinde varsa bitki artıkları ve taşlar temizlenerek kürekle 'V' şeklinde 20 cm derinliğinde bir çukur açılıp bir tarafından yaklaşık 5 cm kalınlığında dilimleme yapılarak 1-2 kg civarında kilitli torbalara yerleştirilmiştir. Örneklerin alındığı yer, tarih, saat ve koordinat bilgileri etiketlere yazılarak kilitli torbalara yapıştırıldıktan sonra toprak örnekleri Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'na getirilmiştir.

Alınan toprak örnekleri, gölgede, oda sıcaklığında, toz almayacak şekilde temiz kağıtlar üzerine serilerek kurutulmuştur. Sonrasında toprak üzerinde görülen bitki parçacıkları, iri taşlar ve çakıllar temizlenerek toprak kesekleri elle ufalanır ve 2 mm (10 mesh)'lik elekten geçirilerek homojenize bir şekilde toz haline getirilmiştir. Toprak örnekleri, içerisindeki nemin giderilmesi için, 24 saat boyunca 80 °C sıcaklıktaki bir fırında kurutulmuş ve her bir örnekten 100 gr alınarak, hacmi 503 cm³ (çapı 8 cm ve yüksekliği 10 cm) olan silindir şeklindeki plastik kaplara yerleştirilmiştir. Kapakların iç yüzeylerinin en üst noktasına LR-115 Tip-II plastik iz dedektörleri (2x2cm) yerleştirilerek kapların ağzı sıkıca kapatılmıştır (kaplar daha sonra, radon gazı kaçışını önlemek için silikonla sıkıca kaplandı) ve dedektörler yaklaşık 3 ay süreyle ışınlanmaya bırakılmıştır [17, 70, 87]. Bu 3 aylık süre içerisinde, toprak örneklerindeki radyumun bozunumundan ortaya çıkan radon gazının yaydığı α parçacıkları, bu dedektörler üzerine çarparak izler oluşmasına neden olur [17]. Bu süresinin ardından, dedektörlerdeki izlerin açığa çıkması için dedektörler sabit 60±1 °C sıcaklıkta 90 dakika boyunca 2,5 N NaOH çözeltisinde iz kazıma işlemine tabi tutulmuştur. İz kazıma sonrası dedektörler 20 dakika boyunca saf suda bekletilmiş ve temiz havada kurutulmuştur. Dedektörlerin hassas yüzeylerindeki alfa izlerinin yoğunluğu (1 cm²'deki iz sayısı) 100x büyütme optik mikroskop kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3.14. Kuzey Sakarya toprak örnekleme istasyonlarının lokasyon haritası.



Şekil 3.15. Güney Sakarya toprak örnekleme istasyonlarının lokasyon haritası.

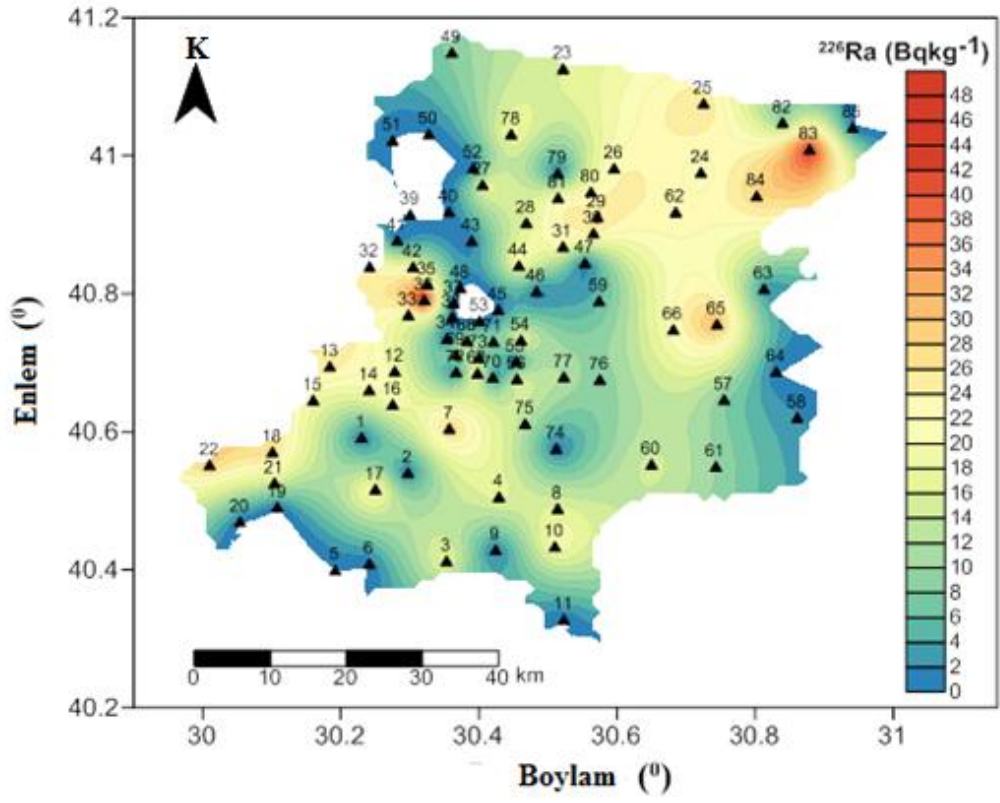
Kapalı kutu tekniği kullanılarak LR-115 film dedektörlerindeki alfa iz yoğunlukları (izcm^{-2}) ölçülmüştür. Etkin radyum içerikleri, radon (kütle ve yüzey) yayılım hızları sırasıyla (3.7), (3.9) ve (3.10) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu teknik kullanılarak elde edilen sonuçlar Kuzey ve Güney Sakarya bölgeleri için ayrı ayrı Ek C. ve Ek D.'de verilmiştir.

BÖLÜM 4. SONUÇLAR

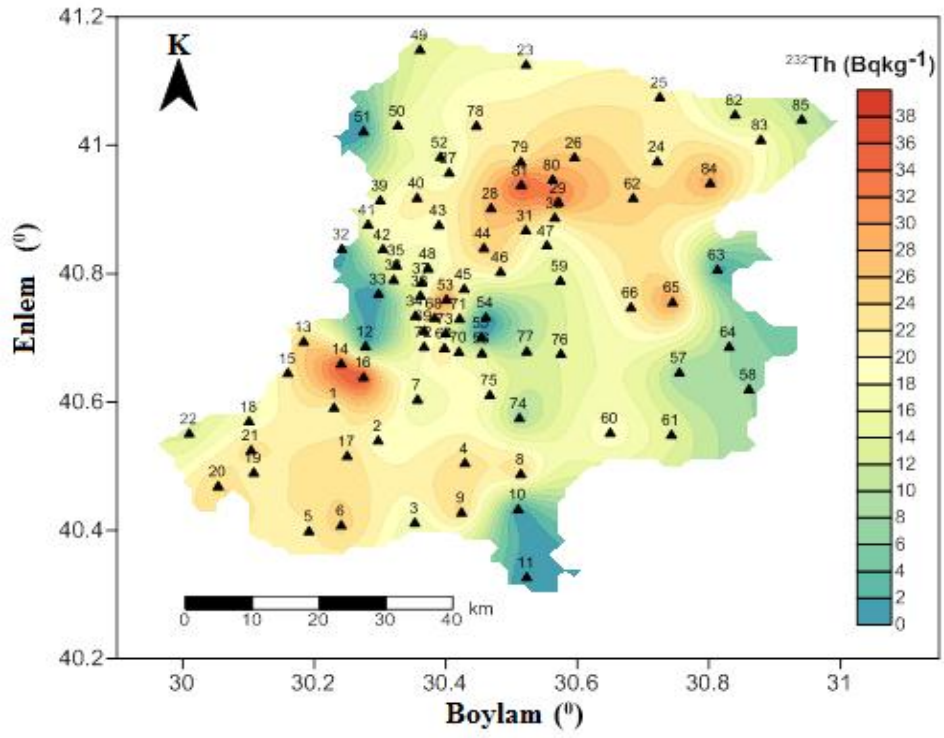
4.1. Toprakta Doğal Radyonüklid Aktivite Konsantrasyonu Ölçüm Sonuçları

Toprak örneklerinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla BDL (dedekte edilebilen limitin altında)-48,5±3,8, BDL-37,7±4,0 ve 100±10-767±20 Bqkg⁻¹ aralığında, 23,2±2,5, 21±3,4 ve 371±25,9 Bqkg⁻¹ ortalama değerler ile değiştiği belirlenmiştir. Toprakta ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının UNSCEAR tarafından tavsiye edilen dünya geneli tahmini ortalama değerleri sırasıyla 35 Bqkg⁻¹, 30 Bqkg⁻¹ ve 400 Bqkg⁻¹ olarak verilmiştir [1]. Türkiye’de ise ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının ortalama değerleri sırasıyla 27,6 Bqkg⁻¹, 32,7 Bqkg⁻¹ ve 439,9 Bqkg⁻¹’dir [81]. Bu nedenle, çalışmamızda toprak örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ortalama aktivite konsantrasyonlarının ortalama değerleri Türkiye ve Dünya geneli ortalama konsantrasyon değerlerinin altında bulunmuştur.

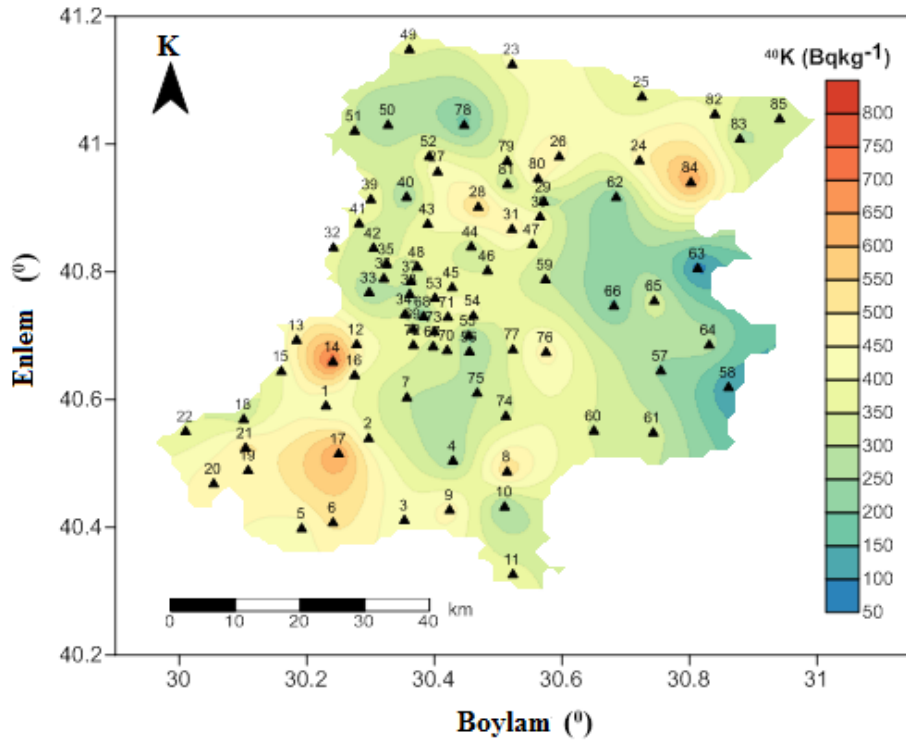
Radyoaktivite çalışmalarında ölçüm sonuçlarının yorumlanması ve değerlendirilmesi için çizilen radyoaktivite dağılım haritaları büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple, Sakarya’dan toplanan toprak örneklerinde ki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın doğal radyoaktivite konsantrasyonlarının dağılımları Şekil 4.1.-4.3.’teki haritalarda verilmiştir.



Şekil 4.1. Çalışma bölgesinde ^{226}Ra spesifik aktivite dağılımlarını gösteren kontur haritası.



Şekil 4.2. Çalışma bölgesinde ^{232}Th aktivite konsantrasyonu dağılımlarını gösteren kontur haritası.



Şekil 4.3. Çalışma bölgesinde ^{40}K aktivite konsantrasyonu dağılımlarını gösteren kontur haritası.

^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için en yüksek aktivite konsantrasyonları sırasıyla 36 (Serdivan), 16 (Sapanca) ve 14 (Sapanca) numaralı istasyonlardan alınan toprak örneklerinde gözlemlenmiştir. Bunun dışında, ^{40}K aktivite konsantrasyonunun, çalışma alanının bütün noktalarında ^{226}Ra ve ^{232}Th konsantrasyonlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Jeolojik haritalar, 16 (Sapanca) ve 14 (Sapanca) numaralı istasyonlardaki kayaların metamorfik kayalardan oluştuğunu, 36 (Serdivan) numaralı istasyondaki kayaç yapısının ise volkanik kayalardan oluştuğunu göstermektedir [88]. Volkanik ve metamorfik kayalarda doğal radyonüklid içeriklerinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu istasyonların bulunduğu bölgeler ovalardan oluşmaktadır. Ayrıca, ^{226}Ra 'nın yüksek konsantrasyonları alüvyollardan oluşmuş ovalarda (65. ve 83. noktalar) gözlemlenmiştir. Ovalardaki bu yüksek spesifik aktivite, uranyumca zengin magmatik kayalardan taşınım prosesinin sonucunda oluşmuş olabilir. Ayrıca uranyumun toryumdan daha fazla çözünürlüğünün olması ve belli koşullar altında kayalardan ve topraklardan ayrılıp bazı uzak mesafedeki çökeltilerde birikebileceği de unutulmamalıdır [89]. Sakarya'nın yüksek tarım potansiyeline

sahip olmasından dolayı, özellikle kimyasal fosfat gübrelerin ova topraklarında kullanılıyor olması da dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Fosfat gübrelerin, özellikle ^{226}Ra ve bozunum ürünlerinin, yüksek konsantrasyonlar da içerdiği iyi bilinmektedir [45]. ^{232}Th ve bozunum ürünlerinin radyoaktif açıdan fosfat gübrelerine katkısı çok düşük olmasına rağmen, bu gübreler büyük miktarda doğal ^{40}K radyonüklidlerini içerirler. Bu nedenle, fosfat gübreleri uygulandıkları topraklarda radyoaktivite seviyesini arttırmaktadırlar [90]. Bu bilgilerin ışığında, ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının istasyondan istasyona değişimindeki önemli farklılıkların temel sebebinin gübreleme olabileceği söylenebilir [91].

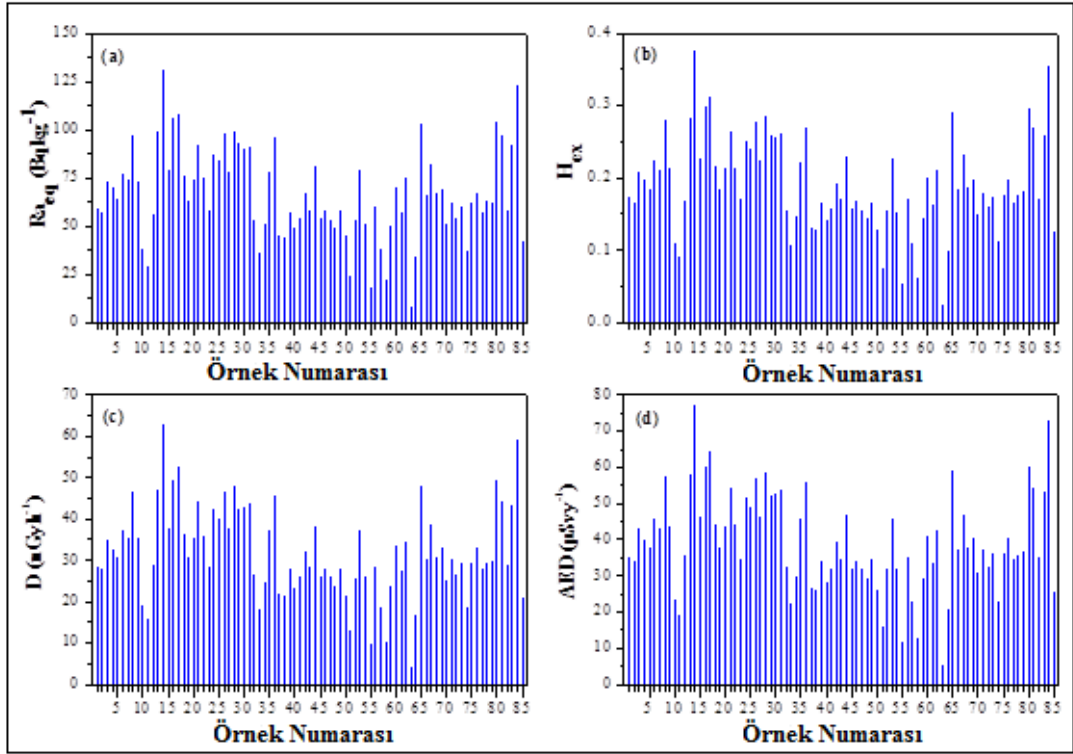
Toprak tipi, jeoloji ve coğrafya gibi toprakta doğal radyoaktivite dağılımını etkileyen birçok faktör vardır. Genel olarak, granitler nispeten yüksek radyum içeriğine, tortul ve metamorfik kayalar orta düzey radyum içeriğine, bazaltlar ve çoğu kireç taşı ise düşük radyum içeriğine sahiptirler [1]. Bu faktörlere ek olarak, seller ve radyonüklid dağılımları arasında bir ilişki olduğu düşünülebilir. Sakarya'da yağış miktarı özellikle kış, ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde oldukça yüksektir. Sonuç olarak, özellikle Geyve, Akyazı, Hendek ve Karapürçek ilçelerinde sık sık taşkınlar meydana gelmektedir. Taşkınların toprağın yer değiştirmesine sebep olduğu çok iyi bilinmektedir. Bundan dolayı, çalışma alanındaki radyonüklidlerin dağılımında seller önemli bir rol oynar [92].

