

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BERGAMA KOZAK GRANİT ALANIN DOĞAL  
RADYASYON SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ VE  
KARASAL DOZ HIZININ TAYİN EDİLMESİ**

**Nazan ÇIYRAK**

**Nisan, 2010**

**İZMİR**

**BERGAMA KOZAK GRANİT ALANIN DOĞAL  
RADYASYON SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ VE  
KARASAL DOZ HIZININ TAYİN EDİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Fizik Bölümü**

**Nazan ÇIYRAK**

**Mayıs, 2010**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

NAZAN ÇIYRAK, tarafından YARD.DOÇ.DR. ÖZLEM KARADENİZ yönetiminde hazırlanan ‘BERGAMA KOZAK GRANİT ALANIN DOĞAL RADYASYON SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ VE KARASAL DOZ HIZININ TAYİN EDİLMESİ’ başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
Yard.Doç.Dr.Özlem KARADENİZ

—————  
Yönetici

.....  
Prof.Dr.Günseli YAPRAK

—————  
Jüri Üyesi

.....  
Prof.Dr.Hamza POLAT

—————  
Jüri Üyesi

.....  
Yard.Doç.Dr.Muhittin AYGÜN

—————  
Jüri Üyesi

.....  
Yard.Doç.Dr.Hasan KARABIYIK

—————  
Jüri Üyesi

—————  
Prof.Dr.Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sűresince, kıymetli bilgi ve önerileri ile katkıda bulunan, çalışmalarımı yönlendiren ve tezimin her aşamasında büyük desteğini gördüğüm tez danışmanlarım Sayın Yard.Doç.Dr. Özlem KARADENİZ ve Sayın Prof. Dr. Günseli YAPRAK' a, en derin teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her türlü çalışma olanağı sağlayan Fizik Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Kemal KOCABAŐ' a teşekkür ederim.

Çalışmalarımda bilgi ve görüşlerinden yararlandığım, arazi çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Yard.Doç.Dr. Cüneyt AKAL' a teşekkür ederim.

Örneklerin toplanmasında yardımcı olan arkadaşım İpek EMEN'e, Yiğit NALBANT'a, Selma-Erdal GÜRLEK çiftine, abim Talip ÇIYRAK'a ve örneklerin hazırlanması, ölçülmesi ve tezin yazılması aşamasında benimle birlikte büyük bir titizlik ve özveri ile çalışan sevgili arkadaşlarım Gül ŐİMŐEK, Onur BÜYÜKOK, Sadi Deniz KAYHAN ve Didem DELİPINAR'a can-ı gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Nazan IYRAK

# DETERMINATION OF NATURAL RADIATION LEVELS AND TERRESTRIAL DOSE RATES IN BERGAMA KOZAK GRANITE AREA

## ABSTRACT

In the presented study, natural radioactivity due to the presence of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  radionuclides in soil and granite samples, collected from Bergama-Kozak Granite Area was determined by using gamma spectrometry technique. The measured activities in the granite and soil samples ranged from 29 to 111  $\text{Bq kg}^{-1}$ , 35 to 87  $\text{Bq kg}^{-1}$ , 698 to 1100  $\text{Bq kg}^{-1}$  and 32 to 82  $\text{Bq kg}^{-1}$ , 42 to 88  $\text{Bq kg}^{-1}$ , 667 to 1127  $\text{Bq kg}^{-1}$  for  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ , respectively. The radium equivalent activity ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ), the external hazard index ( $H_{\text{ex}}$ ), the internal hazard index ( $H_{\text{in}}$ ), the outdoor absorbed dose rate in air and the annual effective dose rate were evaluated to assess the radiation hazard for people living in the granite area. The mean radium equivalent activity ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ), the external hazard index ( $H_{\text{ex}}$ ), the internal hazard index ( $H_{\text{in}}$ ), terrestrial absorbed dose rate in the area under study were determined as 221  $\text{Bq kg}^{-1}$ , 0.62, 0.79, 104  $\text{nGy h}^{-1}$  and 214  $\text{Bq kg}^{-1}$ , 0.60, 0.74, 100  $\text{nGy h}^{-1}$  for granite and soil environment, respectively. The annual effective dose to the public due to granite and soil environment was estimated to be 127  $\mu\text{Sv}$  and 123  $\mu\text{Sv}$ , respectively. The results are comparable with other global radioactivity measurements and are found to be safe for public and environment.

**Key Words:** Natural Radionuclides, Granite Area, Terrestrial Dose Rate

# BERGAMA KOZAK GRANİT ALANIN DOĞAL RADYASYON SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ VE KARASAL DOZ HIZININ TAYİN EDİLMESİ

## ÖZ

Sunulan çalışmada, Bergama-Kozak Granit alanından toplanan toprak ve granit örneklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinden kaynaklanan doğal radyoaktivite Gama Spektrometre tekniği kullanılarak saptanmıştır. Granit ve toprak örneklerinde ölçülen aktiviteler  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için sırasıyla 29-111 Bq kg<sup>-1</sup>, 35-87 Bq kg<sup>-1</sup>, 698-1100 Bq kg<sup>-1</sup> ve 32-82 Bq kg<sup>-1</sup>, 42-88 Bq kg<sup>-1</sup>, 667-1127 Bq kg<sup>-1</sup> aralığında bulunmuştur. Granit alanda yaşayan halkın maruz kaldığı radyasyon hasarını değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ), dışsal radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{ex}}$ ), içsel radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{in}}$ ), havada soğurulan dışsal doz hızı ve yıllık etkin doz tahminleri yapılmıştır. Çalışılan alanda granit ve toprak ortamları için ortalama radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ), dışsal radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{ex}}$ ), içsel radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{in}}$ ), soğurulan karasal doz hızı sırasıyla 221 Bq kg<sup>-1</sup>, 0.62, 0.79, 104 nGy h<sup>-1</sup> ve 214 Bq kg<sup>-1</sup>, 0.60, 0.74, 100 nGy h<sup>-1</sup> olarak saptanmıştır. Granit ve toprak ortamlarından kaynaklanan yıllık etkin dozlar sırasıyla 127 µSv ve 123 µSv olarak tahmin edilmiştir. Sonuçlar dünya çapında yapılan radyoaktivite ölçümleri ile karşılaştırılabilir düzeydedir ve halk ile çevre açısından güvenli bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Doğal Radyonüklitler, Granit alan, Karasal Doz Hızı

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖZ.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ – GENEL BİLGİLER.....</b>	<b>2</b>
2.1 Doğal Radyasyon .....	2
2.1.1 Karasal Orijinli Doğal Radyasyon.....	3
2.2 Karasal Radyasyondan Kaynaklanan Etkin Doz Eşdeğerleri.....	12
2.3 Dünya Üzerinde Yüksek Seviyeli Doğal Radyasyon Alanları.....	14
2.4 Magmatik Kökenli Doğal Taşlar .....	18
2.5 Doğal Taşlarda Radyoaktivite .....	21
2.6 Doğal Taşların Radyolojik Risk Açısından Değerlendirilmesi .....	26
<b>BÖLÜM ÜÇ - MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>28</b>
3.1 Çalışma Alanı ve Genel Jeolojik Yapısı.....	28
3.1.1 Kozak Plutonunun Yeri ve Konumu .....	28
3.1.2 Kozak Granitoidi .....	30
3.1.3 Bergama Volkanikleri.....	33
3.2 Toprak ve Granit Örneklerinde 226Ra, 232Th ve 40K Radyonüklit Analizi .....	33
3.2.1 Örnekleme .....	33
3.2.2 Örnek Hazırlama.....	36
3.2.3 HPGe Gama Spektrometre Sistemi ile Doğal Radyonüklit Analizi .....	36
3.2.3.1 Radyoaktif Denge .....	39

3.2.3.2 Çalışmada Kullanılan Gama Spektrometre Sistemi.....	41
3.2.3.3 Analitik Kalite Kontrolü .....	42
<b>BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>43</b>
4.1 Toprak ve Granit Örneklerinin Doğal Radyonüklit Aktivite İçeriği ve Dağılımları.....	43
4.2 Toprak ve Granit Örneklerinde Doğal Radyasyondan Kaynaklanan Karasal Gama Doz Hızı.....	47
4.3 Toprak ve Granit Örneklerinin Radyolojik Risk Açısından Değerlendirilmesi .....	49
<b>BÖLÜM BEŞ - SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>53</b>



## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Normal alanlarda, toplam yıllık etkin doz eşdeğerinin  $\frac{1}{3}$ 'ünü dışsal maruz kalma,  $\frac{2}{3}$ 'ünü ise içsel maruz kalma oluşturmaktadır. Ancak bu eğilim, yüksek seviyeli doğal radyasyon alanlarında radyoaktivite üreten doğal radyasyon kaynaklarına bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin; dışsal maruz kalma, yüzey topraklarının jeolojik yapısına (granit yapılar, volkanik alanlar, monozit içeren sahil kumları,vb.), içsel maruz kalma, atmosferde  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonuna, Ra-Rn içeren sıcak veya soğuk kaynak sularına ve kullanılan bina materyallerindeki  $^{226}\text{Ra}$  konsantrasyonlarına dayalı olarak artarken, kozmik ışın dozları, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak yüksek değerler göstermektedir (Yaprak, 2009). Magmatik kökenli asidik bir kayaç olan granitlerde, doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının yüksek olduğu ve birçok granit alanının normal alanların çok üzerinde doğal radyasyon dozları ürettiği bilinmektedir. Bu doğrultuda sunulan çalışmada Kozak/ Bergama granit alanında toprak ve kayaç örneklerinde doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının belirlenmesi ve radyolojik risk tayini için karasal doğal radyasyondan kaynaklanan dışsal dozlarının hesaplanması amaçlanmıştır.

Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Ezine/Çanakkale, Eskişehir gibi granit alanlarında ve termik santraller çevresinde yapılan çalışmalar dışında, karasal kaynaklardan alınan doz hızlarının ve doz eşdeğerlerinin normal alanlar için verilen sınır değerlerini aşmadığı görülmektedir. Bu anlamda jeolojik yapısı gereği yüksek radyoaktivite içerdiği bilinen Kozak/Bergama granit masif alanında, granit kayaçlarda ve yüzey topraklarında doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının saptanması ve bu aktivitelere dayalı olarak karasal gama doz hızlarının hesaplanması ve bu verilerin WHO, ICRP, ICRU, IAEA gibi sağlık ve radyasyon korunma ve güvenliği alanında yetkili Uluslararası Organizasyonlar tarafından sağlık ve radyasyon güvenliğini koruma amacıyla izin verilen radyasyon dozları ile karşılaştırılması radyo-korunum açısından büyük bir öneme sahiptir.

## BÖLÜM İKİ

### GENEL BİLGİLER

#### 2.1 Doğal Radyasyon

Doğal radyasyona maruz kalmanın iki temel bileşeni vardır; ilki solunan havadaki radon gazı ve vücuda alınan doğal radyonüklitlerin neden olduğu içsel maruz kalma, diğeri ise kozmik ışınlar, kozmojenik radyonüklitler ve karasal radyasyonun (yer kabuğunda, bina materyalinde, havada) neden olduğu dışsal maruz kalmadır (UNSCEAR, 1982; 1988). Tablo 2.1’de doğal radyasyona içsel ve dışsal maruz kalma ile kişi başına tahmin edilen yıllık ortalama etkin doz eşdeğerleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Doğal radyasyona maruz kalma etkin doz eşdeğerleri (UNSCEAR, 2000; Yaprak, 2009).

<i>Doğal Radyasyon Kaynakları</i>	<i>Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (mSv)</i>		
	<i>Ortalama*</i>	<i>Tipik Aralık</i>	<i>Toplam</i>
<b><i>Kozmik ışınlar</i></b>			
İyonizasyon bileşeni	0.28 (0.30)		
Nötron bileşeni	0.10 (0.08)		
Kozmojenik radyonüklitler	0.01 (0.01)	0.3-1.0	
			<b>0.39</b>
<b><i>Karasal Radyasyona Dışsal Maruz Kalma</i></b>			
Bina dışı	0.07 (0.07)		
Bina içi	0.41 (0.39)	0.3-0.6	
			<b>0.48</b>
<b><i>Karasal Radyasyona İçsel Maruz Kalma (Soluma)</i></b>			
<sup>238</sup> U ve <sup>232</sup> Th serileri	0.006 (0.01)		
<sup>222</sup> Rn (radon)	1.15 (1.2)		
<sup>220</sup> Rn (toron)	0.10 (0.07)	0.2-10	
			<b>1.26</b>
<b><i>Karasal Radyasyona İçsel Maruz Kalma (Diyet)</i></b>			
<sup>40</sup> K	0.17 (0.17)		
<sup>238</sup> U ve <sup>232</sup> Th serileri	0.12 (0.06)	0.2-0.8	
			<b>0.29</b>
<b>Toplam</b>	<b>2.4</b>	1-10	

\* Parantez içindeki değerler önceki UNSCEAR tahminleridir.

Dünya nüfusu tarafından alınan ortalama doza en büyük katkı karasal ve kozmik orijinli radyasyondan gelmektedir ve doğal kaynaklardan alınan yıllık ortalama etkin doz eşdeğeri 2.4 mSv olarak tahmin edilmektedir (UNSCEAR, 1988).

### 2.1.1 Karasal Orijinli Doğal Radyasyon

Karasal orijinli doğal radyasyon, yer kabuğunda bulunan ve dünyanın başlangıcından beri ( $4.5 \times 10^9$  yıl) var olan primordial radyonüklitlerden kaynaklanmaktadır. Radyolojik risk açısından en önemli primordial radyonüklitler;  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve her iki doğal radyoaktif serinin bozunum ürünleridir. Rb-87 ve  $^{235}\text{U}$  ikinci derecede önemli primordial radyonüklitler olup, bunların insanların aldığı doza katkısı ihmal edilebilecek kadar azdır. Doğal kaynaklardan alınan yıllık ortalama etkin dozun (2.4 mSv) büyük bir kısmını  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinden alınan içsel ve dışsal doz oluşturmaktadır (Tablo 2.1). Doğal radyoaktif elementlere ilişkin bilgiler aşağıda verilmiştir.

### Uranyum

Uranyum atom numarası 92, yoğunluğu  $18.95 \text{ g/cm}^3$ , atom ağırlığı  $238.029 \text{ g/mol}$ , spesifik aktivitesi  $12.33 \text{ Bq/mg}$  olan radyoaktif bir metaldir. Pitchblend, uranatit, karnotit, tobernit gibi birçok mineralde, fosfat kayalarında ve monazit kumlarında çok değişen konsantrasyonlarda bulunabilir. Doğal uranyumun doğal çoklukları ve yarı ömürleri verilen üç izotopu vardır (Tablo 2.2).

Tablo 2.2 Doğal uranyumun izotopları ve yarı ömürleri (Yener ve Yaprak, 1988)

İzotop	Doğal Çokluk	Yarı Ömür
$^{238}\text{U}$	% 99.2830	$4,5 \times 10^9$ yıl
$^{235}\text{U}$	%0.7110	$7.1 \times 10^8$ yıl
$^{234}\text{U}$	%0.054	$2.47 \times 10^5$ yıl

Bunlardan U-238, uranyum serisinin, U-235 actinium serisinin seribaşı atomları iken, U-234, uranyum serisinin dördüncü bozunma ürünüdür ve her üç uranyum izotopu da alfa yayımlayarak parçalanırlar. Bir örnek içindeki uranyumun belirlenmesinde U-238 izotopunun bozunma zincirindeki ürünlerin aktivitelerinden yararlanılır. Bu zincirin özellikleri Tablo 2.3'te özet olarak gösterilmektedir.

Tablo 2.3 U-238'in bozunma zincirinin özellikleri (Yener ve Yaprak, 1988)

İzotop	Radyasyon	Yarı ömür
<sup>238</sup> U	A	4.51×10 <sup>9</sup> yıl
<sup>231</sup> Th	B	24.1 gün
<sup>234</sup> Pa	B	1.18 dak
<sup>234</sup> U	α, γ	2.48×10 <sup>5</sup> yıl
<sup>230</sup> Th	A	8×10 <sup>4</sup> yıl
<sup>226</sup> Ra	α, γ	1600 yıl
<sup>222</sup> Rn	α	3.82 gün
<sup>218</sup> Po	α	3.05 dak
<sup>214</sup> Pb	β, γ	26.8 dak
<sup>214</sup> Bi	β, γ	19.8 dak
<sup>214</sup> Po	A	1.6×10 <sup>-4</sup> sn
<sup>210</sup> Pb	β, γ	21.3 yıl
<sup>210</sup> Bi	B	5.01 gün
<sup>210</sup> Po	A	138.4 gün
<sup>206</sup> Pb	Kararlı	

## Toryum

Toryum atom numarası 90, yoğunluğu 11.72 g/cm<sup>3</sup>, atom ağırlığı 232.0381 g/mol ve spesifik aktivitesi 4.1 Bq/mg olan ağır bir elementtir. En önemli izotopu yarı ömrü 1.39×10<sup>10</sup> yıl olan Th-232'dir ve kendi adını verdiği radyoaktif serinin ilk elemanıdır. Th-232 serisi özellikleri Tablo-2.4'te özetlenmiştir. Genel olarak yerkabuğundaki konsantrasyonu normal kayalar için uranyum konsantrasyonunun yaklaşık 3 katı kadardır.



Tablo 2.5 K-40'ın bozunma zinciri (Yener ve Yaprak, 1988)

İzotop	Radyasyon	Gama Enerjisi (MeV)	Yarı Ömrü
<sup>40</sup> K	$\beta^-$ , $\beta^+$ , EC, $\gamma$	1,4608	1,3x10 <sup>9</sup> yıl
<sup>40</sup> Ca (%85)	—————	—————	Kararlı
<sup>40</sup> Ar (%11)	—————	—————	Kararlı

Açık alanlarda insanlar, yüzey topraklarındaki (veya yüzeyi örten diğer tabakalar) radyoaktiviteye dayalı olarak karasal radyasyona maruz kalmaktadır ve bu doğrultuda, dışsal gama doz hızı yüzey topraklarının doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ölçülerek hesaplanmaktadır (UNSCEAR, 1993; Yaprak, 2009).

UNSCEAR 1988 Raporunda, normal alanlarda <sup>238</sup>U ve <sup>232</sup>Th'nin topraklardaki ortalama konsantrasyonları 25 Bq kg<sup>-1</sup> ve <sup>40</sup>K'un 370 Bq kg<sup>-1</sup> alınarak, nüfus ağırlıklı ortalama karasal gama doz hızı 55 nGy h<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır. UNSCEAR 1993 Raporunda bu değer 57 nGy h<sup>-1</sup> olarak verilmekte ve normal alanlarda <sup>238</sup>U ve <sup>232</sup>Th'nin topraklardaki ortalama konsantrasyonlarının 40 Bq kg<sup>-1</sup> alınması önerilmektedir ( Yaprak, 2009).

