

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKİYE FARKLI BÖLGE MERMERLERİNİN DOĞAL RADYOAKTİVİTE  
VE YILLIK ETKİN DOZ EŞDEĞERLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cemre KARAMAN**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Sevilay HACİYAKUPOĞLU**

**MAYIS 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRKİYE FARKLI BÖLGE MERMERLERİNİN DOĞAL RADYOAKTİVİTE  
VE YILLIK ETKİN DOZ EŞDEĞERLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cemre KARAMAN  
(302121001)**

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı**

**Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Sevilay HACİYAKUPOĞLU**

**MAYIS 2015**







İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302121001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cemre KARAMAN** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**TÜRKİYE FARKLI BÖLGE MERMERLERİNİN DOĞAL RADYOAKTİVİTE VE YILLIK ETKİN DOZ EŞDEĞERLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Sevilay HACİYAKUPOĞLU** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nesrin ALTINSOY** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Cenap Ş. ÖZBEN** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi : 4 Mayıs 2015**  
**Savunma Tarihi : 27 Mayıs 2015**





*Çalışma boyunca sevgi ve sabırla benden desteklerini esirgemeyen nişanlım  
Kerem'e ve anneme,*



## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması boyunca bilgisinden faydalandığım, daima hoşgörü ve sabırla beni destekleyen, öğrencisi olmaktan onur duyduğum değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Sevilay Hacıyakupoğlu'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullanılan mermer örneklerinin temininde yardımcı olan Sayın Ozan Bayram'a, Sayın Dr. Esra Oruçoğlu'na ve örneklerin bazı analizlerinde destek olan Sayın Dr. Halim Taşkın ve Sayın Dr. Neşet Öztürk'e teşekkürü borç bilirim.

“Türkiye Farklı Bölge Mermerleri İçin Doğal Radyoaktivite ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri” adlı bu yüksek lisans tez çalışması için, Yüksek Lisans Projesi ile destek veren İ.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü olanağı sevgi ve sabırla sağlayan, her konuda daima beni destekleyen aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Nisan 2015

Cemre Karaman  
Enerji Sistemleri Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xixx
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MERMERLER.....</b>	<b>5</b>
2.1 Mermer Oluşumu ve Mermerlerin Genel Özellikleri.....	5
2.2 Mermerlerin Kullanım Alanları.....	6
2.3 Türkiye'nin Mermer Rezervleri .....	7
<b>3. RADYASYON VE RADYOAKTİVE .....</b>	<b>9</b>
3.1 Radyasyon .....	9
3.1.1 Yapay radyasyon kaynakları .....	9
3.1.2 Doğal radyasyon kaynakları.....	10
3.2 Radyoaktivite .....	12
3.2.1 Doğal radyoaktif seriler ve radyoaktif denge.....	13
3.3 Radyoaktif Bozunum Türleri .....	17
3.3.1 Alfa ( $\alpha$ ) bozunumu .....	17
3.3.2 Beta ( $\beta$ ) bozunumu.....	18
3.3.3 Gama ışını yayınlanması.....	18
3.3.4 Elektron yakalama.....	19
3.3.5 İç dönüşüm .....	19
3.3.6 İzomerik geçiş .....	19
3.4 Radyasyon ve Radyoaktivite Birimleri .....	19
3.4.1 Aktivite birimi.....	20
3.4.2 Işınlama birimi .....	21
3.4.3 Absorblanan doz birimi.....	21
3.4.4 Eşdeğer doz birimi .....	21
<b>4. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>23</b>
4.1 Mermerlerin Alındığı Yerler ve Sınıfları .....	23
4.1.1 Mermer örneklerinin analize hazırlanması .....	24
4.2 Ölçümlerde Uygulanan Yöntemler ve Ölçüm Sistemleri .....	25
4.2.1 Gama spektrometrisi .....	25
4.2.2 Alfa-beta ölçüm sistemi spektrometrisi .....	27
4.2.2.1 Orantılı sayıcılar.....	277
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>29</b>
5.1 Gama Spektrometrik Ölçümler .....	29
5.1.1 Enerji kalibrasyonu .....	29
5.1.2 Verim kalibrasyonu .....	30

5.1.3 Aktivite konsantrasyonu.....	30
5.2 Algılanabilir En Düşük Aktivite .....	32
5.3 Kullanılan Gama Enerjileri.....	32
5.3.1 Radium eşdeğer aktivite .....	34
5.3.2 Gama indeks .....	35
5.3.3 Absorblanan gama doz hızı .....	35
5.3.4 Yıllık etkin doz eşdeğeri .....	35
<b>6. BULGULAR .....</b>	<b>37</b>
6.1 Gama Spektrometre Sisteminin Enerji ve Verim Kalibrasyonu.....	37
6.2 Örneklerin Aktivite Konsantrasyonları .....	42
6.3 Radium Eşdeğer Aktivite Sonuçları .....	45
6.4 Gama İndeks Sonuçları.....	46
6.5 Absorblanan Gama Doz Hızı Sonuçları .....	46
6.6 Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri Sonuçları .....	47
6.7 Örneklerin Alfa-Beta Ölçüm Sonuçları.....	47
<b>7. TARTIŞMA VE YORUM .....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>53</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>63</b>

## **KISALTMALAR**

<b>ADC</b>	: Analog Dijital Dönüştürücü
<b>Bq</b>	: Becquerel
<b>Ci</b>	: Curie
<b>EC</b>	: Avrupa Konseyi
<b>HpGe</b>	: Saf Germanyum
<b>keV</b>	: Kiloelektron Volt
<b>MCA</b>	: Çok Kanallı Analizör
<b>NCRP</b>	: Radyasyondan Korunma ve Ölçümleri Ulusal Konseyi
<b>OECD</b>	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
<b>TAEK</b>	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
<b>UNSCEAR</b>	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Türkiye'deki mermer çeşitleri.....	8
Çizelge 3.1 : Radyasyon ve radyoaktivite birimleri ve dönüşüm faktörleri.....	20
Çizelge 3.2 : Radyasyon tipi ve kalite faktörleri.....	22
Çizelge 4.1 : Mermer örneklerinin türleri, sınıfları ve alındığı yerler.....	24
Çizelge 4.2 : Dedektörün performans özellikleri.....	27
Çizelge 5.1 : Doğal radyonüklidlerin gama çizgileri.....	33
Çizelge 6.1 : Kalibrasyon kaynağının nükleer özellikleri..	37
Çizelge 6.2 : Standart kaynağın gama enerjilerindeki HPGe dedektörünün verim değerler.....	40
Çizelge 6.3 : İncelenen örneklerin kütle ve ölçüm süreleri.....	42
Çizelge 6.4 : Örneklerin <sup>226</sup> Ra aktiviteleri.....	44
Çizelge 6.5 : Örneklerin <sup>228</sup> Th aktiviteleri.....	44
Çizelge 6.6 : Örneklerin <sup>40</sup> K aktiviteleri.....	45
Çizelge 6.7 : Örneklerin radyum eşdeğer aktiviteleri.....	45
Çizelge 6.8: Gama indeks sonuçları.....	46
Çizelge 6.9 : Absorblanan gama doz hızı sonuçları.....	46
Çizelge 6.10 : Yıllık etkin doz eşdeğeri sonuçları.....	47
Çizelge 6.11 : Örneklerin alfa ve beta ölçüm sonuçları.....	48
Çizelge 7.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan Türkiye mermerleri ile bazı farklı ülke mermerlerinin aktivite konsantrasyonları karşılaştırması.....	51



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Türkiye mermer yatakları haritası .....	7
Şekil 3.1 : Maruz kalınan radyasyonun (doğal ve yapay) kaynakları.....	10
Şekil 3.2 : Radyasyonun geçiş yolları. ....	10
Şekil 3.3 : Radon geçiş yolları.....	11
Şekil 3.4 : Negatron ve pozitron bozunumları.....	18
Şekil 4.1 : Mermer örneklerinin alındığı yerler.....	23
Şekil 4.2 : Marinelli kabına konulmuş örnek .....	25
Şekil 4.3 : Gama spektroskopisi sistemi.....	26
Şekil 4.4 : Orantılı sayıcı devre şeması .....	28
Şekil 4.5 : BERTHOLD LB 770 sistemi .....	28
Şekil 6.1 :Gama spektroskopik ölçümler için oluşturulan enerji kalibrasyon eğrisi .	39
Şekil 6.2 : Verim kalibrasyon eğrisi .....	41
Şekil 6.3 : 10 numaralı örmeğin gama spektrum görüntüsü .....	43
A.1: Uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) serisi .....	58
B.1:Aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) serisi .....	59
C.1: Neptünyum ( $^{237}\text{Np}$ ) serisi.....	60
D.1:Toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) serisi .....	61



## TÜRKİYE FARKLI BÖLGE MERMERLERİNİN DOĞAL RADYOAKTİVİTE VE YILLIK ETKİN DOZ EŞDEĞERLERİ

### ÖZET

Başta inşaat sektöründe olmak üzere mermer, Türkiye’de de sıkça kullanılan doğal taşlardandır. Gezegenimizin varoluşundan bu yana mevcut bulunan radyoaktif elementler toprak ve doğal taşlarda bulunan radyoaktivitenin başlıca sebebidir. Bu bağlamda yaygın olarak kullanılan bu doğal taş çeşidinin de doğal radyoaktivite değerlerinin saptanması, insan sağlığına zararının olup olmadığının belirlenmesi için oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, Türkiye’nin çeşitli bölgelerinden alınmış 12 farklı mermer örneğinin doğal radyoaktivite konsantrasyonları incelenmiştir. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan bu örneklerin absorblanan gama doz hızı, radyum eşdeğer aktivitesi, gama indeksi ve yıllık etkin doz eşdeğeri parametreleri de hesaplanmıştır. Doğal radyoaktivite konsantrasyonunun saptanması için gerekli ölçümler yüksek saflıkta germanyum dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Doğal olarak mermerlerin yapısında bulunan elementler  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ve  $^{232}\text{Th}$  seri bozunumunun ürünleridir. Ayrıca  $^{40}\text{K}$  da yine mermerlerin yapısında mevcuttur. Bu sebeple yapılan bu çalışmada,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklidlerinin aktivite konsantrasyonları incelenmiştir. İncelenen mermer örneklerinin  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklidlerinin aktivite konsantrasyonları sırasıyla 4 Bq/kg - 163 Bq/kg, 13 Bq/kg – 184 Bq/kg, 2 Bq/kg – 642 Bq/kg aralığında bulunmuştur. İncelenen radyonüklitler için hesaplanan ölçüm sisteminin algılanabilir en düşük aktiviteleri 86400 s ölçüm süresi için sırasıyla  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için 1, 1 ve 2 Bq/kg olarak elde edilmiştir.

Radyum eşdeğer aktivite sonuçlarının 1 Bq/kg – 345 Bq/kg aralığında olduğu saptanmıştır. Hesaplanan gama indeks değerleri 0,008 - 3,168 aralığındadır. Absorblanan gama doz hızı değerleri hesaplandığında sonuçların 0,181 nGy/sa - 257,168 nGy/sa aralığında olduğu görülmüştür. Yıllık etkin doz eşdeğeri sonuçları ise 0,0009 mSv/yıl - 1,2624 mSv/yıl aralığında değişkenlik göstermektedir. Toplam alfa aktivite konsantrasyonu değerleri 22-77 Bq/kg aralığında değişmektedir. Toplam beta aktivite konsantrasyonu değerleri ise 25-283 Bq/kg aralığında değişmektedir

Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi’nin belirlediği sınırlar doğrultusunda sonuçlar değerlendirildiğinde radyum eşdeğer aktivite değerlerinin 370 Bq/kg’ı aşmaması beklenmektedir. Bu bağlamda çalışmada kullanılan mermer örneklerinin radyum eşdeğer aktivite değerleri üst sınırın altında kalıp, kullanılabilirliği uygun olarak bulunmaktadır. Yıllık etkin doz eşdeğerinin ise 1 mSv/yıl limitini aşmaması beklenmektedir. Hesaplamalar neticesinde elde edilen değerler bu sınırı aşmamaktadır ve tüm mermer örnekleri yıllık etkin doz eşdeğeri için değerlendirildiğinde, inşaat sektöründe kullanıma uygun bulunmaktadır. Gama indeksleri 12 örnekten 10’u için 0.5’ten küçük olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca bağlı olarak yıllık etkin doz eşdeğerinin 0.3 mSv/yıl veya daha az olduğu yorumu yapılabilmektedir.

Çalışmada kullanılan mermer örnekleri için alınan sonuçlar ve yapılan hesaplamalar sonucunda bina yapımında kullanılan bu mermerlerdeki radyoaktivite değerlerinin Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi'nin belirlediği doz sınırlarını aşmadığı ve yapı malzemesi olarak kullanılmasının insan sağlığı için bir risk faktörü olmadığı saptanmıştır.

# **NATURAL RADIOACTIVITY AND ANNUAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENTS OF MARBLES FROM DIFFERENT REGIONS IN TURKEY**

## **SUMMARY**

Ionizing radiation exposure from natural sources is a continuing and unavoidable process for all individuals. The main contributors to natural radiation exposures are high energetic cosmic rays and radionuclides originated in the Earth's crust.

Radionuclides are present everywhere in the environment. Therefore human body is exposed to external and internal exposures from these sources.

Marble is one of the most used materials in construction sector in world also in Turkey and causes radiation exposure to human body. In this frame determination the amount of radioactivity in marble is important. Due to the health risks associated with the exposure to indoor radiation, many governmental and international bodies such as the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the World Health Organization (WHO) have adopted strong measures to minimize such exposures.

Marbles are metamorphological rocks that are formed by geologically and tectonically processes. In this study twelve marble samples from different parts of Turkey and with same rock formation, were used.

The samples were from Antalya/ Korkuteli, Antalya/Burdur, Bilecik, Marmara Adası, Mersin/Taşucu, Bursa/M. Kemal Paşa, Bilecik, Burdur/Karamanlı, Antalya, Muğla/Yatağan, Kayseri/Toros, İzmir/Güzelbahçe.

To prepare marble samples for gamma spectroscopic analysis samples were crushed in İstanbul Technical University Faculty of Mines, Rock Mechanics and Natural Stone Laboratory with jaw crusher and ball mill.

Marble samples were dried at 105°C constant temperature in oven, sieved by a 2-mm-diameter sieve, weighted, placed in to 0,5 L polyethylene Marinelli beakers and sealed tight. The prepared samples were left to stay 38 days to reach radioactive equilibrium.

Gamma spectroscopic measurements of samples were accomplished in the Low Level Radioactivity Measurements Laboratory of the Energy Institute.

The detector in gamma spectroscopy system is high purity germanium semiconductor detector (ORTEC HPGe n-type, vertical, coaxial) covered with 10 cm copper lined lead shield. This shield protects the samples from the background radiation of the environment.

The voltage pulse produced in the detector system was amplified and converted to a signal by using digital spectrometer (DSPEC jr. 2.0). The applied range of channels was 8192 channels and the used energy range was to 2 MeV.

The obtained gamma spectrum was analyzed with the nuclear analysis software GAMMA VISION-32. Counting time of samples were chosen as 24 hours. All the system is connected with a computer.

Before any measurement the system was calibrated with standard radioactive source. The source has Marinelli geometry. The density of source is 1,5 g/cm<sup>3</sup> and the volume of the source is 0,5 L. The source includes many radionuclides such as <sup>241</sup>Am, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>210</sup>Pb, <sup>109</sup>Cd, <sup>57</sup>Co, <sup>139</sup>Ce, <sup>203</sup>Hg, <sup>113</sup>Sn, <sup>85</sup>Sr, <sup>88</sup>Y.

Calibration includes efficiency and energy calibration. The data were used in activity concentration calculations and radium equivalent activity, gamma index, absorbed gamma dose rate, annual effective dose equivalent.

To make the decision for determining of radionuclide energies in marble samples the peak energies were selected according to their intensities and interferences.

The natural decay series in nature that are from <sup>238</sup>U and <sup>232</sup>Th radionuclides enable determination of <sup>226</sup>Ra and <sup>232</sup>Th activities.

The primordial uranium isotope <sup>238</sup>U is found universally in nature. However, <sup>238</sup>U (4.47 x10<sup>9</sup> y half-life) constitutes 99.27% by mass of the uranium found in the Earth's crust, the remaining naturally occurring uranium isotopes being <sup>235</sup>U (7.04 x 10<sup>8</sup> y half-life), which is the parent isotope of the actinium chain and <sup>234</sup>U (2.46 x 10<sup>5</sup> y half-life), which is the fourth member of the <sup>238</sup>U chain.

The sixth member of the <sup>238</sup>U decay chain is the radium isotope <sup>226</sup>Ra (1.6 x 10<sup>3</sup> y half-life). This radionuclide decays with alpha into <sup>222</sup>Rn (3.82 d half-life), which is a noble gas. Beginning with <sup>222</sup>Rn, a series of six short-lived alpha and beta disintegrations occurs leading to the stopper <sup>210</sup>Pb (22.3 y half-life). This latter nuclide decays by beta emission to <sup>210</sup>Bi (5.01 d half-life), which in turn decays by beta particle into <sup>210</sup>Po (138.4 d half-life). The last member of the <sup>238</sup>U decay chain is the stable <sup>206</sup>Pb, which is the result of the alpha decay of <sup>210</sup>Po. There are several gamma-emitting nuclides in the <sup>226</sup>Ra progeny.

As was the case for <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th (1.41 x 10<sup>10</sup> y half-life) is also a primordial nuclide found universally in nature. There are shorter-lived thorium isotopes in all three natural decay chains, as follows: <sup>234</sup>Th (24.1 d half-life) and <sup>230</sup>Th (7.54 x 10<sup>4</sup> y half-life) in the <sup>238</sup>U chain; <sup>228</sup>Th (1.9 y half-life) in the <sup>232</sup>Th chain; and <sup>231</sup>Th (1.06 d half-life) in the <sup>235</sup>U chain. There are also a number of gamma-emitting nuclides in the <sup>232</sup>Th decay chain. Similarly as for <sup>238</sup>U, the activity concentrations of <sup>232</sup>Th in rocks, however, have a narrower range from 7 to 80 Bq/kg. Some regions of the world have much higher <sup>232</sup>Th plus progeny activity concentrations.

K-40 is the only radioactive potassium isotope. Its half-life is 1.3 x 10<sup>9</sup> y. The <sup>40</sup>K contents in soil and rocks range from 70 to 1400 Bq/kg. Some basalts and sands are low in <sup>40</sup>K while other basalts and granites have very high content. K-40, however, is not the only non-series natural radionuclide that is present everywhere on Earth.

The activity concentrations of investigated marble samples ranged from 4 to 163 Bq/kg, 13 to 184 Bq/kg, 2 to 642 Bq/kg for <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K respectively. From these results it has been found that gamma index was ranging from 0,008 to 3,138. Calculated Radium equivalent activities, ranged from 1Bq/kg to 345 Bq/kg. Absorbed gamma dose rates and annual affective dose equivalent values were obtained from 0,181 nGy/h to 257,168 nGy/h and 0,0009 mSv/y to 1,2624 mSv/y.



The gross alpha activity concentration ranged from 22 to 77 Bq/kg. The gross beta activity concentration ranged from 25 to 283 Bq/kg.