Elde edilen verilerin daha genel bir değerlendirmesi için, Sakarya'nın değişik noktalarından toplanan toprak örneklerindeki doğal ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklidleri için ölçülen aktivite konsantrasyonları Tablo 4.1.'de istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Tablo 4.1. Sakarya ili topraklarında ölçülen radyonüklidlerin istatistiksel analizi

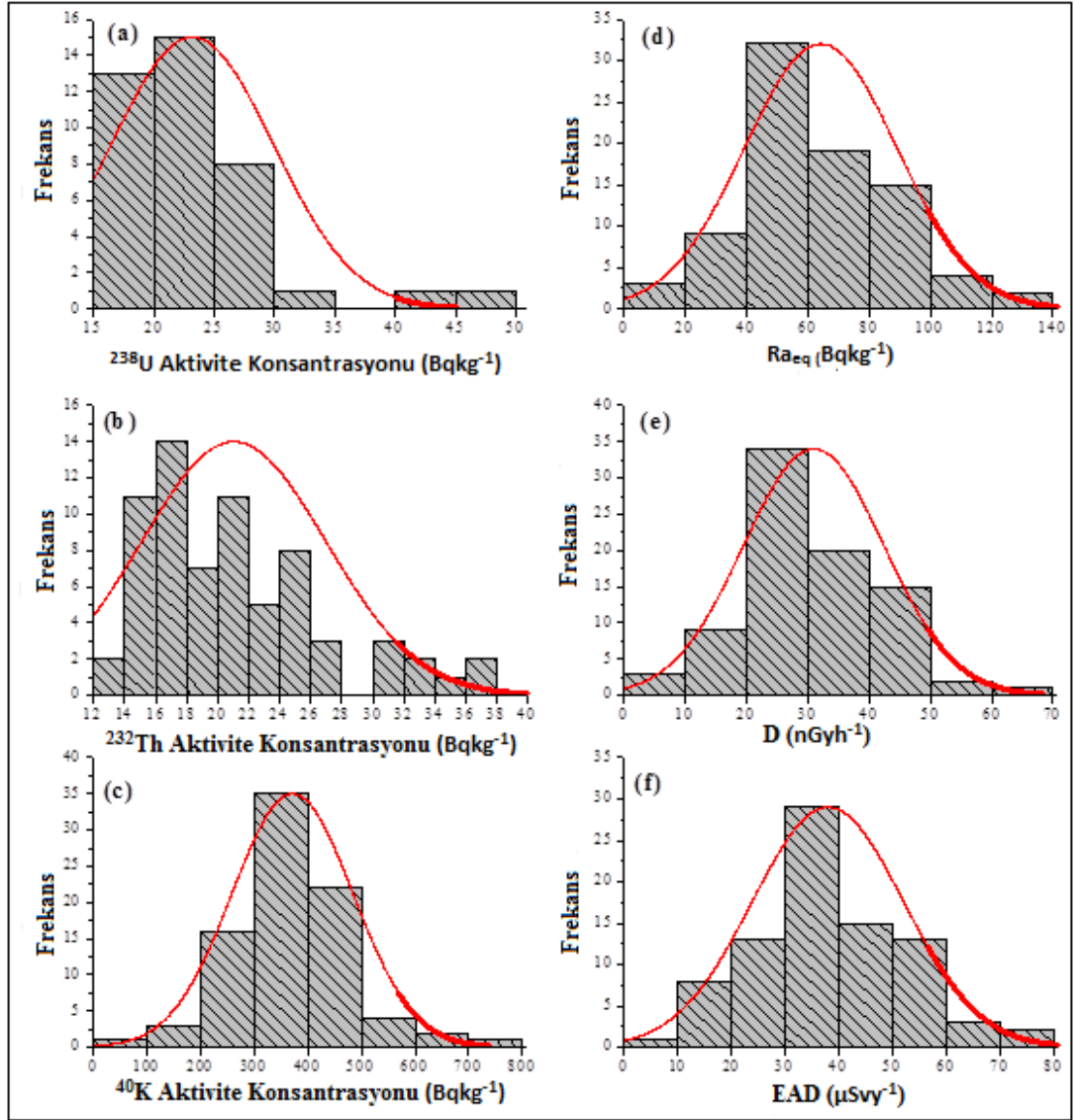
İstatistikler	Aktivite Konsantrasyonları (Bqkg ⁻¹)			Radyolojik Tehlike İndeksi			
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	Ra _{eq} (Bqkg ⁻¹)	D (nGyh ⁻¹)	AED (μSvy ⁻¹)	H _{ex}
Minimum	BDL	BDL	100	7,69	4,17	5,12	0,02
Maksimum	48,5	37,7	767	130,05	62,77	76,98	0,38
Ortalama	23,2	21,0	371	64,14	30,93	37,93	0,18
SD	6,7	5,9	113	24,98	11,51	14,12	0,07
GM	22,4	20,3	353	58,36	28,46	34,91	0,17
Medyan	21,5	20,1	369	58,46	28,59	35,06	0,17
Skewness	2,20	1,00	0,70	0,20	0,27	0,27	0,23
Kurtosis	6,10	0,50	1,60	-0,15	0,03	0,03	-0,01
Kolmogorov-Smirnov	0,16	0,18	0,39	0,40	0,99	0,99	0,99

Şekil 4.4.(a-d)'de, toprak örneklerindeki eşdeğer radyum aktiviteleri (Ra_{eq}), dış tehlike indeksleri (H_{ex}), toplam soğrulan doz oranları (D) ve yıllık etkin doz eşdeğerleri (AED) gösterilmiştir. Buna göre, eşdeğer radyum aktivite (Ra_{eq}) değerleri 7,69-130,05 Bqkg⁻¹ arasında 64,14 Bqkg⁻¹ ortalama değer ile değişir. Bu değerler 370 Bqkg⁻¹ olan limit değerinden daha düşüktür [1]. Dış tehlike indeksinin (H_{ex}) hesaplanan değerleri 1'den daha düşüktür ve 0,02-0,38 arasında 0,18 ortalama değer ile değişir. Soğrulan gama dozu (D) 4,17-62,77 nGyh⁻¹ aralığında 30,93 nGyh⁻¹ ortalama değer ile değişmektedir. En yüksek (maksimum) gama doz oranlarının ölçüldüğü 84 (Kocaali) ve 14 (Sapanca) noktaları haricinde, gözlemlenen değerler dünya ortalaması olan 59 nGyh⁻¹ değerinin altındadır [1]. Hesaplanan yıllık etkin doz (AED) 5,12-76,98 μSvy⁻¹ aralığında 37,93 μSvy⁻¹ ortalama değer ile değişmektedir. Maksimum AED'nin kaydedildiği 84 (Kocaali) ve 14 (Sapanca) noktaları dışındaki sonuçlar dünya ortalaması olan 70 μSvy⁻¹ değerinin oldukça altındadır [1].



Şekil 4.4. Sakarya toprak örneklerindeki a) radyum eşdeğer aktivitesi (Ra_{eq}) b) dış tehlike indeksi (H_{ex}) c) toplam soğrulan doz oranı (D) d) yıllık etkin doz eşdeğeri (AED).

^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımları ve radyolojik risk hesapları Şekil 4.5.'te verilmiştir. Hesaplanan histogramlar (çizgi grafikleri) Kolmogorov-Smirnov testine tabi tutularak normal ve log-normal dağılım fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır. Kolmogorov-Smirnov testine göre ($p>0,05$), ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları normal dağılım göstermektedir.

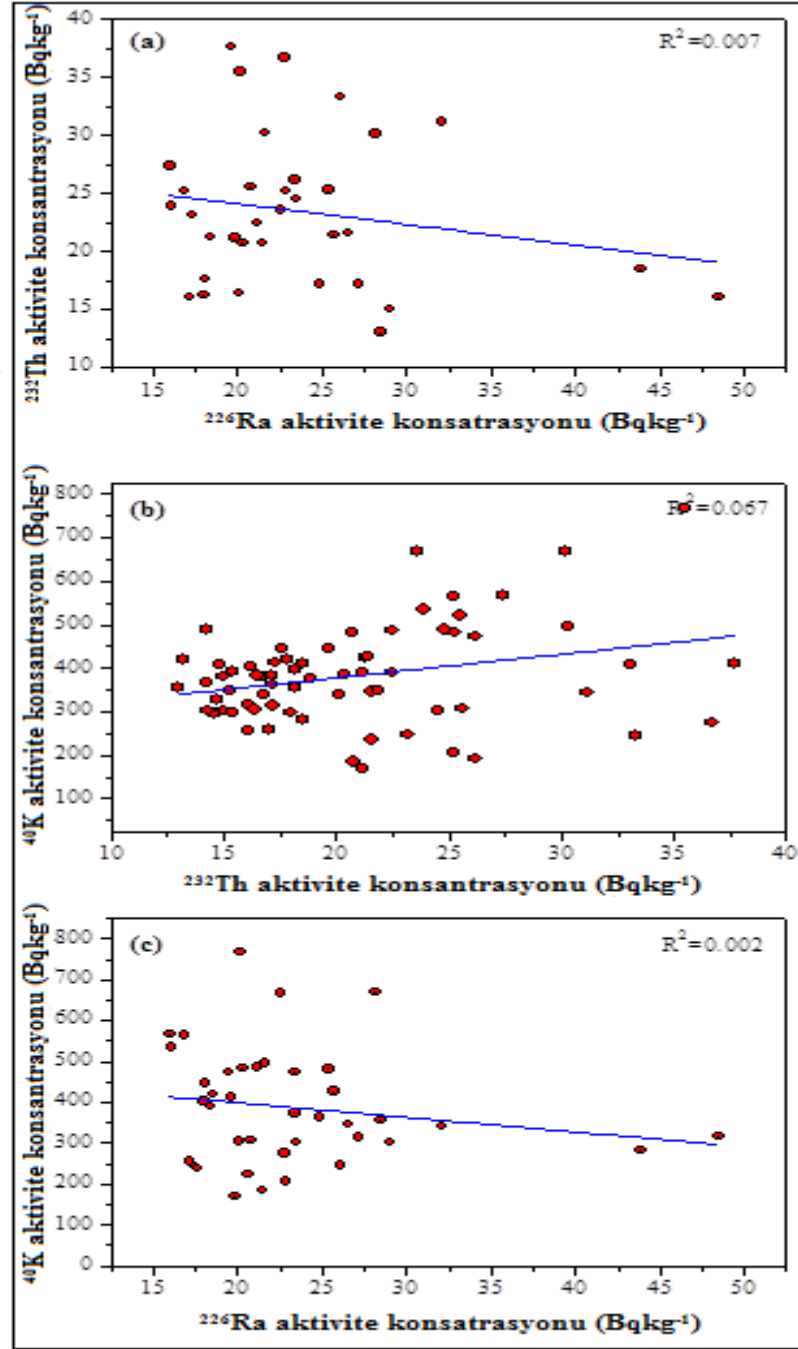


Şekil 4.5. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımları ve radyolojik tehlike indeksleri.

Ölçülen dağılımların normal veya log-normal dağılımlardan hangisine uyduğunun belirlenmesinin bir diğer yolu ölçülen medyan değeri ile aritmetik veya geometrik ortalama değerini karşılaştırmaktır. Eğer dağılım normal ise, ortalama değerin, medyan değerine eşit olması gerekir. Eğer dağılım log-normal ise, geometrik ortalama değeri, medyan değerine eşit olmalıdır. Yaptığımız çalışmada aritmetik ortalama medyana eşittir ve bu durum ölçülen dağılımın normal dağılım olduğunu doğrular.

Skewness ve Kurtosis parametreleri de toprak örneklerinin radyolojik karakteristiklerinin değerlendirilmesi amacıyla analiz edilmiş ve Tablo 2.2.'de verilmiştir. Toplanan örneklerde ^{226}Ra ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları için Kurtosis katsayısı dağılımların nispeten keskin pikli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, pozitif Skewness değeri de dağılımların sağ kuyruklarının daha uzun olduğunu gösterir [93].

Toprak örneklerinin zenginleşme ve tükenme proseslerinin değerlendirilmesi için bilgi verici olan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları arasındaki korelasyon analizleri Şekil 4.6.'da verilmiştir [13]. Th-Ra ve K-Ra için korelasyon katsayılarının sırasıyla 0,007 ve 0,002, ilişkinin ise lineer ve negatif olduğu bulunmuştur. K-Th örnekleme için ise korelasyon katsayısının 0,067 olduğu, pozitif yönelimli ve lineer bir ilişki saptanmıştır. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları arasında önemli bir ilişki olmaması, çalışma alanı topraklarında radyonüklid taşınım proseslerinin farklı olmasından kaynaklanabilir [13]. Bunun yanı sıra, çalışma alanında incelenen birçok toprak örneğinin, toprağı ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K konsantrasyonu açısından zenginleştiren fosfatlı gübrelerin kullanıldığı tarım alanlarından alınmış olmasıdır.



Şekil 4.6. Toprak örneklerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K arasındaki korelasyonlar a) ^{232}Th - ^{226}Ra b) ^{40}K - ^{232}Th ve c) ^{40}K - ^{226}Ra .

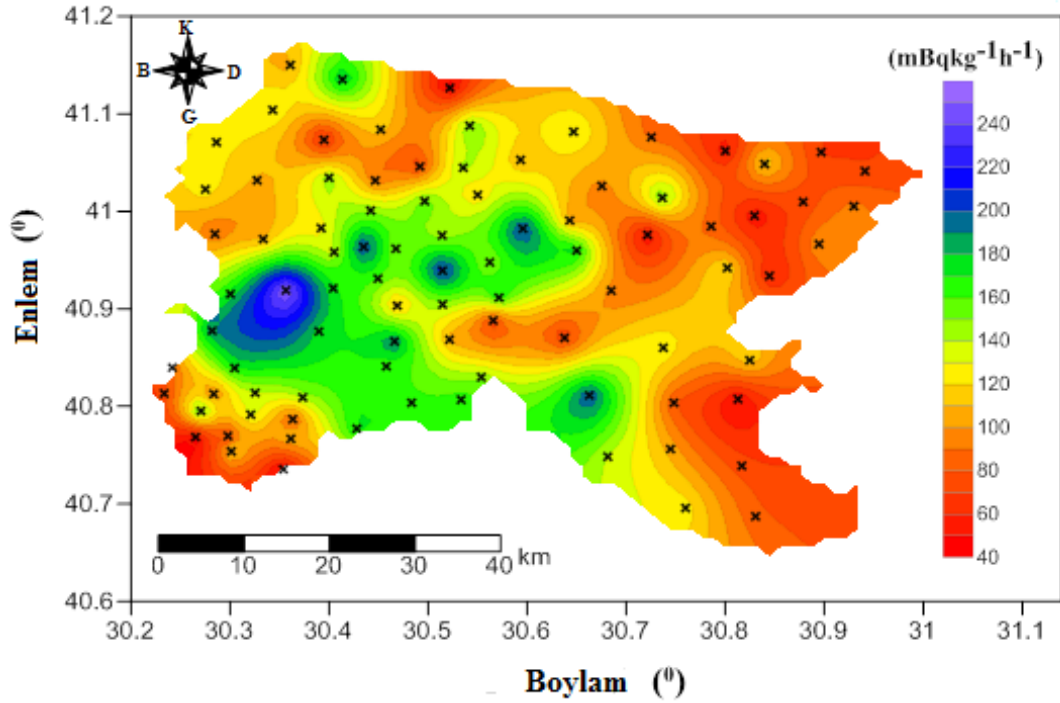
Tablo 4.2.'de Sakarya toprak örneklerinde ölçülen aktivite konsantrasyonları, soğrulan gama doz oranları ve yıllık etkin doz değerleri Türkiye ve Dünya'nın farklı bölgelerinde benzer çalışmalarda rapor edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.2. Ortalama aktivite konsantrasyonları, soğrulan gama doz oranları ve yıllık etkin doz eşdeğerlerinin Türkiye ve Dünya'da yürütölen diğör çalışmalarda elde edilen veriler ile karşılaştırması