Tablo 2.6'da yüzey topraklarında gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ve bina dışı ortamda dışsal maruz kalma sonucu tahmin edilen doz hızlarına ilişkin dünya ortalamaları verilmiştir. Bu çizelge, son 20 yılda dünyanın birçok ülkesinde gerçekleştirilen ve dünya nüfusunun %70'ini kapsayan ölçüm sonuçlarına dayalı olarak UNSCEAR 2000 raporundan derlenmiştir (Yaprak, 2009).

Tablo 2.6 Bina dışı ortamda karasal gama radyasyonuna dışsal maruz kalma (UNSCEAR, 2000; Yaprak, 2009)

<b>Radyonüklit</b>	<b>Topraklarda Ortalama Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonu <math>\underline{a}</math>(Bqkg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Doz Dönüşüm Katsayıları <math>\underline{b}</math>(nGyh<sup>-1</sup>/Bqkg<sup>-1</sup>) (yaş ağırlık)</b>	<b>Havada Absorbe Edilen Gama Doz Hızları <math>\underline{a}</math>( nGyh<sup>-1</sup>)</b>
<sup>40</sup> K	400(420)	0.0417 (0.0414)	17(18)
<sup>238</sup> U serisi	35 (33)	0.462 (0.461)	16(15)
<sup>232</sup> Th serisi	30(45)	0.604 ( 0.623)	18(27)
<b>Toplam</b>	<b><math>D(nGyh^{-1})= 0.0417A_K + 0.462 A_{Ra} + 0.604 A_{Th}</math></b>		<b>51( 60)</b>

- a/ nüfus ağırlıklı ortalamalar parantez içinde verilmiştir.

- b/ UNSCEAR 1993 Doz Dönüşüm Katsayıları

- Gama doz hızlarının hesaplanmasında, <sup>238</sup>U ve <sup>232</sup>Th tüm bozunum ürünleri ile dengede, toprak yoğunluğu 1.6g/cm<sup>3</sup> ve toprak nem faktörünün 0.81 (kuru ağırlık/yaş ağırlık) varsayımı yapılmıştır.

Tablo 2.6'dan görüleceği üzere, UNSCEAR 2000 raporunda, bina dışı ortamda karasal gama radyasyonuna dışsal maruz kalma için nüfus ağırlıklı ortalama doz hızı, 60 nGy h<sup>-1</sup> olarak rapor edilmektedir. Ayrıca bu raporda, karasal gama radyasyonundan kaynaklanan doz hızlarının normal alanlarda 10-200 nGy h<sup>-1</sup> arasında değiştiği bildirilmektedir. Dünyanın farklı bölgelerine ait toprak örneklerinin <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra and <sup>232</sup>Th radyonüklit içerikleri ve havada absorbe edilen gama doz hızları Tablo 2.7' de listelenmiştir.

Tablo 2.7 Dünyanın farklı bölgelerine ait toprak örneklerinin  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları ve havada absorbe edilen gama doz hızları (D).

<b>Bölge</b>	$^{40}\text{K}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{226}\text{Ra}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{232}\text{Th}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	<b>D</b> (nGy h <sup>-1</sup> )	<b>Referans</b>
<i>Avrupa</i>					
Yunanistan				6.60-173	Clouvas et al., 2001
	337 - 1380	21 - 187	16 - 85		Florou and Kritidis, 1992
	238 - 1796	1 - 1420	5 - 296		Florou et al., 2007
Norveç	31 - 643	17 - 134	4 - 52		Dowdall et al., 2003; 2004
İspanya	674 - 1027	27 - 34	38 - 48		Vaca et al., 2001
	48 - 1586	13 - 165	7 - 204		Baeza et al., 1992
Kanarya adaları	142 - 1489	7.30 - 104	11.6 - 111	67	Fernandez-Aldecoa et al., 1992
Estonya	138 - 1152	15 - 325	5 - 62		Realo and Realo, 2005
Sicilya	63 - 1100	8.2 - 370	4 - 88	0.52 - 78	Brai et al., 2006
Sırbistan	190 - 2400	10 - 14700	16.3 - 150		Esposito et al., 2002
<i>Kosova</i>					
Ustica Adası	201 - 1350	15 - 164	16 - 174		Bellia et al., 1997
<i>Antartika</i>	125 - 810	5 - 36	4 - 31		Navas et al., 2005
<i>Asya</i>					
Çin	315 - 838	18.8 - 119	23.3 - 224	5.24 - 20.2	Ziqiang et al., 1988
Ürdün	11 - 426	20 - 984	3 - 33.7	57	Al-Jundi, 2002
Malezya		58.8 - 485	59.6-1204	72 - 1440	Ramli et al., 2005
Rusya	100-1400	1-76	2-79	12-102	UNSCEAR, 2000
Vietnam	5.8 - 756	5.6 - 54.3	12.0- 99.0	9.90 - 115	Huy and Luyen, 2006
Japonya	16.6 - 1300	ND - 100	1.30- 82.8	2.90 - 226	Chikasawa et al., 2001
Pakistan	499 - 629	24 - 33	46 - 62	62 - 77	Tufail et al., 2006
Bangladeş	402 - 750	21 - 43	9 - 22		Miah et al., 1998
<i>Afrika</i>					
Libya	265 - 282	8.67 - 12.8	7.65- 9.73	23	Shenber, 1997
Cezayir	93 - 412	4.6 - 63.5	6.5 - 27.1		Noureddine et al., 1997
Namibiya	212 - 684	10.8 - 26.4	12.8- 52.3	22.0 - 72.7	Oyedele, 2006
Mısır	16 - 1379	3 - 101	2 - 117		El-Reefy et al., 2006
<i>Amerika</i>					
Kanada	153 - 817	3.30 - 36.0	1.50- 28.0		VandenBygaart and Protz, 1999
Meksika	156 - 266	7.10 - 92.1			Segovia et al., 2003
Dünya	140 - 850	17 - 60	11 - 64	10-200	UNSCEAR, 2000
Geneli*	400	35	30	60	

\*: Tipik menzil ve ortalama; ND: < MDA



Dünya üzerinde normal alanların aksine, yüksek doğal radyasyon içeren alanlar oldukça sınırlıdır ve bu bölgeler, toryum ve uranyum içeren materyallerle birlikte bulunmaktadır. Toryumca zengin *monozit* içeren mineral kumlar bunun en önemli örneğidir. Bu şekilde iyi bilinen iki alan; Kerala’da Arap Denizi sahili ve Brezilya’da Espirito Santo sahilidir. Bu sahillerde karasal gama doz hızlarının 100- 4000 nGy h<sup>-1</sup> arasında değiştiği gözlenmiştir. İran’da Ramsar ve Mahallatta termal sularda yüksek <sup>226</sup>Ra aktivite konsantrasyonu nedeni ile bu değer 30000 nGyh<sup>-1</sup>’e çıkmaktadır. Ayrıca, birçok granit alanının normal alanların çok üzerinde gama doz hızı ürettiği gözlenmiştir (UNSCEAR, 1993; Yaprak, 2009).

Binalar dışarıdan gelen kozmik ve karasal orijinli radyasyona karşı koruyucu etkiye sahip olmalarına rağmen, bina malzemelerindeki radyonüklit içeriğine bağlı olarak bina içi radyoaktivite bina dışındaki değere göre daha fazla olabilmektedir. Tablo 2.8’de karasal gama radyasyonuna bina içi ve bina dışı ortamda dışsal maruz kalma sonucu tahmin edilen ortalama doz hızları ve doz oranları verilmiştir (UNSCEAR, 1988; 1993; 2000; Yaprak, 2009).

Tablo 2.8 Bina dışı ve bina içi ortamda dışsal gama doz hızları

UNSCEAR	Soğurulan Doz Hızı ( nGyh <sup>-1</sup> )					
	Bina Dışı Ortam		Bina İçi Ortam		<u>Bina İçi Doz</u> Bina Dışı Doz	
	*Ortalama	Tipik Aralık	Ortalama	Tipik Aralık	Ortalama	Tipik Aralık
<b>1988</b>	55		70		1.3	
<b>1993</b>	57	24- 160	80	20-190	1.4	0.8-2.0
<b>2000</b>	60	10-200	84	20-200	1.4	0.6-2.3

\*Nüfus ağırlıklı ortalamalar verilmiştir.

Tablo 2.8 incelendiğinde bina içi doz / bina dışı doz oranının 1.4 ortalama ile 0.6-2.3 arasında değiştiği gözlenmektedir. UNSCEAR 2000 Raporunda, dünya nüfusunun %45’ini temsil eden verilere dayalı olarak, bina içi ortamda nüfus ağırlıklı

dışsal gama doz hızı ortalaması  $84 \text{ nGy h}^{-1}$  olarak tahmin edilmekte ve ülke ortalamalarının  $20\text{-}200 \text{ nGy h}^{-1}$  arasında değiştiği bildirilmektedir. Karasal gama radyasyonundan kaynaklanan doz hızının bina dışı ortamda  $60 \text{ nGy h}^{-1}$  olarak verildiği bu rapora göre, bina içi ortamda dışsal gama doz hızının % 40 daha fazla olduğu görülmektedir.

Bina materyalleri, üretildikleri bölgenin jeolojik yapısını yansıtırlar ve genelde ham maddeden yapıldıkları için radyoaktif atık ve ürün içermezler. Ancak, bina yapımında kullanılan granit gibi magmatik kökenli doğal taşların, uranyum içeren kil taşlarının (alumshale) ve endüstri kökenli bazı malzemelerin (fosfatlı jips ve kömür külü), bina içi maruz kalmayı hızlı şekilde arttırdığı bilinmektedir (UNSCEAR, 1993). Tablo 2.9’da farklı bina materyallerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ve bu materyallerin bina içi ortamda oluşturacakları dışsal gama doz hızları, aktivite indeksleri ve materyal kullanım oranları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 2.9 Bina materyali ve bina içi ortamda dışsal maruz kalma (UNSCEAR, 1993)

Materyal	Radyonüklit Aktivitesi (Bqkg <sup>-1</sup> )			Aktivite İndeksi (I)	Doz Hızı nGyh <sup>-1</sup>		
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K		W <sub>m</sub>		
					1	½	¼
Tipik bina materyali	50	50	500	1.0	80	40	20
Granit blok	90	80	1200	1.9	140	70	35
Kömür külü içeren malzeme	150	150	400	2.4	180	90	45
Kil taşı (alumshale) tuğla	1300	67	770	9.0	680	390	170
Fosfatlı jips	600	20	60	3.9	290	145	70
Doğal jips	20	5	150	0.25	20	10	5

UNSCEAR 1993 Raporunda, tipik bina materyallerinde ortalama <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonları sırası ile;  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$  olarak verilmekte (Tablo 2.9) ve bina içi ortamda havadaki karasal kaynaklar nedeniyle

maruz kalınan dışsal gama doz hızı  $80 \text{ nGyh}^{-1}$  olarak tahmin edilmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu raporda, herhangi bir bina materyalinin bina içi ortamda oluşturacağı radyolojik risk, tipik bina materyalleri için önerilen ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ve materyalin bina içi kullanım yüzdesine “ $w_m$ ” bağlı olarak Aktivite İndeksi (I) ile tanımlanmaktadır.

$$I = \left( \frac{C_{Ra}}{A_{Ra}} 0.461 + \frac{C_{Th}}{A_{Th}} 0.623 + \frac{C_K}{A_K} 0.0414 \right) w_m \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte;  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  ve  $C_K$ : bina materyalinin doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ),  $w_m$ : materyalin bina içi kullanım yüzdesi ve  $A_{Ra}$ :  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $A_{Th}$ :  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$  ve  $A_K$ :  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$ 'dir.

Tipik bina materyali için Aktivite İndeksi (I): 1 kabul edilmekte ve radyolojik risk açısından, bina materyalleri aktivite indeksinin  $I \leq 1$  olması istenmektedir (UNSCEAR, 1993).

Bina materyallerinin spesifik aktivitelerini karşılaştırmak için tanımlanan bir diğer uluslararası ortak indeks, *Radyum Eşdeğer Aktivitesi*  $Ra(eq)$ 'dir. Aşağıdaki eşitlik ile verilen  $Ra(eq)$  radyasyon zarar indeksi;  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$   $^{226}\text{Ra}$ ,  $259 \text{ Bq kg}^{-1}$   $^{232}\text{Th}$  ve  $4810 \text{ Bq kg}^{-1}$   $^{40}\text{K}$  radyonüklitinin aynı miktarda gama dozu ürettiği varsayımına dayanmaktadır.

$$Ra(eq) = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (2.2)$$

Radyolojik risk açısından  $Ra(eq)$  aktivitesinin  $370 \text{ Bqkg}^{-1}$ 'i geçmemesi istenmektedir (UNSCEAR, 1988). Benzer şekilde, bina materyallerinde  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklitlerinden salınan gamalara bağlı dışsal maruz kalma, UNSCEAR 1982 Raporunda *Dış Zarar İndeksi* ( $H_{ex}$ ) ile tanımlanmakta ve aşağıdaki dozimetrik ilişkiyle verilmektedir.

$$H_{ex}=A_{Ra}/370 + A_{Th}/259 + A_K/4180 < 1.0 \quad (2.3)$$

Bu eşitliklerde,  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$ ; sırası ile bina yapı malzemesinin içerdiği  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$  aktivite konsantrasyonlarıdır (Bq/kg).  $H_{ex}$  indeksinin  $<1$  olması durumunda bina içi ortamda maruz kalınan radyasyon dozunun yılda 1.5 mGy'i geçmeyeceği tahmin edilmektedir (UNSCEAR, 1982; Yaprak, 2009).

Sonuç olarak, bina içi ortamda radyolojik riskin değerlendirilmesine olanak tanıyan bu radyasyon zarar indeksleri, bina materyallerinde gözlenen radyoelement içeriklerine dayalı olarak hesaplanmaktadır.

## 2.2 Karasal Radyasyondan Kaynaklanan Etkin Doz Eşdeğerleri

ICRP, WHO, ICRU, IRPA, IAEA, OECD-NEA gibi sağlık ve radyo-korunum ve güvenliği alanında yetkili Uluslararası Organizasyonlar tarafından tavsiye edilen radyolojik verileri yayınlanan UNSCEAR Raporlarına, (1982; 1988; 1993; 2000) dayalı olarak Tablo 2.10'da, bina içi ve bina dışı ortamda, karasal gama radyasyonuna dışsal ve içsel maruz kalma için doz dönüşüm faktörleri verilmiştir (Yaprak, 2009). Yıllık etkin doz eşdeğerlerinin hesaplandığı dozimetrik bağıntılarda, insanların zamanlarının % 80'ini bina içi ortamda geçirdiği varsayımı yapılmıştır.

Radyasyondan korunma ve güvenliği alanında ICRP ve diğer Uluslararası Kuruluşların tavsiye ettiği limit değerler, mümkün olabilecek en az radyasyon dozuna maruz kalmayı ifade eden **ALARA** (*as low as reasonably achievable*) prensibi dikkate alınarak önerilmektedir.

Tablo 2.10 Karasal gama radyasyonundan kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğerleri (UNSCEAR, 2000; Yaprak, 2009)

Karasal Gama Radyasyonu <sup>a</sup>	Doz Dönüşüm Katsayısı: 0.7 SvGy <sup>-1</sup>	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (DE) mSvy <sup>-1</sup>
	Dozimetrik İlişki	
Bina Dışı Ortam	60 nGyh <sup>-1</sup> x 0.7SvGy <sup>-1</sup> x 8760 saat/yıl x 0.2	0.07
Bina İçi Ortam	84nGyh <sup>-1</sup> x 0.7SvGy <sup>-1</sup> x 8760 saat/yıl x 0.8	0.41
<b>Toplam</b>		0.48
Radon <sup>b</sup>	Doz Dönüşüm Katsayısı: 9 nSv(hBqm <sup>-3</sup> )	
	Dozimetrik İlişki	
Bina İçi Ortam <sup>c</sup>	40Bqm <sup>-3</sup> x 0.4x 7000saat x 9.0 nSvh <sup>-1</sup> /Bqm <sup>-3</sup>	1.0
Bina Dışı Ortam <sup>d</sup>	10Bqm <sup>-3</sup> x 0.6x 1700saat x 9.0 nSvh <sup>-1</sup> /Bqm <sup>-3</sup>	0.095
<b>Toplam</b>		1.095

- Çocuklar için bu değer %10 daha yüksektir.
- Radon için verilen etkin doz eşdeğerleri, kanda çözünen radon ve sulardan alınan radon dozlarını kapsamamaktadır. Bu ilave dozların toplamı, UNSCEAR 2000'de 0.078 mSv y<sup>-1</sup> verilmektedir.
- Bina içi ortamda radon ve ürünleri arasındaki denge faktörü: 0.4 alınmıştır.
- Bina dışı ortamda radon ve ürünleri arasındaki denge faktörü: 0.6 alınmıştır.

Radyasyona maruz kalma sonucu oluşabilecek radyolojik risk, radyasyonun tipi ve enerjisi, radyasyon kaynağına içsel veya dışsal maruz kalma, radyasyonun insan vücudu içinde dağılımı ve radyasyona maruz kalma süresi değerlendirilerek tahmin edilmektedir. Bu doğrultuda, radyolojik risk tahmini için yaygın şekilde kullanılan doz birimlerinin kısa tanımları aşağıda verilmiştir.

**Absorbe Edilen Doz:** Radyasyonla ışınlanan materyalin birim kütleline aktarılan enerji olarak tanımlanır ve SI sistemindeki birimi Gray (1 joule/kg =1Gy)' dir.

**Doz eşdeğeri:** Belirli bir radyasyonun biyolojik sistem üzerindeki etkisi, absorbe edilen doz (Gy) ve kalite faktörüne (Q) bağlı olarak SI sisteminde Sievert (Sv) ile verilir. ICRP tarafından verilen kalite faktörü Q, her bir radyasyonun iyonizasyon

oluşturma kapasitesidir ve lineer enerji transferi (LET) ile ifade edilir.  $X$ ,  $\gamma$  ve  $\beta$  ışınları için  $Q=1$ ,  $\alpha$  ışınları için  $Q= 20$  verilmektedir (UNSCEAR, 1988).

***Etkin Doz Eşdeğeri:*** Radyasyona duyarlı organ ve dokular için ICRP tarafından belirlenen risk tahminlerine dayanarak (vücudun bütünü için) organ ağırlık faktörlerini de içeren etkin doz eşdeğeri birimi, SI birim sisteminde Sv olarak verilir. Etkin doz eşdeğer kavramı, radyasyon tipi, enerjisi ve biyolojik hasar arasındaki ilişkiyi tanımlayan dozimetrik niceliktir.

