



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



DOKTORA TEZİ

**ALFA ve GAMA SPEKTROSKOPİSİ ile ÇEVRESEL
ÖRNEKLERDE RADYOAKTİVİTE ÖLÇÜMÜ ve ANALİZİ**

Nurgül HAFIZOĞLU ALKAN

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN**

Temmuz, 2019

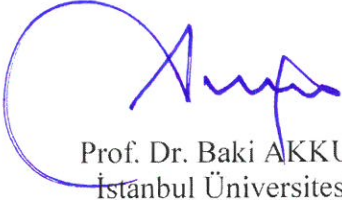
İSTANBUL

Bu çalışma, 5.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Nükleer Fizik Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

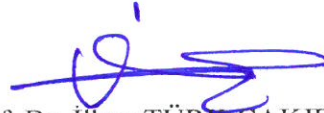
Tez Jürisi



Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Baki AKKUŞ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



Prof. Dr. İlkay TÜRK ÇAKIR
Giresun Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Ela GANİOĞLU NUTKU
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Mustafa DEMİR
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa
Cerrahpaşa Tıp Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Lisans eğitimimden bu yana desteğini her daim hissettiğim, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her konuda örnek aldığım ve daima motivasyon kaynağım olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN'a en içten dileklerle minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimi sürecimdeki desteklerinden dolayı sayın hocam Prof. Dr. Yeşim ÖKTEM'e teşekkür ederim. Bu süreçteki değerli katkıları için sevgili hocam Prof. Dr. Ela GANİOĞLU NUTKU'ya teşekkür ederim.

Bu çalışmanın deneysel sürecinde tecrübe ve bilgilerini bana aktaran Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi çalışanlarından sayın hocam Günay BAĞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmamın deneysel sürecinde bana laboratuvarlarını kullanma imkanı tanıyan Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü öğretim üyelerinden sayın Prof. Dr. Sabriye PERÇİN ÖZKORUCUKLU hocama ve deneysel sürecin bel kemiğini oluşturan kimyasal sağlayan Biyoloji Bölümü öğretim üyelerinden sayın Prof. Dr. Murat BELİVERMİŞ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Balık ve midye örneklerinin temin edilmesinde büyük yardımları olan sayın Engin VURAL, Erkan VURAL, Aziz BUCAK ve Şehmus ÖTGEN'e gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte maddi ve manevi olarak yardım ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Doktora Öğrencisi Güler AĞGEZ, Doktora Öğrencisi Gizem YILDIRIM BAŞTEMUR ve Doktora Öğrencisi Pınar İSEL'e teşekkürlerimi sunarım. Örnek toplama aşamasındaki katkıları için Araş. Gör. Dr. F. Çağla ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Bu uzun ve zorlu yolda bana inanıp, her konuda yanımda olan, desteğini, sevgisini, iyi niyetini hiçbir zaman esirgemeyen ve en az benim kadar emek veren sol yanımda, sevgili eşim M. Kaan ALKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca elimi hiç bırakmayan, maddi, manevi ve her anlamda arkamda durup, bana her koşulda karşılıksız güvenen, inanan ve haklarını asla ödeyemeyeceğim canım annem, babam ve ağabeyime sonsuz sevgi, minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezimi, beni her anlamda ben yapan, kızı olduğum için daima gurur ve onur duyduğum babam Mustafa HAFIZOĞLU'na ithaf ediyorum.

Temmuz 2019

Nurgül HAFIZOĞLU ALKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	6
2.1. NÜKLEER BOZUNMALARIN TEMELİ	6
2.1.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu ve Denge	7
2.2. RADYOAKTİF SERİLER.....	15
2.2.1. Doğal Radyoaktif Seriler	15
2.2.2. Yapay Radyoaktif Seriler	19
2.3. DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİF KAYNAKLAR	20
2.3.1. Doğal Radyoaktif Kaynaklar	20
2.3.1.1. Polonyum (^{210}Po)'un genel özellikleri	21
2.3.2. Yapay Radyoaktif Kaynaklar	22
2.4. SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ	22
2.4.1. Alfa Spektroskopi Sistemi	23
2.4.1.1. İyon implante edilmiş dedektörler	23
2.4.2. Gama Spektroskopi Sistemi	24
2.4.2.1. Yüksek saflıklı Germanyum dedektörü (HPGe)	26
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	30
3.1. İSTANBUL ADALAR BÖLGESİNİN JEOLojİK YAPISI	30
3.2. ÖRNEKLEME İŞLEMİ.....	32
3.3. ALFA SPEKTROSKOPİSİ İÇİN ÖRNEK HAZIRLAMA VE AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ.....	35
3.3.1. Kullanılan Cihaz.....	35
3.3.2. Balık ve Midye Örneklerinin Radyokimyasal Olarak Hazırlanması.....	38

3.3.3. Alfa Spektroskopisi için Spektrum Analizi ve Aktivite Hesabı	41
3.4. GAMA SPEKTROSKOPİSİ İÇİN ÖRNEK HAZIRLAMA VE AKTİVİTE	
ÖLÇÜMLERİ.....	43
3.4.1. Kullanılan Cihaz.....	43
3.4.2. Toprak ve Plaj Kumu Örneklerinin Hazırlanması.....	45
3.4.3. Gama Spektroskopisi için Spektrum Analizi ve Aktivite Hesabı	46
3.5. HAVADAKİ GAMA RADYASYON DOZU ÖLÇÜMLERİ	49
3.5.1. Kullanılan Cihaz ve Ölçüm İşlemi	49
4. BULGULAR.....	51
4.1. BALIK VE MİDYE ÖRNEKLERİNİN DENEYSEL SONUÇLARI.....	51
4.1.1. Aktivite Konsantrasyonları.....	51
4.1.2. Doz Değerleri	53
4.2. TOPRAK VE PLAJ KUMU ÖRNEKLERİNİN DENEYSEL SONUÇLARI.....	54
4.2.1. Aktivite Konsantrasyonları.....	54
4.2.2. Doz Değerleri	62
4.3. HAVADAKİ GAMA RADYASYONU ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	68
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	72
KAYNAKLAR.....	77
EKLER	84
EK 1. Uranyum serisindeki çekirdeklerin bozunum modları ve enerjileri [22].	84
EK 2. Toryum serisindeki çekirdeklerin bozunum modları ve enerjileri [22].	84
EK 3. Aktinyum serisindeki çekirdeklerin bozunum modları ve enerjileri [22].	85
EK 4. Büyükkada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.	86
EK 5. Heybeliada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.	87
EK 6. Burgazada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.	87
EK 7. Kınalıada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.	88
EK 8. İstanbul Prens Adaları bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.	89
ÖZGEÇMİŞ	90

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Kararlı çekirdeklerin dağılımı: Koyu renkli kare şeklindeki bölgeler kararlı ve doğada oluşan uzun yarı ömürlü çekirdeklerdir; pürüzlü çizgiler içerisinde yer alan bölgeler bilinen diğer çekirdekleri ifade etmekte olup, kararsızdır [16].	6
Şekil 2.2: Grafik ^{32}P çekirdeğinin gün cinsinden zamana karşılık dakika başına bozunumunu lineer olarak göstermektedir. X ve y eksenleri arasındaki yatay ve düşey çizgiler, $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ sembolleriyle tanımlanmış olan altı yarı-ömür sonundaki ^{32}P çekirdeğinin aktivitelerini (dpm) ifade etmektedir [17].	8
Şekil 2.3: ^{226}Ra anne çekirdeği ile onun kız çekirdeği ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengenin şematik olarak gösterilmesi [20, 21].	12
Şekil 2.4: ^{212}Pb anne çekirdeği ile onun kız çekirdeği olan ^{212}Bi arasındaki geçici denge durumunu göstermektedir. Anne ve kız çekirdeklerin aktiviteleri hemen hemen eşit olup, zamanla değişmektedir [20, 21].	14
Şekil 2.5: Anne çekirdeğe göre daha uzun yarı-ömürlü ^{214}Pb kız ve ^{218}Po anne çekirdekleri arasındaki denge olmaması durumu şekilde gösterilmektedir. Toplam aktivite zamanla kız çekirdeğin aktivitesine yaklaşmaktadır [20, 21].	15
Şekil 2.6: Uranyum – Radyum serisinin bozunum süreci [22, 23].	16
Şekil 2.7: Toryum serisinin bozunum süreci [22, 23].	17
Şekil 2.8: Aktinyum serisinin bozunum süreci [22, 23].	18
Şekil 2.9: Yapay bir seri olan Neptinyum serisinin bozunum süreci [22, 23].	19
Şekil 2.10: Alfa Spektroskopisi için sistem elemanları.	23
Şekil 2.11: Yarı iletken üzerine iyon implantasyonu.	24
Şekil 2.12: HPGe ve NaI dedektörlerinden elde edilen spektrumların kıyaslanması.	25
Şekil 2.13: Gama Spektroskopisi için sistem elemanları.	26
Şekil 2.14: HPGe dedektörünün genel bileşenleri.	27
Şekil 2.15: Germanyum'un yükten arınmış (tüketim) bölgesi.	28
Şekil 3.1: İstanbul Prens Adaları bölgesinin lokasyon haritası.	31
Şekil 3.2: Büyükkada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.	33

Şekil 3.3: Heybeliada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.....	34
Şekil 3.4: Burgazada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.....	34
Şekil 3.5: Kınalıada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.....	35
Şekil 3.6: İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesindeki Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'nda bulunmakta olan Alfa Spektroskopi Sistemi.	36
Şekil 3.7: İyon implante edilmiş silikon dedektörü ve sayım odası.....	37
Şekil 3.8: Alfa Spektroskopi Sistemi kalibrasyonu için kullanılan karışık alfa kaynağı.	37
Şekil 3.9: Alfa Spektroskopi Sisteminin enerji kalibrasyonu için kullanılan çekirdeklerin pikleri.....	38
Şekil 3.10: Radyokimyasal sürece tabi tutulup alfa spektroskopisi ile analiz edilen çeşitli balık ve kara midye örnekleri.	39
Şekil 3.11: (a) Havanda dövülerek homojenize hale getirilen numune, (b) 10^{-4} hassasiyete sahip hassas terazide örneğin radyokimyasal süreç için tartılması, (c) Numunenin, üzerine ilave edilen HNO_3 , HCl ve ^{209}Po tracer etkisiyle çözünmesi, (d) Örnek çözeltisi üzerine eklenen H_2O_2 , (e) Çözeltinin buharlaştırma işlemi, (f) Tutucu içerisine yerleştirilen gümüş disk üzerine, örnek içerisinde doğal olarak var olan ^{210}Po çekirdeğinin biriktirilme süreci (kendiliğinden depozisyon), (g) Kendiliğinden depozisyon işlemi sonunda gümüş disk, (h) ^{210}Po birikmesi gerçekleşen gümüş diskin ölçüm alınmak üzere alfa spektroskopi sistemine yerleştirilmesi.	40
Şekil 3.12: Balık örneği ölçümlerinden elde edilen örnek bir alfa spektrumu (Tür: Mezgit – Merlangius euxmus).....	41
Şekil 3.13: İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesindeki Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'nda bulunmakta olan Gama Spektroskopi Sistemi.....	43
Şekil 3.14: Gama Spektroskopi Sistemi'nin enerji kalibrasyonu.	44
Şekil 3.15: Gama Spektroskopi Sistemi'nin verim kalibrasyonu.	45
Şekil 3.16: (a) Örneklerin kurutulması, (b) Radyoaktif dengeye ulaşmak ve ölçülmek üzere marinelli beaker kaplara konulan örnekler.	46
Şekil 3.17: Toprak ve plaj kumu örneklerinin ölçümlerinden elde edilen spektrum örneği.....	47
Şekil 3.18: Gama sintilasyon (NaI) probunu içeren taşınabilir doz ölçer sistemi.....	50
Şekil 4.1: Farklı türde balık örneklerine karşılık ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.....	52

Şekil 4.2: Kara midye örneklerine karşılık ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.....	53
Şekil 4.3: Büyükada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.	56
Şekil 4.4: Heybeliada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.	58
Şekil 4.5: Burgazada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.	59
Şekil 4.6: Kınalıada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.	61
Şekil 4.7: Büyükada, Heybeliada, Burgazada ve Kınalıada'nın antropojenik çekirdek ^{137}Cs 'nin aktivite konsantrasyonu dağılım haritaları.....	62
Şekil 4.8: Büyükada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.....	64
Şekil 4.9: Heybeliada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.....	65
Şekil 4.10: Burgazada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.....	66
Şekil 4.11: Kınalıada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.	67
Şekil 4.12: Büyükada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.....	68
Şekil 4.13: Heybeliada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.....	69
Şekil 4.14: Burgazada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.....	69
Şekil 4.15: Kınalıada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.	70
Şekil 4.16: Prens Adaları için havadaki gama doz dağılım haritaları.	71

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Bazı kayaç tiplerinde doğal olarak var olan radyoaktif çekirdekler ve oranları gösterilmektedir [30].	21
Tablo 2.2: Germanyum kristalinin bazı özellikleri [41, 43, 44].	27
Tablo 4.1: Balık örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.	51
Tablo 4.2: Kara midye örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.	52
Tablo 4.3: Balık örneklerinin tüketimiyle maruz kalınan yıllık etkin içsel dozlar.	53
Tablo 4.4: Kara midye örneklerinin tüketimiyle maruz kalınan yıllık etkin içsel dozlar.	54
Tablo 4.5: Büyükada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.	55
Tablo 4.6: Heybeliada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.	57
Tablo 4.7: Burgazada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.	59
Tablo 4.8: Kınalıada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.	60
Tablo 4.9: Büyükada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.	63
Tablo 4.10: Heybeliada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.	65
Tablo 4.11: Burgazada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.	66
Tablo 4.12: Kınalıada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.	67
Tablo 5.1: Dünyanın farklı bölgelerinde balık örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilmiş olan ^{210}Po aktivite konsantrasyon verilerinin kıyaslanması [66 – 74].	72
Tablo 5.2: Dünyanın farklı bölgelerinde midye örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen ^{210}Po aktivite konsantrasyon verilerinin kıyaslanması [75 – 83].	73

Tablo 5.3: Dünya ve Türkiye'nin farklı bölgelerinde toprak örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs konsantrasyonları ve yıllık etkin doz verilerinin kıyaslanması [7, 27, 84 – 98].74

Tablo 5.4: Dünya'da ve Türkiye'de havadaki gama radyasyonunun tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışma verileri ile kıyaslanması [14, 85, 99 – 105].75

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
^{238}U	: Uranyum – 238 çekirdeği
^{232}Th	: Toryum – 232 çekirdeği
^{40}K	: Potasyum – 40 çekirdeği
^{137}Cs	: Sezyum – 137 çekirdeği
^{210}Po	: Polonyum – 210 çekirdeği
Z	: Atom numarası
N	: Nötron sayısı
$t_{1/2}$	: Yarı - ömür
λ	: Bozunma sabiti
N_0	: Başlangıçtaki radyoaktif çekirdek sayısı
t_0	: Başlangıç zamanı
t	: Bitiş zamanı
τ	: Ortalama yaşam süresi
N_A^0	: Başlangıçtaki A çekirdeklerinin sayısı
N_A	: t süresi sonunda A çekirdeklerinin sayısı
λ_A	: A çekirdekleri için bozunma sabiti
N_B^0	: Başlangıçtaki B çekirdeklerinin sayısı
N_B	: t süresi sonunda B çekirdeklerinin sayısı
λ_B	: B çekirdekleri için bozunma sabiti
k_A	: A çekirdeklerinin dedekte edilme katsayısı
k_B	: B çekirdeklerinin dedekte edilme katsayısı
A_A	: A çekirdeklerinin aktivitesi
A_B	: B çekirdeklerinin aktivitesi
β^-	: Beta – eksi bozunması
α	: Alfa bozunması
^{209}Po	: Polonyum – 209 çekirdeği
^{237}Np	: Neptinyum – 237
^{241}Am	: Amerisiyum – 241 çekirdeği
^{244}Cm	: Küriyum – 244 çekirdeği

HNO₃	: Nitrik asit
HCl	: Hidroklorik asit
H₂O₂	: Hidrojen peroksit
Fe⁺³	: 3 elektronlu (yükü) Demir elementi
Fe⁺²	: 2 elektronlu (yükü) Demir elementi
A_{0s}	: ²¹⁰ Po'un aktivitesi
A_{0T}	: ²⁰⁹ Po (izleyici)'un başlangıç aktivitesi
K_T	: ²⁰⁹ Po çekirdeği için bozunma düzeltme faktörü
N_s	: ²¹⁰ Po çekirdeğinin fotopiki altında kalan alan
K_s	: ²¹⁰ Po çekirdeği için bozunma düzeltme faktörü
N_T	: ²⁰⁹ Po çekirdeğinin fotopiki altında kalan alan
E_{210Po}	: ²⁰⁹ Po'dan kaynaklanan yıllık etkin içsel doz seviyesi
⁶⁰Co	: Kobalt – 60 çekirdeği
¹⁰⁹Cd	: Kadmiyum – 109 çekirdeği
⁵⁷Co	: Kobalt – 57 çekirdeği
¹³⁹Ce	: Seryum – 139 çekirdeği
²⁰³Hg	: Cıva – 203 çekirdeği
¹¹³Sn	: Kalay – 113 çekirdeği
⁸⁵Sr	: Stronsiyum – 85 çekirdeği
⁸⁸Y	: İttriyum – 88 çekirdeği
²²⁶Ra	: Radyum – 226 çekirdeği
²¹⁴Pb	: Kurşun – 214 çekirdeği
²¹⁴Bi	: Bizmut – 214 çekirdeği
²⁰⁸Tl	: Talyum – 208 çekirdeği
²²⁸Ac	: Aktinyum – 228 çekirdeği
A_{Ei}	: i çekirdeği için E enerjisindeki kütle başına aktivite
N_{Ei}	: E _i enerjili fotopikin altında kalan alan
ε	: E _i enerjili fotopikin verimi
P_γ	: Fotopik enerjisine karşılık gelen gama ışınının yayımlanma olasılığı
t	: Ölçüm süresi
m	: Ölçülen örneğin kütlesi
L_D	: Dedekte etme limiti
B	: Arka fon sayımı
A_{238U}	: ²³⁸ U çekirdeğinin aktivitesi

$A_{232\text{Th}}$	: ^{232}Th çekirdeğinin aktivitesi
$A_{40\text{K}}$	: ^{40}K çekirdeğinin aktivitesi
$A_{137\text{Cs}}$	: ^{137}Cs çekirdeğinin aktivitesi
D	: Absorblanmış doz

Kısaltmalar	Açıklama
NORM	: Doğal Olarak Oluşan Radyoaktif Malzemeler (Naturally Occuring Radioactive Materials)
ZnS(Ag)	: Çinko Sülfür sintilasyon dedektörü
mBq L⁻¹	: Litre başına milibecquerel
Bq kg⁻¹	: Kilogram başına becquerel
PIPS	: Pasifleştirilmiş İmplant Düzlemsel Silikon (Passivated Implanted Planar Silicon)
HPGe	: Yüksek Saflıklı Germanyum (High Purity Germanium)
μSv	: Mikrosievert
Sv	: Sievert
μSv y⁻¹	: Yıl başına mikrosievert
eV	: Elektronvolt
J	: Joule
dpm	: Dakika başına bozunma (Disintegration per minute)
dps	: Saniye başına bozunma (Disintegration per second)
μg/g	: Gram başına mikrogram
kg	: Kilogram
°C	: Santigrat derece
MeV	: Megaelektronvolt
mBq	: Milibecquerel
Bq	: Becquerel
LSC	: Sıvı Sintilasyon Sayıcısı (Liquid Scintillation Counter)
preamp	: Ön yükselteç (preamplifier)
amp	: Yükselteç (amplifier)
ADC	: Analog Dijital Dönüştürücü (Analog Digital Converter)
MCA	: Çok Kanallı Analizör (Multi Channel Analyzer)
kV	: Kilovolt
μm	: Mikrometre
keV	: Kiloelektronvolt
nm	: Nanometre
NaI(Tl)	: Talyum ile aktive edilmiş Sodyum İyodür (Thallium activated Sodium Iodide)
Ge(Li)	: Lityum sürüklenmiş Germanyum (Lithium drifted Germanium)
atom/cm³	: Santimetre küp başına atom

g mol⁻¹	: Mol başına gram
g cm⁻³	: Santimetre küp başına gram
K	: Kelvin
m	: Metre
cm	: Santimetre
V	: Volt
FWHM	: Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik (Full Width at Half Maximum)
mm²	: Milimetrekare
mm	: Milimetre
µl	: Mikrolitre
ml	: Mililitre
M	: Molar
CF	: Dönüşüm Faktörü (Conversion Factor)
µSv y⁻¹	: Yıl başına mikrosievert
Sv Bq⁻¹	: Becquerel başına sievert
kg y⁻¹	: Yıl başına kilogram
MDA	: Minimum Dedekte Edilebilir Aktivite
nGy h⁻¹	: Saat başına nanogray
AED	: Yıllık Etkin Doz (Annual Effective Dose)
Sv Gy⁻¹	: Gray başına sievert
R/h	: Saat başına röntgen
Sv/h	: Saat başına sievert
cpm	: Dakika başına sayım (count per minute)
cps	: Saniye başına sayım (count per second)

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ALFA ve GAMA SPEKTROSKOPİSİ ile ÇEVRESEL ÖRNEKLERDE RADYOAKTİVİTE ÖLÇÜMÜ ve ANALİZİ

Nurgül HAFIZOĞLU ALKAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

Tüm canlılar yaşamları boyunca doğal ve yapay kaynaklı radyasyona maruz kalmaktadırlar. Doğal radyoaktivitenin radon gazından sonra en önemli kısmı topraktaki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K çekirdeklerinden kaynaklanmaktadır. Topraktaki yapay radyoaktivitenin en önemli kaynağı ise, nükleer kaza ve silahlardan kaynaklanan serpintilerin sonucu olan ^{137}Cs çekirdeğidir. İnsanlar içsel olarak gıdalardan da belli bir radyasyon dozuna maruz kalırlar. Bu dozun bir kaynağı da uranyum bozunum ürünlerinden olan ^{210}Po çekirdeğidir.

Bu tez çalışmasında, İstanbul Prens Adaları bölgesinde tüketilen 13 farklı türdeki balık ve 3 adet kara midye örnekleri için ^{210}Po spesifik aktivite konsantrasyonları, örneklerin radyokimyasal olarak ayrıştırılmasından sonra Alfa Spektroskopisi Sistemi ile analiz edilmiştir. Ayrıca aynı bölgelerden toplanan 56 adet toprak ve plaj kumu örneklerinde ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K doğal ve ^{137}Cs antropojenik çekirdeklerinin aktivite konsantrasyonları Gama Spektroskopisi Sistemi kullanılarak belirlenmiş ve bu örnekleme noktalarında taşınabilir gama dedektörü ile havadaki gama dozları ölçülmüştür. Tüm çekirdekler için bu bölgede yaşayan insanların maruz kaldıkları yıllık içsel ve dışsal eşdeğer dozlar hesaplanmıştır.

Temmuz 2019, 110 sayfa.

Anahtar kelimeler: Radyoaktivite, Alfa Spektroskopisi, Gama Spektroskopisi, Polonyum-210, Uranyum-238, Toryum-232, Potasyum-40, Sezyum-137

SUMMARY

Ph.D. THESIS

MEASUREMENT and ANALYSIS of RADIOACTIVITY in ENVIRONMENTAL SAMPLES with ALPHA and GAMMA SPECTROSCOPY

Nurgül HAFIZOĞLU ALKAN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

All living organisms are exposed to radiation from natural and artificial radionuclides throughout their lives. The most significant part of natural radioactivity after radon gas arises from the ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K nuclides in the soil. The most important source of artificial radioactivity is the ^{137}Cs nuclide which is the result of the nuclear fallout caused by nuclear accidents and weapons. People are also exposed to internally a certain radiation dose from the foodstuffs. A source of this dose is the ^{210}Po nuclide which is one of the uranium decay products.

In this thesis, ^{210}Po specific activity concentrations for 13 different types of fish and 3 mussels consumed in the Prince Islands, İstanbul were analysed by Alpha Spectroscopy after the samples were separated by radiochemical analysis. In addition, the activity concentrations of ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K natural nuclides and anthropogenic ^{137}Cs nuclide in 56 soil and beach sand samples collected from the same regions were determined by using Gamma Spectroscopy. Gamma doses in air were measured with portable gamma detector. For all nuclides, annual internal and external dose equivalents were calculated for the people living in this region.

July 2019, 110 pages.

Keywords: Radioactivity, Alpha Spectroscopy, Gamma Spectroscopy, Polonium-210, Uranium-238, Thorium-232, Potassium-40, Cesium-137

1. GİRİŞ

İnsanoğlu ve dünya üzerinde yaşayan tüm canlılar sürekli olarak doğal ve yapay kaynaklardan gelen iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaktadır. Yaşanılan bölge şartlarına göre maruz kalınan radyasyon dozu da değişmektedir. Toprak yapısında granitin ve mineralli kumun yoğun olduğu bölgelerde yaşayanlar daha çok karasal radyasyona maruz kalmakta, deniz seviyesinden daha yüksek bölgelerde yaşayan veya çalışanlar da daha çok kozmik radyasyona maruz kalmaktadırlar. Maruz kaldığımız doğal radyasyonun önemli bir kısmı da (yaklaşık %50) yer kabuğundan gaz olarak açığa çıkıp, soluduğumuz hava ortamında da mevcut olan radondur. Bu gaz renksiz, kokusuz ve tatsızdır.

Dünya üzerinde yaşayan canlıların maruz kaldıkları doz oranının yaklaşık %85'i doğal radyasyondan kaynaklanmakta olup, bunun önemli bir miktarı da topraktan gelmektedir.

Doğal olarak oluşan radyoaktif materyaller (NORM: Naturally Occuring Radioactive Material), belirli koşullar altında, radyolojik olarak tehlikeli olan seviyelere ulaşabilmektedir. Topraktaki doğal radyoaktivite temel olarak ^{238}U ve ^{232}Th serilerindeki ve ^{40}K çekirdeklerinden kaynaklanmaktadır.

Yapay olarak elde edilen radyasyon kaynaklarının maruz kalınan radyasyon dozuna katkısı %15 civarında olup, nükleer merkezler, endüstri, tıp gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda nükleer reaktör kazası gibi olaylar sonucunda atmosferik yollarla başka bölgelere taşınmakta olan fisyon ürünlerinin sebep olduğu ^{137}Cs gibi yapay radyoaktif çekirdeklerin de yapay radyasyon ve topraktaki radyasyon dozuna katkısı bulunmaktadır.

Uranyum serisinde yer alan ^{210}Po çekirdeği, fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerle su ortamlarına taşınmakta olup, bu ortamlarda ve bu ortamlarda yaşayan canlı türlerinde yoğun şekilde bulunmaktadır. Su ortamlarında da var olan radyoaktif çekirdeklerin, bu ortamlardan elde edilen gıda ürünleri (örneğin; çeşitli balık türleri, denizel omurgasızlar gibi) ile birleşmesi, insanların bu ürünleri tüketerek maruz kaldıkları doğal radyasyon dozuna katkıda bulunmaktadır. İnsanlar tarafından tüketilen gıda ürünlerinde (deniz ürünleri, tahıllar gibi) var

olan ^{210}Po çekirdeği vücuda girdiğinde dalak, karaciğer, böbrek ve kemik iliğinde birirmektedir.

Alfa parçacığı yayımlayan bir çekirdek olan ^{210}Po , insan vücuduna girdiğinde önemli ölçüde biyolojik hasara sebebiyet vermektedir. ^{210}Po 'dan açığa çıkan alfa parçacıklarının tespit edilmesi iki açıdan önemlidir. İlk olarak, radon ürünü olmaları sebebiyle radon kaynaklı olarak önemli bir radyasyon dozu oluşturmaktadırlar. İkinci olarak, alfa ışıması yapmakta ve kararlı bir çekirdek olan ^{206}Pb 'ya bozunmaktadırlar. ^{210}Po 'nun bozunum ürünü olan kararlı yapıdaki ^{206}Pb vücutta en çok kemiklerde birikmekte olup, kemiklerdeki kalsiyum birikimini engellemektedir.

Su ortamlarında yaşayan insanların tükettiği gıda ürünlerindeki (balık, midye, karides gibi) ve diğer deniz organizmalarındaki ^{210}Po birikimini ve aktivite seviyelerini belirlemek, maruz kalınan radyasyon dozunun tespiti açısından oldukça önemlidir.

Gerek Türkiye gerekse dünya genelinde toprakta ve denizel örnekler ile gerçekleştirilen doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesine yönelik bazı çalışmalar aşağıda sunulmaktadır:

Hindistan'da yapılan bir çalışmada, 6 adet su, 6 adet sediment, 17 adet yüzgeçli ve kabuklu balık örneklerinde ^{210}Po ve ^{210}Pb aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Ölçümler ZnS(Ag) dedektörünü içeren radyasyon sayım sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Su örneklerindeki ^{210}Po aktivitesi $1,2 \pm 0,15 \text{ mBq L}^{-1} - 1,6 \pm 0,29 \text{ mBq L}^{-1}$ değerleri arasında ve ortalama $1,4 \pm 0,16 \text{ mBq L}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Sediment örneklerindeki ^{210}Po aktivitesi $2,6 \pm 0,23 \text{ Bq kg}^{-1} - 4,0 \pm 0,18 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında ve ortalama $3,3 \pm 0,56 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Yüzgeçli ve kabuklu balık örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonları $1,28 \pm 0,21 \text{ Bq kg}^{-1} - 45,2 \pm 3,94 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında bulunmuştur [1].

Finlandiya'da yapılan bir çalışmada, dört adet gölden su ve balık örnekleri toplanmıştır. Su örneklerinin ^{210}Po aktivite konsantrasyonları Myllyjarvi gölünde ortalama $0,002 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak, Vesijakojarvi gölünde ortalama $0,0016 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak, Iso-Ahvenainen gölünde ortalama $0,002 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak ve Miestamo gölünde ortalama $0,0019 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Levrek balığının ^{210}Po aktivite konsantrasyonu ortalama $1,345 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak, Turna balığının ^{210}Po aktivite konsantrasyonu ortalama $2,152 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak, Çipura'nın ^{210}Po aktivite konsantrasyonu ortalama $6,532 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir [2].

İspanya’da yapılan bir çalışmada, balığın farklı bölgelerinde (kas, kemik, bağırsak gibi) ^{210}Po aktivite konsantrasyonları alfa spektrometresi ile belirlenmiştir. Kas dokusu ^{210}Po aktivite seviyesi $28 \pm 8 \text{ Bq kg}^{-1}$, balığın bağırsak dokusundaki ^{210}Po aktivite seviyesi $8558 \pm 6378 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır [3].

Kore’de yapılan bir çalışmada, 5 farklı balık türünde ^{210}Po aktivite seviyeleri 0,51 ile 5,56 Bq kg^{-1} arasında belirlenmiştir. Balık örneklerinin ölçümleri PIPS dedektöre sahip alfa spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir [4].

Malezya’da yapılan bir çalışmada, Ağustos 2008, Aralık 2008 ve Şubat 2009 aylarında deniz ürünlerinden balık, karides ve istiridye örnekleri toplanmıştır. Bu örneklerdeki ^{210}Po aktivite seviyeleri alfa spektrometresi yardımıyla belirlenmiş olup, balık örneklerindeki aktivite konsantrasyonu 0,06 ile 5,64 Bq kg^{-1} değerleri arasındadır [5].

İstanbul’da gerçekleştirilen bir çalışmada, topraktaki doğal radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarını belirleyebilmek için 105 adet toprak örneği toplanarak, yüksek saflıklı Germanyum dedektörünü (HPGe) içeren gama spektroskopi sistemi ile ölçülmüştür. ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K çekirdeklerinin ortalama aktivite konsantrasyonları; 21, 37 ve 342 Bq kg^{-1} olarak belirlenmiştir ve bu bölgede yaşayan bir insanın maruz kalacağı ortalama yıllık etkin doz ise 80 μSv olarak hesaplanmıştır [6].

Kütahya’da 357 toprak örneği ile yapılan çalışmada, 3x3 NaI(Tl) gama dedektörünü içeren gama spektroskopi sistemi kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda toprak örneklerinin toplandığı her bir noktada havadaki gama doz seviyeleri de taşınabilir el dedektörü (LUDLUM 2241-3RK) yardımıyla ölçülmüştür. ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K çekirdekleri için ortalama spesifik aktivite konsantrasyonları sırasıyla; $56,4 \pm 1,6 \text{ Bq kg}^{-1}$, $25,9 \pm 1,1 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $538,4 \pm 6,6 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiş ve yıllık etkin doz seviyesi ortalama $78,7 \mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır [7].

Bosna ve Hersek’de gerçekleştirilen bir çalışmada, 31 adet toprak örneği toplanmış ve ölçümleri yüksek saflıklı Germanyum (HPGe) dedektörünü içeren gama spektroskopi sistemi ile yapılmıştır. Toprak örneklerindeki ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K çekirdeklerinin aktivite seviyeleri sırasıyla, 8 ± 4 ile $95 \pm 28 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında, $0,41 \pm 0,06$ ile $4,6 \pm 0,7 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında, 7 ± 1 ile $66 \pm 7 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında, 6 ± 1 ile $55 \pm 6 \text{ Bq kg}^{-1}$ arasında ve 83 ± 12 ile $546 \pm 55 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir [8].

Brezilya’da yapılan bir çalışmada, 52 adet toprak örneği toplanmış ve yüksek saflıklı Germanyum dedektörü ile ölçümleri gerçekleştirilerek, topraktaki doğal radyoaktif çekirdekler olan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $29,2 \pm 19,5 \text{ Bq kg}^{-1}$, $47,8 \pm 37,3 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $704 \pm 437 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Yıllık etkin doz eşdeğeri $552 \mu\text{Sv}$ olarak belirlenmiştir [9].

Kanada’da yapılan bir çalışmada, 28 adet toprak örneğindeki ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K doğal ve ^{137}Cs antropojenik çekirdeklerinin aktivite konsantrasyonları koaksiyel bir germanyum dedektörü kullanılarak belirlenmiş ve hesaplanmıştır. Ortalama aktivite konsantrasyonları ^{226}Ra için $15,6 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{232}Th için $12,3 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{40}K için $415,8 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve ^{137}Cs için $0,8 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak bulunmuştur [10].

Sırbistan’da yapılan bir çalışmada, 37 adet toprak örneği HPGe dedektörünü içeren gama spektroskopi sistemi ile ölçülmüş ve ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K çekirdeklerinin aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Ortalama yıllık etkin doz değeri $7,7 \times 10^{-5} \text{ Sv}$ olarak hesaplanmıştır [11].

Pakistan’da gerçekleştirilen bir çalışmada, 16 adet toprak ve 17 adet kayaç örneğindeki doğal ve yapay radyoaktif çekirdek konsantrasyonları p-tipi koaksiyel yüksek saflıklı Germanyum dedektörünü içeren gama spektroskopi sistemi ile belirlenmiştir. Toprak örnekleri için ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal çekirdekleri için ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $31,25 \pm 0,46 \text{ Bq kg}^{-1}$, $44,1 \pm 1,07 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $575 \pm 8,89 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak, antropojenik çekirdek olan ^{137}Cs için ortalama aktivite konsantrasyonu $15,04 \pm 0,29 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Kayaç örnekleri için ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K doğal çekirdekleri için ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $28,46 \pm 0,45 \text{ Bq kg}^{-1}$, $48,63 \pm 1,12 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $666,7 \pm 9,39 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak, antropojenik çekirdek ^{137}Cs için ortalama aktivite konsantrasyonu $5,7 \pm 0,16 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır [12].

Libya’da yapılan bir çalışmada, 10 adet granit gibi birincil kökenli kayaçlar toplanarak %23 dedektör vermine sahip yüksek saflıklı Germanyum dedektörünün bulunduğu gama spektroskopisi ile karasal çekirdekler olan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’un analizleri gerçekleştirilmiştir. ^{226}Ra için aktivite konsantrasyonları $22 - 5256 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında, ^{232}Th için aktivite konsantrasyonları $11 - 221 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında ve ^{40}K için aktivite konsantrasyonları $132 - 2304 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında bulunmuştur. Yıllık etkin doz değeri $308,9 \mu\text{Sv}$ olarak hesaplanmıştır [13].