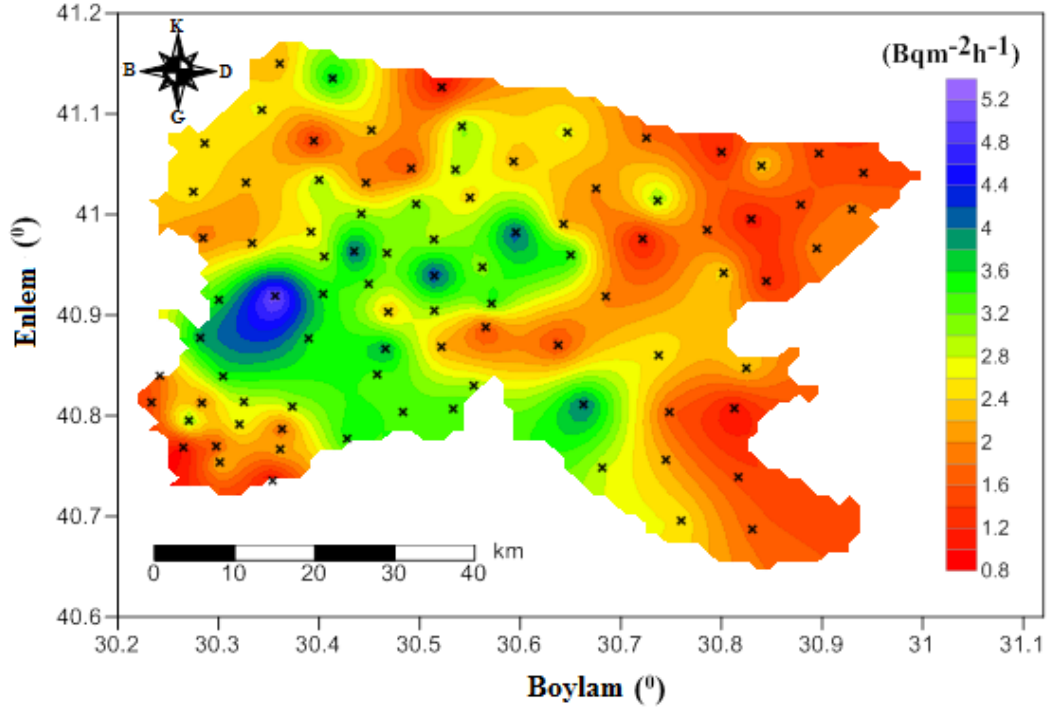
Çalışma	Bölge-Ülke	²²⁶ Ra (Bqkg ⁻¹)	²³² Th (Bqkg ⁻¹)	⁴⁰ K (Bqkg ⁻¹)	D (nGyh ⁻¹)	AED (µSvy ⁻¹)
Rahman ve ark., 2011 [101]	Punjab- Pakistan	55,9	50,9	547	85,5	100
Otansev ve ark., 2012 [81]	Kayseri- Türkiye	35,5	37,3	429,7	14,4	140,34
Şahin ve Cavaş, 2008 [82]	Kütahya- Türkiye	33	32	255	46	57
Taşkın ve ark., 2009 [37]	Kırklareli- Türkiye	28	40	667	71	87
Tufan and Bostancı, 2012 [83]	Samsun- Türkiye	19,0	22,0	521	45	55
Uğur ve ark., 2013 [84]	Osmaniye- Türkiye	10,4	12,2	639,7	22,4	30
Yalçın ve ark., 2012 [85]	Erzincan- Türkiye	8,93	1,4	281,9	22,8	27,90
Ağar ve ark., 2014 [86]	Karaman- Türkiye	28,3	21,6	342,4	42,3	51,82
Baldık ve ark., 2011 [38]	Karabük- Türkiye	21	23,5	363,5	39,0	47,9
Ravisankar ve ark., 2012 [104]	Nadu- Hindistan	19,2	48,6	1146,7	88,6	106
Saleh and Shayeb., 2014 [109]	Ma'An- Ürdün	44,9	18,1	138,1	37,2	45,59
Rajeshwari ve ark., 2014 [110]	Bidar- Macaristan	26,1	29,0	142,32	34,5	42,27
Jankovic ve ark., 2008 [111]	Sırbistan	64	41	536	69	0,85
Mevcut Çalışma	Sakarya- Türkiye	19,3	19,7	367	31,79	38,98

4.2. Kuzey Sakarya Bölgesi Topraklarında Radon Yayılım Hızı Ölçüm Sonuçları

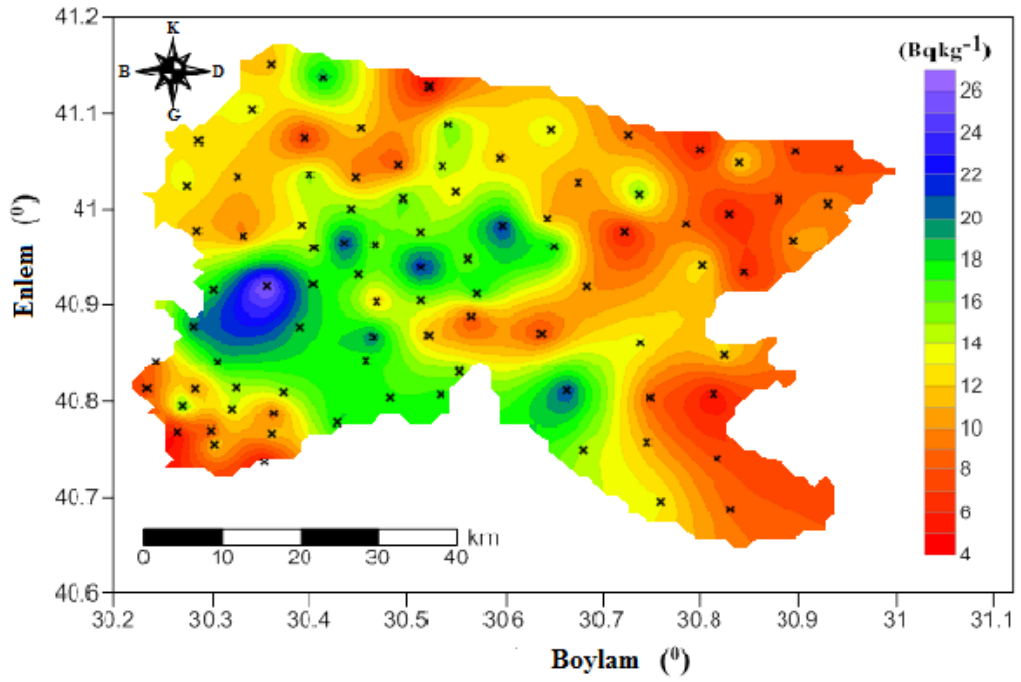
Kontur haritaları, çevresel radyasyon araştırması sonuçlarını yorumlamada daha pratik olduğundan, Kuzey Sakarya'dan toplanan toprak örneklerinin etkin radyum içerikleri, yüzey ve kütle radon yayılım hızları Şekil 4.7.-4.9.'da detaylı şekilde haritalandırılmıştır. Kontur haritaları "Krigleme interpol metoduyla" oluşturulmuştur. Kontur haritasında koyu kırmızı ve mavi renkler sırasıyla düşük ve yüksek değerleri göstermektedir.



Şekil 4.7. Çalışma bölgesinde kütle radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Kuzey Sakarya).



Şekil 4.8. Çalışma bölgesinde yüzey radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Kuzey Sakarya).



Şekil 4.9. Çalışma bölgesindeki etkin radyum içeriği spesifik aktivitesinin dağılımını gösteren kontur haritası (Kuzey Sakarya).

Kuzey Sakarya toprak örneklerindeki etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızları yaklaşık olarak benzer dağılım göstermektedir. Üç büyüklük için de çalışma bölgesinin doğusundaki ölçüm sonuçlarının, batısındaki ölçüm sonuçlarından daha düşük olduğu bulunmuştur. Özellikle, Adapazarı'ndan toplanan örneklerde ölçülen etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızları diğer örnekler göre daha yüksek bulunmuştur. Bu üç büyüklük dağılımlarının en yüksek değeri ADA-2 istasyonundan alınan örnekte ölçülmüştür. ADA 1-10, FER 1-10, SÖĞ 1-10, KAY-2 ve HEN-3 örnek noktalarından alınan topraklarda ölçülen etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızı değerleri diğer örneklerin ölçülen değerlerinden biraz daha yüksek bulunmuştur.

Kuzey Sakarya'dan toplanan toprak örneklerindeki etkin radyum içeriğinin, yüzey ve kütle radon yayılım hızlarının değişimi, ortalama değerleri ve standart sapmaları (SD) Tablo 4.3.'de özetlenmiştir. Tablo 4.3.'ten etkin radyum içeriğinin ortalama değeri $8,84-18,41 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında, kütle yayılım hızlarının ortalama değeri $83,87-174,69 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve yüzey radon yayılım hızlarının ortalama değerinin $1,72-3,58 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ aralığında değiştiği görülmektedir. Etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızlarının en büyük değeri Adapazarı'nda ölçülürken, en düşük değerleri ise Kocaeli ilçesinde kaydedilmiştir. Tablo 4.3.'deki verilerden de görülebileceği gibi, radon konsantrasyonları bölgeler arasında önemli değişiklikler göstermemektedir. Bu durum bölgenin jeolojisiyle ilgili olabilir. Tortullu yerlerdeki radon yayılım hızındaki küçük farklılık 2009'da Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmayla gösterilmiştir [94]. Buna karşın, bu çalışmada granit bölgelerde ölçülen değerler ile diğer jeolojik yapıya sahip topraklarda yapılan ölçümler arasında geniş farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir [95]. Tablo 4.3. ve Tablo 4.4.'te sunulan değerler UNSCEAR (2000) tarafından tavsiye edilen değerlerden oldukça küçüktür [1].

Tablo 4.3. Kuzey Sakarya bölgesi toprak örneklerindeki etkin radyum içeriği değerleri (değişim, ortalama ve standart sapma)

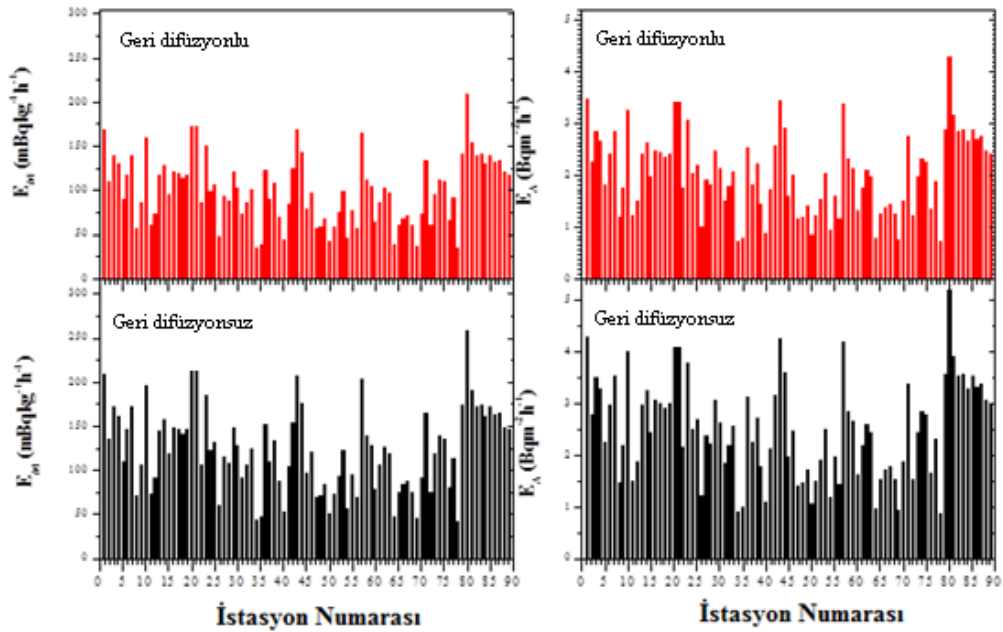
İlçe	C_{Ra}^{eff} (Bqkg ⁻¹)		
	Değişim	Ortalama	Standart sapma
Söğütlü	7,46-22,03	15,56	4,54
Ferizli	7,73-22,50	14,54	4,04
Kaynarca	6,25-19,52	12,51	3,24
Karasu	4,58-22,85	11,96	5,53
Kocaali	5,39-12,89	8,84	2,57
Hendek	5,00-21,49	11,15	4,37
Serdivan	4,44-17,42	10,22	3,99
Adapazarı	15,33-27,14	18,41	3,18

Tablo 4.4. Kuzey Sakarya bölgesi toprak örneklerindeki kütle ve yüzey radon yayılım hızı değerleri (değişim, ortalama ve standart sapma)

İlçe	E_M (mBqkg ⁻¹ h ⁻¹)			E_A (Bqm ⁻² h ⁻¹)		
	Değişim	Ortalama	Standart sapma	Değişim	Ortalama	Standart sapma
Söğütlü	70,80-208,97	147,58	43,03	1,45-4,28	3,02	0,88
Ferizli	73,32-213,42	137,98	38,28	1,50-4,37	2,83	0,78
Kaynarca	59,27-185,16	118,72	30,69	1,21-3,79	2,43	0,63
Karasu	43,45-207,36	113,50	52,48	0,89-4,25	3,32	1,07
Kocaali	51,12-122,31	83,87	24,39	1,05-2,50	1,72	0,50
Hendek	47,45-203,89	105,82	41,41	0,97-22,50	2,17	0,85
Serdivan	42,16-165,28	96,05	37,90	0,86-3,38	1,90	0,78
Adapazarı	145,45-257,38	174,69	30,19	2,98-5,27	3,58	0,62

Şekil 4.10.'da kütle ve yüzey birimlerinde ölçülen radon yayılım hızlarına geri difüzyonun etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.10.'da üstte verilen iki grafikte geri difüzyon hesaba katılmış fakat altta verilen grafiklerde geri difüzyon hesaba katılmadan grafikler oluşturulmuştur ve buradan topraktaki geri difüzyondan dolayı kütle ve yüzey yayılım hızlarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar 2008'de Matiullah tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile uyumludur [96].

Kuzey Sakarya toprak örneklerindeki eşdeğer radyum içeriğinin 4,444-27,141 Bqkg⁻¹ aralığında değiştiği ve ortalama değerinin 12,970 Bqkg⁻¹ olduğu bulunmuştur. Yüzey yayılım hızı 0,863-5,273 Bqm⁻²h⁻¹ arasında 2,520 Bqm⁻²h⁻¹ ortalama değer ile değişirken, kütle yayılım hızı ise 42,161-257,474 mBqkg⁻¹h⁻¹ aralığında 123,040 mBqkg⁻¹h⁻¹ ortalama değer ile değişmektedir. Ölçülen toprak örneklerinde etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey yayılım hızlarının ortalama değerleri sırasıyla 11,970 Bqkg⁻¹, 113,551 mBqkg⁻¹h⁻¹ ve 2,352 Bqm⁻²h⁻¹ olarak bulunmuştur. Etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey yayılım hızlarının medyan değerleri ise sırasıyla 12,875 Bqkg⁻¹, 122,141 mBqkg⁻¹h⁻¹ ve 2,501 Bqm⁻²h⁻¹ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.10. Ölçülen yüzey ve kütle radon yayılım hızları üzerinde geri difüzyonun etkisi (Üstteki kırmızı ve alttaki siyah grafikler sırasıyla geri difüzyonlu ve geri difüzyonsuz hesaplamaları gösterir).

Ölçüm sonuçlarının daha iyi yorumlanabilmesi için, Tablo 4.5.'te Kuzey Sakarya için etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının istatistiksel analizi verilmiştir.

Tablo 4.5. Kuzey Sakarya toprak örneklerindeki etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının istatistiksel analizi

İstatistikler	C_{Ra}^{eff} ($Bqkg^{-1}$)	E_M ($mBqkg^{-1}h^{-1}$)	E_A ($Bqm^{-2}h^{-1}$)
Minimum	4,444	42,161	0,863
Maksimum	27,141	257,474	5,273
Değişim	22,697	215,313	4,409
Ortalama	12,970	123,040	2,520
Varyans	24,396	2195,472	0,921
Medyan	12,875	122,141	2,501
GM	11,970	113,551	2,325
SD	4,94	46,856	0,960
Skewness	0,293	0,2928	0,293
Kurtosis	-0,357	-0,357	-0,357
Shapiro-Wilk	0,200	0,200	0,200
Kolmogorov-Smirnov	1,00	1,00	1,00

Kuzey Sakarya'daki etkin radyum içeriğinin ortalama değerinin ($12,97 Bqkg^{-1}$), Güney Sakarya bölgesinin ortalama radyum içeriği değerine ($11,86 Bqkg^{-1}$) yakın olduğu görülmüştür.