### **2.3 Dünya Üzerinde Yüksek Seviyeli Doğal Radyasyon Alanları**

ICRP 60 Raporunda, müsaade edilebilir yıllık etkin doz eşdeğeri  $5 \text{ mSvy}^{-1}$  olarak verilmekte ve insanların doğal radyasyon kaynaklarından alacakları dozun  $1 \text{ mSvy}^{-1}$ 'i geçmemesi önerilmektedir (ICRP, 1990). Genel olarak, insanların maruz kaldığı doğal radyasyon dozları değerlendirildiğinde, dünya coğrafyası ve jeolojik koşullarının normal dozlar ürettiği ve etkin doz eşdeğerinin, dünya nüfusunun %65'i için  $1-3 \text{ mSvy}^{-1}$ , %25'i için  $< 1 \text{ mSvy}^{-1}$  ve %10'u için  $\geq 3 \text{ mSvy}^{-1}$  olduğu gözlenmektedir (UNSCEAR 2000). Dünya nüfusunun %90'ının yıllık etkin doz eşdeğerinin  $\leq 3 \text{ mSvy}^{-1}$  olduğu normal alanlarda yaşadığını ifade eden bu sonuç, radyolojik risk açısından, kalan %10 için yüksek doğal radyasyon alanları tanımının yapılmasını gerektirmektedir. UNSCEAR 1993 Raporu, kozmik ve karasal doğal radyasyondan kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğerlerini, normal ve yüksek doğal radyasyonlu alanlar için Tablo 2.11 verildiği şekilde özetlemiştir.

Tablo 2.11 Normal ve yüksek doğal radyasyonlu alanlar için yıllık etkin doz eşdeğerleri (UNSCEAR 1993; Canbaz, 2007; Yaprak, 2009).

Doğal Radyasyon	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (mSv)	
	Normal Alanlar	Yüksek Radyasyonlu Alanlar
<b>Dışsal Maruz Kalma</b>		
Kozmik ışınlar	0.38	2.01
Karasal Radyasyon	0.46	4.3
<b>İçsel Maruz Kalma</b>		
Kozmojenik radyonüklitler	0.01	0.01
Karasal radyonüklitler	0.23	0.6
Radon	1.205	10.1
Toron	0.07	0.1
<b>Toplam</b>	<b>2.4</b>	<b>17.1</b>

Normal alanlarda, toplam yıllık etkin doz eşdeğerinin  $\frac{1}{3}$ 'ünü dışsal maruz kalma,  $\frac{2}{3}$ 'ünü ise içsel maruz kalma oluşturmaktadır (Tablo 2.11). Ancak bu eğilim, yüksek seviyeli doğal radyasyon alanlarında yüksek radyoaktivite üreten doğal radyasyon kaynaklarına bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin; dışsal maruz kalma, yüzey topraklarının jeolojik yapısına (granit yapılar, volkanik alanlar, monozit içeren sahil kumları, vb.), içsel maruz kalma, Ra-Rn içeren sıcak veya soğuk kaynak suları ve/veya bina materyallerine dayalı olarak artarken, kozmik ışın dozları, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak yüksek değerler göstermektedir.

Dünya üzerinde yüksek seviyeli doğal radyasyon alanlarının büyük bir kısmı, toryumca zengin monazit içeren ağır mineral kumlar, uranyum ve toryum içeren granitler, çeşitli volkanik ve tortul kayalar, kum taşları, kil taşları (alum shale), kireç taşları ve benzeri jeolojik yapılar üzerine yer almaktadır. Genel olarak, jeolojik yapı veya bu yapıya dayalı olarak, çevredeki karasal radyonüklitlerin jeokimyasal olaylarla taşınarak birikmesi sonucu oluşan bu alanlar Tablo 2.12'de özetlenmiştir. Normal alanların 100 katı ve üzerinde karasal gama doz hızları ürettiği gözlenen bu alanlarda (UNSCEAR, 2000;Yaprak 2009), ayrıca yerel jeolojik malzemenin bina materyali olarak kullanılması, bina içi ortamda içsel ve dışsal maruz kalmanın (Ramsar;  $0.6-360 \text{ mGy}^{-1}$ ) önemli derecede artmasına neden olmaktadır.

Tablo 2.12 Dünya üzerinde yüksek seviyeli doğal radyasyon alanları (Canbaz, 2007; Yaprak, 2009)

Ülke	Bölge	Bölgenin Özellikleri	Doz hızları (nGyh <sup>-1</sup> )
Brezilya	Guarapari	Monazitli sahil kumları	90-90000
	Meaibe	Monazitli sahil kumları	20000*
	Mineas Gerais ve Goias	Volkanik sokulumlar	340*
	Pocos de Caldas Araxa	Volkanik sokulumlar	2800*
Cin	Yangjiang ve Quandong	Monazitli topraklar	370*
Mısır	Nil Deltası	Monazitli kumlar	20-400
Fransa	Orta (merkez) Bölge	Granitik, şistik alanlar	20-400
	Güneybatı	Uranyum Mineralleri	10-10000
Hindistan	Kerala ve Madras	Monazitli sahil kumları (200 km uzunluğunda ve 0.5 km genişliğinde sahil )	200-4 000 1800*
	Ganj Deltası	Monazitli kumlar	260-440
	Chinavilai Köyü,Tamil Nadu	Monazitli sahil kumları	2283-4566
İran	Ramsar	Radyum içeren doğal kaynak suları	70-17000
	Mahallat	Radyum içeren doğal kaynak suları	800-4000
		Uranyum içeren çeşitli volkanik ve tortul kayaçlar	0.092-0.457
İtalya	Lazio	Volkanik topraklar	180*
	Campania		200*
	Orvieto Kasabası		560*
	Güney Toscana		150-200
Yeni Zelanda	Pasifik	Volkanik topraklar	1100 (max)
İsviçre	Tessin, Alpler, Jura	<sup>226</sup> Ra içeren karstik topraklar	100-200
Sudan	Miri Gölü	-	31311*

\* Ortalama değerleri göstermektedir.



Yüksek seviyeli radyasyon alanlarında yapılan radyobiolojik ve epidemiyolojik araştırmalar uzun süredir devam etmesine rağmen, elde edilen veriler, bu alanların normal alanların üzerinde önemli bir sağlık riski oluşturduğunu henüz ortaya koyamamıştır. Bu nedenle, radyasyon korunmasında kabul edilen seviyeler ile mevcut literatürlerdeki değerler arasında gözlenen farklılığı gidermek ve gerçek radyasyon risk kriterlerinin kesinleşmesi için veri eksikliğini tamamlayacak radyolojik incelemelerin farklı HLNRA alanlarında sürdürülmesi önerilmektedir (Canbaz, 2007; Yaprak, 2009).

Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan benzer çalışmalar Çizelge 2.13' te özetlenmiştir. Bu çizelgede, Ezine/Çanakkale ve Eskişehir gibi granit alanında yapılan çalışmalar dışında, topraklarda gözlenen ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarının, UNSCEAR-2000'de verilen dünya ortalamaları ( $^{226}\text{Ra}$  için 35 (17-60) Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  için 30 (11-64) Bq kg<sup>-1</sup> ve  $^{40}\text{K}$  için 400 (140-850) Bq kg<sup>-1</sup>) ile karşılaştırılabilir düzeyde olduğu ve karasal gama doz hızlarının normal alanlar için verilen 10- 200 nGy h<sup>-1</sup> sınır değerlerini aşmadığı görölmektedir.

Genelde, topraklarda gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları toprağın üzerinde türediği kaya türünün doğal background konsantrasyonlarını yansıtmaktadır. Ancak, elektrik enerjisi sağlamak için kömürün yakılması ve bunun yanı sıra tarımsal üretimi arttırmak için fosfat içeren yapay gübrelerin topraklara uygulanması çevrede, doğal radyonüklitlerin zenginleşmesine neden olmaktadır (Yaprak ve Gür, 2007).

Tablo 2.13 Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan doğal radyoaktivite çalışmaları

Bölge	Radyonüklit Aktivite			Doz hızı (nGy h <sup>-1</sup> )	Etkin Doz Eşdeğeri	Literatür
	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th			
<i>Doğu</i>						
Kars, Iğdır	272 – 949	13 – 47	5 – 17	5.20 – 13		Topçuoğlu et al., 2003
Şanlıurfa <sup>a</sup>	144 – 401	20.8	24.95	15.7–73.7		Bozkurt et al., 2007
<i>Akdeniz</i>						
Adana <sup>a</sup>	9.6 – 814	0.60–80.9	0.60–56.9	0.10–8.60		Degerlier et al., 2008
<i>Karadeniz</i>						
Kastamonu <sup>a</sup>	156 – 869	14.6–65.7	17.1 -35.6	28.7–96.2	60	Kam ve Bozkurt, 2007
Rize	105- 1235	11.0 - 188	10.0 - 105	19.1 - 150	23.4 - 183	Kurnaz et al., 2007
<i>Marmara</i>						
İstanbul <sup>a</sup>	117- 1204	21	37	15.2–79.8	18.6–97.9	Karahan ve Bayulken, 2000
Çanakkale <sup>a</sup>	1015-1375	82.3 - 167	152 - 276	190 - 272	234 - 333	Merdanoğlu et al., 2006
Çanakkale <sup>b</sup>	670–1572	90.7–361	110–341	0.80 - 448	1.10 - 549	Örgün et al., 2007
Çanakkale <sup>c</sup>	687 – 1421	78.8-1885	96.6-4360	158- 3743	194- 4591	Örgün et al., 2007
Çanakkale <sup>g</sup>	782–1400	31.5–212	50.3–208	79.9–273		Örgün et al., 2007
Çanakkale <sup>h</sup>	0.80–50.0	0.79–53.4	0.71–26.9	0.80–42.9		Örgün et al., 2007
Çanakkale <sup>b</sup>	1074 – 1527	78 - 531	120 - 601			Canbaz, 2007
Çanakkale <sup>c</sup>	872- 2905	66 - 6048	72- 12537			Canbaz, 2007
Çanakkale <sup>d</sup>	126 – 3181	17 - 434	11 - 499			Canbaz, 2007
Çanakkale,	228-1479	10.0-72.0	18.0-78			Yaprak ve Gür, 2007
Kocaeli <sup>d</sup>	161 – 964	11.0–49.0	11.0–65.0			Karakelle et al., 2002
Bursa,	34-1011	2.00-88.0	3.00-83			Yaprak ve Gür, 2007
<i>Orta</i>						
Eskişehir <sup>e</sup>	418 – 1695	43.6 - 652	50.9 - 352	87.1 - 532	107 - 653	Örgün et al., 2005
<i>Ege</i>						
İzmir <sup>i</sup>	180-927	9-55	13-83			Karadeniz, 2005
Manisa	210 – 470	22 - 35	18 - 36	54	66	Ereeş et al., 2006
Gediz <sup>f</sup>	168-965	19.0-72.0	10.0-65.0			Yaprak et al., 2005
K.Menderes	296 – 1305	17 - 76	17 - 51			Işık, 2002
Soma <sup>d</sup>	59-885	13-88	59-885			Yaprak ve Gür, 2007
Yatağan <sup>d</sup>	203-794	18.0-53.0	17.0-89	27–111		Yaprak ve Gür, 2007
Yeniköy	117–937	9–168	6–74	13–161		Yaprak ve Gür, 2007
Kütahya	142-463	4.00-65.0	3.00-44.0	10–76		Yaprak ve Gür, 2007
Kütahya	132-607	12.0-129	12.0-70.0	18–127		Yaprak ve Gür, 2007

<sup>a</sup>: bozulmamış; <sup>b</sup>: granit alanda kayaç; <sup>c</sup>: sahil kumu; <sup>d</sup>: şehir; <sup>e</sup>: granit alan; <sup>f</sup>: zirai; <sup>g</sup>: volkanik kayaç;

<sup>h</sup>: metamorfik kayaç; <sup>i</sup>:orman

## 2.4 Magmatik Kökenli Doğal Taşlar

Doğal taşların bilimsel anlamda sınıflandırılması (Tablo 2.14) birçok kitapta detayları ile verilmiştir (Kun, 2000), burada kısaca değinilecektir.

Tablo 2.14 Doğal taşların bilimsel anlamda sınıflandırılması (Yaprak, 2006).

DOĞAL TAŞLAR		
Magmatik Kökenli Doğal Taşlar	Metamorfik Kökenli Doğal Taşlar	Sedimanter Kökenli Doğal Taşlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Derinlik Kayaçları</li> <li>➤ Damar Kayaçları</li> <li>➤ Yüzey Kayaçları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Gerçek Mermerler</li> <li>➤ Şistler</li> <li>➤ Gnayslar</li> <li>➤ Migmatitler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kırıntılı Sedimanter Kayaçlar</li> <li>➤ Kimyasal Sedimanter Kayaçlar</li> <li>➤ Organik Sedimanter Kayaçlar</li> </ul>

Magmatik kökenli doğal taşlar, magma adı verilen tamamen erimiş silikat sıvısının yerkabuğunun değişik derinliklerine sokulması ve oralarda soğuyarak katılaşması sonucu oluşurlar. Bu kayaçlar yerleşme derinliklerine göre üç alt sınıfa ayrılırlar (Yaprak, 2006):

**Derinlik Kayaçları** (Plütonik kayaçlar): Granit, gabro.

**Damar Kayaçları** (Yarı Derinlik Kayaçları): Diyabaz, aplit.

**Yüzey Kayaçları** (Volkanik Kayaçlar): Bazalt, andezit, riyolit, tüf.

Ergimiş silikat sıvısı olan magmanın yerkabuğunun derinliklerine sokulması ve orada uzun sürede, yavaş yavaş soğuması ile oluşan kayaçlardır. Yerkabuğuna sokulan magma yüzeye çıkmadan derinlerde soğursa silikat sıvısı içindeki elementler birbirleriyle birleşerek minareleri oluştururlar. Zaman öylesine uzundur ki magma sıvısının tümü kristalleşir. Böylece tümüyle kristalleşmiş yapıda kayaçlar (Holokristalin doku) oluşturur. Magmanın soğuma süresi ve yerleşme derinliği arttıkça kayacın mineral iriliği de artar. Granit, granodiyorit, siyenit, dünit, harzburjt, troktolit, gabro veya norit, serpantinit, piroksenit vs. gibi kayaçlar bu gruba örnek olarak verilebilirler (Yaprak, 2006). Derinlik kayaçlarını  $SiO_2$  sınıflamasına göre örneklersek;

Ultrabazik kayalar:	$SiO_2 > \%45$	harzburjit, dünit, serpantin
Bazik kayalar:	$SiO_2 = \%52-45$	gabro, norit, labradorit
Nötr kayalar:	$SiO_2 > \%66-52$	siyent, diyorit, monzonit
Asidik kayalar:	$SiO_2 > \%66$	granit ve granodiyorit

Asidik kökenli olan granit ve granodiyorit kayaları, diğer kayaç gruplarına göre yer kabuğunda yayılımları daha fazla olan kayalardır. Dünyada ve ülkemizde en iyi bilinen ve işletilen kayalar granitlerdir. Eski çağlardan beri insanlar bunları kolaylıkla bulup kullanmışlardır. (De Vecchi et al., 2000). Sağlam, dayanıklı, sert ve hava koşullarından az etkilenmeleri nedeniyle yüzyıllar boyunca dimdik ayakta kalan granitten yapılmış eserlere dünyanın birçok yerinde rastlamak mümkündür. Buna en iyi örnek, *Nil Granitinden* yapılmış olan Mısır Piramitlerinin yüzyıllardır ayakta durmasıdır. Dünyada birçok ülkede yaygın olarak bulunurlar. İtalya, İspanya, Portekiz, Çin, Hindistan, Baltık ülkeleri, Güney Amerika ve Kuzey Amerika'da işletilen ve dünya pazarlarına sunulan çeşitli granitler vardır. Rosa Porrino, bunların en iyi tanınanı ve en yaygın kullanılanıdır.

Türkiye'de işlenen birçok asidik derinlik kayacı bulunmaktadır. Ülkemizdeki asidik ve bazı nötr kayaların (Granit, Granodiyorit ve bazı Siyenitler) yayılımlarına dikkat edilirse bunların Türkiye'nin kuzey batısı ve Marmara denizinin güneyi, Orta Anadolu bölgesi Kırşehir- Nevşehir Bölgesi ve Türkiye'nin Kuzey doğusu, Doğu Karadeniz bölgesinde yer aldığı görülür. Bu bölgelerin dışında ülkemizde daha birçok yerde irili ufaklı granit ve granodiyorit sokulumlarına rastlamak olasıdır.

Ülkemizde işletilen asidik kayalar içinde en tanınanları, Ayvalık ile Bergama arasında işletilen gri renkli *Kozak Graniti*, Doğanşehir/Giresun'da işletilen *Karadeniz Gri*, Ortoklas kristallerinin rengi nedeniyle hafif pembe görümlü olan ve Kaman/Kırşehir de işletilen *Türk Lokumu*, Savcılı/Kırşehir'de işletilen Anadolu ve Epidotlu granit olan *Balaban Green* (Şekil 2.1), *Giresun Vizon*, *Kırşehir Kaman*, *Aksaray Nova*, *Aksaray Yaylak*, *Kır çiçeği pembe*, *Kır çiçeği*, *Anatolian Grey*, *Beypazarı* ve *Kaman Rosa* bilinen Türk granitleridir (Yaprak, 2006).



Şekil 2.1 Ülkemizde işletilen asidik kayaçların bazıları

## 2.5 Doğal Taşlarda Radyoaktivite

Uranyum ve toryum, magmatik ve metaformik kayalarda apatit, sfen ve zirkon gibi minerallerde bulunur (Tablo 2.15). Bunların içinde en yaygın bulunan mineral zirkondur. Magmatik ve metaformik kayaçlardaki zirkonların büyük çoğunluğu bu kayaların oluşumu sırasında kristalleşmiştir. Buna karşın sedimanter kayalar içerisindeki zirkonların tamamı, önceki bir kaynak kayasından türeme detritik (taşınmış kırıntı) kökenlidir. Kayaç içerisindeki % zirkon değerine bağlı olarak, bu minerallerden kaynaklanan uranyum konsantrasyonu granit gibi asidik magmatik kayaçlarda maksimum değere ulaşmakta ve bu değer bazik ve ultrabazik kayaçlara doğru minimum değere inmektedir.