Results show that Kayseri/Toros marble samples have the highest  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  activity concentrations and thus the highest gamma index, absorbed gamma dose rate and annual effective dose equivalent. The lowest  $^{226}\text{Ra}$  activity concentrations have found in Antalya/Korkuteli marble samples and the lowest  $^{232}\text{Th}$  activity concentrations have found in Marmara Island marble samples. The lowest  $^{40}\text{K}$  activity concentrations have found in Bilecik marble samples.

It has been determined that marble samples which are investigated in this study are under the permitted levels compared with results of worldwide average values of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation report. Considering knowledge of the natural radioactivity of building materials is important for the determination of population exposure to radiation these marble samples can be safely used as building materials.



## 1. GİRİŞ

1896 yılında Henri Becquerel'in radyoaktiviteyi keşfetmesiyle birlikte radyasyon ve radyasyonun canlılar üzerindeki etkileri bilim insanları için bir merak ve araştırma konusu olmuştur. Bazı radyoaktif çekirdeklerin Dünya'nın varoluşundan bu yana mevcut olduğunun saptanması, insanlığın yaşam boyunca radyasyona maruz kaldığının da kanıtı olmuştur. Radyoaktivitenin keşfi ile birlikte gündelik yaşamda tensel temas, beslenme ya da solunum yolu ile çevreden maruz kalınan radyasyon dozu miktarıyla ilgili yapılan çalışmaların sayısı günden güne artış göstermiştir. Doğal veya yapay kaynaklı olabilen radyasyon, belirlenen yıllık ortalama etkin dozun üstünde maruz kalındığında insan sağlığı için önemli bir tehdit unsuru olabilmektedir. Yıllık maruz kaldığımız radyasyonun büyük oranı doğal radyasyon temellidir.

Doğal radyasyon kaynaklarını kozmik ve karasal olmak üzere iki ana başlıkta inceleyebiliriz. Kozmik ışınların ve buna bağlı olarak maruz kalınan radyasyonun miktarı güneş patlamalarına, bulunan bölgenin manyetik alanına ve yüksekliğe göre değişmektedir. Yükseklik arttıkça maruz kalınan kozmik radyasyon miktarı da artmaktadır. Karasal radyasyon ise dünyanın varoluşundan beri yer kabuğunda bulunan Uranyum-238, Toryum-232 serileri ve Potasyum-40 radyoizotoplarından kaynaklanan gama ışınmasının sonucudur (Smith ve Beresford, 2005). Yapı malzemeleri büyük oranda yer kabuğu hammaddeli olduğu için insanlar sadece bina dışında değil bina içinde de radyasyona maruz kalmaktadır.

Radyoaktivite konsantrasyonu, bina yapımında kullanılan malzemenin türü ve alındığı bölgenin jeolojik özelliklerine göre değişiklik gösterir. Bu kapsamda, dünyanın çeşitli bölgelerinde çeşitli amaçlarla ve çeşitli yöntemlerle pek çok yapı malzemesi incelenmiştir. Yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda bu mermerlerin yapı malzemesi olarak kullanılmasının insan sağlığı için riskli olup olmadığını saptamak mümkün olmaktadır. Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), insanların maruz kaldığı radyasyonun kaynakları ve maruz kalınan ortalama doz değerlerinin saptanması için çeşitli araştırmalar

yapmakta ve periyodik aralıklarla bu değerleri raporlamaktadır. Böylece radyasyonun insanlardaki biyolojik etkileri ve sağlık için risk faktörü oluşturabilecek durumlar belirlenebilmektedir (UNSCEAR Report, 2000).

Buna göre Ürdün'n çeşitli bölgelerinden (Ajloun, Dabaa'h, Azrak) alınan mermer örneklerinin gama spektrometrisi ile doğal radyoaktivite değerlerinin llmesi için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Dabba'h taş ocaklarından alınan mermer örneklerinin <sup>226</sup>Ra konsantrasyon değerleri 264.9 ile 369.5 Bq/kg değerleri arasında bulunmuştur. Azrak ve Ajloun bölgelerinden alınan örneklerdeki maksimum <sup>226</sup>Ra konsantrasyon değerleri ise 28.3 ile 23.41 Bq/kg arasında llmştr. Sonuçlar değerlendirildiğinde, OECD kriterlerine göre Dabaa'h bölgesinden alınan mermerlerin konut inşaatında kullanılmasının insan sağlığı için zararlı olacağı görülmüştür (Khatibeth, 1997).

in'deki ticari amaçlı kullanılan mermerlerin radyolojik risklerinin belirlenmesi amaçıyla NaI(Tl) gama işını spektrometresi kullanılarak matris dönüşümü temelli spektral sıyırma tekniği ile <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonları bulunmuştur. Bu mermerlerin <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonları sırasıyla 8.4 -157.4, 5.6-165.5 ve 44.1 -1352.7 Bq /kg aralığında bulunmuştur. Radium eşdeğer aktivitesi, dış tehlike indeksi, i tehlike indeksi ve yıllık gonadal doz eşdeğeri hesaplanmış ve uluslararası önerilen değerlerle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara ve kıyaslamalara göre örneklerden birinin evrensel değerlerin üstünde değerlere sahip olduğu ve bu bağlamda ticari kullanımının insan sağlığı için zararlı olacağı kanısına varılmıştır (Lu, 2006). Pakistan'da gerçekleştirilen bir doğal radyoaktivite araştırmasına göre Rawalpindi/İslamabad sanayi bölgesinden alınan çeşitli mermerler için HPGe dedektörü ile yapılan ölümler sonucunda <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th'nin ortalama aktivite konsantrasyonları aralığının sırasıyla 6.15-33.42 Bq/kg, 1.45-29.34 Bq/kg, 1.16-6.28 Bq/kg olduğu görülmüştür. Radium eşdeğer aktivite değeri ise 5.56-33.42 Bq/kg değerleri arasında bulunmuştur. Tahmin edilen yıllık etkin doz hızı 0.04 mSv/y olarak hesaplanmıştır. Tüm bu değerlerin UNSCEAR tarafından raporlanan tahmini değerlerin altında olduğu görülmüş ve bu mermerlerin konut inşaatında kullanılmasının insan sağlığına zararlı olmayacağı sonucuna varılmıştır (Aslam ve ark., 2002).

Mısır'da jeolojik örnekler ile (mermer ve granit) yapılan araştırmada, HPGe dedektörü kullanılmıştır. Bu çalışmada gama işını spektrometresi sonucunda

absorblanmış doz hızı, mermer örnekleri için  $2.45 \pm 0.07$  –  $64.44 \pm 1.93$  nGy/sa aralığında bulunurken, granit örnekleri için  $41.55 \pm 1.25$  –  $111.94 \pm 3.36$  nGy/sa aralığında bulunmuştur.. Aynı örnekler için katı hal dedektörü (CR-39) ile radon soluma hızı tayin edilmiştir. Buna göre mermer örnekleri için radon soluma hızı  $8.0 \pm 2.39$  Bq/m<sup>2</sup>/gün ile  $30.20 \pm 5.06$  Bq/m<sup>2</sup>/gün aralığında saptanmıştır. Granit örnekleri için ise  $6.89 \pm 1.72$  ile  $25.79 \pm 4.38$  Bq/m<sup>2</sup>/gün aralığında değiştiği sonucuna varılmıştır. Etkin radyum içeriğinin ise mermer örnekleri için  $1.700 \pm 0.51$  ile  $6.42 \pm 1.08$  Bq/kg arasında, granit örnekleri için ise  $1.29 \pm 0.32$  ile  $5.63 \pm 0.96$  Bq/kg arasında olduğu görülmüştür. Radon soluma hızı ve etkin radyum içeriği değerlerinin HPGe dedektörü ile ölçülen uranyum konsantrasyonu değerlerine karşılık geldiği sonucuna varılmıştır (El-Dine ve ark., 2001).

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden alınan yapı malzemesi olarak kullanılan mermer örneklerinin gama, alfa ve beta radyasyonu ölçümleriyle, doğal radyoaktivite açısından incelenmesidir. Alınan sonuçlar ve yapılan hesaplamalar sonucunda bina yapımında kullanılan bu mermerlerdeki radyoaktivite değerlerinin UNSCEAR'in belirlediği doz sınırlarını aşp aşmadığı ve yapı malzemesi olarak kullanılmasının insan sağlığı için bir risk faktörü olup olmadığı saptanmıştır.



## 2. MERMERLER

### 2.1 Mermer Oluşumu ve Mermerlerin Genel Özellikleri

Mermer, karbonat bileşimli kayaçların başkalaşım geçirmiş halidir (DPT, 2001). Bu kayaçların içeriğinde kalsiyum karbonat, magnezyum karbonat ve metal oksitler bulunmaktadır. Kimyasal çözünme süreçlerinin farklılıklarına göre mermerler siyah, pembe, mavi, sarı gibi çeşitli renklerde ve farklı saydamlıklarda olabilmektedir. Yer hareketliliğinin sonucu olarak mermerler damarlı yapıya da sahip olabilmektedir. Yer kabuğunu oluşturan kayaçlar üç sınıfta incelenmektedir: magmatik, tortul ve metamorfik kayaçlar (Erguvanlı, 1994). Mermerler metamorfik kayaçlar sınıfında yer almaktadır. Metamorfik kayaçlar magmatik ve tortul kayaçların basınç, kesim, ısı ve benzeri dış etkenler dolayısıyla şekil değiştirmesi sonucu meydana gelmişlerdir (Erguvanlı, 1994; Blyth, 1983).

Mermerlerin fiziko-mekanik özellikleri, mermerin işleniş yönteminin ve kullanım alanının belirlenmesinde bilinmesi gereken parametrelerdir. Mermerlerin başlıca fiziko-mekanik özellikleri: sertlik, çözünme yeteneği, renk, yoğunluk, basınç direnci, doluluk oranı, donmaya ve aşınmaya karşı dayanıklılıktır (Güleç, 1973). Mermerlerin sertlik derecesi arttıkça madenden çıkarılması güçleşmekte, maliyeti artmaktadır. Mermer içindeki mineral bileşimine, yabancı madde miktarına, doku ve porozitlerine bağlı olarak sertlik derecesi değişmektedir. Yoğunluk derecesi ya da birim hacim kütlesi de mermerin sınıflandırılmasında önemli bir parametredir. 1910 standartlarına göre bir mermerin yoğunluğu en az  $2,55 \text{ g/m}^3$  olmalıdır. Doluluk oranı ise yoğunluğun özgül ağırlığa bölünmesi ile bulunur. Bu değer de %98'in altına düşmemesi yine 1910 Türk standartlarında yer almaktadır. Çözülme oranı mermerin hangi ortamda kullanılmasının uygun olacağına dair fikir verir. Yüksek çözülme yeteneği bulunan bir mermer türünün dış ortamda kullanılması uygun olmaz. Bu tip mermerlerin binaların içinde kullanılması daha uygundur. Mermerin kalitesinin belirlenmesinde rengi de oldukça etkindir. Kalsiyum karbonat beyaz renkli olmasına

karşın mermerin yapısında bulunan mineraller ve demir oksitleri mermerlere değişik renkler verir. Türkiye mermerlerinde renk çeşidi oldukça fazladır. Farklı renkli ve damarlı yapıdaki mermerler estetik görünmekte ve dekorasyonda sıkça kullanılmaktadır. Mermerlerin basınca karşı direnci de yine kullanım alanlarını etkileyen bir fiziko-mekanik özelliktir. Yer kaplamasında ve basamaklarda basınç direnci yüksek mermerler tercih edilmektedir. Kalsiyum karbonat miktarı arttıkça basınca olan direnç de artmaktadır. Mermerlerin emdiği su dondukça mermerin basınç direncinin düştüğü saptanmıştır. Bu sebeple donmaya karşı hassas olan mermerler dış kaplamada kullanılmamalıdır. Özellikle yayaların sıkça kullandığı kamu alanlarındaki mermer yer kaplamaları sıkça aşınmaya uğramaktadır. Eğer uygun taşlar kullanılmazsa bu alanlardaki zemin kullanılmaz hale gelme riski taşımaktadır. 1910 Türk standartlarına göre 15 cm<sup>3</sup>/50cm<sup>2</sup>'den fazla aşınma değerine sahip mermerler tercih edilmemelidir (Güleç, 1973). Mermer endüstrisinde taşlar kimi zaman kesilip parlatılıp ve yüzeyi işlenerek kullanılmakla beraber kimi zaman ham hali ile de kullanılabilir (Korkmaz, 2003).

Mermerlerin içerdiği doğal radyoaktivite de mermerler için önemli bir özelliktir. Radyoaktivite seviyesine göre bina içinde kullanımlar için uygunlukları tartışılabilir. Bina yapımında kullanılan malzemelerin hemen hemen hepsi tabiat kaynaklıdır ve bu malzemelerde, çeşitli konsantrasyonlarda doğada bulunan radyoizotoplar bulunur. İnsanlar yaşamının büyük bir bölümünü kapalı alanlarda geçirmektedir ve bu sebeple yapı malzemelerinden kaynaklı radyasyona bina içinde sıkça maruz kalınmaktadır. Bu nedenle, insanların günlük hayatta maruz kaldığı doz seviyesinin belirlenmesinde yapı malzemelerinin içerdiği radyoaktivite miktarlarının bilinmesi çok önemlidir (Kovler ve ark., 2002). Mermer de dünyada ve ülkemizde yapı malzemesi olarak sıkça kullanılmaktadır. Bu bağlamda, mermerlerin radyoaktivite miktarlarının saptanması ve insan sağlığı için risk faktörü olup olmadığının araştırılması oldukça önemlidir.

## **2.2 Mermerlerin Kullanım Alanları**

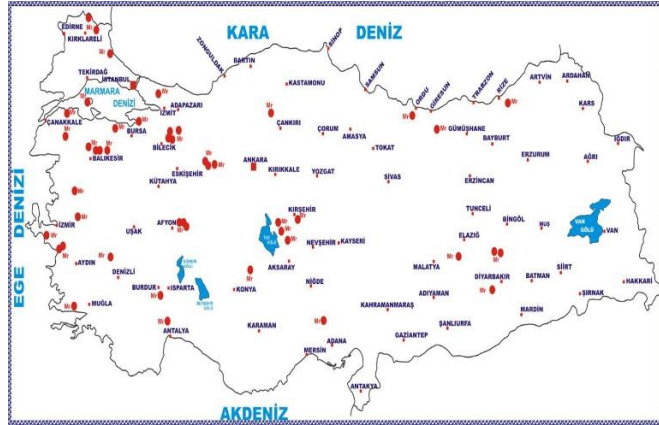
Mermer, tarih boyunca birçok medeniyet tarafından çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Özellikle mermer rezervinin zengin olduğu Anadolu'da, o bölgede kurulan medeniyetlerden kalan mermer ile yapılmış pekçok esere rastlanabilmektedir. Bu doğal taşın günümüzde de sıkça kullanımının başlıca sebebi dayanıklılığı, estetiği ve



çoğu yapı malzemesine kıyasla ekonomik oluşudur. Mermerlerin başlıca kullanım alanları inşaat sektörü, heykeltıraşlık, dekorasyon, süs eşyası yapımı, mezarcılıktır. Mermerin işlenmesi aşamasında ortaya çıkan mermer parçacıkları ve tozları da değerlendirilebilmektedir. Mermer tozu seramik, plastik, çimento, tarım, yem, boya, kağıt ve yapı malzemesi sanayilerinde kullanılmaktadır (Dadak, 2012). Mermer ülkemizde turizmin geliştiği bölgelerde otel inşaatlarında ve çevre/bahçe düzenlemelerinde sıkça tercih edilen bir doğal taş türüdür. Ayrıca kimyasal maddelere karşı dayanıklı olması sebebiyle fabrika ve atölyelerin iç kaplamalarında yaygınlıkla kullanılmaktadır (Öztürk, 2006).

### 2.3 Türkiye'nin Mermer Rezervleri

Türkiye'nin mermer rezervi oldukça zengindir (Şekil 2.1). Ülkemizde 5.161.000.000 m<sup>3</sup> mermer potansiyeli bulunmaktadır (Url-1). Bu potansiyel dünya mermer rezervinin yaklaşık %36'sına karşılık gelmektedir. Türkiye'deki doğal taş ihracatının büyük bir kısmını mermer ihracatı oluşturmaktadır.



Şekil 2.1 : Türkiye mermer yatakları haritası (Url-1).

Yeni keşfedilen taşlar ve üretim kapasitesi artışına bağlı olarak taş ihracatı gün be gün gelişmektedir. 1985 yılında 10 milyon dolar olarak belirlenen doğal taş ihracatı, 2000 yılında 189 milyon dolara ulaşmıştır (Öktem, 2001). Türkiye'nin hemen her bölgesinde mermer rezervi bulunmaktadır. Bilinen en eski mermer üretim bölgelerinden olan Anadolu'da çok çeşitli mermerler bulunmaktadır. Başlıca ihracat yaptığımız ülkeler Amerika, İsrail ve Suudi Arabistan'dır (Günoğlu, 2008). Mermerler büyük oranda işlendikten sonra pazara sunulmaktadır. Mermerin işlenmesi aşamasında çevreye ciddi zararlar verilmemektedir. Dünyada kaliteli

mermer olarak nitelendirilen 80 farklı çeşitte ve 120 farklı renkte mermer Türkiye rezervlerinde mevcuttur (Çizelge 2.1). Rezervler çoktan aza doğru sırasıyla Ege, Marmara, İç Anadolu, Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde yer almaktadır (Dadak, 2012). Rezerv yoğunluğunun sonucunda mermer ithalatı ve ihracatı Türkiye'nin ekonomisinde hatırı sayılır bir paya sahip olmaktadır.