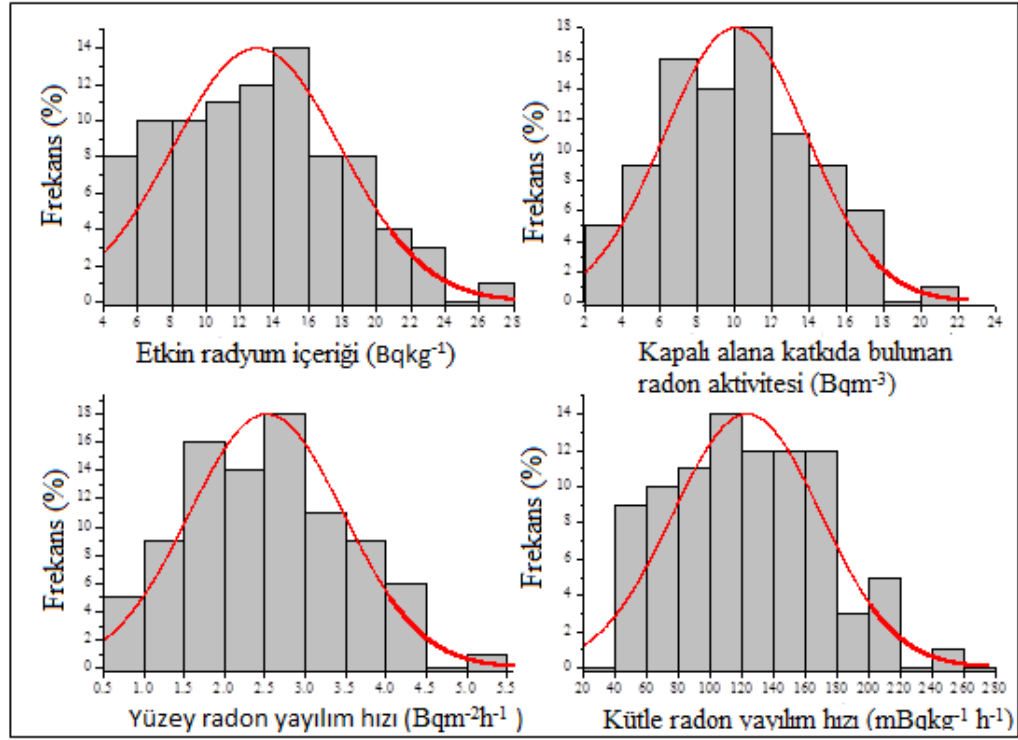
Her iki bölgede ölçülen ortalama yüzey radon yayılım hızları ($2,30 \pm 0,8$ ve $2,52 Bqm^{-2}h^{-1}$) Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR, 2000) tarafından verilen yıllık ortalama değerden ($118,8 Bqm^{-2}h^{-1}$) daha düşüktür [1]. Radon yayılım hızı, toprağın tanecik boyutu, yoğunluğu, gözenekliliği ve geçirgenliği gibi birçok etkene bağlı olmakla birlikte, topraktaki uranyum ve radyum konsantrasyonuna da bağlı olarak değişiklik gösterir. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun (TAEK) yaptığı bir araştırmada, Sakarya toprak örneklerindeki ortalama radyum aktivitesinin $15,03 Bqkg^{-1}$ olduğu ölçülmüştür [97]. Bu değer UNSCEAR (2000) tarafından tavsiye edilen dünyadaki ortalama radyum değeri olan $32 Bqkg^{-1}$ 'in çok altındadır [1]. Bu nedenle, bu çalışmadaki

nispeten düşük radon yayılım hızlarının (2,30 ve 2,52 $\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$) bölge topraklarındaki düşük radyum aktivitesinden (15,03 Bqkg^{-1}) kaynaklandığı söylenebilir.

Radyum varlığının jeolojik yapı ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Genellikle, granitler nispeten yüksek radyum içeriğine, tortullar ve metamorfik kayalar orta içeriğe, bazaltlar ve kireç taşları ise düşük radyum içeriğine sahiptirler. Bununla birlikte, bazı killi şistler ve fosfat kayaların nispeten yüksek radyonüklit konsantrasyonuna sahip olduğu istisnai durumlar da vardır. Bu çalışmada örnekleme alanlarındaki kaya tipleri tortullardır, özellikle kuvaterner döneme ait tortullar daha yaygındır. Kuvaterner döneme ait tortullardaki radyonüklit konsantrasyonu diğer jeolojik yapılara kıyasla daha düşüktür. [98].

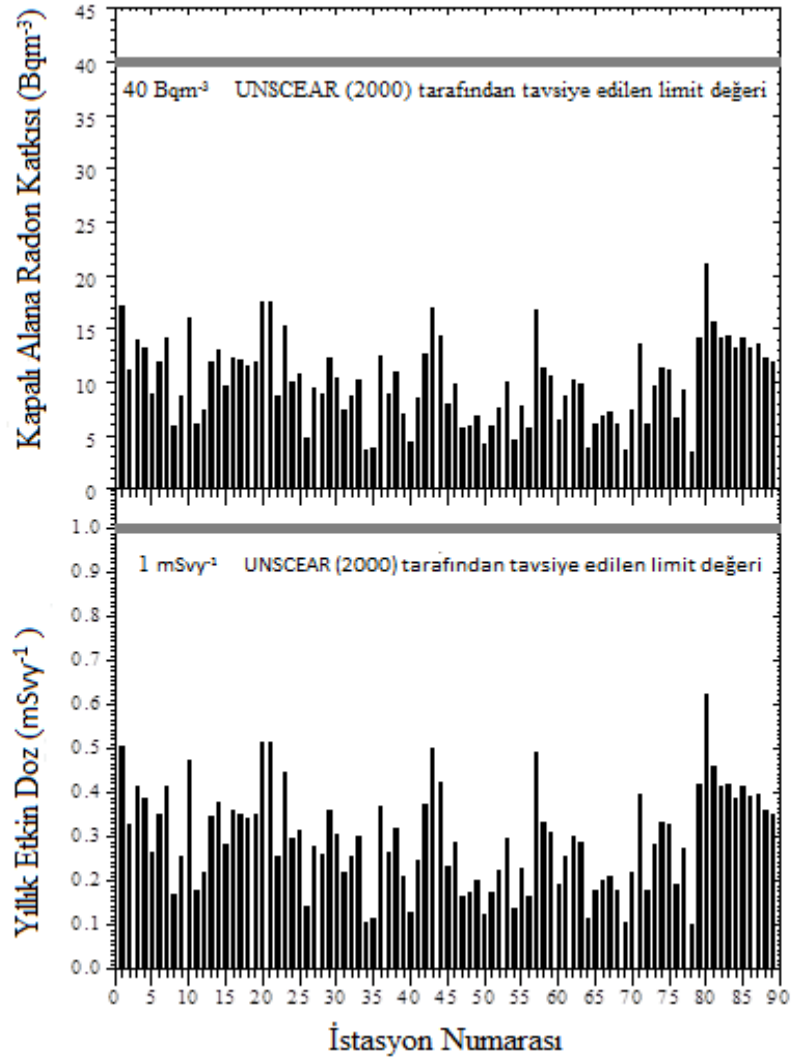
Doğal örneklerin radon kaynağı terimi olarak tanımlanan etkin radyum konsantrasyonu $C_{\text{Ra}}^{\text{eff}}$ (Bqkg^{-1}), radyum konsantrasyonunun (C_{Ra}) emanasyon katsayısıyla (E) çarpımıdır [99]. Bir başka deyişle, etkin radyum içeriği $C_{\text{Ra}}^{\text{eff}}$ örnekten yayılan radona karşılık gelen radyum oranıdır [100]. Bu sebeple, tüm radonun örnek matristen kaçmamasından dolayı, etkin radyum konsantrasyonu daima mevcut radyum konsantrasyonundan daha düşüktür.

Şekil 4.11.'de 89 toprak örneğinde ölçülen etkin radyum içeriği, kapalı alana katkıda bulunan radon aktivitesi, yüzey ve kütle radon yayılım hızı değerlerinin frekans dağılımları gösterilmiştir. Şekil 4.11'den etkin radyum içeriği, kapalı alana katkıda bulunan radon aktivitesi, yüzey ve kütle radon yayılım hızlarına ait frekans dağılımlarının normal dağılıma daha yakın olduğu açıkça görülmektedir. Çünkü sonuçların ortalama değeri, mod ve medyana hemen hemen eşit bulunmuştur.



Şekil 4.11. Kuzey Sakarya'dan toplanan 89 toprak örneğindeki etkin radyum içeriği, kapalı alana katkıda bulunan radon aktivitesi, kütle ve yüze radyon yayılım hızlarının frekans dağılımları.

Kapalı ortamdaki radonun yıllık etkin doza katkısının tahmini için, kapalı alana topraktan yayılan radonun katkısı ölçülen yüze radyon yayılım hızları kullanılarak belirlenmiştir [17]. Şekil 4.12.'de Kuzey Sakarya için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri gösterilmiştir. Çalışma alanındaki, tahmini yıllık etkin doz, tavsiye edilen sınır değerinin ($3-10 \text{ mSvy}^{-1}$, UNSCEAR, 2000) oldukça altındadır [1].



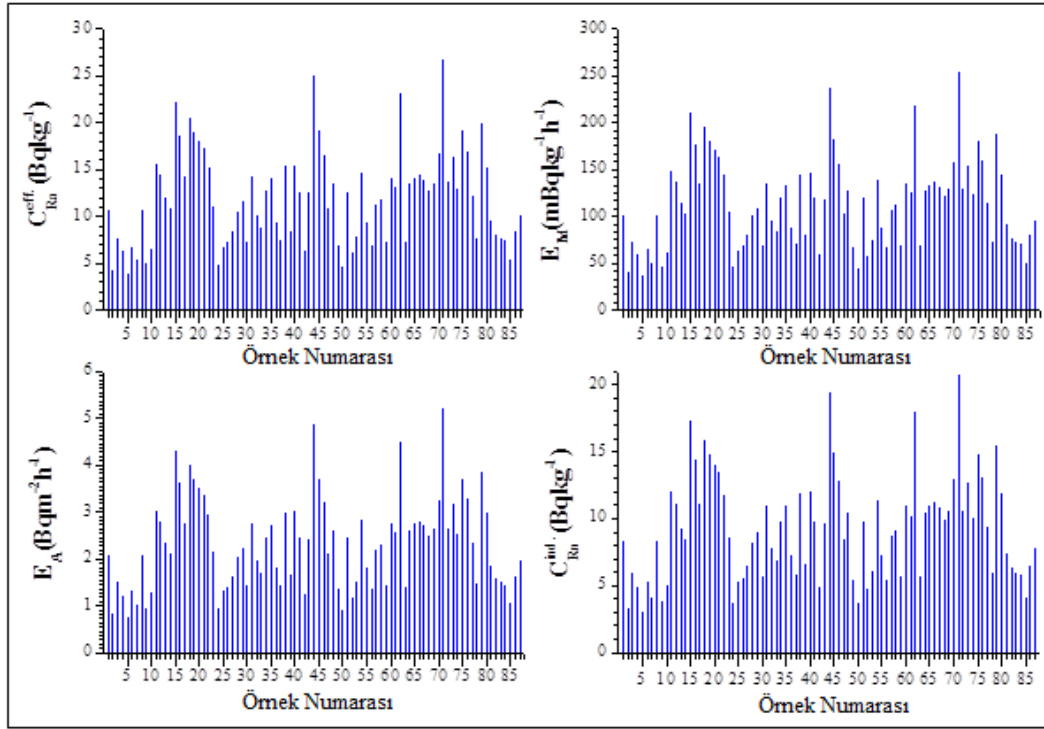
Şekil 4.12. Kuzey Sakarya'da yetişkinler için kapalı alana katkıda bulunan radon konsantrasyonu ve karşılık gelen yıllık eşdeğer doz değeri.

4.3. Güney Sakarya Bölgesi Topraklarında Radon Yayılım Hızı Ölçüm Sonuçları

EK A. ve Ek B.'deki tablolardan görülebileceği gibi, radon yayılım hızı örnekler arasında önemli ölçüde değişir. Örneklerin doğası arasındaki farklılık toprak örneklerinin arasında radon yayılım hızının farklılık göstermesinin bir sonucu olabilir [13]. Farklı formasyonlardan toplanan örnekler, farklı geometri ve tanecik boyutuna sahip olduklarından topraktan yayılan radon hızını etkilemektedirler [101]. Bunun yanı sıra, bu değişimler örneklerin radyum içeriklerindeki farklılıktan kaynaklanıyor olabilir çünkü radyum farklı bölgelerde değişik

konsantrasyonlarda bulunabilir [4, 13, 17]. Birçok çalışmada, topraktan radon yayılım hızı ve radyum içeriği arasında bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir [102]. Diğer bir sebep ise, örnekleme alanlarının jeolojik yapılarının farklılığıdır. Genellikle, granit yüzeylerde ^{226}Ra konsantrasyonu daha büyük olabileceğinden bu kayaların jeolojik yapıya hakim olduğu yerlerde ki radon yayılım hızları, jeolojik yapısı kumtaşı ve riyolitten oluşan bölgelerdekenden daha büyüktür. Yüzey jeolojisinin radon yayılım hızını etkileyen faktörlerden biri olduğu diğer çalışmaların sonuçları tarafından doğrulanmaktadır [6]. Ayrıca, ^{222}Rn yayılım hızını, ^{226}Rn 'nin bozunumundan meydana gelen radonun radyoaktif dağılımı, toprak taneciğinde radonun geri tepme yönü, radon difüzyonu ve topraktaki nem durumu gibi diğer birçok parametre etkilemektedir [103].

Güney Sakarya'nın değişik bölgelerinden toplanan toprak örneklerindeki etkin radyum içerikleri, kütle ve yüzey radon yayılım hızları ve bina içi radon konsantrasyonuna katkıda bulunan toprak gazı radon aktivite dağılımları Şekil 4.13.'de gösterilmiştir. Etkin radyum içeriği $3,77\pm 1,0-26,69\pm 2,6 \text{ Bqkg}^{-1}$ arasında değişirken ve $11,86\pm 1,7 \text{ Bqkg}^{-1}$ ortalama değere sahiptir. Kütle ve yüzey radon yayılım hızları sırasıyla $35,76 \pm 3,0-253,15\pm 8,0 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $0,73\pm 0,4-5,18\pm 1,1 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ aralığında $53\pm 5,3 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ve $2,30\pm 0,8 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ortalama değerlerle değişmektedir. Kapalı alana katkıda bulunan radon aktivitesi ise $2,93\pm 0,9-20,73\pm 2,3 \text{ Bqm}^{-3}$ arasında değişirken $9,22\pm 1,5 \text{ Bqm}^{-3}$ ortalama değere sahiptir. Şekil 4.15.-4.17.'den görüleceği gibi, kapalı alana radon katkısının maksimum olduğu Arifiye ilçesinden alınan (örnek 71) toprak örneğindeki etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey radon yayılım hızları da en yüksek değerleri almıştır. Bununla birlikte, kapalı alana radon katkısının minimum olduğu numunenin (Taraklı, örnek 5) etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey yayılım hızları da en düşük değerleri almıştır.

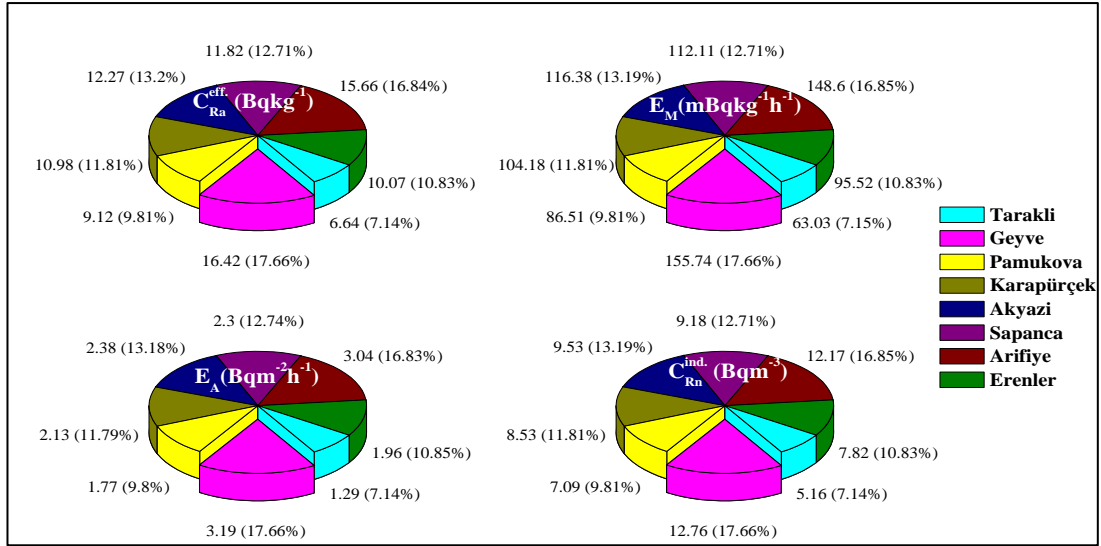


Şekil 4.13. (a) Etkin radyum içeriği (b) Kütle radon yayılım hızı (c) Yüzey radon yayılım hızı, (d) Topraktan yayılan radonun bina içi radon konsantrasyonu katkısı.