Tablo 2.15 Taşıyıcı minerallerin uranyum içerikleri (Yaprak, 2006)

<b>Mineral</b>	<b>Uranyum Konsantrasyonu (ppm)</b>
Rutil	<100
Apatit	10-50
Sfen	100-1400 (genelde<500)
Epidot	<200
Allanit	Allanite 30-3000
Zirkon	100-3000 (alkali kayalarda 6000 a kadar çıkabilir.
Ksenotim	300-4000
Monazit	500-5000
Toriyanit	%1 (uranathorite % 25 e kadar çıkabilir.
Çoklu Nb-Ta-Ti-YREE oksitler	Genelde % 10 ( % 30 a kadar çıkabilir.
Uraninit	80%

Silisyumca zengin magmatik kayalarda  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$ ' dan yapıları majör oksit içerikleri %99'dan daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bunların yanı sıra, söz konusu kayalar ppm düzeyinde Mo, Zr, Sn, Th, Pb, Zn, W, Nb, V, F ve nadir toprak elementleri içermektedir. Buna karşın Ni, Co, Cr, Ag, Or, ve Ft gurubu metaller silisyumca fakir olan mafik ve ultramafik magmatik kayalarda zenginleşmekte olup bu kayalarla ilişkili maden yataklarının gelişimine neden olurlar. Bu elementlere aynı zamanda uranyum da eşlik etmektedir. Bu ilişki, uranyum yataklarının köken kayacının mafik magmatikler olabileceğini göstermektedir. Bu konu ile ilgili diğer bir gözlem de mafik kayaların asit karakterdeki kütlelerden genellikle çok daha az uranyum içermesidir. Uranyum kaynağının mafik kayalar olduğunu savunan araştırmacılar, bu özelliğin ilksel mafik magma içinde uranyumun bulunmadığı anlamına gelmeyeceğini, aksine bunun nedeninin, mafik kayaların mineralojik bileşimine giren minerallerin uranyumu tutup muhafaza edememesi, olduğunu ileri sürmektedirler. Bu görüşe göre uranyum, mafik bileşimdeki magmatik kayacı oluşturan ana minerallerin kafes yapısı içine kabul edilmediği için dışarı atılmakta, kayaç böylece uranyum yönünden fakirleşmektedir. Kayacı oluşturan minerallerin kafes yapılarına diadokh olarak yerleşemeyen uranyum, ana kayacın içerisindeki kırıklarda veya çevre kaya içerisinde kristalleşerek uranyum yatağını oluşturmaktadır. Bir görüşe göre

magmanın kristalleşmesi süreci sırasında, başlangıçta, uranyum ve halojenler gaz fazında ortamdaki uzaklaştırılmakta, toryum ise magmanın sıvı fazında tutulmaktadır. Bu nedenle pek çok uranyum yatağında, uranyum-flor beraberliği gözlenmektedir. Toryumca zengin hidrotermal damarlarının gangi ise karbonatlıdır(Rosholt et al., 1971).

Bazik ve ultrabazik kayalarda zirkon mineral içeriği minimumdur. Olivin gibi ultrabazik magmadan erken evrede kristalleşen mineraller, hemen hemen hiç toryum veya uranyum içermezler. Bazik kayaçların piroksen ve plajiyoklas gibi ana minerallerinin ve apatitin kristalizasyonu esnasında az miktarda uranyum ve toryum bu minerallerin kafeslerine girebilmektedir. Plajiyoklas serilerindeki kalsiyum kafes yapısının koordinasyon değerleri, uranyum ve toryumun izomorfik olarak kalsiyumun yerini almasını engellemektedir. Uranyum ve toryumun bazik magmadan kristalize olmamaları, bunların silisli magmalarda zenginleşmelerine sebep olur. Bundan dolayı daa çok silisli olan kayaçlar, oldukça çok miktarda uranyum ve toryum içerirler(Fairbridge, R, W, 1972).

Diğer yüksek radyoaktiviteye sahip mineraller ise monozit, uraninit, toriyanit, piroklordur. (Tablo 2.15) Bu mineraller doğada yaygın olarak bulunmasına rağmen kayalardaki içerikleri oldukça düşüktür.

Kırıntılı, magmatik ve metamorfik kayaçlardaki Th'un ana kaynağı monazit mineralidir. Bu mineral asidik magmatik kayalarda maksimum, ultrabazik kayalarda ise minimum değerlerde bulunmaktadır. Tortul kayalarda ise monazit minerali, bu kayaçların türedikleri kaynak kayacı ile doğrudan bağlantılıdır. Kireçtaşı ve onların metamorfik eşlenikleri mermerlerde Th minerali yine minimum değerlerde bulunmaktadır.

Çözünürlüğü uranyum ve potasyuma göre düşük olan toryum göreceli olarak daha stabildir ve rüzgar, erozyon gibi mekanik prosesler ile kayalardan ayrılmaz. Uranyum ise yüzeye yakın yerlerde hareketli olmaya eğilimlidir.

Tablo 2.16 Kaya türlerinin doğal radyonüklit içerikleri (Yaprak, 2006)

<b>Kaya Tipi</b>	<b>U(ppm)</b>	<b>Th (ppm)</b>	<b>K (%)</b>
Kabuksal değer	2.77	10	1.75
Ultramafik	0.001	0.003	0.5
Bazalt	0.6	2.2	0.8
Granodiorit	3	10	3.3
Andezit	2	-	-
Granit	4.8	17	3.3
Şeyl	4	12	2.7
Kumtaşı	2.2	-	1.1
Kireçtaşı	2	2	0.3

Metamorfik kayalardaki potasyumun ana kaynağı potasyum feldspat (Ortoklas-Mikrolin) ve beyaz mika (muskovit ve fengit) mineralleridir. Denizel kökenli kireçtaşlarından türeyen mermerlerde bu değer % 0-0,2 arasında değişmektedir. Asidik kökenli kaynak kayasından türeyen, dokusal olgunluğu düşük kırıntılardaki detritik kökenli feldspatlar, bu kayalardaki potasyumun kaynağıdır. Tablo 2.16' da belli başlı kaya türlerindeki ortalama  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  içerikleri verilmiştir (Taylor, 1964; Koljonen, 1992).

Jeolojik bir materyaldeki Th/U ve Th/K oranları bu materyalin jeokimyası hakkında bilgi vermektedir. Magmatik kayalardaki ortalama Th/U oranı 3,5 civarındadır. Kayalarda ve taşıyıcı minerallerdeki Th/U oranları Tablo 2.17' da verilmiştir.

Th/U oranının  $< 2$  olması uranyum zenginleşmesini,  $\text{Th/U} \geq 7$  olması ise uranyumun ortamdan kaçtığını göstermektedir. Bu oran, ortalama toryum ve uranyum içerileri oldukça farklı kayalarda bulunmuştur ve feldspat, kuvars gibi kayaç oluşturan ana minerallerde bulunan çok düşük konsantrasyonların tipik bir oranıdır. Tali minerallerde bu oran çok değişkendir. 4 değerli uranyum içeren mineraller suda erimezler, ancak nemli iklimlerde atmosferik etkenlerde kimyasal olarak, 6 değerli uranyum içeren ikincil minerallere dönüşürler. Bu dönüşme 4 değerli uranyumun 6 değerli uranyuma oksidasyonu sonucu olur. Yer altı su



tablasının üstündeki yüzey ve yüzeye yakın kısımlarda, oksidasyon şartlarında, uranyum 6 değerlidir. Oksijen en önemli etken olduğu sistemlerde 6 değerli uranyum 2 oksijen atomuyla beraber bulunur ve uranyil iyonu ( $UO_2^{++}$ ) halindedir. Uranyil iyonu, 4 değerli uranyumdan (uranus iyonu) bütünüyle değişik bir kimyasal türdür.

Tablo 2.17 Kayalarda ve taşıyıcı minerallerdeki Th/U oranları (Yaprak, 2006)

KAYA TİPİ	MAGMATİK	Granit	
		Granadiorit	3.5 - 6.3
	Riyolit		
MAGMATİK	Gabro	4.3	
	Bazalt	1-5	
	Ultramafik	Değişken	
	Gnays	1-30	
METAMORFİK	Şist	$\geq 3$	
	Fillit	2.9	
	Sleyt	2.8	
	SEDİMANTER	Kireçtaşı	< 1
Dolomit		-	
Kil		0.4-10	
Siyah Şeyl		Düşük	
MİNERALLER	Peşblend	0.001/0.00002	
	Uraninit	0.1/0.016	
	Brannerit	0.033	
	Pikroklor	0.33	
	Betafit	0.05	
	Zirkon	2/0.1	
	Toriyanit	10/5	
	Monozit	10	
	Sfen	10	
	Allanit	5	

Jeokimyasal bakımdan en önemli ayrıcalık da, uranil bileşikleri halindeki ikincil minerallerin, 4 değerli uranyum içeren birincil minerallerden daha çok eriyebilirliğe sahip olmasıdır. Bundan dolayı da 6 değerli uranyum bu minerallerden, uranil iyonları halinde nötr yakın pH' lı sularda kolayca solüsyona geçer ve yer altı

sularıyla uzun mesafelere taşınır. Redükleyici ortamlara girildiğinde ise 6 değerli uranyum, 4 değerli uranyuma redüklenerek uraninit veya peşblend halinde tekrar çökeler ve çeşitli tip sedimanter uranyum yataklarını meydana getirir.  $U^{+4}$  iyonunu eriyik halde tutabilmek için ise muhtemelen 4' ten aşağı bir pH gereklidir. Granitik kayaçlar ve silisli tüfler yüksek uranyum içerikleri dolayısıyla yeraltı suyuna geniş ölçüde uranyum sağlarlar.

Yer kabuğunda magmatik kayaçlarda saçılmış halde bulunan toryum, alterasyon ve erozyon esnasında uranyumun aksine erimez ve yüzey veya yeraltı suları ile taşınmaz. Her ne kadar toryum, pH değeri 3'ten aşağı olan solüsyonlarda hidrolize olursa da  $Th^{+4}$  iyonunun yüksek iyonik potansiyeli dolayısıyla, solüsyona geçmiş haldeki toryum hızlı bir şekilde absorbe edilir veya hidrolizatlar halinde çökeler. Yeraltı suyunda çok az miktarda toryum, ancak koloidal ve organik anyon kompleksleri halinde taşınır. Toryumun magmatik kayaçlardan çeşitli ortamlara taşınması, ancak fiziksel taşınma yoluyla gerçekleşebilir. Magmatik kayaçlardan alterasyon sonucu açığa çıkan ve serbest kalan dayanıklı toryum minerallerinin (özellikle monazit) kırıntı (detritik) olarak taşınıp, uygun ortamlarda biriktirilmesi sonucu çeşitli plaser (kırıntılı) yataklar meydana gelir (Fairbridge., 1972).

Th/K oranı mika ve feldspatların yapısı hakkında bilgi verir. Th/K artışı kil oranının göstergesi olarak kabul edilmektedir. Ortamda bulunan kil minerallerinin ve organik maddelerin uranyum cevherleşmesinde bir katalizör görevi yaptıkları düşünülmektedir.

## 2.6 Doğal Taşların Radyolojik Risk Açısından Değerlendirilmesi

Dünyadaki teknolojik ve bilimsel gelişmeye paralel olarak insanoğlunun hayat ve yaşam anlayışı da değişmiş ve değişmeye devam etmektedir. Bu gelişmeler insanoğlunun çevre bilinciyle birlikte, daha sakin ve doğal ortamlarda yaşama arzusuna ve özlemine yönlendirmektedir.

Gelişmiş ülkelerin büyük kentlerinde insanları doğaya yaklaştırmak eğilimi, doğal yapı taşlarının bina yapımı ve dekorasyonunda kullanımını hızla yaygınlaştırmıştır. Ancak bir önceki bölümde sözü edildiği üzere doğada bulunan birçok materyal gibi doğal taşlarda  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve bozunum ürünleri ile birlikte  $^{40}\text{K}$  içermektedir.

Genelde, U, Th, ve K radyoelementlerinin doğal taşlardaki aktivite konsantrasyonları, metamorfik ve sedimanter (fosfatlı kayalar hariç) kökenli kayalarda magmatik kayalara oranla oldukça düşüktür. Uranyum ve toryumun bazik magmadan kristalize olamamaları, bu radyonüklitlerin granit gibi asidik magmatik kayalarda zenginleşmesine neden olmaktadır. Bu doğrultuda, granit gibi doğal yapı taşlarında gözlenen ortalama U konsantrasyonu 5 ppm ve Th konsantrasyonu 15 ppm olarak rapor edilmektedir (Tzortsiz. 2003).

Dünyada bina yapım dekorasyonu amacıyla kullanılan granit örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları, Tablo 2.18’de verilmiştir.

Tablo 2.18 Granit örneklerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları (Yaprak, 2006)

Ülke	Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonu (Bq/kg)			Kaynak
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	
Belçika		77±2	1129±44	Tzortzis et al., 2003
Brezilya	24±1	37±1	1173±30	Pavlidou et al., 2006
Brezilya		17-906	1021-1606	Tzortzis et al., 2003
Finladiya	60-170	57-354	1350-1592	Pavlidou et al., 2006
Hindistan	11±1	84±2	926±3	Pavlidou et al., 2006
Hollanda		490±13	1540±60	Tzortzis et al., 2003
Hong-Kong	180±31	122±5	1248±15	Tso et al., 1994
İspanya	11-163	43-109	1190-1420	Pavlidou et al., 2006
İtalya		21-172	1047-1581	Tzortzis et al., 2003
Yugoslavya		> 300		Pavlovic et al., 1996
Yunanistan	64	81	1104	Pavlidou et al., 2006
Yunanistan	2-195	1-450	50-3800	Stoulos et al., 2003
Dünya Ort.	42	73	1055	Chen and Lien., 1996

## BÖLÜM ÜÇ

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Çalışma Alanı ve Genel Jeolojik Yapısı

##### 3.1.1 Kozak Plütonunun Yeri ve Konumu

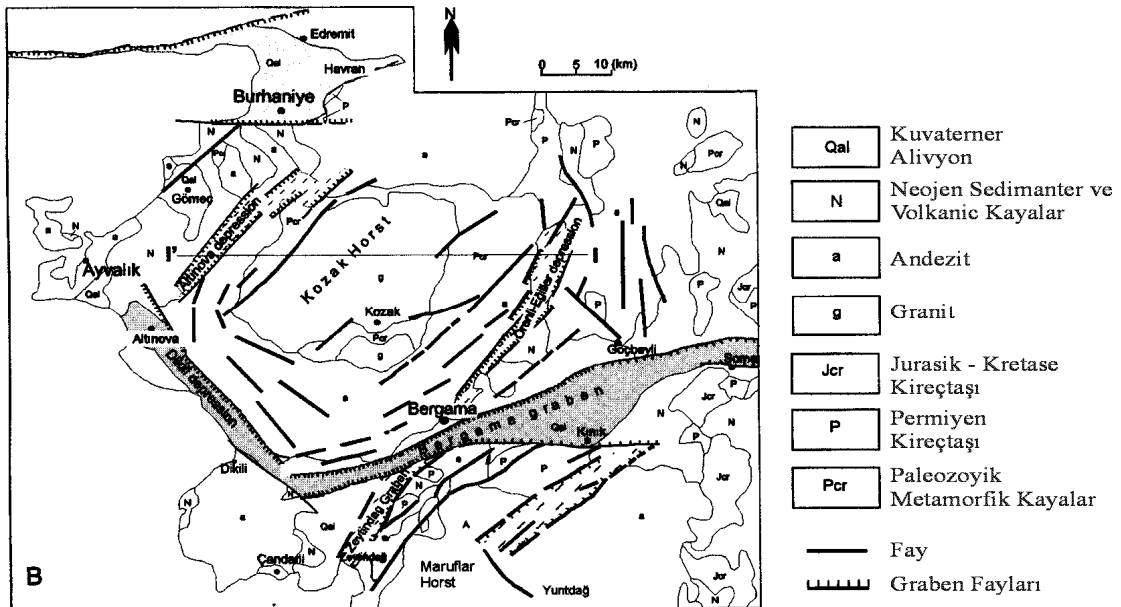
Kozak dağı magmatik kompleksi, Kuzey Anadolu Fayı'nın güneyinde Paleozoyik yaşlı metamorfik ve metamorfik olmayan kayalar içine yerleşmiş birden fazla sokulumlardan biri olup Türkiye'nin en batı ucunda Ayvalık, Bergama ve Burhaniye üçgeninin içinde yer almaktadır (Şekil 3.1)

Kozak plütonunu yerleşimi ile başlayan magmatik aktivite geç Oligosen - Erken Miyosen boyunca etkin olmuştur. Plüton yarı derinlik eşdeğerleri çevresinde gözlenmektedir. Kısmen erken Miyosen boyunca granitin bölgeye yerleşimi ile eş yaşlı olan volkanik kayalar tarafından çevrelenmiştir (Yılmaz et al., 1996).

Yılmaz et al., (1996) tarafından yapılan çalışmalarda arazi ve petrografik özelliklerine göre üç farklı plütonik kaya grubu ayırt edilmiştir: (a) Kozak granodioriti; (b) aplogranit (ince taneli ve açık renkli granodiorite); ve (c) microgranite. İçinde saçınmış halde mafik mikrogranular anklavlar içeren plüton birçok aplitik ve pegmatitik damarlar tarafından kesilmiştir. Yankaya ile dokanak yaptığı kesimlerde aplitik damarların sayıları fazlalaşmaktadır.

Kozak Plütonu, Alt Triyas yaşlı yeşil şist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş Çavdarstepe Formasyonu, metaspilit, metadiabaz, albit diabaz ve bunların tüflerinden oluşan Kocaçukur üyesi ile kısmen ilksel özelliklerini korumuş metakonglomera, metakumtaşı, mateçakıltaşı, metaçamurtaşı, kumlu kireçtaşı, kumtaşı, aglomera ve metavolkanitten oluşan Kınık Formasyonu içine sokulmuştur (Akyürek, 1989). Kozak plütonu çevresinde gözlenen granodiorit porfir daykları genellikle Alt Triyas

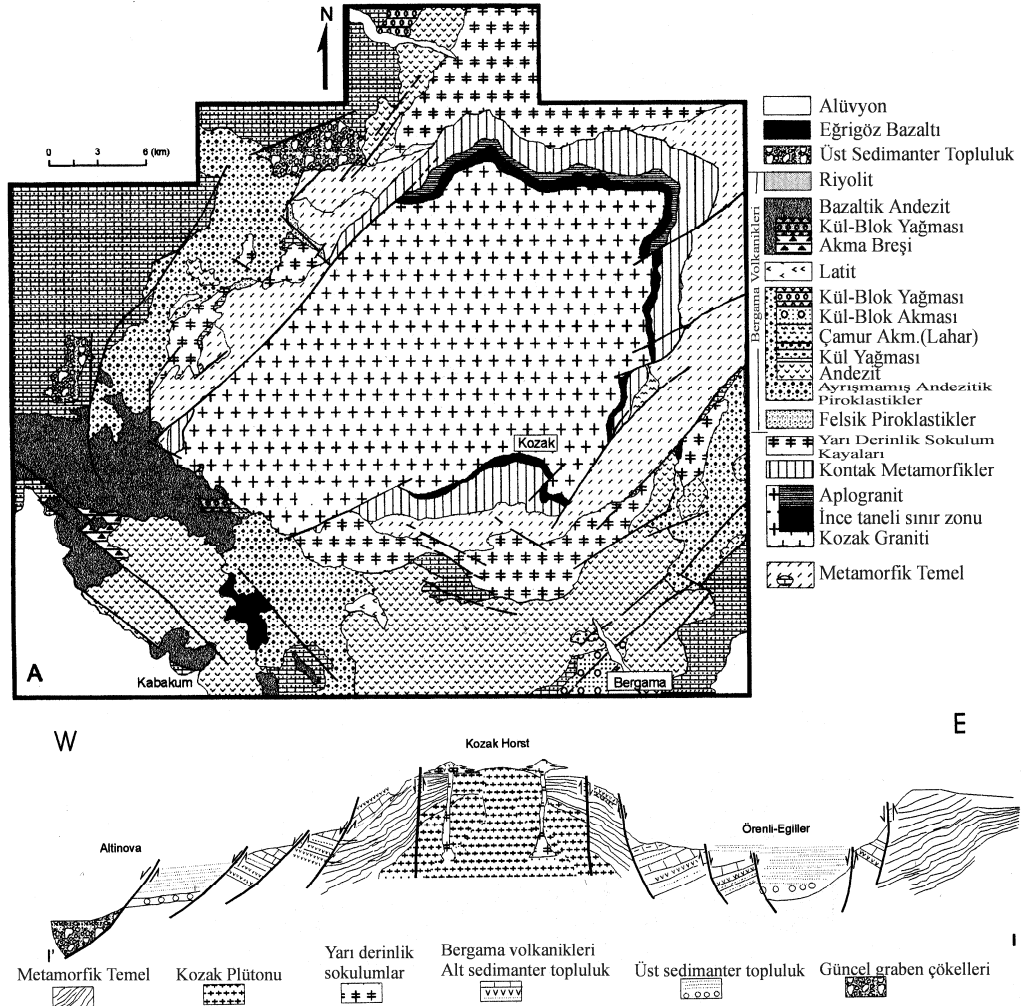
yaşlı çökelleri yer yer keserek kontak metamorfik etkiler geliştirmişlerdir (Ercan et al., 1984).