**Çizelge 2.1** : Türkiye'deki mermer çeşitleri (Bilgin, 1998).

Mermer adı
Afyon Beyaz-Kaplan Postu- Menekşe
Akhisar Beji
Akhisar Siyah
Bartın Bej
Bilecik Pembe-Gül Kurusu
Burdur-Kahverengi-Bej
Denizli Pembe
Diyarbakır Bej
Ege Bordo(Muğla)
Ege Kahve(Manisa)
Ege Füme-Ege Vişne(İzmir)
Efes Güneşi(Balıkesir)
Elazığ-Vişne-Petrol Yeşili-Sunta-Siyah İnci(Elazığ)
Gölpazarı Bej-Harmankaya
Hazar Pembe
Karacabey Siyahı
Karaburun Bej
Kırşehir Beyaz-Siyahı
Kastamonu Eflani Bej
Kumru Türü(Balıkesir)
Leopar-Afrodit-Salome-Süpren(Eskişehir)
Manyas Beyaz
Marmara Beyaz
Milas Leylak-Sedef-Newyork-Limon-Kavaklıdere(Muğla)
Muğla Beyazı-Pembe
Osmaniye Vişne(Adana)
Sazara Sedef
Saracakaya Bej
Sivas Beji
Sivrihisar Bej
Söğüt Bej
Teos Yeşil-Teos Ateş
Toros Siyah-Bej
Uşak Yeşil-Beyaz
Vize Pembesi

### **3. RADYASYON VE RADYOAKTİVE**

#### **3.1 Radyasyon**

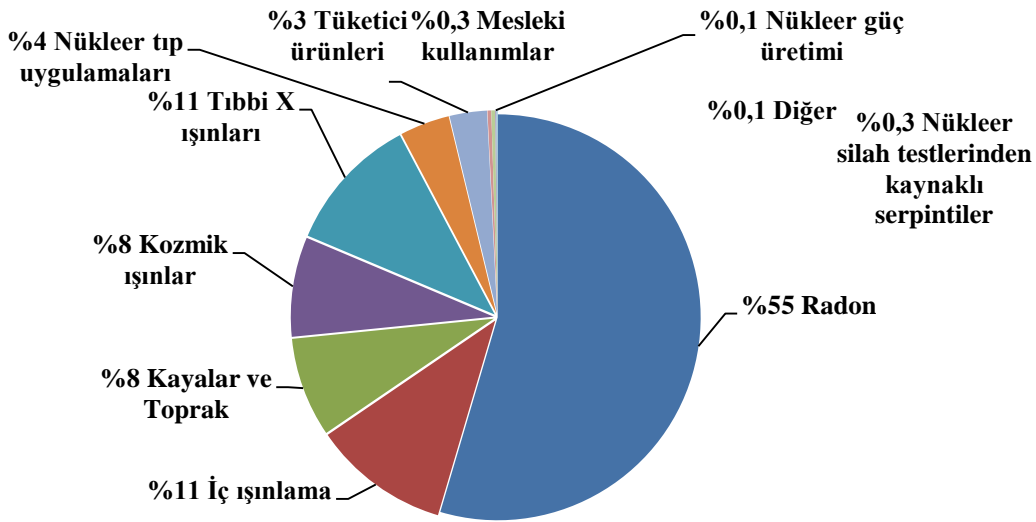
Partikül akımı ile veya dalga tabiatına uygun olarak bir maddeye veya ortama enerji transfer edilmesine radyasyon denir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2010). Radyasyon türüne, enerjisine ve kaynağına göre üç ana sınıfta incelenmektedir. Türüne göre partiküler (alfa, beta, nötron, hızlandırılmış elektron, alt parçacıklar, ağır çekirdekler vb.) ve elektromanyetik radyasyon (gama, X, morötesi, görünür ışık, kızılötesi, mikro dalgalar, radar dalgaları, radyo dalgaları) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Radyasyonun madde ile etkileşimine bağlı olarak yapılan bir diğer sınıflandırma türü ise radyasyonun enerjisine göre sınıflandırılmasıdır. Enerjisine göre sınıflandırmada ise radyasyon, iyonizan ve iyonizan olmayan radyasyon olmak üzere iki ana başlıkta incelenir. İyonizan radyasyon ise kendi içinde doğrudan (alfa, beta, hızlandırılmış elektron, ağır çekirdekler) ve indirekt iyonizan (nötron, X, gama) radyasyon alt başlıklarına ayrılır. Kaynağına göre ise radyasyon doğal ve yapay radyasyon olmak üzere ikiye ayrılır.

##### **3.1.1 Yapay radyasyon kaynakları**

Radyoaktivitenin keşfi ile birlikte teknolojik gelişmeler amacıyla insan üretimi radyoizotoplar ve X-ışınları kullanılmaktadır. Yapay radyasyon kaynakları başlıca tıbbi, zirai ve endüstri alanlarında kullanılmaktadır. Tıpta teşhis ve tedavi amacıyla, nükleer reaktörlerde enerji üretiminde, endüstride ürünlerin kalite kontrolünde, gıda sektöründe sterilizasyon gibi amaçlarla yapay radyasyon kaynakları kullanılmaktadır (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2010; Tüysüz, 2004). Yapay radyasyonun dağılımında en büyük payı tıbbi uygulamalar oluşturmaktadır.

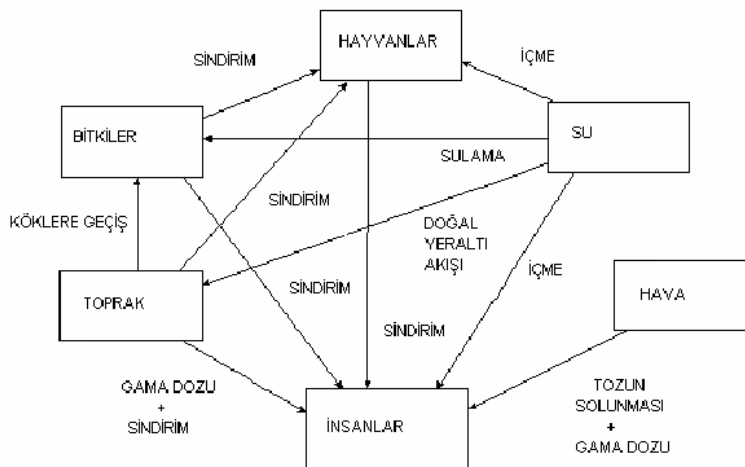
### 3.1.2 Doğal radyasyon kaynakları

Dünyanın oluşumundan bu yana var olan çok uzun yarı ömre sahip radyoaktif elementler yaşadığımız çevrede maruz kaldığımız doğal radyasyonu oluşturmuşlardır (Şekil 3.1). Doğal radyasyon düzeyi teknolojinin ilerlemesi, nükleer kazalar ve nükleer bomba denemeleri sebebiyle artmaktadır.



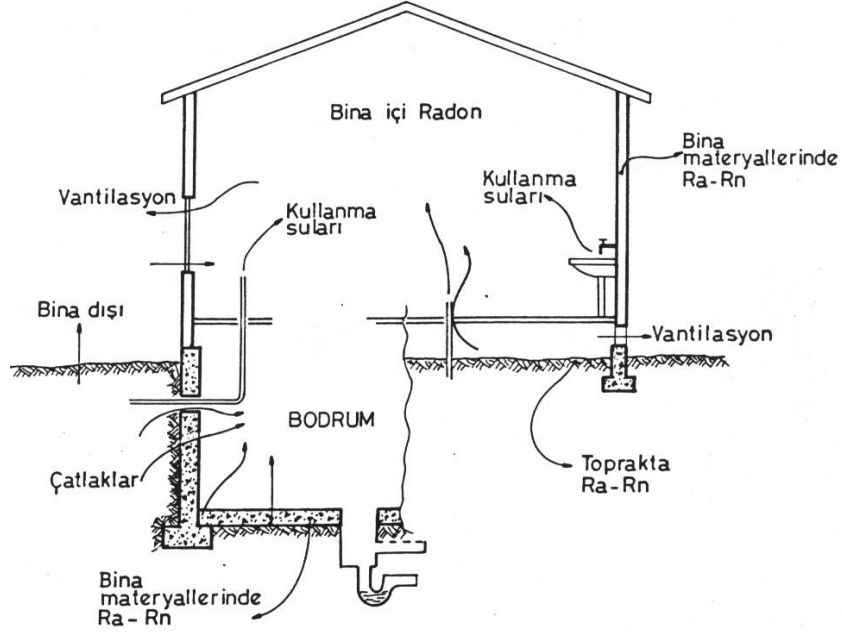
Şekil 3.1 : Maruz kalınan radyasyonun kaynakları (NCRP,1987).

Radyasyonun, doğal radyasyon kaynaklarından insanlara geçişi çok çeşitli yollarla olmaktadır (Şekil 3.2). Birbiriyle bağlantılı bu yollar ile insanlar farklı türde ve dozda çevresel radyasyona maruz kalmaktadır.



Şekil 3.2 : Radyasyonun geçiş yolları (Değerliler, 2007).

Yer kabuğunda mevcut bulunan radyoaktif elementler, bunların bozunum ürünleri ve yaydığı ışınlar başlıca doğal radyasyon kaynaklarıdır. Yer kabuğunda bulunan radyoizotopların bozunumu sonucunda açığa çıkan radon gazı en yaygın olarak maruz kaldığımız doğal radyasyonun kaynağıdır. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi Radon gazına çok çeşitli yollarla bina içi ve bina dışında maruz kalınır.



**Şekil 3.3 :** Radon geçiş yolları (Dayanıklı, 2004).

Bina içinde maruz kalınan radon miktarı yapı malzemesinin türüne, binanın havalandırılmasına, bölgenin meteorolojik özelliklerine ve bina içinde geçirilen süreye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Radon bulunduğu akciğerlerde tutunur ve bozunumuna akciğer dokusunda devam ederek açığa çıkardığı enerjiyle dokuya zarar verir. Dokuda meydana gelen deformasyonlar akciğer kanserine sebep olabilmektedir. Yüksek dozda radon gazına maruz kalmak kanser riskini artırır (Stabin, 2008; TAEK, 2002).

İnsanların maruz kaldıkları karasal radyon dozu eşit değildir. Bulunulan bölgeye, bölge yer tabakasındaki radyoizotop konsantrasyonuna göre değişiklik göstermektedir (Özger, 2005). Yüzeğe yakın atmosferde bulunan doğal radyoaktivite de insan sağlığını etkilemektedir. Radyoaktif toz ve partiküller, kozmik etkileşimler, volkanik patlamalar ve nükleer deneyler neticesinde ortaya çıkan radyoaktif ürünler atmosferdeki radyoaktivite miktarını arttırmaktadır. Bu radyoaktif ürünler yeryüzüne doğru alçalarak solunum veya temas ettikleri bitkisel besinlerin tüketilmesi sonucunda sindirim yolları gibi çeşitli yollarla insanlara ulaşmaktadır.

Gezegeneimize uzaydan gelen kozmik ışınlar bir diğer doğal radyasyon kaynağıdır. Kozmik ışınlar dolayısıyla maruz kalınan radyasyon düzeyi de bulunulan bölgeye göre değişiklik gösterir. Kozmik ışınların yoğunluğu ekvator dan kutuplara gittikçe arttığı için ekvator dan uzaklaştıkça maruz kalınan doz da artış gösterir. Bununla birlikte yükseklik de maruz kalınan kozmik radyasyon dozu için önemli bir faktördür. Rakım arttıkça radyasyon miktarı da artar. Özellikle çok yüksek dağlarda, deniz seviyesine kıyasla birkaç kat fazla radyasyona maruz kalınabilir. Yüksekliğin bu etkisinden dolayı, uçak seyahatlerinde kozmik radyasyondan daha çok etkilenilir. Atmosfer kozmik radyasyona karşı bir zırh niteliğindedir. Bu sebeple atmosfer tabakalarındaki deformasyonlar maruz kalınan kozmik radyasyon dozajı ile doğrudan ilişkilidir. Atmosfere giren kozmik ışınlardaki nötron ve protonların atmosferde mevcut bulunan elementlerle etkileşmesi sonucunda bazı radyoizotoplar meydana gelir. Bu radyoizotoplar solunum yoluyla veya besinler vasıtasıyla vücuda girer iç ışınlamaya sebep olur (Froehlich, 2009; Değerliler, 2007; Kaçar, 2006).

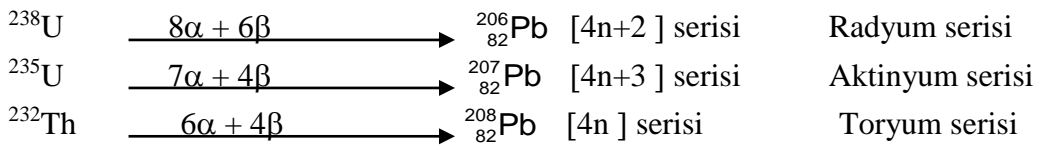
Canlılar doğal radyasyona dış ortamdan maruz kaldıkları gibi vücutta bulunan veya besin maddeleri ve içme suları ile alınan radyoaktif elementler vasıtasıyla da maruz kalmaktadırlar. Bahsedilen yollarla maruz kalınan radyasyon için iç ışınlama tanımı da kullanılır. Vücudumuzda bulunan en etkin radyoaktif element Potasyum-40 elementidir. Solunum ve sindirim yollarına hava, hayvansal ve bitkisel gıdalar ile alınan radyoaktif maddeler kimi zaman belirli organlarda birikmektedir.

### **3.2 Radyoaktivite**

Kararsız çekirdeklerin radyoaktif ışınlar yayarak farklı çekirdeklere dönüşmesine radyoaktivite denir. Radyoaktivite gelişigüzel gerçekleşen bir olaydır, gerçekleşeceği vakit tahmin edilemez. Atom numarası 82'den büyük olan her element radyoaktiftir (Smith ve Beresford, 2005; Hallenbeck, 1994). Radyoaktivite ilk kez 1896 yılında Henri Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Radyoaktivite doğal ve yapay radyoaktivite olmak üzere ikiye ayrılır. 1914 yılında Curie ve Joliot, kararlı elementlerin radyoaktif hale getirilmesini keşfederek yapay radyoaktiviteyi bulmuşlardır (Turner, 1995; Günoğlu, 2008).

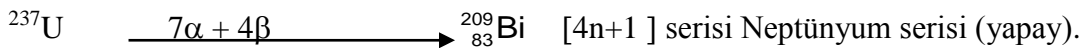
### 3.2.1 Doğal radyoaktif seriler ve radyoaktif denge

Doğada yer alan tüm ağır elementler ( $Z > 83$ ) radyoaktiftir ve  $\alpha$  ya da  $\beta$  yayınımları ile bozunurlar. Bizmut nüklidi ( $Z = 83$ ), kurşun ( $Z = 82$ ) nüklidinden sonraki kararlı olan tek nükliddir. Ağır elementler radyoaktif ürünler vererek, kararlı bir duruma ulaşana dek bozunurlar. Doğada yer alan tüm ağır radyonüklidler üç bozunum serisinden birine dahildirler.  $^{238}\text{U}$  (Radyum serisi),  $^{235}\text{U}$  (Aktinyum serisi),  $^{232}\text{Th}$  serisi,  $4n+2$  serisi,  $4n+3$  serisi,  $4n$  serisi olarak da isimlendirilir. Her seride bir asal gaz vardır: bu da radyum serisinde radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), aktinyum serisinde aktinon ( $^{219}\text{Rn} = \text{An}$ ), toryum serisinde toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) olarak isimlendirilir.



Bir  $\alpha$  bozunumu sırasında kütle numarası dört birim değiştiği için, radyonüklidin kütle numarası dörde bölünerek hangi gruba dahil olduğu belirlenebilir. Ayrıca bu bozunum serilerinin bir gösterim şekli de serideki radyonüklidlerin atom ağırlıklarının bir tamsayı olmak üzere  $4n$ 'nin fonksiyonu olarak göstermektir. Uranyumun izotopları alfa ve beta-parçacığı yayınlamaya bozunurlar ve kararlı hale geçerler ve uranyumun radyoaktif bozunum serilerini oluştururlar.  $^{238}\text{U}$  ve  $^{235}\text{U}$  bozunum serileri, periyodik sistemin bu bölgesinde yer alan, doğada bulunan radyoaktif elementleri içerirler. Şekil A.1'te görüldüğü gibi  $^{238}\text{U}$  serisinde  $^{238}\text{U}$  ana elementi oluşturur, bu ana element  $8\alpha$  ve  $6\beta$  yayınlamaya kararlı bir nüklid oluşturur ( $^{206}\text{Pb}$ ). Uranyum  $^{238}\text{U}$  serisi ile başlar ve kararlı  $^{206}\text{Pb}$  nüklidi ile biter, atom ağırlığı dörde bölündüğünde kalan ikidir. Uranyum serisi Şekil A.1 de verilmiştir. Aktinyum serisi  $^{235}\text{U}$  ile başlar  $^{207}\text{Pb}$  ile biter kalan 3'tür. Aktinyum serisi Şekil B.1' de verilmiştir.

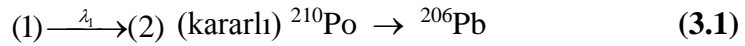
$^{237}\text{U}$  ile başlayan dördüncü bir seri vardır:  $4n+1$  serisi, bu yapay bir seridir.



Bu seri 1 kalanla neptünyum serisidir, bu serinin en uzun ömürlü üyesi  $^{237}\text{Np}$   $2,2 \cdot 10^6$  yıl yarı ömürlüdür. Neptünyum serisi Şekil C.1'de verilmiştir. Bu süre jeolojik olarak kısa bir zaman aralığıdır. Bu seri bozunumun güneş sisteminin oluşumu sırasında gerçekleşmiş olmalıdır. Dünyanın oluşum süreci yaklaşık  $4,7 \cdot 10^9$  yıl olduğundan bu seri doğada mevcut değildir (Hacıyakupoğlu, 2010). Neptünyum doğada yoktur, serideki bozunum ürünleri de yapay olarak üretilebilir.

Toryum serisi  $^{232}\text{Th}$  ile başlar ve  $^{208}\text{Pb}$  ile biter, kalanı yoktur. Toryum serisi 11 ürün radyonüklid içerir. Karmaşık bir gama spektrumu verir.  $^{232}\text{Th}$  un yarı ömrü  $1,41 \cdot 10^{10}$  yıldır. Özgül aktivitesi ise  $4.1 \text{ Bq/mg}$  dır. Toryum serisi Şekil D.1' de verilmiştir Tüm bozunum serilerinin herhangi bir ara basamağına gama ışınları da eşlik ediyor olabilir. Her dört serinin bir gaz ürünü (Radonun bir izotopu) vardır ve seriler kurşunun kararlı bir izotopu ile biter. Doğada fiziksel ve kimyasal süreçlerin etkisi olmadıkça, primordial  $^{238}\text{U}$  daha kısa yarı ömürlü ürün radyonüklidleriyle sürekli dengede bulunur (Froehlich, 2009). Bu da serinin basamaklarındaki ürünlerle dengede olmak anlamına gelir. Bu dikkate alındığında  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ 'ye bozunduğunda belirgin bir değişiklik olur. Ürün radon, asal (noble) bir gazdır; başlangıç radyonüklidiyle kimyasal bir bağı yoktur. Radonun yarı ömrü bir kısmının atmosfere atılmasını sağlayacak kadar uzundur. Birçok hafif elementin doğal primordial radyoaktif izotopları vardır. Bunlardan en önemlilerinden biri, yarı ömrü  $1,28 \cdot 10^9$  yıl olan  $^{40}\text{K}$ 'tır. Diğer doğal radyonüklidler kozmojenik orjinlidir. Kozmojenik olarak dünyanın atmosferik yapısına girmişlerdir. Atmosferde kozmik ışınlarla etkileşim sonucu  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{21}\text{Na}$ ,  $^{14}\text{K}$  oluşur (Vertes ve ark., 2003; Parry, 1991).