Şekil 4.13.'de görüldüğü gibi, dört ölçüm parametresi değerleri kendi içlerinde büyük değişimler göstermektedir. Etkin radyum içeriğindeki değişim, yerküre üzerinde değişik bölgelerdeki uranyum içeriğinin farklı olmasından kaynaklanıyor olabilir. Başka bir sebep ise, örnekleme bölgelerinin değişik jeolojik yapıya sahip olmasından kaynaklanabilir. Genellikle, granit bölgelerin radyoaktivitesi, kumtaşı ve riyolit bölgelerinden daha yüksektir [95]. Tanecik geçirgenliği, tanecik boyutu ve yapısı, örneğin mineral taneciğindeki radyum dağılımı, örneklerdeki radyum içeriğindeki değişkenlik gibi birçok etken yüzey ve kütle radon yayılım hızlarındaki değişime sebep olabilir. Farklı tipteki toprak örnekleri, farklı geometri ve tanecik boyutuna sahiptir. Radon yayılım katsayısını etkileyen en önemli etkenin, taneciklerdeki radyum aktivitesinin dağılımı olduğu iyi bilinmektedir. Özellikle, eğer radyum ince yüzeyli taneciklerde birikirse, radon üretimi artacak ve tanecikler arasındaki gözeneklere kaçan radon atomlarının sayısı da artacaktır. Dolayısıyla, radon emanasyon katsayısı da artacaktır. Diğer bir ifadeyle, malzemenin iç yapısı da (örneğin makroskopik

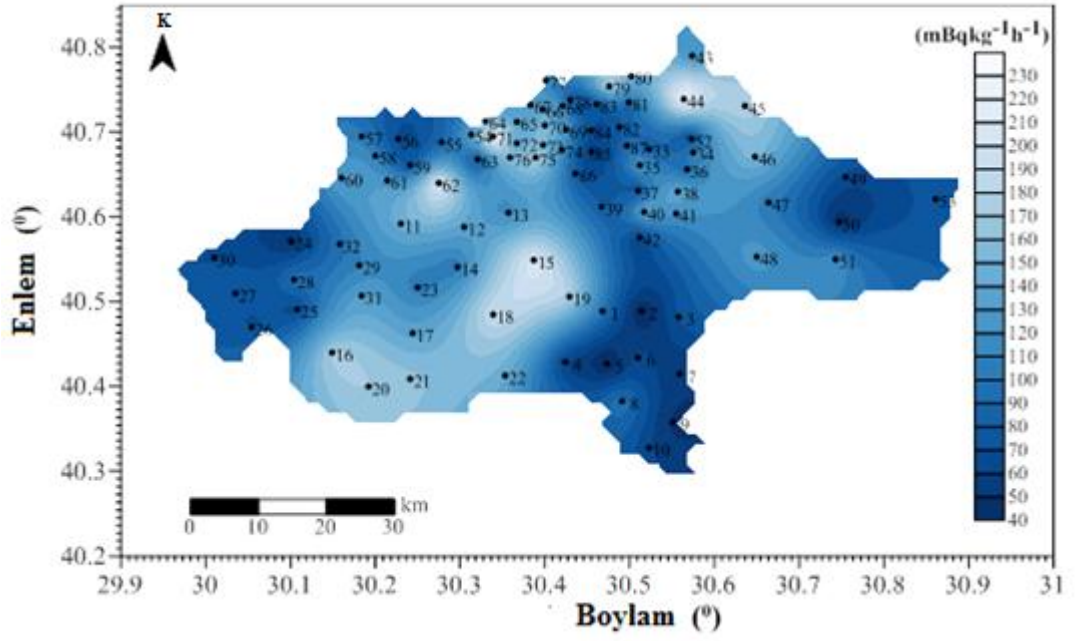
özellikleri, tanecik yüzeylerinin kristalizasyonu ve tanecik boyutu ve yapısı) emanasyon katsayısını etkileyecektir [102].

Şekil 4.14.'de Güney Sakarya bölgesindeki kapalı alana katkıda bulunan etkin radyum içeriğinin, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ve kapalı ortam radon konsantrasyonuna katkı veren toprak gazı radon aktivitesinin ortalama değerlerinin dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3.20.'de her bir ölçülmüş değerin Geyve ilçesine karşılık gelen oranının en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir.

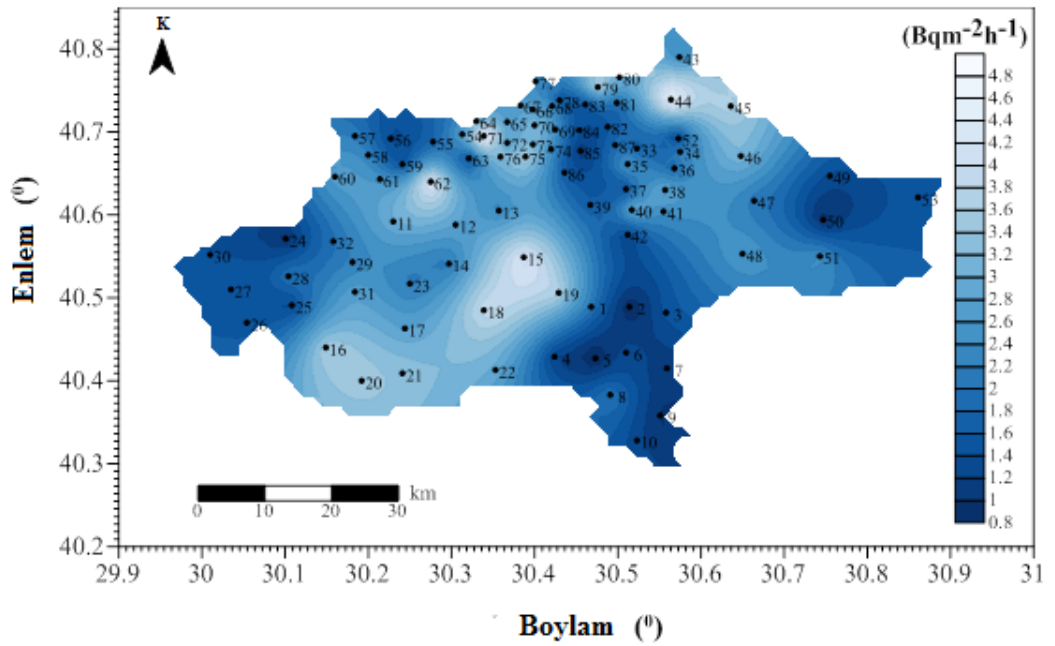


Şekil 4.14. Güney Sakarya bölgesindeki kapalı alana katkı yapan etkin radyum içeriğinin, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ve radon konsantrasyonunun dağılımı.

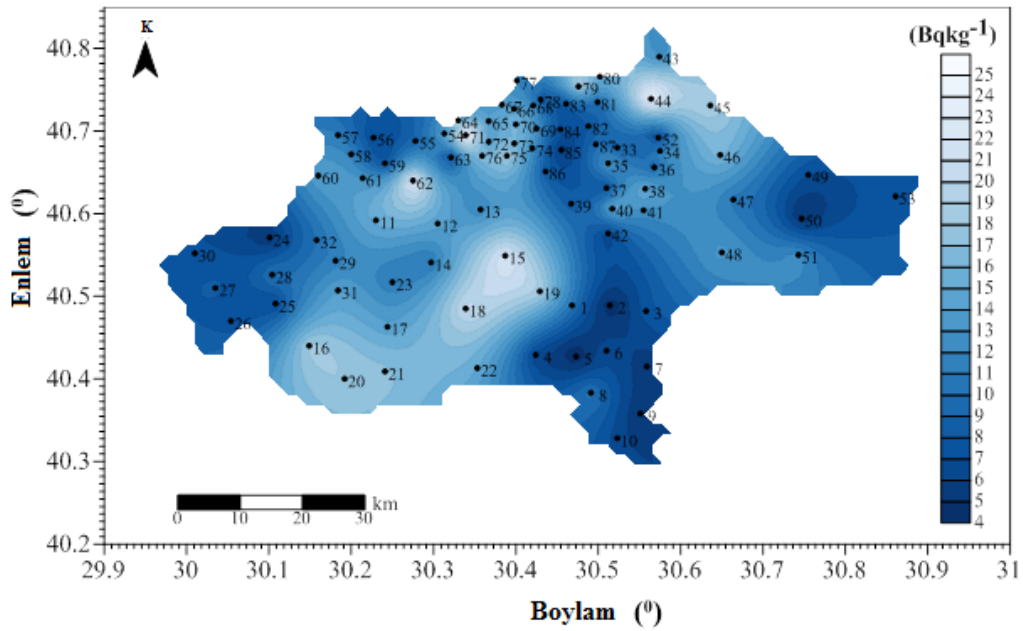
Güney Sakarya'dan toplanan toprak örneklerinin etkin radyum içerikleri, yüzey ve kütle radon yayılım hızları Şekil 4.15.-4.17.'de detaylı şekilde haritalandırılmıştır. Kontur haritaları "Krigleme interpol metoduyla" oluşturulmuştur. Kontur haritasında koyu mavi ve beyaz renkler sırasıyla düşük ve yüksek değerleri göstermektedir.



Şekil 4.15. Çalışma bölgesinde kütle radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Güney Sakarya).



Şekil 4.16. Çalışma bölgesinde yüzey radon yayılım hızı dağılımını gösteren kontur haritası (Güney Sakarya).



Şekil 4.17. Çalışma bölgesindeki etkin radyum içeriği spesifik aktivitesinin dağılımını gösteren kontur haritası (Güney Sakarya).

Güney Sakarya toprak örneklerindeki etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle yayılım hızları yaklaşık olarak benzer dağılımlar göstermektedir. Çalışma bölgesinin doğusunda her üç büyüklük için elde edilen sonuçlar, batıdaki ölçüm sonuçlarından daha düşüktür. Özellikle, Geyve'den toplanan örneklerdeki etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızları diğer örnekleme istasyonlarında ölçülen değerlere göre daha yüksektir. Şekil 4.15.-4.17.'den görüleceği gibi, her üç nicelik için de maksimum değerler 71 (Arifiye) numaralı istasyondan alınan numunede ölçülmüştür. Bunun yanı sıra, 15 (Geyve), 18 (Geyve), 44 (Akyazı) ve 62 (Sapanca) istasyonlarından alınan numunelerde ölçülen etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızları diğer istasyonlardan alınan numunelerin ölçüm sonuçlarına göre daha yüksek bulunmuştur. Şekil 4.17.'den görüldüğü gibi, örneklerin %76'sında etkin radyum içeriği $0,8-10 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında, %23'ünde $10-25 \text{ Bqkg}^{-1}$ aralığında değişmekte iken sadece bir örnekte etkin radyum içeriği 25 Bqkg^{-1} 'i aşmıştır. Şekil 4.15.'ten, numunelerin %81,6'sının kütle radon yayılım hızı değerleri $150 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ 'in altında, %4,6'sının ise $200 \text{ mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$ 'in üstünde olduğu görülmektedir. Şekil 4.16. ise numunelerin %90,8'inde yüzey radon yayılım hızının $0,7-3,5 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$

arasında değiştiğini ve en büyük değerinin ise $5,18 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$ olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.6.'da Güney Sakarya için kapalı alana katkıda bulunan toprak gazı radon aktivite konsantrasyonu, kütle ve radon yüzey yayılım hızları ile etkin radyum içeriğine ait istatistiksel analizler verilmiştir.

Tablo 4.6. Güney Sakarya bölgesinde kapalı alana katkıda bulunan toprak gazı radon aktivite konsantrasyonu, kütle ve yüzey radon yayılım hızları ile etkin radyum içeriğine ait istatistiksel analizler

İstatistikler	$C_{Ra}^{eff} (\text{Bqkg}^{-1})$	$E_M (\text{mBqkg}^{-1}\text{h}^{-1})$	$E_A (\text{Bqm}^{-2}\text{h}^{-1})$	$C_{Rn}^{ind} (\text{Bqm}^{-3})$
Değişim	3,77±1,0 - 26,69±2,6	35,76±3,0 - 253,15±8,0	0,73±0,4 - 5,18±1,1	2,93±0,9 - 20,73±2,3
Ortalama	11,86±1,7	112,53±5,3	2,30±0,8	9,22±1,5
Medyan	11,72	111,19	2,278	9,11
GM	10,84	102,82	2,11	8,42
Mod	7,37	69,90	1,43	5,73
SD	4,96	47,06	0,96	3,86
COV	0,42	0,42	0,42	0,42
Skewness	0,64	0,64	0,64	0,64
Kurtosis	0,17	0,17	0,17	0,17
Kolmogorov- Smirnov	0,01	0,01	0,01	0,01

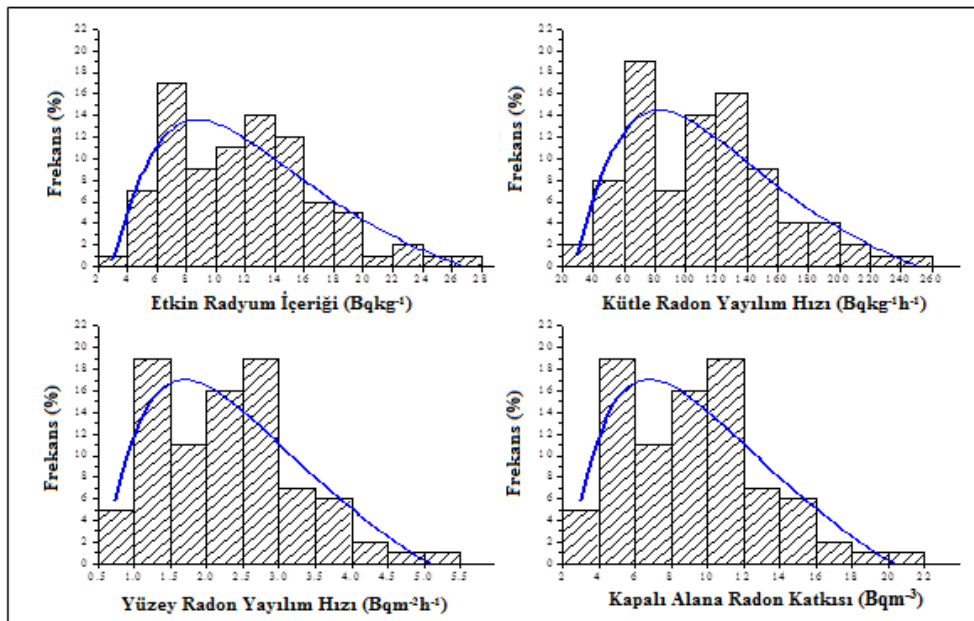
Güney Sakarya'da kapalı alana katkıda bulunan ortalama toprak gazı radon spesifik aktivitesi, kütle ve yüzey radon yayılım hızları ve etkin radyum içeriği sırasıyla $9,22±1,51$, $112,53±5,3$, $2,30±0,8$ ve $11,86±1,7$ olarak bulunmuştur. Toprak rneklerinin %23'nde kapalı alana katkıda bulunan ortalama toprak gazı radon spesifik aktivitesinin, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ve etkin radyum içeriğinin alt çeyrek dilim değerlerinden (sırasıyla 5,90, 72,03, 1,47 ve 7,59) daha düşük, %25'inde ise üst çeyrek dilim değerlerinden (sırasıyla 11,28, 137,75, 2,82 ve 14,52) daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Her iki bölgede de ölçülen ortalama yüzey radon yayılım hızları ($2,30 \pm 0,8$ ve $2,52 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$), Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR, 2000) tarafından verilen yıllık ortalama değerden ($118,8 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$) daha düşüktür [1]. Radon yayılım hızının tanecik boyutu, yoğunluk, gözeneklilik ve geçirgenlik gibi birçok etkene bağlı olmasına rağmen, topraktaki uranyum ve radyum konsantrasyonuna bağlı olması da beklenir [53]. Bu bölgede ölçülen değerler UNSCEAR (2000) [1] tarafından tavsiye edilen dünya genelindeki ortalama radyum değeri olan 32 Bqkg^{-1} 'in çok altındadır. Bu nedenle, bu çalışmadaki nispeten düşük radon yayılım hızlarının ($2,30$ ve $2,52 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$) bölge topraklarındaki düşük radyum aktivitesinden ($15,03 \text{ Bqkg}^{-1}$) kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 4.6.'da verilen ve değişik jeolojik formasyonlardan toplanan toprak örneklerinde kapalı ortama katkıda bulunan toprak gazı radon konsantrasyonları, kütle ve yüzey yayılım hızları ve etkin radyum içeriği için Skewness ve Kurtosis hesapları da verilmiştir. Skewness, olasılık teorisi ve istatistikte, reel-değerli bir serbest değişkenin olasılık dağılımının ortalama değer etrafındaki asimetrisinin bir ölçüsüdür. Eğer Skewness sıfırsa, veriler mükemmel bir şekilde simetriktir ve normal dağılım gösterir. Bununla birlikte, gerçek hayatta bu pek mümkün olmamaktadır. Bu yüzden, veri setinin çarpıklığını anlamak ortalama değerden sapmanın pozitif veya negatif olduğunu bulmamızı sağlar [104, 105]. Pozitif Skewness dağılımın sağ kuyruğunun daha uzun olduğunu ve değerlerin solda yoğunlaştığını gösterir [104]. Böyle bir dağılımda, ortalama değer $>$ medyan $>$ mod'dur [106]. Diğer taraftan, negatif Skewness, dağılımın sol kuyruğunun daha uzun olduğunu ve verilerin sağda yoğunlaştığını gösterir. Böyle bir dağılımda, ortalama değer $<$ medyan $<$ mod'dur [106]. Kurtosis gerçek-değerli bir değişkenin olasılık dağılımının düzgünlüğünün bir ölçüsüdür. Pozitif Kurtosis oldukça sivri bir dağılımı gösterirken, negatif Kurtosis oldukça düz bir dağılımı gösterir. [104].

Etkin radyum içeriğinin, yüzey ve kütle yayılım hızlarının pozitif Skewness değerlerine sahip olması, dağılımın sağa çarpık olduğunu gösterir. Ölçülen Skewness değerlerinin -0,5 ile 0,5 arasında olması da dağılımın yaklaşık olarak simetrik olduğu anlamına gelir. Tablo 4.6.'da verilen pozitif ve düşük Kurtosis katsayısı, düz bir pik yerine ortalama değere yakın şekilde bir pik elde edileceğini göstermektedir.