Şekil 3.1 Bergama grabeninin ve çevresinin tektonik haritası ( Yılmaz ve diğ., 2001).

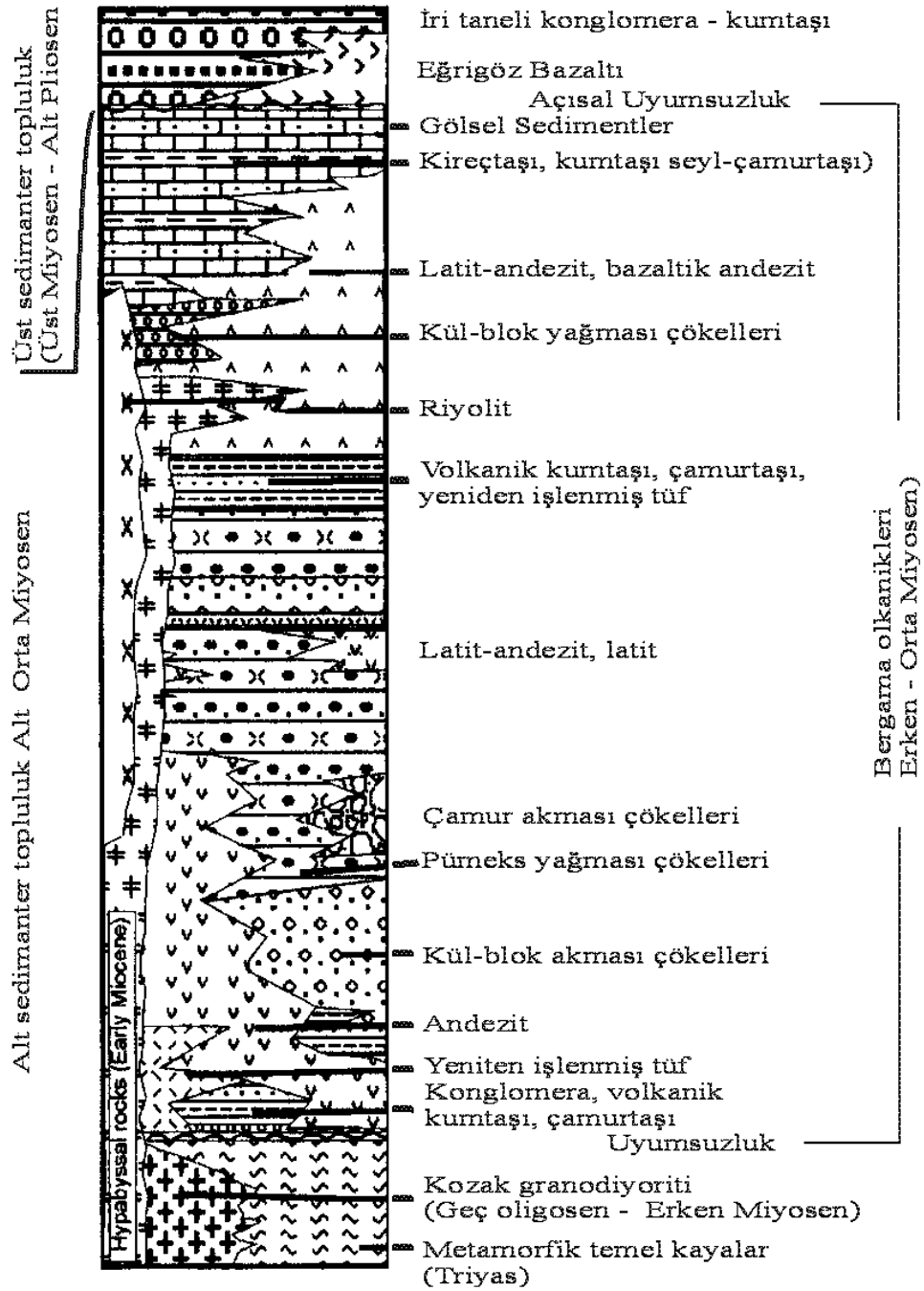
Plütonun bölgeye yerleşimini takip eden evrede gelişen volkanik faaliyetler sonucu dasit ve andezit bileşimindeki volkanik kayalar granit - adamellit - gnanodiorit bileşimindeki kayaları ile metamorfik temel kayaları örtmüşlerdir (Yılmaz et al., 1996). Plüton etrafında geniş alanlar kaplayan volkanik kayalar andezit - latit andezit - dasit - riyodasit ve bunların tüflerinden oluşmaktadır. Akyürek ve Soysal (1983) tarafından Yuntdağı voklanitleri olarak adlandırılan kayaların Borsi et al. (1972) tarafından K/Ar yöntemi çalışmaları ile 16,7 - 17,3 - 17,6 - 18,5 milyon yıl, Benda et al. (1974) ise  $18.1 \pm 0.3$  -  $1,2 \pm 0.4$  milyon yıllık yaşlar bulmuşlardır. Kozak plütonuna ait ilk yaş tayini Bürküt (1966) tarafından toplam radyojenik kurşun yöntemi ile zirkonlardan yapılmış ve  $79,8 \pm 8$  milyon yıl olarak saptanmıştır. Daha sonraki yıllarda yapılan çeşitli çalışmalarda, plütonun'nun bölgeye yerleşim yaşı İzdar (1968) tarafından Paleozoyik sonu - Alt Jura öncesi, Akyürek'e (1989 a - b) göre Alt Triyas sonrasıdır. Ataman (1975), Rb/Sr yöntemiyle 13, 16.5 ve 23 milyon yıl, Bingöl ve diğ. (1982) ise K/Ar yöntemiyle biotitlerden yaptığı analizlerde  $20.3 \pm 3$  ile  $24.6 \pm 1.5$  ve ortoklaslardan yaptığı analizlerde ise  $24.2 \pm 1.1$  ve  $37.6 \pm 3.3$  milyon yıl olarak saptanmıştır.

### 3.1.2 Kozak Granitoidi



Şekil 3.2 Kozak dağıının ve çevresinin jeolojik haritası ve jeolojik kesiti (Yılmaz et al., 2001) (Bölgenin geliştirilmiş stratigrafik istifi Şekil 3.3 te verilmektedir).

Kozak plütönu içinde genelde saçınmış olarak yer alan mafik microgranular anklavların plütönu orta ve yankaya ile dokanak yaptığı kesimlerinde yoğunlaştığı gözlenmektedir. Elipsoidal şekilli mafik mikrogranular anklavların boyutları 2cm ile 1.5 metre arasında değişmektedir. İri mafik microgranular anklavlara ana kayanın çevre kaya ile dokanak yaptığı kesimlerde rastlanmaktadır ve plütönu kesen aplitik damarlar anklavlarında kesmektedirler.



Şekil 3.3. Kozak bölgesinin geliştirilmiş stratigrafik istifi (Altunkaynak et al., 1998).

Bergama ilçesinin kuzey batısında yer alan ve adını Kozak kasabasından alan plüton Kozak dağının merkezinde 300 km<sup>2</sup> lik bir alanda yüzlek vermektedir (Şekil 3.2). Eliptik bir şekle sahip olan plütonunun uzun eksini GB-ND uzanımlıdır. Baskın kayaları geçişli bir dokanak sunan granodioritler ve granitler oluşturmaktadır. Genelde orta taneli olan plüton içinde ince taneli mikrogranodioritik kesimler yer

almaktadır ve özellikle Çamavlu Köyü çevresinde gözlenmektedirler. Mikrogranodiorit ana kayaya göre daha felsiktir. Oldukça sık rastlanabilen aplitlerin kalınlıkları 2 cm - 2.5 m arasında değişirken yüzlek verdikleri kesimlerde uzunlukları maksimum 50 m' ye ulaşabilmektedir. Plüton içinde değişik doğrultular sunan aplitlerin çeperlerinde pegmatitik damarlar gelişmiştir. Aşağıcumalı kuzeyinde ve Çamavlu köyü içinde büyük aplitik damarlar yer almaktadır. Kozak plütonunun içine sokulduğu çevre kayalarla dokanak yaptığı kesimlerinde, her ikisini kesen kalınlıkları maksimum 2 cm ile 40 cm arasında değişen ince uzun birçok aplitik damar bulunmaktadır. Bu aplitik damarların içlerinde ve çevresinde ince pegmatitik oluşumlar bulunmaktadır.

Kozak plütonu içinde, genişlikleri ve uzunlukları değişken olan pegmatitik damarların yanı sıra sayıları fazla olmayan mercek ve/veya jeod şeklinde pegmatitik oluşumlar bulunmaktadır. Bunların boyutları 10 - 50 cm arasında değişmektedir. Aplitleri ana kaya ile olan dokanakları boyunca gözlenen pegmatit damarlarının mineral bileşimlerini potasyum feldispat, sodyum feldispat, kuvars, biotit, turmalin, topaz ve pirit kristalleri oluşturmaktadır. Mercek ve/veya jeodlar şeklindeki pegmatitik oluşumların mineral bileşimleri zengin olup özşekilli kristaller halinde potasyum feldispat, sodyum feldispat, kuvars, topaz epidot, granat, turmalin, zeolit ve kalsitleri içermektedir.

Kozak granodiyorit'nin genel mineral bileşimi kuvars, plajiyoklas, ortoklas, biotit, hornblend, sfen, allanit (ortit), apatit, zirkon, opak mineralden oluşan granitoidin bileşimindeki kloritler biotitlerin, kalsitler ise plajiyoklasların alterasyon ürünleridir. Plütonu oluşturan orta ve ince taneli kesimlerin mineral bileşimleri aynı olup ince taneli ve mikrogranit olarak adlandırılan kesimler daha felsiktirler. Holokristalen allotrimorf / hipidiamorf taneli doku sunan granitoid içindeki aplitik damarlarda poligonal doku gözlenmektedir. Orta taneli olan granitoidin kuzey-kuzeybatı kesimlerinden alınan örneklerden yapılan kesitlerde ortoklaslar porfirler halindedir.

Metamorfik çevre kayaları kesen fay düzlemlerini kullanarak yükselen Kozak granodiyoriti sığ sokulumlu bir plüton olup granodiyoriti çevreleyen yarıderinlik ve



volkanik kayalar plüton ile benzer petrokimyasal özelliklere sahiptirler. Plütonun metamorfik temel ile dokanak yaptığı kesimlerde özümsememiş köşeli yapılar sunan metamorfik seriye ait ksenolitler gözlenmektedir ve plütonun üstünde yükselim sırasında kalmış metamorfik yamalar yer almaktadır (Altunkaynak et al., 1998).

### **3.1.3 Bergama Volkanikleri**

Metamorfik temeli uyumsuzluk ile örten volkanik topluluk dasit-riyolit den bazaltik andezite kadar farklılıklar sunan volkanik kayalardan ve piroklastiklerinden oluşmaktadır. Altunkaynak et al. (1998) tarafından yapılan çalışmalarda volkanik seriyi oluşturan magmanın kompozisyonunun ilerleyen bir değişim ile alttan üste doğru farklılıklar sunduğu belirtilmektedir. Seri tabanda riyolitik ve dasitik kompozisyondaki felsik volkanikler ile başlamaktadır. Üste doğru ortaç nitelikteki andezit ve latitler ile bunlara eşlik eden piroklastiklere geçilmektedir. Volkanik serinin en üstünde bazaltik andezit ve bazaltik trakiandezit lav akmaları yer almaktadır (Şekil 3.3).

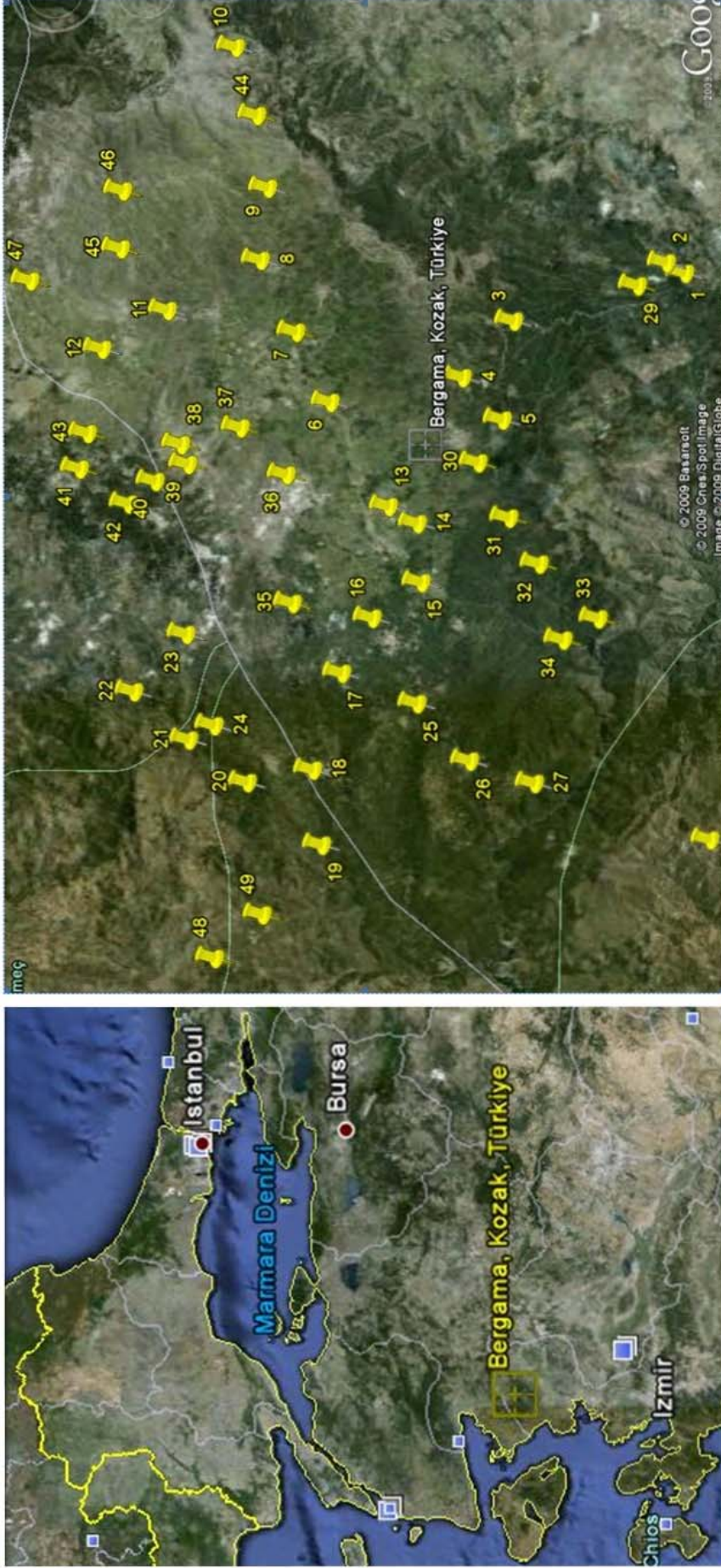
Asidik ve ortaç karakterdeki volkaniklerden erken – orta Miyosen'e karşılık gelen 20.8 ile 15 my arasında yaşlar elde edilmiştir (Borsi et al., 1972; Benda et al., 1974; Krushensky, 1976, Ejima et al., 1987).

## **3.2 Toprak ve Granit Örneklerinde <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K Radyonüklit Analizi**

### **3.2.1 Örnekleme**

Yukarıda verilen genel jeolojik yapıya dayalı olarak **Kozak/Bergama** granit alanını kapsayan çalışma bölgesinde, bu alana temel teşkil eden granit kayalar ve yüzey toprakları, granit masifi temsil edecek şekilde alınmıştır. Granit kayalar yaklaşık 3-5 kg olacak şekilde 11 bölgeden örneklenmiştir.

Toprak rnekleme için bölgenin 1/100.000'lik jeolojik haritası 3x3 km'lik alanlara bölünerek karelaj yapılmıştır. rnek yoğunluğunun yaklaşık 1/10km<sup>2</sup> olduğu bu çalışmada her bir örnekleme noktasında; toprak örnekleri, yüzeyden 0-10 cm derinliğe kadar alınmış, yerinde yüzey gama ölçümleri yapılmış ve sistematik örnekleme noktaları GPS (global position system) ile belirlenerek her bir örnekleme noktası için tanıtım kartı düzenlenmiştir. Buna göre, 38° 41' 05" ve 37° 53' 08" kuzey enlemleri ile 28° 41' 36" ve 26° 11' 48" doğu boylamları arasında bulunan bölgeden alınan toplam 49 yüzey toprak örneğinin konumu Şekil 3.4' de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Toprak örneklerinin alındığı noktalar

### 3.2.2 Örnek Hazırlama

Araziden alınan toprak örnekleri açık havada birkaç gün bırakıldıktan sonra etüvde 105° C'de sabit ağırlığa varıncaya kadar (24-48 saat) kurutulmuş ve 2 mm' lik elekten geçirilmiştir. Örneklenen granit kayaçlar, DEÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümünde hidrolik pres yardımıyla önce parçalara ayrılmış daha sonra çeneli kırıcı ile istenilen boyutta küçültülerek radyometrik ölçümler için hazırlanmıştır. Daha sonra 1 L' lik Marinelli kaplara (Şekil 3.5) yerleştirilen toprak ve kayaç örnekleri, radyum ( $^{226}\text{Ra}$ ) ve radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) arasındaki radyoaktif dengenin oluşması için ölçümlerden önce 4 hafta süre ile bekletilmiştir.



Şekil 3.5 Gama spektroskopik ölçümler için hazırlanan toprak örneği

### 3.2.3 HPGe Gama Spektrometre Sistemi ile Doğal Radyonüklit Analizi

Gama spektroskopisi günümüzde çok çeşitli analiz işlemlerinde başarıyla ve çoğu zaman diğer analitik yöntemlere, hatta bazen diğer nükleer analiz yöntemlerine dahi tercih edilerek kullanılmaktadır. Bu analiz tekniğinin en önemli özellikleri şu şekilde özetlenebilir (Yener ve Yaprak, 1988):

- (i) Gama spektroskopisi bir örneğin içinde bulunan radyoaktif atomların yayınladığı gama ışınlarını enerjilerine göre ayırarak dedeksiyon esasına dayanır ve örneklerin hiçbir işleme tabi tutulmadan yani bozulmadan analizi mümkün olur.
- (ii) Gama ışınları yüksek enerjili elektromagnetik dalga olduğundan madde içinden geçerken intensitelerinin azalması çok az olur, dolayısıyla örnek içindeki self-absorbsiyon ihmal edilecek kadar önemsizdir. Bu nedenle sayım istatistiğinin iyi olması ve analiz süresinin kısaltılması amacıyla örnek miktarı büyük tutulabilir.
- (iii) Bir ölçümle, bir örnek içinde bulunan birçok elemente ait gama verici izotoplar aynı anda gözlenebilir.

Bir gama spektrumunda bir fotopikin altındaki alan, gama dedektörünün o enerjide algıladığı gama ışını sayısına eşittir ve bu sayı örnek içinde, o enerjide gama ışınını veren radyoaktif atom sayısı ile orantılıdır. Fotopikin altındaki sayımdan, sistemin geometri faktörü, dedektörün seçilen gama enerjisindeki verimi, spektrometrenin ölü zamanı, gamanın çekirdekten çıkış intensitesi gibi faktörler dikkate alınarak ve uygun standartlar kullanılarak örnekteki aktivite ve radyoaktif atom sayısı bulunur.

Gerek uranyum gerekse toryum radyoaktif olmalarına rağmen (her ikisinde alfa vererek parçalanırlar) doğrudan doğruya yayınladıkları radyasyon ölçülerek gözlenemezler. Çünkü yarı ömürleri çok uzun dolayısıyla birim zamanda yaptıkları parçalanma olasılığı  $\lambda$  ve buna bağlı olarak yayınladıkları ortalama radyasyon sayısı çok düşüktür. Parçalanma olasılığı Uranyum-238 için  $1,54 \times 10^{-10}$  parçalanma/yıl, Toryum-232 için  $4,98 \times 10^{-11}$  parçalanma/yıldır. Bu nedenle Uranyum ve Toryumun dedeksiyonu bozunma zincirleri içindeki radyoaktif ürünlerine ait aktivitelerin ölçülmesi suretiyle yapılır. Zincir içinde radyoaktif dengenin varlığı kabul edilerek ürün aktivitesi ana çekirdek aktivitesine eşitlenerek ana element konsantrasyonunu bulmak mümkün olur.

Doğal bir jeolojik örneğin çok kanallı gama spektrumunda uranyum ve toryum serilerinin bütün bozunma ürünlerinden gelen gama ışınları ile K-40 ın gama ışımına ait piklerin hepsi bir arada yer alır. U ve Th saptanmasında spektrumlarda, her seriye ait bir ürünün bir gama ışınını dikkate alarak analiz yapmak yeterlidir. Kontrol amacı ile birden fazla gama ışını da kullanılabilir. Kullanılacak ürün ve gama pikleri seçilirken ürün yarı ömrü, gama ışınının çekirdekten yayılma intensitesi ve enerjisi ile spektrumdaki diğer gama ışınları ile interferans olasılığı gibi faktörler dikkate alınmalıdır ve kompleks olmayan pikler seçilmelidir. Tablo 3.1 ve 3.2’de görüldüğü gibi U-238 serisinde Bi-214 ve Pb-214,Th-232 serisinde ise Tl-208, Bi-212 ve Pb-212 izotopları en uygun gama verici ürünlerdir. Analizlerde kullanılacak en elverişli gama ışınları ise Bi-214 e ait 1.76 MeV ve Tl-208 e ait 2.61 MeV enerjili ışınlardır. K-40 ın zaten tek bir 1.46 MeV lik gama ışını vardır.

Tablo 3.1 U-238’in bozunma ürünlerinin en belirgin gama ışınları

İzotop	Gama enerjisi (MeV)	İntensite (%)
<sup>214</sup> Pb	0,2419	7
<sup>214</sup> Pb	0,2952	18
<sup>214</sup> Pb	0,3520	35
<sup>214</sup> Bi	0,6094	43
<sup>214</sup> Bi	1,1204	15
<sup>214</sup> Bi	1,7647	15
<sup>214</sup> Bi	2,2045	5
<sup>214</sup> Bi	2,4480	1,5

Tablo 3.2 Th-232’nin bozunma ürünlerinin en belirgin gama ışınları

İzotop	Gama enerjisi (MeV)	İntensite (%)
<sup>212</sup> Pb	0,2386	45
<sup>228</sup> Ac	0,3385	12
<sup>208</sup> Tl	0,5107	9
<sup>208</sup> Tl	0,5831	30
<sup>212</sup> Bi	0,7272	7
<sup>228</sup> Ac	0,9111	29
<sup>228</sup> Ac	0,9667	23
<sup>208</sup> Tl	2,6147	36

Bir örnek veya standarda ait spektrumda, seçilen gama piki altındaki alan örnek veya standarttaki o gamayı veren radyoaktif atom sayısı ile orantılıdır. Aynı şartlarda

alınan örnek ve standart spektrumlardaki pik alanlarının karşılaştırılması suretiyle örnek içindeki radyoizotop konsantrasyonuna geçilir.

### 3.2.3.1 Radyoaktif Denge

U-238 ve Th-232 gibi radyoaktif serilerde, daimi dengeye, seride oluşan ürün atom sayısı radyoaktif bozunum yoluyla kaybedilen ürün atom sayısına eşit olduğunda varılır. Bir örnek içindeki atomların ardı ardına radyoaktif bozunmasında zincirin ana nüklidine ait çekirdek sayısı  $N_1$ ; bu çekirdeğin saniyede parçalanma olasılığı (bozunma sabiti)  $\lambda_1$  ise radyoaktif parçalanma yoluyla  $N_1$ 'de meydana gelen azalma  $N_1$  ile orantılıdır ve

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

ile ifade edilir.  $N_1$ ' in ilk bozunum ürünü  $N_2$  ve bozunum sabiti  $\lambda_2$  ise,  $N_2$  atomları  $\lambda_1 N_1$  ile artarken,  $\lambda_2 N_2$  ile azalır.

Benzer şekilde  $N_2$ 'den sonra gelen bozunma ürünleri için bozunma sabitleri ve  $N$ ' ler cinsinden yazılan diferansiyel denklemler takımının çözümleri aktivitelerle  $\lambda$ ' lar arasındaki ilişkileri verir.

Bir bozunum zincirinde ana çekirdek ömrünün, ürün ömrüne göre ( $\tau_1 \gg \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$  veya  $\lambda_1 \ll \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ ) çok uzun olması halinde belli bir süre sonunda, bir ürünün radyoaktif parçalanma ile kayıp hızı oluşum hızına eşit olur. Aşağıdaki eşitlikle verilen bu durum, radyoaktif bozunum serileri için daimi denge koşuludur.

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \lambda_n N_n$$

Bu bağıntı göz önüne alınan bozunum zincirinde ürün aktivitesini ölçerek, ana aktivitesinin bulunabileceğini ifade eder. Ancak böyle bir ölçmenin yapılabilmesi için gerekli koşul daimi dengenin bozulmamış olmasıdır. Ana atomun veya ürünlerin

bir veya birden fazlasının radyoaktif parçalanma dışında herhangi bir yolla kaybedilmesi durumunda yukarıdaki eşitlik geçersiz olur ve radyoaktif dengesizlik oluşur. Eğer bir nüklid kısa ömrü ile ortamdaki uzaklaşırsa denge hızla yenilenebilir, fakat uzun yarı ömürlü bir nüklid ortamdaki kalkarsa, bozunum zincirinde bütün üyeler arasında dengenin tamamlanıp yenilenmesi ürünlerin yarı ömürlerine bağlı olarak milyonlarca yıla kadar varan çok uzun süreler alabilir (Yaprak, 1995).

Bir radyoaktif seride, denge bozulmuş ise dengenin yeniden sağlanması için gereken süre, o serinin en uzun yarı ömürlü ürününün yarı ömrüne bağlıdır. Bu süre yaklaşık 6-7 yarı ömür kadardır.

Uranyumun, bozunum zincirindeki üyeleri ile arasındaki denge, serideki iki uzun yarı-ömürlü nüklid U-234 ( $t_{1/2}=250000$  yıl) ve Th-230 ( $t_{1/2}=80000$  yıl) nedeniyle  $10^6$  yıldan daha fazla zaman alırken, Th-232 ile bozunum ürünleri arasındaki radyometrik denge yaklaşık 40-50 yılda kurulur. Bunun nedeni toryum serisindeki ürünlerin U-238 serisindeki ürünlere göre daha çok kısa yarı ömürlü olmalarıdır.

Toryum serisinde en uzun yarı ömürlü ürün  $t_{1/2}= 6.7$  yıl ile Ra-228' dir. Bu yüzden çoğu jeolojik örnekte toryum serisinin dengede olduğu varsayılır. Herhangi bir metamorfik olay ile seri jeolojik olarak hemen denge durumuna döner.

Th-232'nin aksine U-238 serisinde radyometrik dengesizliğin çok yaygın olduğu bilinmektedir. Uranyum bozunum ürünlerinin jeolojik olarak bile uzun sayılan yarı ömürleri ile aynı ortamdaki farklı fiziksel ve kimyasal davranışları bu dengesizliğin en önemli nedenidir. Bu yüzden radyoaktif bozunum dışında ürünlerden birinin veya birkaçının kaybedilmesi ile sonuçlanan dağınlıkta denge kolay tamir edilemez ve radyometrik dengesizlik oluşur (Yaprak ve Yener, 1990; Yener ve Yaprak, 1988).

Uranyum bozunum zincirinde, uranyum grubunun ilk üç üyesi arasında (U-238 – Th-234 – Pa 234) radyoaktif denge bir yıldan az sürede kurulur. U-234 ile U-238 aynı kimyasal özelliklere sahip olduğundan, genelde doğada uranyum grubunun ilk dört üyesi arasında radyoaktif dengenin sürdüğü varsayılır.



Uranyum bozunum zincirinde ilk kırılma Th- 230' dan kaynaklanır. U- Th kimyasındaki farklılık ve Th- 230' un uzun yarı-ömrü ( $t_{1/2} = 80000$  yıl) bu dengesizliğin en büyük nedenidir.

Bozunum zincirindeki ikinci önemli kırılmayı ise 1600 yıl yarı-ömürlü ve toprak alkalilere benzer kimyası ile Ra-226 ve bozunum ürünü Rn-222 oluşturur. Rn-222, 3.85 gün yarı ömürlü asal bir gazdır ve gözenekli ortamda 1.6 m olan difüzyon uzunluğu ile sistemden kaçma olasılığı çok fazladır.

Son grubun ilk üyesi olan Pb-210' a 22 yıl yarı ömrü ve önünde yer alan Rn-222 hareketliliği jeokimyasal bağımsızlık kazandırmaktadır. Gelişen bu dengesizlikler sonucunda, uranyumla ürünleri arasında radyoaktif bozunum yasasına göre önceden tahmin edilen aktivite oranları olmayacağından , ürün aktivitesinin ölçülmesi ana element hakkında geçerli bilgi sağlamayacaktır. Bu nedenle radyometrik ölçümlerde uranyumla ürünleri arasındaki denge durumunun mutlaka dikkate alınması gerekir.

### 3.2.3.2 Çalışmada Kullanılan Gama Spektrometre Sistemi

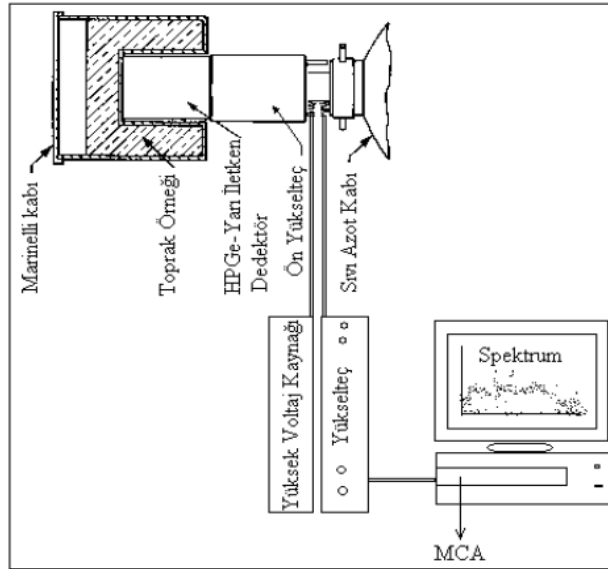
Çalışmada kullanılan gama spektrometre sistemi (Şekil 3.6); 184 cc HPGe koaksial dedektör (dedektör verimi: %25,  $^{60}\text{Co}$ 'ın 1.33 MeV gama enerjisi için FWHM: 1.83 keV ve pik/compton oranı: 57:1), Ortec Model-671 spektroskopi amplifikatörü ve Canberra PC bazlı MCA'dan (8 K Wilkinson ADC) oluşmuştur ve 100 mm kurşun ile zırhlanmıştır. Toprak ve kayaç örneklerindeki  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları, sırası ile 1764 keV ( $^{214}\text{Bi}$ ), 2614keV ( $^{208}\text{Tl}$ ) ve 1461 keV gama enerjilerinden yararlanılarak ölçülmüştür. Sayım sistemi için minimum dedekte edilebilen aktivite (MDA), iyi bilinen art ortam için Currie kriterleri kullanılarak,

$$MDA = \frac{2.71 + 3.29\sqrt{BG}}{K}$$

eşitliği uyarınca hesaplanmıştır (Curie, 1968; Yaprak

2009). Kalibrasyon faktörü mevcut örnek geometrisi ve sayım süresi için dedektör verimini de içeren sistem parametresidir. Toprak örnekleri için kullanılan 1 L Marinelli geometrisinde ve 10 000 s sayım süresi için saptanan MDA'ler  $^{226}\text{Ra}$  için 2 Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  için 1 Bq kg<sup>-1</sup> ve  $^{40}\text{K}$  için 4.36 Bq kg<sup>-1</sup>' dir. Toprak örneklerinin gama

spektrumları 1-3000 keV enerji aralığında 10 000 s süre ile alınmıştır. Background spektrumları düzenli olarak kaydedilmiştir. Radyometrik sayım hatası, analiz edilen tüm toprak ve granit örneklerinde %10'dan küçüktür.



Şekil 3.6 Çalışmada kullanılan sayım sistemi diyagramı (Saç, 2003).

### 3.2.3.3 Analitik Kalite Kontrolü

Gama spektrometre sisteminin analitik kalite kontrolü, IAEA ve Amersham kaynaklı standard referans materyallerden, örneklerle benzer matris ve geometride (1 L Marinelli kapları için) hazırlanan standartlar kullanılarak yapılmıştır.

## BÖLÜM DÖRT

### DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bergama-Kozak granit alanında gerçekleştirilen bu radyolojik gözlem programı kapsamında, toprak ve granit örneklerinde radyoaktivite düzeyi saptanmış, radyoaktivite dağılımları bölgenin genel jeolojik yapısı dikkate alınarak incelenmiş, doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz hızları hesaplanmış ve sonuçlar radyolojik risk açısından değerlendirilmiştir.

#### 4.1 Toprak ve Granit Örneklerinin Doğal Radyonüklit Aktivite İçeriği ve Dağılımları

Bergama-Kozak granit alanlarından alınan 11 granit ve 19 toprak örneklerinde gama spektroskopik olarak saptanan  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bergama-Kozak granit alanında U-Th içeren minerallerin oldukça yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu bilinmektedir. K-feldispat bileşiminde major bir element olan Potasyum tüm granit kayalarda temel kaya minerali olarak bulunmaktadır (Pavlidou et al., 2006). Buna bağlı olarak, çalışılan alanın farklı bölgelerinden örneklenen granitlerin içerdiği  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları 61 (29 – 111) Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları 64 (35 – 87) Bq kg<sup>-1</sup> ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonları 883 (698 – 1100) Bq kg<sup>-1</sup> aralığında saptanmıştır. Toprak örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarının sırasıyla, 52 (32 – 82) Bq kg<sup>-1</sup>, 68 (42 – 88) Bq kg<sup>-1</sup> ve 824 (667 – 1127) Bq kg<sup>-1</sup> aralığında değiştiği görülmektedir. Bu değerler, son 20 yılda dünyanın birçok ülkesinde gerçekleştirilen ve dünya nüfusunun %70’ ini kapayan ölçüm sonuçlarına dayalı olarak UNSCEAR (2000) raporunda topraklar için verilen dünya ortalamalarından [ $^{226}\text{Ra}$  için 35(17-60) Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  için 30(11-64) Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{40}\text{K}$  için 400(140-850) Bq kg<sup>-1</sup>] yüksek düzeydedir.

Tablo 4.1 Bergama-Kozak granit alanı granit ve toprak örneklerinin  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonları.

Örnek No	Aktivite Konsantrasyonu ( $\text{Bq kg}^{-1} \pm \text{SD}$ )		
	$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{40}\text{K}$
<b>Granit</b>			
G 9	69 ± 1	68 ± 2	886 ± 7
G 17	65 ± 1	61 ± 2	890 ± 7
G 21	60 ± 1	55 ± 2	802 ± 7
G 26	58 ± 1	37 ± 1	879 ± 7
G 27	58 ± 1	29 ± 1	794 ± 7
G 30	62 ± 1	71 ± 2	972 ± 8
G 34	35 ± 1	45 ± 2	698 ± 7
G 36	87 ± 2	80 ± 2	1100 ± 9
G 39	82 ± 2	111 ± 3	1037 ± 8
G 42	72 ± 1	58 ± 2	867 ± 8
G 47	57 ± 1	58 ± 2	792 ± 7
<b>Toprak</b>			
T 4	67 ± 2	53 ± 2	858 ± 9
T 9	80 ± 2	52 ± 2	667 ± 7
T 17	79 ± 2	57 ± 2	894 ± 10
T 19	57 ± 2	44 ± 2	704 ± 9
T 21	76 ± 2	55 ± 2	743 ± 8
T 22	53 ± 1	41 ± 2	707 ± 8
T 24	42 ± 1	37 ± 2	794 ± 9
T 25	69 ± 2	32 ± 2	738 ± 10
T 26	69 ± 2	47 ± 2	805 ± 9
T 30	55 ± 2	47 ± 2	938 ± 9
T 32	60 ± 2	49 ± 2	714 ± 11
T 34	67 ± 2	50 ± 2	941 ± 9
T 3	87 ± 2	57 ± 2	825 ± 10
T 38	53 ± 1	75 ± 2	1127 ± 10
T 39	88 ± 2	82 ± 3	1045 ± 9
T 41	74 ± 2	61 ± 2	798 ± 9
T 42	79 ± 2	55 ± 2	796 ± 8
T 46	79 ± 2	47 ± 2	835 ± 8
T 47	68 ± 2	55 ± 2	723 ± 9

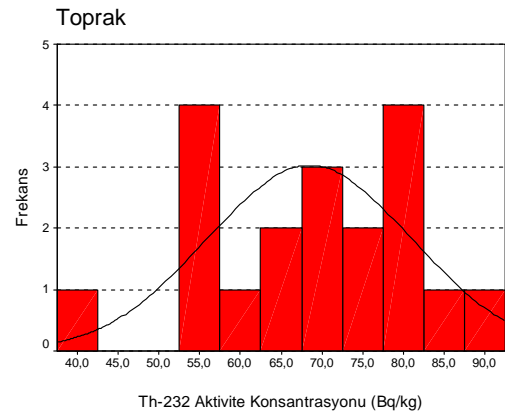
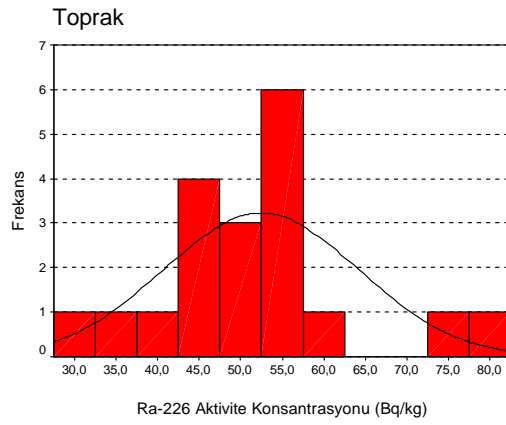
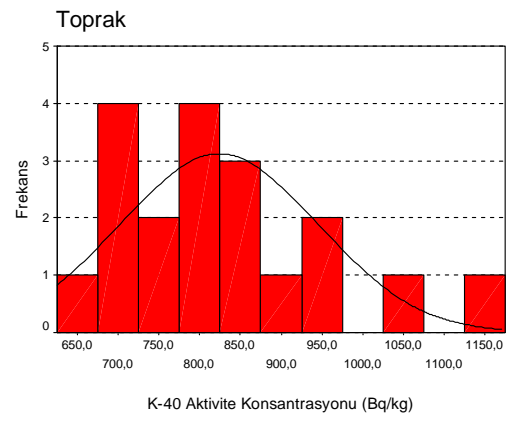
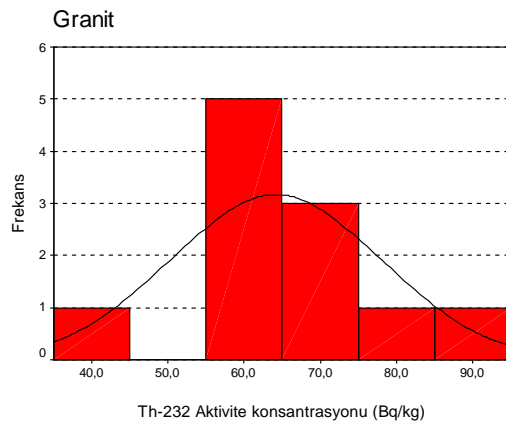
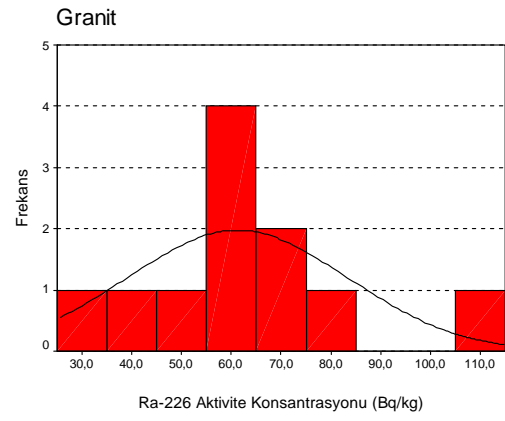
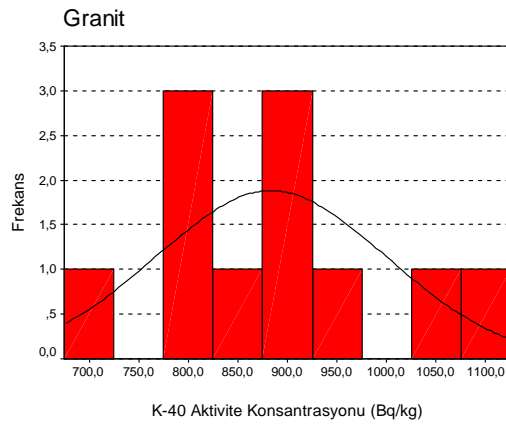
Granit ve toprak örneklerinde gama spektroskopik olarak saptanan doğal radyonüklid ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ ) aktivite konsantrasyonlarının, aritmetik ortalaması, medyanı, geometrik ortalaması, minimum ve maksimum değerleri, standart sapmaları ve aktivite konsantrasyonları değişim katsayısı (%CV= ölçülen aktivite konsantrasyonlarının standart sapması/aritmetik ortalama) SPSS 8.0 istatistik programı kullanılarak derlenmiştir (Tablo 4.2). Ayrıca, granit ve toprak örneklerinde saptanan doğal radyonüklit ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ ) aktivite konsantrasyonlarının

frekans dağılımları elde edilerek (Şekil 4.1) bu dağılımların normal ve log-normal dağılım fonksiyonları ile uygunluğu tartışılmıştır.

Tablo 4.2 Analiz edilen granit ve toprak örneklerine ait  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının medyan, aritmetik ortalama, aritmetik ortalamasının standart hatası (OSH), standart sapma (SS), geometrik ortalama, değişim katsayısı (CV), geometrik değişim katsayısı (GCV), menzil ve frekans dağılımlarının skewness ve kurtosis katsayıları

	$^{40}\text{K}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{226}\text{Ra}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{232}\text{Th}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )
<b>Granit</b>			
Medyan	879	58	62
Aritmetik Ortalama ± OSH	883 ± 35	61 ± 7	64 ± 4
S.S.	116	22	14
Geometrik Ortalama	877	58	63
CV (%)	13.19	36.20	21.55
GCV(%)	13.29	38.37	22.05
Menzil	698 – 1100	29 – 111	35 – 87
Skewness	0.470	0.940	-0.350
Kurtosis	-0.033	1.877	1.360
Frekans dağılımı	Normal	Log-normal	Normal
<b>Toprak</b>			
Medyan	798	52	69
Aritmetik Ortalama ± OSH	824 ± 28	52 ± 3	68 ± 3
S.S.	121	11.7	12
Geometrik Ortalama	816	51	67
CV (%)	14.72	22.34	18.27
GCV(%)	14.86	22.86	18.56
Menzil	667 – 1127	32 – 82	42 – 88
Skewness	1.091	0.902	-0.378
Kurtosis	0.921	1.732	-0.496
Frekans dağılımı	Log-normal	Log-normal	Normal

Frekans dağılımlarının normal ve log-normal dağılım fonksiyonları ile karşılaştırılmasında, Kolmogorov-Smirnov normalite testi yanında kullanılan daha basit bir yöntem, dağılımların aritmetik ortalaması, medyan ve geometrik ortalamasının karşılaştırılmasıdır (Karadeniz ve Yaprak, 2008.a; Camgöz ve Yaprak, 2009). Normal dağılımlarda aritmetik ortalama ile medyan benzer iken, Log-normal dağılımlarda geometrik ortalama ile medyan birbirine benzer olmaktadır (Blagoeva ve Zikovssky 1995; Al-Hamarneh et al., 2003).



Şekil 4.1 Granit ve toprak örneklerinin  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonlarının ( $\text{Bq kg}^{-1}$  kuru ağırlık) frekans dağılımları.

## 4.2 Toprak ve Granit Örneklerinde Doğal Radyasyondan Kaynaklanan Karasal Gama Doz Hızı

Bergama-Kozak granit alanında doğal radyasyondan kaynaklanan karasal gama doz hızları, yüzey topraklarında ve granitlerde ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarından yararlanılarak ve UNSCEAR 2000' de verilen doz dönüşüm katsayıları kullanılarak, aşağıdaki eşitlik uyarınca hesaplanmıştır

$$D(\text{nGyh}^{-1}) = 0.0417A_K + 0.462 A_{Ra} + 0.604 A_{Th} \quad (4.1)$$

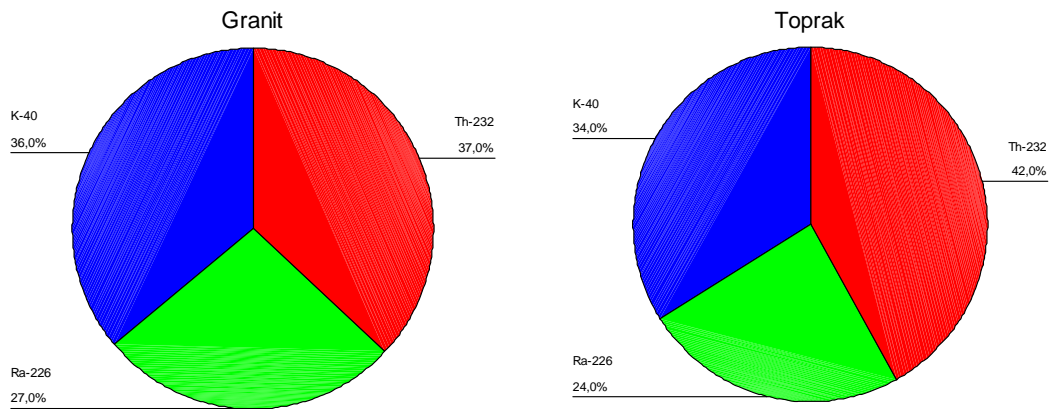
Bu eşitlikte;  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$  sırası ile topraklarda ve granitlerde ölçülen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarıdır ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ). Tablo 4.3'te çalışılan granit alanında karasal gama radyasyonuna maruz kalma sonucu tahmin edilen doz hızları verilmiştir. İlgili çizelge incelendiğinde çalışılan granit alanında havada soğurulan karasal gama doz hızlarının, normal alanlar için rapor edilen 60 (10-200)  $\text{nGy h}^{-1}$  değerlerini aştığı gözlenmektedir. (UNSCEAR, 2000).

Tablo 4.3 Bergama-Kozak granit alanında granit ve topraklardan kaynaklanan karasal gama doz hızları (D), yıllık etkin doz eşdeğerleri (DE), radyum eşdeğer aktivitesi (Ra(eq)),  $H_{ex}$  ve  $H_{in}$  radyasyon zarar indeksleri.

Örnek	D (nGy h <sup>-1</sup> )	DE (µSv y <sup>-1</sup> )	Ra(eq) (Bq kg <sup>-1</sup> )	$H_{ex}$	$H_{in}$
<b>Granit</b>					
G 9	110	134	234	0,66	0,84
G 17	105	128	223	0,63	0,79
G 21	95	117	203	0,57	0,72
G 26	89	109	189	0,54	0,64
G 27	81	100	173	0,49	0,57
G 30	111	136	235	0,66	0,86
G 34	71	87	149	0,42	0,55
G 36	135	166	289	0,82	1,03
G 39	144	177	308	0,87	1,17
G 42	106	131	228	0,64	0,80
G 47	94	116	201	0,57	0,72
Ortalama	104	127	221	0,62	0,79
<b>Toprak</b>					
T 4	101	123	214	0,61	0,75
T 9	100	123	218	0,61	0,75
T 17	112	137	240	0,68	0,83
T 19	84	103	180	0,51	0,63
T 21	102	125	220	0,62	0,77
T 22	80	99	171	0,48	0,60
T 24	76	93	158	0,45	0,55
T 25	87	107	187	0,53	0,62
T 26	97	119	208	0,59	0,72
T 30	94	115	198	0,56	0,69
T 32	89	109	190	0,54	0,67
T 34	103	126	219	0,62	0,75
T 35	113	138	244	0,69	0,84
T 38	113	139	237	0,68	0,88
T 39	135	165	288	0,81	1,03
T 41	106	130	228	0,64	0,80
T 42	106	130	229	0,64	0,79
T 46	104	128	224	0,63	0,76
T 47	97	118	208	0,58	0,73
Ortalama	100	123	214	0,60	0,74
UNSCEAR 2000	60 (10-200)	70	≤370	< 1.0	< 1.0

Bergama-Kozak granit alanında, insanların maruz kaldığı ortalama karasal gama doz hızına (Granit için 104 nGy h<sup>-1</sup>, Toprak için 100 nGy h<sup>-1</sup>), doğal radyonüklitlerin % katkıları hesaplanmıştır (Şekil 4.2).





Şekil 4.2 Toplam absorbe edilen doza <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra ve <sup>232</sup>Th' nin rölatif katkıları.

Bu dağılım incelendiğinde, karasal gama doz hızına granitlerde <sup>40</sup>K' in % 36, <sup>226</sup>Ra' nın % 27 ve <sup>232</sup>Th' nin % 37 oranında, topraklarda <sup>40</sup>K' in % 34, <sup>226</sup>Ra' nın % 24 ve <sup>232</sup>Th' nin % 42 oranında katkı yaptığı gözlenmektedir. Ormanlık alanlar ve tarımsal alanlarda toplam karasal gama doz hızı içinde en büyük payı <sup>40</sup>K almakta iken, granit alanlarda <sup>232</sup>Th' nin toplam karasal gama dozuna en büyük katkısı sağladığı görülmektedir (Karadeniz ve Yaprak, 2008.b; Camgöz ve Yaprak, 2009).

### 4.3 Toprak ve Granit Örneklerinin Radyolojik Risk Açısından Değerlendirilmesi

Bergama-Kozak granit alanına ait radyolojik veri tabanının oluşturulduğu bu çalışmada, tarımsal topraklarda gözlenen <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonlarına dayalı olarak elde edilen; karasal gama doz hızı, yıllık etkin doz eşdeğeri ve radyasyon zarar indeksleri verilmiştir (Tablo 4.3). Topraklardaki doğal radyonüklitler nedeni ile dışsal maruz kalma (karasal gama radyasyonu) ve içsel maruz kalma (<sup>222</sup>Rn ve ürünlerinin solunması) ile oluşabilecek, dış ve iç radyasyon zarar indeksleri (UNSCEAR 2000) aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$H_{\text{ex}} = A_{\text{Ra}}/370 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4180 < 1.0 \quad (4.2)$$

$$H_{\text{in}} = A_{\text{Ra}}/185 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4180 < 1.0 \quad (4.3)$$

Bu dozimetrik eşitlikte;  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  ve  $A_K$ ; sırası ile toprakların  $Bq\ kg^{-1}$  olarak içerdiği  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  ve  $^{40}K$  aktivite konsantrasyonlarıdır. Radyolojik risk açısından tanımlanan bu iki radyasyon zarar indeksi dışında, havadaki karasal kaynaklardan alınan yıllık etkin doz eşdeğeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$DE (\mu Sv\ y^{-1}) = [D (nGy\ h^{-1}) \times 0,7\ Sv\ Gy^{-1} \times 8760\ saat/yıl \times 0,2] \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

Benzer şekilde bina materyallerinin spesifik aktivitelerini karşılaştırmak için tanımlanan bir diğer uluslararası ortak indeks, *Radyum Eşdeğer Aktivitesi*  $Ra(eq)$ 'dir.  $Ra(eq)$  radyasyon zarar indeksi aşağıdaki eşitlik ile verilmekte ve radyolojik risk açısından  $Ra(eq)$  aktivitesinin  $370\ Bq\ kg^{-1}$ 'i geçmemesi istenmektedir (UNSCEAR, 1988).

$$Ra(eq) = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (4.5)$$

Bu doğrultuda çalışılan alanın radyolojik risk açısından değerlendirme tablosu incelendiğinde,  $Ra(eq)$ ,  $H_{ex}$  ve  $H_{in}$  radyasyon zarar indekslerinin raporlarda verilen sınır değerleri aşmadığı görülmektedir. Tahmin edilen yıllık etkin doz eşdeğerlerinin ise normal alanlar içi rapor edilen  $70\ \mu Sv\ y^{-1}$  lık dünya ortalaması değerini aştığı gözlenmektedir (Tablo 4.3).

## BÖLÜM BEŞ

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Gama spektrometre tekniği çevresel örneklerdeki doğal radyonüklitlerin ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ ) aktivite konsantrasyonlarını belirlemede hassas bir ölçüm yöntemidir. Sunulan çalışmada, Bergama-Kozak granit alanından toplanan granit ve toprak örneklerindeki doğal radyoaktivite düzeyleri HPGe Gama Spektrometre sistemi kullanılarak saptanmıştır. Tez kapsamında 11 granit, 19 toprak örneği çalışılmıştır. Granit örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla, 61, 64 ve 883 Bq kg<sup>-1</sup> iken toprak örneklerinin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 52, 68 ve 824 Bq kg<sup>-1</sup> olarak saptanmıştır. Bu değerler, son 20 yılda dünyanın birçok ülkesinde gerçekleştirilen ve dünya nüfusunun %70' ini kapayan ölçüm sonuçlarına dayalı olarak UNSCEAR (2000) raporunda topraklar için verilen dünya ortalamalarından [ $^{226}\text{Ra}$  için 35(17-60) Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{232}\text{Th}$  için 30(11-64) Bq kg<sup>-1</sup>,  $^{40}\text{K}$  için 400(140-850) Bq kg<sup>-1</sup>] yüksek düzeyde bulunmuştur.

Doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarından çalışılan alandaki havada soğurulan doz hızları hesaplanmış, bu alanda yaşayan insanların zamanlarının %20 sini bina dışında geçirdikleri farzedilerek maruz kaldıkları yıllık etkin dozlar tahmin edilmiştir. Ayrıca, radyasyon hasarını değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ), dışsal radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{ex}}$ ) ve içsel radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{in}}$ ) tahminleri yapılmıştır. Çalışılan alanda granit ve toprak ortamları için ortalama radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ), dışsal radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{ex}}$ ), içsel radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{in}}$ ), soğurulan karasal doz hızı sırasıyla 221 Bq kg<sup>-1</sup>, 0.62, 0.79, 104 nGy h<sup>-1</sup> ve 214 Bq kg<sup>-1</sup>, 0.60, 0.74, 100 nGy h<sup>-1</sup> olarak saptanmıştır. Granit ve toprak ortamlarından kaynaklanan ortalama yıllık etkin dozlar sırasıyla 127 µSv ve 123 µSv olarak tahmin edilmiştir.

Çalışılan granit alanında havada soğurulan karasal gama doz hızlarının ve yıllık etkin dozların, normal alanlar için rapor edilen ortalama 60 nGy h<sup>-1</sup> ve 70 µSv y<sup>-1</sup> değerini aştığı gözlenmiştir. Hesaplanan dozlara radyonüklitlerin yaptığı katkılar

incelendiğinde, granitlerde  $^{40}\text{K}$ ' in % 36,  $^{226}\text{Ra}$ ' nın % 27 ve  $^{232}\text{Th}$ ' nin % 37 oranında, topraklarda  $^{40}\text{K}$ ' in % 34,  $^{226}\text{Ra}$ ' nın % 24 ve  $^{232}\text{Th}$ ' nin % 42 oranında katkı yaptığı gözlenmiştir. Radyum eşdeğer aktivitesi ( $R_{\text{eq}}$ ), dışsal radyasyon zarar indeksi ( $H_{\text{ex}}$ ) ve içsel radyasyon zarar indeksinin ( $H_{\text{in}}$ ) tavsiye edilen sınırların altında olduğu görülmüştür. Bu bulguların ışığında, bina materyali olarak Kozak Granitinin kullanımının güvenli olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada elde edilen veriler gelecekteki radyolojik hesaplamalar için değerli bir veri tabanı oluşturmuştur. Çalışma kapsamında ölçülen doğal radyonüklit içerikleri ve buna bağlı olarak tahmin edilen karasal gama dozları müsaade edilir düzeylerde olsa da, kesin sonuçlar için direk doz hızı ölçümleri gereklidir.

## KAYNAKÇA

Akyürek, B. (1989-a) 1/ 100 000 Ölçekli Açın-sama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Balıkesir - G4 Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi 12s. (Yayımlanmamış).

Akyürek, B. (1989-b). 1/ 100 000 Ölçekli Açın-sama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Balıkesir - G3 Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi 8s. (Yayımlanmamış).

Akyürek, B., Soysal, Y., (1983). Biga yarımadası güneyinin (Savaştepe-Kırkağaç Bergama- Ayvalık) temel jeoloji özellikleri; *MTA Dergisi*, 95/96, 1-12.

Al Hamarneh, I., Wreikat, A., Toukan, K., 2003. Radioactivity concentrations of <sup>40</sup>K, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>241</sup>Am, <sup>238</sup>Pu and <sup>239</sup>+<sup>240</sup>Pu radionuclides in Jordanian soil samples. *Journal of Environmental Radioactivity* 67, 53-67.

Al-Jarallah, M.I., Fazal-ur-Rehman, Musazay, M.S., Aksoy,A.,2005,Correlation between radon exhalation and radium content in granite samples used as construction material in Saudi Arabia, *Radiation Measurements*,40,625-629.

Al-Jundi, J., 2002. Population doses from terrestrial gamma exposure in areas near to old phosphate mine, Russaifa. Jordan, *Radiation Measurement*. 35, 23-28.

Altunkaynak, Ş. and Yılmaz, Y., (1998) The mount Kozak magmatic complex, Western Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal research* 85, 211-231.

Ataman, G., (1975). Plütonisme calco-alcolin d'age Alpin en Anatolie du Nordquest; C.R. Acad. Sc. Paris, D. 280, 2065-2068.

- Baeza, A., del Rio, M., Miro, C., Paniagua, J.M., 1992. Natural radioactivity in soils of the province of Caceres (Spain). *Radiation Protection Dosimetry*. 45 (1/4), 261-263.
- Bellia, S., Brai, M., Hauser, S., Puccio, P., Rizzo, S., 1997. Natural radioactivity in a volcanic island:Ustica, Southern Italy. *Applied Radiation Isotopes*. 48 (2), 287-293.
- Benda, L., Innocenti, F., Mazzuoli, R., Radicati, F. ve Steffens, P., (1974). Stratigraphic and radiometric data of the Neogene in Northwest Turkey: z. Deutsch. Geol. Ges. 125, 183-193.
- Bingöl, E., Delaloy, M., ve Ataman, G., (1982). Granitic intrusions in Western Anatolia, a contribution to the geodynamic study of this area: *Eclogae Geol. Helv.* 75/2, 437-446.
- Blagoeva, R., Zikovsky, L., 1995. Geographic and vertical distribution of Cs-137 in soils in Canada. *Journal of Environmental Radioactivity* 27 (3), 269-274.
- Borsi, S., Ferrara, G., Innocenti, F., ve Mazzuoli, R., (1972). Geochronology and petrology of recent volcanics in the Eastern Aegean sea: *Bull. Volcan.*, 36/I, 473-496.
- Bozkurt, A., Yorulmaz, N., Kam, E., Karahan, G., Osmanlioglu, A.E., 2007. Assessment of environmental radioactivity for Sanliurfa region of southeastern Turkey, *Radiation Measurement*, 42, 1387-1391.
- Brai, M., Bellia, S., Hauser, S., Puccio, P., Rizzo, S., Basile, S., Marrale, M., 2006. Correlation of radioactivity measurements, air kerma rates and geological features of Sicily. *Radiation Measurement* 41, 461-470.

- Bürküt, Y., (1966). *Kuzeybatı Anadolu'da yer alan plütonların mukayeseli jenetik etüdü*: Doktora Tezi, İTÜ Maden Fak., İstanbul, 272 s.
- Camgöz, Y.I., Yaprak, G., 2009. Küçük Menderes Havzası Tarım Topraklarında Doğal Radyonüklit Seviyesinin Belirlenmesi, *Ekoloji*, 18, 70, 74-80.
- Canbaz, B., 2007. *Ezine/Çanakkale granit alanının radyolojik risk açısından değerlendirilmesi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 49-57.
- Chikasawa, K., Ishii, T., Sugiyama, H., 2001. Terrestrial gamma radiation in Kochi Prefecture, Japan. *Journal of Health Science*. 47 (4), 362-372.
- Clouvas, A., Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M., 2001. Extended survey of indoor and outdoor terrestrial gamma radiation in Greek Urban areas by in situ gamma spectrometry with a portable Ge detector. *Radiation Protection Dosimetry*. 94(3), 233-246.
- Curie LA (1968) Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination. *Analytical Chemistry* 40, 3, 586-593.
- De Vecchi,G.,Lazzarini, L., Lünel, T.,Mignucci, A., Visona, D., 2000, The genesis and characterization of 'Marmor Misium' from Kozak (Turkey), a granite in antiquity, *Journal of Cultural Heritage1*, 145-153.
- Degerlier, M., Karahan, G. and Ozger, G., 2008. Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey. *Journal Of Environmental Radioactivity*, 99 (7), 1018-1025.
- Dowdall, M., Gerland, S., Lind, B., 2003. Gamma-emitting natural and anthropogenic radionuclides in the terrestrial environment of Kongsfjord, Svalbard. *Science of The Total Environment*. 305, 229-240.

- Dowdall, M., Vicat, K., Frearson, I., Gerland, S., Lind, B., Shaw, G., 2004. Assessment of the radiological impacts of historical coal mining operations on the environment of Ny-Alesund, Svalbard. *Journal Of Environmental Radioactivity*. 71, 101-114.
- Ejima, Y., Fujina, T., Takagi, H., Shimada, K., Iwanaga, T., Yoneda, Y., Murakomi, Y., 1987. The pre-feasibility study on the Dikili–Bergama geothermal development project in the Republic of Turkey. Progress Report II.
- El-Reefy, H.I., Sharshar, T., Zaghloul, R., Badran, H.M., 2006. Distribution of gamma-ray emitting radionuclides in the environment of Burullus Lake: I. soils and vegetations. *Journal Of Environmental Radioactivity*. 87, 148-169.
- Ercan, T., Türkecan, A., Akyürek, B., Günay, E., Çevikbaş, A., Ateş, M., Can, B., Erkan, M. ve Özkirişçi, C., (1984). *Dikili-Bergama-Çandarlı (Batı Anadolu) Yöresinin Jeolojisi ve Magmatik Kayaçlarının Petrolojisi: Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, 20, 47-60
- Ereeş, F.S., Aközcan, S., Parlak, Y., Çam, S., 2006. Assessment of dose rates around Manisa (Turkey). *Radiation Measurement*, 41, 598-601.
- Esposito, M., Polic, P., Bortolomei, P., Benzi, V., Martellini, H., Cvetkovic, O., Damjanov, V., Simic, M., Zunic, Z., Zivancevic, B., Simic, S., Jovanovic, V., 2002. Survey of natural and anthropogenic radioactivity in environmental samples from Yugoslavia. *Journal Of Environmental Radioactivity*. 61, 271-282.
- Fairbridge, R. W., 1972, *The Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Sciences*, New York.).



- Fernandez-Aldecoa, J.C., Robayna, B., Allende, A., Poffijn, A., Hernandez-Armas, J., 1992. Natural Radiation in Tenerife (Canary islands). *Radiation Protection and Dosimetry* 45(1/4), 545-548.
- Florou, H., Kritidis, P., 1992. Gamma radiation measurements and dose rate in the coastal areas of a volcanic islands, Aegean Sea, Greece. *Radiation Protection Dosimetry* 45 (1/4), 277-279.
- Florou, H., Trabidou, G., Nicolaou, G., 2007. An assessment of the external radiological impact in areas of Greece with elevated natural radioactivity. *Journal Of Environmental Radioactivity*. 93, 74-83.
- Huy, N.Q., Luyen, T.V., 2006. Study on external exposure doses from terrestrial radioactivity in Southern Vietnam. *Radiation Protection Dosimetry*. 118 (3), 331-336.
- ICRP (1990), Recommendations of the International Commission on radiological Protection., Publication 60. Ann. Pergamon Pres, Oxford. International Commission on radiation Protection.
- Işık, Y., 2002. *Küçük Menderes havzasında doğal radyonüklid konsantrasyonlarının belirlenmesi ve doz dağılımının hesaplanması*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 34-39.
- İzdar, E., (1968). Kozak intrüzif masifinin petrolojisi ve Paleozoik çevre kayaçlarıyla jeolojik bağıntıları: Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, II 1-2, 140-179.
- Kam, E., Bozkurt, A., 2007. Environmental radioactivity measurements in Kastamonu region of northern Turkey, *Applied Radiation And Isotopes*, 65, 440-444.

- Karadeniz Ö, Yaprak G (2008.a) Geographical and vertical distribution of radiocesium levels in coniferous forest soils in Izmir. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 277(3): 567-577.
- Karadeniz Ö, Yaprak G (2008.b) Vertical distributions and gamma dose rates of <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U and <sup>137</sup>Cs in the selected forest soils in Izmir, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry* 131(3): 346-355.
- Karadeniz, Ö., 2005. *Orman Ekosisteminde <sup>137</sup>Cs'nin Topraktaki Hareketi ve Mantardaki Depozisyonu*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Karahan, G., Bayulken, A., 2000. Assessment of gamma dose rates around İstanbul (Turkey), *Journal Of Environmental Radioactivity*, 47, 213-221.
- Karakelle, B., Öztürk, N., Köse, A., Varinlioğlu, A., Erkol, A.Y. and Yilmaz, F., 2002, Natural radioactivity in soil samples of Kocaeli basin, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 254/ 3, 649-651.
- Koljonen,T.(Ed.), 1992. The Geochemical atlas of Finland,Part 2: Till Geological Survey of Finland,Espoo,Finland.
- Krushensky, R.D., 1976. Volcanic rocks of Turkey. Bulletin of Geological Survey, Japan, 26-393.
- Kun, N., Mermer Jeolojisi ve Teknolojisi,2000.
- Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Keser, R., Okumusoglu, N.T., Korkmaz, F., Karahan, G.,Çevik, U., 2007. Determination of radioactivity levels and hazards of soil and sediment samples in Fırtına Valley (Rize, Turkey), *Applied Radiation And Isotopes*, 65, 1281-1289.

- Merdanoğlu, B., Altınsoy, N., 2006. Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples from Kestanbol Granite Area, *Radiation Protection Dosimetry*, 121 (4), 399-405.
- Miah, F.K., Roy, S., Touhiduzzaman, M., Alam, B., 1998. Distribution of radionuclides in soil samples in and around Dhaka City. *Applied Radiation And Isotopes*. 49 (1-2), 133-137.
- Navas, A., Soto, J., Lopez-Martinez, J., 2005. Radionuclides in soils of Byers Peninsula, South Shetland Islands, Western Antarctica. *Applied Radiation And Isotopes*. 62, 809-816.
- Noureddine, A., Baggoura, B., Larosa, J.J., Vajda, N., 1997. Gamma and alpha emitting radionuclides in some Algerian soil samples. *Applied Radiation Isotopes*. 48 (8), 1145-1148.
- Oyedele, J.A., 2006. Measurement of the natural radioactivity at the international high energy stereoscopic system (HEES) Project in Southern Africa. *Applied Radiation Isotopes*. 64, 686-688.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Gültekin, A.H., Karahan, G., Çelebi, N., 2005. Natural radioactivity levels in granitic plutons and groundwaters in Southeast part of Eskişehir, Turkey. *Applied Radiation And Isotopes*, 63, 267-275.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Şahin, S.Y., Güngör, Y., Gültekin, A.H., Karahan, G., Karacık, Z., 2007, Natural and anthropogenic radionuclides in rocks and beach sands from Ezine region (Çanakkale), Western Anatolia, Turkey, *Applied Radiation And Isotopes*, 65, 739-747.
- Pavlidou, S., Koroneos, A., Papastefanou, C., Christofides, G., Stoulos, S., Vavelides, M., 2006, Natural radioactivity of granites used as building materials, *Journal of Environmental Radioactivity*, 89 (1), 48-60.

- Paplovic,S.,Pavlovic ,R.,Avramovic,I.,Markovic,S.,Milonovic,S., 1996 Radiological Assesment of an Important Building Material : a Case Study, *Environmental International* Volume 22,Suplement 1,pp.S295-S300.
- Ramli, A.T., Hussein, A.W.M.A., Wood, A.K., 2005. Environmental <sup>238</sup>U and <sup>232</sup>Th concentration measurements in an area of high level natural background radiation at Palong, Johor, Malaysia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 80, 287-304.
- Realo, E., Realo, K., 2005. Natural radionuclides in radium-rich soils in North-East Estonia, *Journal of Environmental Radioactivity*.7, 140-149.
- Rosholt, J.N., Prijana, O., Noble, D.O., 1971. Mobility of uranium and thorium in glassy and crystallized silicic volcanic rocks. *Econ. Geol.*, 66, 1061-1071.
- Saç M.M., 2003 *Yatağan Havzası'nda toprak erozyonunun hızını radyoaktif sezyum tekniği kullanılarak ölçülmesi*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Segovia, N., Gaso, M.I., Alvarado, E., Pena, P., Morton, O., Armienta, M.A., Reyes, A.V., 2003. Environmental radioactivity studies in the soil of a coniferous forest. *Radiation Measurement*. 36, 525-528.
- Shenber, M.A., 1997. Measurement of natural radioactivity levels in soil in Tripoli. *Applied Radiation Isotopes*. 48 (1), 147-148.
- Stoulos, S., Manolopoulou, M., Papastefanou, C., 2003. Assesment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece, *Journal of Environmental Radioactivity*, 69, 225-240.
- Taylor,S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochim.Cosmochim.Acta* 28,1273-1284.

- Topcuoğlu, S., Türer, A., Güngör, N. and Kırbaşoğlu, Ç., 2003, Monitoring of anthropogenic and natural radionuclides and gamma absorbed dose rates in eastern Anatolia, *Journal of Radioanalytical And Nuclear Chemistry*, 258 (3), 547-550.
- Tso, W.M., Ng, C.Y. and Leung, J.K.C., 1994. Radon Release From Building Materials in Hong-Kong, *Health Physics*,67(4):378-384.
- Tufail, M., Akhtar, N., Waqas, M., 2006. Measurement of terrestrial radiation for assessment of gamma dose from cultivated and barren saline soils of Faisalabad in Pakistan. *Radiation Measurement*. 41, 443-451.
- Tzortsiz,M.,The Tsertos, H.,Christofides,S.,Christodoulides,G., 2003 Gamma radiation measurements and dose raates in commercially-used natural tiling rocks (granites), *Journal of Environmental Radioactivity*,70,223-235.
- UNSCEAR 1982 Report, United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations, United Nations, New York.
- UNSCEAR 1988 Report, United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations, United Nations, New York.
- UNSCEAR 1993 Report, United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations, United Nations, New York.
- UNSCEAR 2000 Report, United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations, United Nations, New York.
- Weaver , B.L.,Tarney,J., 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust.*Nature* 310,575-577.

- Vaca, F., Manjon, G., Garcia-Leon, M., 2001. The presence of some artificial and natural radionuclides in a Eucalyptus forest in the South of Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*. 56, 309-325.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R., 1999. Gamma radioactivity in podzolic soils of Northern Ontario, Canada. *Journal of Environmental Radioactivity*. 42, 51-64.
- Yaprak, G., 1995. Radyoaktif Mineral İçeren Örneklerin Gama Spektroskopik Analizlerinde Matris Etkisi ve Self Absorpsiyon İçin Bir Düzeltme Yönteminin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü.
- Yaprak, G., 2009. Çevresel Radyoaktivite I ve II Ders Notları (yayınlanmamış), E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü.
- Yaprak, G., Gür, F., 2007. Batı Anadolu termik santralleri çevresinde radyoaktif ve ağır metal kirliliğinin biyomonitörlerle izlenmesi, Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (Proje No: 2003 NBE 007).
- Yaprak, G., Gür, F., Candan, O., Camgöz, B., Epik, Ö., Köseoğlu, K., 2005. Aktif Gediz grabeninde yer alan kaynak sularında ve ılıca ortamlarında radon konsantrasyonunun saptanması ve bölgenin doğal radyoaktivite düzeyi ile ilişkilendirilmesi, Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (Proje No: 2000 NBE 003).
- Yaprak, G., Yener, G., 1990. Bergama Sarıcaoğlu Bölgesindeki Toprak ve Kayaçlarda Uranyum İle Ürünleri Arasındaki Radyoaktif Dengenin Saptanması. Ege Üniversitesi Rektörlüğü Araştırma Fonu. Proje No: 1986 NBE 005.
- Yaprak, G., Yaşar, Ö., 2006. Türkiye Mermerlerindeki Doğal Radyonüklit İçeriğinin Ve Radon Emanasyon Hızının Radyolojik Risk Açısından Değerlendirilmesi. Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (Proje No: 2004 NBE 003).

Yener, G., Yaprak, G., 1988. Granit ve Granodiyorit Kayaçlarda ve Erozyon Bölgelerindeki Topraklarda Gama Spektroskopisi ile Uranyum ve Toryum Analizleri. Ege Üniversitesi Rektörlüğü Araştırma Fonu. Proje No: 004/1985.

Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Elmas, A., Gürer, F.Ö. ve Altunkaynak, Ş., (1996). Bergama Grabeni ve Çevre Alanlarda Genç Magmatizma ile Tektonizma İlişkilerinin Araştırılması, Tübitak, Üniversite-MTA Ulusal Deniz Jeolojisi ve Jeofiziği Programı, YDABÇAG 228/G, 4-10.

Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Karacık, Z., ve Altunkaynak, Ş., (2001). Two contrasting magmatic associations of NW anatolia and their tectonic significance. 31, 243-271.

Ziqiang, P., Yin, Y., Mingqiang, G., 1988. Natural Radiation and radioactivity in China. *Radiation Protection Dosimetry*. 24 (1/4), 2