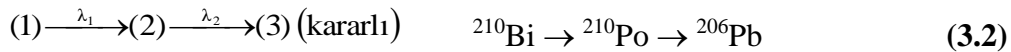
Doğal olarak kararsız olan çekirdeklere, doğal radyoaktif çekirdekler denir. Başlangıç radyonüklidinin (1) ve ürün radyonüklidin (2) ile gösterildiği aşağıdaki bozunum şemasına göre  $N_1$  ve  $N_2$  (1) ve (2) izotoplarının çekirdek sayısı;  $t$  zaman;  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  (1) ve (2) izotoplarının bozunum sabitleri; (1) izotopunun başlangıçtaki çekirdek sayısı olmak üzere; (2) izotopu için bozunum hızı aşağıdaki denklemle elde edilir :



$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$N_1 N_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

Başlangıç radyonüklidinin (1) ve ürün radyonüklidlerin (2) ve (3) ile gösterildiği aşağıdaki bozunum şemasına göre:





$N_1$  ve  $N_2$  (1) ve (2) izotoplarının çekirdek sayısı;  $t$  zaman;  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  (1) ve (2) izotoplarının bozunum sabitleri; (1) izotopunun başlangıçtaki çekirdek sayısı olmak üzere; (2) izotopu için bozunum hızı:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (3.3)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemde (1) izotopunun  $t$  anındaki çekirdek sayısı;  $N_1^0$  (1) izotopunun  $t=0$  anındaki çekirdek sayısı olmak üzere,

$$N_1 = N_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad (3.4)$$

denklemleri elde edilir. (3.3) denklemi

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 \cdot N_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad (3.5)$$

şeklinde düzenlenerek,  $t = 0$  anında  $N_2^0 = 0$  varsayımıyla Leibnitz denklemine göre çözülür. Leibnitz denkleminin

$$\frac{dy}{dx} + Py = Q \quad (3.6)$$

çözüm denklemleri;

$$y = \exp\left(-\int P dx\right) \int Q \exp\left(\int P dx\right) dx + C \exp\left(-\int P dx\right) \quad (3.7)$$

$y=N_2$ ,  $x=t$ ,  $P= \lambda_2$ ,  $Q = \lambda_1 N_1^0 \exp(-\lambda_1 t)$  yerleştirilerek, çözüm elde edilince,  $t$  süresi sonundaki (2) izotopunun çekirdek sayısı,

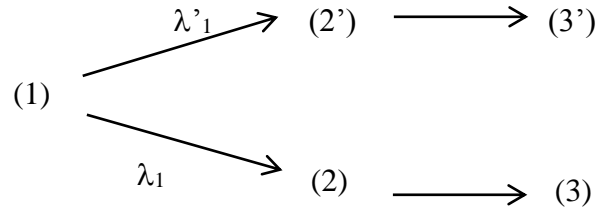
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} \exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \quad (3.8)$$

bulunur. Aktivite tanımı  $A = \lambda N$  olduğundan,  $t$  süre sonundaki (2) izotopunun aktivitesi;

$$A_2(t) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.9)$$

denklemleri hesaplanır.

$$(1) \xrightarrow{\lambda_1} (2) \xrightarrow{\lambda_2} (3) \dots \dots \dots \xrightarrow{\lambda_n} \quad (3.10)$$



Ardısıra birçok radyoaktif bozunumun (3.10) ve branşlaşmış bozunumların (3.11) söz konusu olduğu durumlarda Leibnitz'e göre çözüm kullanıldığında işlemler çok uzun sürer, çünkü bir denklem çözülüp diğerine yerleştirilecektir. Diğer bir çözüm yöntemi olarak Bateman-Rubinson denklemleriyle gerçekleştirilir.  $N_2^0 = N_3^0 = \dots = N_n^0 = 0$  varsayımıyla oluşturulmuş olan Bateman - Rubinson denklemleri aşağıda görülmektedir:

$$N_n(t) = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \dots \lambda_{n-1} \cdot N_1^0 \sum_{i=1}^{i=n} C_i \exp(-\lambda_i t) \quad (3.11)$$

$$C_i = \prod_{j=1}^{j=n} \frac{1}{\lambda_j - \lambda_i} \quad (i \neq j) \quad (3.12)$$

İncelenen radyonüklidler için oluşturulan radyoaktif bozunum şemalarına göre elde edilen denklemler, Leibnitz denklemine göre ya da diğer bir çözüm yöntemi olan Bateman-Rubinson denklemleriyle çözülür (Soete, ve ark., 1972; Benedict ve ark., 1981). Branşlaşmış bozunumlar için Bateman-Rubinson denklemlerinde bozunum yolu olasılığı ile ilgili düzeltmeler yapılır.

Zincirleme bozunma eşitliklerine uygulanan bazı özel durumlar neticesinde iki farklı denge durumunun ortaya çıktığı görülmüştür. Bunlardan ilki geçici denge durumudur. Geçici denge durumunda ana çekirdeğin yarı ömrü ürün çekirdeğin yarı ömrüne yaklaşık eşittir ( $\lambda_1 \cong \lambda_2$ ). İkinci durum ise sürekli denge olarak adlandırılır ve sürekli dengede ana çekirdeğin yarı ömrü birinci ürünün yarı ömrüne kıyasla çok çok büyüktür ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ).

Geçici denge koşullarına göre oluşacak denklem aşağıdaki gibidir:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.13)$$

Bu denklemde t ye göre türev alınıp sifıra eşitlendiğinde  $N_2$  nin maksimumuna ulaştığı tm değeri hesaplanır.

$\lambda_1 < \lambda_2$  ise denklem

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \quad (3.14)$$

haline gelecektir.  $\lambda_2 < \lambda_1$  ise

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.15)$$

denklemini elde edilir. Sürekli dengede ise  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  durumu ele alınır. Bu durumda (3.15) eşitliğindeki  $e^{-\lambda_2 t}$  terimi sifıra gider ve

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{10} \quad (3.16)$$

eşitliği oluşur. Ana çekirdeğin yarı ömrü çok çok büyük olduğu için hemen hemen sabit olarak kabul edilir ( $N_{10} = N_1$ ) ve

$$\lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2 \quad (3.17)$$

sürekli denge şartı elde edilir (Arya, 1970).

### 3.3 Radyoaktif Bozunum Türleri

Kararsız çekirdek bozunurken enerji kaybına uğrar. Kararsız çekirdek bir ya da daha fazla bozunum şekli geçirerek kararlı hale gelebilir. Radyoaktif bozunum türleri: alfa, gama yayınlanması, iç dönüşüm, beta bozunması, elektron yakalanması ve izomerik geçiştir.

#### 3.3.1 Alfa ( $\alpha$ ) bozunumu

Alfa bozunması ile çekirdek bir ürün çekirdeğe ve bir alfa parçacığına ( $He^4$ ) parçalanır. Böylece bu bozunum sonucunda ana çekirdek iki proton ve iki nötron kaybeder. Ürün çekirdeğin kütle numarası ana çekirdeğin kütle numarasından 4, atom numarası ise 2 azdır. Ürün çekirdek ana çekirdekten farklı atom numarasına sahip olduğu için kimyasal özellikleri de farklı olacaktır (Arya, 1970).

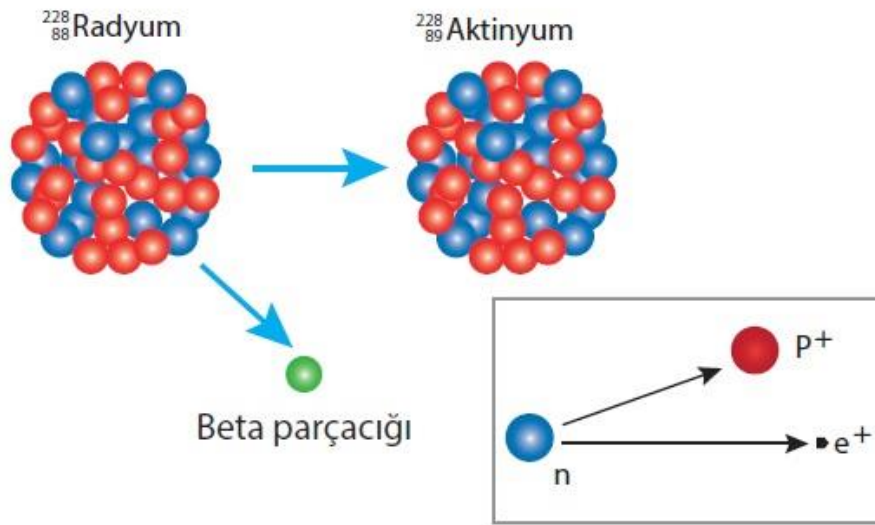
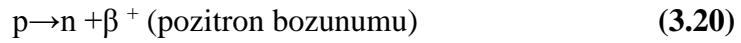
Alfa bozunumuna bir örnek:



Alfa parçacıkları ilerledikleri birim yolda çok sayıda iyon çifti oluşturmaktadır ve bu sayede soğurucu ortamdaki menzilleri oldukça kısadır. Bu durum, lineer enerji transferi değerlerinin büyük olduğunu gösterir. Buna ek olarak alfa parçacıklarının izledikleri yol neredeyse düz bir çizgiye benzemektedir (Turner, 1995).

### 3.3.2 Beta ( $\beta^-$ ) bozunumu

Genellikle fazla nötrona sahip olan bir çekirdeğin kararlı hale gelmek için gerçekleştirdiği bir bozunum türüdür (Günaydın, 2014). Bu bozunumda yayılan enerji elektron olarak ortama yayılır. Beta parçacığının kütlesi elektronun kütlesine eşittir. Fakat elektrondan farklı olarak hem negatif hem de pozitif yüklü olabilmektedir. Pozitif yüklü olana pozitron, negatif yüklü olanına ise negatron denir.



Şekil 3.4 : Negatron ve pozitron bozunumları (Ur1-2).

### 3.3.3 Gama ışını yayınlanması

Gama ışınları manyetik alan ile kolayca yolu saptırılmayan fakat giriciliği yüksek ışınlardır. X ışınları ile benzetilir fakat aralarındaki en önemli fark X ışınının atomun yörüngesinden, gama ışınının ise atomun çekirdeğinden yayınlanmasıdır. Genellikle alfa veya beta bozunumu gerçekleşen atomlar uyarılmış haldedir ve kalan bu fazla enerjisini gama ışını olarak yayınlamaktadır. Gama ışınları yüksüz ve kütsüzdür. Bu sebeple gama bozunumu sonucunda atomun atom numarası veya kütle numarası değişmez. Gama ışınının giriciliği ve enerjisi yüksek olduğu için, bu ışıma maruz kalmak insan sağlığı için oldukça zararlı olabilmektedir. Gama ışınının durdurulması alfa ve beta partiküllerinin durdurulmasına nispeten daha külfetlidir (Arya, 1970).

### **3.3.4 Elektron yakalama**

Yüksek sayıda proton bulunan atomun çekirdeği elektron yakalar ve proton ve elektron birleşerek nötron oluştururlar. Böylece atomun atom numarası bir düşerek iki aynı kütle numarası değerine sahip ana ve ürün çekirdek oluşur. Elektron yakalama sonucunda oluşan boşluğun doldurulması için yörüngeler arası elektron geçişleri başlar ve neticede X ışınları meydana gelir. Bazı durumlarda gama ışını da yayımlanabilir (Arya, 1970).

### **3.3.5 İç dönüşüm**

Uyarılmış bir çekirdeğin yörünge elektronuna enerji aktarması ve elektronun atomdan fırlatılması olayıdır. Dönüşüm sonunda elektronun açtığı boşluk bir başka yörüngeden gelen elektron ile doldurulur ve bu esnada karakteristik X ışını yayımlanır. İç dönüşümde herhangi bir yük değişimi gerçekleşmez. Atom numarası değişmez ve farklı bir atom ortaya çıkmaz. Nötrino çıkışı da söz konusu değildir. Yayınlanan karakteristik X ışını, atomun ilk hali hakkında bilgi verir (Arya, 1970).

### **3.3.6 İzomerik geçiş**

Radyoaktif bozunumlar sonucunda uyarılmış kalan atomlar kararlı hale geçebilmek için gama ışını yayarlar ve bu olaya izomerik geçiş denilir. İzomerik geçiş sonucunda atomun atom veya kütle numarasında bir değişiklik görülmez. İzomerik geçişlerde gama yayılması epey vakit aldığı için uyarılmış bu atomlar radyoaktif kabul edilir (Arya, 1970).

## **3.4 Radyasyon ve Radyoaktivite Birimleri**

Radyasyonun insan sağlığına olan etkisinin incelenmesi X ışınlarının keşfi ile ivme kazanmıştır. Bu amaçla birçok birim tanımlanmıştır. Uluslararası Radyasyon Bilimi Komisyonunun yaptığı çalışmalar doğrultusunda önceki yıllarda Uluslararası Birim (SI) olarak ışınlanma için Röntgen, aktivite için curie, absorblanan doz için rad ve doz eşdeğer birimi için rem birimleri kullanılmaktaydı. Fakat bazı hesaplamalar için yetersiz olduğu saptanan bu birimlerin yerine yeni birimler tanımlanmıştır. Çizelge 3.1 yeni birimleri ve eski birimlerle arasındaki bağıntıları göstermektedir.

**Çizelge 3.1:** Radyasyon ve radyoaktivite birimleri ve dönüşüm faktörleri.

Büyüklik	Eski Birimler ve Sembolü	SI Birimi ve Sembolü	Dönüşüm Faktörü
Aktivite	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1Ci=3,7x10 <sup>10</sup> Bq
Absorblanan Doz	Radiation absorbed doz (rad)	Gray (Gy)	1Gy=100rad
Işınlanma Dozu	Röntgen (R)	Coulomb/kilogram (C/kg)	1C/kg=3876 R
Eşdeğer Doz	Röntgen equivalent man (rem)	Sievert (Sv)	1Sv=100 rem

### 3.4.1 Aktivite birimi

Radyoaktivite birim zamanda bozunan atom sayısı olarak ifade edilir. Radyoaktif bozunum hızı olarak da tanımlanabilir. Eskiden 1 gram <sup>226</sup>Ra'nın bozunum hızı baz alınarak aktivite birimi olarak Curie(Ci) belirlenmiştir. Yarı ömrü 1620 yıl olan Radyum elementi referans alınarak Curie nin değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

Radyum elementinin bozunum sabiti :

$$\lambda = \frac{0.693}{1,62 \times 10^3 \text{y}} = 13,8 \times 10^{-12} \text{s}^{-1}$$

Radyumun kütlesi 226 akb dir ve 1 gram radyumda Avogadro Sayısı (6,02x10<sup>23</sup>) kadar atom bulunmaktadır. Bu bağlamda 1 gram radyum:

$$\frac{6,02 \times 10^{23}}{2,26 \times 10^2} = 2,66 \times 10^{21} \text{ atom içerir}$$

Parçalanma hızı:

$$dN/dt = |\lambda N| = 13,8 \times 10^{-12} \times 2,66 \times 10^{21} = 3,7 \times 10^{10} \text{ parçacık/s olarak bulunur (Arya,1970).}$$

### **3.4.2 Işınlama birimi**

Işınlama birimi, X ve gama ışınlarının havayı iyonlaştırabilme yetisinin ölçüsüdür. Işınlamanın eski birimi Röntgen(R) dir ve bu birim normal şartlarda 1 kg havada  $2,58 \times 10^{-4}$  Coulomb'luk negatif ve pozitif iyon meydana getiren foton miktarı olarak tanımlanabilir (Dişçi, 2012). SI sisteminde ise yeni ışınlama birimi olarak C/kg kullanılmaktadır.

### **3.4.3 Absorblanan doz birimi**

Bu birim malzemelerde absorblanan enerjinin bir ölçüsüdür. Absorblanan doz birimi, standart olarak kabul edilen hava için hesaplanmıştır. Eski birimi rad'dır ve herhangi bir malzemenin 1 gramının 100 erg lik enerjiyi absorblanması olarak tanımlanmıştır. SI birim sisteminde gray (Gy) olarak ifade edilen absorblanan doz birimi, 1 kg lık maddeye 1 joule enerji verilmesiyle tanımlanan iyonlaştırıcı radyasyonun dozudur (Özger, 2005) .

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

### **3.4.4 Eşdeğer doz birimi**

Absorblanan doz radyasyonun tipi ve iyonlaştırma miktarına bağlı olarak değişmektedir. Biyolojik etkiler iyonlaştırıcı radyasyonun kat ettiği birim yolun birim uzunluğunda kaybettikleri enerji miktarına (LET: Lineer Enerji Transferi) bağlıdır. LET değeri büyüdükçe canlıdaki etki de artacaktır. Eşdeğer doz birimi kalite faktörü ile soğurulan dozun çarpılması ile bulunur. Kalite faktörü radyasyonun cinsine göre farklılık göstermektedir (Turner, 1995).

**Çizelge 3.2:** Radyasyon tipi ve kalite faktörleri.

Radyasyonun Tipi	Kalite Faktörü (Q)
X- ve Gama ışınları, Elektronlar ve Beta Parçacıkları	1
Epitermal ve Termal Nötronlar	2
Hızlı Nötronlar	10
Alfa Parçacıkları	20

Eşdeğer dozun eski birimi rem (Roentgen Equivalent Man), yeni birimi ise Joule/kg'dır. Yeni birim Sievert (Sv) olarak gösterilmektedir. Sv ve rem arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem.}$$



## 4. MATERYAL VE METOT

### 4.1 Mermerlerin Alındığı Yerler ve Sınıfları

Bu çalışmada incelenen mermer örnekleri, Türkiye'nin farklı bölgelerinden alınan 12 örnekten oluşmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Mermer örneklerinin alındığı yerler (Bayram, 2009).

Bayram (2009) tarafından sınıflandırılan mermerlerin, 5 farklı doğal taş türü ve tek kayaç sınıfından oluştuğu belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Bu kayaçlar jeolojik ve tektonik olaylar sonucunda açığa çıkan basınç ve ısı ile fiziksel özellikleri değişen metamorfik (başkalaşmış) kayaçlardır.

**Çizelge 4.1 :** Mermer örneklerinin türleri, sınıfları ve alındığı yerler.

Örnek no	Doğal Taş	Alındığı Yer	Kayaç Sınıfı
2	Bej mermer	Antalya/ Korkuteli	Metamorfik
3	Bej mermer	Antalya/Burdur	Metamorfik
4	Bej mermer	Bilecik	Metamorfik
5	Beyaz mermer	Marmara Adası	Metamorfik
6	Bej mermer	Mersin/Taşucu	Metamorfik
7	Renkli mermer	Bursa/M. Kemal Paşa	Metamorfik
8	Bej mermer	Bilecik	Metamorfik
9	Bej mermer	Burdur/Karamanlı	Metamorfik
10	Bej mermer	Antalya	Metamorfik
11	Beyaz mermer	Muğla/Yatağan	Metamorfik
12	Siyah mermer	Kayseri/Toros	Metamorfik
14	Yeşil mermer	İzmir/Güzelbahçe	Metamorfik

#### 4.1.1 Mermer örneklerinin analize hazırlanması

Çalışmada kullanılacak mermer örneklerinde gama spektrometrik analiz ve toplam alfa-beta sayımı yapılması amacıyla temin edilen mermer örnekleri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Kaya Mekaniği ve Doğaltaş Laboratuvarı'nda çeneli kırıcı ile küçük parçalara bölündükten sonra, bilyalı öğütücü yardımıyla öğütülmüştür. 105°C sabit sıcaklıktaki etüvde kurutulan örnekler 2 mm'lik elekten geçirilmiş, tartılmış ve 0,5 L'lik polietilen Marinelli kaplarına yerleştirilmiştir. Radyoaktif dengeye gelmesi için Marinelli kapları bantlanarak kapatılmış ve en az 38 gün olmak üzere beklemeye bırakılmıştır. Gama spektrometrik analiz öncesinde, radyoaktif dengenin oluşması için Marinelli kaplarına alınan örnek, Şekil 4.2'de görülmektedir.