Şekil 4.18.'de 87 örneğin frekans dağılımlarının grafikleri etkin radyum içeriği, yüzey radon yayılım hızı ve kütle radon yayılım hızı için gösterilmiştir. Genellikle, etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızlarının frekans dağılımlarının normal dağılıma daha yakın olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Çünkü sonuçların ortalama değeri, mod ve medyana hemen hemen eşit bulunmuştur.

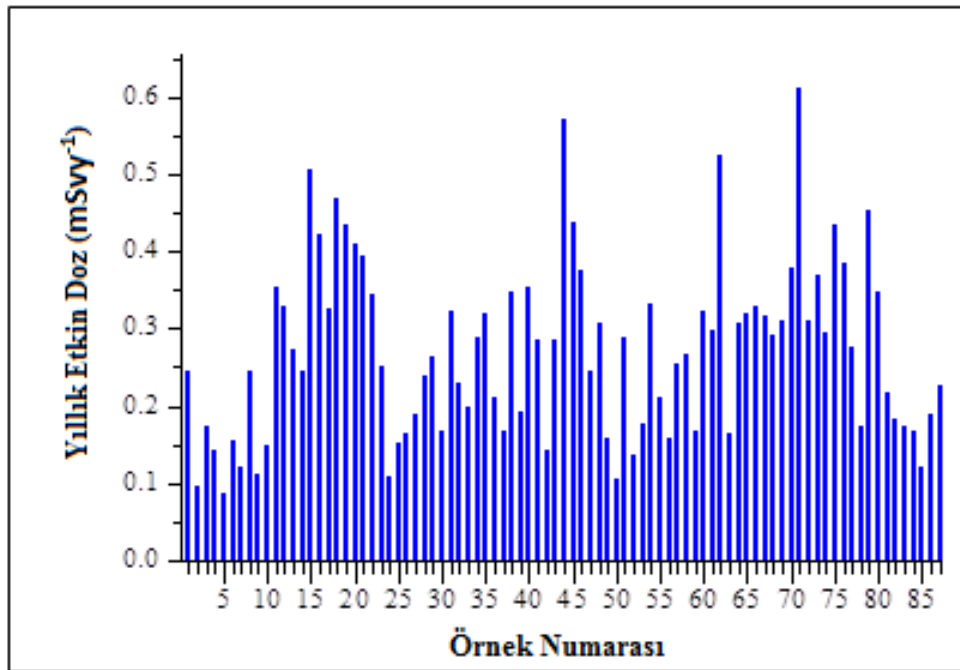


Şekil 4.18. Güney Sakarya toprak örneklerindeki etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey radon yayılım hızları ve kapalı alana katkıda bulunan toprak gazı radon spesifik aktivitesi.

Histogramlar, Kolmogorov-Smirnov (değer seviyesi $p > 0,05$) test değerleri kullanılarak normal ve log-normal dağılım fonksiyonları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.18.'de verilen dağılım grafikleri, açıkça verilerin normal dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Değerlerin nasıl bir dağılım gösterdiğini anlamının diğer bir yolu da, ölçülen medyan değeri ile aritmetik ortalama veya

geometrik ortalamayı kıyaslamaktır. Eğer dağılım normal ise, aritmetik ortalama medyana eşit olmalıdır [106]. Tablo 4.6.'dan görülebileceği gibi, medyan ve aritmetik ortalamanın yaklaşık eşit değerleri, Kuzey ve Güney Sakarya'dan toplanan toprak örneklerindeki kapalı ortama katkıda bulunan toprak gazı radon konsantrasyonu, kütle ve yüzey yayılım hızları ve etkin radyum içeriği normal dağılım gösterdiğini doğrulamaktadır. Ayrıca, Kolmogorov-Smirnov testleri (p-değerinin 0,05'ten büyük olduğu) normal dağılımı doğrulamaktadır.

Kapalı ortamdaki yıllık etkin doz eşdeğeri, yüzey radon yayılım hızından yola çıkılarak kapalı ortama katkı veren toprak gazı radon konsantrasyonu değerleri kullanılarak belirlenmiştir [17]. Şekil 4.19.'da Güney Sakarya bölgesi için hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri gösterilmiştir. Çalışma alanlarındaki, tahmini yıllık etkin doz, tavsiye edilen sınır değerden ($3-10 \text{ mSvy}^{-1}$ UNSCEAR, 2000) daha düşüktür [1].



Şekil 4.19. Güney Sakarya bölgesi için yıllık etkin doz eşdeğerleri.

Tablo 4.7.'de Kuzey ve Güney Sakarya bölgelerinden toplanan toprak örneklerinin etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızlarının ölçülen değerlerinin dünya genelinde bu alanda yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 4.7.'den görülebileceği gibi, çalışma alanı için belirlenen etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızı değerleri arasında büyük farklılıklar vardır. Bu çalışmalardaki farklılıklar muhtemelen toprak örneklerindeki radyum içeriklerinden ve örneklerin toplandıkları bölgenin jitolojilerindeki (taşbilimi) farklılıktan kaynaklanmaktadır. Toprak-gazı radon ve radyonüklid göçü jeolojik olarak aktif fay hatlarına yakın yerlerde daha fazladır. Radon yayılım hızı ve toprak-gazı radon arasında zayıf bir ilişki vardır. Radon yayılım hızına etki eden temel faktör olan radon, toprakta uranyum ve radyum içeriğinden çok yüksek bir mobiliteye sahiptir [6].

Bu alanda farklı ülkelerde yapılan çalışmaların sonuçları ile mevcut çalışmamızda elde edilen kütle ve yüzey radon yayılım hızı değerleri karşılaştırıldığında, çalışmamızda ölçülen değerlerin Mısır ve Hindistan'da yapılan çalışmalarda ölçülen değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Türkiye'de Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Hatları ile Hindistan'ın Punjab bölgesinde yapılan çalışmalarda ölçülen etkin radyum içeriği değerinin ise çalışmamızda elde ettiğimiz değerden daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, çalışmamızda ortaya konulan etkin radyum içeriği ve kütle radon yayılım hızı değerleri Libya, Hindistan ve Mısır'da yapılan çalışmalarda rapor edilen değerler ile karşılaştırılabilir seviyededir [4, 17, 18].

Tablo 4.7. Sakarya'dan toplanan toprak örneklerindeki etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey radon yayılım hızı değerlerinin başka ülkelerde elde edilen değerler ile karşılaştırması

Çalışılan Ülke	C_{Ra} ($Bqkg^{-1}$)	E_M ($mBqkg^{-1}h^{-1}$)	E_A ($Bqm^{-2}h^{-1}$)	Çalışma Ref.
Libya	1,5-25,3	1,16-19,13	0,031-0,507	Saad ve ark., 2013 [17]
Hindistan	13,8-298,9	0,0039-0,082	-	Prasad ve ark., 2008 [6]
Mısır	5,72-157,99	8,31-233,70	0,48-15,37	El-Zaher., 2013 [18]
Hindistan	5,70 – 25,45	7,17-31,98	0,246-1,100	Singh ve ark., 2005 [4]
Punjab-Hindistan	1,39-5,31	1,62-6,55	0,053-0,217	Kumar and Narang., 2014 [24]
Assam-Hindistan	10,54-49,67	-	0,502-2,063	Kakati ve ark., 2013 [108]
Kuzey ve Doğu Anadolu Fay Sistemleri, Türkiye	0,02-0,80	-	0,0013-0,4	Baykara ve ark., 2005 [29]
Pakistan	-	-	0,171-0,344	Rafique ve ark., 2011 [10]
Pakistan	-	-	0,038-0,288	Mujahid ve ark., 2010 [9]
Hindistan	-	-	0,529-1,685	Kumar ve ark., 2008 [71]
Kuzey Sakarya, Turkey	4,444-27,141	42,161-257,474	0,863-5,273	Bu çalışma
Güney Sakarya, Turkey	3,77- 26,69	35,76-253,15	0,73-5,18	Bu çalışma

Ayrıca, kütle radon yayılım hızı değerleri, Hindistan'da Singh ve Prasad ve Libya'da Saad tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir [6, 17]. Mevcut çalışmanın yüzey radon yayılım hızı açısından sonuçları Hindistan, Pakistan ve Türkiye'de yapılmış çalışmalardaki verilerden daha yüksektir. Öte yandan, bu çalışmada gözlemlenen ortalama yüzey radon yayılım hızı dünya ortalaması olan $57,6 Bqm^{-2}h^{-1}$ (UNSCEAR, 2000) değerinin oldukça altındadır ve bu nedenle yerel halk için herhangi bir sağlık tehlikesi doğurmayacağı söylenebilir [1].

Kapalı alan radon seviyeleri ve topraktan radon yayılım hızı arasında güçlü bir ilişki olduğu bilinmektedir. Maalesef, Adapazarı'ndaki sınırlı sayıdaki binalarda yapılmış çalışma hariç, bizim yaptığımız çalışma alanında kapalı alan radonu ile ilgili hiç bir veri yayınlanmamıştır [107]. Bununla birlikte, kapalı alandaki yıllık etkin dozların tahmini için, ölçülen yüzey radon yayılım hızları kullanılarak, topraktan kapalı alana radon katkısı hesaplanabilir [17]. Hesaplamalarımıza göre, kapalı alan radon aktivitesine katkıda bulunan toprak gazı radon konsantrasyonu 3,454-20,09 Bqm⁻³ aralığında 10,078 Bqm⁻³ ortalama değer ile, yıllık etkin doz eşdeğeri ise 0,102-0,622 mSvy⁻¹ aralığında 0,29 mSvy⁻¹ ortalama değer ile değişmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Sakarya ili topraklarında doğal radyoaktivite düzeyi belirlenerek radyolojik risk değerlendirilmiştir. Bu amaç için Sakarya'nın değişik bölgelerinden toplanan toprak örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyonüklid aktivite konsantrasyonları gama spektrometresi tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar, çalışma alanındaki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklid aktivite konsantrasyonlarının geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Örnekten örneğe farklılık gösteren sonuçların, bölgelerin değişik jeolojik formasyonlara sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, tarım amaçlı gübreleme ve zaman zaman meydana gelen taşkınların ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarındaki değişimin diğer bir sebebi olabileceği düşünülmektedir. Doğal radyonüklidlerin aktivite konsantrasyonları ulusal ve uluslararası radyasyondan korunma kuruluşları tarafından tavsiye edilen limit değerlerinin altında bulunmuştur.

Aktivite ölçümlerine ek olarak, çalışma bölgesinde radyolojik riskin değerlendirilebilmesi için eşdeğer radyum aktivitesi, soğrulan gama doz oranları, yıllık etkin doz eşdeğerleri ve dış tehlike indeksleri de hesaplanmıştır. Yukarıda bahsedilen radyolojik risk parametrelerinin ortalama değerleri uluslararası ve ulusal kuruluşların önerdiği limit değerlerden oldukça düşüktür. Sonuç olarak, Sakarya topraklarındaki radyoaktivite seviyesinin radyolojik açıdan herhangi bir tehlike oluşturmadığı anlaşılmıştır.

Kuzey Sakarya ve Güney Sakarya'dan toplanan çok sayıda toprak örneği için kapalı kutu tekniği kullanılarak etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle yayılım hızları ve dağılımları belirlenmiştir. Radon ve ürünlerinden kaynaklanan radyasyon zararları, toprak örneklerinin radon yayılım hızlarından hesaplanabilir. Bunun için yüzey radon yayılım hızları ölçümlerinden doğrudan topraktan kapalı

alana radon konsantrasyonu katkısı hesaplanmıştır. Bu çalışmada mevcut verilerin değerlendirilmesinden, şu bilgiler edinilmiştir:

Sonuçlar, her iki bölgedeki topraklarda ölçülen etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle yayılım hızlarının önemli ölçüde değiştiğini gösterir. Bu farklılıklar, bazı örneklerin yüksek radyum ve uranyum içeriklerinden kaynaklanabilir. Ayrıca, bu farklılıklar çalışma bölgesinin jeolojik özelliklerinden de ortaya çıkabilir.

Geyve'den toplanan toprak örneklerinde ölçülen ortalama etkin radyum içeriği, ortalama kütle ve yüzey radon yayılım hızları, diğer toprak örneklerinde ölçülen değerlerden nispeten daha yüksektir.

Kuzey Sakarya'dan toplanan toprak örneklerindeki etkin radyum içeriğinin, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının maksimum değerleri, toprak yapısı tortullardan oluşan ADA-2'de ölçülmüştür.

Etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızları ve kapalı ortama katkı yapan toprak gazı radon aktivitesinin istatistiksel hesaplamalarındaki değerler normal dağılım göstermektedir.

Bu çalışmadaki etkin radyum içeriği, yüzey ve kütle radon yayılım hızlarının ölçülen değerleri, diğer ülkelerdeki çalışmaların sonuçları ile kıyaslanabilir düzeydedir.

Tüm incelenen toprak örneklerinden elde edilen etkin doz ICRP (1993) [78] tarafından tavsiye edilen etkin değerden ($3-10 \text{ mSvy}^{-1}$) daha düşük düzeyde bulunmuştur.

Çalışma alanında radondan kaynaklanan sağlık zararlarının değerlendirmesi için, kapalı alana toprak gazı radon katkısı ve yıllık eşdeğer dozları da hesaplanmıştır. Kapalı alana katkıda bulunan radon aktivitesi ve yıllık etkin doz eşdeğerleri UNSCEAR (2000) tarafından verilen güvenli limit değerleri içerisinde [1].

Bundan dolayı, bu bölgenin toprak örneklerinin oldukça güvenli ve yapılar için tehlikeli radon seviyesi üretmediği sonucu çıkarılabilir.

Ayrıca bu çalışma Sakarya ili topraklarında etkin radyum içeriği, kütle ve yüzey radon yayılım hızlarını belirlemek için yapılan ilk çalışma olması sebebiyle de önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations, New York, NY, USA.
- [2] Tunçkin, A.B., Demirci (Manisa) ilçesinin çevresel radyoaktivitesinin saptanması. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [3] Sharma D.K., Kumar A., Kumar M., Singh S., 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. Radiat. Meas., 36: 363-366, 2003.
- [4] 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.
- [5] Singh H., Singh J., Singh S., Bajwa B.S., Radon exhalation rate and uranium estimation study of some soil and rock samples from Tusham ring complex, India using SSNTD technique. Radiat. Meas., 43: S459-S462, 2008.
- [6] 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.
- [7] Gusain G.S., Prasad G., Prasad Y., Ramola R.C., Comparison of indoor radon level with radon exhalation rate from soil in Garhwal Himalaya. Radiat. Meas., 44: 1032-1035, 2009.
- [8] Singh J., Singh H., Singh S., Bajwa B.S., Uranium, radium and radon exhalation studies in some soil samples using plastic track detectors. India J. Phys., 83(8): 1147-1153, 2009.
- [9] Mujahid S.A., Hussain S., Ramzan M., Measurement of radon exhalation rate and soil gas radon concentration in areas of Southern Punjab, Pakistan. Radiat. Prot. Dosim., 140(3): 300-303, 2010.

- [10] Rafique M., Rahman S., Mahmood T., Rahman S., Matiullah, Rehman S., Radon exhalation rate from soil, sand, bricks and sedimentary samples collected from Azad Kashmir, Pakistan. *Russian Geol. Geophys.*, 52: 450-457, 2011.
- [11] 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.
- [12] Khan M.S., Naqvi A.H., Azam A., Srivastava D.S., Radium and radon exhalation studies of soil. *Iran. J. Radiat. Res.*, 8(4): 207-210, 2011.
- [13] Verma D., Khan M.S., Zubair M., Assessment of effective radium content and radon exhalation rates in soil samples. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 294: 267-270, 2012.
- [14] Zubair M., Khan M.S., Verma D., Measurement of radium concentration and radon exhalation rates of soil samples collected from some areas of Bulandshahr district, Uttar Pradesh, India using plastic track detectors. *Iran. J. Radiat. Res.*, 10(2): 83-87, 2012.
- [15] 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.
- [16] El-Farrash A.H., Yousef H.A., Hafez A.F., Activity concentrations of ^{238}U and ^{232}Th in some soil and fertilizer samples using passive and active techniques. *Radiat. Meas.*, 47: 644-648, 2012.
- [17] Saad A.F., Abdallah R.M., Hussein N.A., Radon exhalation from Libyan soil samples measured with the SSNTD technique. *Appl. Radiat. Isot.*, 72: 163-168, 2013.
- [18] El-Zaher M.A., A comparative study of the indoor radon level with the radon exhalation rate from soil in Alexandria City. *Radiat. Prot. Dosim.*, 154(4): 490-496, 2013.
- [19] Kumar G., Kumar A., Walia V., Kumar J., Gupta V., Yang T.F., Singh S., Bajwa B.S., Soil gas thoron-radon monitoring in Dharamsala area of north-west Himalayas, India using solid state nuclear track detectors. *J. Earth. Syst. Sci.*, 122(5): 1295-1301, 2013.
- [20] Baruah D.M.B., Deka P.C., Rahman M., Measurement of radium concentration and radon exhalation rate in soil samples using SSNTDs. *The African Rev. Phys.*, 8: 0032, 2013.