Trabzon’da gerçekleştirilen bir çalışmada, 222 adet toprak örneği toplanarak, yüksek saflıklı Germanyum dedektörü ile ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs aktivite konsantrasyonları ortalama 41, 35, 437 ve 21 Bq kg⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Maruz kalınan yıllık etkin doz değeri 72 µSv y⁻¹ olarak bulunmuştur [14].

Bu doktora tezi çalışmasında, İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesinden tutulmuş olan 13 adet farklı türde balık örneği ve 3 adet kara midye temin edilmiş ve her bir numune radyokimyasal bir sürece tabii tutularak, iyon implante edilmiş yarı iletken dedektörleri içermekte olan Alfa Spektroskopisi ile balık ve kara midye numunelerinin ^{210}Po aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Elde edilen ^{210}Po çekirdeğinin aktivite seviyelerinden bu denizel ürünleri tüketen yetişkinlerin içsel olarak maruz kaldıkları etkin dozlar hesaplanmıştır.

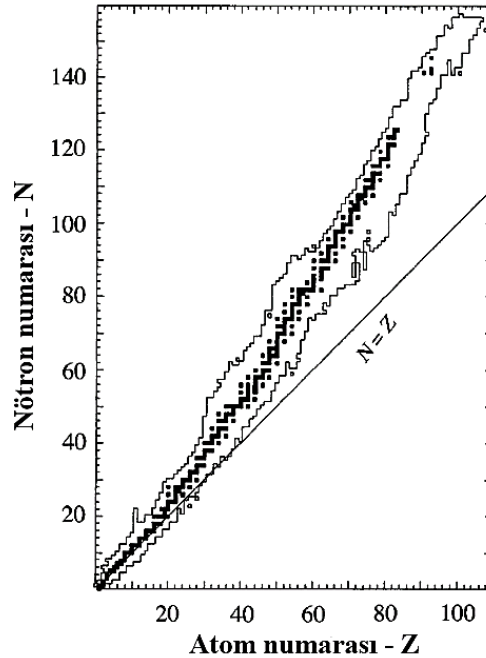
İlaveten İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Heybeliada) bölgesinden toplanan 56 adet toprak ve plaj kumu örneklerinin p – tipi, dedektör verimi %35 olan yüksek saflıklı Germanyum (HPGe) dedektörünü içeren Gama Spektroskopi Sistemi ile doğal radyoaktivite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu örneklerin ölçümleri sonucunda Gamma Vision 6.2 yazılımı kullanılarak elde edilen spektrumların analiz edilmesi ile toprak ve plaj kumu örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal çekirdeklerinin ve antropojenik bir çekirdek olan ^{137}Cs ’un spesifik aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Ayrıca toprak ve plaj kumu örneği toplanan örnekleme noktalarında, taşınabilir gama dedektörü (LUDLUM 2241, NaI prob) ile havadaki gama dozu seviyeleri de ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara dayanarak bu bölgelerde yaşayanların maruz kaldığı yıllık etkin dozlar hesaplanmış ve dünyada gerçekleştirilen diğer çalışmalar ile kıyaslanmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. NÜKLEER BOZUNMALARIN TEMELİ

Aynı atom numarasına fakat farklı nötron sayısına (farklı kütle numaralarına) sahip bir elementin atomlarına izotop denilmektedir. İzotoplar aynı kimyasal özelliklere sahiptir fakat fiziksel özellikleri birbirinden farklıdır. Bazı izotopların atom çekirdekleri fazla bir enerjiye sahiptir, kararsızdır ve farklı bir izotopun daha kararlı çekirdeklerini oluşturmak için parçalanmaktadırlar. Bu süreç, nükleer radyasyon olarak isimlendirilen parçacık yayınlama ya da elektromanyetik radyasyon eşlik etmektedir. Bu özelliğe sahip olan çekirdekler radyoaktif çekirdekler olarak adlandırılmakta olup, sürece ise nükleer ya da radyoaktif bozunma denilmektedir [15].

Kararlı çekirdekler $N - Z$ düzleminde (Şekil 2.1) çok dar bir bantta görülmektedir, bu bant kararlılık bandı olarak isimlendirilmektedir. En ağır kararlı element bizmuttur ($Z = 83$, $N = 126$). Ayrıca şekilde, yüksek atom numarasına sahip bazı kararsız çekirdeklerin yeri de görülmektedir (Toryum ($Z = 90$) ve Uranyum ($Z = 92$)) [15].



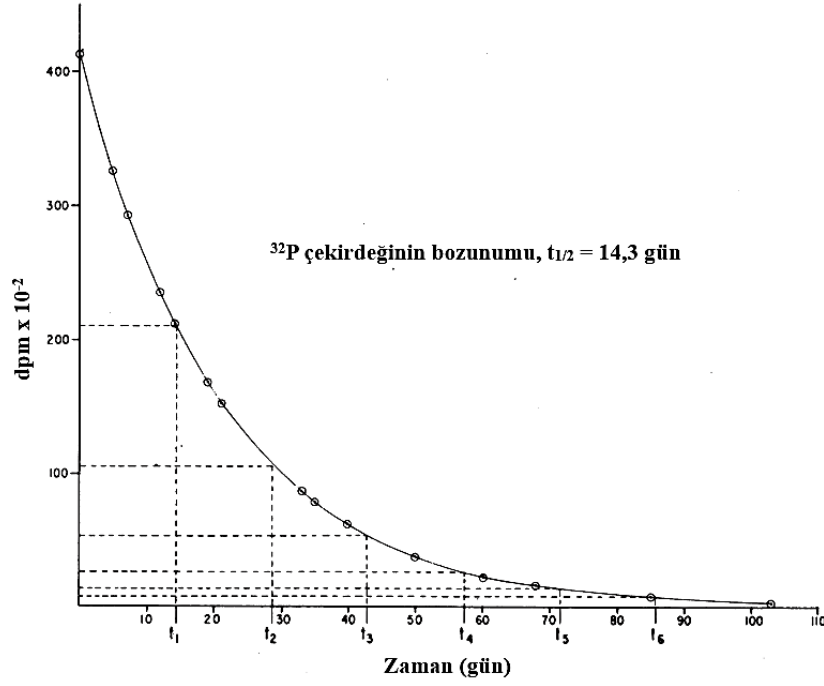
Şekil 2.1: Kararlı çekirdeklerin dağılımı: Koyu renkli kare şeklindeki bölgeler kararlı ve doğada oluşan uzun yarı ömürlü çekirdeklerdir; pürüzlü çizgiler içerisinde yer alan bölgeler bilinen diğer çekirdekleri ifade etmekte olup, kararsızdır [16].

Diğer tüm çekirdekler kararsızdır ve çeşitli radyoaktif bozunma modlarında kendiliğinden bozunmaktadırlar. Başlıca radyoaktif bozunum modları alfa ve beta bozunumlarıdır. Gama yayınlanması sıklıkla alfa ya da beta bozunumlarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Gama spektrometresinde kullandığımız enerji birimleri elektron voltur (eV), burada $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$. Gama radyasyonunun enerjileri keV mertebesinde elverişlidir [15].

2.1.1. Radyoaktif Bozunma Kanunu ve Denge

Bir radyoaktif kaynağın ya da radyoaktif çekirdek örneğinin aktivitesi, birim zaman başına şiddetinin ya da yoğunluğunun azalması veya başka bir deyişle bozunan çekirdek sayısı olarak ifade edilmektedir (dpm – dakika başına bozunma, dps – saniye başına bozunma). Bir örnek içerisindeki belirli bir radyoaktif çekirdeğin aktivitesi o örnekte bulunan radyoaktif atomların sayısı ile orantılıdır. Sonuç olarak, bir radyoaktif çekirdeğin aktivitesi de kütlesinin bir ölçüsüdür. Radyoaktif çekirdeğin bozunmasının sonucu olarak aktivitesi zamanla azalmaktadır. Belirli miktardaki radyoaktif çekirdeğin aktivitesinde gözlemlenebilir bir değişimin olduğu zaman birimi saniyeler kadar kısa ya da yıllar kadar uzun olabilmektedir. Bazı çekirdeklerin bozunma oranı o kadar yavaştır ki, insanların yaşam süreleri boyunca bu çekirdeklerin aktivitelerindeki değişimi ölçmek imkansızdır [17].

Radyoaktif çekirdeğin bozunma oranları genellikle yarı-ömür cinsinden ifade edilmektedir. Bu terim belli bir miktar radyoaktif çekirdeğin aktivitesinin %50'sini kaybetmesi için gerekli olan süreyi ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle, belirli sayıda çekirdeğin yarısının bozunması için gereken süredir. ^{32}P çekirdeğinin bozunma eğrisi yarı-ömür kavramını örneklemektedir (Şekil 2.2). Şekil 2.2'de, ^{32}P çekirdeğinin aktivitesi gün cinsinden zamana karşı çizilmiştir. Her 14,3 günlük zaman aralığından sonra, ^{32}P aktivitesinin yarı yarıya azaldığı görülebilmektedir. Dolayısıyla, ^{32}P çekirdeğinin yarı-ömrü, $t_{1/2}$, 14,3 gündür [17].



Şekil 2.2: Grafik ^{32}P çekirdeğinin gün cinsinden zamana karşılık dakika başına bozunumunu lineer olarak göstermektedir. X ve y eksenleri arasındaki yatay ve düşey çizgiler, t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , t_5 , t_6 sembolleriyle tanımlanmış olan altı yarı-ömür sonundaki ^{32}P çekirdeğinin aktivitelerini (dpm) ifade etmektedir [17].

Radyoaktif çekirdek bozunumu en iyi matematiksel terimler ile tanımlanabilmektedir. Belirli bir zamanda, Δt , bozunan atomların sayısı, ΔN , var olan radyoaktif atomların sayısı, N , ile orantılıdır. Bu ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilir [18];

$$\Delta N / \Delta t = -\lambda N \quad (2.1)$$

ya da

$$dN/dt = -\lambda N \quad (2.2)$$

burada λ bir orantı sabitidir, genellikle bozunma sabiti olarak adlandırılmaktadır ve negatif işaret zamanla radyoaktif çekirdek sayısında meydana gelen azalmayı ifade etmektedir.

Radyoaktif çekirdek bozunum hesaplamaları için, denklem (2.2)'yi aşağıdaki gibi daha uygun bir forma dönüştürmek gerekmektedir [17, 18].

$$dN/N = -\lambda dt \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de eşitliğin solundaki ifade N_0 ve N sınırları arasında ve eşitliğin sağındaki ifade ise t_0 ve t sınırları arasında integre edilebilmektedir. Burada t_0 , 0'dır, N_0 , başlangıçta t_0 anındaki var olan atomların sayısıdır ve N ise t zaman sonra kalan atomların sayısıdır. Bunlara göre [17, 18];

$$\int_{N_0}^N dN/N = -\lambda \int_{t_0}^t dt \quad (2.4)$$

$$\ln N/N_0 = -\lambda t \quad (2.5)$$

Denklem (2.5) eksponansiyel şekilde aşağıdaki gibi yazılabilmektedir;

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

Burada e tabii logaritmanın temeli, λ bozunma sabiti ve t zaman aralığıdır. Denklem (2.6) belirli bir zaman aralığından sonra radyoaktif çekirdek örneğinin bozunmasını belirlemek için kullanılmaktadır. Denklem (2.6)'i kullanmak için, λ bozunma sabiti değeri bilinmelidir ve bu değer her bir radyoaktif çekirdek için farklıdır. Belirli bir radyoaktif çekirdeğin λ bozunma sabitini belirlemek için, denklem (2.5)'den bozunma sabiti ve yarı-ömür arasında bir ilişki türetilerek, aşağıdaki ifadeye dönüştürülebilmektedir [18];

$$\ln N_0/N = \lambda t \quad (2.7)$$

Tanım olarak, yarı-ömüre karşılık gelen bir zaman aralığından sonra radyoaktif çekirdeğin başlangıçtaki aktivitesinin yarıya düşmesi sebebiyle başlangıçtaki aktiviteyi (N_0) bir olarak, bir yarı-ömürden sonra kalan aktivite N ise birin yarısı olarak atanacaktır ve aşağıdaki denklem yazılabilir;

$$\ln 1/(1/2) = \lambda t_{1/2} \quad (2.8)$$

Buradan bozunma sabiti aşağıdaki şekilde belirlenebilmektedir [18];

$$\lambda = 0,693/t_{1/2} \quad (2.9)$$

Bir radyoaktif çekirdeğin ortalama yaşam süresi ise τ ile gösterilmekte olup, aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir [15, 19];

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.10)$$

Anne ve kız çekirdekler arasındaki en basit bozunma ilişkisi, kararlı bir kız çekirdek oluşturmak için bozunan anne çekirdek olarak düşünülebilmektedir. Bununla birlikte, çoğu radyoaktif çekirdek ise kararsız kız çekirdekler üretmektedirler. Bunu açıklayabilecek en temel durum, A anne çekirdeğinin B kız çekirdeğine dönüştüğü ve bunun sonucunda da kararlı bir C torun çekirdeğinin oluştuğu durumdur [15, 17, 18];



Böyle bir bozunma zincirinde, anne çekirdeğin bozunma oranı ile birlikte kız çekirdeğin bozunma oranı ve üretimi de düşünülmelidir. Anne çekirdeğin bozunumu basitçe aşağıdaki denklem ile ifade edilebilmektedir;

$$- dN_A/dt = \lambda_A N_A \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) integre edildiğinde aşağıdaki ifadeye dönüşmektedir;

$$N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13)'de N_A^0 , $t = 0$ anındaki anne atomların sayısıdır ve N_A , $t = t_1$ süresinin sonundaki atomların sayısıdır.

Kız çekirdeğin bozunma oranı anne çekirdek tarafından oluşturulma oranı ile birlikte kendi bozunma oranına da bağlıdır. Aşağıdaki denklem ile ifade edilebilmektedir [15, 17, 18];

$$- dN_B/dt = \lambda_B N_B - \lambda_A N_A \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)'de $\lambda_B N_B$, yalnız kız çekirdeğin bozunma oranıdır ve $\lambda_A N_A$, kız çekirdeğin oluşma oranı ya da anne çekirdeğin bozunma oranıdır. Denklem (2.13) ve (2.14) lineer bir diferansiyel denkleme dönüştürülebilmektedir [15, 17, 18];

$$dN_B/dt + \lambda_B N_B - \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} = 0 \quad (2.15)$$

Denklem (2.15) kız çekirdek sayısı (N_B) için zamanın bir fonksiyonu olarak çözülmektedir [15, 17, 18];

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_A^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_B^0 e^{-\lambda_B t} \quad (2.16)$$

Bu tür bozunma şemalarında, üç durum gözlenebilmektedir: Kalıcı denge, geçici denge ve denge durumunun olmamasıdır. Her bir durumu ayrıntılı incelemek gerekirse [18];

Kalıcı Denge: Uzun-ömürlü anne çekirdek ve onun kısa-ömürlü kız çekirdeği arasında aktivitelerinin eşit olduğu kararlı bir durumudur. Kalıcı dengenin bağlı olduğu önemli kriterler şunlardır;

1. Anne çekirdek uzun-ömürlü olmalıdır; yani, anne çekirdeğin ihmal edilebilir bozunması gözlem süreci sırasında meydana gelmektedir.
2. Kız çekirdek nispeten kısa bir yarı-ömre sahip olmalıdır. Bu son kriterin yarı-ömür farklılığı aşağıda daha açık bir şekilde ifade edilmektedir [17, 18].

$$\lambda_A/\lambda_B \leq \sim 10^4 \quad (2.17)$$

Yani,

$$\lambda_A \ll \lambda_B \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'de λ_A ve λ_B sırasıyla anne ve kız çekirdeklerin bozunma sabitleridir.

Anne çekirdekten oluşan kız çekirdeklerin büyümesi için kalıcı denge kriterleri düşünülerek Denklem (2.16)'dan faydalanarak bir denklem elde edilebilir. $\lambda_A \approx 0$, $\lambda_A \ll \lambda_B$, $e^{-\lambda_A t} = 1$ için, ilk terimin paydasında yer alan λ_A düşmektedir. Kız çekirdek fiziksel olarak anne çekirdekten ayrılırsa, $t = 0$ (anne – kız çekirdek ayrılma zamanı) zamanında $N_B^0 = 0$ 'dır ve Denklem (2.16)'nın son terimi düşmektedir. Bu yüzden, kalıcı denge durumunda, anne ile kız çekirdeklerin içe doğru büyümesini ifade eden ifade aşağıdaki şekildedir;

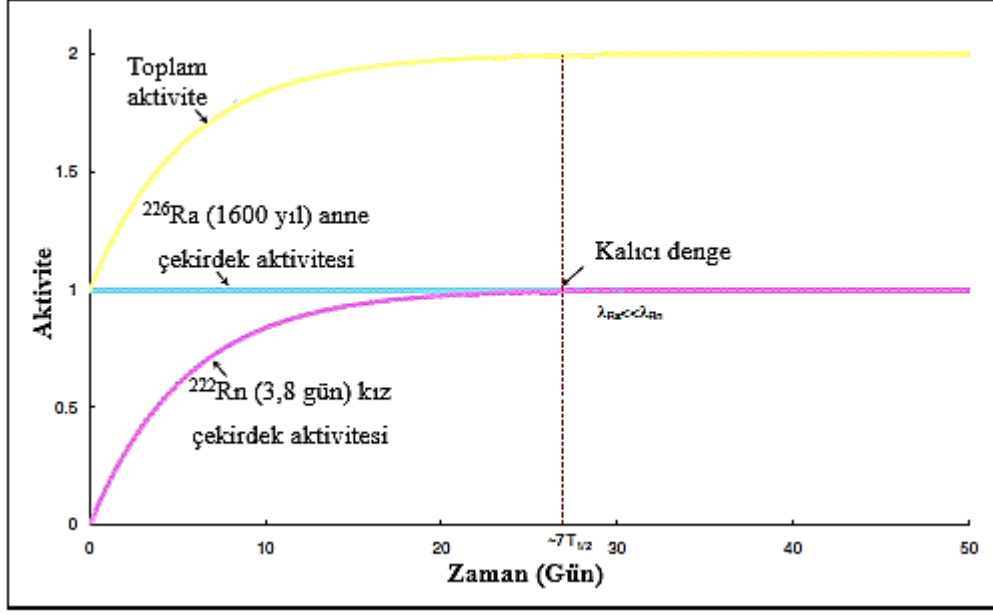
$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.19)$$

Kız çekirdeğin içe doğru büyümesinin gözlemlenmesi, kız çekirdeğin birçok yarı-ömrü için yapılırsa kız çekirdeklerin sayısının maksimum bir değere ($\lambda_A N_A^0/\lambda_B$) yaklaştığı görülmektedir. Denklem (2.19)'un son şekli kullanılarak, kız çekirdeğin içe doğru büyümesinin hesaplanması aşağıdaki denklem ile ifade edilebilmektedir [17, 18, 20].

$$N_B = (N_B)_{\max} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.20)$$

Kız çekirdeklerin aktivitesi, A_B , kız çekirdeklerin sayısı ile orantılı olduğu için, (ya da $A_B = k \lambda_B N_B$, burada k , kız çekirdeklerin dedekte edilebilme katsayısıdır.) denklem (2.20) aşağıdaki şekilde de yazılabilmektedir [17, 18].

$$A_B = (A_B)_{\max} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.21)$$



Şekil 2.3: ^{226}Ra anne çekirdeği ile onun kız çekirdeği ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengenin şematik olarak gösterilmesi [20, 21].

Geçici Denge: Kalıcı denge gibi, geçici denge durumu da anne ve kız çekirdekler arasında kararlı bir durumdur. Fakat, geçici dengede anne ve kız çekirdekler aynı aktivitelere sahip değildir. Geçici dengenin vurguladığı ölçüt, anne çekirdeğin kız çekirdekten daha uzun yaşam süresine sahip olması gerektiğidir. Fakat denklem (2.17)'de ifade edilen büyüklük değil, $\lambda_A < \lambda_B$ olması gerekmektedir. Bununla birlikte, λ_A / λ_B oranı, $10^{-4} < \lambda_A / \lambda_B < 1$ sınırları içerisinde bulunmalıdır [18, 21].

Kız çekirdeğin genel denklemi (2.16) düşünülürse, t nin yeterince büyük değerleri için $e^{-\lambda_B t}$ terimi, $e^{-\lambda_A t}$ terimiyle kıyasla ihmal edilebilmektedir. Böylece, $e^{-\lambda_B t}$ ve $N_B^0 e^{-\lambda_B t}$ terimleri genel denklemden düşürülmekte ve denklem aşağıdaki şekle dönüşmektedir [18];

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (N_A^0 e^{-\lambda_A t}) \quad (2.22)$$

Denklem (2.22) zamanın bir fonksiyonu olarak kız çekirdeğin bozunumunu ifade etmektedir.

$N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t}$ olduğu için, denklem (2.22) aşağıdaki gibi yazılabilmektedir [18, 20];

$$N_B/N_A = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)'de, atomların sayısının ya da anne ve kız çekirdeklerin aktivite oranlarının geçici denge durumunda sabit olduğu görülmektedir. $A_A = k_A \lambda_A N_A$ ve $A_B = k_B \lambda_B N_B$ olduğu için, denklem (2.23) aktivite cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir, burada A_A ve A_B anne ve kız çekirdeklerin aktiviteleridir, k_A ve k_B ise bu çekirdeklerin sırasıyla dedekte edilme katsayılarıdır [18].

$$\frac{A_B}{k_B \lambda_B} (\lambda_B - \lambda_A) = \frac{A_A}{k_A \lambda_A} \lambda_A \quad (2.24)$$

ya da

$$A_B/A_A = \frac{k_B \lambda_B}{k_A (\lambda_B - \lambda_A)} \quad (2.25)$$

Anne ve kız çekirdekler için dedekte etme katsayıları eşit kabul edilirse, denklem (2.25) aşağıdaki ifade olarak yazılabilmektedir [18];

$$A_B/A_A = \frac{\lambda_B}{(\lambda_B - \lambda_A)} \quad (2.26)$$

Böylece, geçici denge için denklem (2.26), $\lambda_B/(\lambda_B - \lambda_A)$ faktörü sebebiyle kız çekirdeğin aktivitesinin anne çekirdeğin aktivitesinden daima daha büyük olduğunu göstermektedir. Denklem (2.26) aşağıdaki ifadeye dönüştürülerek yazılabilmektedir [17, 18];

$$A_A/A_B = 1 - \lambda_A/\lambda_B \quad (2.27)$$

Buradaki A_A/A_B oranı, geçici denge durumunda $0 < A_A/A_B < 1$ sınırları arasında yer almaktadır.

$t = 0$ anında $N_B^0 = 0$ olduğu için (anne çekirdek ile kız çekirdeğin ayrılma zamanı), denklem (2.16)'nın son terimi düşmekte ve aşağıdaki şekilde yazılmaktadır [17, 18];

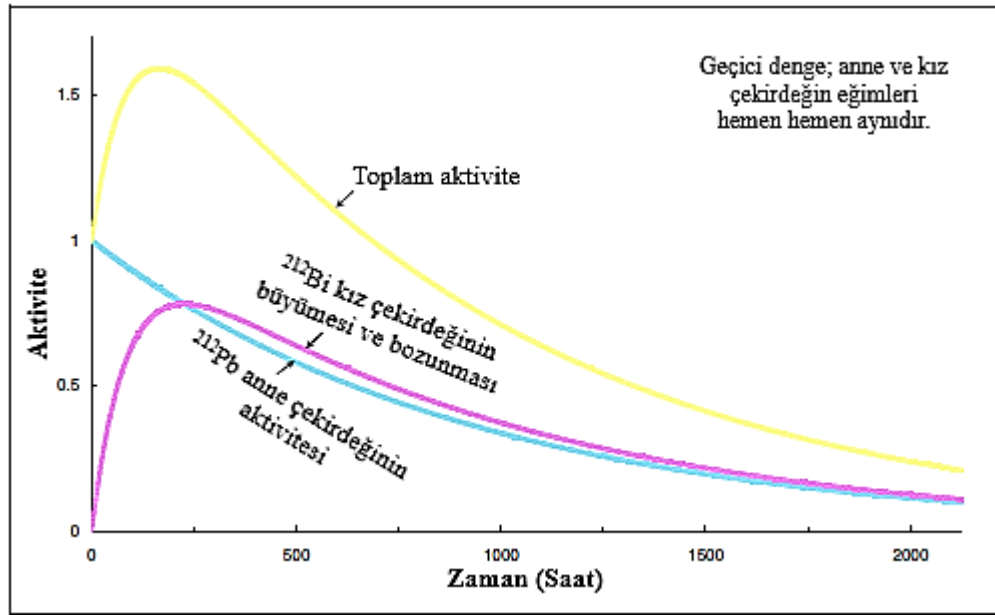
$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.28)$$

$\lambda_A N_A^0 / (\lambda_B - \lambda_A)$ terimi, kız çekirdeğin üretim oranının kız ve anne çekirdeklerin bozunma sabitleri farkına bölümünü tanımlamaktadır, aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir [17, 18];

$$N_B = (N_B)_{\max} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.29)$$

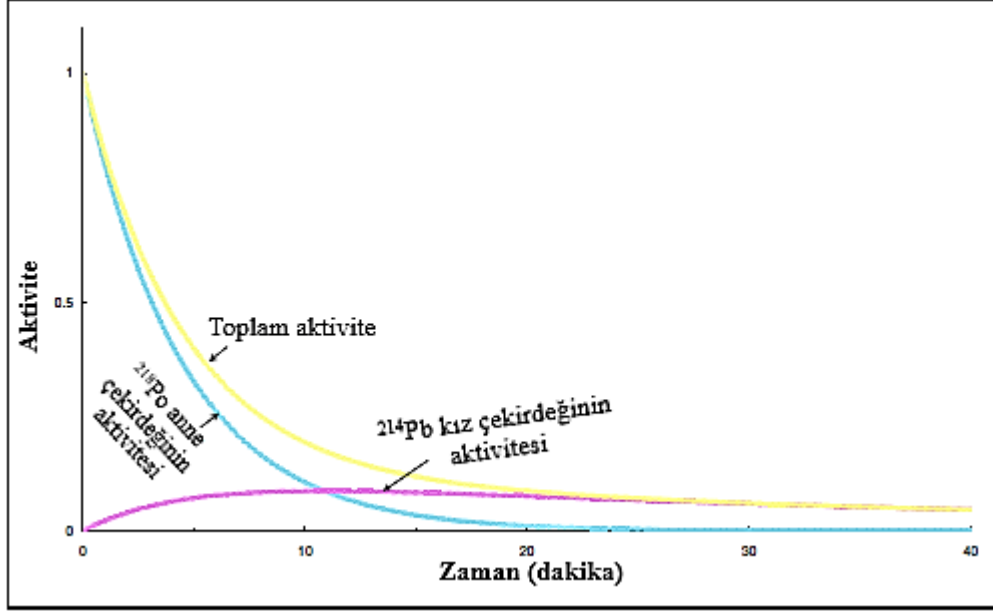
Bu ifade, denklem (2.20)'ye benzerdir. Kız çekirdeğin aktivite ifadesi ise aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir [17, 18];

$$A_B = (A_B)_{\max} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (2.30)$$



Şekil 2.4: ^{212}Pb anne çekirdeği ile onun kız çekirdeği olan ^{212}Bi arasındaki geçici denge durumunu göstermektedir. Anne ve kız çekirdeklerin aktiviteleri hemen hemen eşit olup, zamanla değişmektedir [20, 21].

Denge Olmaması Durumu: Kalıcı ve geçici denge durumları, anne çekirdeğin kız çekirdekten daha uzun ömürlü bozunma şemalarını içermektedir. Kız çekirdeğin anne çekirdeğe göre daha uzun ömürlü olduğu durumlarda, $\lambda_A > \lambda_B$, denge durumu elde edilememektedir. Anne çekirdek, kız çekirdeğe göre daha kısa bir yarı-ömre sahip olduğunda, kız çekirdeğin aktivitesi bir miktar maksimuma çıkmakta ve daha sonra kendi karakteristik yarı-ömrü ile bozunmaktadır [18, 21].



Şekil 2.5: Anne çekirdeğe göre daha uzun yarı-ömürlü ^{214}Pb kız ve ^{218}Po anne çekirdekleri arasındaki denge olmaması durumu şekilde gösterilmektedir. Toplam aktivite zamanla kız çekirdeğin aktivitesine yaklaşmaktadır [20, 21].

2.2. RADYOAKTİF SERİLER

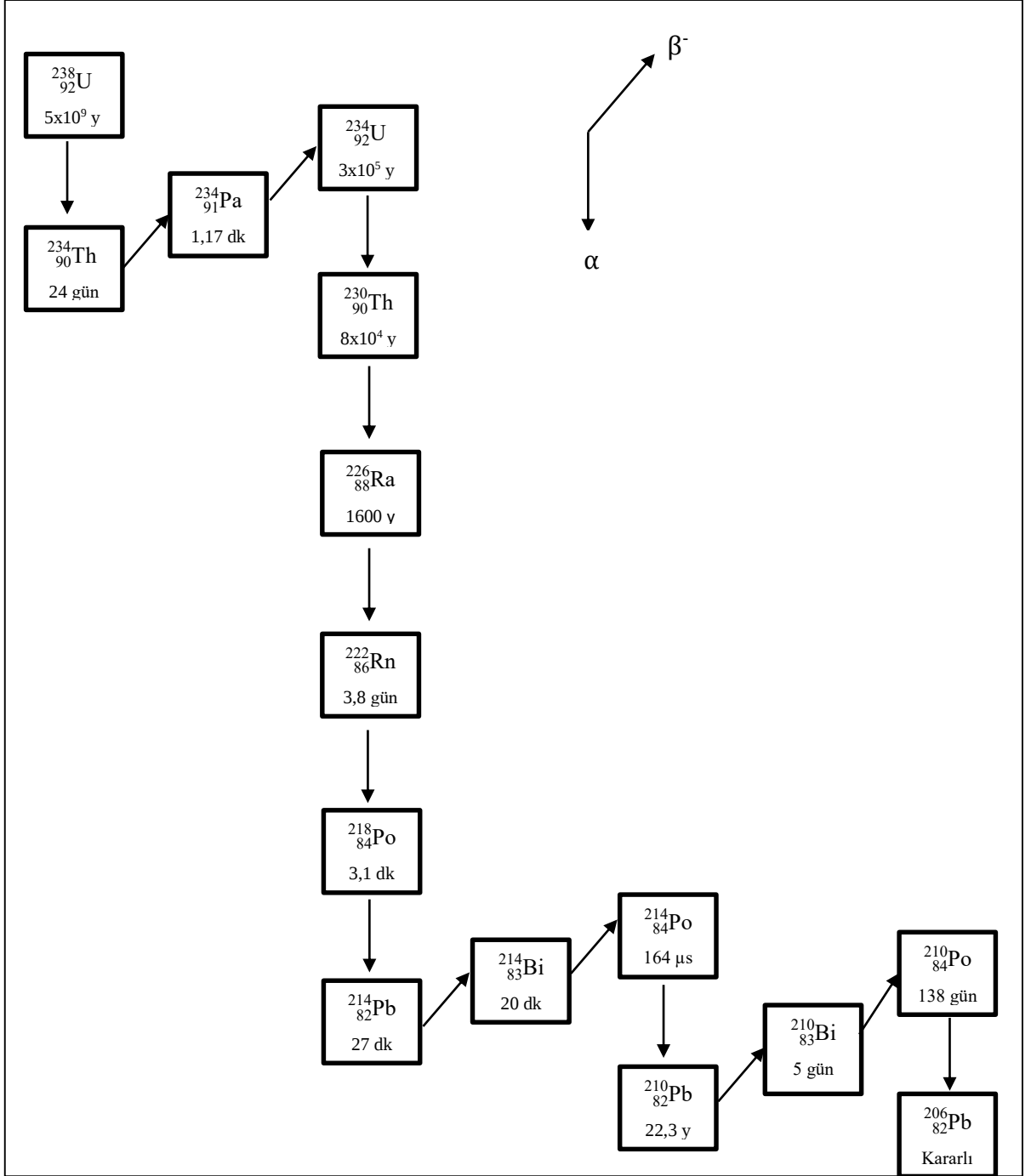
Radyoaktif bozunma serileri periyodik tabloda anne ve kız radyoaktif çekirdeklerden oluşmakta olan bir grup elementtir [22].

2.2.1. Doğal Radyoaktif Seriler

Doğal olarak meydana gelen radyoizotoplar üzerinde kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilen fiziksel ve kimyasal araştırmalar sonucunda, bu izotopların çoğunun uranyum, aktinyum veya toryumun bozunumu sonucu kararlı bir kurşun izotopuna kadar uzanan üç uzun radyoaktif seriden birinin üyeleri olduğu tespit edilmiştir. Doğada gözlemlenen bu üç temel seri başlangıç izotopları ile adlandırılmaktadır [23]. Bunlar; uranyum – radyum ($4n+2$), toryum ($4n$) ve aktinyum ($4n+3$) serileridir. Atom numaraları 81 – 92 arasında değişmektedir. Bu üç serideki çekirdeklerin çoğu alfa ve beta bozunumları esnasında gama ışını yaymaktadır [22, 23].

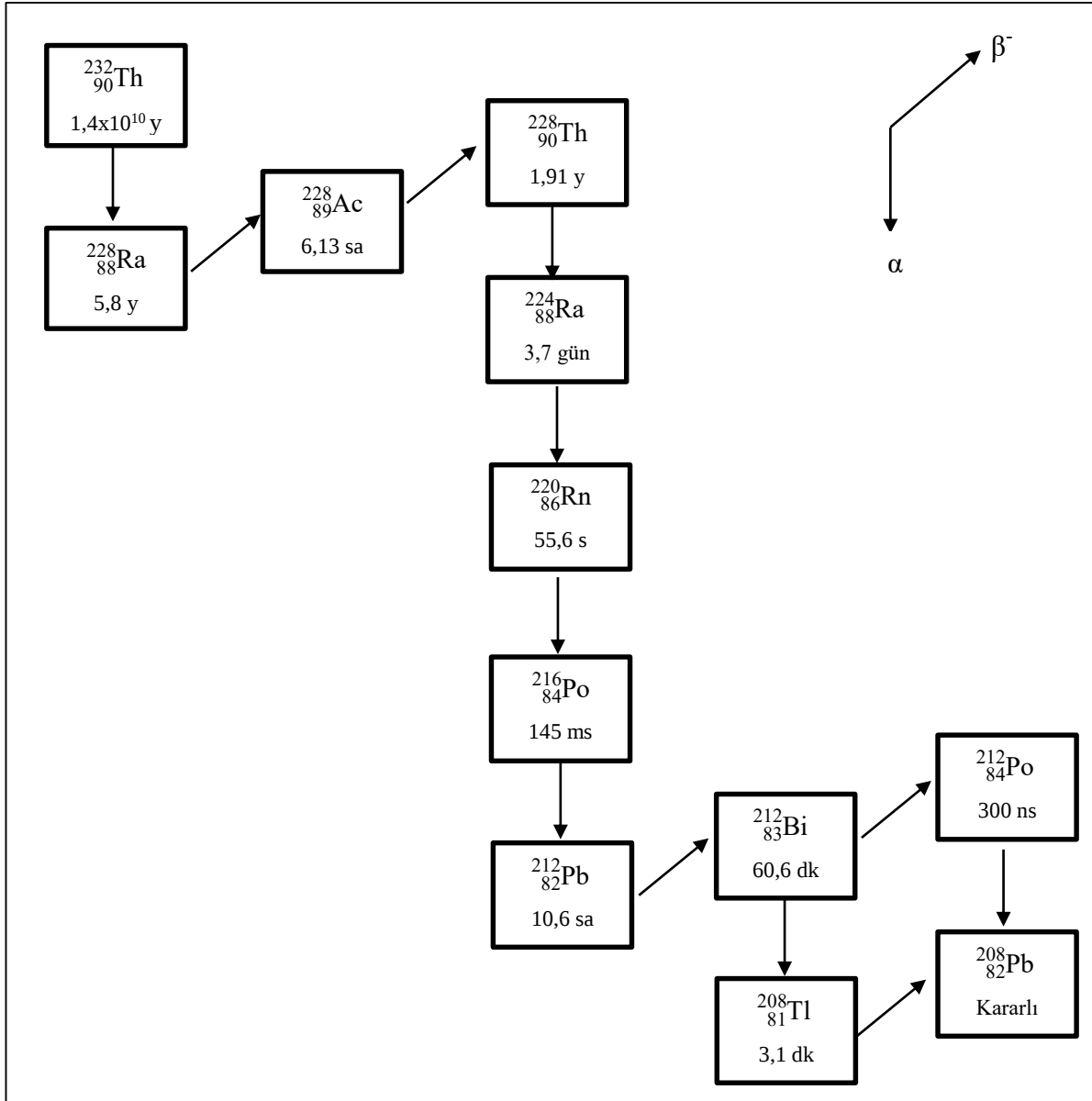
Toryum, uranyum – radyum ve aktinyum serilerinden herhangi birinin herhangi bir üyesinin kütle numarasına karşılık gelen ilişki sırasıyla, $4n$, $4n + 2$ ve $4n + 3$ ile verilmektedir ve n bir tamsayıdır [23].

Uranyum – Radyum serisi: Bu seri 15 çekirdek içermektedir. Bozunma süreci Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Bu seri 5×10^9 yıl yarı-ömre sahip $^{238}_{92}\text{U}$ çekirdeği ile başlamaktadır ve alfa, beta, gama bozunumları geçirerek kararlı bir çekirdek olan $^{206}_{82}\text{Pb}$ çekirdeğine dönüşmektedir [22]. Uranyum serisi bozunma ürünlerine ait bozunma modu ve enerji bilgileri EK 1.’de verilmektedir.



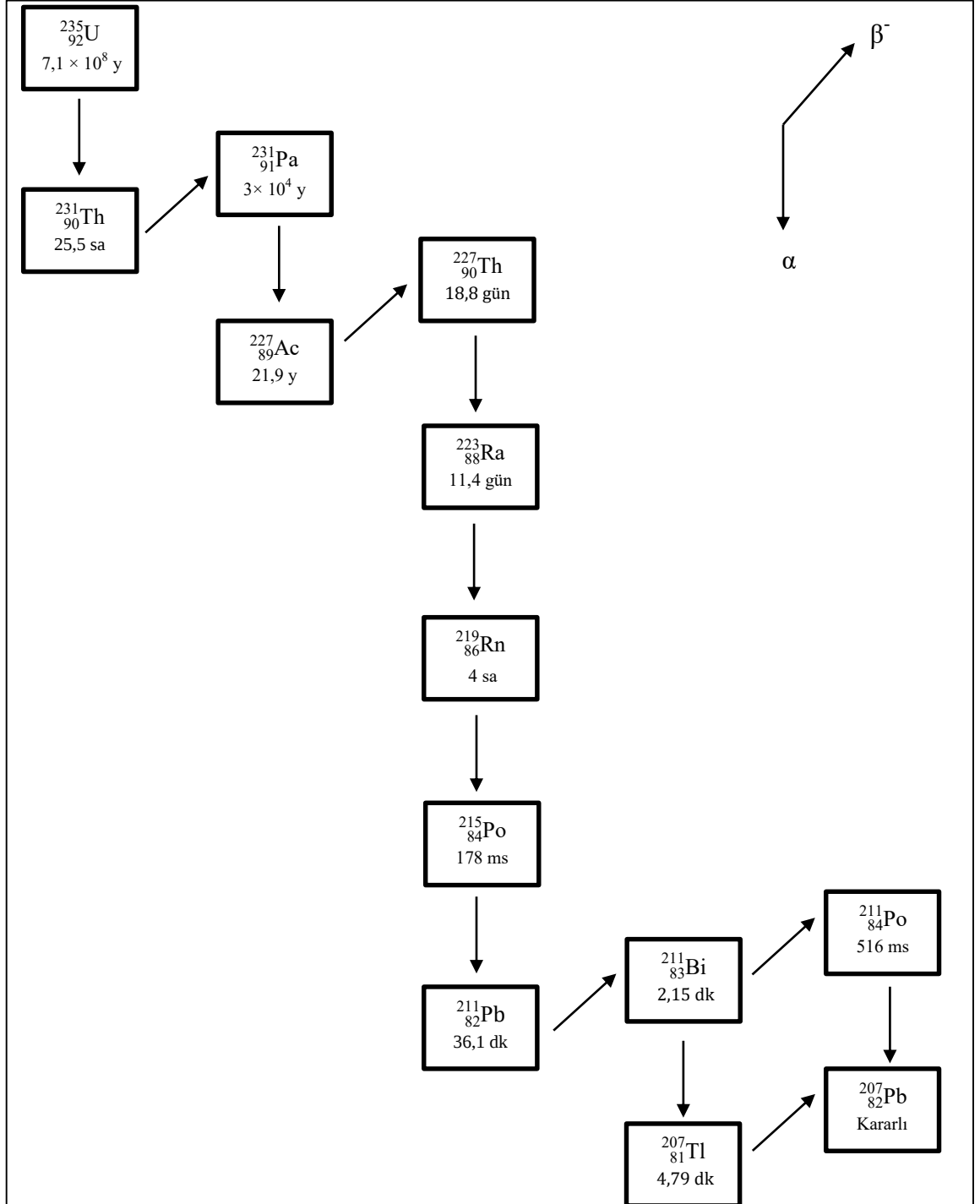
Şekil 2.6: Uranyum – Radyum serisinin bozunum süreci [22, 23].

Toryum serisi: Bu seri 12 çekirdek içermektedir. Toryum serisinin bozunma süreci Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Yarı ömrü 1.4×10^{10} yıl olan $^{232}_{90}\text{Th}$ çekirdeği ile başlamaktadır. $^{232}_{90}\text{Th}$ çekirdeği alfa, beta ve gama bozunumlarını gerçekleştirerek kararlı bir çekirdek olan $^{208}_{82}\text{Pb}$ çekirdeğine dönüşmektedir [22]. Toryum serisi bozunma ürünlerine ait bozunma modu ve enerji bilgileri EK 2.’de verilmektedir.



Şekil 2.7: Toryum serisinin bozunum süreci [22, 23].

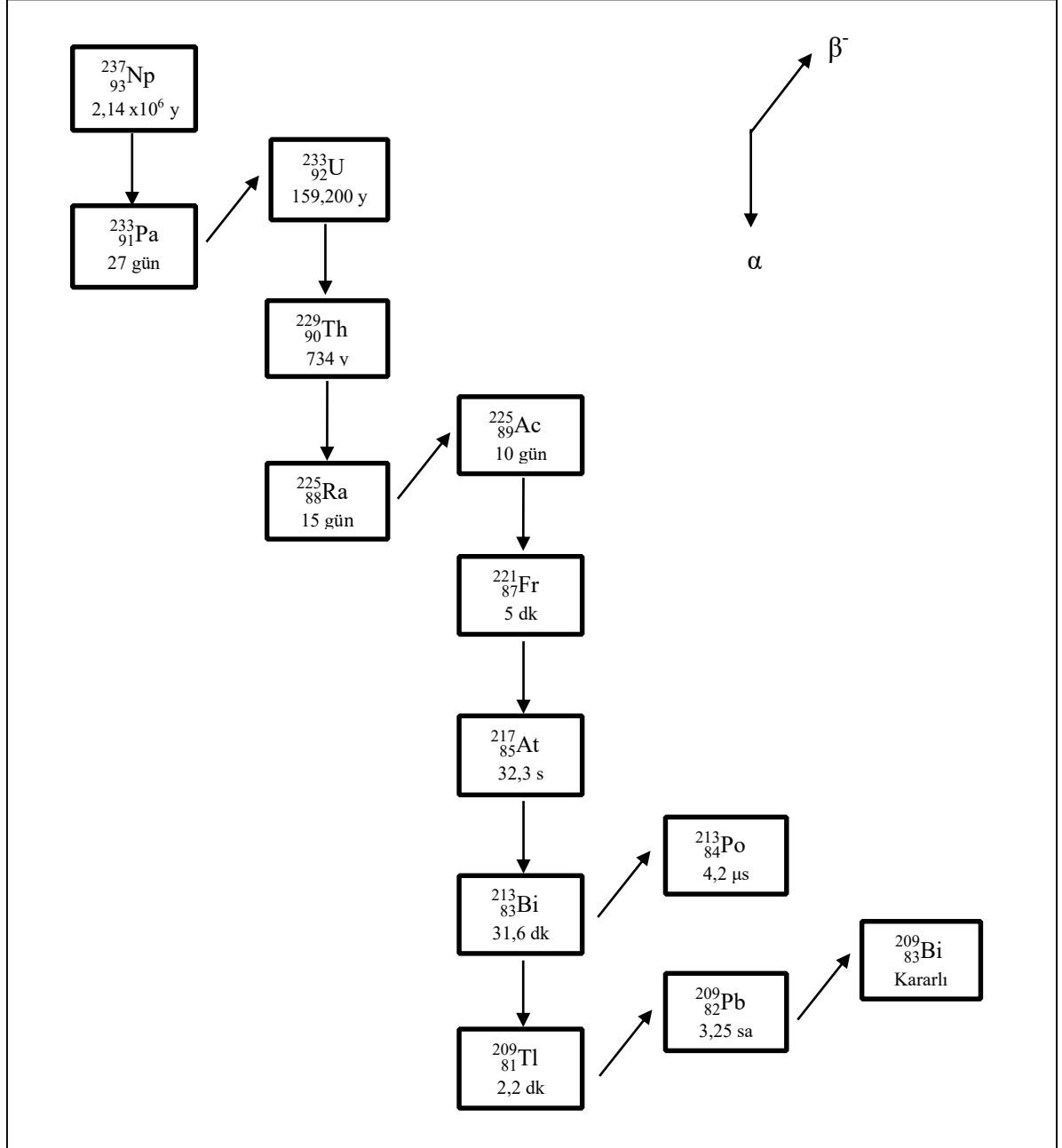
Aktinyum serisi: Bu seri 13 çekirdek içermektedir. Bu seri $7,1 \times 10^8$ yıl yarılanma ömrüne sahip olan $^{235}_{92}\text{U}$ çekirdeği ile başlamakta olup, alfa, beta ve gama bozunmalarını gerçekleştirdikten sonra kararlı $^{207}_{82}\text{Pb}$ çekirdeğine dönüşmektedir (Şekil 2.8) [22]. Serinin bozunma ürünlerine ait bozunma modu ve enerji bilgileri EK 3.'de verilmektedir



Şekil 2.8: Aktinyum serisinin bozunum süreci [22, 23].

2.2.2. Yapay Radyoaktif Seriler

Bu ailenin üyeleri nükleer reaksiyonlarla yapay olarak üretilmiştir. Bu serinin en uzun yarı-ömürlü çekirdeği ^{237}Np olduğu için Neptinyum serisi denilmektedir. Şekil 2.9’da Neptinyum serisinin bozunma süreci gösterilmektedir. Bu serideki radyoaktif çekirdeklerden Talyum ve Bizmut doğal olarak meydana gelmektedir [19, 24].



Şekil 2.9: Yapay bir seri olan Neptinyum serisinin bozunum süreci [22, 23].

2.3. DOĞAL VE YAPAY RADYOAKTİF KAYNAKLAR

İnsanlar ve dünya üzerinde yaşayan tüm canlı türleri çeşitli kaynaklar sebebiyle çevresel radyasyona maruz kalmaktadırlar [24]. Bu maruz kalınan radyasyonun iki ana kaynağı vardır: doğal kaynaklar ve insan yapımı denilen yapay kaynaklardır [25, 26].

2.3.1. Doğal Radyoaktif Kaynaklar

İnsanların doğal kaynaklardan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaları, yeryüzündeki yaşamın devam eden ve kaçınılmaz bir özelliğidir. Birçok birey için, bu maruziyet, insan yapımı tüm yapay kaynaklardan ortaya çıkan radyasyon dozu ile bir araya geldiğinde sınır değerleri aşmaktadır. Doğal radyasyon maruziyetine iki önemli katkı bulunmaktadır. Bunlar, dünyanın atmosferinde meydana gelen yüksek enerjili kozmik ışınlar ve yer kabuğundan açığa çıkarak, insan vücudu da dahil olmak üzere tüm çevrede bulunmakta olan radyoaktif çekirdeklerdir [27].

Doğal radyoaktif kaynaklardan biri olan kozmik ışınlar, radyasyona dışsal olarak maruz kalmanın önemli bir katkısıdır. Bu ışınların çoğu, yıldızlararası uzayın derinliklerinden kaynaklanmaktadır. Bazıları ise güneş patlamaları sırasında güneşten salınmaktadır. Dünya, uzayda ortaya çıkan bu yüksek enerjili parçacıklar tarafından sürekli olarak bombalanmaktadır. Bu kozmik ışınlar, atmosferik bileşenlerin çekirdeği ile etkileşime girerek farklı tiplerde radyasyon üretmektedirler. Kozmik ışın etkileşimleri aynı zamanda kozmojenik olarak bilinen radyoaktif çekirdekleri üretmektedir. Bu çekirdeklerden bazıları; ^3H , ^7Be , ^{14}C ve ^{22}Na 'dur. Dünyanın atmosferi ve manyetik alanı kozmik radyasyonu önemli ölçüde azaltırken, yeryüzü üzerindeki bazı bölgeler diğer bölgelere nazaran daha fazla kozmik ışınlarla maruz kalmaktadır [26, 27].

Karasal kaynaklı doğal olarak meydana gelen radyoaktif çekirdekler (aynı zamanda birincil yani dünyanın oluşumundan bu yana var olan radyoaktif çekirdekler olarak adlandırılırlar) insan vücudu da dahil olmak üzere tüm çevrede bulunmaktadır. Bu malzemelerde, sadece dünyanın yaşı ile kıyaslanabilen büyüklükteki yarı-ömre sahip bu radyoaktif çekirdekler ve bozunma ürünleri önemli miktarlarda bulunmaktadır [27]. İnsan vücudunun dışsal kaynaklardan ışınlanması, temel olarak uzun yarı-ömrü olan ^{238}U ve ^{232}Th serilerindeki çekirdekler ve ^{40}K çekirdeklerinden açığa çıkan gama radyasyonundan kaynaklanmaktadır. Bu radyoaktif çekirdekler vücutta da bulunmaktadır ve alfa, beta parçacıkları aynı zamanda gama ışınları ile çeşitli organların ışınlanmasına sebebiyet vermektedirler. Karasal kaynaklı meydana

gelen bu çekirdekler o çevrenin jeolojisine bağlı olup, bölgeden bölgeye ve bölgenin kayaç yapısına göre değişkenlik göstermektedir [28]. Magmatik ve tortul kayaçlarda yüksek oranda bulunmaktadır ve bu tür kayaçlardan toprağa, suya ve havaya geçiş yapmaktadırlar [29].

Tablo 2.1: Bazı kayaç tiplerinde doğal olarak var olan radyoaktif çekirdekler ve oranları gösterilmektedir [30].

Kayaç Tipi	K (%)	U (µg/g)	Th (µg/g)
Derinlik kayaçları			
Granit	2,75 – 4,26	3,6 – 4,7	19 – 20
Granitik kayaçlar (ortalama)	4,11	4,35	15,2
Granitik kayaçlar	2,3 – 4,0	2,1 – 7,0	8,3 – 40
Biyotit granit	3,4	4,0	15
Gabro	0,46 – 0,58	0,84 – 0,90	2,70 – 2,85
Granodiyorit	2 – 2,5	2,6	9,3 – 11
Diyorit	1,1	2,0	8,5
Dünit	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Dünit, piroksenik	0,15	0,03	0,08
Peridotit	0,2	0,01	0,05
Yüzey kayaçları			
Riyolit	2 – 4	2,5 – 5	6 – 15
Trakit	5,7	2 – 7	9 – 25
Alkali bazalt	0,61	0,99	4,6
Plato bazaltı	0,61	0,53	1,96
Andezit	1,7	0,8	1,9
Dasit	2,3	2,5	10,0
Liparit	3,7	4,7	19
Metamorfitler			
Gnays – (Alp Dağları)	0,32 – 4,7	0,9 – 24	1,2 – 25,7
Gnays – (Almanya)	2,28 ± 0,17	2,6 ± 1,2	8,2 ± 2,0
Eklojit	0,8	0,2	0,4
Amfibolit – (Alp Dağları)	0,11 – 2,22	0 – 7,8	0,01 – 13,7
Amfibolit	0,6	0,7	1,8

2.3.1.1. Polonyum (^{210}Po)’un genel özellikleri

Marie ve Pierre Curie, 1898 yılında, yaklaşık 1000 kg’lık Uranyum cevherinden Uranyum ve Toryum’un çıkarılmasından sonra yeni bir radyoaktif element bulmuşlardır. Bu element, Marie Curie’nin Polonyalı olması sebebiyle Polonyum olarak adlandırılmıştır [31].

Polonyum’un kimyasal sembolü Po olup, atom numarası 84 ve kimyasal olarak Bizmut ve Tellür elementlerine benzemektedir. Polonyum’un erime noktası 254°C olup, kaynama noktası

962⁰C'dir. Atomik kütlesi 188 ve 222 arasında değişen, bilinmekte olan 33 adet radyoaktif izotopu vardır. Doğal olarak en çok bulunan izotopu 138,376 gün yarı-ömre sahip olan ²¹⁰Po çekirdeğidir ve ²³⁸U'nin bozunum serisinde yer almaktadır [31, 32]. ²¹⁰Po, enerjisi 5,3 MeV ve şiddeti %100 olan alfa parçacıkları yayımlamaktadır [33].

Polonyum'un uzun yarı-ömürlü yapay izotopları olan ²⁰⁹Po (yaklaşık 103 yıl) ve ²⁰⁸Po (yaklaşık 2,9 yıl), hızlandırıcı sistemlerinde elde edilen protonların kurşun ve bizmut elementleri üzerine bombardımanı ile elde edilmektedir [31].

2.3.2. Yapay Radyoaktif Kaynaklar

Bilim adamlarının ordudan tıbbi uygulamalara (örneğin kanser tedavisi), elektrik üretiminden ev içi uygulamalara (örneğin duman dedektörleri) kadar çok çeşitli amaçlar için atomun enerjisinin kullanımı üzerine yaptıkları birçok çalışma sebebiyle, radyasyonun kullanımı özellikle son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Bunlar ve diğer yapay kaynaklar, hem bireysel hem de küresel nüfus açısından doğal radyoaktif kaynaklardan maruz kalınan radyasyon dozuna katkıda bulunmaktadır [26].

İnsan yapımı kaynaklar için bazı başlıca izotoplar ¹³¹I, ^{99m}Tc, ⁶⁰Co, ¹⁹²Ir ve ¹³⁷Cs'dir. İnsanlar nükleer yakıtlar sebebiyle de radyasyona maruz kalmaktadırlar; buna örnek olarak uranyum madenleri verilebilmekte ve madenin çıkartılmasından, bir nükleer santralde fiili üretime kadar olan tüm süreci içermektedir.

Radyoaktif malzemelerin taşınması, radyoaktif atıklar ve Çernobil nükleer santral kazası gibi nükleer silahların test ve kazalarından kaynaklanan nükleer serpintiler sebebiyle de insanlar yapay radyoaktiviteye maruz kalmaktadırlar [34].

2.4. SPEKTROSKOPİ SİSTEMLERİ

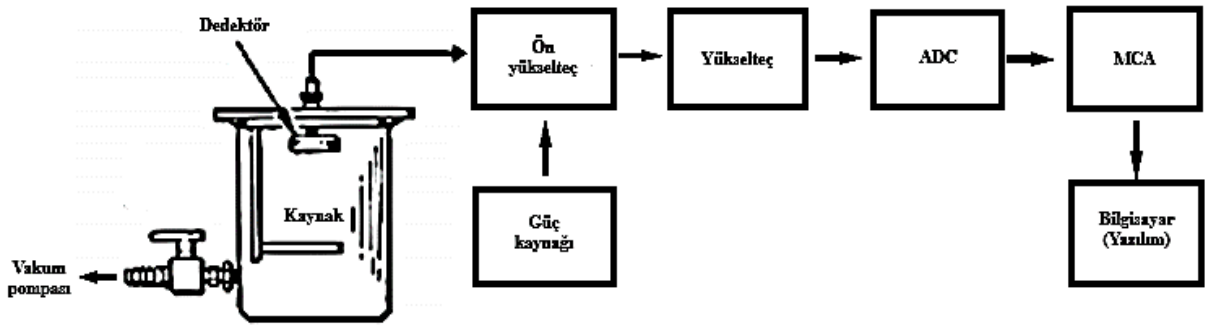
Ortamdaki veya bir malzemedeki radyasyon oranını tespit edebilmek için gaz, sintilasyon veya yarı iletken dedektörler gibi çeşitli tiplerde birçok radyasyon dedektörü ve sistemi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları radyasyonu, enerjisi, yoğunluğu veya ölçülen radyasyonun çeşidi gibi farklı türlerde bilgi sağlayabilmektedirler. Her bir dedektörün birbirinden farkı, katı, sıvı veya gazdan oluşabilen dedektör malzemesidir. Her türlü radyasyon dedekte etme cihazı, temelde radyasyonun dedektör malzemesi ile etkileşiminden kaynaklanan sinyallerin

üretilmesini içermektedir. Dedekte etme yöntemleri genellikle yüklü bir parçacığın geçişi ile dedektör malzemesindeki atomların uyarılma veya iyonizasyon süreçlerine dayanmaktadır. Gama ışınlarının dedektör malzemesi ile etkileşiminden fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu olayları da meydana gelmektedir [25, 35, 36].

2.4.1. Alfa Spektroskopi Sistemi

Çevresel örneklerin alfa spektroskopisi ile ölçümleri, miliBecquerel (mBq) ile Becquerel (Bq) mertebeleri arasındaki düşük aktivite değerleri ile sonuçlanmaktadır. Bu tip ölçümler yüksek sayım verimine ve düşük arka fon (background) radyasyonuna sahip olan ölçüm sistemlerini gerektirmektedir. Alfa radyasyonunun belirlenebilmesi için, alfa parçacıklarının iyonize edici etkisi kullanılabilir. Ölçümler, gazla dolu iyonize edici dedektörler ya da iyonizasyon etkisiyle salınan elektriksel pulsların sayıldığı yarı iletken dedektörler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Alfa parçacıklarının dedekte edilmesinde kullanılan başka bir sistem sıvı sintilasyon sayım sistemleridir (LSC – Liquid Scintillation Counter) [19, 35, 37].

Bir alfa spektroskopi sistemi, alfa parçacıklarını dedekte etme özelliğine sahip bir dedektör, vakum ortamı sağlayacak bir vakum pompası, ön yükselteç (preamp), yükselteç (amp), analog dijital dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör (MCA), güç kaynağı ve yazılımı içeren bilgisayardan oluşmaktadır.

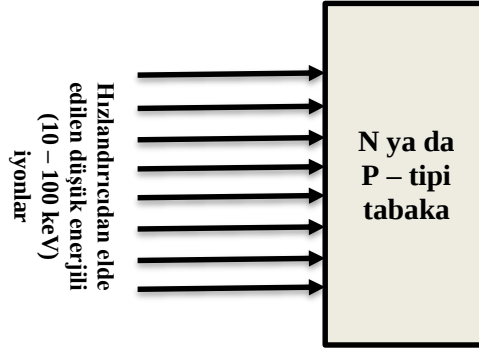


Şekil 2.10: Alfa Spektroskopisi için sistem elemanları.

2.4.1.1. İyon implante edilmiş dedektörler

Yarı iletken bir kristal üzerine hızlandırıcı sistemi tarafından üretilen safsızlık seviyesi yüksek iyonların bombardıman edilmesi ile oluşmaktadır. Bu yöntem iyon implantasyonu olarak adlandırılmaktadır. Fosfor ya da bor gibi iyonların hızlandırılarak n ya da p tabakalarını

oluşturmak için kullanılmaktadır. Böylece katkı maddeleri tam olarak kristalin içerisine dağılmaktadır. Hızlandırıcıdan çıkan (sabit bir hızlandırıcı voltajında yaklaşık 10 kV) iyon demetinin enerjisini belirli bir aralıkta ayarlayarak yarı iletkendeki safsızlık konsantrasyonu ve derinlik profili kontrol edilebilmektedir. Eklem derinliği 0,5 μm 'den daha azdır.



Şekil 2.11: Yarı iletken üzerine iyon implantasyonu.

İyon demetine maruz kaldıktan sonra, gelen iyonların neden olduğu radyasyon hasarının etkilerini azaltmak için, kullanımından önce yarı iletken yaklaşık 500 $^{\circ}\text{C}$ veya daha düşük sıcaklıklarda tavlmalıdır. Bu difüzyon sürecinde kullanılan sıcaklık seviyesinden çok daha azdır, fakat, taşıyıcının ömrünün daha az etkilenmesi sağlanmakta ve kristalin yapısı daha az bozulmaktadır.

Oksit pasivasyonunu iyon implantasyonu ile birleştiren yeni bir yöntem geliştirilmiştir; bu yöntem, yüzey kaçak akımını ve dolayısıyla gürültüyü azaltmaktadır.

İyon implante edilmiş dedektörler, yüzey engelli dedektörlere nazaran daha kararlıdır ve ortam koşullarına daha az maruz kalmaktadırlar. Ayrıca, 34 nm silikon eşdeğeri kadar ince giriş pencerelerine sahip şekilde oluşturulabilmektedirler [35, 38].

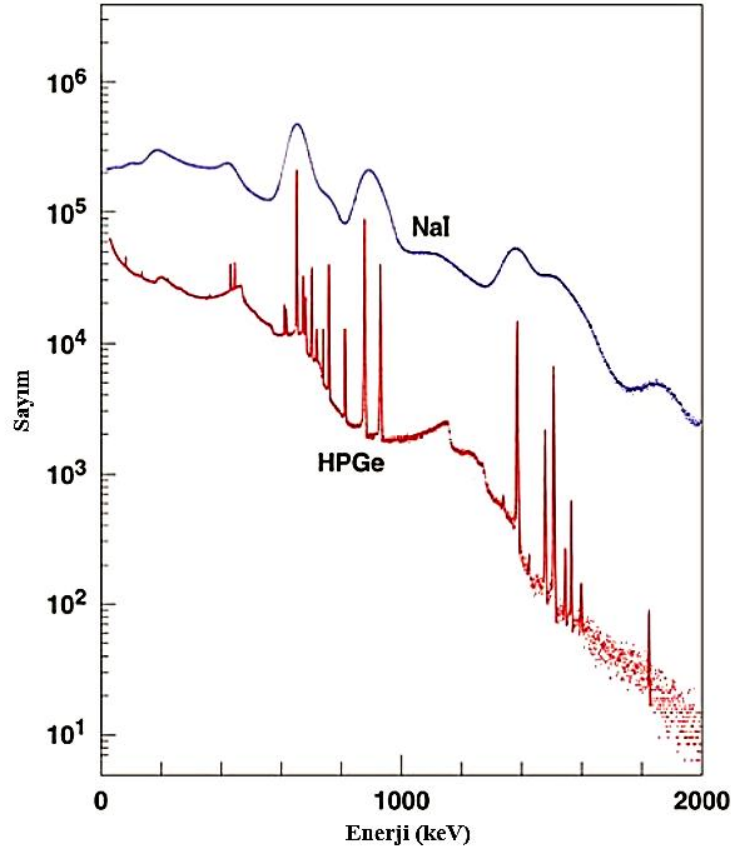
2.4.2. Gama Spektroskopi Sistemi

Bir kaynaktan veya malzemelerde bulunan radyoaktif çekirdeklerin dedekte edilmesi ve ölçülmesi, gama ışını enerjilerinin ve bu ışınların bolluğunun dedeksiyonuna bağlıdır. Gama ışınlarının dedekte edilmesi, enerjisinin tamamını ya da bir kısmını soğurucu malzeme içerisindeki elektrona aktarmasıyla ilişkilidir. Bu nedenle, bir gama spektrometresinin; sahip olduğu dedektör mekanizmasına gelen gama ışınlarının bir veya daha fazla elektron üretmesi için yüksek bir etkileşim olasılığına sahip oldukları bir dönüştürme ortamı olarak hizmet

vermesi gerekmektedir. Gama ışınlarının dedekte edilmesinde önemli rol oynayan başlıca iki tip dedektör vardır:

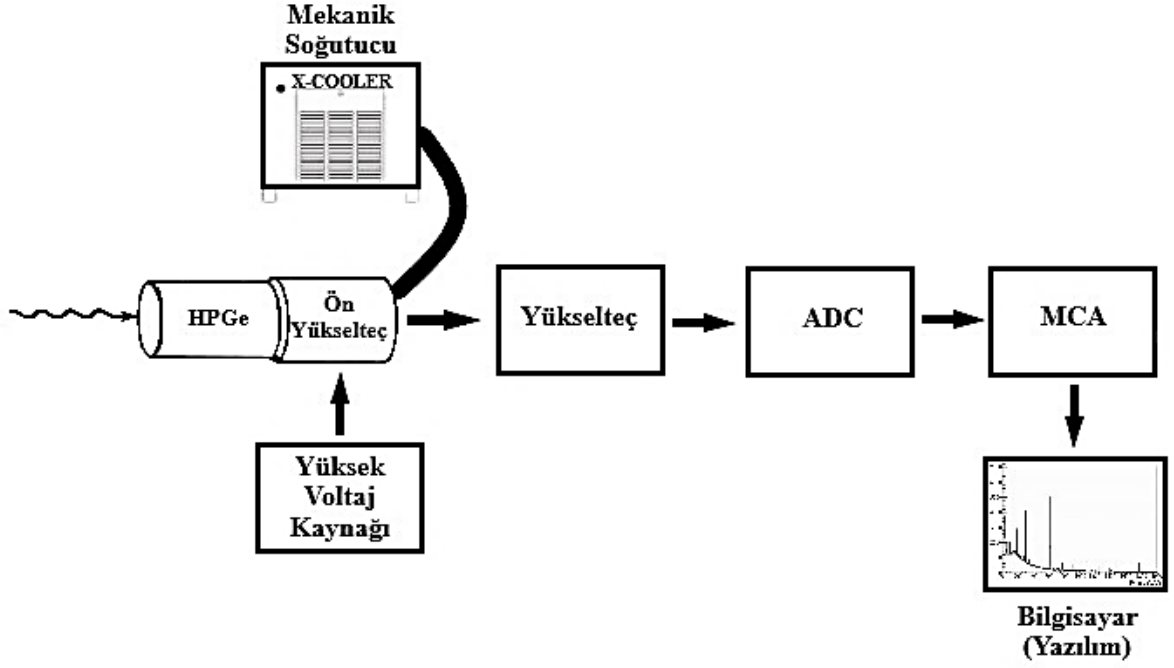
1. İnorganik sintilatörler: Talyum ile aktive edilmiş Sodyum İyodür kristali (NaI(Tl)),
2. Katı hal yarı iletkenleri: Yüksek saflıklı Germanyum (HPGe) veya Lityum sürüklenmiş Germanyum (Ge(Li)).

NaI(Tl) dedektörleri, HPGe ve Ge(Li) dedektörlerinden daha yüksek verime fakat daha zayıf bir enerji çözünürlüğüne sahiptir. Bu nedenle, bir gama dedektörünün seçimi gerekli çözme gücü, dedektör verimi gibi terimlere dayanmaktadır [39].



Şekil 2.12: HPGe ve NaI dedektörlerinden elde edilen spektrumların kıyaslanması.

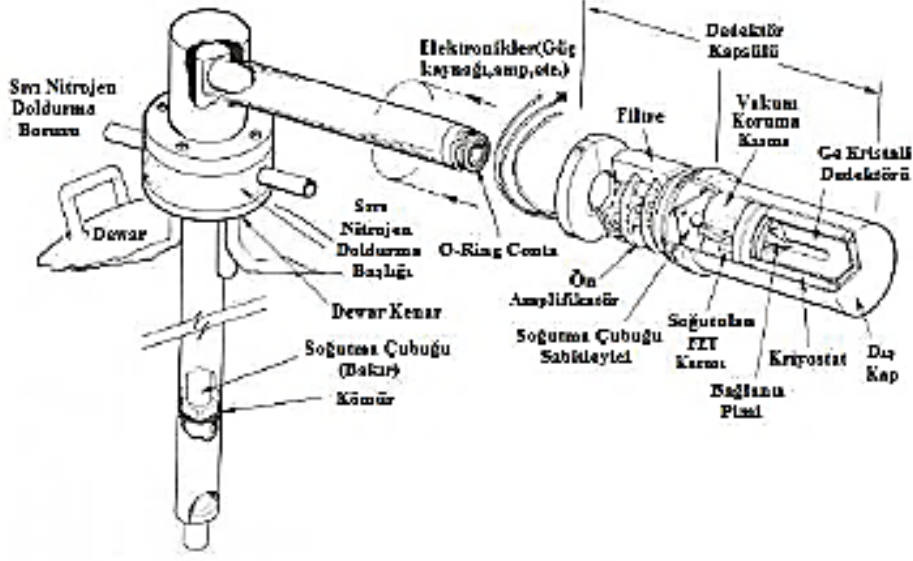
Tipik bir gama spektroskopi sistemi sintilasyon ya da yarı iletken özelliğe sahip bir dedektör, ön yükselteç (preamp), yükselteç (amp), analog dijital dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör (MCA), güç kaynağı ve yazılımı içeren bilgisayardan oluşmaktadır [40].



Şekil 2.13: Gama Spektroskopisi için sistem elemanları.

2.4.2.1. Yüksek saflıklı Germanyum dedektörü (HPGe)

Yarı iletken malzeme içerisindeki safsızlıklar elektron – boşluk çiftinin meydana gelmesi için gerekli olan enerjiyi düşürmekte ve sızıntı (kaçak) akım olasılığını arttırmaktadır. Bu sebeple HPGe dedektörlerinde yüksek saflığa sahip (yaklaşık 10^{10} atom/cm³ saflıkta) Germanyum kristali kullanılmaktadır. Bu kristaller kullanılarak üretilen dedektörler gerçek veya yüksek saflıklı dedektörler olarak adlandırılmaktadır [18, 41, 42]. Düzlemsel dedektörler, koaksiyel dedektörler ve kuyu-tipi dedektörler olmak üzere farklı boyut ve geometriye sahip çeşitleri mevcuttur [18, 42].



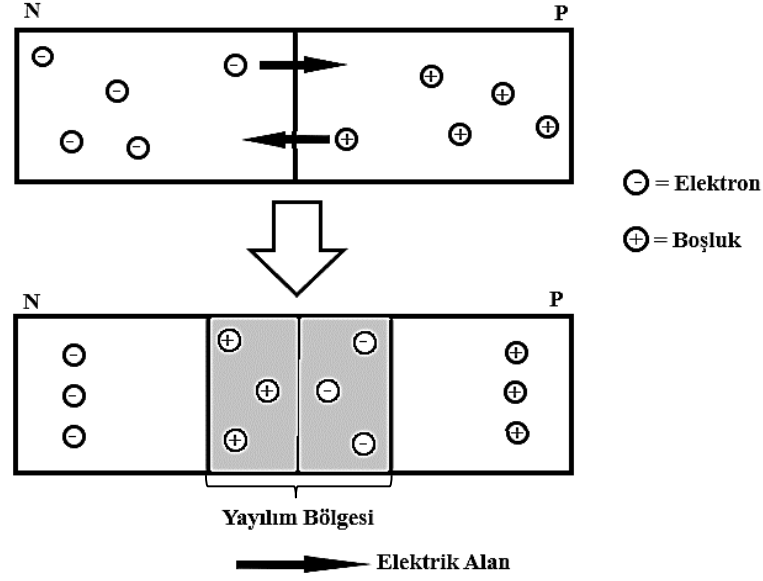
Şekil 2.14: HPGe dedektörünün genel bileşenleri.

HPGe dedektörlerinin mevcut diğer dedektörlere göre geniş bir enerji aralığında lineer cevap fonksiyonu, manyetik alana hassas olmaları, Germanyum madde yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle yüksek verimli olması, Germanyum kristalinin farklı geometrilerde işlenebilmesi gibi birçok artı yönü bulunmaktadır.

Tablo 2.2: Germanyum kristalinin bazı özellikleri [41, 43, 44].

Fiziksel Özellik	Sayısal Değer
Atom numarası Z	32
Atomik kütlesi A	72,59 g.mol ⁻¹
Yoğunluğu	5,3234 g.cm ⁻³
Kristal yapısı	Diamond (fcc)
Bant genişliği	0,75 eV
Dielektrik sabiti	16,2
İyonlaşma enerjisi (77K)	2,96 eV

Yarı iletken malzeme içerisinde alıcı ve verici safsızlıklarının eşit olması zor bir süreç gerektirmektedir. P – tipi veya n – tipi safsızlıklarından biri baskındır. Bu sebeple p – n eklemleri oluşturulmuş, bu ters besleme olarak adlandırılmakta olan durum ile, iyonize bir radyasyon türü etkileşime girmediği müddetçe akım yasak bölgeyi aşamamaktadır.



Şekil 2.15: Germanyum'un yükten arınmış (tüketim) bölgesi.

Kristaldeki yük dengesizliği olan kısım tüketim bölgesi olarak isimlendirilmektedir. Tüketim bölgesinin kalınlığı kristalin safsızlık konsantrasyonuna bağlı olmakla birlikte, bir p – n eklemlili Ge (Germanyum) dedektörünün tüketim bölgesi, bir gama ışınının hassas olan dedektör malzemesi ile etkileşme olasılığını arttırmak ve bir gama ışını spektroskopisi işlevi görmesi için birkaç santimetre kalınlığa sahip olmalıdır [39, 41].

Bu tip dedektörler, tüketim bölgesindeki elektrik alanı arttırarak, bu bölgenin duyarlı hacminin artmasını sağladıkları için ters besleme voltajı ile çalışmaktadırlar.

Dedektör üzerine gelen gama ışınları, içerisindeki germanyum kristali ile etkileştikten sonra tüketim bölgesinde elektron – boşluk çifti oluşturmaktadır. Elektronlar bir yöne doğru hareket etmekte, boşluklar ise elektronlara ters yöne doğru hareket etmektedirler ve elektronların birikmesiyle bir puls meydana gelmektedir. Meydana gelen pulsun genliği dedektöre giren gama ışınlarının enerjisiyle orantılıdır. Germanyum kristalinde elektron – boşluk çiftinin meydana gelmesi için ihtiyaç duyulan enerji yaklaşık 2,96 eV'tur [41, 42]. Bu enerji değeri diğer yarı iletken dedektörlere göre oldukça düşük bir değerdir ve düşük enerjili gama ışınlarının ölçülmesine olanak sağlamaktadır [45].

Germanyum kristalleri küçük bir bant aralığına sahip olmaları sebebiyle, sıcaklık etkisi altında yük taşıyıcıları iletkenlik bandına geçiş yapabilmektedirler. Bunun sonucu olarak kaçak bir akım meydana gelmekte ve dedektörün enerji çözünürlüğüne zarar vermektedir. Bu istenmeyen

durumdan kurtulabilmek için kristalin sürekli olarak soğutulması gerekmektedir. Dedektörlerin soğutulması, sıcaklığı 77 K ya da -196°C olan sıvı azot ya da mekanik soğutma sistemleri ile gerçekleştirilmektedir [41].

3. MALZEME VE YÖNTEM

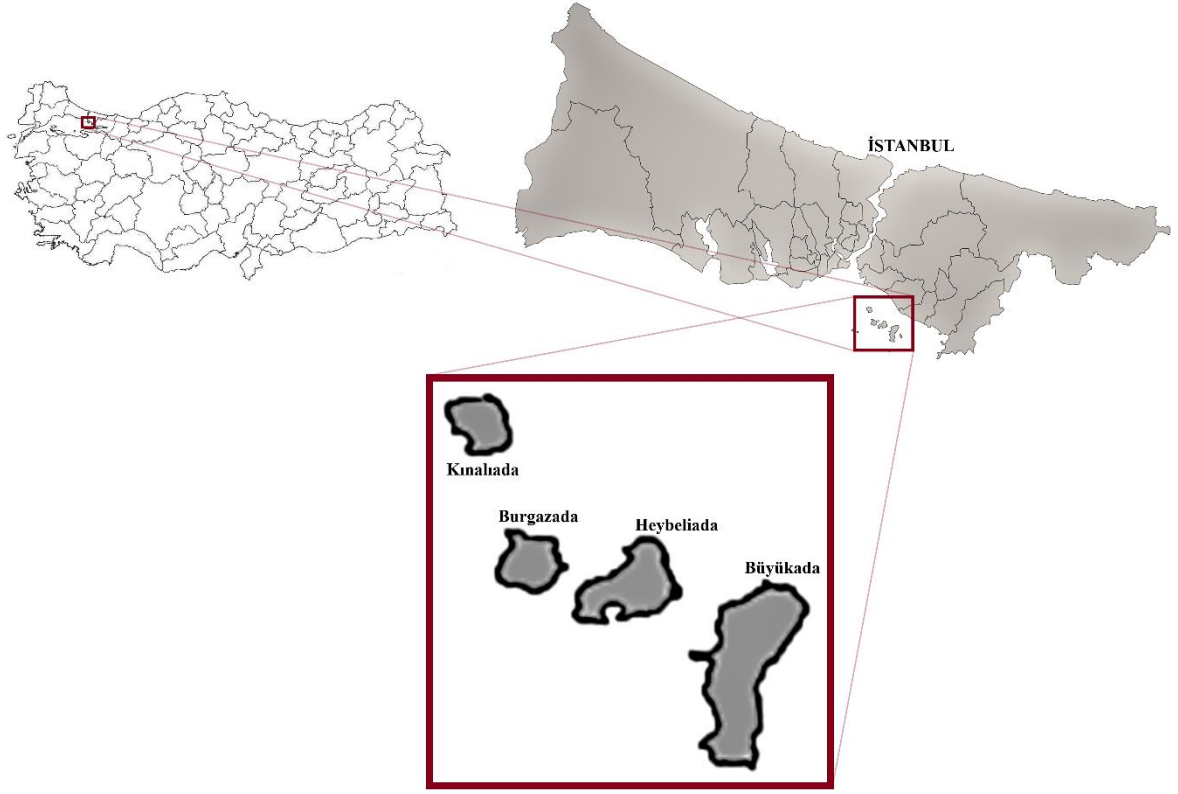
3.1. İSTANBUL ADALAR BÖLGESİNİN JEOLojİK YAPISI

Coğrafi konum olarak İstanbul ili 28° 01' ve 29° 55' doğu boylamları ile 41° 33' ve 40° 28' kuzey enlemleri arasında bölgenmektedir. Adalar ilçesi ise Marmara Denizi'nde bulunan irili ufaklı adaların 9'unu kapsamakta olup, İstanbul iline bağlı olan Adalar ilçesi, 40° 49' 10" kuzey ile 29° 06' 45" doğu koordinatları arasında yer almaktadır [46]. Çalışma bölgesi olarak; nüfus yoğunluğu, turizm ve bölgeye ulaşım bakımından değerlendirilmiş olup, Adalar ilçesine bağlı 9 adet adadan 4'ü seçilmiştir.

Büyükada, 4200 metre uzunluğa sahip ve 538,63 hektarlık alan ile diğer adalara göre en büyük ada konumundadır. Heybeliada, 2400 metre uzunluk ile 251,07 hektarlık alan üzerinde yer almaktadır ve ilçenin ikinci büyük adasıdır. Burgazada, ilçenin üçüncü büyük adası olup, 146,50 hektarlık alana sahiptir. Kınalıada, uzunluk ve genişliği neredeyse eşit olup, 136,01 hektarlık alan ile ilçenin dördüncü büyük adasıdır [47, 48].

Adalar bölgesi, zengin tarihi kalıntılara sahip olması sebebiyle tarihsel sit alanı olarak, 8. asırdan itibaren yerleşim yeri olarak birçok toplum tarafından kullanılmış ve bu toplumlardan çok sayıda dini, askeri ve mimarlık örneklerinin günümüze kadar ulaşması sebebiyle kentsel sit alanı olarak ve birçok çeşidi bünyesinde barındıran bir doğa yapısına sahip olması sebebiyle de doğal sit alanı olarak ilan edilmiştir [47 – 49].

İstanbul Prens Adaları bölgesinde jeolojik olarak, Paleozoik ve Senozoik yaşlı çökeller yer almaktadır. Paleozoik çökeller karasal ortamda çökelmeye başlamış, ardından denizel çökeller oluşmuş ve bunun da ardından havza çökelleriyle sonlanmıştır. En yaşlı birim olan Kurtköy Formasyonu adalar bölgesinde görülmekte olup, ırmak çökellerinden meydana gelmiştir. Bu en yaşlı formasyon granitik ve metamorfik bir yapıdan türemiştir. Kurtköy Formasyonu'nun üzerinde Aydos Formasyonu yer almaktadır. Üst Devoniyene çökelmiş olan Tuzla Formasyonu derin deniz çökeltme ortamında oluşmuş olup, Kurtköy ve Aydos Formasyonları üzerinde meydana gelmiştir. Kuvaterner döneminden sonra yaşanan tektonik hareketlerin sonucunda İstanbul Adalar bölgesi bugünkü özelliklerine kavuşmuştur [46, 47].



Şekil 3.1: İstanbul Prens Adaları bölgesinin lokasyon haritası.

Marmara Denizi'nde bulunan Adalar bölgesi, Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın kuzeyinde yer almakta ve bu bölgeyi oldukça etkilemiştir. Adalar bölgesinde gözlemlenmekte olan formasyonlar ve bunların özellikleri;

Kurtköy Formasyonu: Genellikle mor-eflatun renge sahip çakıl taşı, kum taşı ve çamur taşı gibi başlıca kırıntılı kayalardan oluşmaktadır. Bu formasyon mor renkli, kaotik iç yapılı, kalınlıkları 15 – 20 metreyi bulmakta olan kil taşlarından meydana gelmektedir. Bu birim içerisinde, kuvars, düşük dereceli metamorfik ve volkanik kayalardan türemiş olup, boyutları 10 cm'ye ulaşan çakıllar görülmektedir. Kurtköy Formasyonu, Büyükada, Heybeliada, Burgazada ve Kınalıada'nın büyük bir bölümünde görülmektedir [47, 50 – 52].

Aydos Formasyonu: Bu formasyon yüksek oranda kuvarsit yapılardan meydana gelmektedir. Formasyonun maksimum kalınlığı 300 – 310 m civarında olup, geometrisi örtü biçimindedir. İstanbul'un başlıca dağ ve tepelerinde de bu yapılar görülmekte olup, Adalar bölgesinde de Büyükada, Heybeliada, Burgazada ve Kınalıada'nın büyük bölümlerinde görülmektedir. [47, 50, 52].

Tuzla Formasyonu: Formasyon, değişen oranda şeyl arakatlı olarak, kireçtaşı, killi kireçtaşı, lidit ve yumrulu kireçtaşından meydana gelmekte olup, Büyükada Formasyonu olarak da bilinmektedir [50, 52, 53].

3.2. ÖRNEKLEME İŞLEMİ

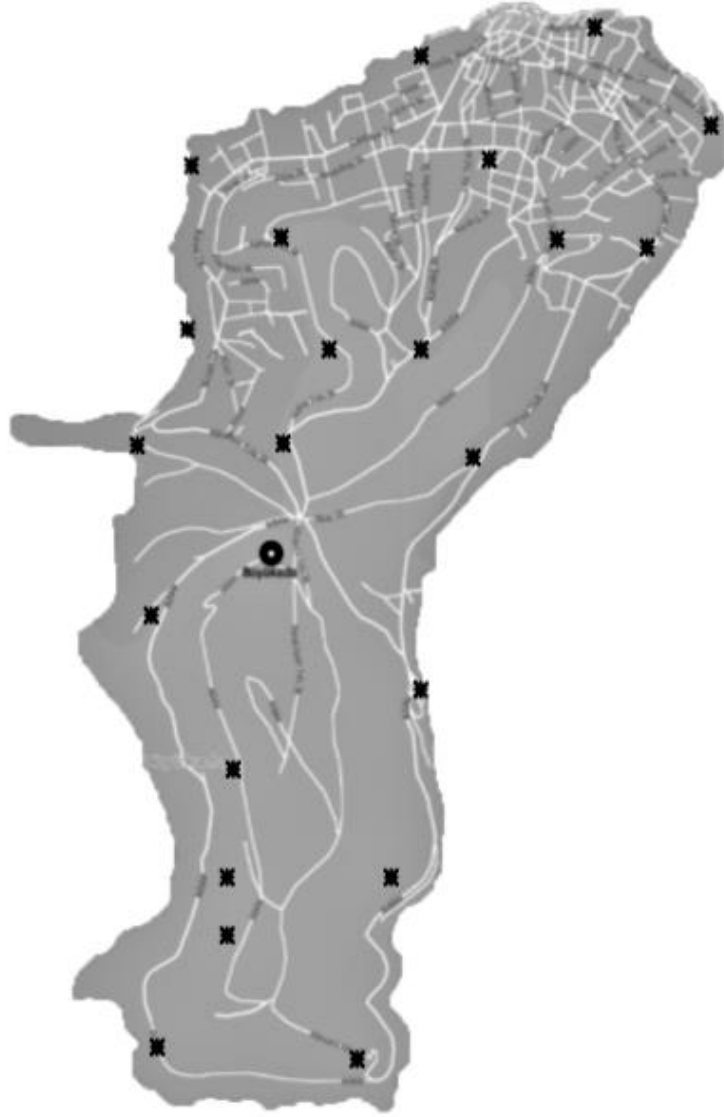
İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesinde en çok tüketilen 13 adet balık ve 3 adet kara midye (Akdeniz midyesi olarak da bilinmektedir) örnekleri radyokimyasal süreçlere tabi tutularak alfa spektroskopi sistemi yardımıyla örnekler içerisindeki ^{210}Po radyoaktif çekirdeğinin aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir.

Aynı zamanda İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesinde, her bir ada haritası üzerinde homojen bir dağılım olacak şekilde toprak ve plaj kumu örnekleme yapılacak noktalar belirlenmiştir.

Örnekleme noktaları belirlendikten sonra, 24 Haziran – 26 Haziran 2017 tarihleri arasında Büyükada'nın örnekleme işlemi gerçekleştirilmiş olup, Büyükada bölgesinden 23 adet (Şekil 3.2), 01 Temmuz 2017 tarihinde Heybeliada'nın örnekleme işlemi gerçekleştirilmiş olup, Heybeliada bölgesinden 14 adet (Şekil 3.3), 15 Temmuz 2017 tarihinde Burgazada'nın örnekleme işlemi gerçekleştirilmiş olup, Burgazada bölgesinden 10 adet (Şekil 3.4), 20 Temmuz – 22 Temmuz 2017 tarihleri arasında Kınalıada bölgesinin örnekleme işlemi gerçekleştirilmiş olup, Kınalıada bölgesinden 9 adet (Şekil 3.5) olmak üzere, toplamda 56 adet toprak ve plaj kumu örnekleri toplanmıştır.

Toprak ve plaj kumu örnekleme işleminin yer yüzeyinin yaklaşık 20 cm altından ve tarım arazisi olmayan noktalardan yapılmasına dikkat edilmiştir. Numune alınan her bir noktanın Küresel Konumlama Sistemi yardımıyla enlem, boylam, yükseklik ve mahalle bilgileri kaydedilerek (EK 4., EK 5., EK 6., EK 7.), Büyükada, Heybeliada, Burgazada ve Kınalıada bölgelerinin haritalandırması yapılmıştır.

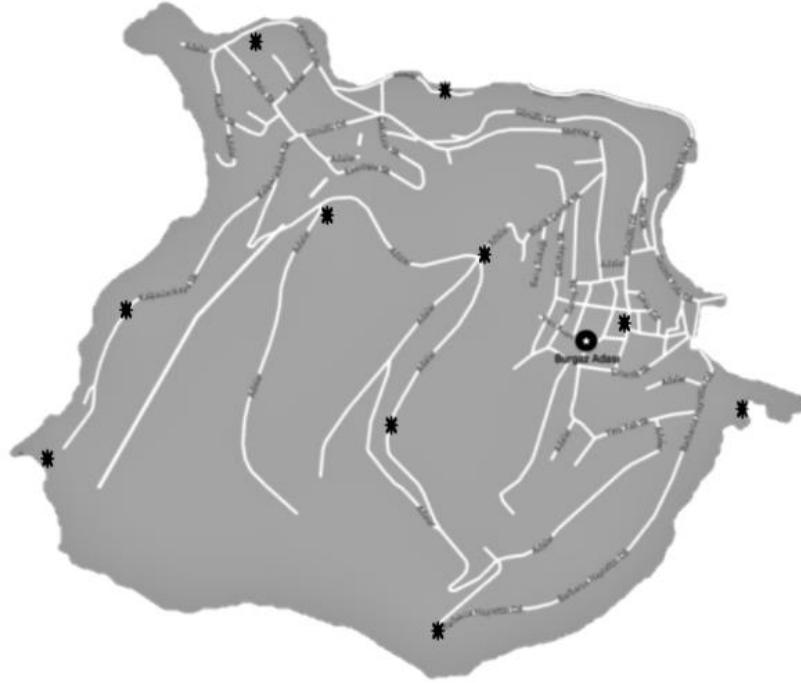
İstanbul Prens Adaları bölgesinde toprak ve plaj kumu örnekleme işleminin yapıldığı noktaların her birinde taşınabilir el dedektörü (LUDLUM - 2241, 44 - 10 NaI prob) kullanılarak havadaki gama radyasyonu doz seviyeleri de belirlenmiştir.



Şekil 3.2: Büyükada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.



Şekil 3.3: Heybeliada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.



Şekil 3.4: Burgazada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.

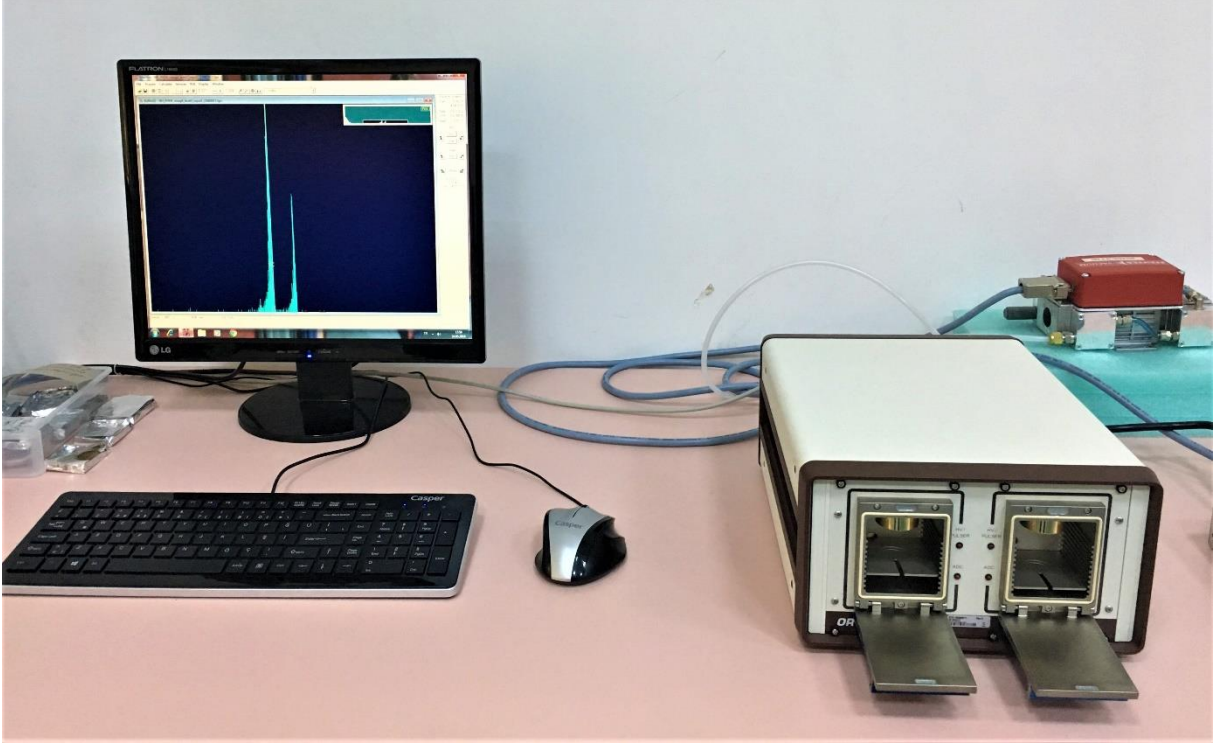


Şekil 3.5: Kınalıada bölgesinde toprak ve plaj kumu numunelerinin toplandığı ve havadaki gama dozlarının ölçüldüğü noktalar.

3.3. ALFA SPEKTROSKOPİSİ İÇİN ÖRNEK HAZIRLAMA VE AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ

3.3.1. Kullanılan Cihaz

Balık ve midye örneklerindeki ^{210}Po çekirdeklerinin aktivite konsantrasyonlarını belirleyebilmek için kullanılan alfa spektroskopi sistemi iki eş zamanlı ölçümü mümkün kılan iki adet sayım odasını (Alpha Duo Spectrometer, ORTEC), iki adet iyon (boron) implante edilmiş silikon dedektörünü (ULTRA AS serisi, BU-020-450-AS model), vakum pompasını (ALPHA-MINI-PPS) içermektedir.



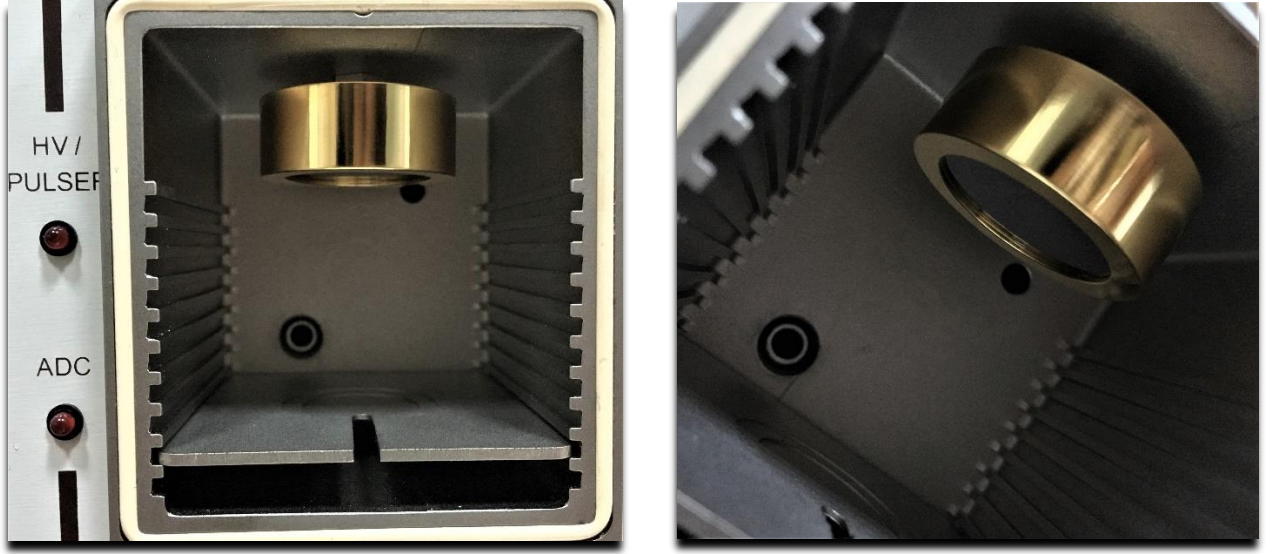
Şekil 3.6: İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesindeki Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'nda bulunmakta olan Alfa Spektroskopi Sistemi.

Sistemin her iki sayım odası; vakum göstergesi, değişken voltaj kaynağı (pozitif ya da negatif), ön yükselteç, değişken genlikli test puls üretici ve sızıntı akım monitörüne sahiptir. Sayım odalarındaki her bir dedektör birbirinden tamamen bağımsız olarak 0 ile 10 MeV enerji aralığında ayarlanabilir şekilde çalışmaktadır. Detektöre uygulanan voltaj 0 ile ± 100 V arasında ayarlanabilmektedir.

Enerji çözünürlüğü, dedektör çapına eşit bir dedektör – kaynak mesafesinde, ≤ 20 keV (FWHM)'dir. Dedektör verimi, kaynağın dedektöre yakın olduğu mesafede, $\geq \%25$ 'dir. Arka fon (background), 3 MeV'in üzerindeki enerji değerlerinde ≤ 1 sayım/saat'tir.

Dedektörün aktif alanı 450 mm^2 olup, maksimum ölçüm alınabilecek örnek boyutu 51 mm'dir. Her bir sayım odasındaki dedektör – kaynak mesafesi maksimum 44 mm olup, içerisinde 10 adet bölme bulunmakta ve dedektör – kaynak mesafesi ayarlanabilmektedir.

Bu sistemde sayım odalarının havalandırma, tutma ve pompa gibi vakum fonksiyonları yazılım (MAESTRO® MCA) kontrollüdür.



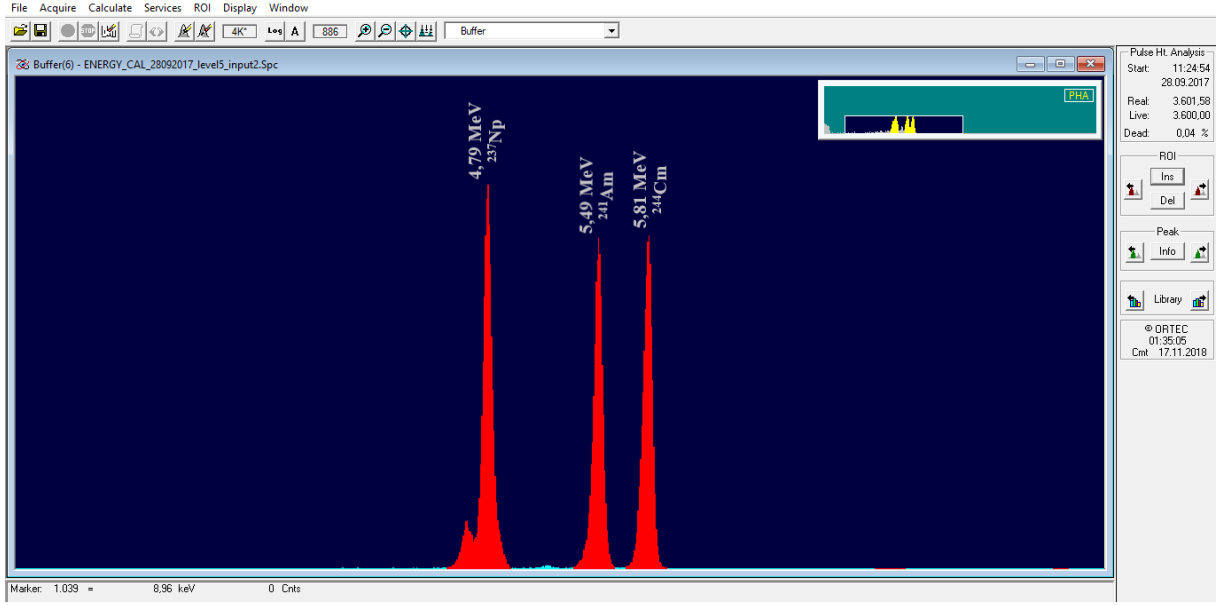
Şekil 3.7: İyon implante edilmiş silikon dedektörü ve sayım odası.

Aynı zamanda donanım kontrolleri, veri toplama ayarları, dedektör gerilimi ve kaçak akım bir spektrum analiz programı olan MAESTRO® MCA ile görüntülenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir [54].

İyon implante edilmiş iki adet dedektörü içeren alfa spektroskopi sisteminin enerji ve verim kalibrasyonları örnek geometrisi ile aynı geometri ve çapa sahip olan disk şeklindeki karışık alfa kaynağı (mixed source, Eckert & Ziegler Isotope Products) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). Kalibrasyon kaynağı; ^{237}Np , ^{241}Am ve ^{244}Cm çekirdeklerini içermekte olup, bu çekirdeklerin enerjileri sırasıyla 4,79 MeV, 5,49 MeV ve 5,81 MeV'dir.



Şekil 3.8: Alfa Spektroskopi Sistemi kalibrasyonu için kullanılan karışık alfa kaynağı.

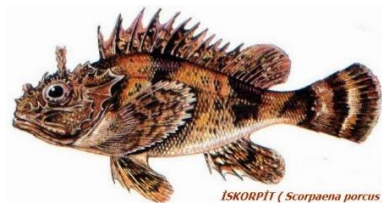


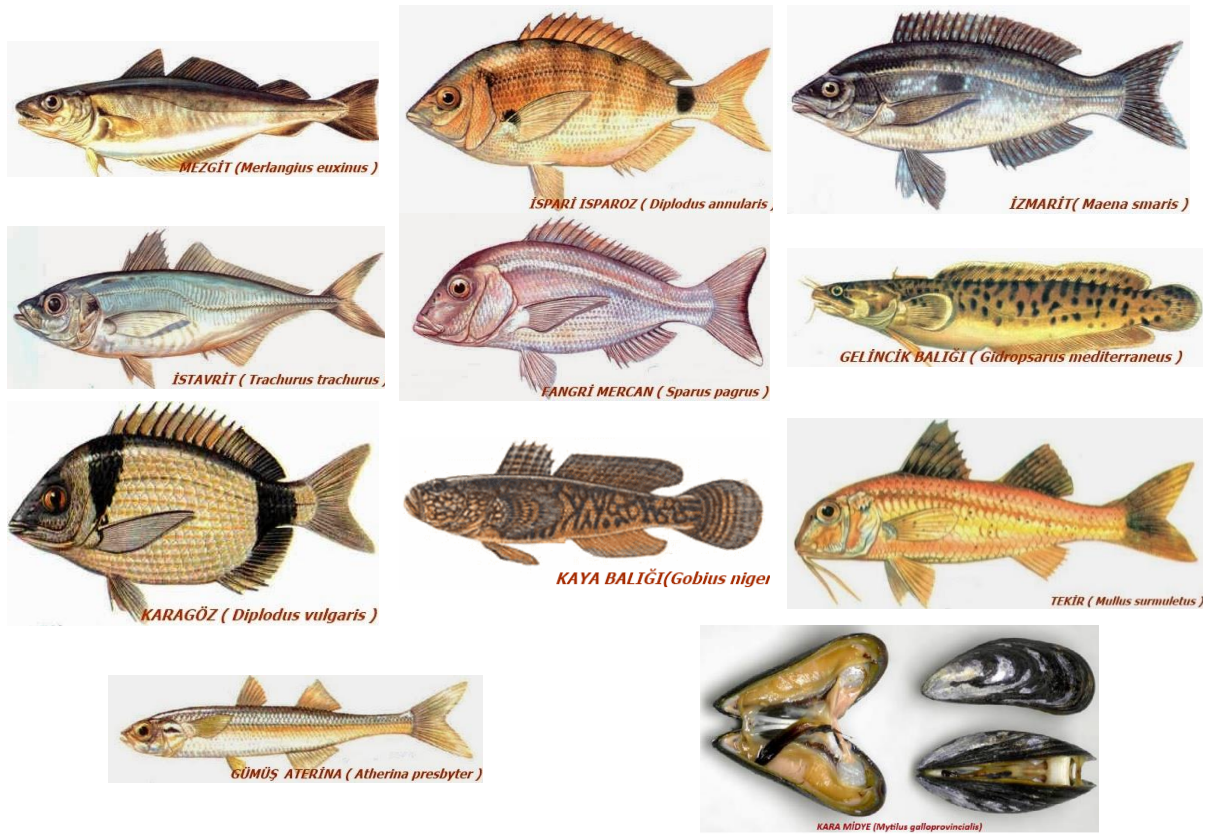
Şekil 3.9: Alfa Spektroskopi Sisteminin enerji kalibrasyonu için kullanılan çekirdeklerin pikleri.

3.3.2. Balık ve Midye Örneklerinin Radyokimyasal Olarak Hazırlanması

Balık ve midye örneklerinin radyokimyasal hazırlık süreci İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü bünyesindeki laboratuvarlarda gerçekleştirilmiş olup, radyokimyasal olarak hazırlanan balık ve midye örneklerinin ölçüm ve analizleri İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesindeki Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

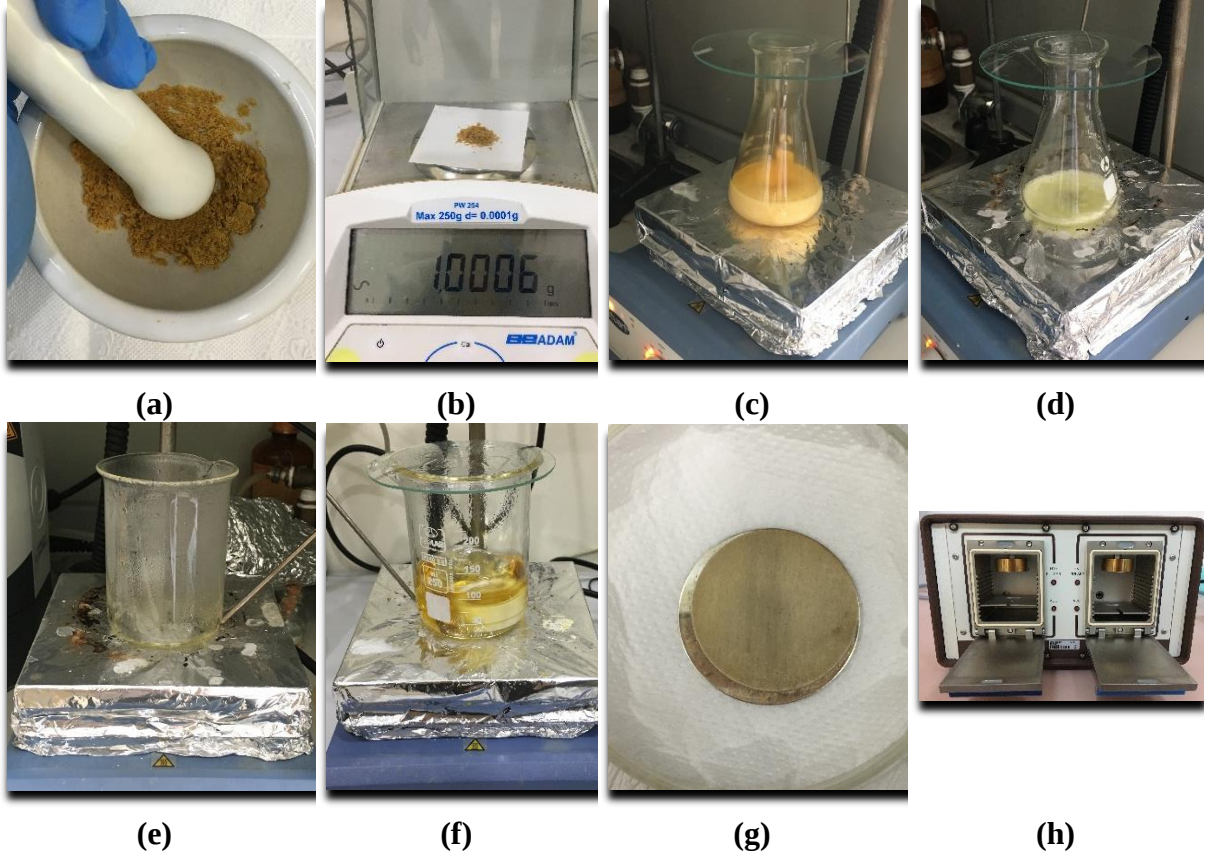
İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesinde tüketilen toplamda 13 adet (İskorpit – *Scorpaena porcus*, Eşkina – *Sciaena umbra*, Mırmır – *Lithognathus mormyrus*, Mezgit – *Merlangius euxmus*, İspari – *Diplodus annularis*, İzmarit – *Maena smaridis*, İstavrit – *Trachurus*, Mercan – *Sparus pagrus*, Gelincik – *Gaidropsarus mediterraneus*, Karagöz – *Diplodus vulgarensis*, Kaya balığı – *Gobiidae*, Tekir – *Mullus surmuletus*, Gümüş – *Atherina*) balık ve 3 adet kara midye (*Mytilus galloprovincialis*) örnekleri alfa spektroskopi sisteminde ölçülmek üzere öncelikle radyokimyasal olarak hazırlanmıştır.





Şekil 3.10: Radyokimyasal sürece tabi tutulup alfa spektroskopisi ile analiz edilen çeşitli balık ve kara midye örnekleri.

Her numuneye ait yaş ağırlık ve yaş uzunluk bilgileri not edildikten sonra, numunelerin her biri yaklaşık 48 saatlik süre ile kurutulmak üzere ayrı ayrı etüve yerleştirilmiştir. Etüvden alınan numunelerin kuru ağırlık bilgileri de not edilmiştir. Kurutulan numune homojen bir dağılım olacak şekilde porselen havanda dövülmüştür. Çeker ocak sistemi altında, numunenin 1 gramı üzerine, 3:1'lik oran ile HNO_3 (Nitrik asit), HCl (Hidroklorik asit) ve ^{210}Po 'dan kaynaklanan alfa parçacıklarını belirleyebilmek için ^{209}Po radyoaktif izleyici ilave edilip, sıcaklık ayarı yapılabilen ısıtıcı tabla üzerine yerleştirilerek numunenin çözünmesi (sindirilmesi) sağlanmıştır. Bu örnek çözeltisi üzerine 3 ml H_2O_2 (Hidrojen per oksit) ilave edilip, ısıtıcı tabla üzerinde bekletilerek çözeltinin berrak bir görünüme kavuşması sağlanmıştır. Bu işlemlerden sonra örnek çözeltisi oda sıcaklığına ulaştığında, bir çökelti gözleniyorsa santifrüj işlemi yapılarak, çökelti ayrılmıştır. Farklı bir behere alınan örnek çözeltisine buharlaştırma işlemi uygulanmıştır.

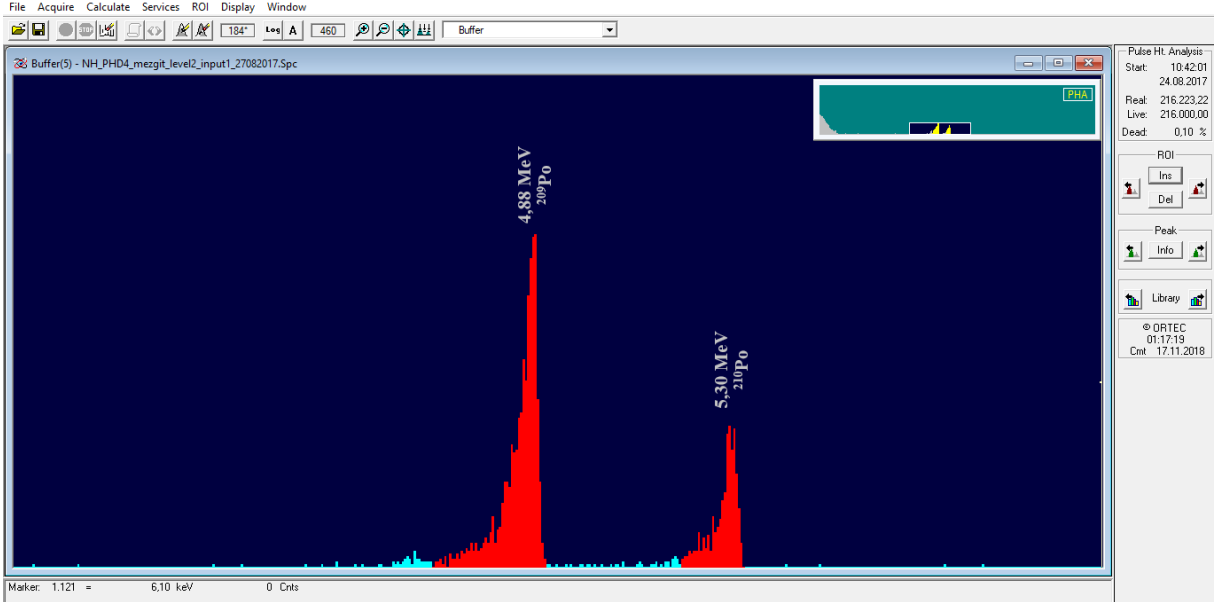


Şekil 3.11: (a) Havanda dövülerek homojenize hale getirilen numune, (b) 10^{-4} hassasiyete sahip hassas terazide örneğin radyokimyasal süreç için tartılması, (c) Numunenin, üzerine ilave edilen HNO_3 , HCl ve ^{209}Po tracer etkisiyle çözünmesi, (d) Örnek çözeltisi üzerine eklenen H_2O_2 , (e) Çözeltinin buharlaştırma işlemi, (f) Tutucu içerisine yerleştirilen gümüş disk üzerine, örnek içerisinde doğal olarak var olan ^{210}Po çekirdeğinin biriktirme süreci (kendiliğinden depozisyon), (g) Kendiliğinden depozisyon işlemi sonunda gümüş disk, (h) ^{210}Po birikmesi gerçekleşen gümüş diskin ölçüm alınmak üzere alfa spektroskopi sistemine yerleştirilmesi.

Bu işlemler sonucunda 250 ml beher içerisindeki örnek çözeltisi üzerine 1 M'lik 75 ml HCl , ilave edildikten sonra sıcaklık ayarlaması yapılan ısıtıcılı manyetik karıştırıcı üzerindeki çözelti içerisine, Fe^{+3} ve Fe^{+2} iyonlarının gümüş disk üzerine birikimini engellemek için askorbik asit ilave edilmiştir [55]. Diskin bir yüzünü açık bırakacak şekilde tasarlanmış olan teflon tutucu içerisine yerleştirilen gümüş disk, ısıtıcılı manyetik karıştırıcı üzerindeki örnek çözeltisi içerisine bırakılmıştır. Kendiliğinden depozisyon (birikme) olarak adlandırılan bu işlem için yaklaşık 4 saat boyunca gümüş disk üzerine ^{210}Po birikimini sağlamak amacıyla beklenmiştir. Depozisyon işlemi tamamlanan her bir örnek diskinin Alfa Spektroskopi Sistemi'nde (Alpha Duo Spectrometer, ORTEC) ölçümü gerçekleştirilmiştir.

3.3.3. Alfa Spektroskopisi için Spektrum Analizi ve Aktivite Hesabı

Alfa Spektroskopi Sistemi ile ölçümü gerçekleştirilen 13 adet balık ve 3 adet kara midye örneklerinin her biri için 216000 saniye süreli olacak şekilde, örnek spektrumları elde edilmiştir. ^{210}Po ve ^{209}Po (izleyici) radyoaktif çekirdeklerini içeren örnek spektrumlarının analizi ORTEC Maestro 32 spektrum toplama ve veri analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ve hesaplama işlemi için ^{210}Po çekirdeğinin ve ^{209}Po izleyicisinin sırasıyla 5,30 MeV ve 4,88 MeV enerjilerindeki karakteristik pik alanlarından yararlanılmış olup, balık ve kara midye örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir.



Şekil 3.12: Balık örneği ölçümlerinden elde edilen örnek bir alfa spektrumu (Tür: Mezgit – *Merlangius euxmus*).

Her bir örneğin ^{210}Po aktivite konsantrasyonlarını hesaplayabilmek için aşağıdaki denklem kullanılmıştır [37];

$$A_{o_s} = \frac{A_{o_T} K_T N_s}{K_s N_T} \quad (3.1)$$

Burada;

A_{o_s} : ^{210}Po çekirdeğinin aktivitesini (Bq),

A_{o_T} : ^{209}Po (izleyici) çekirdeğinin başlangıç aktivitesini (Bq),

K_T : ^{209}Po çekirdeği için bozunma düzeltme faktörünü,

N_s : ^{210}Po fotopiki altında kalan alanı,

K_s : ^{210}Po çekirdeği için bozunma düzeltme faktörünü,

N_T : ^{209}Po (izleyici) fotopiki altında kalan alanı ifade etmektedir.

Denklem (3.1)'e kütle terimi de ilave edilerek ^{210}Po çekirdeğinin aktivite konsantrasyonları Bq kg^{-1} biriminde elde edilmektedir.

^{210}Po çekirdeğinden kaynaklanmakta olan yıllık etkin içsel doz seviyeleri deniz ürünlerinin tüketim miktarına bağlıdır. Her bir örnek için yıllık etkin içsel doz seviyeleri denklem (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{210\text{Po, ing}} = CF \times m \times A_{210\text{Po}} \quad (3.2)$$

Burada,

$E_{210\text{Po, ing}}$: ^{210}Po 'dan kaynaklanan yıllık etkin içsel doz seviyesi (Sv y^{-1}),

CF : Dönüşüm faktörü (Sv Bq^{-1}),

m : Yıllık tüketim miktarı (kg y^{-1}),

$A_{210\text{Po}}$: ^{210}Po 'un aktivite konsantrasyonu (Bq kg^{-1})

Yıllık etkin içsel doz seviyesi hesaplamalarında, ^{210}Po çekirdeğinin yetişkinler için içsel doz dönüşüm faktörü (CF) $1,2 \times 10^{-6} \text{ Sv Bq}^{-1}$ olarak kullanılmıştır [56]. Kişi başına düşen yıllık ortalama balık tüketim miktarı, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'nin Su Ürünleri raporlarından 5,49 kg/yıl olarak belirlenmiş, TÜİK raporları ve literatürde Türkiye için kişi başına düşen yıllık ortalama midye tüketim miktarlarına yönelik ayrıntılı veriye ulaşılamadığı için 1 kg/yıl olarak hesap edilmiştir [57, 58].

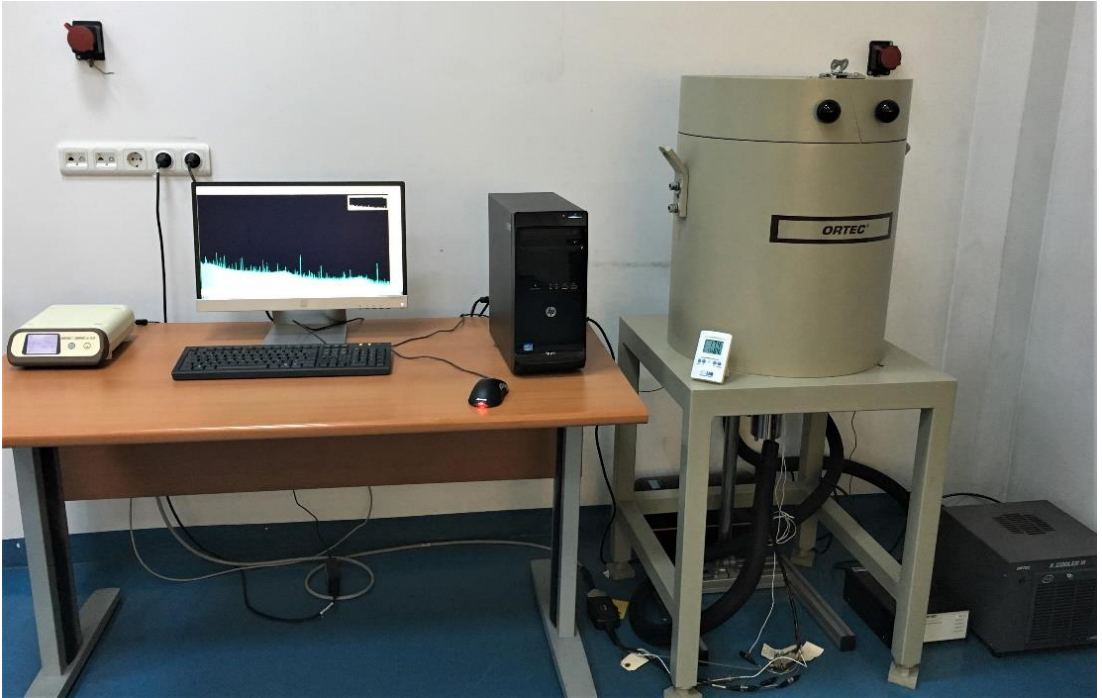
3.4. GAMA SPEKTROSKOPİSİ İÇİN ÖRNEK HAZIRLAMA VE AKTİVİTE ÖLÇÜMLERİ

3.4.1. Kullanılan Cihaz

Toprak ve plaj kumu örneklerindeki aktivite seviyelerinin belirlenmesi için kullanılan gama spektroskopi sistemi, ^{60}Co çekirdeği için 1,33 MeV’de %35 verime ve ^{60}Co çekirdeği için 1,33 MeV’de 1,85 keV enerji çözünürlüğüne (FWHM) sahip olan, p – tipi yüksek saflıklı Germanyum (HPGe) dedektörünü içermektedir (Şekil 3.13). Bu sistem ile 40 keV ile 10 MeV arasındaki gama enerjileri ölçülebilmektedir.

Dedektör penceresi alüminyumdur ve ön yükselticiyi korumak için otomatik bir yüksek gerilim kapatma sistemi bulunmaktadır. Sistem, dijital sinyal işlemcisi olan çok kanallı analizörü (DSPEC jr 2.0) de içermektedir. Sistemin soğutulması sıvı azot kullanımı gerektirmeyen mekanik soğutucu (X-COOLER III) ile gerçekleştirilmektedir.

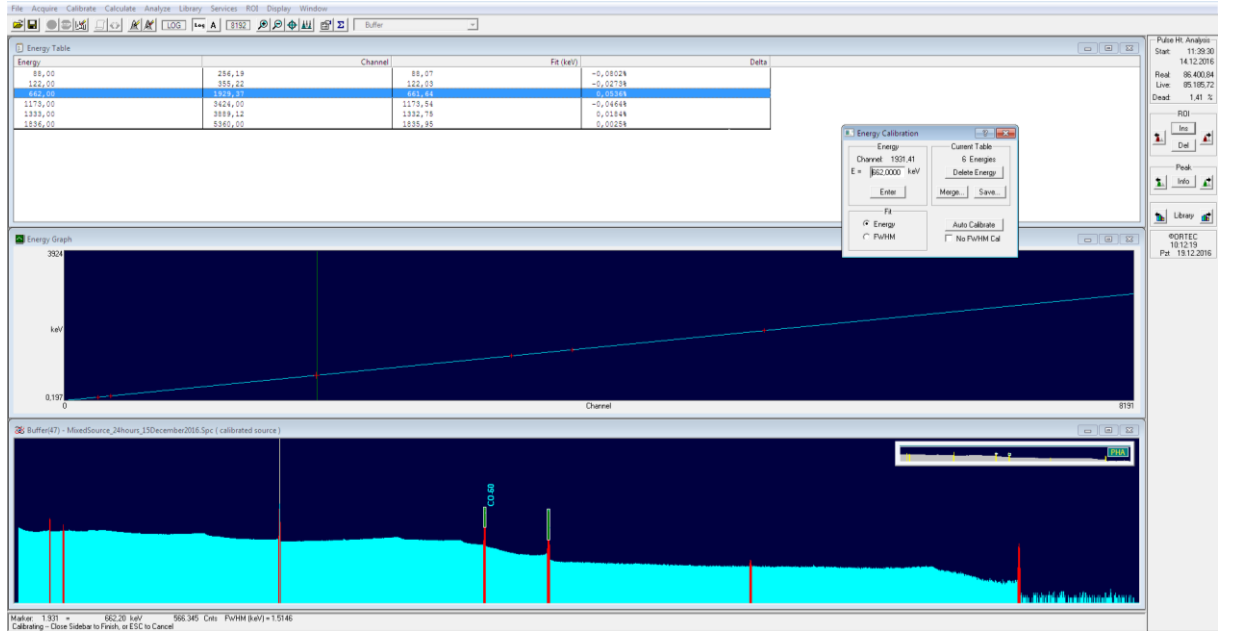
Dedektör, üstten açılan ve yaklaşık 10 cm kalınlığa sahip silindirik geometrilili zırha sahiptir. Bu zırh kurşun ve bakır – kalay kaplamalı olup, poliüretan cilalıdır [59].



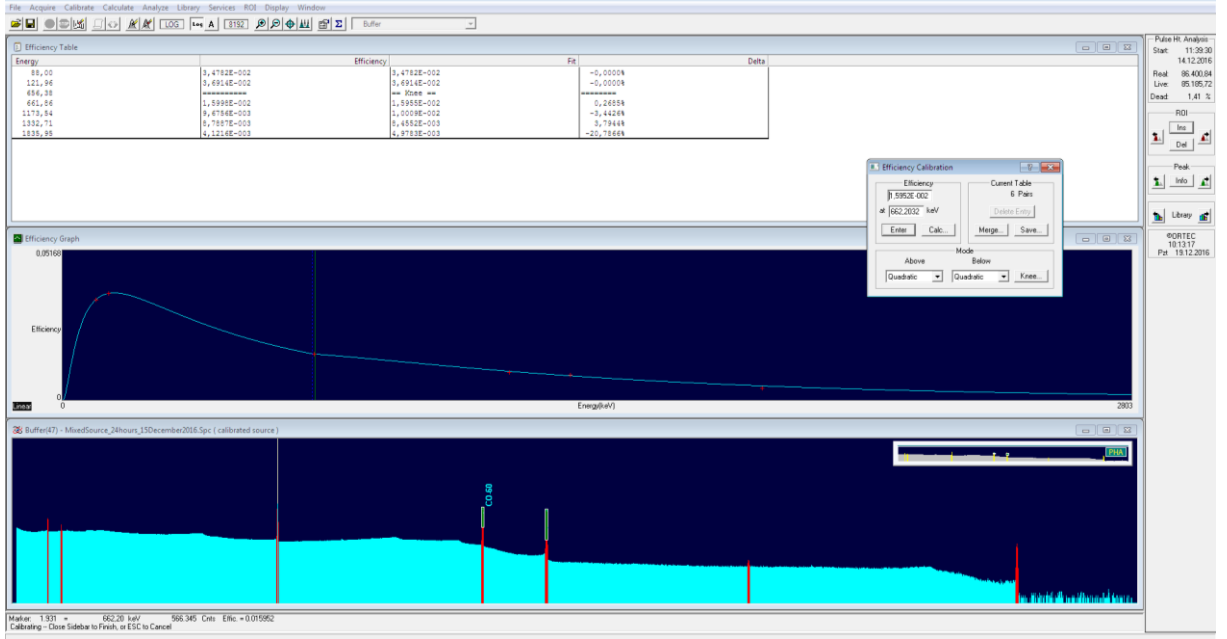
Şekil 3.13: İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesindeki Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvar’ında bulunmakta olan Gama Spektroskopi Sistemi.

Gama Spektroskopi Sistemi'nin enerji ve verim kalibrasyonu için, marinelli beaker kap geometrisine sahip karışık toprak standartı (mixed source) kullanılmıştır. Kalibrasyon kaynağında bulunan çekirdekler ve enerjileri; ^{109}Cd (88 keV), ^{57}Co (122 keV), ^{139}Ce (166 keV), ^{203}Hg (279 keV), ^{113}Sn (392 keV), ^{85}Sr (514 keV), ^{137}Cs (662 keV), ^{88}Y (898 keV ve 1836 keV) ve ^{60}Co (1173 keV ve 1333 keV) şeklindedir.

Bu toprak standartı ile gama spektroskopi sisteminde 86400 saniye olacak şekilde ölçüm gerçekleştirilmiş ve elde edilen spektrumda 88 keV'lik ^{109}Cd , 122 keV'lik ^{57}Co , 662 keV'lik ^{137}Cs , 1173 keV ve 1333 keV'lik ^{60}Co ve 1836 keV'lik ^{88}Y pikleri kullanılarak sistemin enerji (Şekil 3.14) ve verim (Şekil 3.15) kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14: Gama Spektroskopi Sistemi'nin enerji kalibrasyonu.

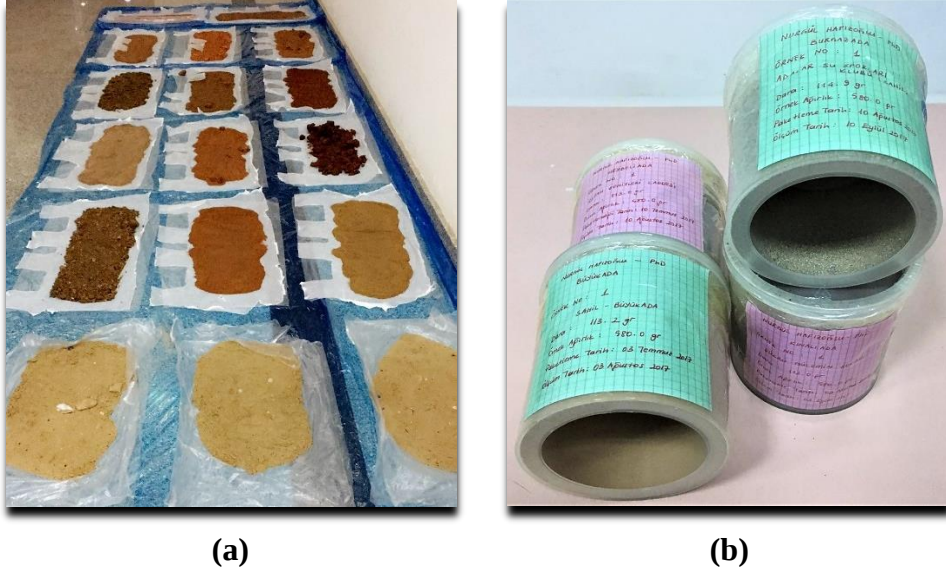


Şekil 3.15: Gama Spektroskopi Sistemi'nin verim kalibrasyonu.

3.4.2. Toprak ve Plaj Kumu Örneklerinin Hazırlanması

Toprak ve plaj kumu örneklerinin ölçülmek üzere hazırlanması, gama spektroskopi sistemi ile ölçülmesi, doğal (^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K) ve antropojenik (^{137}Cs) kökenli çekirdeklerin aktivite seviyelerinin belirlenmesi İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesindeki Nükleer Fizik Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

İstanbul Adalar (Büyükdada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesinden toplanan 56 adet toprak ve plaj kumu örnekleri Gama Spektroskopi Sistemi'nde ölçülmek üzere hazırlanmıştır. Örnekler ilk olarak kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Kurutulan örnekler $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 'lik elekler yardımıyla elenerek, 500 ml'lik marinelli beaker geometrisine sahip ölçüm kaplarına doldurulup, hava sızdırmayacak şekilde kapatılmıştır. Her bir örneğin üzerine örneklendiği yerin bilgisi, ağırlığı, paketlenme tarihi ve ölçüm tarihi not edilmiştir. Paketlenen örnekler radyoaktif dengeye ulaşmak üzere yaklaşık 30 gün boyunca bekletilmiştir.

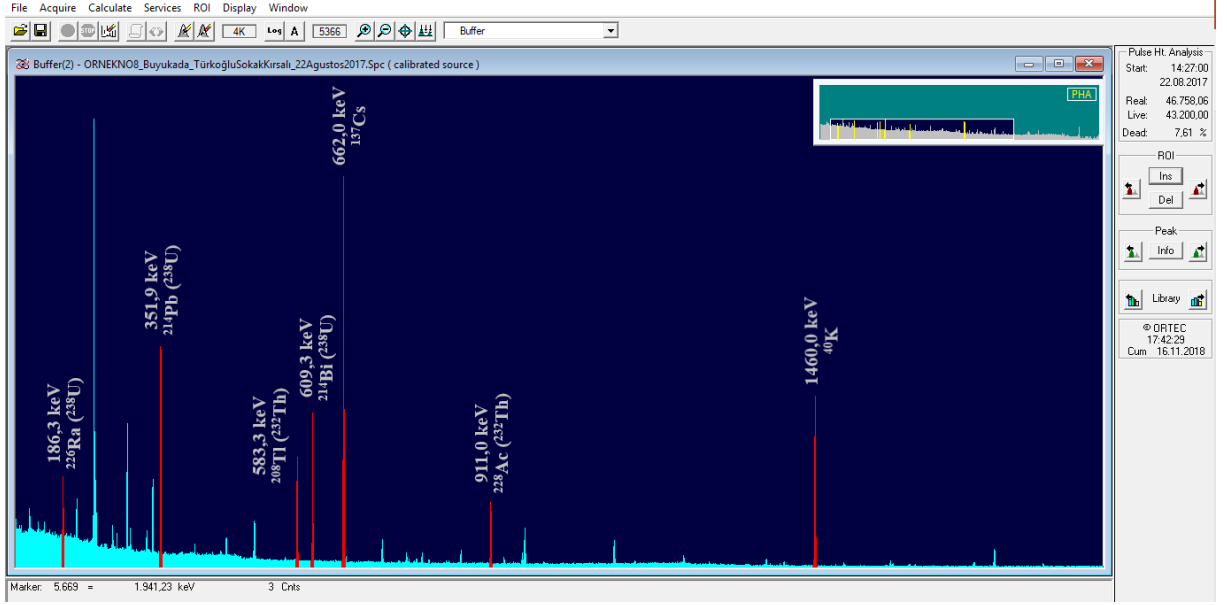


Şekil 3.16: (a) Örneklerin kurutulması, (b) Radyoaktif dengeye ulaşmak ve ölçülmek üzere marinelli beaker kaplara konulan örnekler.

3.4.3. Gama Spektroskopisi için Spektrum Analizi ve Aktivite Hesabı

HPGe dedektörünü içeren Gama Spektroskopi Sistemi ile ölçümü gerçekleştirilen 56 adet toprak ve plaj kumu örneklerinin her biri için ölçüm süresi 43200 saniye süreli olacak şekilde ayarlanmış ve örneklerin gama spektrumları elde edilmiştir. Arka fon ölçümleri de toprak ve plaj kumu örnekleri ile aynı sürede gerçekleştirilmiş olup, marinelli beaker kap geometrisi kullanılmıştır. Spektrumların elde edildiği ve analizlerinin gerçekleştirildiği program ORTEC GammaVision 6.2'dir.

Bu spektrumlardan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K olmak üzere doğal olarak oluşan radyoaktif çekirdeklerin ve ^{137}Cs antropojenik çekirdeğinin aktivite konsantrasyonları hata payları ile birlikte belirlenmiştir. ^{238}U serisi için; ^{226}Ra (186,3 keV), ^{214}Pb (351,9 keV) ve ^{214}Bi (609,3 keV) çekirdeklerinin pikleri, ^{232}Th serisi için; ^{208}Tl (583,3 keV) ve ^{228}Ac (911,0 keV) çekirdeklerinin pikleri, ^{40}K çekirdeği için; 1460 keV enerjili piki ve ^{137}Cs çekirdeği için; 662 keV enerjili piki spektrum üzerinde belirlenerek, bu çekirdeklere ait aktivite konsantrasyonları spektrumlar yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 3.17: Toprak ve plaj kumu örneklerinin ölçümlerinden elde edilen spektrum örneği.

E enerjisine sahip fotopikin i çekirdeği için, analitik ifadeyle aktivite konsantrasyonu hesabı aşağıdaki formül ile gerçekleştirilmektedir [60, 61];

$$A_{E_i} = \frac{N_{E_i}}{\varepsilon_E P_\gamma t m_s} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'de;

A_{E_i} : Bir i çekirdeği için E enerjisindeki kütle başına aktivite ($Bq\ kg^{-1}$),

N_{E_i} : E_i enerjili fotopikin altında kalan alandaki net sayım (arke fon sayımı çıkartılmış),

ε : E_i enerjili fotopikin verimi,

P_γ : Fotopik enerjisine karşılık gama ışınının yayılma olasılığı,

t: Saniye cinsinden ölçüm süresi,

m: Ölçülen örneğin kilogram biriminde kütlesini ifade etmektedir.

^{238}U ve ^{232}Th çekirdekleri için spektrumlarda birden fazla enerjinin dikkate alınması sebebiyle, ağırlıklı aktivite denklemi kullanılmıştır. Bu ifade denklem (3.4) şeklinde ifade edilmektedir;

$$A_{E_i} = \frac{\sum A_{E_i} \times P_\gamma}{\sum P_\gamma} \quad (3.4)$$

Gama-ışını spektroskopisi metodunun bir performans kriteri olarak minimum dedekte edilebilir aktivite (MDA), güvenilir bir şekilde belirlenebilen belirli bir ölçüm için en küçük radyoaktif çekirdek miktarı olarak tanımlanabilmektedir. Minimum dedekte edilebilir aktivitenin miktarı dedekte etme limiti ifadesi (Denklem 3.5) ile hesaplanabilmektedir [20].

$$L_D = 2,71 + 4,65 \times \sqrt{B} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'te; L_D , dedekte etme limiti ve B, arka fon sayımıdır.

$$MDA = \frac{L_D}{t \times P_\gamma \times \epsilon \times m} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da;

t: Ölçüm alınan süre (sn),

P_γ : Gama ışını yayımlanma olasılığı,

ϵ : Dedekte etme verimi,

m: Ölçülen örneğin kütlesi (kg) olarak ifade edilmektedir.

Bu çalışma için minimum dedekte edilebilir aktivite (MDA) değerleri; ^{238}U için $0,39 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{232}Th için $0,13 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{40}K için $3,05 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve ^{137}Cs için $0,03 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

Doğal radyoaktif çekirdeklerin hava ortamında absorblanan doz oranına katkısı toprakta bulunmakta olan radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarına bağlıdır. Topraktaki radyoaktif çekirdeğin aktivitesi biliniyorsa zeminden 1 metre yükseklikte havadaki maruz kalma dozu bulunabilmektedir. Denklem (3.7)'de ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal çekirdekleri için dönüşüm faktörleri verilmektedir [27, 62].

$$D (\text{nGy h}^{-1}) = 0,462 \times A_{^{238}\text{U}} + 0,604 \times A_{^{232}\text{Th}} + 0,0417 \times A_{^{40}\text{K}} \quad (3.7)$$

Burada;

D: Yerden 1 m yükseklikteki doz oranı,

$A_{238\text{U}}$: ^{238}U 'in aktivite konsantrasyonu,

$A_{232\text{Th}}$: ^{232}Th 'nin aktivite konsantrasyonu,

$A_{40\text{K}}$: ^{40}K 'in aktivite konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Denklem (3.8)'de toprakta bulunan yapay çekirdek ^{137}Cs için dönüşüm faktörü verilmektedir.

$$D (\text{nGy h}^{-1}) = 0,1125 \times A_{137\text{Cs}} \quad (3.8)$$

Burada, $A_{137\text{Cs}}$, ^{137}Cs 'nin aktivite konsantrasyonudur.

Maruz kalınan yıllık etkin doz eşdeğerini tahmin edebilmek için, havadaki absorbe edilen doz değeri ile birlikte doz dönüşüm ve dışsal maruz kalma faktörlerini de hesaba katmak gerekmektedir [63]. Denklem (3.9) ile yıllık etkin doz değeri $\mu\text{Sv y}^{-1}$ biriminde hesaplanabilmektedir [6, 27].

$$\text{AED} (\mu\text{Sv y}^{-1}) = D \times 8760 \times 0,2 \times 0,7 \times 0,001 \quad (3.9)$$

Burada,

8760: Saat/yıl birimi olarak maruz kalma süresi (365 gün x 24 saat),

0,2: Dışsal maruz kalma faktörü,

0,7: Sv Gy⁻¹ biriminde dönüşüm faktörüdür [27].

3.5. HAVADAKİ GAMA RADYASYON DOZU ÖLÇÜMLERİ

3.5.1. Kullanılan Cihaz ve Ölçüm İşlemi

Havadaki gama radyasyon dozunu tespit edebilmek üzere ölçümlerde kullanılan dedektör taşınabilir (LUDLUM, 2241). Bu taşınabilir doz ölçer sistemi, sintilasyon, Geiger-Müller (GM), orantılı sayaç tipi dedektör problemleri ile kullanılmak üzere tasarlanmış olup, iç veya dış mekan ölçümleri için uygundur. Doz ölçer, R/h, Sv/h, cpm ya da cps olarak istenilen birime ayarlanabilme özelliğine sahiptir [64].

Ölçümlerde kullanılan 44 – 10 model gama sintilasyon (NaI) probu, 60 keV ile 2 MeV enerji aralığına sahip gama ışınlarını dedekte edebilmektedir. Prob, fotoçoğaltıcı tüpe bağlanmış 5,1 x 5,1 cm (çap x kalınlık)'lik bir NaI kristalinden oluşmaktadır [65].



Şekil 3.18: Gama sintilasyon (NaI) probunu içeren taşınabilir doz ölçer sistemi.

İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesinde havadaki gama radyasyonu ölçümleri, toprak ve plaj kumu toplanan her bir örnekleme noktasında (56 adet) gerçekleştirilmiştir. NaI gama probu zeminden 1 m yükseklikte olacak şekilde tutularak, yaklaşık 900 – 1000 sn süreli anlık ölçümler gerçekleştirilerek, havadaki gama radyasyon doz seviyeleri belirlenmiştir.

4. BULGULAR

4.1. BALIK VE MİDYE ÖRNEKLERİNİN DENEYSEL SONUÇLARI

4.1.1. Aktivite Konsantrasyonları

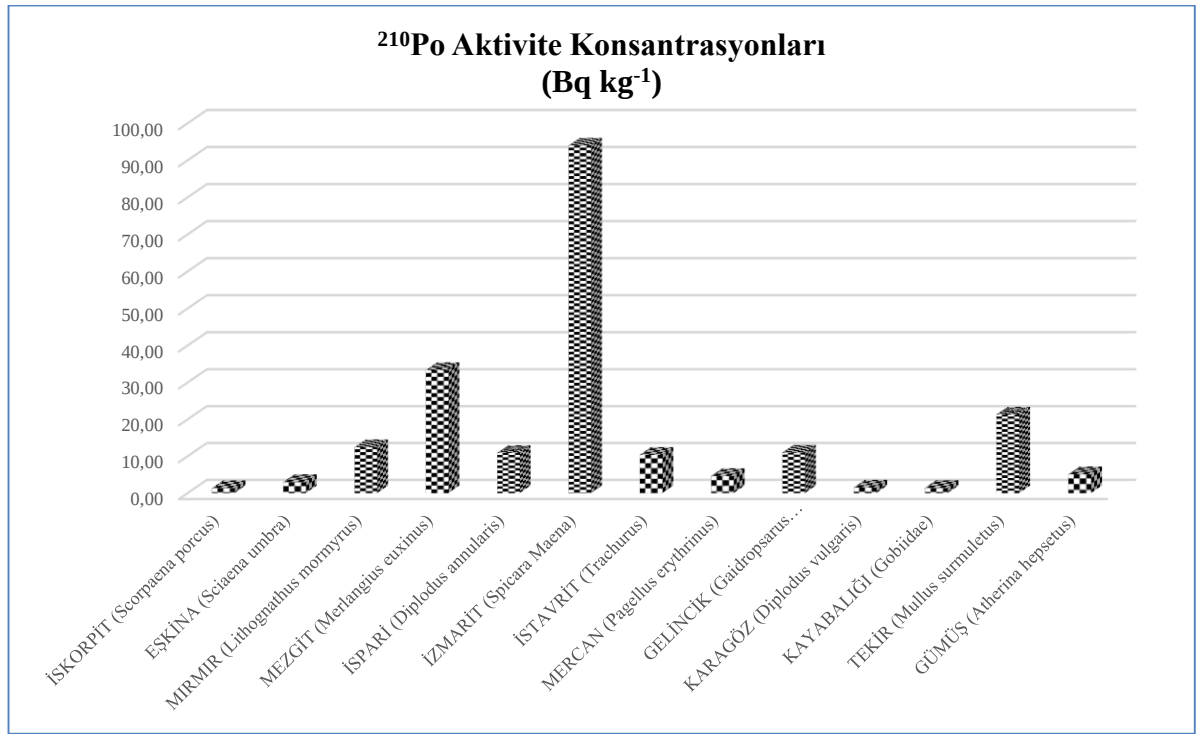
İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesinden temin edilen farklı türde 13 adet balık ve 3 adet kara midye numuneleri için alfa spektroskopi sistemi ile alınan spektrumlar analiz edilmiştir.

Balık örneklerinin ^{210}Po çekirdeği aktivite konsantrasyonları Tablo 4.1’de gösterilmektedir. Hesaplanan minimum aktivite konsantrasyonu İskorpit (*Scorpaena porcus*) türüne ait olup $1,40 \pm 0,41 \text{ Bq kg}^{-1}$, maksimum aktivite konsantrasyonu İzmarit (*Spicara maena*) türüne ait olup $94,02 \pm 7,34 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve balık örneklerinin ortalama aktivite konsantrasyonu ise $16,23 \pm 1,88 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.1: Balık örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.

Tür / Latince		^{210}Po Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg^{-1})
İSKORPİT	<i>Scorpaena porcus</i>	$1,40 \pm 0,41$
EŞKİNA	<i>Sciaena umbra</i>	$3,06 \pm 0,73$
MİRMİR	<i>Lithognathus mormyrus</i>	$12,50 \pm 1,29$
MEZGİT	<i>Merlangius euxinus</i>	$33,40 \pm 2,70$
İSPARİ	<i>Diplodus annularis</i>	$10,93 \pm 1,16$
İZMARİT	<i>Spicara maena</i>	$94,02 \pm 7,34$
İSTAVRİT	<i>Trachurus</i>	$10,42 \pm 2,66$
MERCAN	<i>Pagellus erythrinus</i>	$4,69 \pm 1,52$
GELİNCİK	<i>Gaidropsarus mediterraneus</i>	$11,01 \pm 1,54$
KARAGÖZ	<i>Diplodus vulgaris</i>	$1,56 \pm 0,70$
KAYABALIĞI	<i>Gobiidae</i>	$1,47 \pm 0,68$
TEKİR	<i>Mullus surmuletus</i>	$21,35 \pm 3,15$
GÜMÜŞ	<i>Atherina hepsetus</i>	$5,17 \pm 0,58$
Minimum		$1,40 \pm 0,41$
Maksimum		$94,02 \pm 7,34$
Ortalama		$16,23 \pm 1,88$

Şekil 4.1’de balık türlerine göre ^{210}Po aktivite konsantrasyonları bar grafiği olarak da gösterilmektedir.



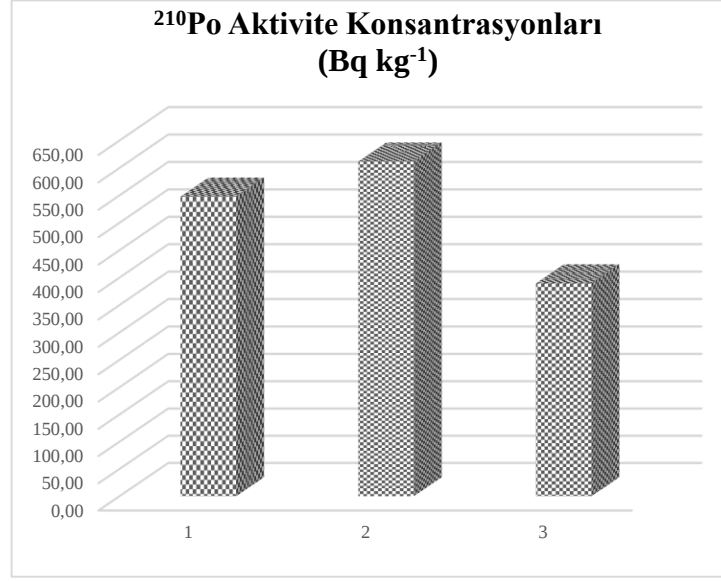
Şekil 4.1: Farklı türde balık örneklerine karşılık ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.

Kara midye örneklerinde analiz edilen doğal radyoaktif ^{210}Po çekirdeğinin aktivite konsantrasyonları Tablo 4.2’de gösterilmektedir. ^{210}Po aktivite konsantrasyonları $389,34 \pm 20,33 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $611,50 \pm 25,99 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında olup, ortalama aktivite konsantrasyonu ise $516,13 \pm 25,81 \text{ Bq kg}^{-1}$ ’dir.

Tablo 4.2: Kara midye örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.

Örnek No	Tür / Latince	^{210}Po Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg^{-1})
1	KARA MİDYE / <i>Mytilus galloprovincialis</i>	$547,54 \pm 31,10$
2	KARA MİDYE / <i>Mytilus galloprovincialis</i>	$611,50 \pm 25,99$
3	KARA MİDYE / <i>Mytilus galloprovincialis</i>	$389,34 \pm 20,33$
Minimum		$389,34 \pm 20,33$
Maksimum		$611,50 \pm 25,99$
Ortalama		$516,13 \pm 25,81$

Kara midye örneklerinin ^{210}Po aktivite konsantrasyon seviyeleri Şekil 4.2’deki bar grafiğinde de görülmektedir.



Şekil 4.2: Kara midye örneklerine karşılık ^{210}Po aktivite konsantrasyonları.

4.1.2. Doz Değerleri

^{210}Po aktivite konsantrasyonlarına göre balık örneklerinin tüketimiyle maruz kalınacak yıllık etkin içsel doz seviyeleri $\mu\text{Sv y}^{-1}$ biriminde hesaplanmıştır. Aktivite konsantrasyonları ile orantılı olarak minimum, maksimum ve ortalama yıllık etkin içsel dozlar sırasıyla, $9,24 \mu\text{Sv y}^{-1}$, $619,40 \mu\text{Sv y}^{-1}$ ve $106,92 \mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak belirlenmiştir (Tablo 4.3).

Tablo 4.3: Balık örneklerinin tüketimiyle maruz kalınan yıllık etkin içsel dozlar.

	Tür / Latince	Yıllık Etkin İçsel Dozlar ($\mu\text{Sv y}^{-1}$)
İSKORPİT	<i>Scorpaena porcus</i>	9,24
EŞKİNA	<i>Sciaena umbra</i>	20,17
MİRMİR	<i>Lithognathus mormyrus</i>	82,33
MEZGİT	<i>Merlangius euxinus</i>	220,06
İSPARİ	<i>Diplodus annularis</i>	72,02
İZMARİT	<i>Spicara maena</i>	619,40
İSTAVRİT	<i>Trachurus</i>	68,65
MERCAN	<i>Pagellus erythrinus</i>	30,93
GELİNCİK	<i>Gaidropsarus mediterraneus</i>	72,52
KARAGÖZ	<i>Diplodus vulgaris</i>	10,28
KAYABALIĞI	<i>Gobiidae</i>	9,70
TEKİR	<i>Mullus surmuletus</i>	140,64
GÜMÜŞ	<i>Atherina hepsetus</i>	34,05
Minimum		9,24
Maksimum		619,40
Ortalama		106,92

Kara midye örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonlarına göre, yetişkinler tarafından tüketildiğinde maruz kalınacak yıllık etkin içsel dozlar $\mu\text{Sv y}^{-1}$ biriminde hesaplanmıştır. Midye örnekleri için minimum, maksimum ve ortalama yıllık etkin içsel dozlar sırasıyla, 467,21 $\mu\text{Sv y}^{-1}$, 733,80 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ ve 619,35 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak belirlenmiştir (Tablo 4.4).

Tablo 4.4: Kara midye örneklerinin tüketimiyle maruz kalınan yıllık etkin içsel dozlar.

Örnek No	Tür / Latince	Yıllık Etkin İçsel Dozlar ($\mu\text{Sv y}^{-1}$)
1	KARA MİDYE / <i>Mytilus galloprovincialis</i>	657,05
2	KARA MİDYE / <i>Mytilus galloprovincialis</i>	733,80
3	KARA MİDYE / <i>Mytilus galloprovincialis</i>	467,21
Minimum		467,21
Maksimum		733,80
Ortalama		619,35

4.2. TOPRAK VE PLAJ KUMU ÖRNEKLERİNİN DENEYSEL SONUÇLARI

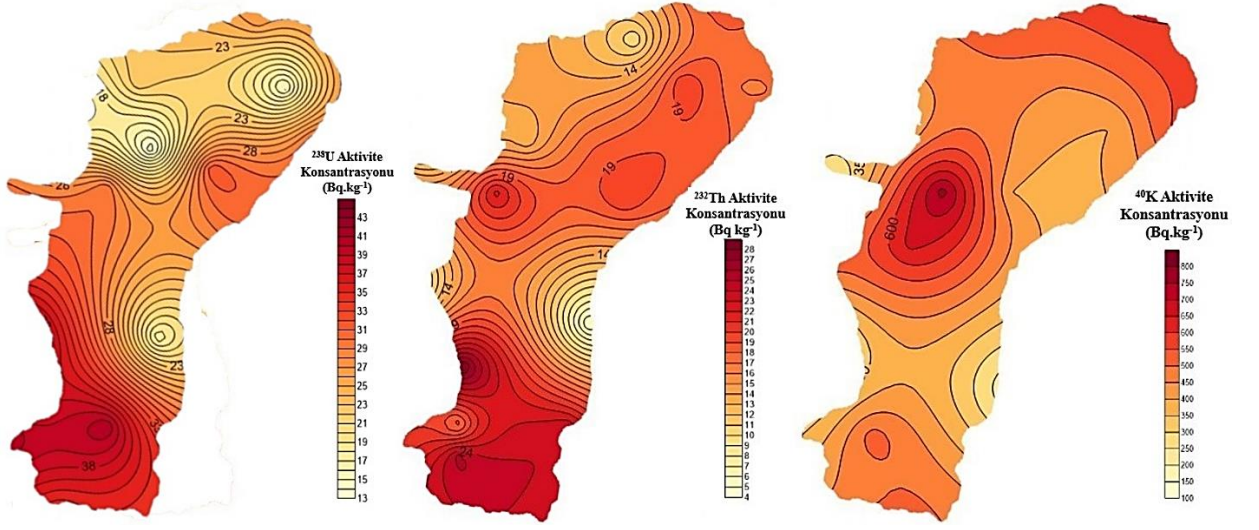
4.2.1. Aktivite Konsantrasyonları

İstanbul Prens Adaları Büyükada bölgesinden toplanan 23 adet toprak ve plaj kumu örneklerinin gama spektroskopi sisteminde ölçümleri gerçekleştirilerek elde edilen spektrumları analiz edilmiştir. Toprak ve plaj kumu örneklerindeki doğal ve yapay radyoaktif çekirdekler olan ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs 'nin aktivite konsantrasyonları Bq kg^{-1} biriminde hesaplanmıştır (Tablo 4.5). ^{238}U çekirdeği için minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $13,00 \pm 0,31 \text{ Bq kg}^{-1}$, $43,52 \pm 0,85 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $27,96 \pm 0,44 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. ^{232}Th çekirdeği için minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $4,51 \pm 0,15 \text{ Bq kg}^{-1}$, $28,31 \pm 0,37 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $16,46 \pm 0,28 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. ^{40}K çekirdeği için minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $135,17 \pm 3,05 \text{ Bq kg}^{-1}$, $772,62 \pm 5,86 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $457,99 \pm 4,61 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. ^{137}Cs yapay çekirdeği için minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $0,15 \pm 0,02 \text{ Bq kg}^{-1}$, $67,08 \pm 0,74 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $11,49 \pm 0,15 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.5: Büyükada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.

Örnek No	^{238}U Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{232}Th Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{40}K Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)
B1	31,63 ± 0,44	20,35 ± 0,31	619,27 ± 5,26	0,93 ± 0,05
B2	30,34 ± 0,43	17,53 ± 0,29	580,88 ± 5,10	0,58 ± 0,04
B3	29,08 ± 0,43	16,88 ± 0,29	565,18 ± 5,04	2,33 ± 0,08
B4	30,74 ± 0,44	19,85 ± 0,31	400,14 ± 4,27	3,12 ± 0,09
B5	14,33 ± 0,32	10,16 ± 0,22	456,92 ± 4,55	1,21 ± 0,06
B6	26,64 ± 0,41	14,74 ± 0,27	546,62 ± 4,96	2,79 ± 0,09
B7	21,40 ± 0,38	12,93 ± 0,25	453,22 ± 4,53	2,65 ± 0,09
B8	22,79 ± 0,42	15,08 ± 0,29	390,52 ± 4,56	43,96 ± 0,38
B9	13,00 ± 0,31	13,26 ± 0,25	772,62 ± 5,86	15,54 ± 0,21
B10	31,87 ± 0,44	17,66 ± 0,29	400,75 ± 4,27	37,74 ± 0,33
B11	29,42 ± 0,43	20,02 ± 0,31	389,66 ± 4,21	18,69 ± 0,23
B12	17,07 ± 0,34	4,78 ± 0,16	196,00 ± 3,05	0,39 ± 0,03
B12 - 2	15,08 ± 0,33	5,04 ± 0,16	245,31 ± 3,39	0,84 ± 0,05
B13	29,90 ± 0,43	22,47 ± 0,33	659,31 ± 5,43	0,15 ± 0,02
B14	40,90 ± 0,49	23,67 ± 0,34	443,14 ± 4,48	1,42 ± 0,06
B15	33,97 ± 0,46	23,04 ± 0,33	487,79 ± 4,69	16,19 ± 0,21
B16	35,67 ± 0,51	22,11 ± 0,35	353,96 ± 4,35	13,18 ± 0,21
B17	30,55 ± 0,44	17,35 ± 0,29	471,88 ± 4,62	0,16 ± 0,02
B18	43,52 ± 0,50	25,30 ± 0,35	589,44 ± 5,14	11,01 ± 0,18
B19	42,77 ± 0,50	28,31 ± 0,37	521,79 ± 4,85	2,05 ± 0,08
B20	30,59 ± 0,85	5,45 ± 0,29	135,17 ± 4,87	67,08 ± 0,74
B21	28,00 ± 0,42	18,16 ± 0,30	615,40 ± 5,25	21,67 ± 0,25
B22	13,81 ± 0,32	4,51 ± 0,15	238,87 ± 3,34	0,69 ± 0,04
Minimum	13,00 ± 0,31	4,51 ± 0,15	135,17 ± 3,05	0,15 ± 0,02
Maksimum	43,52 ± 0,85	28,31 ± 0,37	772,62 ± 5,86	67,08 ± 0,74
Ortalama	27,96 ± 0,44	16,46 ± 0,28	457,99 ± 4,61	11,49 ± 0,15

Büyükada bölgesi için doğal radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarına göre oluşturulan aktivite dağılım haritaları Şekil 4.3'te görülmektedir.



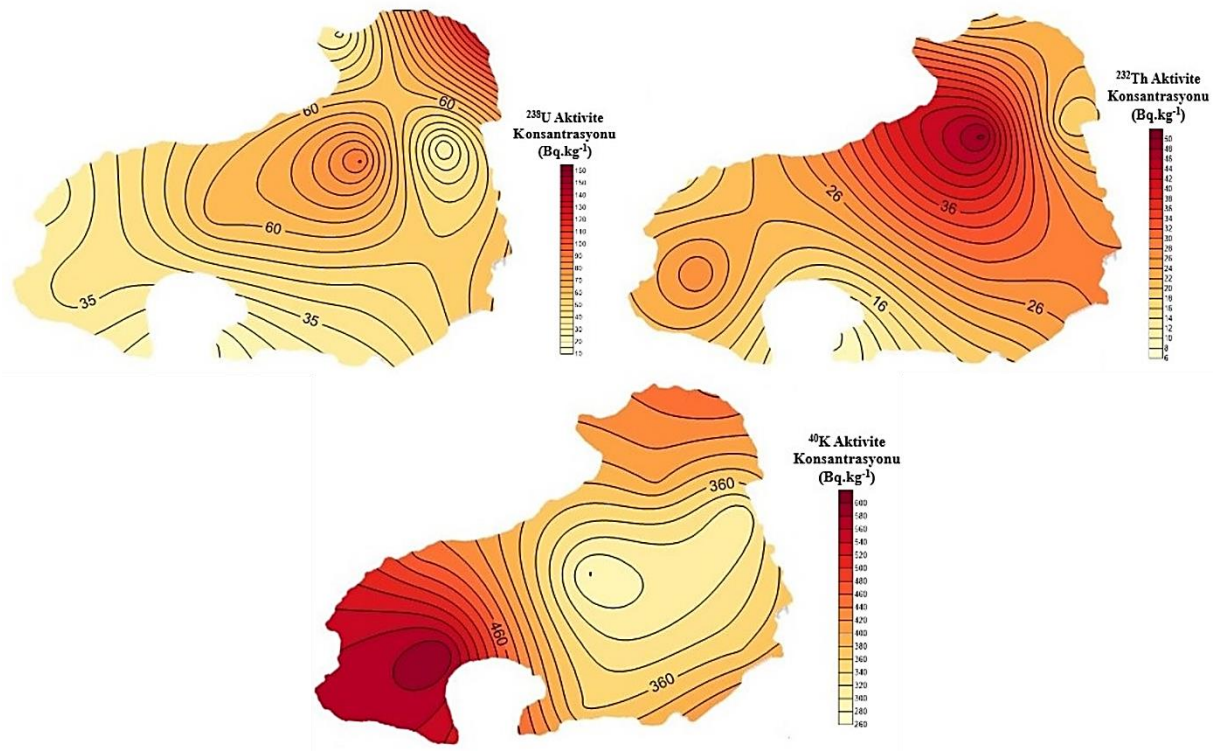
Şekil 4.3: Büyükada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.

Prens Adaları Heybeliada bölgesinden toplanan 14 adet toprak ve plaj kumu örneklerinin ölçümleri gerçekleştirilerek, spektrumları analiz edilmiştir. Tablo 4.6’da analiz sonuçlarını içeren aktivite konsantrasyonları görülmektedir. ^{238}U çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $13,66 \pm 0,32 \text{ Bq kg}^{-1}$, $158,70 \pm 0,91 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $50,23 \pm 0,53 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. ^{232}Th çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $6,96 \pm 0,19 \text{ Bq kg}^{-1}$, $48,85 \pm 0,52 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $24,54 \pm 0,35 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. ^{40}K çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $276,89 \pm 3,88 \text{ Bq kg}^{-1}$, $602,05 \pm 5,41 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $431,52 \pm 4,52 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. ^{137}Cs çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, $1,22 \pm 0,06 \text{ Bq kg}^{-1}$, $39,57 \pm 0,36 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $11,16 \pm 0,16 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.6: Heybeliada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.

Örnek No	^{238}U Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{232}Th Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{40}K Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)
H1	60,24 ± 0,58	40,69 ± 0,44	404,88 ± 4,29	4,93 ± 0,12
H2	62,84 ± 0,64	26,02 ± 0,38	276,89 ± 3,88	39,57 ± 0,36
H3	44,29 ± 0,51	28,94 ± 0,37	360,22 ± 4,06	1,22 ± 0,06
H4	65,17 ± 0,60	30,03 ± 0,38	369,96 ± 4,11	14,80 ± 0,21
H5	33,29 ± 0,45	19,44 ± 0,31	513,57 ± 4,81	13,29 ± 0,19
H6	13,66 ± 0,32	6,96 ± 0,19	359,74 ± 4,05	1,31 ± 0,06
H7	37,88 ± 0,47	28,12 ± 0,37	602,05 ± 5,19	2,96 ± 0,09
H8	27,94 ± 0,42	17,74 ± 0,29	556,79 ± 5,00	12,68 ± 0,19
H9	28,58 ± 0,46	19,72 ± 0,33	558,52 ± 5,41	3,77 ± 0,11
H10	26,65 ± 0,45	15,75 ± 0,30	452,56 ± 4,89	8,20 ± 0,16
H11	91,97 ± 0,76	48,85 ± 0,52	298,58 ± 4,02	35,57 ± 0,34
H12	23,81 ± 0,43	17,83 ± 0,32	471,93 ± 4,99	5,30 ± 0,13
H13	28,18 ± 0,42	14,41 ± 0,26	472,49 ± 4,62	3,12 ± 0,09
H14	158,70 ± 0,91	29,05 ± 0,37	343,05 ± 3,96	9,56 ± 0,17
Minimum	13,66 ± 0,32	6,96 ± 0,19	276,89 ± 3,88	1,22 ± 0,06
Maksimum	158,70 ± 0,91	48,85 ± 0,52	602,05 ± 5,41	39,57 ± 0,36
Ortalama	50,23 ± 0,53	24,54 ± 0,35	431,52 ± 4,52	11,16 ± 0,16

Heybeliada bölgesi için doğal radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarına göre oluşturulan aktivite dağılım haritaları Şekil 4.4'te görülmektedir.



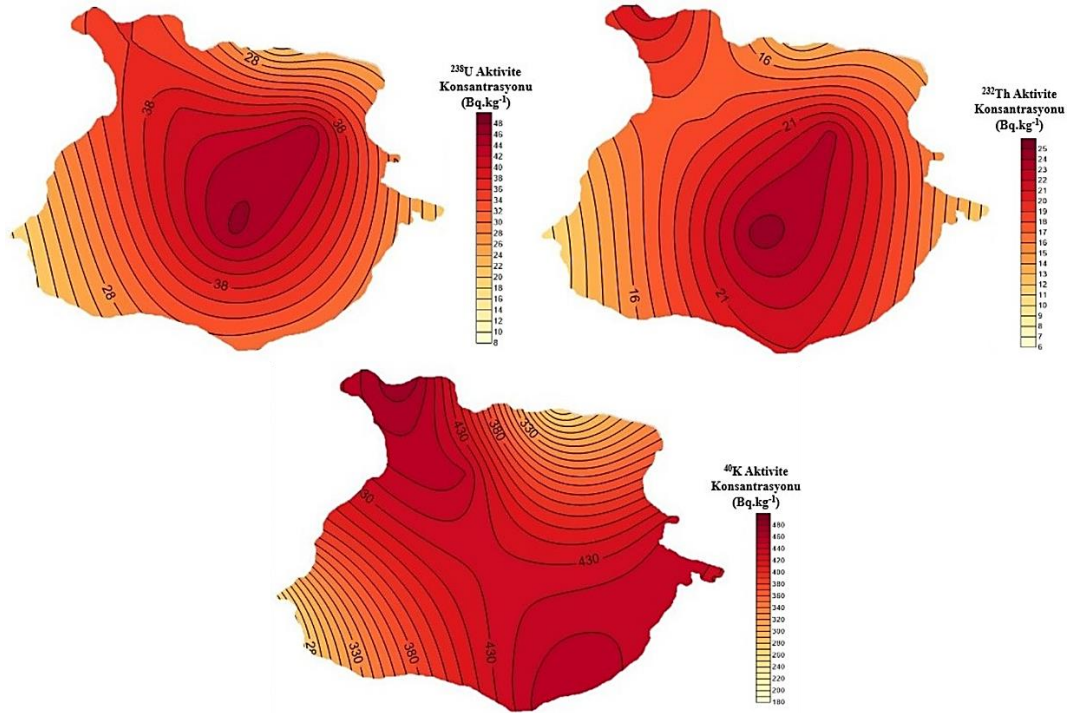
Şekil 4.4: Heybeliada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.

Burgazada bölgesinden toplanan 10 adet toprak ve plaj kumu örneklerinin gama spektroskopi sistemi ile ölçümleri gerçekleştirildikten sonra spektrum analizleri yapılmış, doğal ve yapay çekirdeklerin aktivite konsantrasyon seviyeleri belirlenmiştir (Tablo 4.7). ^{238}U çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite seviyeleri sırasıyla, $9,80 \pm 0,30 \text{ Bq kg}^{-1}$, $46,45 \pm 0,52 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $28,17 \pm 0,42 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. ^{232}Th çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite seviyeleri sırasıyla, $6,34 \pm 0,19 \text{ Bq kg}^{-1}$, $24,53 \pm 0,34 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $16,13 \pm 0,28 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. ^{40}K çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite seviyeleri sırasıyla, $184,34 \pm 3,22 \text{ Bq kg}^{-1}$, $482,62 \pm 4,67 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $383,86 \pm 4,17 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. ^{137}Cs çekirdeğinin minimum, maksimum ve ortalama aktivite seviyeleri sırasıyla, $0,36 \pm 0,04 \text{ Bq kg}^{-1}$, $15,11 \pm 0,21 \text{ Bq kg}^{-1}$ ve $4,19 \pm 0,09 \text{ Bq kg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.7: Burgazada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.

Örnek No	^{238}U Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{232}Th Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{40}K Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)
BA1	11,23 ± 0,30	7,26 ± 0,19	357,79 ± 4,04	0,86 ± 0,05
BA2	29,32 ± 0,43	20,87 ± 0,32	460,92 ± 4,56	15,11 ± 0,21
BA3	46,45 ± 0,52	24,53 ± 0,34	436,70 ± 4,45	4,55 ± 0,11
BA4	45,77 ± 0,52	23,27 ± 0,34	380,75 ± 4,17	7,79 ± 0,15
BA5	40,19 ± 0,48	17,63 ± 0,29	451,18 ± 4,52	0,93 ± 0,05
BA6	21,25 ± 0,38	11,68 ± 0,24	383,27 ± 4,18	0,97 ± 0,05
BA7	9,80 ± 0,32	6,34 ± 0,19	184,34 ± 3,22	0,36 ± 0,04
BA8	36,56 ± 0,47	21,90 ± 0,33	482,62 ± 4,67	2,61 ± 0,09
BA9	18,03 ± 0,35	12,24 ± 0,24	242,57 ± 3,37	0,55 ± 0,04
BA10	23,11 ± 0,39	15,53 ± 0,27	458,49 ± 4,55	8,12 ± 0,15
Minimum	9,80 ± 0,30	6,34 ± 0,19	184,34 ± 3,22	0,36 ± 0,04
Maksimum	46,45 ± 0,52	24,53 ± 0,34	482,62 ± 4,67	15,11 ± 0,21
Ortalama	28,17 ± 0,42	16,13 ± 0,28	383,86 ± 4,17	4,19 ± 0,09

Burgazada bölgesi için doğal radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarına göre oluşturulan aktivite dağılım haritaları Şekil 4.5'te görülmektedir.



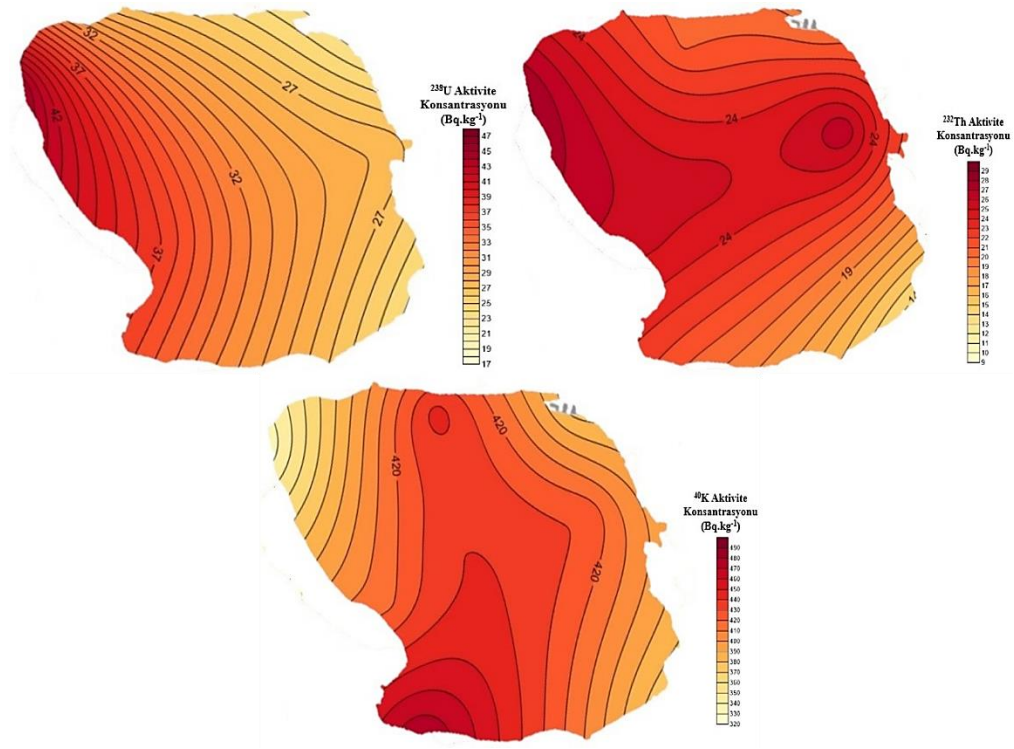
Şekil 4.5: Burgazada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.

Kınalıada bölgesinden toplanan ölçümü ve analizi gerçekleştirilen 9 adet toprak ve plaj kumu örneklerinin her bir doğal ve yapay çekirdek için aktivite konsantrasyon değerleri Tablo 4.8’de yer almaktadır. ^{238}U çekirdeği için aktivite konsantrasyonları $17,77 \pm 0,35 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $46,24 \pm 0,52 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında yer almakta olup, ortalama aktivite seviyesi $29,38 \pm 0,43 \text{ Bq kg}^{-1}$ ’dır. ^{232}Th çekirdeği için aktivite konsantrasyonları $9,67 \pm 0,22 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $28,83 \pm 0,37 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında yer almakta olup, ortalama aktivite seviyesi $22,07 \pm 0,32 \text{ Bq kg}^{-1}$ ’dır. ^{40}K çekirdeği için aktivite konsantrasyonları $327,96 \pm 3,88 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $482,14 \pm 4,66 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında yer almakta olup, ortalama aktivite seviyesi $404,35 \pm 4,28 \text{ Bq kg}^{-1}$ ’dır. ^{137}Cs çekirdeği için aktivite konsantrasyonları ise $0,07 \pm 0,01 \text{ Bq kg}^{-1}$ ile $8,86 \pm 0,16 \text{ Bq kg}^{-1}$ değerleri arasında yer almakta olup, ortalama aktivite seviyesi $4,13 \pm 0,10 \text{ Bq kg}^{-1}$ ’dır.

Tablo 4.8: Kınalıada bölgesinden toplanan örneklerdeki ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdekleri için aktivite konsantrasyonları.

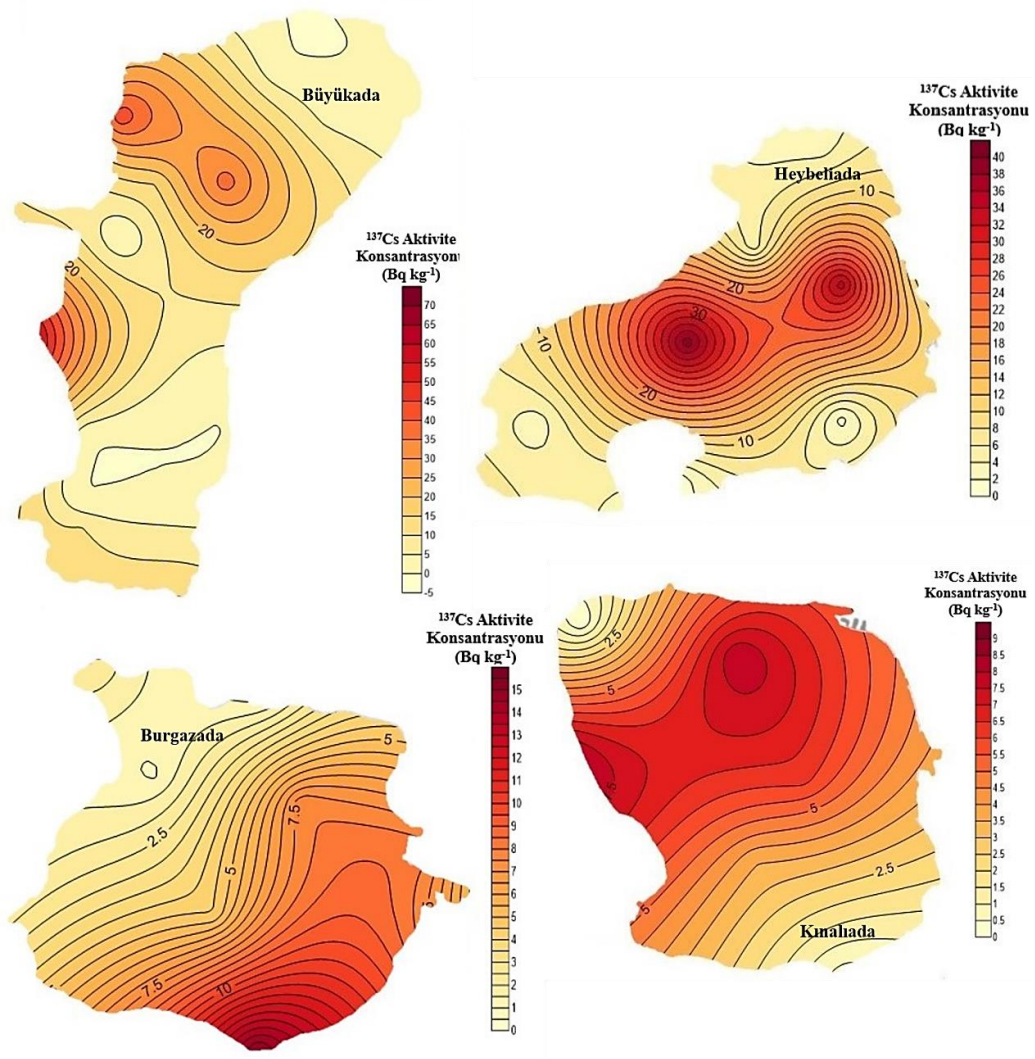
Örnek No	^{238}U Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg^{-1})	^{232}Th Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg^{-1})	^{40}K Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg^{-1})	^{137}Cs Aktivite Konsantrasyonu (Bq kg^{-1})
K1	$27,77 \pm 0,42$	$26,89 \pm 0,36$	$428,14 \pm 4,41$	$4,06 \pm 0,11$
K2	$32,19 \pm 0,45$	$25,32 \pm 0,35$	$439,14 \pm 4,46$	$6,18 \pm 0,13$
K3	$27,39 \pm 0,42$	$20,90 \pm 0,32$	$444,31 \pm 4,48$	$7,97 \pm 0,15$
K4	$22,89 \pm 0,39$	$22,32 \pm 0,33$	$372,48 \pm 4,12$	$0,07 \pm 0,01$
K5	$17,77 \pm 0,35$	$9,67 \pm 0,22$	$358,61 \pm 4,05$	$1,46 \pm 0,06$
K6	$32,08 \pm 0,45$	$20,29 \pm 0,31$	$482,14 \pm 4,66$	$0,16 \pm 0,02$
K7	$36,94 \pm 0,47$	$25,21 \pm 0,35$	$417,18 \pm 4,35$	$3,61 \pm 0,10$
K8	$46,24 \pm 0,52$	$28,83 \pm 0,37$	$327,96 \pm 3,88$	$8,86 \pm 0,16$
K9	$21,18 \pm 0,38$	$19,23 \pm 0,30$	$369,22 \pm 4,10$	$4,81 \pm 0,12$
Minimum	$17,77 \pm 0,35$	$9,67 \pm 0,22$	$327,96 \pm 3,88$	$0,07 \pm 0,01$
Maksimum	$46,24 \pm 0,52$	$28,83 \pm 0,37$	$482,14 \pm 4,66$	$8,86 \pm 0,16$
Ortalama	$29,38 \pm 0,43$	$22,07 \pm 0,32$	$404,35 \pm 4,28$	$4,13 \pm 0,10$

Kınalıada bölgesi için doğal radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarına göre oluşturulan aktivite dağılım haritaları Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.6: Kınalıada bölgesi için ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K doğal radyoaktif çekirdeklerinin aktivite konsantrasyon dağılım haritaları.

Büyükada, Heybeliada, Burgazada ve Kınalıada bölgeleri için antropojenik ^{137}Cs çekirdek konsantrasyonlarına göre oluşturulmuş olan aktivite dağılım haritaları Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7: Büyükada, Heybeliada, Burgazada ve Kınalıada'nın antropojenik çekirdek ^{137}Cs 'nin aktivite konsantrasyonu dağılım haritaları.

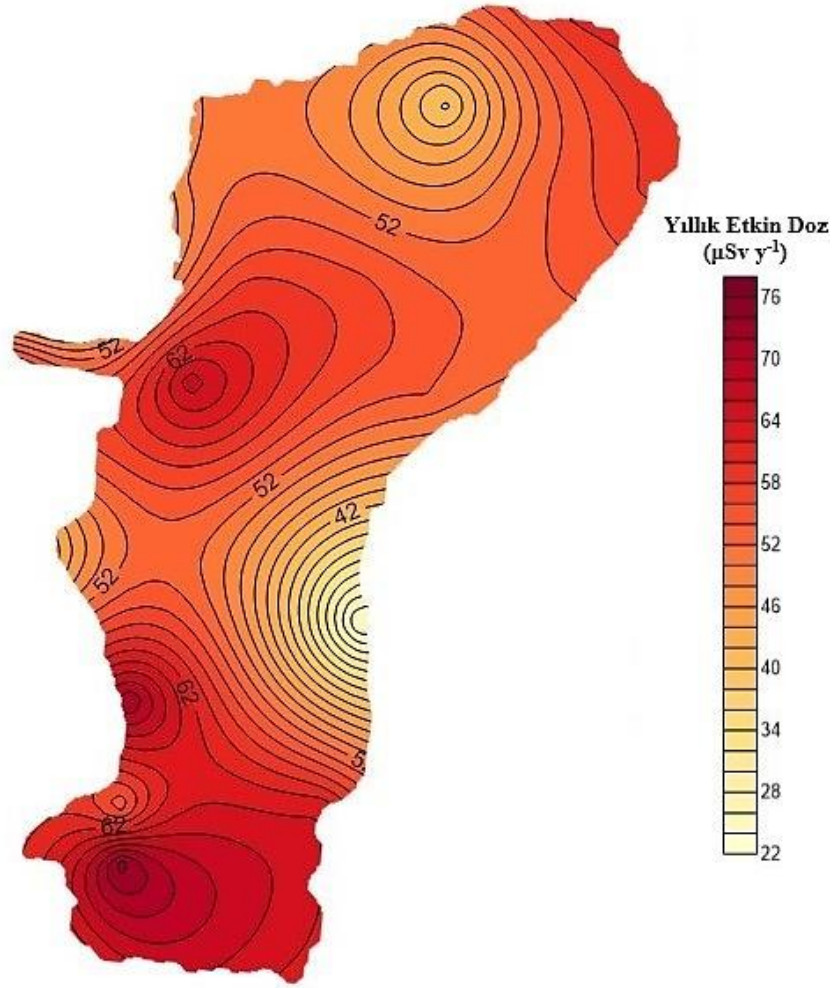
4.2.2. Doz Değerleri

İstanbul Prens Adaları (Büyükada, Heybeliada, Burgazada, Kınalıada) bölgesi için belirlenmiş olan ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs çekirdeklerinin aktivite konsantrasyonlarına bağlı olarak doğal ve yapay olmak üzere absorblanmış doz ve yıllık etkin doz seviyeleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.9'da Büyükada bölgesinde yaşayanlar için maruz kalınan yıllık etkin doz seviyeleri gösterilmekte olup, bu değerlerinden faydalanarak bölgenin doz haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.8).

Tablo 4.9: Büyükada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.

Örnek No	DOĞAL		YAPAY		TOPLAM
	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)
B1	52,73	64,67	0,10	0,13	64,79
B2	48,83	59,89	0,06	0,08	59,97
B3	47,19	57,88	0,26	0,32	58,20
B4	42,87	52,58	0,35	0,43	53,01
B5	31,81	39,01	0,14	0,17	39,18
B6	44,01	53,97	0,31	0,39	54,36
B7	36,60	44,88	0,30	0,37	45,25
B8	35,92	44,05	4,95	6,07	50,12
B9	46,23	56,70	1,75	2,14	58,84
B10	42,10	51,63	4,25	5,21	56,84
B11	41,93	51,42	2,10	2,58	54,00
B12	18,95	23,24	0,04	0,05	23,29
B12 - 2	20,24	24,83	0,09	0,12	24,94
B13	54,87	67,30	0,02	0,02	67,32
B14	51,67	63,37	0,16	0,20	63,56
B15	49,95	61,26	1,82	2,23	63,49
B16	44,60	54,69	1,48	1,82	56,51
B17	44,27	54,30	0,02	0,02	54,32
B18	59,97	73,54	1,24	1,52	75,06
B19	58,62	71,89	0,23	0,28	72,17
B20	23,06	28,28	7,55	9,26	37,53
B21	49,57	60,79	2,44	2,99	63,78
B22	19,07	23,39	0,08	0,10	23,48
Minimum	18,95	23,24	0,02	0,02	23,29
Maksimum	59,97	73,54	7,55	9,26	75,06
Ortalama	41,96	51,46	1,29	1,59	53,04

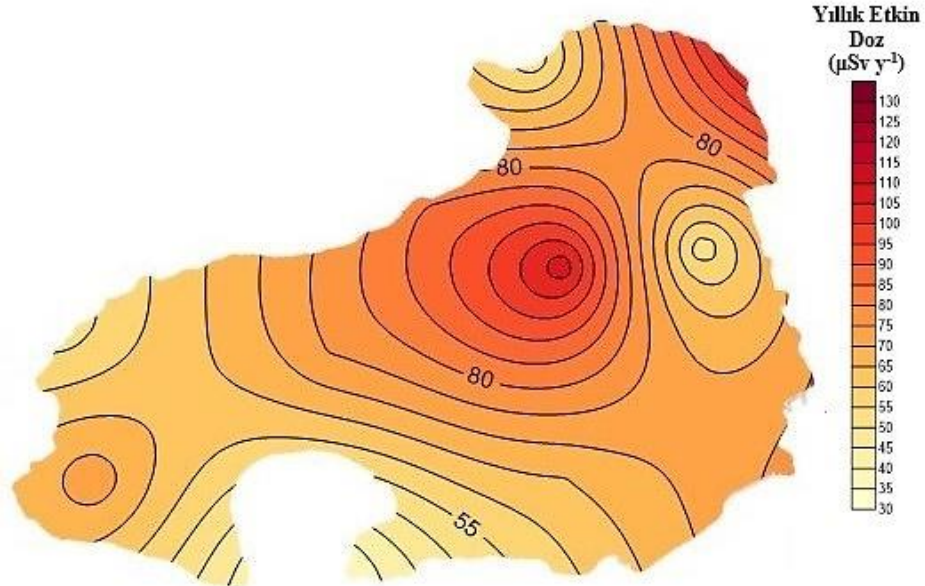


Şekil 4.8: Büyükada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.

Heybeliada bölgesinde yaşayanların maruz kaldığı toplam yıllık etkin doz seviyeleri $\mu\text{Sv y}^{-1}$ biriminde Tablo 4.10'da gösterilmektedir. Bu değerlere göre Heybeliada'nın etkin doz haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.9).

Tablo 4.10: Heybeliada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.

Örnek No	DOĞAL		YAPAY		TOPLAM
	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)
H1	69,29	84,98	0,56	0,68	85,66
H2	56,29	69,04	4,45	5,46	74,50
H3	52,96	64,95	0,14	0,17	65,12
H4	63,68	78,09	1,66	2,04	80,13
H5	48,54	59,53	1,49	1,83	61,36
H6	25,51	31,29	0,15	0,18	31,47
H7	59,59	73,08	0,33	0,41	73,49
H8	46,84	57,44	1,43	1,75	59,19
H9	48,40	59,36	0,42	0,52	59,88
H10	40,70	49,91	0,92	1,13	51,04
H11	84,45	103,56	4,00	4,91	108,47
H12	41,45	50,83	0,60	0,73	51,56
H13	41,42	50,80	0,35	0,43	51,23
H14	105,17	128,98	1,08	1,32	130,30
Minimum	25,51	31,29	0,14	0,17	31,47
Maksimum	105,17	128,98	4,45	5,46	130,30
Ortalama	56,02	68,70	1,26	1,54	70,24

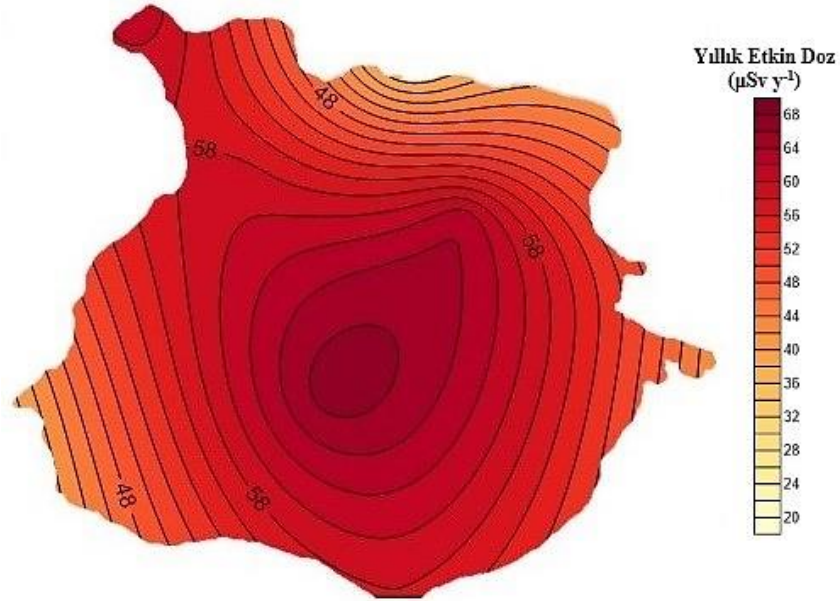


Şekil 4.9: Heybeliada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.

Burgazada bölgesi için absorblanmış doz ve yıllık etkin doz değerleri Tablo 4.11’de gösterilmektedir. Hesaplanan bu değerlere göre bölgenin doz haritası Şekil 4.10’da görülmektedir.

Tablo 4.11: Burgazada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.

Örnek No	DOĞAL		YAPAY		TOPLAM
	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)
BA1	24,49	30,04	0,10	0,12	30,16
BA2	45,37	55,64	1,70	2,08	57,72
BA3	54,48	66,82	0,51	0,63	67,45
BA4	51,08	62,64	0,88	1,08	63,72
BA5	48,03	58,91	0,10	0,13	59,04
BA6	32,86	40,29	0,11	0,13	40,43
BA7	16,04	19,68	0,04	0,05	19,73
BA8	50,25	61,62	0,29	0,36	61,98
BA9	25,84	31,69	0,06	0,08	31,76
BA10	39,18	48,05	0,91	1,12	49,17
Minimum	16,04	19,68	0,04	0,05	19,73
Maksimum	54,48	66,82	1,70	2,08	67,45
Ortalama	38,76	47,54	0,47	0,58	48,11

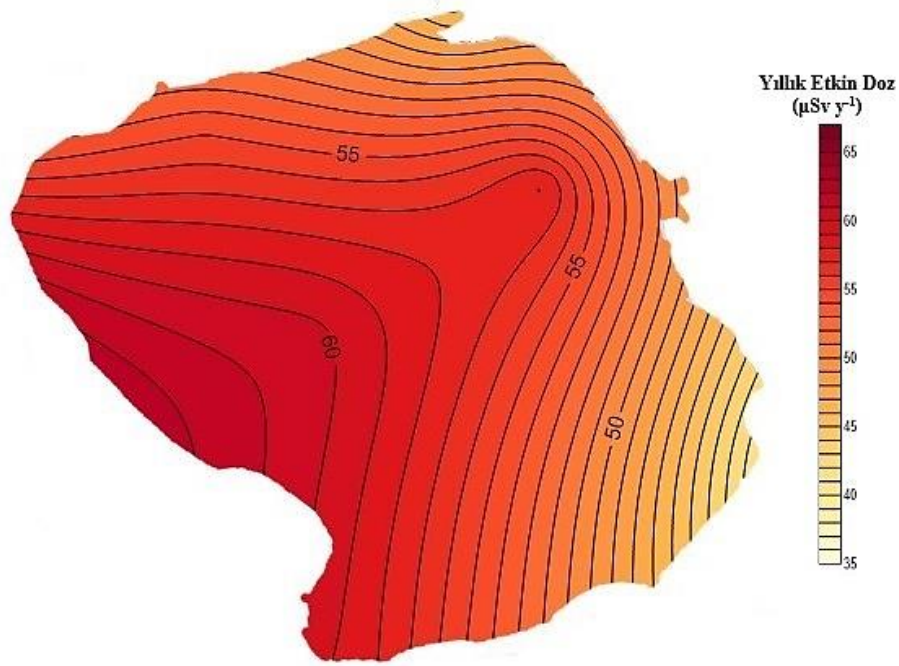


Şekil 4.10: Burgazada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.

Kınalıada bölgesi için absorblanmış ve yıllık etkin doz değerleri Tablo 4.12’de gösterilmektedir. Bu değerlere göre Şekil 4.11’de görüldüğü gibi Kınalıada’nın etkin doz haritası oluşturulmuştur.

Tablo 4.12: Kınalıada bölgesindeki doğal ve yapay çekirdekler için absorblanmış ve yıllık etkin doz seviyeleri.

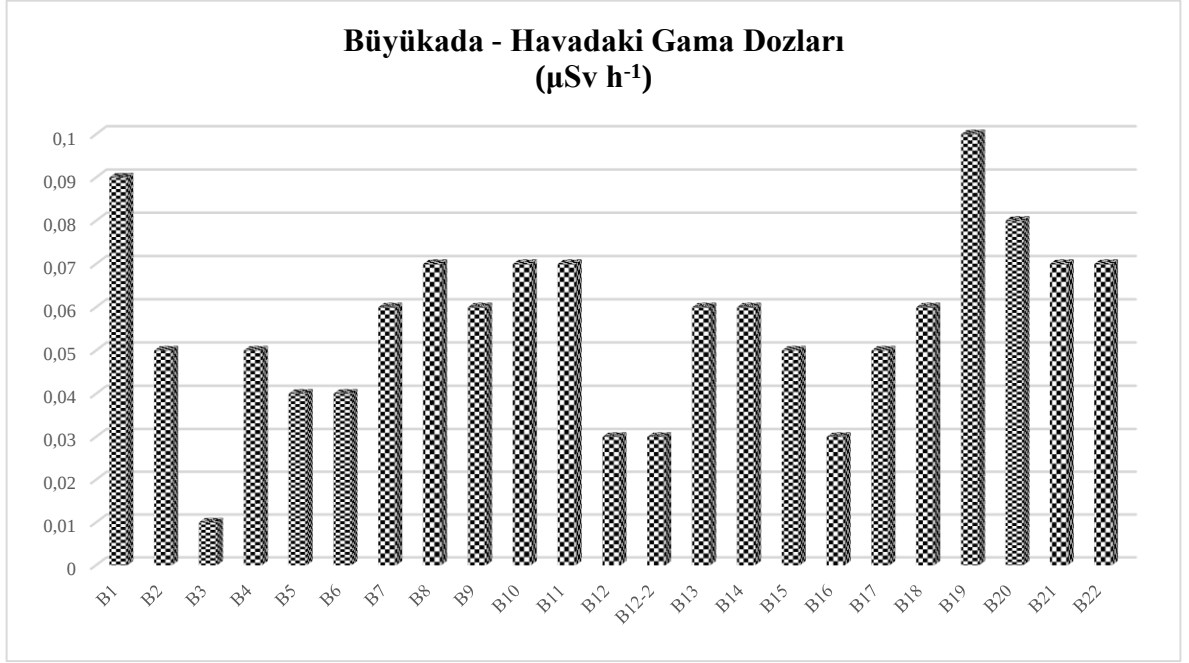
Örnek No	DOĞAL		YAPAY		TOPLAM
	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Absorblanmış Doz (nGy h ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)	Yıllık Etkin Doz (μSv y ⁻¹)
K1	46,92	57,55	0,46	0,56	58,11
K2	48,48	59,45	0,70	0,85	60,31
K3	43,80	53,72	0,90	1,10	54,82
K4	39,59	48,55	0,01	0,01	48,56
K5	29,00	35,57	0,16	0,20	35,77
K6	47,18	57,87	0,02	0,02	57,89
K7	49,69	60,94	0,41	0,50	61,44
K8	52,45	64,32	1,00	1,22	65,55
K9	36,79	45,13	0,54	0,66	45,79
Minimum	29,00	35,57	0,01	0,01	35,77
Maksimum	52,45	64,32	1,00	1,22	65,55
Ortalama	43,77	53,68	0,46	0,57	54,25



Şekil 4.11: Kınalıada bölgesinin yıllık etkin doz haritası.

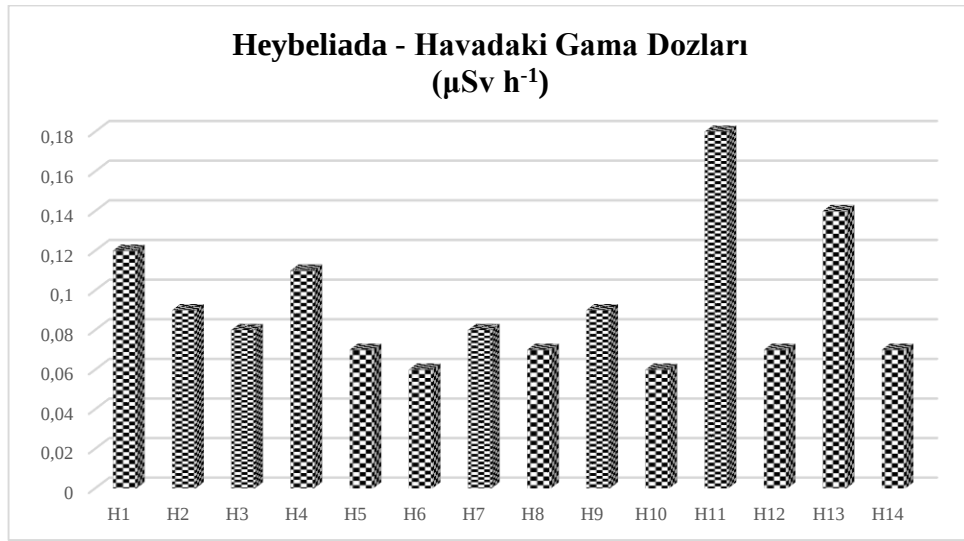
4.3. HAVADAKİ GAMA RADYASYONU ÖLÇÜM SONUÇLARI

Taşınabilir doz ölçer ile İstanbul Prens Adaları bölgesinde toprak ve plaj kumu örneklemelerinin yapıldığı noktalarda (56 adet) gerçekleştirilen havadaki gama radyasyonu ölçümlerinin sonuçları Büyükada için Şekil 4.12’de, Heybeliada için Şekil 4.13’te, Burgazada için Şekil 4.14’te ve Kınalıada için Şekil 4.15’te grafiklendirilmiştir. Bu sonuçlara göre; Büyükada için $0,01 \mu\text{Sv h}^{-1}$ - $0,10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ değerleri arasında ve ortalama $0,057 \mu\text{Sv h}^{-1}$, Heybeliada için $0,06 \mu\text{Sv h}^{-1}$ - $0,18 \mu\text{Sv h}^{-1}$ değerleri arasında ve ortalama $0,092 \mu\text{Sv h}^{-1}$, Burgazada için $0,06 \mu\text{Sv h}^{-1}$ - $0,11 \mu\text{Sv h}^{-1}$ değerleri arasında ve ortalama $0,082 \mu\text{Sv h}^{-1}$, Kınalıada için $0,06 \mu\text{Sv h}^{-1}$ - $0,10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ değerleri arasında ve ortalama $0,079 \mu\text{Sv h}^{-1}$ olduğu görülmektedir (EK. 8).



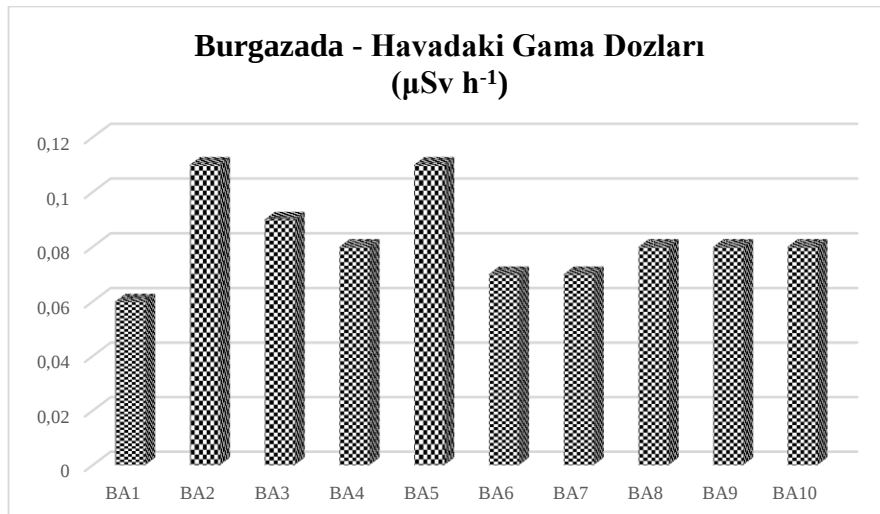
Şekil 4.12: Büyükada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.

Bu ölçümler sonucunda, Büyükada bölgesinde yaşayan insanların karasal radyoaktif çekirdekler ve kozmik ışıklardan kaynaklanmakta olan havadaki gama dozuna yıllık maruziyetlerinin yaklaşık $495,13 \mu\text{Sv y}^{-1}$ olduğu belirlenmiştir.



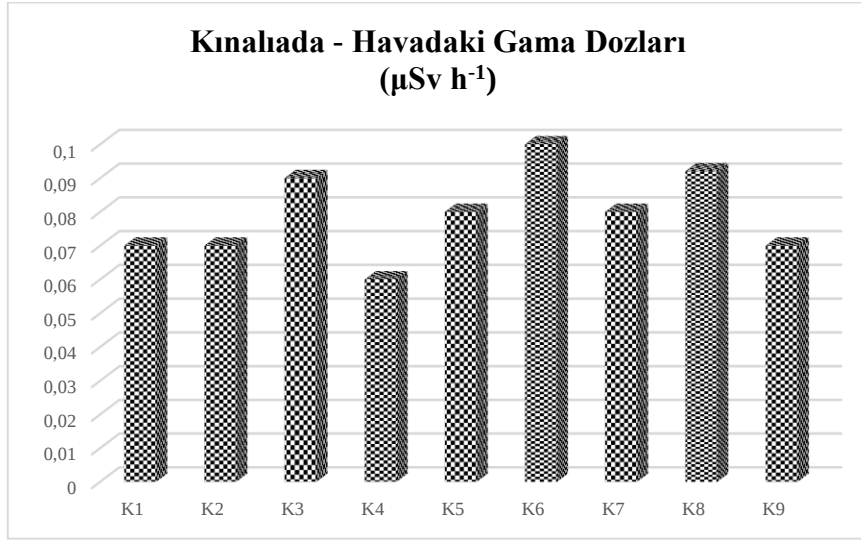
Şekil 4.13: Heybeliada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.

Heybeliada bölgesinde yaşayan insanların, yıllık maruz kaldıkları karasal çekirdekler ve kozmik ışınlardan kaynaklanan havadaki gama dozu seviyesinin yaklaşık $807,17 \mu\text{Sv y}^{-1}$ olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.14: Burgazada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.

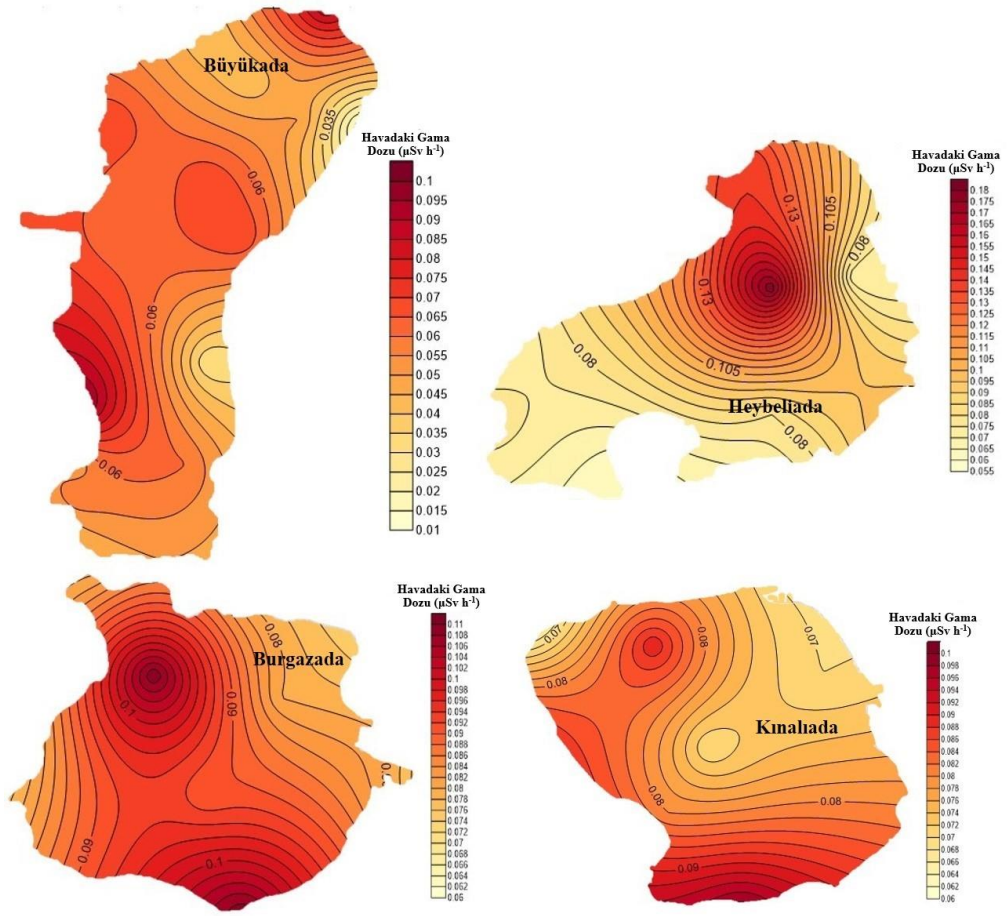
Burgazada’da yaşayan insanların yıllık olarak karasal çekirdekler ve kozmik ışınlar sebebiyle maruz kaldıkları ortalama havadaki gama dozu seviyesi yaklaşık $718,32 \mu\text{Sv y}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.15: Kınalıada bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.

Kınalıada bölgesinde yaşayanların maruz kaldıkları, karasal çekirdekler ve kozmik ışınlardan kaynaklanan, yıllık ortalama havadaki gama dozu seviyesinin $693,01 \mu\text{Sv y}^{-1}$ olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlara göre her bir ada için havadaki gama dozlarının radyolojik doz dağılım haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: Prens Adaları için havadaki gama doz dağılım haritaları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu doktora tez çalışması kapsamında, Marmara Denizi'nde yer alan Prens Adaları'nda en çok tutulan ve tüketilen balık türleri ve kara midyelerdeki ^{210}Po spesifik aktivite konsantrasyonları tayin edilmiştir. Spesifik aktivite konsantrasyon seviyelerine ve bu deniz ürünlerinin tüketim miktarına bağlı olarak tüketildiğinde maruz kalınan yıllık etkin içsel doz değerleri belirlenmiştir.

Dipte ve kayalık bölgelerde yaşayan balık türlerinde tespit edilen, yüzeyde yaşayan balık türlerine göre nispeten daha fazla olan ^{210}Po aktivite konsantrasyonları bu balıkların başta denizlerdeki gıda zincirinin ilk basamağını oluşturan planktonlar olmak üzere ^{210}Po konsantrasyonu yüksek olan organizmalarla beslenmiş olabileceği sonucuna bağlanabilmektedir. Sebebi ise, planktonlar ^{210}Po haricinde çeşitli radyoaktif çekirdekleri vücutlarında tutabilme özelliğine sahip oldukları için biyomonitör olarak kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla planktonlar ile beslenen balık türlerinde biriken ^{210}Po seviyeleri yüzeyde yaşayan, büyük ve yırtıcı balıklardaki ^{210}Po değerlerine göre çok daha yüksektir.

Tablo 5.1: Dünyanın farklı bölgelerinde balık örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilmiş olan ^{210}Po aktivite konsantrasyon verilerinin kıyaslanması [66 – 74].

Bölge		²¹⁰ Po Konsantrasyonu (Bq kg ⁻¹)	
BALIK	Sudan	Yaş ağırlık	0,25 – 6,42
	Suriye	Yaş ağırlık	0,27 – 27,48
	Küba	Yaş ağırlık	5,0 ± 1,0 – 89,0 ± 13,0
	Lübnan	Yaş ağırlık	0,22 ± 0,03 – 62,64 ± 2,68
	Hindistan	Kuru ağırlık	38,3 ± 2,1 – 109,3 ± 5,8
	Suudi Arabistan	Yaş ağırlık	0,1 ± 0,1 – 14,7 ± 0,9
	Kore	Yaş ağırlık	0,51 ± 0,12 – 5,56 ± 1,23
	Kanada	Yaş ağırlık	ND – 9,6 ± 2,1
	Türkiye (İzmir)	Kuru ağırlık	ND – 400,0 ± 9,0
	Türkiye (Bu çalışma)	Kuru ağırlık	1,40 ± 0,41 – 94,02 ± 7,34 (16,23 ± 1,88)

Tablo 5.1'de dünya genelinde farklı türlere sahip balıkların ^{210}Po aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar listelenmiştir. Özellikle Küba ve Hindistan'da elde edilen ^{210}Po konsantrasyon sonuçlarının, bu çalışmada elde edilen minimum ve maksimum aktivite konsantrasyon aralıklarına oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. İzmir

(Türkiye)'deki çalışma sonuçlarına bakıldığında elde edilen maksimum konsantrasyon değeri $400,0 \pm 9,0 \text{ Bq kg}^{-1}$ iken Prens Adaları'nda yapılan çalışmada elde edilen maksimum ^{210}Po konsantrasyon değeri $94,02 \pm 7,34 \text{ Bq kg}^{-1}$ olup, yaklaşık 4 kat daha küçüktür.

Kara midye örneklerindeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonları yüksek seviyelerde gözlemlenmektedir. Bu yüksek konsantrasyon seviyeleri, midyelerin deniz içerisindeki kayalık bölgelere yapışarak yaşaması, denizel yaşamın ilk basamağını oluşturan plankton ve bu gibi organizmalar ile beslenmesi, aynı zamanda deniz suyunu filtre eden omurgasızlar olmasına bağlanabilir. Kolay üreyen ve denizlerde de bol miktarda bulunmakta olan midyeler, denizel ortamda var olan ağır metalleri ve radyoaktif çekirdekleri, özellikle Uranyum doğal serisinin bozunum ürünlerinden ^{210}Po radyoaktif çekirdeğini, yüksek miktarda vücutlarında biriktirip, uzun süre bünyelerinde tutmalarından kaynaklı denizel ortamlardaki kirliliğin başlıca sebepleridir.

Tablo 5.2: Dünyanın farklı bölgelerinde midye örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen ^{210}Po aktivite konsantrasyon verilerinin kıyaslanması [75 – 83].

	Bölge	Tür		^{210}Po Konsantrasyonu (Bq kg^{-1})
MİDYE	Fransa	<i>Mytilus edulis</i>	Kuru ağırlık	$91,7 \pm 6,1 - 421,2 \pm 26,0$
	Slovenya	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Yaş ağırlık	$78,7 \pm 2,6$
	Hırvatistan	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Yaş ağırlık	$22,1 \pm 2,5 - 207,0 \pm 21,0$
	Hindistan	<i>Perna perna</i>	Yaş ağırlık	$78,1 \pm 5,5 - 320,0 \pm 18,1$
	Monako	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Kuru ağırlık	$428,0 - 459,0$
	Kore	<i>Mytilis coruscus</i>	Yaş ağırlık	$42,9 \pm 3,2 - 46,7 \pm 0,7$
	Brezilya	<i>Perna perna</i>	Kuru ağırlık	$1995,0 \pm 363,0$
	Malezya	<i>Perna viridis</i>	Kuru ağırlık	$45,7 \pm 1,17 - 96,4 \pm 2,19$
	Türkiye (Çandarlı Körfezi)	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Kuru ağırlık	$332,0 \pm 17,0 - 776,0 \pm 23,0$
	Türkiye (Bu çalışma)	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Kuru ağırlık	$389,3 \pm 20,3 - 611,5 \pm 25,9$ ($516,1 \pm 25,8$)

Tablo 5.2'de dünya çapında gerçekleştirilen midyelerdeki ^{210}Po aktivite konsantrasyonlarının tespit edilmesi çalışmaları listelenmiştir. Bu çalışmalardan, aynı türde olan midyeler ve kuru ağırlıkları üzerinden gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen ^{210}Po konsantrasyonlarına bakıldığında, Monako ve özellikle Çandarlı Körfezi (Türkiye)'ndeki sonuç

aralıkları ile Prens Adaları'nda midye örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen ^{210}Po konsantrasyon verilerinin birbirine oldukça yakın değerler olduğu görülmektedir.

Prens Adaları'ndan toplanan toprak ve plaj kumu örneklerinde doğal (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) ve yapay (^{137}Cs) radyoaktif çekirdeklerin aktivite seviyeleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar, örnekleme noktalarında taşınabilir gama dedektörü ile ölçülen havadaki gama doz seviyeleri ile kıyaslanmıştır. Belirlenen bu spesifik aktivite değerlerine göre yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanarak, bu bölgelerde yaşayanların sağlığı açısından risk olup olmadığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 5.3: Dünya ve Türkiye'nin farklı bölgelerinde toprak örnekleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ve ^{137}Cs konsantrasyonları ve yıllık etkin doz verilerinin kıyaslanması [7, 27, 84 – 98].

Bölge	Aktivite Konsantrasyonları (Bq kg ⁻¹)				Yıllık Etkin Dozlar (μSv y ⁻¹)
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs	
Rize	85,75	51,08	771,57	236,38	136
Kırklareli	28	40	667	8	87
Trabzon	41	35	437	21	72
Manisa	29	27	340	-	66
Şanlıurfa	20,80	24,95	298,60	9,08	46,90
Gaziantep	25,20	23,70	289,20	8,02	46,90
Adana	17,60	21,10	297,50	6,80	44,00
Kütahya	56,40	25,90	538,40	-	78,70
İran	24,3	25,8	457,7	-	60
Hindistan	46,7	250	429,5	-	240
İspanya	39	41	578	-	49
Japonya	26,40	14,80	581,00	24,50	-
Nijerya	18	22	210	-	40,75
Ürdün	22 - 104	21 - 103	138 - 601	-	40 - 151
Sırbistan	51	53	554	12	-
Slovenya	63	77	800	-	-
Malezya	117	151	622	-	210
UNSCEAR	35	30	400	-	66
Türkiye (Bu çalışma)	33,79	19,32	429,52	8,92	56,66

Tablo 5.3'te dünya çapında karasal radyoaktivite üzerine gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda tespit edilen ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K doğal çekirdekleri ve ^{137}Cs yapay çekirdeğinin ortalama spesifik aktivite konsantrasyonları ve maruz kalınan yıllık etkin doz seviyeleri, Prens Adaları

bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada elde edilen ortalama spesifik aktivite konsantrasyonları ve ortalama yıllık etkin doz seviyeleri ile kıyaslanmıştır.

Birleşmiş Milletler Radyasyon Etkisi Komitesi (UNSCEAR)'nin belirlediği sınır değerler ^{238}U için 35 Bq kg^{-1} , ^{232}Th için 30 Bq kg^{-1} ve ^{40}K için 400 Bq kg^{-1} olup, yıllık etkin doz için $66 \mu\text{Sv y}^{-1}$ 'dir.

Bu çalışmanın sonuçlarını UNSCEAR'ın belirlemiş olduğu sınır değerler ve gerek dünya gerekse Türkiye'de yapılan çalışmalar ile kıyasladığımızda ortalama spesifik aktivite konsantrasyonları ve yıllık etkin doz değerlerinin yüksek olmadığı görülmektedir. Bu sonuç; bu bölgede yaşayan insanlar için bir sorun teşkil etmeyecektir.

Bireysel olarak sonuçlar incelendiğinde her bir çekirdek için yüksek aktivite değerleri de gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ise Prens Adaları'nın kayaç yapısıdır. Bölgenin büyük bir bölümüne Kurtköy formasyonu hakimdir. Bu formasyon granit ve metamorfik kayaç yapısına sahiptir. Bu tür kayaçlar doğal radyoaktif çekirdekler açısından oldukça zengindir.

Havadaki gama radyasyonunun kaynağını topraktaki radyoaktif çekirdekler ve kozmik ışınlar oluşturmaktadır. Havada ölçülen gama radyasyonunun, toprak için belirlenen yıllık etkin doz seviyelerine göre daha yüksek çıkmasının sebebi kozmik ışınlardan gelen katkıdır. Bu katkı ölçüm alınan bölgenin coğrafi yapısına bağlı olup, yüksekliğin fazla olduğu bölgelerde daha fazladır.

Tablo 5.4: Dünya'da ve Türkiye'de havadaki gama radyasyonunun tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışma verileri ile kıyaslanması [14, 85, 99 – 105].

Bölge	Havadaki Gama Dozu (mSv y^{-1})
Artvin	0,214
Trabzon	0,066
Kırklareli	0,144
Çanakkale	1,2
Sudan	0,295
Tayvan	0,25
Hindistan	0,16
Irak	0,45
İran	0,82
Türkiye (Bu çalışma)	0,68

Tablo 5.4’te dünya çapında havadaki gama radyasyonunun tespit edilmesi üzerine yapılan bazı çalışmalar gösterilmektedir. Özellikle toprak yapısında granit yoğunluğu fazla olan Çanakkale bölgesinde yapılan çalışmada havadaki gama dozu seviyesinin $1,2 \text{ mSv y}^{-1}$ olduğu görülmekte olup, Prens Adaları’nda $0,68 \text{ mSv y}^{-1}$ olarak elde edilen ortalama havadaki gama dozu değerinden yaklaşık iki kat daha fazladır.

Prens Adaları bölgesi için, topraktaki doğal ve yapay radyoaktif çekirdeklerin aktivite konsantrasyonları ve yıllık etkin dozlarının belirlenmesiyle oluşturulan radyolojik doz haritaları, havadaki gama radyasyonu doz ölçümleriyle elde edilen radyolojik doz haritaları ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda; toprak ve havadaki gama radyasyonu doz dağılım haritalarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Satheeshkumar, G., et al., 2011, A post-tsunami study on the distribution and bioaccumulation of natural radionuclides in Pichavaram mangrove environment (South East Coast of India) and dose to local human population, *Radiation Protection and Environment*, 34(2), 96 – 103.
- [2]. Norwegian Radiation Protection Authority, 2012, *Polonium-210 and other radionuclides in terrestrial, freshwater and brackish environments*, Report, Norway, ISSN: 0804-4910.
- [3]. Lopez Castillo, E., 2011, *Bioaccumulation of ^{210}Pb and ^{210}Po in fish tissues in a radioactive naturally enhanced area: the Peniscola marsh (Castello, Spain)*, Thesis (BSc), Autonomous University of Barcelona.
- [4]. Kim, S.H., et al., 2017, ^{210}Po in the marine biota of Korean coastal waters and the effective dose from seafood consumption, *Journal of Environmental Radioactivity*, 174, 30 – 37.
- [5]. Alam, L. and Mohamed, C., 2011, Natural radionuclide of ^{210}Po in the edible seafood affected by coal-fired power plant industry in Kapar coastal area of Malaysia, *Environmental Health*, 10(43), 1 – 10.
- [6]. Karahan, G., and Bayulken, A., 2000, Assessment of gamma dose rates around Istanbul (Turkey), *Journal of Environmental Radioactivity*, 47(2): 213 – 221.
- [7]. Sahin, L., et al., 2017, Assessment of radiological hazard parameters due to natural radioactivity in soils from granite – rich regions in Kütahya Province, Turkey, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 53, 212 – 221.
- [8]. Kasumovic, A., et al., 2015, Natural radioactivity and radiation hazards assessment of soil samples from the area of Tuzla and Lukavac, Bosnia and Herzegovina, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 51(3), 469 – 477.
- [9]. Malanca, A. and Gaidolfi, L., 1995, Distribution of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in soils of Rio Grande do Norte (Brazil), *Journal of Environmental Radioactivity*, 30(1), 55 – 67.
- [10]. VandenBygaart, A. and Protz, R., 1999, Gamma radioactivity in podzolic soils of Northern Ontario, Canada, *Journal of Environmental Radioactivity*, 42, 51 – 64.
- [11]. Dragovic, S., et al., 2007, Population doses from terrestrial gamma exposure in Serbia, *Archive of Oncology*, 15(3-4), 78 – 80.
- [12]. Rafique, M., et al., 2013, Radiometric analysis of rock and soil samples of Leepa Valley; Azad Kashmir, Pakistan, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 298(3), 2049 – 2056.
- [13]. Tereesh, M., et al., 2012, Terrestrial radioactivity of the Jabal Eghei area in southern Libya and assessment of the associated environmental risks, *Radiation Protection Dosimetry*, 153(4), 1 – 10.

- [14]. Kurnaz, A., et al., 2011, Radiological maps for Trabzon, Turkey, *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 393 – 399.
- [15]. Merita, X., 2013, *New gamma-ray spectrometry methods for estimating K, U, Th concentrations in rocks of the Sardinia batholith*, Thesis (PhD), University of Sassari.
- [16]. Martin, B., 2006, *Nuclear and particle physics: An introduction*, 1st ed., Wiley, England, ISBN: 0-470-01999-9.
- [17]. L' Annunziata, M., 2007, *Radioactivity: Introduction and history*, 1st ed., Elsevier science, Amsterdam, The Netherlands, ISBN: 978-0-444-52715-8.
- [18]. L' Annunziata, M., 1998, *Handbook of radioactivity analysis*, 1st ed., Academic press, California, USA, ISBN: 0-12-436255-9.
- [19]. Lieser, K., 1997, *Nuclear and radiochemistry: Fundamentals and applications*, 1st ed., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, ISBN: 3-527-29453-8.
- [20]. Santawamaitre, T., 2012, *An evaluation of the level of naturally occurring radioactive materials in soil samples along the Chao Phraya River basin*, Thesis (PhD), University of Surrey.
- [21]. Magill, J. and Galy, J., 2004, *Radioactivity Radionuclides Radiation*, 1st ed., Springer, Germany, ISBN: 3-540-21116-0.
- [22]. Zhang, W. et al., 2016, The processes of three natural decay series in underground strata and their common characteristics, *EDJE*, 21 (2), 709 – 721.
- [23]. Ağgez, G., 2017, *Türkiye’de yetişen tütünlerdeki radyoaktif çekirdek konsantrasyonlarının ölçülmesi*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi.
- [24]. Brownell, L., 1961, *Radiation uses in industry and science*, United States Atomic Energy Commission, The University of Michigan.
- [25]. Lilley, J., 2001, *Nuclear Physics: Principles and Applications*, 1st ed., Wiley, England, ISBN: 0-471-97936-8.
- [26]. United Nations Environment Programme, 2016, *Radiation effects and sources: What is radiation? What does radiation do to us? Where does radiation come from?*, United Nations, Austria, ISBN: 978-92-807-3517-8.
- [27]. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 2000, *Sources and effects of ionizing radiation – Annex B*, United Nations, New York, ISBN: 92-1-142238-8.
- [28]. Cottingham, W. and Greenwood, D., 2001, *An introduction to nuclear physics*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, ISBN: 0-521-65733-4.
- [29]. Wahl, L., 2010, Environmental radiation, *Health physics society*, Fact sheet, 1-6.

- [30]. Schön, J., 2011, *Physical properties of rocks*, 1st ed., Elsevier, Austria, ISBN: 9780444537966.
- [31]. Persson, B., 2014, ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in the terrestrial environment, *Current advances in environmental science*, 2, 22-37.
- [32]. Özden, B., 2009, *Gediz Havzası tarım yapılan ve yapılmayan alanlarda erozyon hızının radyoaktif kurşun dağılımından belirlenmesi*, Tez (Doktora), Ege Üniversitesi.
- [33]. NuDat database version 2.7, <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/chartNuc.jsp>, [Ziyaret tarihi: 12.11.2018].
- [34]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/06.pdf>, [Ziyaret tarihi: 04.11.2018].
- [35]. Knoll, G., 2000, *Radiation detection and measurement*, 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- [36]. Cember, H. and Johnson, T., 2009, *Introduction to health physics*, 4th ed., McGraw-Hill Companies Inc., New York, USA, ISBN: 978-0-07-142308-3.
- [37]. Johansson, L., 2008, *Determination of Pb-210 and Po-210 in aqueous environmental samples*, Thesis (PhD), Leibniz University.
- [38]. Leo, W., 1994, *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, 2nd ed., Springer-Verlag, Germany, ISBN: 3-540-57280-5.
- [39]. Tyler, A., 1994, *Environmental influences on gamma ray spectrometry*, Thesis (PhD), University of Glasgow.
- [40]. Değerlier, M., 2007, *Adana ili ve çevresinin çevresel doğal radyoaktivitesinin saptanması ve doğal radyasyonların yıllık etkin doz eşdeğerinin bulunması*, Tez (Doktora), Çukurova Üniversitesi.
- [41]. Arıcı, T., 2012, *Gama ışını spektroskopisi için bir hibrid dedektör sisteminin kurulumu ve karakterizasyonu*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi.
- [42]. Parmaksız, A., 2004, *Gama spektrometrik yöntem ile fosfojipsteki ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K aktivitelerinin ölçülmesi*, Tez (Yüksek Lisans), Gazi Üniversitesi.
- [43]. Lenntech BV, <https://www.lenntech.com/periodic/elements/ge.htm>, [Ziyaret tarihi: 18.11.2018].
- [44]. Royal Society of Chemistry, <http://www.rsc.org/periodic-table/element/32/germanium>, [Ziyaret tarihi: 18.11.2018].
- [45]. Baykal, S., 2007, *Yeni tip gama dedektörleri ve iz sürme tekniği*, Tez (Yüksek Lisans), Ankara Üniversitesi.
- [46]. Garipağaoğlu, N. ve Özcan, S., 2016, İstanbul Adaları'nın mekan-kıyı yönetimi ve sürdürülebilirlik kapsamında planlanması, *Marmara Coğrafya Dergisi*, 33, 215 - 240.

- [47]. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İmar ve Şehircilik Daire Başkanlığı, Şehir Planlama Müdürlüğü, 2010, *1/5000 ölçekli Adalar koruma amaçlı nazım imar raporu*, Cilt 1, Cilt2, İstanbul.
- [48]. Koca, C., 2013, Prens Adaları'nın ekolojik özelliklerinin korunması, *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 6 (1), 38 – 41.
- [49]. <http://www.adalar.gov.tr/genel-bilgiler>, [Erişim tarihi: 10 Kasım 2018].
- [50]. Gülşen, H., 2007, *Beykoz-Kadıköy-Tuzla (İstanbul) bölgesinin hidrojeoloji incelemesi*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi.
- [51]. Uslu, O., 2002, *Akbaba-Mahmut Şevket Paşa bölgesinin jeoloji ve yapısal özellikleri*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [52]. Özgül, N., İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2011, *İstanbul il alanının jeolojisi*, Rapor.
- [53]. Sismoteknik Zemin ve Deprem Mühendisliği, 2016, *Sondaja dayalı zemin ve temel etüt raporu*, Rapor.
- [54]. Ortec, 2014, *Alpha Duo, Alpha Mega and Alpha Ensemble Integrated Alpha Spectrometer Hardware User's Manual*, U.S.A., 932505.
- [55]. Ugur, A. and Yener, G., 2009, Determination of lead-210 and polonium-210 in marine environment, *New Techniques for the Detection of Nuclear and Radioactive Agents*, Springer Science, ISBN: 978-1-4020-9598-6.
- [56]. International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2012, *ICRP Publication 119 – Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60*, Canada, ISBN: 978-1-4557-5430-4.
- [57]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2017, *Su Ürünleri Haber Bülteni*, Ankara, Sayı: 27669.
- [58]. Diaz-Frances, I. et al., 2013, Evaluation of the Amount of ²¹⁰Po Ingested by the Spanish Population and its Relation to their Diet Habits, *IAEA-INIS*, 46 (37), 87 – 91.
- [59]. Ortec, 2004, *Dspec jr 2.0™ Digital Gamma-Ray Spectrometer Hardware User's Manual*, U.S.A., 931010.
- [60]. Al-Sulaiti, H., 2011, *Determination of natural radioactivity levels in the state of Qatar using high-resolution gamma-ray spectrometry*, Thesis (PhD), University of Surrey.
- [61]. El-Sayed, N., 2014, *Studying of naturally occurring radionuclides for some environmental samples and its hazardous effects*, Thesis (MSc), Fayoum University.
- [62]. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 1993, *Exposure from natural sources of radiation*, United Nations, New York, ISBN: 92-1-142200-0.

- [63]. Baykara, O., et al., 2011, Assessments of natural radioactivity and radiological hazards in construction materials used in Elazig, Turkey, *Radiation Measurements*, 46, 153 – 158.
- [64]. Ludlum Measurements, Inc., 2015, *Ludlum Model 2241 Survey Meter*, Technical Manual, Texas, 238822.
- [65]. Ludlum Measurements, Inc., 2012, *Ludlum Model 44-10 Gamma Scintillator*, Technical Manual, Texas, PR107232.
- [66]. Hassona, R.K., et al., 2008, Assessment of committed effective dose due to consumption of Red Sea coral reef fishes collected from the local market (Sudan), *Science of the Total Environment*, 393, 214 – 218.
- [67]. Al-Masri, M.S., et al., 2000, ^{210}Po and ^{210}Pb concentrations in fish consumed in Syria, *Journal of Environmental Radioactivity*, 49, 345 – 352.
- [68]. Alonso-Hernandez, C., et al., 2002, ^{137}Cs and ^{210}Po dose assessment from marine food in Cienfuegos Bay (Cuba), *Journal of Environmental Radioactivity*, 61, 203 – 211.
- [69]. El Samad, O., et al., 2010, Activity Concentrations of Polonium-210 and Lead-210 in Lebanese Fish, *Lebanese Science Journal*, 11, 39 – 45.
- [70]. Musthafa, M.S. and Krishnamoorthy, R., 2011, Assessment of committed effective dose to human beings due to consumption of fishes collected from Pulicat Lagoon, south east of India, *Radiation Protection and Environment*, 34, 110 – 113.
- [71]. Ababneh, Z.Q., et al., 2018, Assessment of the committed effective dose due to the ^{210}Po intake from fish consumption for the Arabian Gulf population, *Chemosphere*, 210, 511 – 515.
- [72]. Kim, S.H., et al., 2017, ^{210}Po in the marine biota of Korean coastal waters and the effective dose from seafood consumption, *Journal of Environmental Radioactivity*, 174, 30 – 37.
- [73]. Chen, J., et al., 2016, A study on the levels of radioactivity in fish samples from the experimental lakes area in Ontario, Canada, *Journal of Environmental Radioactivity*, 153, 222 – 230.
- [74]. Aközcan, S. and Uğur, A., 2013, Activity levels of ^{210}Po and ^{210}Pb in some fish species of the İzmir Bay (Aegean Sea), *Marine Pollution Bulletin*, 66, 234 – 238.
- [75]. Connan, O., et al., 2007, Variations of ^{210}Po and ^{210}Pb in various marine organisms from Western English Channel: contribution of ^{210}Po to the radiation dose, *Journal of Environmental Radioactivity*, 97, 168 – 188.
- [76]. Strok, M. and Smodis, B., 2011, Levels of ^{210}Po and ^{210}Pb in fish and molluscs in Slovenia and the related dose assessment to the population, *Chemosphere*, 82, 970 – 976.
- [77]. Rozmaric, M., et al., 2012, ^{210}Po and ^{210}Pb activity concentrations in *Mytilus galloprovincialis* from Croatian Adriatic coast with the related dose assessment to the coastal population, *Chemosphere*, 87, 1295 – 1300.

- [78]. Macklin Rani, L., et al., 2014, Estimation of Polonium – 210 activity in marine and terrestrial samples and computation of ingestion dose to the public in and around Kanyakumari coast, India, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7, 207 – 213.
- [79]. McDonald, P., et al., 1986, Polonium – 210 in mussels and its implications for environmental alpha – autoradiography, *Journal of Environmental Radioactivity*, 3, 293 – 303.
- [80]. Cho, B., et al., 2016, Annual Effective Dose of ^{210}Po from Sea Food Origin (Oysters and Mussels) in Korea, *Journal of Radiation Protection and Research*, 41, 245 – 252.
- [81]. Gouvea, R.C., et al., 1992, Lead – 210 and polonium – 210 concentrations in some species of marine molluscs, *Science of The Total Environment*, 112, 263 – 267.
- [82]. Lubna, A., et al., 2011, A study on the Activity Concentrations of Po – 210 in the Marine Environment of the Kappar Coastal area, *Journal of Tropical Marine Ecosystem*, 1, 1 – 8.
- [83]. Aközcan, S., 2013, Levels of ^{210}Po and ^{210}Pb in mussel and sediments in Candarli Gulf and the related dose assessment to the coastal population, *Marine Pollution Bulletin*, 73, 11 – 15.
- [84]. Dizman, S., et al., 2016, Determination of radioactivity levels of soil samples and the excess of lifetime cancer risk in Rize province, Turkey, *International Journal of Radiation Research*, 14, 237 – 244.
- [85]. Taskin, H., et al., 2009, Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey, *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, 49 – 53.
- [86]. Ereeş, F.S., et al., 2006, Assessment of dose rates around Manisa (Turkey), *Radiation Measurements*, 41, 598 – 601.
- [87]. Bozkurt, A., et al., 2007, Assessment of environmental radioactivity for Sanliurfa region of southeastern Turkey, *Radiation Measurements*, 42, 1387 – 1391.
- [88]. Osmanlioglu, A.E., 2007, Assessment of background radioactivity level for Gaziantep region of southeastern Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 124, 407 – 410.
- [89]. Degerlier, M., et al., 2008, Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1018 – 1025.
- [90]. Kardan, M.R., et al., 2017, A national survey of natural radionuclides in soils and terrestrial radiation exposure in Iran, *Journal of Environmental Radioactivity*, 178 – 179, 168 – 176.
- [91]. Gusain, G.S., et al., 2012, Distribution of terrestrial gamma radiation dose rate in the eastern coastal area of Odisha, India, *Radiation Protection Dosimetry*, 152, 42 – 45.

- [92]. Quindos, L.S., et al., 1994, Natural radioactivity in Spanish soils, *Health Physics*, 66, 194 – 200.
- [93]. Chikasawa, K., et al., 2001, Terrestrial Gamma Radiation in Kochi Prefecture, Japan, *Journal of Health Science*, 47, 362 – 372.
- [94]. Agbalagba, E.O. and Onoja, R.A., 2011, Evaluation of natural radioactivity in soil, sediment and water samples of Niger Delta (Biseni) flood plain lakes, Nigeria, *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 667 – 671.
- [95]. Al – Jundi, J., et al., 2003, Natural radioactivity concentrations in soil samples along the Amman Aqaba Highway, Jordan, *Radiation Measurements*, 36, 555 – 560.
- [96]. Bikit, I., et al., 2005, Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro), *Journal of Environmental Radioactivity*, 78, 11 – 19.
- [97]. Kovacs, T., et al., 2013, Systematic survey of natural radioactivity of soil in Slovenia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 122, 70 – 78.
- [98]. Gabdo, H.T., et al., 2015, Radiological hazard associated with natural radionuclide concentrations in the northern part of Pahang State Malaysia, *Environmental Earth Sciences*, 73, 6271 – 6281.
- [99]. Kobya, Y., et al., 2015, Evaluation of Outdoor Gamma Dose Rate and Cancer Risk in Artvin Province, Turkey, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 21, 2077 – 2085.
- [100]. Cetiner, M.A., et al., 2011, High background radiation areas at Çanakkale in Turkey, *Radiation Physics and Chemistry*, 80, 704 – 709.
- [101]. Khatir Sam, A., et al., 1997, Assessment of terrestrial gamma radiation in Sudan, *Radiation Protection Dosimetry*, 71, 141 – 145.
- [102]. Lin, Y.M., et al., 1996, Natural background radiation dose assessment in Taiwan, *Environment International*, 22, 45 – 48.
- [103]. Karunakara, N., et al., 2014, Assessment of ambient gamma dose rate around a prospective uranium mining area of South India – A comparative study of dose by direct methods and soil radioactivity measurements, *Results in Physics*, 4, 20 – 27.
- [104]. Marouf, B.A., et al., 1993, Assessment of exposure rate and collective effective dose equivalent in the city of Baghdad due to natural gamma radiation, *Science of The Total Environment*, 133, 133 – 137.
- [105]. Saghatchi, F., et al., 2008, Assessment of annual effective dose due to natural gamma radiation in Zanzjan (Iran), *Radiation Protection Dosimetry*, 132, 346 – 349.

EKLER

EK 1. Uranyum serisindeki çekirdeklerin bozunum modları ve enerjileri [22].

Çekirdek	Sembol	Yarı Ömrü	Alfa (MeV)	Beta (MeV)	Gama (MeV)
Uranyum	²³⁸ U	$4,5 \times 10^9$ y	4,2	-	0,048
Toryum	²²⁴ Th	24,1 gün	-	0,19	0,09
Protaktinyum	²³⁴ Pa ^m	1,17 dk	-	2,29	1,0
Uranyum	²³⁴ U	$2,5 \times 10^5$ y	4,8	-	0,05
Toryum	²³⁰ Th	$7,7 \times 10^4$ y	4,8	-	0,068
Radyum	²²⁶ Ra	1600 y	4,8	-	0,186
Radon	²²² Rn	3,82 gün	5,49	-	0,5
Polonyum	²¹⁸ Po	3,05 dk	6,00	-	-
Kurşun	²¹⁴ Pb	26,8 dk	-	0,65	0,24
Bizmut	²¹⁴ Bi	19,9 dk	5,5	0,15	0,61
Polonyum	²¹⁴ Po	164 μ s	7,7	-	0,8
Kurşun	²¹⁰ Pb	22,3 y	-	0,016	0,046
Bizmut	²¹⁰ Bi	5 gün	-	1,16	-
Polonyum	²¹⁰ Po	138 gün	5,30	-	0,80
Kurşun	²⁰⁶ Pb		Kararlı		

EK 2. Toryum serisindeki çekirdeklerin bozunum modları ve enerjileri [22].

Çekirdek	Sembol	Yarı Ömrü	Alfa (MeV)	Beta (MeV)	Gama (MeV)
Toryum	²³² Th	$1,40 \times 10^{10}$ y	4,00	-	0,06
Radyum	²²⁸ Ra	5,8 y	-	0,054	-
Aktinyum	²²⁸ Ac	6,13 sa	-	1,11	0,09
Toryum	²²⁸ Th	1,91 y	5,43	-	0,08
Radyum	²²⁴ Ra	3,7 gün	5,68	-	0,24
Radon	²²⁰ Rn	55,6 s	6,29	-	-
Polonyum	²¹⁶ Po	145 ms	6,78	-	-
Kurşun	²¹² Pb	10,6 sa	-	0,36	0,238
Bizmut	²¹² Bi	60,6 dk	6,05	2,20	0,04
Polonyum	²¹² Po	300 ns	8,78	-	-
Talyum	²⁰⁸ Tl	3,1 dk	-	1,79	2,62
Kurşun	²⁰⁸ Pb		Kararlı		

EK 3. Aktinyum serisindeki çekirdeklerin bozunum modları ve enerjileri [22].

Çekirdek	Sembol	Yarı Ömrü	Alfa (MeV)	Beta (MeV)	Gama (MeV)
Uranyum	²³⁵ U	$7,0 \times 10^8$ y	4,38	-	0,185
Toryum	²³¹ Th	25,5 sa	-	0,30	0,25
Protaktinyum	²³¹ Pa	$3,3 \times 10^4$ y	5,06	-	Birden fazla
Aktinyum	²²⁷ Ac	21,8 y	4,95	0,046	Birden fazla
Toryum	²²⁷ Th	18,7 gün	6,04	-	Birden fazla
Radyum	²²³ Ra	11,4 gün	5,86	-	Birden fazla
Radon	²¹⁹ Rn	4 s	6,82	-	0,27
Polonyum	²¹⁵ Po	178 ms	7,38	-	-
Kurşun	²¹¹ Pb	36,1 dk	-	1,36	0,83
Bizmut	²¹¹ Bi	2,15 dk	6,62	0,59	0,35
Talyum	²⁰⁷ Tl	4,79 dk	-	1,44	2,90
Kurşun	²⁰⁷ Pb		Kararlı		

EK 4. Büyükkada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.

Örnek No	Mahalle Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)
B1	Gülistan Caddesi (Sahil)	40,87486	29,13338	2
B2	Deniz Kulübü Sokak	40,87142	29,13851	2
B3	Yılmaz Türk Caddesi	40,86718	29,13571	22
B4	Mimozalı Sokak	40,8675	29,13174	69
B5	Çarkıfelek Caddesi - 1	40,87027	29,12867	36
B6	23 Nisan Caddesi (Sahil)	40,87386	29,12574	4
B7	Hamlacı Sokak	40,87007	29,11556	12
B8	Türkoğlu Sokak Kırsalı	40,86755	29,11954	107
B9	Aşıklar Yolu - 1	40,86368	29,12165	96
B10	Çarkıfelek Caddesi - 2	40,86366	29,12573	122
B11	Yılmaz Türk Caddesi - Küçük Tur Yolu Kavşağı	40,85992	29,12797	27
B12	Kartal Belediyesi Sosyal Tesisleri (Sahil)	40,85187	29,12571	0
B12 - 2	Kartal Belediyesi Sosyal Tesisleri (Sediment)	40,85187	29,12571	-1 (deniz içerisinden)
B13	Çarkıfelek Caddesi - Aşıklar Yolu Kavşağı	40,8604	29,11961	86
B14	Büyük Tur Yolu Sokak - 1	40,84527	29,12435	30
B15	Büyük Tur Yolu Sokak - 2	40,83897	29,12291	30
B16	Büyük Tur Yolu Sokak - 3	40,83941	29,1141	41
B17	Aya Yorgi Klisesi Sırtı - 1	40,84532	29,11716	124
B18	Aya Yorgi Klisesi Sırtı - 2	40,84328	29,11719	151
B19	Aya Yorgi Klisesi Sırtı - 3	40,84905	29,11744	141
B20	Büyük Tur Yolu Sokak - 4	40,85439	29,1138	65
B21	Yörükali Sokak	40,86034	29,11322	15
B22	Kırlangıç Sokak - Nizam Koyu (Sahil)	40,86433	29,11537	0

EK 5. Heybeliada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.

Örnek No	Mahalle Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)
H1	Refah Şehitleri Caddesi - 1	40,87805	29,0899	44
H2	Refah Şehitleri Caddesi - 2	40,87509	29,08781	67
H3	Refah Şehitleri Caddesi - 3	40,87271	29,0926	75
H4	Refah Şehitleri Caddesi - 4	40,8715	29,09759	57
H5	Çam Limanı Yolu Sokak Kavşağı	40,86975	29,09366	34
H6	Çam Limanı Yolu Sokak - 1	40,87089	29,08766	0
H7	Çam Limanı Yolu Sokak - 2 (Sahil)	40,87263	29,08319	43
H8	Alp Görüngen Yolu Sokak - 1	40,86987	29,0797	40
H9	Alp Görüngen Yolu Sokak - 2	40,87223	29,0771	52
H10	Alp Görüngen Yolu Sokak - 3	40,87576	29,08254	48
H11	Alp Görüngen Yolu Sokak - 4	40,87692	29,0926	84
H12	Dibektaş Sokak	40,8773	29,09536	39
H13	Müsteci Onbaşı Sokak	40,8811	29,092	22
H14	Yalı Rıhtım Caddesi	40,88185	29,0972	51
	Zeybek Sokak - Kırçıçeği Sokak Kavşağı			

EK 6. Burgazada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.

Örnek No	Mahalle Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)
BA1	Adalar Su Sporları Kulübü (Sahil)	40,87907	29,07136	0
BA2	Barbaros Hayrettin Caddesi	40,87484	29,06328	62
BA3	Bayraktar Sokak	40,87875	29,06205	111
BA4	Büyük Çamlık Yolu - Bayraktar Sokak Kavşağı	40,882	29,06452	83
BA5	Bayraktar Sokak - Çiçekli Yalı Sokak Kavşağı	40,88275	29,06034	76
BA6	Kalpazankaya Yolu Sokak	40,88095	29,05497	21
BA7	Kalpazankaya Plajı (Sahil)	40,87811	29,05288	0
BA8	Cennet Yolu Sokak	40,88608	29,05842	29
BA9	Gezinti Caddesi (Sahil)	40,88514	29,06347	0
BA10	Mezarlık Sokak - Takınmağa Sokak Kavşağı	40,88071	29,06824	13

EK 7. Kınalıada bölgesinde toprak, plaj kumu örneklemelerinin ve havadaki gama dozu ölçümlerinin yapıldığı noktaların koordinat ve yükseklik bilgileri.

Örnek No	Mahalle Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)
K1	Şükrü Gülemin Sokak	40,91059	29,05175	52
K2	Çınar Sokak	40,90812	29,04797	73
K3	İsmailpaşa Sokak - Tefrikiye Sokak Kavşağı	40,91153	29,04615	75
K4	Kınalı Hamam Sokak	40,91241	29,04189	50
K5	Vatan Sokak (Sahil)	40,90586	29,05667	1
K6	Heybetli Sokak	40,90269	29,04909	6
K7	Terzi Dimitri Sokak - 1	40,90595	29,04664	20
K8	Terzi Dimitri Sokak - 2	40,90861	29,04122	6
K9	Fazıl Ahmet Aykaç Sokak - Akasya Caddesi	40,91351	29,05023	26

EK 8. İstanbul Prens Adaları bölgesi için havadaki gama radyasyonu seviyeleri.

Havadaki Gama Doz Seviyeleri ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)							
Büyükada		Heybeliada		Burgazada		Kınalıda	
Örnek No		Örnek No		Örnek No		Örnek No	
B1	0,09	H1	0,12	BA1	0,06	K1	0,07
B2	0,05	H2	0,09	BA2	0,11	K2	0,07
B3	0,01	H3	0,08	BA3	0,09	K3	0,09
B4	0,05	H4	0,11	BA4	0,09	K4	0,06
B5	0,04	H5	0,07	BA5	0,10	K5	0,08
B6	0,04	H6	0,06	BA6	0,07	K6	0,10
B7	0,06	H7	0,08	BA7	0,06	K7	0,08
B8	0,07	H8	0,07	BA8	0,08	K8	0,092
B9	0,06	H9	0,09	BA9	0,08	K9	0,07
B10	0,07	H10	0,06	BA10	0,08		
B11	0,07	H11	0,18				
B12	0,03	H12	0,07				
B12-2	0,03	H13	0,14				
B13	0,06	H14	0,07				
B14	0,06						
B15	0,05						
B16	0,03						
B17	0,05						
B18	0,06						
B19	0,10						
B20	0,08						
B21	0,07						
B22	0,07						
Minimum	0,01		0,06		0,06		0,06
Maksimum	0,10		0,18		0,11		0,10
Ortalama	0,057		0,092		0,082		0,079

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Nurgül HAFIZOĞLU ALKAN
Doğum Yeri	Kırcaali / Bulgaristan
Doğum Tarihi	20.11.1987
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	nurgulhafizoglu@istanbul.edu.tr
Web Adresi	-



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Dumlupınar Üniversitesi
Fakülte	Fen Edebiyat Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	30.07.2010

Yüksek Lisans	
Üniversite	Dumlupınar Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Nükleer Fizik Programı

Makale ve Bildiriler
M. Doğan, E. Ganioglu, L. Sahin, N. Hafizoğlu , 2017, Investigation of radon concentrations in some reservoirs, spring and tap waters in İstanbul, Turkey, <i>Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry</i> , 315(3), 653 – 660.
L. Sahin, N. Hafizoglu , H. Cetinkaya, K. Manisa, E. Bozkurt, A. Bicer, 2016, Assessment of radiological hazard parameters due to natural radioactivity in soils from granite-rich regions in Kütahya Province, Turkey, <i>Isotopes in Environmental and Health Studies</i> , 53 212-221.
N. Hafizoglu , L. Sahin, <i>Studies on Energy and Efficiency Calibration of Alpha Spectroscopy System</i> , Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 33. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 33, 6 – 10 Eylül 2017, Bodrum / Türkiye.

P. Isel, L. Sahin, **N. Hafizoglu**, B. Gundogdu, *Radon Concentration Measurements in Fruit Juices Using AlphaGuard Radon Detector*, Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 33. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 33, 6 – 10 Eylül 2017, Bodrum / Türkiye.

N. Hafizoglu, L. Sahin, P. Isel, B. Gundogdu, G. Aggez, E. Ganioglu, B.T. Alicli, A. Mulayim, *Activity Concentration Measurements from Environmental Gamma Radiation in Soil and Sediment Samples Collected from Bosphorus, Istanbul*, Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 32, 6 – 9 Eylül 2016, Bodrum / Türkiye.

B. Gundogdu, L. Sahin, **N. Hafizoglu**, *Radioactivity Concentration Measurements of Soil and Tea Samples Collected from Rize Region, Turkey*, Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 32, 6 – 9 Eylül 2016, Bodrum / Türkiye.

P. Isel, L. Sahin, **N. Hafizoglu**, *Indoor and Outdoor Gamma Radiation Measurement by Ludlum Portable Radiometric Instrument in Private Küçük Melekler Kindergarten*, Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 32, 6 – 9 Eylül 2016, Bodrum / Türkiye.

B. Gundogdu, L. Sahin, **N. Hafizoglu**, *Indoor Radon Concentration Measurements in the Physics Department at Istanbul University*, Poster Sunum, 9th International Balkan School on Nuclear Physics, 10 – 17 Temmuz 2016, Köstence / Romanya.

P. Isel, L. Sahin, **N. Hafizoglu**, B. Gundogdu, G. Aggez, *Indoor Radon Measurement By Using AlphaGuard and LR-115 Nuclear Track Detector in Private Küçük Melekler Kindergarten*, Poster Sunum, 9th International Balkan School on Nuclear Physics, 10 – 17 Temmuz 2016, Köstence / Romanya.

N. Hafizoglu, L. Sahin, K. Manisa, H. Cetinkaya, E. Bozkurt, S. Bostan, A. Bicer, *Measurement of Environmental Gamma Radiation in Province of Kütahya*, Poster Sunum, 3rd European Nuclear Physics Conference, 31 Ağustos – 4 Eylül 2015, Groningen / Hollanda.

A. Kurt, L. Sahin, Y. Oktem, B. Akkus, E. Bozkurt, **N. Hafizoglu**, F.C. Ozturk, *Determination of Indoor Radon Concentrations Around the Fatih District in Istanbul*, Poster Sunum, 3rd European Nuclear Physics Conference, 31 Ağustos – 4 Eylül 2015, Groningen / Hollanda.

G. Aggez, L. Sahin, **N. Hafizoglu**, B. Gundogdu, P. Isel, *Natural Background Radiation Measurement by Using Portable Detector at Science Faculty of Istanbul University*, Poster Sunum, 9th International Physics Conference of Balkan Physical Union – BPU 9, 24 – 27 Ağustos 2015, İstanbul Üniversitesi, İstanbul / Türkiye.

N. Hafizoglu, L. Sahin, *Neutron Radiography Systems*, Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 31, 21 – 24 Temmuz 2014, Bodrum / Türkiye.

B. Gundogdu, E. Kaya, L. Sahin, **N. Hafizoglu**, A. Kurt, F.C. Ozturk, *Measurement of Indoor Radon Concentration at Science Faculty of Istanbul University*, Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 31, 21 – 24 Temmuz 2014, Bodrum / Türkiye.

N. Hafizoglu, *MCA ile Compton Saçılması*, Ders Veren, 10. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Detektörleri Yaz Okulu – UPHDYO 10, 14 – 19 Temmuz 2014, Bodrum / Türkiye.

N. Hafizoglu, L. Sahin, K. Manisa, H. Cetinkaya, E. Bozkurt, A. Bicer, S. Bostan, *Measurement of Environmental Gamma Radiation in Province of Kütahya*, Sözlü Sunum, Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi – TFD 30, 2 – 5 Eylül 2013, İstanbul / Türkiye.