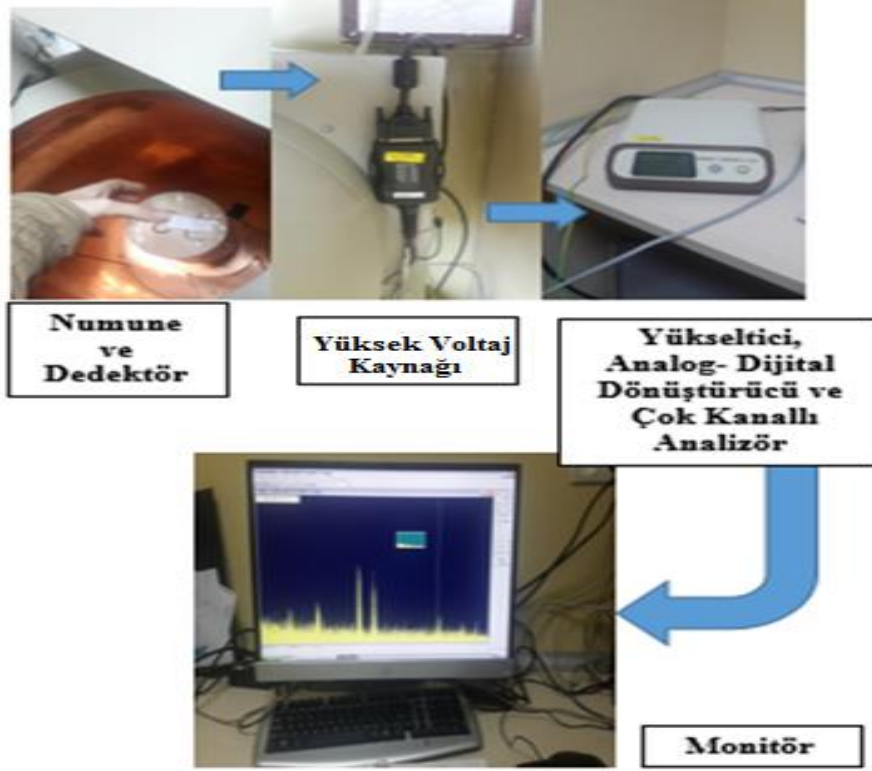
**Şekil 4.2 :** Marinelli kabına konulmuş örnek.

Örneklerin alfa ve beta ölçümlerine hazırlanması için öncelikle agat havanda dövülerek mümkün olan en küçük boyutlara getirilmiştir. 105°C sabit sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyuna kurutulanan örneklerden 100 er miligram tartılarak planşetlere konulmuştur. Her bir örnek 1000 dakika sayılmıştır.

## **4.2 Ölçümlerde Uygulanan Yöntemler ve Ölçüm Sistemleri**

### **4.2.1 Gama spektrometrisi**

Gama spektrometresi gama radyoaktivitesi belirlenmesi için kullanılan bir sistemdir. Malzemedeki radyoaktivitenin hangi radyoizotop kaynaklı olduğunu, bu radyoizotopların yaydığı gama ışınlarının enerjilerine göre ayıran sistemdir. Radyasyonun madde ile etkileşiminin özelliklerinden faydalanılarak gama ışınları kaydedilir ve enerjisi ölçülür. Gama ışını enerjiyle orantılı olarak üretilen elektrik sinyalleri dedektörde toplanarak elektronik düzeneklerle ölçülür. Gama spektrometre sistemini oluşturan elemanlar: yarı iletken dedektörler, radyasyon zırhı, yüksek voltaj kaynağı, ön yükseltici, yükseltici, analog-dijital dönüştürücü, çok kanallı analizör ve spektrumun gözleneceği bilgisayardır.



**Şekil 4.3 :** Gama spektroskopi sistemi.

Bu çalışmada mermer örneklerinin gama spektrometrik analizleri yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) kullanılarak yapılmıştır. Yarı iletken dedektörlerden olan HPGe dedektörünün verimi düşük, ayırma gücü ise yüksektir. HPGe dedektörler p-tipi veya n-tipi olarak tasarlanabilmektedir. Dedektöre besleme enerjisini yüksek voltaj kaynağı vermektedir. Dedektörden gelen düşük sinyallerin büyütülmesi ön yükseltici ile yapılır. Dedektör ve sonraki bileşenleri arasındaki direnç seviyesi ön yükselteç sayesinde ayarlanır. Ön yükseltecin gönderdiği sinyalleri ise yükselteç cihazı tekrar yükseltir ve biçimlendirir. Bu sinyaller ise analog dijital çevirici (ADC) sayesinde genliği ile orantılı sayısal sisteme dönüştürülür. Çok kanallı analizör (MCA) gelen her sinyali dijital hale getirir ve hafızaya alır. Bu cihazda her kanal bir enerji seviyesine denk gelmektedir. Sayım süresince gelen sinyallerin birikmesiyle pik oluşur ve pikler bilgisayar ortamında spektrum olarak görülür. Gama spektroskopi sistemindeki ölçümler kanal aralığı 8K (8192 kanal) ve istatistiksel güvenli seviye aralığı  $2\sigma$  (%95) olmak üzere yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan algılayıcı, dikey kriyostatlı, n-tipi, koaksiyel saf germanyum gama algılayıcıdır (GAMMA-X HPGe). Dış radyasyonun etkisini en aza indirmek için algılayıcı içi ince bakır tabakayla kaplı 10 cm kalınlığında kurşun zırh içinde yer almaktadır. Algılayıcı yüksek voltaj kaynağı, dijital sinyal üreten entegre gama spektrometresi (DSPEC jr. 2.0) ve

spektrumların analizini sağlayan GAMMA VISION-32 spektrum analiz yazılımı ve bilgisayara bağlıdır. Elektrik kesintilerinden etkilenmemesi için, sisteme kesintisiz güç kaynağı da bağlıdır; laboratuvar ortam sıcaklığı klima sistemi ile sabit tutulmaktadır. Dedektör 61.5 mm çapında ve 71.1 mm uzunluğundadır. Dedektör soğurucu yüzeyinde 0.76 mm kalınlığında karbon fiber ve 0.3 µm kalınlığında aktif olmayan germanyum bulunmaktadır. Dedektörün performans özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2 : Dedektörün performans özellikleri.**

Özellik	Ölçülen değer	Darbe şekillendirme süresi (µs)
Göreceli Verim 1,33MeV 60Co	% 45.7	6
Çözünürlük (FWHM) 1,33MeV 60Co	1.84 keV	6
Pik Şekli (FWTM/FWHM) 60Co	1.90	6
Pik Şekli (FWFM/FWHM) 60Co	2.58	6
Pik-Compton Oranı	66:1	6

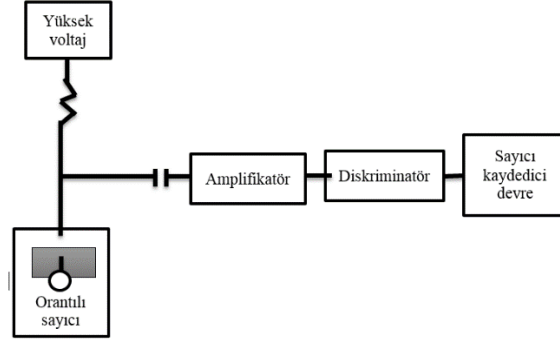
## 4.2.2 Alfa-beta ölçüm sistemi

### 4.2.1.1 Orantılı sayıcılar

Orantılı sayıcılar alfa ve beta ışınlarının sayımı ve enerji ölçümü için en ideal dedektörlerdendir. Bu dedektörler pencereless ve penceresiz tipte yapılmaktadır. Orantılı sayıcıların elektrotları içi boş bir silindir ve silindirin içinden geçen ve silindir eksenini boyunca uzanan bir telden oluşur. Bu elektrotlara uygulanan voltaj oldukça yüksektir. Elde edilen darbe büyüklüğü artan voltaj ile belli bir limite kadar artar. Darbe büyüklüğü, parçacıkların iyonlaşma miktarı ile orantılıdır.

Alfa taneciklerinin özgül iyonozasyonu, beta ve gama ışınlarına kıyasla daha yüksek olduğu için daha büyük darbeler meydana getirirler. Orantılı bölgedeki elektronik devre ayarları düzenlenerek ve çalışma voltajı belirlenerek alfa tanecikleri dışındaki radyasyonların meydana getirdikleri darbeler elenebilir.

Böylelikle sadece alfa taneciklerinin sayımı gerçekleştirilir. Orantılı sayıcılar iyonizasyon odası, elektronik devre ve sayıcı-kaydedici devrelerinden meydana gelir (Berkem, 1992; Arya, 1970).



**Şekil 4.4 :** Orantılı sayıcı devre şeması (Berkem, 1992'den uyarlanmıştır).

Örneklerin toplam alfa ve beta aktiviteleri Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi laboratuvarlarında mevcut bulunan orantılı sayıcı (BERTHOLD LB 770 Low Level 10 Channel Proportional Counter) sisteminde ölçülmüştür; sistem 10 adet dedektörden oluşmaktadır. Bu doğrultuda artortam radyasyonu ölçüm sonuçlarından çıkarılmış, örneklerin toplam net alfa ve beta sayımları belirlenmiş ve verim faktörü kullanılarak aktiviteler Bq/kg olarak elde edilmiştir. Sayım sisteminin alfalar için minimum deteksiyon limiti  $MDA_{\alpha}$ : 22 Bq/kg ve betalar için minimum deteksiyon limiti  $MDA_{\beta}$ : 25 Bq/kg'dır. Sayım sisteminin görseli Şekil 4.5'te görülmektedir.



**Şekil 4.5 :** BERTHOLD LB 770 sistemi (Url-3).

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gama spektrometrisi ve toplam alfa beta ölçümlerinin uygulanması için ölçüm sistemleri önce kalibre edilmiştir. Akabinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına göre saptanan aktivite konsantrasyonları kullanılarak, örneklerin radyoaktivite miktarlarının insan sağlığı üzerindeki etkisini uluslararası standart değerlerle karşılaştırarak bulmak amacıyla bazı parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler: radyum eşdeğer aktivite indeksi, gama indeksi, absorblanan gama doz hızı ve yıllık etkin doz eşdeğeridir.

### 5.1 Gama Spektrometrik Ölçümler

#### 5.1.1 Enerji kalibrasyonu

Enerji kalibrasyonu, spektrumdaki pik ve pikin bulunduğu gama enerjisi arasındaki ilişkiyi oluşturmak amacıyla yapılır. Kaynağın yayınladığı gama ışını enerjisinin tam olarak bilinmesi, ölçülen enerji ile karşılaştırmanın yapılabilmesi için önemlidir. Kalibrasyonda kullanılacak piklerin istatistiksel hassasiyetinin sağlanacağı süre boyunca kaynaklarla ölçüm yapılır. Elde edilen spektrumda daha önceden belirlenen incelenecek pikler aranır. İncelenecek piklerin yer aldığı kanal ve pik enerjilerinden yararlanarak enerji kanal bağıntısı için veriler toplanır. Böylece enerji kanal bağıntısı belirlenir (Gilmore ve Hemingway, 1995).

$$E = a_1 + a_2.C + a_3.C^2 \quad (5.1)$$

Bu denklemde  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  sabitleri, enerjisi bilinen radyoaktif kaynakların spektrumlarının ölçülmesiyle elde edilir. C ise kanal numarasını ifade etmektedir. Gelen pikin enerjisi ve karşılık geldiği kanal numarasına göre, en küçük kareler yöntemiyle enerji kalibrasyon denklemi belirlenir (Hacıyakupoğlu, 2007).

### 5.1.2 Verim kalibrasyonu

Kaynaktan yayılan gama ışınları sayısı ile spektrumda alınan sayımların sayısının arasındaki ilişki verimi tanımlar. Radyoaktiviteyi belirlemek için pik alanına ve verimine ihtiyaç duyulur. Verimin belirlenmesi için aktivitesi bilinen standart kaynaklar kullanılır. Kaynaklar ve örneklerin aynı koşullarda ölçülmesi gerekmektedir. Ölçüm geometrisi, yoğunlukları, elektronik donanım ayarları standart ve örnekler için özdeş olmalıdır (Hacıyakupoğlu, 2010). Spektrumun herhangi bir E enerjisindeki verim aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\epsilon = \frac{P_E/t_s}{A \cdot I} \quad (5.2)$$

$P_E$ : E enerjili, pikin net alanı (bozunum/s)

$t_s$ : Kalibrasyon spektrumu ölçüm süresi (s)

$A$ : Kalibrasyon kaynağındaki radyonüklitin kalibrasyon anındaki aktivitesi (bozunum/s)

$I$ : Radyonüklitin, E enerjisinde gama radyasyonu yayınlanma olasılığı (%).

### 5.1.3 Aktivite konsantrasyonu

Kalibrasyon tamamlandıktan sonra 12 mermer örneğinin her biri için 24 saat ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler esnasında artortam radyasyonu ölçümü de yapılarak, dışarıdan gelen katkılar çıkarılmıştır. Aktivite konsantrasyonunun bulunması için aşağıdaki denklemden faydalanılmıştır:

$$A = \frac{P_E}{\epsilon \cdot I \cdot t \cdot m} \quad (5.3)$$

Bu denklemde  $A$  aktivite konsantrasyonu (Bq/kg),  $P_E$  E enerjili pikin net alanı (bozunum/s),  $I$  ilgili nüklidin gama yayınlama olasılığı,  $\epsilon$  verim,  $t$  ölçüm süresi (s),  $m$  kütle (kg) değerlerini ifade etmektedir.

Aktivite konsantrasyonundaki belirsizliğin hesaplanmasında, deneysel ölçüm değerinin, çeşitli diğer ölçüm değerlerinden türetildiği durumlardaki gibi ölçüm değerinin belirsizliği birleştirilmiş belirsizlik olarak verilir ve Gauss'un "hata yayılma yasası" kullanılarak türetilebilir.

En genel haliyle, ölçülen  $x$  değerinin birleştirilmiş belirsizliği  $u(x)$ , her bir değişkenin belirsizliğinden  $u(x_i)$ , (5.4) numaralı denklem ile hesaplanır.



$$u(x) = x \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \quad (5.4)$$

Birleştirilmiş belirsizlik değeri, daha yüksek güvenilirlikle ifade edilmek istenirse bir genişletme faktörü (k) ile çarpılarak, k·u(x) şeklinde verilir. %95 güven aralığı ( $\pm 2\sigma$ ) için k=1,96'dır (Miller ve Miller, 2005).

Doğal radyoaktivite analizi ölçümlerindeki en genel belirsizlik kaynakları örnek kütlesi, geometri, dedektör verimi, sayım istatistiği, yayınlanma olasılığı ve yarı-ömür olmak üzere gruplanabilir (Bakr ve Ebaid, 2008; IAEA-TECDOC-1401, 2004). Örnek kütlesindeki belirsizlik, örnek hazırlama sırasında örneğin tartımında olan belirsizliktir. Geometrideki belirsizlik, örnek-dedektör uzaklığındaki farklılıktan ya da örnek-standart şekli arasındaki farklılıktan kaynaklanır. Sayım istatistiğindeki belirsizlik, gama-ışını spektrum analizi ile ilişkilidir. En etkin belirsizlik kaynağı genellikle dedektör verimidir. Ölçüm sonucu elde edilen değer x, bu sonuçtaki belirsizlik u(x) olmak üzere, bağıl belirsizlik aşağıdaki denklemle elde edilir:

$$\%u(x) = u \frac{u(x)}{x} \cdot 100 \quad (5.5)$$

Deneysel koşullar dikkate alındığında, geometri, kütle, yarı-ömür ve yayınlanma olasılığı ile ilgili parametreler ihmal edilebildiğinden, radyonüklit aktivitesinin birleştirilmiş bağıl belirsizliği  $u(A_x)$ , ile hesaplanmıştır. Burada  $u(A_x)$  örneğin aktivitesinin belirsizliği,  $u(C_x)$  örnekteki gama-ışını pikindeki net sayımının belirsizliği,  $u(\epsilon_x)$  verimden gelen belirsizliktir

$$u(A_x) = A_x \cdot \sqrt{\left( \frac{u(C_x)}{C_x} \right)^2 + \left( \frac{u(\epsilon_x)}{\epsilon_x} \right)^2} \quad (5.6)$$

## 5.2 Algılanabilir En Düşük Aktivite

Ölçüm sistemi için algılanabilir en düşük aktivite (MDA) ölçüm ve örnek geometrisi, doğal ortam radyasyonu (DOR), dedektörün çözünürlüğü ve ölçülen nüklitin özellikleri gibi birçok faktörden etkilenen sistem tarafından ölçülebilen en düşük aktivite miktarıdır ve incelenen izotopun spektrumda ilgili enerjideki pikinin DOR değerine göre hesaplanır. Duyarlılık testini veya pik şekli testini geçemeyen pikler için, pik altındaki alan değeri, aktivite hesabında kullanılmaz; yalnızca MDA hesaplamalarında DOR değerine eklenir. MDA değeri Curie yöntemi, ORTEC yöntemi, DIN 25 482 gibi farklı yöntemler kullanılarak hesaplanabilir. Curie Limit yönteminde P spektrumda pik altındaki alan, DOR doğal ortam radyasyonu ve t ölçüm süresi olmak üzere

$$P = 1.645 \times \frac{\sqrt{DOR}}{t} \quad (5.7)$$

denklemden yararlanılarak hesaplanır (ORTEC, 2003). Eğer DOR değeri sıfır ise, hesaplamalarda 1 olarak alınır. MDA değeri denklem (5.4)'de verilen pik altındaki alanın (P), dedektör verimine ( $\epsilon$ ) ve nüklitin yayınlanma olasılığına (I) bölünmesi ile elde edilir (Tsoulfanidis ve Landsberger, 2010; ORTEC, 2003).

$$MDA = \frac{P}{\epsilon \cdot I} \quad (5.8)$$

## 5.3 Kullanılan Gama Enerjileri

Doğal radyonüklidlerin ve etkileşimlerinin belirlenmesi için ISO, 2007 standardına göre verilen gama çizgileri Çizelge 5.1'de görülmektedir.

**Çizelge 5.1 : Doğal radyonüklidlerin gama çizgileri (ISO, 2007).**

Belirlenen Radyonüklid	Ölçülen Radyonüklid	Enerji E $\gamma$ keV	Yayınlanma Olasılığı I	Etkileşen/Karışan Radyonüklidler (E $\gamma$ , I)
U-238	Th-234	63,28	4,1	Th-232 (63,81 keV; 0,263 %)
	Th-234	92,37	2,42	Th-K $\alpha$ 1 (93,35 keV; 5,6 %)
U-238	Th-234	92,79	2,39	—
	Pa-234m	766,37	0,316	—
Ra-226	Ra-226	1 001,03	0,839	—
		186,10	3,51	U-235 (185,72 keV; 57,2 %)
Ra-226	Pb-214	295,22	18,15	Bi-211 (351,06 keV; 12,91 %)
		351,93	35,10	—
Ra-226	Bi-214	609,31	44,6	—
		1 120,29	14,70	—
		1 764,49	15,10	—
Pb-210	Pb-210	46,54	4,25	—
U-235	U-235	143,76	10,96	Ra-223 (144,23 keV; 3,22 %)
		163,33	5,08	—
Ac-227	Th-227	185,72	57,20	Ra-226 (186,10 keV; 3,51 %)
		205,31	5,01	—
Th-232	Ac-228	235,97	12,3	—
		Bkz. Th-228	—	—
		Th-228	—	—
Ra-228	Ac-228	209,25	3,89	—
		338,32	11,27	Ra-223 (338,28 keV; 2,79 %)
Th-228	Ra-224	911,20	25,80	—
		968,97	15,8	—
		240,99	4,10	Pb-214 (241,98 keV; 7,12 %)

**Çizelge 5.1(devam)** : Doğal radyonüklidlerin gama çizgileri (ISO, 2007).

Belirlenen Radyonüklid	Ölçülen Radyonüklid	Enerji	Belirlenen Radyonüklid	Ölçülen Radyonüklid
				—
				Th-227 (300,00 keV; 2,70 %)
Th-228	Pb-212	238,63	43,30	Pa-231 (300,07 keV; 2,47 %)
		300,09	3,28	Ac-228 (278,95 keV; 0,191 %)
		277,36	2,27	Ac-228 (583,41 keV; 0,111 %)
		583,19	30,4	—
Th-228	Tl-208	860,56	4,47	—
		2 614,53	35,64	—
K-40	K-40	1 460,83	10,67	Ac-228 (1 459,3 keV; 0,997 %)

Ölçüm sonuçlarından elde edilen pikler Çizelge 5.1'deki değerlerle kıyaslanır ve hesaplamalarda kullanılacak piklere karar verilir. Girişim yapmayan ve en yüksek yayınlanma olasılığına sahip pikler seçilir ve gerekli hesaplamalarda kullanılır.

### 5.3.1 Radyum eşdeğer aktivite

$^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'ın örneklerdeki dağılımı eşit değildir. Örneklerin spesifik aktivitelerinin karşılaştırılması için radyum eşdeğer aktivitesi adı verilen ortak bir indeks kullanılmaktadır. Bu değer 370 Bq/kg değerini aşmaması beklenmektedir (OECD, 1979). Bu değer Beretka ve Mathew (1985) tarafından bulunan aşağıdaki denkleme göre hesaplanmaktadır.

$$\mathbf{Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43A_{Th} + 0,077A_K} \quad (5.9)$$

Bu denkleme göre  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_K$  ifadeleri sırasıyla  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$ 'nın özgül aktivitelerini temsil etmektedir.

### 5.3.2 Gama indeks

Radyasyonun insan sağlığına olan etkisinin anlaşılmasıyla birlikte birçok araştırmacı radyoaktivite ölçümleri ile ilgili çalıştırmalar gerçekleştirmiştir. Dış ve iç sağlık indeksleri ve gama konsantrasyon indeksleri de bu çalışmaları neticesinde hesaplanmıştır. Avrupa Komisyonu (EC, 1999) tarafından önerilen gama indeks hesabı denklemini aşağıdaki gibidir:

$$I_Y = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{300} \quad (5.10)$$

### 5.3.3 Absorblanan gama doz hızı

Mermer örneklerindeki radyoaktif çekirdeklerin gama yayması sonucunda kapalı ortamda absorblanan gama doz hızı UNSCEAR (2000) ve EC (1999) tarafından belirlenen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Raporlarda doz dönüşüm kat sayısı hesapları standart bir oda için belirlenmiştir ve formüller bu standart odaya göre yapılan hesaplar doğrultusunda oluşturulmuştur. Raporlarda belirtilen odanın boyutları 4m x 8m x 2,8m'dir. Duvar kalınlığı 20 cm'dir. Ayrıca zemin, duvar ve tavanın yoğunluğu 2350 kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Odanın duvar, zemin ve tavanı betondur. Bu koşullarda belirlenen doz dönüşüm katsayıları <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th ve <sup>40</sup>K için Bq/kg da sırasıyla 0.92 nGy/sa, 1.1 nGy/sa ve 0.080 nGy/sa olarak bulunmuştur. Böylece absorblanan gama doz hızı aşağıdaki formül ile hesaplanabilmektedir:

$$D_R(\text{nGy/sa}) = 0.092 \times A_{Ra} + 1.1 \times A_{Th} + 0.080 \times A_K \quad (5.11)$$

### 5.3.4 Yıllık etkin doz eşdeğeri

Yıllık etkin doz eşdeğeri bir yıl boyunca teneffüs ettiği alanda maruz kaldığı iç ve dış ışınlama sonucu alınan radyasyon dozu olarak tanımlanır. Yıllık etkin doz eşdeğeri aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$H_R = D_R \times 8766(\text{sa}) \times 0.8 \times 0.7(\text{Sv/Gy}) \times 10^{-6} \quad (5.12)$$

Bu formülde  $D_R$  absorblanan gama doz hızı değeridir. 0,7 kat sayısı çevresel gama ışınlamaları için doz dönüşüm faktörünün değeridir. Bu değer hem açık hem de kapalı alan için kullanılır. 0,8 kat sayısı ise bina içi işgal faktörü değeridir. Dünya çapında kapalı alanda geçirilen zamanın %80 olduğu var sayılarak bu faktör belirlenmiştir. 8766 saat ise 1 yıldaki saat miktarının ifadesidir (UNSCEAR, 2000).



## 6. BULGULAR

### 6.1 Gama Spektrometre Sisteminin Enerji ve Verim Kalibrasyonu

Spektrumun enerji kalibrasyonunda, içerdiği radyonüklidlerin nükleer özellikleri Çizelge 6.1’de verilen, Marinelli geometrisindeki 1,5 g/cm<sup>3</sup> yoğunluklu ve 0,5 L hacimli radyoaktif standart kaynak kullanılmıştır.

**Çizelge 6.1 :** Kalibrasyon kaynağının nükleer özellikleri (DKD-K-36901, 2006).

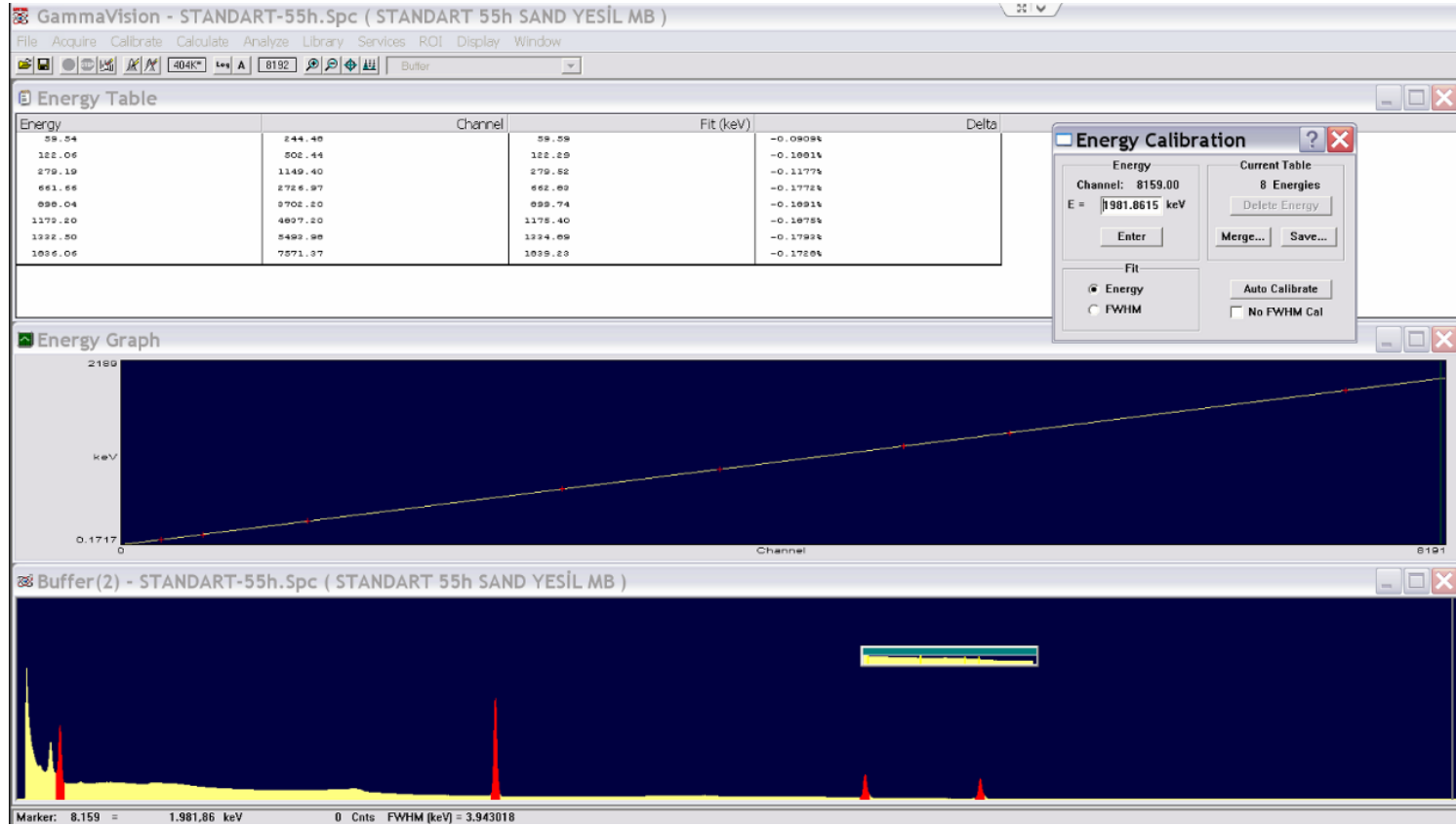
Radyonüklid	Yarı- ömür	Enerji (keV)	Yayınlanma olasılığı (%)	Aktivite (Bq)
<sup>241</sup> Am	432,17 yıl	59.537	35.90	1010
<sup>137</sup> Cs	30.17 yıl	661.66	85.1	2630
<sup>60</sup> Co	5.2714 yıl	1173.237	100	3080
<sup>60</sup> Co	5.2714 yıl	1332.501	100	3080
<sup>210</sup> Pb	22,3 yıl	47	4,18	11500
<sup>109</sup> Cd	462,6 gün	88	3,63	16600
<sup>57</sup> Co	271,79 gün	122	85,6	600
<sup>139</sup> Ce	137,640 gün	166	79,9	770
<sup>203</sup> Hg	46,595 gün	279	81,5	2230
<sup>113</sup> Sn	115,09 gün	392	64,9	3220
<sup>85</sup> Sr	64,849 gün	514	98,4	3770
<sup>88</sup> Y	106,630 gün	898	94,0	6120
<sup>88</sup> Y	106,630 gün	1836	99,4	6120

Denklem (6.1) ile, denklem (5.1)'e göre yapılan enerji kalibrasyonu için elde edilen kalibrasyon denklemi verilmiştir; elde edilen kalibrasyon eğrisi Şekil 6.1'de görülmektedir.

$$E = 0.172 + 0.243 C - 2.183 \times 10^{-8} C^2 \quad (6.1)$$

Enerjiye bağlı verim değerlerini ve verim eğrisini elde etmek için, 55 saat süreyle hacimli radyoaktif standart kaynağın spektrumu alınmıştır. Analizlenen spektrumdan elde edilen veriler, (5.2) numaralı denkleme uyarlanmış ve kullanılan radyonüklit enerjilerine karşılık gelen verim değerleri Çizelge 6.2'deki gibi elde edilmiştir.





Şekil 6.1 : Gama spektroskopik ölçümler için oluşturulan enerji kalibrasyon eğrisi.

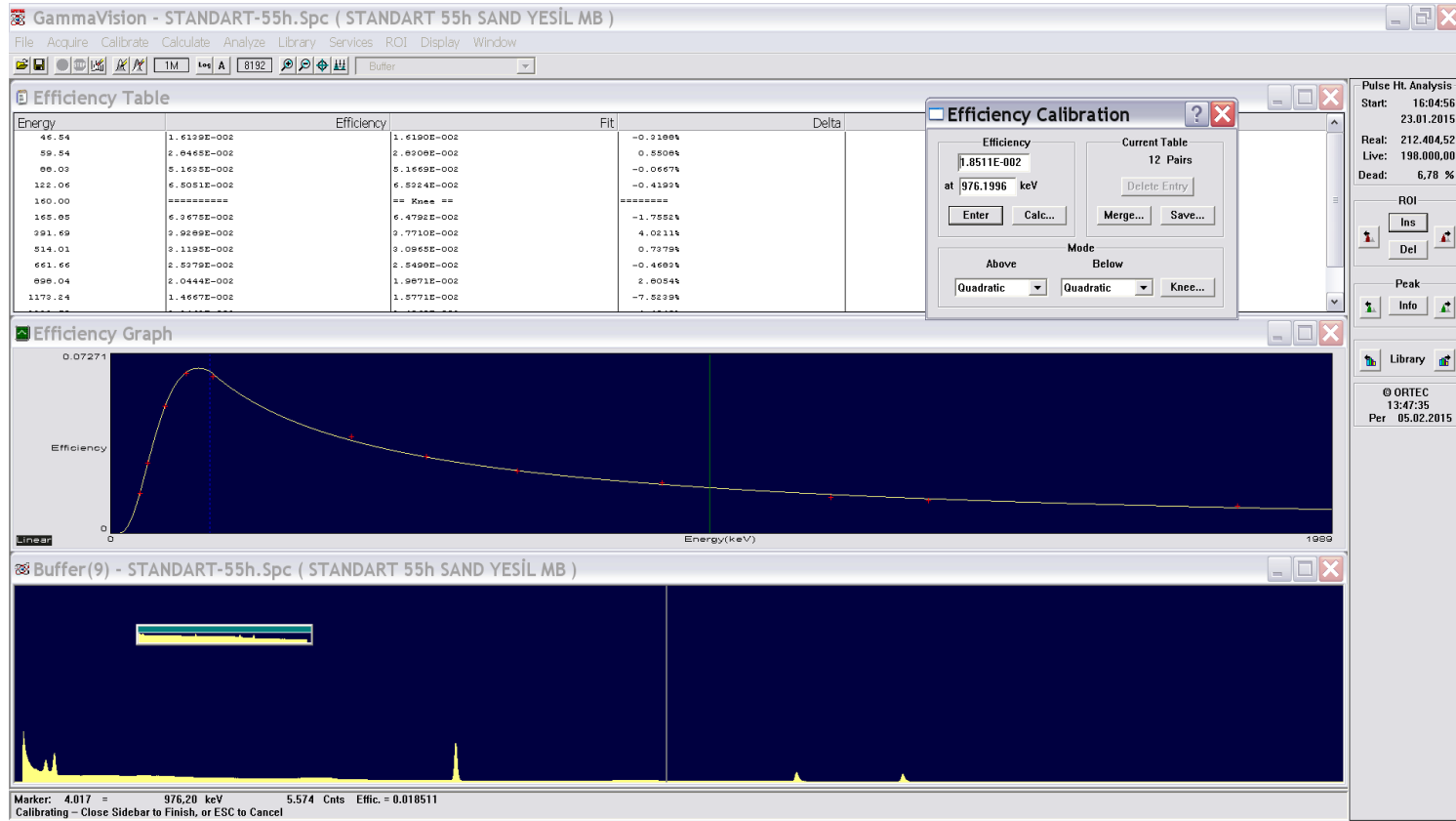
**Çizelge 6.2 :** Standart kaynağın gama enerjilerindeki HPGe dedektörünün verim değerleri.

Enerji (keV)	Verim
46,539	0,00064
59,537	0,01163
88,0341	0,00021
122,0614	0,00029
661,66	0,00730
1173,237	0,00187
1332,501	0,00145

Yarı iletken dedektörün enerjiye bağlı verimi belirli bir enerji değerine kadar artıp, bir dönüm noktasından sonra azalma özelliği gösterdiği için, elde edilen veriler iki farklı fonksiyona fit edilmiş ve verim kalibrasyonu denklemleri olarak 6.2 ve 6.3 numaralı denklemler elde edilmiştir. Şekil 6.2’de ise hacimli radyoaktif standart kaynak ile yapılan ölçüm ile elde edilen spektrum ve uyarlanan verim kalibrasyon grafiği gösterilmektedir.

$$\varepsilon = -0.42659 + 0.16285 \ln(E) - 0.01257 \ln(E)^2 \quad (6.2)$$

$$\varepsilon = 0.68618 - 0.19612 \ln(E) + 0.01411 \ln(E)^2 \quad (6.3)$$



Şekil 6.2 : Verim kalibrasyon eğrisi.

## 6.2 Örneklerin Aktivite Konsantrasyonları

(5.3) numaralı denkleme göre örneklerin incelenen radyonüklitlere ait aktivite konsantrasyonlarını hesaplamak için gerekli olan verilerden, örneklerin kütleleri ve uygulanan ölçüm süreleri Çizelge 6.3’de verilmektedir.

**Çizelge 6.3 :** İncelenen örneklerin kütle ve ölçüm süreleri.

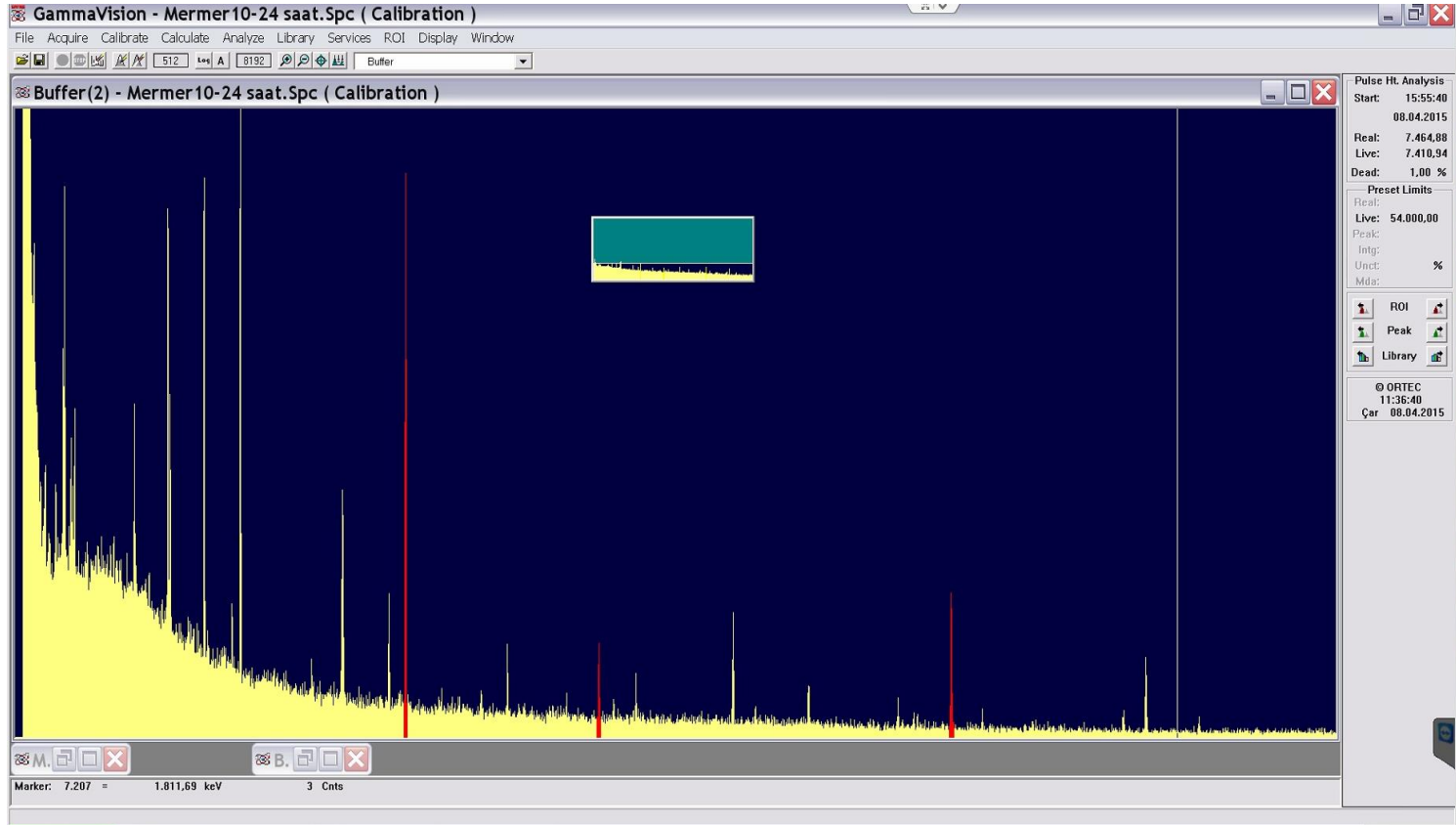
Örnek No	Örnek Kütlesi (kg)	Ölçüm Süresi (s)
2	0,888	86400
3	0,8722	86400
4	0,8795	86400
5	0,829	86400
6	0,8726	86400
7	0,861	86400
8	0,86805	86400
9	0,89575	86400
10	0,8677	86400
11	0,86045	86400
12	0,88	86400
14	0,8633	86400

(5.3) numaralı denkleme göre gerekli diğer verilerden olan verim, (6.2) ve (6.3) verim denklemlerinden uranyum, toryum ve potasyum-40 belirlenmesinde kullanılan pik enerjilerine karşılık gelen verim değerleri hesaplanarak elde edilmiştir. Bu verim değerleri ve diğer ilgili veriler (5.3) numaralı denkleme girilerek örneklerin aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir.

Radyonüklit aktivitesinin birleştirilmiş bağıl belirsizliği örnekteki gama-ışını pikindeki net sayım belirsizliği ve verimden gelen belirsizlik dikkate alınarak (5.6) denklemine göre elde edilmiştir.

İncelenen radyonüklitler için hesaplanan ölçüm sisteminin algılanabilir en düşük aktiviteleri 86400 s ölçüm süresi için (5.8) denklemine göre sırasıyla  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  için 1, 1 ve 2 Bq/kg olarak elde edilmiştir.

Şekil 6.3 ölçülen örneklerden biri için hesaplamalarda kullanılan pik enerji değerlerini işaretlenmiş olarak göstermektedir. Çizelge 6.4, 6.5 ve 6.6’da sistemin kalibrasyonu yapıldıktan sonra tüm örnekler için yapılan ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan aktivite konsantrasyonları verilmektedir.



Şekil 6.3 : 10 numaralı örneğin gama spektrum görüntüsü.

**Çizelge 6.4 :** Örneklerin  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonları.

Örnek No	Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)	Belirsizlik (%)
2	4	6
3	98	4
4	<1	-
5	<1	-
6	65	4
7	163	4
8	22	4
9	4	5
10	8	4
11	10	5
12	32	4
14	45	4

Örneklerdeki  $^{226}\text{Ra}$  aktivite konsantrasyonu 4-163 Bq/kg arasında değişmektedir.

**Çizelge 6.5 :** Örneklerin  $^{232}\text{Th}$  aktiviteleri.

Örnek No	Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)	Belirsizlik (%)
2	<1	-
3	<1	-
4	<1	-
5	13	15
6	<1	-
7	<1	-
8	<1	-
9	30	13
10	33	13
11	33	12
12	184	5
14	<1	-

Örneklerdeki  $^{232}\text{Th}$  aktivite konsantrasyonu 13-184 Bq/kg arasında değişmektedir.

**Çizelge 6.6 : Örneklerin <sup>40</sup>K aktiviteleri.**

Örnek No	Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)	Belirsizlik (%)
2	4	8
3	6	11
4	2	8
5	<2	-
6	<2	-
7	<2	-
8	<2	-
9	78	5
10	30	6
11	45	6
12	642	4
14	<2	-

Örneklerdeki <sup>40</sup>K aktivite konsantrasyonu 2-642 Bq/kg arasında değişmektedir.

### 6.3 Radyum Eşdeğer Aktivite Sonuçları

(5.9) denklemiyle hesaplanan radyum eşdeğer aktivite değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

**Çizelge 6.7 : Örneklerin radyum eşdeğer aktiviteleri.**

Örnek No	Radyum Eşdeğer Aktivite (Bq/kg)
2	4
3	99
4	1
5	19
6	65
7	163
8	23
9	53
10	57
11	62
12	345
14	45

Örneklerin radyum eşdeğer aktivitelerinin 1 Bq/kg ile 345 Bq/kg aralığında değiştiği görülmektedir.

#### 6.4 Gama İndeks Sonuçları

(5.10) numaralı denklem ile hesaplanan gama indeks değerleri çizelge 6.8'de verilmiştir.

**Çizelge 6.8 :** Gama indeks sonuçları.

Örnek No	Gama İndeks
2	0,026
3	0,349
4	0,008
5	0,067
6	0,216
7	0,545
8	0,075
9	0,424
10	0,292
11	0,350
12	3,168
14	0,150

Gama indeks sonuçlarının 0,008 ile 3,168 değerleri arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek değere sahip örnek Kayseri/Toros bölgesinden alınmıştır. Bu mermerin çeşidi siyah mermerdir.

#### 6.5 Absorblanan Gama Doz Hızı Sonuçları

(5.11) numaralı denklem ile hesaplanan absorblanan gama doz hızı değerleri Çizelge 6.9'da verilmiştir.

**Çizelge 6.9 :** Absorblanan gama doz hızı sonuçları.

Örnek No	Absorblanan Gama Doz Hızı (nGy/sa)
2	0,664
3	9,557
4	0,181
5	14,720
6	5,953
7	15,036
8	2,066
9	39,476
10	39,311



**Çizelge 6.9 (devam) : Absorblanan gama doz hızı sonuçları.**

Örnek No	Absorblanan Gama Doz Hızı (nGy/sa)
11	41,243
12	257,168
14	9,557

Çizelgeye göre absorblanan gama doz hızı değerleri 0,181 nGy/sa ile 257,168 nGy/sa arasında değişiklik göstermektedir.

### 6.6 Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri Sonuçları

(5.12) numaralı denklem ile hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğeri değerleri Çizelge 6.10’te verilmiştir.

**Çizelge 6.10 : Yıllık etkin doz eşdeğeri sonuçları.**

Örnek No	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (mSv/yıl)
2	0,0033
3	0,0469
4	0,0009
5	0,0723
6	0,0292
7	0,0738
8	0,0101
9	0,1938
10	0,1930
11	0,2025
12	1,2624
14	0,0203

Yıllık etkin doz eşdeğeri sonuçları 0,0009 mSv/yıl ile 1,2624 mSv/yıl aralığındadır.

### 6.7 Örneklerin Alfa-Beta Ölçüm Sonuçları

11 örnek için gerçekleştirilen alfa ve beta ölçüm sonuçları Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Örneklerdeki toplam alfa aktivite konsantrasyonu değerleri 22-77 Bq/kg aralığında değişmektedir. Toplam beta aktivite konsantrasyonu değerleri ise 25-283 Bq/kg aralığında değişmektedir.

**Çizelge 6.11 : Örneklerin alfa ve beta ölçüm sonuçları.**

Örnek no	Toplam Alfa (Bq/kg)	Toplam Beta (Bq/kg)	Belirsizlik (alfa) (%)	Belirsizlik (beta) (%)
2	37	122	-	-
3	24	25	-	-
4	22	64	-	-
5	25	65	-	-
7	77	178	7,7	17,8
8	53	92	-	-
9	35	172	-	-
10	39	175	-	-
11	36	89	-	-
12	38	283	3,8	28
14	33	67	-	-

## 7. TARTIŞMA VE YORUM

İnşaat sektöründe çok çeşitli materyaller kullanılmaktadır. Bu sebeple bina inşaatında kullanılan malzemelerin doğal radyoaktivite konsantrasyonu tayini toprak, kireç, mermer, granit, seramik ve benzeri birçok madde için yapılmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden alınan 12 mermer örneği için deneyler gerçekleştirilmiştir. Radyum-226 aktivite konsantrasyonunun en yüksek çıktığı mermer Bursa/M. Kemal Paşa'dan alınan renkli mermer örneğidir. Radyum aktivite konsantrasyonunun en düşük çıktığı mermer ise Antalya/Korkuteli'nden alınan bej mermer örneğidir. Toryum-232 aktivite konsantrasyonunun en yüksek çıktığı mermer örneğinin Kayseri/Toros'tan alınan siyah mermer olduğu saptanmıştır, bu radyonüklidin aktivite konsantrasyonunun en düşük çıktığı mermerin ise Marmara Adası'ndan alınan beyaz mermer olduğu gözlenmektedir. Potasyum-40 aktivite konsantrasyonu en yüksek Kayseri/Toros'tan alınan siyah mermerde, en düşük ise Bilecik'ten alınan bej mermerde bulunmuştur.

Aktivite konsantrasyon sonuçları elde edildikten sonra radyum eşdeğer aktivite, absorblanan gama doz hızı, gama indeks ve yıllık etkin doz eşdeğeri parametreleri hesaplanmıştır. Hesap sonuçlarına göre radyum eşdeğer aktivite değerlerinin en yüksek ve en düşük bulunduğu örnekler sırasıyla, Bursa/M. Kemal Paşa'dan alınan renkli mermer ve Bilecik'ten alınan bej mermer olarak görülür. Gama indeks değerlerinin en yüksek olduğu örnek Kayseri/Toros'tan alınan siyah mermerde, en düşük olduğu örnek ise Bilecik'ten alınan bej mermerdedir. Absorblanan gama doz hızı değerlerinin en yüksek ve en düşük bulunduğu örnekler sırasıyla, Kayseri/Toros'tan alınan siyah mermer ve Bilecik'ten alınan bej mermer olarak görülür. Yıllık etkin doz eşdeğeri sonuçlarının en yüksek ve en düşük bulunduğu örnekler sırasıyla, Kayseri/Toros'tan alınan siyah mermer ve Bilecik'ten alınan bej mermer olarak bulunmuştur.

Toplam alfa aktivite konsantrasyonu Bilecik'ten alınan bej mermer örneğinde en düşük çıkmıştır. Bursa/M. Kemal Paşa'dan alınan renkli mermer örneğinde ise en yüksek çıkmıştır. Toplam beta aktivite konsantrasyonunun en düşük Antalya/Burdur'dan alınan bej mermer örneğinde olduğu görülmektedir. Yine toplam beta aktivite konsantrasyonunun en yüksek bulunduğu örnek Kayseri/Toros'tan alınan siyah mermer örneğidir.

Bu çalışmaya benzer olarak farklı ülkelerde ve Türkiye'de mermerler ile yapılan araştırmalarda elde edilen sonuçlarının karşılaştırması Çizelge 7.1'de gösterilmektedir.

**Çizelge 7.1 :** Çalışmada kullanılan Türkiye mermerleri ile bazı farklı ülke mermerlerinin aktivite konsantrasyonları karşılaştırması.

Radyonüklid	Aktivite konsantrasyonu (Bq/kg)						
	Ürdün mermerler i <sup>a</sup>	Çin mermerleri <sup>b</sup>	Mısır mermerleri <sup>c</sup>	Pakistan mermerleri <sup>d</sup>	Türkiye mermerleri <sup>e</sup>	Türkiye mermerleri <sup>f</sup>	İncelenen mermerler
Ra-226	23,41- 369,5	8,4-157,4,	1,700-6,42	1,45-29,34	1,3-56,3	38,883-195,726	4-163
Th-232	- <sup>g</sup>	5,6-165,5	- <sup>g</sup>	1,16-6,28	1,0-82,0	32,165-47,814	13-184
K-40	- <sup>g</sup>	44,1- 1352,7	- <sup>g</sup>	6,15-33,42	13,2-729,3	106,264-351,755	2-642

<sup>a</sup>Khatibeth, 1997

<sup>b</sup>Lu, 2006

<sup>c</sup>El-Dine ve ark., 2001

<sup>d</sup>Aslam ve ark., 2002

<sup>e</sup>Turhan ve Varinlioğlu, 2012

<sup>f</sup>Akkurt ve ark., 2010

<sup>g</sup>Raporlanmamış

Türkiye’de yapılan bazı çalışmalarda Türkiye’den ve diğer bazı ülkelerden alınan granit örneklerinde doğal radyoaktivite konsantrasyonları incelenmiştir. Bu örneklerde Ra-226 ve Th-232 aktivite konsantrasyonu bu çalışmada incelenen mermerlerle benzerlik göstermesine karşın, K-40 radyonüklidini aktivite konsantrasyonu açısından çok daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir (Çetin, 2011; Örgün ve ark., 2007; Örgün ve ark., 2005). Bu bağlamda K-40 radyoaktivitesi yüksek granitler yerine K-40 radyoaktivitesi daha düşük olan mermerlerin kullanılmasının daha makul olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar UNSCEAR’in belirlemiş olduğu doz limitleri açısından karşılaştırıldığında incelenen Türkiye’nin çeşitli bölgelerinden alınmış mermerlerin kullanımının, bu limitler aşılmadığı için insan sağlığı için risk faktörü oluşturmayacağı sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Agbalagba, E. O. Avwiri, G. O. ve Chad-Umoreh, Y.E.** (2011). Gamma spectroscopy measurement of natural radioactivity and assessment of radiation hazard indices in soil samples from oil fields environment of Delta State, Nigeria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 109, 64-70.
- Akkurt I., Oruncak, ve Günoğlu, K.** (2010). Natural radioactivity and dose rates in commercially-used marbles from Afyonkarahisar-Turkey, *International Journal of the Physical Science*, 5(2), 170-173.
- Alaamer, A. S.** (2008). Assessment of Human Exposures to Natural Sources of Radiation in Soil of Riyadh, Saudi Arabia. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32, 229-234.
- Amin, S. A. ve Naji, M.** (2012). Natural radioactivity in different commercial ceramic samples used in Yemeni buildings. *Radiation Physics and Chemistry*, 86, 37-41.
- Arya, A. P.** (1970). *Fundamentals of Nuclear Physics Third Edition*. Allyn and Bacon, 646, Boston.
- Aslam, M., Orfi, S.D., Khan, K. ve Jabbar, A.** (2002). Radiological Significance of Pakistani marble used for construction of dwellings. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Cilt 253, Sayı 3*, 483-487.
- Bakr W.F. ve Ebaid, Y. Y.** (2008). Uncertainties in Gamma Ray Spectrometric Measurements. *Journal of Nuclear and Radiation Physics*, 6(1&2), 55-67.
- Bayram, O.** (2009). Bazı Doğal Taşların Dokusal Özellikleri ile Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 155s, İstanbul.
- Benedict, M., Pigford, T. ve Levi, H.** (1981). *Nuclear Chemical Engineering Second Edition*. McGraw-Hill Book Company, 1008, New York.
- Berkem, A.R.** (1992). Çekirdek Kimyası Ve Radyokimya, İstanbul Üniversitesi Basımevi ve Film Merkezi, 418, İstanbul.
- Bilgin, M. ve Çakır, E.** (1998). Mermer Araştırması, *İstanbul Ticaret Odası, Yayın No: 1998-1*.
- Blyth, F.G.** (1983). *Geology for Engineers*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, İstanbul.

- Çetin, E.** (2011). Granitik Kayaçların Radyolojik ve Mineralojik Yönden Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, İstanbul.
- Çetin, T.** (2003). Türkiye Mermer Potansiyeli, Üretimi ve İhracatı. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, Cilt 23, Sayı 3*, 243-256.
- Çevik, U., Damla, N., Kobya, A.I., Çelik, A. ve Kara, A.** (2010). Radiation dose estimation and mass attenuation coefficients of marble used in Turkey. *Annals of Nuclear Energy, 37*, 1705-1711.
- Dadak, M.T. ve Gül, M.** (2012). Adıyaman İli Mermer Sektörü Araştırma Raporu, Mermer Kenti Adıyaman Projesi, Kalkınma Projeleri Akademileri Derneği, 41s, Adıyaman.
- Dayanıklı, Ş. A.** (2004). Manisa İlinde Kullanılan Bina Materyallerinde Radyoaktivite Tayini. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 39s, Manisa.
- Değerliler, M.** (2007). Adana İli ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 191s, Adana.
- Dişçi, T.** (2012). Samsun İlinde Üretilen ve Kullanılan İnşaat Malzemelerinde Doğal Radyoaktivite Ölçümleri. On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Samsun.
- DKD-K-36901** (2006). *Calibration Certificate*. Isotope Products Laboratory, Valencia, CA.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı)** (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu, Cilt-II (Mermer, Granit, Yapıtaşları, Arduvaz), Yayın No: DPT: 2616- ÖK: 627, Ankara.
- EC (European Commission)** (1999). Radiation Protection 112,:Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- El-Dine, N.W., El-Shershaby, A., Ahmed, F. ve Abdel-Haleem A.S.,** (2001). Measurement of radioactivity and radon exhalation rate in different kinds of marbles and granites. *Applied Radiation and Isotopes, 55*, 853-860.
- Erguvanlı, K.** (1994). Mühendislik Jeolojisi, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Froehlich, K.** (2009). Environmental Radionuclides, Elsevier Science, Amsterdam.
- Gilmore, G., Hemingway, J.** (1995). "Practical Gamma-Ray Spectrometry", John Wiley Sons, England, 314 p.
- Güleç, K.** (1973). Afyonkarahisar Mermerlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Ayrışma ile İlişkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, İstanbul



- Günaydın, E.** (2014). Nötronlara Maruz Kalmış ZnO: Al/P-Si Heterokavşakların Akım-Voltaj Karakteristiklerinde Oluşan Değişimlerin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 94s, İstanbul.
- Günoğlu, K.** (2008). Afyonkarahisar Yöresi Mermerlerinde Doğal Radyoaktivite Tayini. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 94s, Afyon.
- Hacıyakupoğlu, S.** (2007). Nükleer Analitik Kimya Ders Notları.
- Hacıyakupoğlu, S.** (2010). Radiation Measurements Lecture Notes.
- Hallenbeck, H. W.** (1994). Radiation Protection First Edition. Lewis Publishers,, 269, Florida.
- IAEA–TECDOC-1401,** (2004). Quantifying Uncertainty in Nuclear Analytical Measurements, Atomic Energy Authority.
- Kaçar, A.** (2006). Yapılarda radyasyon kalkanı olarak kullanılan barit agregalı ağır beton elemanların zırh kalınlık hesaplarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Isparta, 60s.
- Khatibeth, A.J.A.H., Ahmad, N., Matullah ve Kenawy, M. A.** (1997). Natural Radioactivity in marble stones- Jordan. Radiation Measurements, *Cilt 28, Sayı 1-6*, 345-348.
- Korkmaz, Ö.** (2003). Mermer Sektör Profili : 2003, İstanbul Ticaret Odası, İTO Yayınları Koleksiyonu.
- Kovler, K., Haquin, G., Manasherov, V., Ne’eman, E. ve Lavi, N.** (2002). Natural radionuclides in building materials available in Israel. *Building and Environment, 37*, 531-537
- Lu, X.** (2006). Radiometric analysis and radiological hazards of Chinese commercial marble. *Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, Cilt 162, Sayı 6*, 455-462.
- Lu, X., Yang, G., Ren, C.** (2012). Natural radioactivity and radiological hazards of building materials in Xianyang, China. *Radiation Physics and Chemistry, 81*, 780-784.
- Miller, J.N., Miller, J.C.** (2005). Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry, 5th edn. Pearson Education Limited, England.
- NCRP** (1987). National Council on Radiation Protection and Measurements Exposure of the Population in the United States, Report No: 93.
- OECD** (1979). Organization for Economic Cooperation and Development, Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. OECD, Paris.
- ORTEC** (2003). Gamma Vision-32 A66-B32 Software Users Manual.
- Öktem, G.** (2001). Türkiye ve Doğal Taşları, Mart Matbaacılık, İstanbul.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Gültekin, A.H., Karahan, G., Çelebi, N.,** (2005). Natural Radioactivity Levels in Granitic Plutons and Groundwaters in

Southeast Part of Eskisehir, Turkey, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 63, 267-275.

**Örgün, Y., Altınsoy, N., Şahin, S.Y., Güngör, Y., Gültekin, A.H., G. Karahan, Karacık, Z.,** (2007). Natural and anthropogenic radionuclides in rocks and beach sands from Ezine region (Çanakkale), Western Anatolia, Turkey. *Applied Radiation Isotope*, Vol. 65, 739-747.

**Öztürk, A.** (2006). Kayaç dokusal özelliklerinin sınıflandırılması ve kaya mühendisliği uygulamaları, Doktora Tezi (Yayımlanmamış), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği, İstanbul.

**Özger, G.** (2005). Ceyhan, Yumurtalık ve Pozantı Bölgelerinin Doğal Radyoaktivite Düzeylerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 100s.

**ISO 18589-3** (2007). International Standard, Measurement of Radioactivity in the Environment Soil, Part 3: Measurement of Gamma-emitting Radionuclides, ISO, Geneva .

**Smith, J. ve Beresford, N.A.** (2005). Chernobyl: Catastrophe and Consequences. Springer, 310, New York.

**Soete, D., Gijbels, R., Hoste, J.** (1972). Neutron Activation Analysis First Edition. John Wiley and Sons, 856, New York.

**Stabin, M.G.,** (2008). Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics, Springer, 378, New York.

**TAEK Bülteni Sayı: 60,** (Kasım/Aralık 2002).

**Tezsezer, Ş.** (2010). Ayvalık Sarımsaklı Kumsalı Deniz Suyu Ve Kum Örneklerinde K-40 Radyoizotopu Tayini, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, İstanbul.

**Tsoufanidis N., Landsberger S.,** (2010). Measurement and Detection of Radiation, Third Edition, Taylor and Francis, 636, New York.

**Turhan Ş. ve Varinlioğlu, A.** (2012). Measurement of primordial radionuclides in and dose evaluation from marble and glazed tiles used as covering building materials in Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 151(3), 546–555.

**Turner, J.E.** (1995). Atoms, Radiation and Protection Second Edition. John Wiley Sons, 555, Darmstadt.

**Tüysüz, M.Z.** (2004). Co-60 Teleterapi Kaynağı İçin Monte Carlo Yöntemiyle Uygun Zırh Tasarımı, Harran Üniversitesi, Bitirme tezi.

**UNSCEAR Report** (2000). United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations. New York.

**Url-1** <[www.mta.gov.tr](http://www.mta.gov.tr)>, alındığı tarih: 03.03.2015.

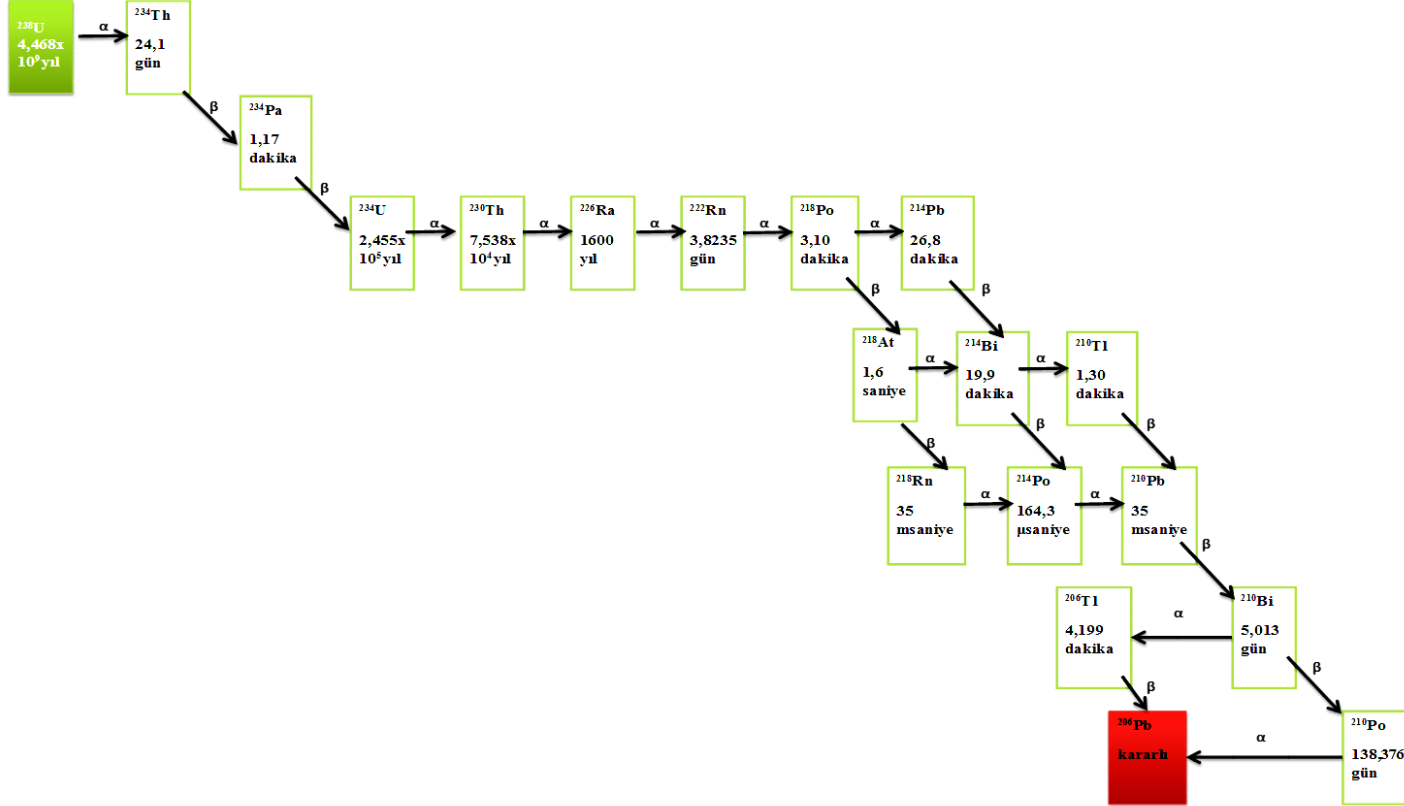
**Url-2** <<https://kbrn.afad.gov.tr/kategori-1205-iyonlastirici-radyasyon-cesitleri.html>>, alındığı tarih: 10.03.2015.

**Url-3** <<https://www.berthold.com/en/rp/lb-790-10-channel-low-level-counter>>, alındığı tarih: 28.04.2015.

## **EKLER**

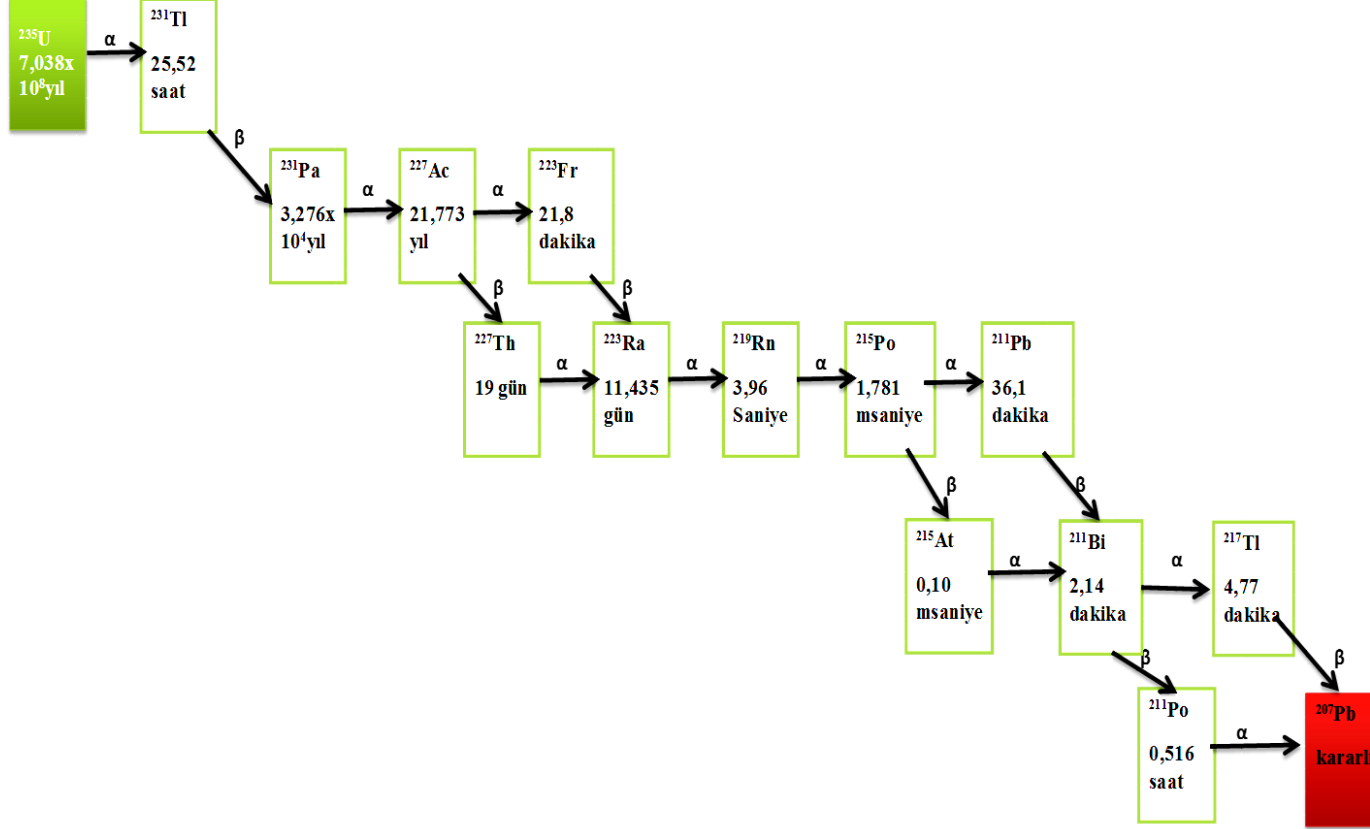
- EK A** : Uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) serisi  
**EK B** : Aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) serisi.  
**EK C** : Neptünyum ( $^{237}\text{Np}$ ) serisi.  
**EK D** : Toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) serisi

## EK A : Uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) serisi



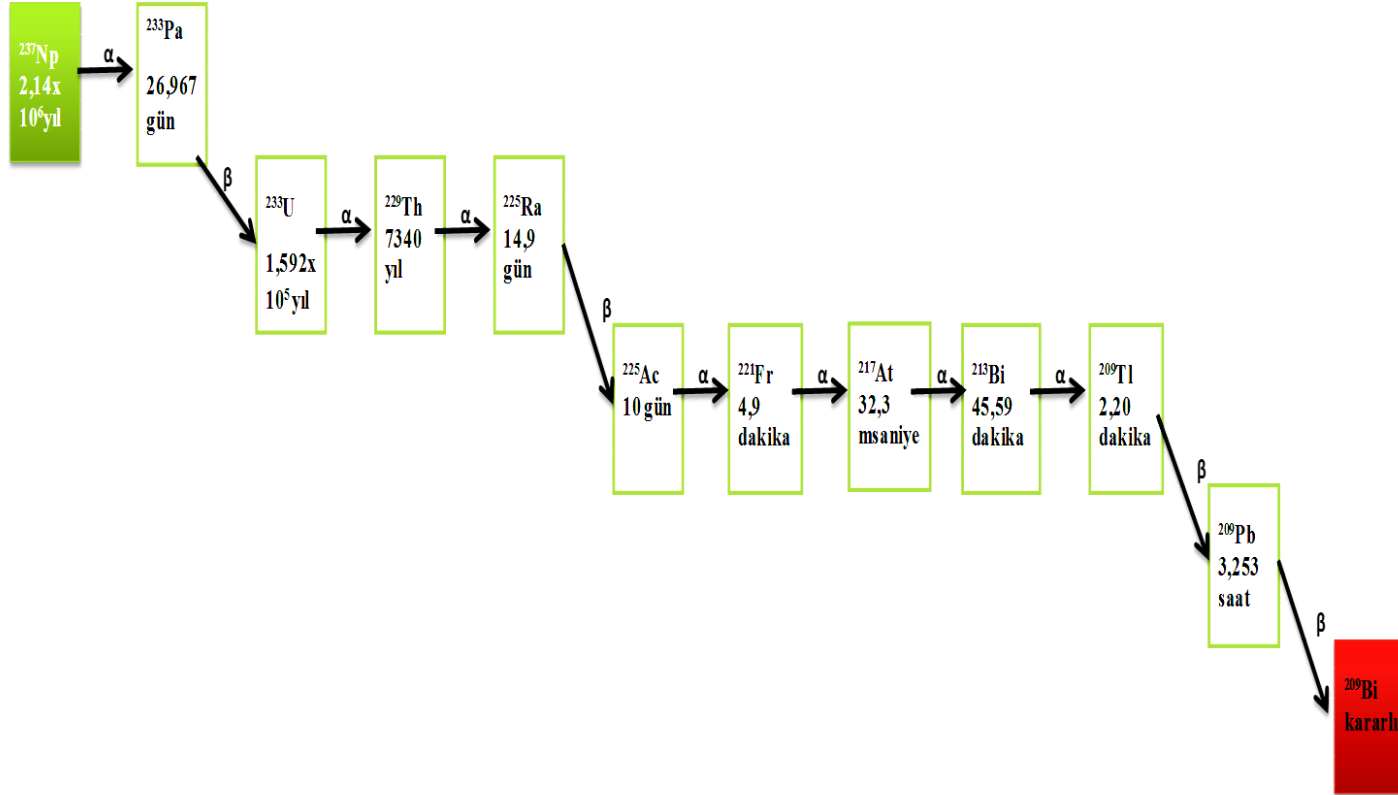
Şekil A.1 : Uranyum ( $^{238}\text{U}$ ) serisi.

**EK B : Aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) serisi.**



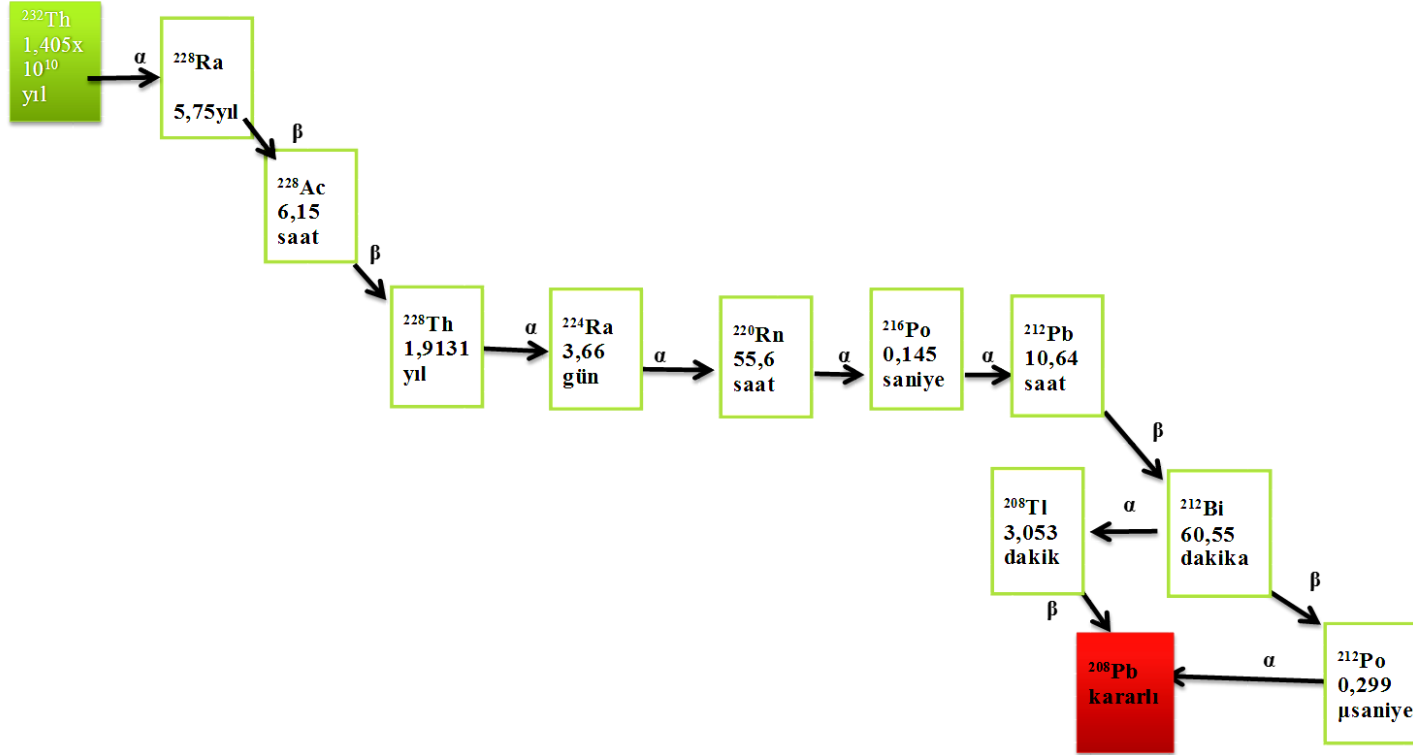
**Şekil B.1 : Aktinyum ( $^{235}\text{U}$ ) serisi.**

**EK C : Neptünyum ( $^{237}\text{Np}$ ) serisi.**



**Şekil C.1 : Neptünyum ( $^{237}\text{Np}$ ) serisi.**

EK D : Toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) serisi.



Şekil D.1 : Toryum ( $^{232}\text{Th}$ ) serisi.





## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Cemre KARAMAN  
**Doğum Tarihi ve Yeri:** 26.02.1990, İstanbul  
**E-posta** : cemrekaraman@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

**2013- Devam Ediyor:** İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi.

**2014:** Uluslararası Enerji ve Yönetimi Konferansı (ICEM 2014), Organizasyon Komitesi Üyesi.

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Cemre Karaman (Araştırmacı), Sevilay Hacıyakupoğlu, Türkiye Farklı Bölge Mermerleri İçin Doğal Radyoaktivite ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri, Lisansüstü Tezlerini Destekleme Programı Projesi, 2014- Devam ediyor.