- [21] Mahur A.J., Gupta M., Varshney R., Sonkawade R.G., Verma K.D., Verma R., radon exhalation and gama radioactivity level in soil and radiation hazard assessment in the surrounding area of Nationa Thermal Power Corporation, Dadri (U.P.), India. *Radiat. Meas.*, 50: 130-135, 2013.
- [22] Dhawal S.J., Phadatare M.R., Thorat N.D., Kulkarni G.S., Pawar S.H., National radioactivity study in soil samples of south Konkan, Maharashtra, India. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1-9, 2013.
- [23] Chauhan R.P., Chauhan P., Pundir A., Kamboj S., Bansal V., Sainin R.S., Estimation of dose contribution from ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K and radon exhalation rates in soil samples from Shivalik Foot Hills in India., *Radiat. Prot. Dosim.*, 158(1): 79-86, 2014.
- [24] 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.
- [25] Sundar B.S., Chitra N., Vijayalakshmi I., Danalakshmi B., Chandrasekaran S., Jose M.T., Venkatraman B., Soil radioactivity measurements and estimation of radon/thoron exhalation rate in soil samples from Kalpakkam residential complex. *Radiat. Prot. Dosim.*, 164(4): 569-574, 2015.
- [26] Mehta V., Singh S.P., Chauhan R.P., Mudahar G.S., Study of indoor radon, thoron, their progeny concentration and radon exhalation rate in the environs of Mohali, Punjab, Northern India. *Aerosol Air Qual. Res.*, 15: 1380-1389, 2015.
- [27] Menon S.R., Sahoo B.K., Balasundar S., Gaware J.J., Jose M.T., Venkatraman B., Mayya Y.S., A comparative study between the dynamic method and passive can technique of radon exhalation measurements from samples. *Appl. Radiat. Isot.*, 99: 172-178, 2015.
- [28] Yarar Y., Günaydı T., Kam E., A radon survey in some regions of Turkey. *Int. Congr. Ser.*, 1276: 385-386, 2005.
- [29] Baykara O., Doğru M., İnceöz M., Aksoy E., Measuremts of radon emanation from soil samples in triple-junction of North and East Anatolian active Faults systems in Turkey., *Radiat. Meas.*, 39: 209-212, 2005.
- [30] Baykara O., Doğru M., Measuremts of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian Active Faults systems (Turkey). *Radiat. Meas.*, 41: 362-367, 2006.
- [31] Bozkurt A., Yorulmaz N., Kam E., Karahan G., Osmanlıoğlu A.E., Assessment of environmental radioactivity for Sanlıurfa region of southeastern Turkey. *Radiat. Meas.*, 42: 1387-1391, 2007.

- [32] Kam E., Bozkurt A., Environmental radioactivity measurements in Kastamonu region of northern Turkey., *Appl. Radiat. Isot.*, 65: 440-444, 2007.
- [33] Kurnaz A., Küçükömeroğlu B., Keser R., Okumusoglu N.T., Korkmaz F., Karahan G., Çevik U., Determination of radioactivity levels and hazards of soil and sediment samples in Fırtına valley (Rize, Turkey). *Appl. Radiat. Isot.*, 65: 1281-1289, 2007.
- [34] Baykara O., İnceöz M., Külahcı F., Doğru M., Aksoy E., Assessment of ^{222}Rn concentration and terrestrial gama-radiation dose rates in the seismically active area. *J. Radio. Nucl. Chem.*, 278(1): 59-63, 2008.
- [35] Degerlier M., Karahan G., Ozger G., Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey. *J. Environ. Radioact.*, 99: 1018-1025, 2008.
- [36] Baykara O., Doğru M., Determination of terrestrial gama, ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in soil along fracture zones. *Radiat. Meas.*, 44: 116-121, 2009.
- [37] Taskin H., Karavus M., Ay P., Topuzoglu A., Hidiroglu S., Karahan G., Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gama radioactivity in Kırklareli, Turkey. *J. Environ. Radioact.*, 100: 49-53, 2009.
- [38] 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.
- [39] Cetiner M.A., Gündüz H., Ilgar A., high background radiation areas at Çanakkale in Turkey. *Radiat. Phys. Chem.*, 80: 704-709, 2011.
- [40] Kucukomeroglu B., Yesilbag Y.O., Kurnaz A., Celik N., Cevik U., Celebi N., Radiological characterisation of Artvin and Ardahan provinces of Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.*, 145(4): 389-394, 2011.
- [41] Karadeniz Ö., Yaprak G., Activity concentrations of natural radionuclides ^{137}Cs in soils of coniferous forest sites in West Anatolia. *Eur. J. Forest. Res.*, 130: 271-276, 2011.
- [42] Tabar E., Kumru M.N., İçhedef M., Saç M.M., Radioactivity level and the measurements of soil gas radon concentration in Dikili geothermal area, Turkey. *Int. J. Radiat. Res.*, 11(4): 253-261, 2013.
- [43] Kurnaz A., Background radiation measurements and cancer risk estimates for Şebinkarahisar, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1-10, 2013.

- [44] Aközcan S., Yılmaz M., Külahcı F., Dose rates and seasonal variations of ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K and ^{137}Cs radionuclides in soils along Thrace, Turkey. *J. Radio. Nucl. Chem.*, 299: 95-101, 2014.
- [45] Mutuk H., Gümüş H., Turhan Ş., Measurement of the terrestrial and anthropogenic radionuclide concentrations in Bafra Kızılırmak delta (bird sanctuary) in Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.*, 158(3): 350-354, 2014.
- [46] Tabar E., Yakut H., Kuş A., Measurement of the radon exhalation rate and effective radium concentration in soil samples of southern Sakarya, Turkey. *Indoor Built Environ.*, Doi: 10.1177/1420326X16672510 (in press).
- [47] Taşköprü C., Küçük Menderes havzası topraklarında radon difüzyon katsayılarının belirlenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [48] Albayrak N., Kırıkkale’de (Türkiye) doğal radyasyon kaynaklarının belirlenmesi ve gama doz oranlarının değerlendirilmesi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [49] Akkurt A., Afyon jeotermal sularında radon (Rn-222) aktivitesi tayini. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [50] Aras G., Kastamonu merkezindeki okul binalarında havadaki radon aktivitesinin ölçülmesi. Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [51] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and effects of ionizing radiation). Sources and effects of ionizing radiation. New York, NY: United Nations Publication, 1993.
- [52] Kaynar S.Ç., Akhisar-Gölmarmara-Gördes-Sındırgı bölgesi doğal radyoaktivitesinin jeolojik yapı ile ilişkisinin incelenmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Doktora Tezi, 2011.
- [53] Kapdan E., Adapazarı merkezi kış dönemi radon ölçüm ve analizleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [54] Ekin K., İzmir-Urla ve çevresindeki sismik aktivitenin sürekli radon ölçümlerine olan etkisinin incelenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.

- [55] Özbey E., İstanbul'da kullanılan bina materyali örneklerinde radon soluma hızının araştırılması. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [56] Abu-Jarad F., Fremlin J.H., Bull R., A study of radon emitted from construction materials using plastic α -track detectors. Phys. Med. Biol., 25: 483-694, 1980.
- [57] Yakut H., Tabar E., Zenginerler Z., Demirci N., Ertugral F., Measurement of ^{222}Rn concentration in drinking water in Sakarya, Turkey. Radiat. Prot. Dosim., 157(3): 397-406, 2013.
- [58] Işık Ş., Sakarya'nın tarım coğrafyası. Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [59] Zorlu K., Adapazarı ovası ve aşağı Sakarya platosunda tarımsal değişim. Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [60] http://www.mta.gov.tr/v2.0/bolgeler/kocaeli/sakarya/sakarya_jeoloji_haritasi.jpg Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- [61] Mutuk H., Bafra kıyılırmak deltası toprak örneklerinde doğal gama radyoaktivite ölçümleri. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [62] Kılıçaslan S., Tokat-Sivas bölgeleri için toprak ve traverten örneklerinde radyoaktivite tayini. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [63] <http://nbe.ege.edu.tr/?sayfa=laboratuvarlar&id=347> Erişim Tarihi: 20.12.2016.
- [64] Şahin S., Sivrice fay zonundaki radon değişimi ve doğal radyoaktivite. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Doktora Tezi, 2009.
- [65] Fadıl İ., Alaşehir çevresinde KB-GD ve D-B uzanımlı graben faylarında depremle ilişkili radon anomalilerinin tanımlanması. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [66] Aközcan S., Manisa ili yerleşim alanı topraklarında ICP-AES ve gama spektrometresi ile element analizleri. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
- [67] Beretka J., Matthew P.J., Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. Health. Phys., 48(1): 87-95, 1985.

- [68] Krieger R., Radioactivity of construction materials. *Betonw. Fertig. Tech.*, 47: 468-473, 1981.
- [69] Tabar E., Dikili ve Bergama bölgelerindeki tektonik aktivitenin jeotermal sularda radon ölçümleri ile değerlendirilmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [70] Abu-Jarad F., Fremlin J.H., Bull R., A study of radon emitted from construction materials using plastic α -track detectors. *Phys. Med. Biol.*, 25: 483-694, 1980.
- [71] Kumar R., Mahur A.K., Rao N.S., Sengupta D., Prasad R., Radon exhalation rate from sand samples from the newly discovered high background radiation area at Erasama beach placer deposit of Orissa, India. *Radiat. Meas.*, 43: S508-S511, 2008.
- [72] Abo-Elmagd M., Radon exhalation rates corrected for leakage and back diffusion evaluation of radon chambers and radon sources with application to ceramic tile. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, 7: 390–398, 2014.
- [73] Sahoo B.K., Mayya Y.S., Two dimensional diffusion theory of trace gas emission into soil chambers for flux measurements. *Agric. Forest. Meteo.*, 150: 1211-1224, 2010.
- [74] Kovler K., Radon exhalation of hardening concrete: monitoring cement hydration and prediction of radon concentration in construction site. *J. Environ. Radioac.*, 86: 354–366, 2006.
- [75] Jang M., Kang C., Hyun S., Moon J., Estimation of ^{222}Rn release from the phosphogypsum board used in housing panels. *Environ. Radioact.*, 80: 153–160, 2005.
- [76] Samuelsson C., the closed-can exhalation method for measuring radon. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Tech.* 95: 167-169, 1990.
- [77] Nazaroff W.W., Nero A.V., Radon and its decay products in indoor air. Wiley-Interscience Publication, New York, NY, 1988.
- [78] ICRP (International Commission on Radiological Protection). Protection against Radon-222 at home and at work, report no: 65, ICRP Publication, New York, NY, 1993.
- [79] ICRP (International Commission on Radiological Protection). Lung cancer risk from exposures to radon daughters, report no: 50, ICRP Publication, New York, NY, 1987.

- [80] Ichedef M., Sac M.M., Camgoz B., Bolca M., Demirel N., Oruc O.E., Natural radioactivity levels of great soil groups in Seferihisar geothermal region, Turkey. *Environ. Earth. Sci.*, 74(7): 6283-6292, 2015.
- [81] Otansev P., Karahan G., Kam E., Barut I., Taskin H., Assessment of natural radioactivity concentrations and gamma dose rate levels in Kayseri, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.*, 148(2): 227-236, 2012.
- [82] Sahin L., Cavas M., Natural radioactivity measurements in soil samples of central Kutahya (Turkey). *Radiat. Prot. Dosim.*, 131(4): 526-530, 2008.
- [83] Tufan M.Ç., Bostancı S., Radioactivity concentrations in soil and dose assessment for Samsun city centre, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.*, 151(3): 532-536, 2012.
- [84] Ugur F.A., Turhan S., Goren E., Gezer F., Yegingil Z., Sahan H., Sahan M., Tel E., Karahan G., A survey of distribution of terrestrial radionuclides in surface soil samples in and around the Osmaniye province, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.*, 154(4): 483-489, 2013.
- [85] Yalcin P., Taskin H., Kam E., Taskin H., Terzi M., Varinlioglu A., Bozkurt A., Bastug A., Tasdelen B., Investigation of radioactivity level in soil and drinking water samples collected from the city of Erzincan, Turkey. *J. Radioa. Nucl. Chem.*, 292: 999-1006, 2012.
- [86] Agar O., Boztosun I., Korkmaz M.E., Ozmen S.F., Measurement of radioactivity levels and assessment of radioactivity hazards of soil samples in Karaman, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.*, 162(4): 630-637, 2014.
- [87] Khan, A.J., Prasad, R., Tyagi, R.K., Measurement of radon exhalation rate from some building materials. *Nucl. Tracks. Radiat. Meas.*, 20: 609-610, 1992.
- [88] <http://www.csb.gov.tr/db/ced/eduardosya/Sakarya2015.pdf>
Erişim Tarihi: 04.06.2017.
- [89] Guidotti L., Carini F., Rossi R., Gatti M., Cenci R.M., Beone G.M., Gamma-spectrometric measurement of radioactivity in agricultural soils of the Lombardia region, northern Italy. *J. Environ. Radioac.* 142: 36-44, 2015.
- [90] Camelo G.L.L., Miguez S.R., Marbán L., Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *Sci. Total. Environ.*, 204(3): 245-50, 1997.
- [91] Kant K., Upadhyay S.B., Sonkawade R.G., Chakarvarti S.K., Radiological risk assessment of use of phosphate fertilizers in soil. *Iran. J. Radiat. Res.*, 4(2): 63-70, 2006.

- [92] Boukhenfouf W., Boucenna A., The radioactivity measurements in soils and fertilizers using gamma spectrometry technique. *J. Environ. Radioact.*, 102: 336-339, 2011.
- [93] Majid A., Adam A., Ahmed M., Eltayeb H., Multivariate statistical analysis of radioactive variables in two phosphate ores from Sudan. *J. Environ. Radioact.*, 107: 23-43, 2012.
- [94] Wang, N., Xiao, L., Li, C., Mei, W., Hang, Y., Liu, D., Level of radon exhalation rate from soil in some sedimentary and granite areas in China. *J. Nucl. Sci. Tech.*, 46(3): 303–309, 2009.
- [95] Fonollosa E., Penalver A., Borrull F., Aguilar C., Radon in spring waters in the south of Catalonia. *J. Environ. Radioac.*, 151: 275–281, 2016.
- [96] Matiullah, M.F., Radon exhalation and its dependence on moisture content from samples of soil and building materials. *Radiat. Meas.*, 43: 1458-1462, 2008.
- [97] Turkish Atomic Energy Authority, Türkiye Çevresel Radyoaktivite Atlası, <http://www.taek.gov.tr/radyasyon-izleme/turkiye-cevresel-radyasyon-atlasi.html> Erişim Tarihi: 19.12.2016.
- [98] Ramli, A.T., Environmental terrestrial gamma radiation dose and its relationship with soil type and underlying geological formations in Pontian district, Malaysia. *Appl. Radiat. Isot.*, 48: 407–412, 1997.
- [99] Girault, F., Perrier, F., Measuring effective radium concentration with large numbers of samples. Part I-experimental method and uncertainties. *J. Environ. Radioac.*, 113: 177-188, 2012a.
- [100] Girault, F., Perrier, F., Measuring effective radium concentration with large numbers of samples. Part II-general properties and representativity. *J. Environ. Radioac.*, 113(C): 189-202, 2012b.
- [101] Rahman S.U., Matiullah, Malik F., Rafique M., Anwar J., Ziafat M., Jabbar A., Measurement of naturally occurring/fallout radioactive elements and assessment of annual effective dose in soil samples collected from four districts of the Punjab province, Pakistan. *J. Radio. Nucl. Chem.*, 287: 647-655, 2011.
- [102] Hassan N.M., Radon emanation coefficient and its exhalation rate of wasted petroleum samples associated with petroleum industry in Egypt. *J. Radio. Nucl. Chem.*, 299: 111–117, 2014.

- [103] Lawrence, C.E., Akber, R.A., Bollhofer, A., Martin, P., Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics. *J. Environ. Radioact.*, 100: 1–8, 2009.
- [104] Ravisankar R., Chandrasekaran A., Vijayagopal P., Venkatraman B., Senthilkumar G., Eswaran P., Rajalakshmi A., Natural radioactivity in soil samples of Yelagiri Hills, Tamil Nadu, India and the associated radiation hazards. *Radiat. Phys. and Chem.*, 81: 1789-1795, 2012.
- [105] Groeneveld R.A., Meeden, G., Measuring skewness and kurtosis. *The Statistician.*, 33(4): 391-399, 1984.
- [106] Balakrishnan, A., Nevzorov, V.B., A primer on statistical distributions. John Wiley and Sons Inc. Publication, New Jersey, Canada, 2003.
- [107] Kapdan E., Altinsoy A., Karahan G., Taskin H., Determination of the health hazards due to background radiation sources in the city of Adapazari, Northwestern Turkey. *Isot. Environ. Health Stud.* 47: 93–100, 2011.
- [108] Kakati R.K., Kakati L., Ramachandran T.V., Measurement of uranium, radium and radon exhalation rate of soil samples from Karbi Anglong district of Assam, India using EDXRF and can technique method. *APCBEE Procedia.*, 5:186–191, 2013.
- [109] Saleh H., Shayeb M.A., Natural radioactivity distribution of southern part of Jordan (Ma'an) soil. *Ann. Nucl. Energy.*, 65: 184-189, 2014.
- [110] Rajeshwari T., Rajesh S., Kerur B.R., Anilkumar S., Krishnan N., Pant A.D., Natural radioactivity studies of Bidar soil samples using gamma spectrometry. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 300: 61-65, 2014.
- [111] Jankovic M., Todorovic D., Savanovic M., Radioactivity measurements in soil samples collected in the republic of Srpska. *Radiat. Meas.*, 43: 1448-1452, 2008.

EKLER

EK A: Kuzey Sakarya örnekleme istasyonlarının koordinatları

İstasyon		Enlem	Boylam	İstasyon		Enlem	Boylam
No	Yer			No	Yer		
1	SÖĞ 1	40,96355	30,43495	45	KOC 1	41,04850	30,83974
2	SÖĞ 2	40,95828	30,40512	46	KOC 2	41,06068	30,89689
3	SÖĞ 3	40,92106	30,40408	47	KOC 3	41,04128	30,94114
4	SÖĞ 4	40,93105	30,44931	48	KOC 4	40,98466	30,78577
5	SÖĞ 5	40,90321	30,46875	49	KOC 5	40,99557	30,82961
6	SÖĞ 6	40,90456	30,51451	50	KOC 6	41,00976	30,87872
7	SÖĞ 7	40,91158	30,57151	51	KOC 7	41,00529	30,92989
8	SÖĞ 8	40,88813	30,56569	52	KOC 8	40,94205	30,80215
9	SÖĞ 9	40,86859	30,52161	53	KOC 9	40,93384	30,84463
10	SÖĞ 10	40,86662	30,46607	54	KOC 10	40,96643	30,89471
11	FER 1	41,04592	30,49160	55	HEN 1	40,91871	30,68494
12	FER 2	41,03156	30,44660	56	HEN 2	40,87032	30,63773
13	FER 3	41,04466	30,53547	57	HEN 3	40,81133	30,66278
14	FER 4	41,01047	30,49648	58	HEN 4	40,74842	30,68137
15	FER 5	41,01689	30,55005	59	HEN 5	40,86014	30,73751
16	FER 6	41,00077	30,44193	60	HEN 6	40,80366	30,74822
17	FER 7	40,96170	30,46747	61	HEN 7	40,75627	30,74474
18	FER 8	40,97535	30,51418	62	HEN 8	40,69582	30,75998
19	FER 9	40,94778	30,56229	63	HEN 9	40,84738	30,82469
20	FER 10	40,93924	30,51456	64	HEN 10	40,80744	30,81281
21	KAY 1	41,14995	30,36083	65	HEN 11	40,73911	30,81673
22	KAY 2	41,13514	30,41343	66	HEN 12	40,68727	30,83069
23	KAY 3	41,07085	30,28622	67	SER 1	40,83986	30,24167
24	KAY 4	41,10394	30,34306	68	SER 2	40,81328	30,23348
25	KAY 5	41,07329	30,39486	69	SER 3	40,76858	30,26516
26	KAY 6	41,08381	30,45204	70	SER 4	40,81278	30,28346
27	KAY 7	41,03175	30,32727	71	SER 5	40,79527	30,27060
28	KAY 8	41,03449	30,39995	72	SER 6	40,76969	30,29779
29	KAY 9	41,02259	30,27504	73	SER 7	40,75387	30,30127
30	KAY 11	40,97675	30,28475	74	SER 8	40,81393	30,32534
31	KAY 10	40,97151	30,33342	75	SER 9	40,79158	30,32079
32	KAY 12	40,98284	30,39194	76	SER 10	40,78685	30,36330
33	KAR 1	41,12656	30,52195	77	SER 11	40,76685	30,36134
34	KAR 2	40,97589	30,72156	78	SER 12	40,73550	30,35381
35	KAR 3	41,08771	30,54197	79	ADA 1	40,91528	30,30035
36	KAR 4	41,05275	30,59336	80	ADA 2	40,91911	30,35641
37	KAR 5	41,08162	30,64686	81	ADA 3	40,87758	30,28184
38	KAR 6	41,07614	30,72537	82	ADA 4	40,83929	30,30458
39	KAR 7	41,06201	30,80009	83	ADA 5	40,87686	30,38964
40	KAR 8	40,99062	30,64298	84	ADA 6	40,84106	30,45777
41	KAR 9	41,01385	30,73649	85	ADA 7	40,77727	30,42790
42	KAR 10	40,98219	30,59565	86	ADA 8	40,80379	30,48334
43	KAR 11	40,95985	30,65002	87	ADA 9	40,80690	30,53328
44	KAR 12	41,02591	30,67534	88	ADA 10	40,84510	30,55368
				89	ADA 11	40,80918	30,37336

EK B: Güney Sakarya örnekleme istasyonlarının koordinatları

İstasyon				İstasyon			
No	Yer	Enlem	Boylam	No	Yer	Enlem	Boylam
1	TAR 1	40,489	30,468	45	PAM 1	40,517	30,250
2	TAR 2	40,489	30,514	46	PAM 2	40,571	30,101
3	TAR 3	40,482	30,558	47	PAM 3	40,491	30,108
4	TAR 4	40,429	30,424	48	PAM 4	40,490	30,051
5	TAR 5	40,427	30,473	49	PAM 5	40,532	30,023
6	TAR 6	40,434	30,510	50	PAM 6	40,526	30,104
7	TAR 7	40,418	30,534	51	PAM 7	40,543	30,181
8	TAR 8	40,383	30,491	52	PAM 8	40,597	29,991
9	TAR 9	40,358	30,551	53	PAM 9	40,507	30,184
10	TAR 10	40,328	30,523	54	PAM 10	40,568	30,158
11	KRP 1	40,680	30,523	55	GEY 1	40,592	30,230
12	KRP 2	40,676	30,575	56	GEY 2	40,588	30,305
13	KRP 3	40,661	30,512	57	GEY 3	40,605	30,357
14	KRP 4	40,656	30,568	58	GEY 4	40,541	30,297
15	KRP 5	40,631	30,510	59	GEY 5	40,549	30,387
16	KRP 6	40,630	30,557	60	GEY 6	40,440	30,149
17	KRP 7	40,612	30,467	61	GEY 7	40,463	30,244
18	KRP 8	40,606	30,517	62	GEY 8	40,485	30,339
19	KRP 9	40,604	30,555	63	GEY 9	40,506	30,429
20	KRP 10	40,576	30,512	64	GEY 10	40,400	30,192
21	ARF 1	40,713	30,330	65	GEY 11	40,409	30,241
22	ARF 2	40,712	30,367	66	GEY 12	40,413	30,353
23	ARF 3	40,727	30,398	67	AKY 1	40,790	30,574
24	ARF 4	40,732	30,383	68	AKY 2	40,739	30,564
25	ARF 5	40,731	30,421	69	AKY 3	40,731	30,636
26	ARF 6	40,703	30,425	70	AKY 4	40,671	30,648
27	ARF 7	40,708	30,400	71	AKY 5	40,617	30,664
28	ARF 8	40,695	30,339	72	AKY 6	40,553	30,650
29	ARF 9	40,687	30,367	73	AKY 7	40,647	30,755
30	ARF 10	40,685	30,398	74	AKY 8	40,594	30,747
31	ARF 11	40,679	30,420	75	AKY 9	40,550	30,743
32	ARF 12	40,670	30,389	76	AKY 10	40,692	30,573
33	ARF 13	40,670	30,359	77	AKY 11	40,680	30,892
34	ERN 1	40,761	30,401	78	SAP 1	40,697	30,313
35	ERN 2	40,738	30,430	79	SAP 2	40,688	30,278
36	ERN 3	40,754	30,476	80	SAP 3	40,692	30,227
37	ERN 4	40,766	30,502	81	SAP 4	40,695	30,184
38	ERN 5	40,735	30,499	82	SAP 5	40,672	30,200
39	ERN 6	40,706	30,488	83	SAP 6	40,661	30,241
40	ERN 7	40,733	30,461	84	SAP 7	40,646	30,160
41	ERN 8	40,702	30,454	85	SAP 8	40,643	30,214
42	ERN 9	40,677	30,455	86	SAP 9	40,640	30,275
43	ERN 10	40,651	30,436	87	SAP 10	40,668	30,321
44	ERN 11	40,684	30,497				

EK C: Kuzey Sakarya'dan toplanan toprak örneklerindeki kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ve etkin radyum içeriğinin ölçülen değerleri

İstasyon		C_{Ra}^{eff} (Bqkg ⁻¹)	E_M (μBqkg ⁻¹ d ⁻¹)	E_A (μBqm ⁻² d ⁻¹)
No	Yer			
1	SOG 1	22,03	208,972	4,279
2	SOG 2	14,29	135,588	2,777
3	SÖG 3	18,06	171,319	3,508
4	SOG 4	16,87	160,080	3,278
5	SÖG 5	11,54	109,505	2,242
6	SOG 6	15,33	145,385	2,977
7	SOG 7	18,17	172,370	3,530
8	SOG 8	7,46	70,7993	1,450
9	SOG 9	11,17	105,959	2,170
10	SOG 10	20,65	195,870	4,011
11	FER 1	7,73	73,324	1,501
12	FER 2	9,56	90,693	1,857
13	FER 3	15,19	144,093	2,950
14	FER 4	16,64	157,856	3,233
15	FER 5	12,47	118,309	2,423
16	FER 6	15,69	148,841	3,048
17	FER 7	15,44	146,467	2,999
18	FER 8	14,87	141,023	2,888
19	FER 9	15,37	145,776	2,985
20	FER 10	22,50	213,420	4,370
21	KAY 1	11,12	105,493	2,160
22	KAY 2	19,52	185,157	3,792
23	KAY 3	12,88	122,140	2,501
24	KAY 4	13,83	131,171	2,686
25	KAY 5	6,25	59,275	1,214
26	KAY 6	12,16	115,349	2,362
27	KAY 7	11,43	108,438	2,221
28	KAY 8	15,66	148,510	3,041
29	KAY 9	13,42	127,264	2,606
30	KAY 11	9,52	90,317	1,850
31	KAY 10	11,23	106,560	2,182
32	KAY 12	13,17	124,951	2,559
33	KAR 1	4,58	43,453	0,890
34	KAR 2	5,02	47,600	0,975
35	KAR 3	16,06	152,372	3,120

36	KAR 4	11,55	109,565	2,244
37	KAR 5	14,02	132,989	2,723
38	KAR 6	9,12	86,486	1,771
39	KAR 7	5,59	53,069	1,087
40	KAR 8	10,86	103,059	2,110
41	KAR 9	16,27	154,370	3,161
42	KAR 10	21,86	207,364	4,246
43	KAR 11	18,52	175,676	3,598
44	KAR 12	10,12	96,042	1,967
45	KOC 1	12,61	119,602	2,449
46	KOC 2	7,26	68,846	1,410
47	KOC 3	7,54	71,521	1,465
48	KOC 4	8,86	84,022	1,721
49	KOC 5	5,39	51,116	1,047
50	KOC 6	7,69	72,963	1,494
51	KOC 7	9,77	92,706	1,898
52	KOC 8	12,89	122,306	2,505
53	KOC 9	5,99	56,856	1,164
54	KOC10	10,41	98,716	2,022
55	HEN 1	10,03	95,110	1,948
56	HEN 2	7,27	68,936	1,412
57	HEN 3	21,49	203,894	4,175
58	HEN 4	14,58	138,323	2,833
59	HEN 5	13,56	128,617	2,634
60	HEN 6	8,34	79,093	1,620
61	HEN7	11,17	105,989	2,170
62	HEN 8	13,25	125,720	2,574
63	HEN 9	12,57	119,211	2,441
64	HEN 10	5,00	47,450	0,972
65	HEN 11	7,86	74,556	1,527
66	HEN 12	8,75	82,967	1,699
67	SER 1	9,19	87,147	1,785
68	SER 2	7,84	74,345	1,522
69	SER 3	4,73	44,836	0,918
70	SER 4	9,56	90,663	1,857
71	SER 5	17,42	165,278	3,385
72	SER 6	7,76	73,594	1,507
73	SER 7	12,47	118,096	2,421

74	SER 8	14,61	138,594	2,838
75	SER 9	14,29	135,558	2,776
76	SER 10	8,44	80,025	1,639
77	SER 11	11,92	113,111	2,316
78	SER 12	4,44	42,161	0,863
79	ADA 1	18,25	173,152	3,546
80	ADA 2	27,14	257,474	5,273
81	ADA 3	20,09	190,551	3,902
82	ADA 4	18,14	172,130	3,525
83	ADA 5	18,37	174,294	3,569
84	ADA 6	16,92	160,530	3,287
85	ADA 7	18,19	172,521	3,533
86	ADA 8	17,07	161,943	3,316
87	ADA 9	17,39	164,978	3,378
88	ADA 10	15,66	148,570	3,042
89	ADA 11	15,33	145,445	2,978

EK D: Güney Sakarya'dan toplanan toprak örneklerindeki kütle ve yüzey radon yayılım hızlarının ve etkin radyum içeriğinin ölçülen değerleri

No	İstasyon		C_{Ra}^{eff} (Bqkg ⁻¹)	E_M (µBqkg ⁻¹ d ⁻¹)	E_A (µBqm ⁻² d ⁻¹)
	Yer				
1	TAR1		10,66	101,120	2,070
2	TAR2		4,16	39,426	0,807
3	TAR3		7,65	72,602	1,486
4	TAR4		6,18	58,628	1,200
5	TAR5		3,77	35,760	0,732
6	TAR6		6,73	63,872	1,307
7	TAR7		5,26	49,929	1,022
8	TAR8		10,66	101,090	2,070
9	TAR9		4,88	46,277	0,947
10	TAR10		6,49	61,5436	1,260
11	GEY1		15,46	146,617	3,002
12	GEY2		14,31	135,738	2,779
13	GEY3		11,92	113,110	2,316
14	GEY4		10,73	101,781	2,084
15	GEY5		22,14	210,023	4,300
16	GEY6		18,51	175,615	3,596
17	GEY7		14,22	134,867	2,761
18	GEY8		20,44	193,856	3,969
19	GEY9		18,97	179,973	3,685
20	GEY10		17,96	170,387	3,489
21	GEY11		17,23	163,445	3,347
22	GEY12		15,12	143,431	2,937
23	PAM1		10,95	103,885	2,127
24	PAM2		4,77	45,286	0,927
25	PAM3		6,66	63,166	1,293
26	PAM4		7,11	67,433	1,380
27	PAM5		8,32	78,912	1,615
28	PAM6		10,50	99,647	2,040
29	PAM7		11,48	108,873	2,229
30	PAM8		7,26	68,906	1,411
31	PAM9		14,10	133,755	2,739
32	PAM10		10,04	95,200	1,949
33	ERN1		12,03	114,162	2,337
34	ERN2		7,59	72,031	1,475
35	ERN3		19,78	187,606	3,841

36	ERN4	15,23	144,483	2,958
37	ERN5	9,50	90,121	1,845
38	ERN6	8,06	76,418	1,564
39	ERN7	7,65	72,602	1,486
40	ERN8	7,37	69,897	1,431
41	ERN9	5,27	49,974	1,023
42	ERN10	8,32	78,912	1,615
43	ERN11	9,96	94,479	1,934
44	AKY1	12,44	118,038	2,417
45	AKY2	24,97	236,829	4,849
46	AKY3	19,08	180,964	3,705
47	AKY4	16,45	156,022	3,195
47	AKY5	10,75	102,021	2,089
49	AKY6	13,43	127,444	2,609
50	AKY7	6,92	65,660	1,344
51	AKY8	4,61	43,753	0,895
52	AKY9	12,56	119,150	2,439
53	AKY10	5,99	56,795	1,163
54	AKY11	7,75	73,473	1,504
55	SAP1	14,52	137,752	2,820
56	SAP2	9,24	87,687	1,795
57	SAP3	6,92	65,630	1,343
58	SAP4	11,13	105,597	2,162
59	SAP5	11,72	111,187	2,276
60	SAP6	7,27	68,966	1,412
61	SAP7	14,08	133,575	2,735
62	SAP8	13,08	124,109	2,541
63	SAP9	23,00	218,227	4,468
64	SAP10	7,21	68,365	1,399
65	ARF1	13,38	126,933	2,599
66	ARF2	14,03	133,124	2,726
67	ARF3	14,37	136,339	2,791
68	ARF4	13,85	131,351	2,689
69	ARF5	12,72	120,683	2,471
70	ARF6	13,52	128,226	2,625
71	ARF7	16,56	157,104	3,217
72	ARF8	26,69	253,146	5,183
73	ARF9	13,59	128,887	2,639

74	ARF10	16,20	153,648	3,146
75	ARF11	12,91	122,516	2,508
76	ARF12	19,05	180,694	3,700
77	ARF13	16,78	159,178	3,259
78	KRP1	8,74	82,939	1,698
79	KRP2	12,59	119,451	2,446
80	KRP3	13,98	132,583	2,715
81	KRP4	9,23	87,597	1,793
82	KRP5	7,37	69,897	1,431
83	KRP6	15,25	144,693	2,963
84	KRP7	8,40	79,724	1,632
85	KRP8	15,41	146,196	2,993
86	KRP9	12,55	119,030	2,437
87	KRP10	6,29	59,710	1,222

ÖZGEÇMİŞ

Adem Kuş, 19.07.1989'da Kastamonu'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2007 yılında Dedekorkut Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nü 2012 yılında bitirdi. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nde, 2013 yılında yine Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı.