

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

**KASTAMONU'DA KULLANILAN YAPI MALZEMELERİNDE
DOĞAL OLARAK BULUNAN RADYONÜKLİTLERİN (^{238}U ,
 ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn ve ^{40}K) AKTİVİTE DERİŞİMLERİNİN VE BU
MALZEMELERİN RADON SALIM HIZLARININ ÖLÇÜLMESİ**

Alper Tolga TEMİRCİ

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Şeref TURHAN
Doç. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN
Yrd. Doç. Dr. Aslı KURNAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

KASTAMONU – 2017

TEZ ONAYI

Alper Tolga TEMİRCİ tarafından hazırlanan “Kastamonu’da kullanılan yapı malzemelerinde doğal olarak bulunan radyonüklitlerin (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn ve ^{40}K) aktivite derişimlerinin ve bu malzemelerin radon salım hızlarının ölçülmesi” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Prof. Dr. Şeref TURHAN
Kastamonu Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN
Çankırı Karatekin Üniversitesi



Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Aslı KURNAZ
Kastamonu Üniversitesi



15/05/2017

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Temel SARIYILDIZ



TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildirir ve taahhüt ederim.

İmza
Alper Tolga TEMİRCİ



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KASTAMONU'DA KULLANILAN YAPI MALZEMELERİNDE DOĞAL OLARAK BULUNAN RADYONÜKLİTLERİN (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn ve ^{40}K) AKTİVİTE DERİŞİMLERİNİN VE BU MALZEMELERİN RADON SALIM HIZLARININ ÖLÇÜLMESİ

Alper Tolga TEMİRCİ
Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şeref TURHAN

Yerkabuğu kökenli yapı malzemelerinin içerdiği doğal radyonüklitler, bireylerin iç ve dış ışınlanmasına sebep olan radyoaktif kaynaklardır. Bu radyonüklitlerden yayınlanan gama radyasyonu dış ışınlamaya ve bu malzemelerden salınan ve solunum yolu ile vücuda alınabilen radon (^{222}Rn) gazı ve kısa yarı ömürlü bozunum ürünleri iç ışınlamaya sebep olmaktadır. Bu yüzden yapı malzemelerindeki doğal radyoaktivite seviyesinin bilinmesi, bireylerin iç ve dış ışınlamadan dolayı alabilecekleri radyasyon dozunun değerlendirilmesi için çok önemlidir. Bu çalışmada, Kastamonu İlinde kullanılan bazı yapı malzemelerindeki uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th), radyum (^{226}Ra) ve potasyumun (^{40}K) aktivite derişimi, yüksek saflıktaki germanyum dedektörlü (HPGe) bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlendi. ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişiminin en küçük ve en büyük büyük değeri, sırasıyla $6,7\pm 0,4$ Bq/kg (sıva)- $128,6\pm 3,7$ Bq/kg (briket), $2,6\pm 0,8$ Bq/kg (alçı)- $172,2\pm 7,6$ Bq/kg (granit), $5,2\pm 0,6$ Bq/kg (saten alçı)- $187,0\pm 2,4$ Bq/kg (granit), ve $12,3\pm 17,0$ Bq/kg (kum)- $1958,0\pm 83,4$ Bq/kg (briket) olarak bulundu.

Yapı malzemeleri aynı zamanda konut, okul ve iş yeri gibi kapalı ortamlardaki radonun ikincil kaynağıdır. Uzun zaman aralığında radon ve bozunum ürünlerine maruz kalma, akciğer kanser riskini artırmaktadır. Bu yüzden yapı malzemelerinin saldığı radon derişiminin ve radon salım hızlarının (yüzey ve kütle) bilinmesi, her bir yapı malzemesinin toplam radon ışınlanmasına olan katkısının bilinmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada, Kastamonu'dan toplanan bazı yapı malzemelerinin saldığı radon aktivite derişimi ve radon yüzey ve kütle salım hızları, aktif yöntem ile sürekli ölçüm yapabilen radon izleme cihazı (AlphaGUARD PQ2000 PRO) kullanılarak ölçüldü ve literatürdeki veriler ile karşılaştırıldı. Radon yüzey ve kütle salım hızının, sırasıyla $2,9$ mBq/m².h (mermer)- $2734,6$ mBq/m².h (granit) ve $0,033$ mBq/kg.h (mermer)- $53,866$ mBq/kg.h (granit) aralığında olduğu bulundu.

Yapı malzemelerinin kullanılmasını ve bireylerin aldığı radyasyon dozunu radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivite indisi, aktivite derişim indisi, alfa indisi, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı, karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu ve yaşam boyu kanser riski hesaplandı ve sonuçlar ölçüt veya

sınır değerler ile karşılaştırıldı. Sonuçlar, incelenen örneklerin yapı malzemesi olarak kullanılmasının önemli ölçüde herhangi bir radyolojik risk oluşturmayacağını gösterdi.

Anahtar Kelimeler: Yapı malzemeleri, radyoaktivite, gama-ışını spektrometresi radon, radon salım hızı, yıllık etkin radyasyon dozu, yaşam boyu kanser riski.

Yıl 2017, 73 sayfa

Bilim Kodu: 202



ABSTRACT

MSc.Thesis

MEASUREMENT OF THE ACTIVITY CONCENTRATION OF RADIONUCLIDES (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn and ^{40}K) NATURALLY OCCURRING IN BUILDING MATERIALS USED IN KASTAMONU AND RADON MASS EXHALATION RATES OF THESE BUILDING MATERIALS

Alper Tolga TEMİRCİ
Kastamonu University
Institute of Science
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Şeref TURHAN

Abstract: The natural radionuclides contained in building materials originating from earth's crust are radioactive sources that cause internal and external irradiation of individuals. Gamma radiation emitted from these radionuclides causes external irradiation and radon (^{222}Rn) gas and its short half-life decay products are released from these materials and taken by the respiratory tract cause internal irradiation. Therefore, the knowledge of the level of natural radioactivity in building materials is very important for evaluating the external and internal radiation exposure to individuals. In this study, the activity concentrations of uranium (^{238}U), thorium (^{232}Th), radium (^{226}Ra) and potassium (^{40}K) in some building materials collected from Kastamonu province were determined by using gamma-ray spectrometry with a high purity germanium detector (HPGe). The minimum and maximum value of the activity concentrations of ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K were found as 6.7 ± 0.4 (plaster)- 128.6 ± 3.7 (brick), 2.6 ± 0.8 (gypsum)- 172.2 ± 7.6 (granite), 5.2 ± 0.6 (satin plaster)- 187.0 ± 2.4 (granite), and 12.3 ± 17.0 (sand)- 1958.0 ± 83.4 Bq/kg (brick), respectively.

Building materials are also a secondary source of radon in indoor environments such as homes, school and work places. Long-term exposure to radon and its short-lived decay products increase the risk of the lung cancer. Therefore, it is important to know of the radon concentration and radon exhalation rates (surface and mass) from building materials from point of the view of the understanding the individual contribution of each material to the total indoor radon exposure. In the study, the radon activity concentration, radon surface and mass exhalation rates from some building materials from Kastamonu were measured by the active method using a continuous active radon monitoring system (AlphaGUARD PQ2000 PRO) and compared with data in the literature. Radon surface and mass exhalation rates were found in the range of 2.9 (marble)- 2734.6 mBq/m².h (granite) and 0.033 (marble)- 53.866 mBq/kg.h (granite), respectively.

Radium equivalent activity index, activity concentration index, alpha index, indoor absorbed gamma-ray dose rate and the corresponding annual effective radiation dose, lifetime cancer risk were estimated to evaluate the radiation dose to individuals and

usage of building materials from a radiological point of view and the results were compared with criteria or limit values. The results indicated that the examined samples used as building materials would not cause any significant radiological risk.

Key Words: Building materials, radioactivity, gamma-ray spectrometer, radon, radon exhalation rate, annual effective radiation dose, lifetime cancer risk.

Year 2017, pages 73

Science Code: 202



TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca beni ynlendiren, her trl desteği ve imknı sağlayarak değerli bilgilerinden yararlandığım, danışman hocam Prof. Dr. Şeref TURHAN'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalıőmalarımda bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Aslı KURNAZ'a, bu çalıőmaya KPAB-01/2016-13 proje kodu ile bilimsel araştırma projesi kapsamında destek veren niversitemiz BAP Koordinatörlüğüne, niversitemiz Merkezi Araştırma Laboratuvarı Müdürlüğüne ve Kastamonu Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü ğretim üyelerine içtenlikle teşekkür ederim.

Bu çalıőmayı aileme ithaf ediyorum.

Alper Tolga TEMİRCİ

Kastamonu 2017

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
GRAFİKLER	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapı Malzemelerindeki Radyoaktiviteye İlişkin Mevzuat.....	4
1.2. Literatürdeki Çalışmaların Değerlendirilmesi	5
2. KURAMSAL BİLGİ.....	18
2.1. Radyoaktivite.....	18
2.2. Radyoaktivite Bozunum Süreçleri	19
2.3. Doğal Radyasyon Kaynakları	21
2.4. İyonlaştırıcı Radyasyon.....	22
2.5. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi	24
2.6. Radyasyon Doz Birimleri.....	31
2.7. Radyasyonun Etkileri	33
3. MALZEME VE ÖLÇME YÖNTEMİ	36
3.1. Örneklerin Toplanması.....	36
3.2. Örneklerin Radyoaktivite Ölçme İşlemi İçin Hazırlanması	36
3.3. Radyoaktivite Ölçme Yöntemi	39
3.4. Radon Aktivite Derişimi ve Radon Salım Hızını Ölçme Yöntemi	45
4. ELDE EDİLEN BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	49
4.1. Radyoaktivite Ölçme Sonuçları.....	49
4.2. Radon Salım hızı Ölçme Sonuçları	53
4.3. Örneklerin Kullanılmasına Yönelik Radyolojik Değerlendirme.....	55
4.4. Radyasyon Dozunun Değerlendirilmesi.....	59

5. ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	71



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AK	Avrupa Komisyon
Bq	Becquerel (Bekerel)
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü (WHO)
eV	Elektronvolt
Gy	Gray
h	Saati
HPGe	High purity germanium detector
IARC	International Agency for Research on Cancer
kg	Kilogram
m	Metre
mBq	Milibekerel
mSv	Milisieveret
nGy	Nanogray
Sv	Sieveret
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TS	Türk Standardları
UKAK	Uluslararası Kanser Araştırma Kurumu
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
V	Volt
y	Yıl

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

	Sayfa
Fotoğraf 3.1. Ölçme işlemine hazırlama süreci	39
Fotoğraf 3.2. Radyoaktivite ölçümü için kullanılan gama-ışını spektrometresi.	46
Fotoğraf 3.3. AlphaGUARD PQ2000 PRO radon cihazı	49
Fotoğraf 3.4. Radon ve salım hızları için yapılan model hücre	49



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Fotoelektrik etkinin şematik gösterimi	26
Şekil 2.2. Compton saçılmasının şematik gösterimi	28
Şekil 2.3. Çift oluşumunun şematik gösterimi.	29
Şekil 2.4. Gama-ışını şiddetinin üstel zayıflatma eğrisi.....	31
Şekil 3.1. Gama-ışını spektrometre diyagramı.....	41
Şekil 3.2. Düzlemsel geometrili p-tipi HPGe dedektörü	43
Şekil 3.3. Etkileşme süreci ve foto-pik oluşumu.....	43



TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Uranyum serisindeki radyonüklitler	23
Tablo 2.2. Toryum serisindeki radyonüklitler	24
Tablo 2.3. Aktinyum serisindeki radyonüklitler	24
Tablo 2.6. Farklı radyasyonlar için KF değerleri	34
Tablo 3.1. İncelenen yapı malzemesi örnekleri	38
Tablo 3.2. Germanyumun kristalinin özellikleri	42
Tablo 3.3. HPGe dedektörünün özellikleri	46
Tablo 3.4. Radon cihazının teknik özellikleri	48
Tablo 4.1. Örneklerde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi.....	53
Tablo 4.2. Bazı yapı malzemelerinin saldığı radon aktivite derişimi	55
Tablo 4.3. Bazı yapı malzemeleri için radon salım hızları	56
Tablo 4.4. RYSH ve RKSH değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	57
Tablo 4.5. Yapı malzeme örnekleri için hesaplanan indis değerleri	59
Tablo 4.6. Doz ölçütünün kontrolüne yönelik I_{ADI} değerleri	60
Tablo 4.7. Örnekler için hesaplanan KOGDH, ERD ve YKR değerleri.....	64

GRAFİKLER DİZİNİ

	Sayfa
Grafik 1.1. Bireylerin aldığı yıllık etkin dozun radyoaktif kaynaklara göre dağılımı.....	2
Grafik 2.1. Foton etkileşmesinin üç ana tipinin bağıl önemi	30
Grafik 4.1. Aktivite derişimlerinin karşılaştırılması	54
Grafik 4.2. $R_{a_{eş}}$ aktivite indisinin sınır değer ile karşılaştırılması	60
Grafik 4.3. I_{ADi} değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması	60
Grafik 4.4. I_{α} değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması	61
Grafik 4.5. KOGDH değerlerinin ortalama değer ile karşılaştırılması	65
Grafik 4.6. ERD değerlerinin ortalama sınır ile karşılaştırılması	65

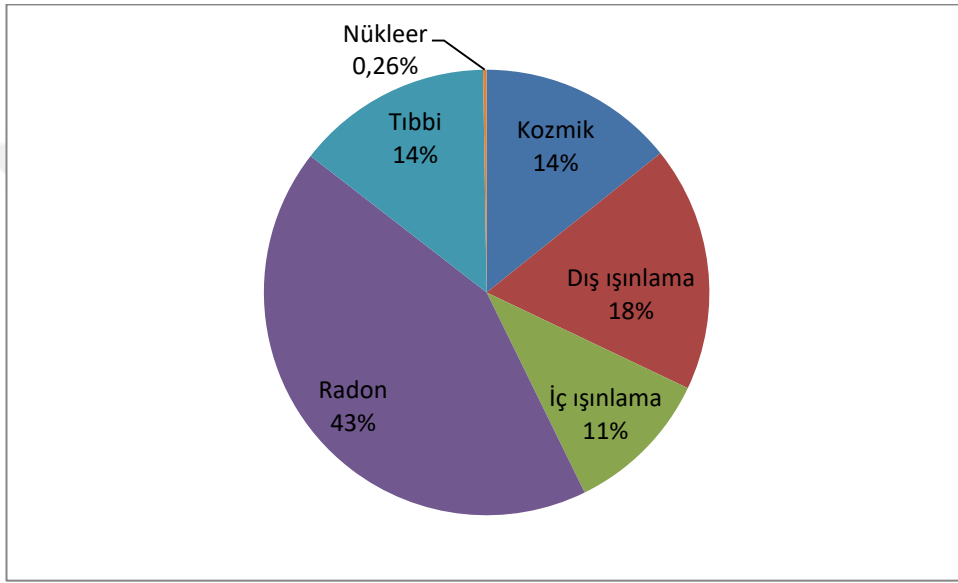


1. GİRİŞ

İnsanoğlunun doğal ve yapay radyoaktif kaynaklardan yayınlanan alfa, beta ve gama ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalması, hayatın kaçınılmaz bir gerçeğidir. Doğal radyoaktif kaynaklarını, kozmojenik ve primordiyal radyonüklitler oluştururken yapay radyoaktif kaynaklarını ise nükleer silah denemeleri ve nükleer kazalar sonucunda serpinti ile yayılan, nükleer reaktör çalışmaları esnasında kontrollü olarak bırakılan radyonüklitler ile endüstri, tıp, tarım gibi alanlarda kullanılmak için depolanan veya atık olarak değerlendirilen radyoizotoplar oluşturmaktadır (UNSCEAR, 2000). Bireyler bu radyoaktif kaynaklardan yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona iki farklı şekilde maruz kalabilirler: 1) Bireyler, açık ve kapılı ortamlarda, doğal ve/veya yapay radyonüklitlerden yayınlanan gama-ışınlarına tüm vücut olarak maruz kalabilirler ve bu maruziyet dış ışınlama olarak isimlendirilir. 2) Bireyler, solunum (radyoaktif gazın solunması gibi) ve sindirim (doğal radyonüklit içeren gıdaların tüketilmesi gibi) yolu ile vücutlarına aldıkları radyonüklitlerden yayınlanan alfa ve beta gibi iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalabilirler bu maruziyet ise iç ışınlama olarak isimlendirilir. Atmosferik nükleer silah denemelerinden kaynaklanan radyoaktif serpentinin sebep olabileceği sağlık risklerini değerlendirmek için 1955 yılında kurulan ve kurulduğu yıldan itibaren günümüze kadar bütün radyasyon kaynaklarından ileri gelen dozlar ile ilgili düzenli veriler yayınlayan Birleşmiş Milletler Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) raporuna göre bireylerin aldığı yıllık etkin radyasyon dozunun dünya nüfus ağırlıklı ortalaması 2,8 mSv tir (UNSCEAR, 2000). Bu yıllık etkin radyasyon dozunun radyoaktif kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Şekil 1.1’den, bireylerin aldığı yıllık etkin radyasyon dozunun %85’ine karşılık gelen 2,4 mSv’lik dozun doğal radyoaktif kaynaklardan yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyonun ve doğal radyoaktif kaynakların sebep olduğu dozun yarısının (1,2 mSv lik kısmının) ise radon (^{222}Rn) gazının sebep olduğu anlaşılmaktadır.

Kozmojenik radyonüklitler, genellikle yüksek enerjili fotonların atmosferde gerçekleştirdikleri etkileşmeler sonucunda meydana gelen ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na , vb. radyonüklitlerdir (UNSCEAR, 2000). Doğal olarak var olan ve yarılanma süreleri

dünyanın yaşı ile kıyaslanabilir olan yer kabuğu kökenli radyonüklitleri ise uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th), aktinyum (^{235}U) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitler ve potasyum (^{40}K) vb. radyonüklitler oluşturmaktadır (UNSCEAR, 2000). ^{238}U 'in bolluk oranı % 0,7 olan bir izotopu olan aktinyum serisinin başı ^{235}U ile lantanyum (^{138}La), samaryum (^{147}Sm) ve lütesyum (^{176}Lu) gibi diğer radyonüklitlerin, yer kabuğundaki aktivite derişimlerinin düşük olması sebebiyle yıllık etkin radyasyon dozuna olan katkıları ihmal edilecek düzeydedir (UNSCEAR, 2000).



Grafik 1.1. Bireylerin aldığı yıllık etkin dozun radyoaktif kaynaklara göre dağılımı (UNSCEAR, 2000)

Konut, okul ve iş yeri binalarında kalıcı olarak kullanılmak için üretilen yapı malzemeleri, doğrudan kullanılan yapısal malzemeler (tuğla, briket, çimento, harç, gaz beton vb.), yalıtım ve dekoratif amaçlara yönelik olarak kullanılan kaplama malzemeleri (granit, mermer, tuf, andezit, fayans, seramik, alçı sıva vb.) ve katkı ham maddesi malzemeleri (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı, fosfojips vb.) olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Yer kabuğu kökenli olan bu malzemelerin tamamı yukarıda sözü edilen doğal radyonüklitleri, malzemelerin elde edildiği bölgenin jeolojik ve jeokimyasal yapısına bağlı olarak farklı miktarlarda içerirler. Dolayısıyla yapı malzemelerindeki doğal radyonüklitlerin aktivite derişimleri, bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir (UNSCEAR, 2000). Beton, tuğla veya taştan yapılan kâgir veya oda bölmeleri briket veya tuğladan yapılan yapılarda, bu malzemeler dış ortamdan gelen gama ve kozmik radyasyonlara karşı bir zırh gibi davranır. Bununla

birlikte zamanlarının büyük bir kısmını kapalı ortamda geçiren ev halkı veya okul öğrencileri ve çalışanları veya işyeri çalışanları, binalarda kullanılan bu tür yapısal ve/veya kaplama ve/veya bu maddelerin üretilmesi aşamasında kullanılan katkı ham maddelerinin içerdiği doğal radyonüklitlerden yayımlanan iyonlaştırıcı radyasyonlara dış ve iç ışınlama şeklinde maruz kalırlar. Yapı malzemelerinin içerdiği radyonüklitlerin yayınladığı gama radyasyonu, dış ışınlamaya sebep olurken yapı malzemelerinden kapalı ortamlara (odalara, derslikler vb.) ve/veya binaların temelindeki kaya ve topraktan bina içine sızan ve solunum ile vücuda alınabilen radon ise iç ışınlamaya sebep olmaktadır.

Kapalı ortamlardaki radon gazı derişiminin yaklaşık %30'u, yapı malzemelerinden ileri gelmektedir (UNSCEAR, 2000). Uranyum doğal radyoaktif serisinde bulunan radyum elementinin (^{226}Ra) bozunum ürünü olan radon, tatsız, kokusuz, renksiz, soy gaz sınıfında yer alan ve yarılanma süresi 3,8 gün olan radyoaktif bir elementtir. Radonun radyoaktif bozunumu sonucunda oluşan kısa yarı ömürlü ürünleri polonyum (^{218}Po , ^{214}Po), kurşun (^{214}Pb) ve bizmut (^{214}Bi), kapalı ve açık ortamlarda havada asıltı hâlindeki toz ve su zerrelere tarafından soğurularak aktif alfa-ışını yayan asıltı taneciklerin oluşmasına sebep olurlar. Bu asıltı tanecikler, kolaylıkla solunum yolu ile üst solunum yoluna nüfuz edebilir, akciğerlere ulaşabilir, akciğerlerin duvarlarına tutunabilir ve orada kalıcı olarak yerel alfa radyasyon kaynağı gibi davranabilir. Alfa-beta ışını yayımlayabilen bu bozunum ürünlerinin solunum sistemindeki etkileri (davranışları) üzerine yapılan araştırmalar, bu radyonüklitlerin akciğerlerdeki biyolojik yarı ömürlerinin birkaç saatten bir güne kadar olabileceğini, dolayısıyla akciğer dokusuna hasar vermeleri sonucunda zamanla kansere sebep olma riski açısından radondan daha tehlikeli olabileceğini göstermiştir (Güler, Çobanoğlu, 1997). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) ilk olarak 1979 yılında, kapalı ortamlarda radona maruz kalmadan kaynaklanan sağlık etkilerine dikkat çekmiş ve radon, 1988 yılında Uluslararası Kanser Araştırma Kurumu (UKAK) tarafından kansere yol açan madde olarak kabul edilmiştir (IARC, 1988; WHO, 2009). Yapılan araştırmalar, akciğer kanserine yakalanma riskinin, radona maruz kalmanın artışı ile doğru orantılı olarak arttığını göstermiştir (WHO, 2009). Birçok insan düşük ve orta seviyedeki radon derişimine maruz kaldığından, radona dayalı akciğer kanserlerinin büyük bir kısmı, yüksek seviyedeki radon derişiminden ziyade düşük ve orta

seviyedeki radondan kaynaklanmaktadır. Radondan kaynaklı akciğer kanser vakalarının büyük bir ekseriyeti, sigara ve radon birleşik etkisi sebebiyle sigara tiryakilerde görülmektedir (WHO, 2009).

1.1. Yapı Malzemelerindeki Radyoaktiviteye İlişkin Mevzuat

Avrupa Birliği üyesi bazı ülkeler, yapı malzemelerinin içerdiği radyoaktivitenin sınırlandırılmasına ilişkin düzenlemeler yapmışlardır. Bununla birlikte Avrupa Komisyonu (AK) tarafından yayınlanan raporda, bireylerin kapalı ortamlarda (yaşadıkları evlerde) yapı malzemelerindeki radyoaktivitede dolayı alacakları yıllık etkin radyasyon dozu 1 mSv olarak sınırlandırılmış ve bu değerin üzerinde doza sebep olabilecek miktarda radyoaktivite içeren yapı malzemelerinin, üye ülkelerde dolaşımının kısıtlanması tavsiye edilmiştir (EC, 1999). Ülkemizde, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 08/09/2002 tarihli Resmi Gazetede yayınlanan Yapı Malzemeleri Yönetmeliğinde (89/106/EEC), yapı işlerine ilişkin gerekli kuralları oluşturmuş ancak yer kabuğu kökenli ham maddelerin, endüstriyel işlemler sonucunda yan ürün olarak elde edilen katkı maddelerinin ve yapı işlerinde kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen bütün yapı malzemelerinin kullanılmasında radyolojik açıdan sınırlama getiren herhangi bir yönetmelik hazırlanamamış veya yapı malzemeleri ile ilgili mevzuata bu husus ilave edilmemiştir (TAEK TR 2008-7, 2008). TAEK tarafından hazırlanan ve 24/03/2000 tarihli ve 23999 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinin 29/09/2004 tarih ve 25598 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile değişik Doğal Radyasyon başlıklı 37. maddesinde “Maruz kalınan doğal radyasyon seviyesinin yapı malzemeleri nedeniyle artmasının önlenmesi ve toplum üyelerinin alacağı radyasyonun mümkün olan en düşük seviyede tutulması amacıyla bu malzemelerdeki radyoaktivitenin kontrolü esastır” hükmüne yer verilmiş ancak bu kontrolü nasıl yapılacağı belirtilmemiştir (TAEK TR 2008-7, 2008).

Dünya Sağlık Örgütü kapalı ortamda radona maruz kalma sebebiyle sağlık risklerini en aza indirmek amacıyla radon referans seviyesini 100 Bq/m³ olarak teklif etmektedir (WHO, 2009). Ülkelerin kendilerine özgün şartları, bu referans radon

seviyesini karşılamıyorsa, radon referans seviyesi, yaklaşık olarak 10 mSv/y etkin yıllık radyasyon dozuna karşılık gelen 300 Bq/m³'ü geçmemelidir. Sınır değerlerin aşılması durumunda, radon derişiminin, yapı malzemelerinin radyoaktivite açısından kontrolü, binaların özellikle bodrum ve zemin katlarının sızıntıya imkân vermeyecek şekilde izole edilmesi, çatlakların kapatılması, havalandırma vb. basit tedbirlerle en aza indirilmesi tavsiye edilmiştir. Avrupa Birliği, radon derişimine ilişkin sınır değerleri, eski binalarda 400 Bq/m³, yeni binalarda ise 200 Bq/m³ olarak belirlemiştir (EC, 1997). Ülkemizde, kapalı ortamlarda radon gazı derişiminin kontrolü amacıyla, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu tarafından hazırlanan ve 24/03/2000 tarihli ve 23999 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan “Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği”nde yeni binalar için azami radon derişimi, 400 Bq/m³ ile sınırlandırılmıştır (TAEK TR 2008-7, 2008). TS 12614 “Çevre Sağlığı- Kapalı Ortamda Radon Kirliliğine Karşı Alınacak Tedbirler” standardında ise eski ve yeni binalar için radon sınır değeri olarak 200 Bq/m³ olarak tavsiye edilmiştir (TAEK TR 2008-7, 2008).

1.2. Literatürdeki Çalışmaların Değerlendirilmesi

Bugün birçok ülkede yapı malzemelerindeki aktivite derişiminin belirlenmesine ve bu malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik çalışmalar sürdürölmektedir. Tezin bu kısmında, hem ülkemizde hem de diğer ülkelerde kullanılan yapı malzemeleri ile ilgili son yıllarda literatürde yer alan bu tür çalışmalar özetlenmiştir.

Sahoo, Nathwani, Eappen, Ramachandran, Gaware ve Mayya (2007) tarafından yapılan çalışmada, Hindistan'da yaygın olarak kullanılan bazı yapı malzemelerinin (fırınlanmış tuğla, uçucu küllü tuğla, çimento, mermer, beton, toprak vb.) içerdiği ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K radyonüklitinin aktivite derişim, gama-ışını spektrometresi kullanılarak ve bu malzemelerin radon kütle salım hızları ise AlphaGUARD izleme sistemi ile ölçölmüştür. Çalışmada ayrıca yapı malzemesi örneklerinin radon emanasyon katsayıları ²²⁶Ra ve ²²²Rn içeriği esas alınarak 0,1%- %20,8 aralığında bulunmuştur.

Turhan, Baykan ve Şen (2008) tarafından yapılan çalışmada, Ankara İlindeki konutların inşaatında kullanılan 20 farklı yapı malzemesinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile sırasıyla 0,5-144,9 Bq/kg, 0,6-169,9 Bq/kg ve 2,0-1792,3 Bq/kg aralığında ölçülmüştür. Çalışmada ayrıca bu malzemelerin kullanılmasına eşlik eden radyolojik tehlikeleri değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivite, gama indisi, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve buna karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmış ve elde edilen değerlerin, kriter değerlerden veya üst sınır değerlerinden daha küçük olduğu bulunmuştur.

Ngachin vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada, Kamerun'da dekorasyon ve yapısal malzeme olarak kullanılan malzemelerdeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, bir HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi ile ve bu malzemelerin yüzey radon hızları ise pasif yöntem olan CR-39 katı-hal nükleer iz dedektörü ile ölçülmüştür. Çalışmada, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, sırasıyla 12-49 Bq/kg, 16-37 v ve 306-774 Bq/kg ve tuğla, kaplama malzemesi ve beton için radon yüzey salım hızı ise, sırasıyla 6×10^{-5} - 8×10^{-5} Bq/cm². h, 6×10^{-5} - 12×10^{-5} Bq/cm². h ve 7×10^{-5} Bq/cm². h aralığında bulunmuştur. Ayrıca, bu malzemelerin kullanılmasının uygunluğuna yönelik olarak radyum eşdeğer aktivite indisi, dış ve iç ışınlama indisleri hesaplanmıştır.

Verità, Righi, Guerra ve Jeyapandian (2009) tarafından yapılan çalışmada, İtalya'da porselen kaplama malzemelerinde katkı ham maddesi olarak kullanılan zirkon hamuru ve zirkon kumunun radon kütle salım hızları E-perm elektret iyon odası kullanılarak ölçülerek sırasıyla 0,17- 1,9 Bq/kg. h ve 0,09-0,2 Bq/kg.h aralığında olduğu bulunmuştur.

Flores, Estrada, Suárez, Zerquera ve Pérez (2009) tarafından yapılan çalışmada, Küba'da kullanılan yapı malzemesi ve katkı hammaddelerinden oluşan 44 örneğin doğal olarak içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ve kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ise 543 evde bir yüksek basınçlı iyonlaşma odası kullanılarak ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasına eşlik eden radyolojik tehlikeleri değerlendirmek amacıyla radyum

eşdeğer aktivite ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in aktivite derişimi, sırasıyla 6-57 Bq/kg, 1,2-22 Bq/kg ve 9-857 Bq/kg aralığında bulunmuştur.

Çelik, Damla ve Çevik (2010) tarafından yapılan çalışmada, Ordu İlinde kullanılan bazı yapı malzemelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in ortalama aktivite derişimi, bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak, sırasıyla 34,5, 26,9 ve 378,4 Bq/kg olarak ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasına eşlik eden radyolojik tehlikeleri değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivite ve dış ışınlama indisi, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve buna karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmış ve değerlerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu bulunmuştur.

Mavi ve Akkurt (2010) tarafından yapılan çalışmada, Isparta'da kullanılan bazı yapı malzemelerindeki (tuğla, çimento, kireç taşı, Ytong, alçı, seramik ve çakıl) ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'in aktivite derişimi, NaI(Tl) dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasına eşlik eden radyolojik tehlikeleri değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivite ve dış ışınlama indisi, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve buna karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Saad, Abdalla, Hussein and Elyaseerry (2010) tarafından yapılan çalışmada, Libya Bingazi'de bulunan Garyounis Üniversitesinin inşasında kullanılan yapı malzemelerinin radon aktivite derişimi ve radon salım hızları, pasif yöntem ile CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçüldü. Çalışmada, tuğla, mermer ve seramik taban kaplaması için ortalama radon aktivite derişimi, sırasıyla 172 Bq/m³, 175 Bq/m³ ve 145 Bq/m³ olarak ve ortalama radon yüzey salım hızları ise sırasıyla 0,13 Bq/m².h, 0,132 Bq/m².h ve 0,11 Bq/m².h olarak bulunmuştur.

Chen, Rahman ve Atiya (2010) tarafından yapılan çalışmada, Kanada'da evlerin iç dekorasyonunda kullanılan alçıpan, mermer, porselen, seramik ve arduvaz örneklerinin radon yüzey salım hızı ve radon derişimi Lucas hücresi (Model 300A) ve taşınabilir sürekli radon ölçme cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

Stojanovska, Nedelkovski ve Ristova (2010) tarafından yapılan çalışmada, Makedonya'da kullanılan yapı katkı ham maddesi ve nihai ürün çimento örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimi, bir gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada, bu yapı malzemelerinin kullanılmasına yönelik olarak radyum eşdeğer aktivite indisi, sağlık indisi ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır. Çimento örnekleri için hesaplanan yıllık etkin radyasyon dozunun, Avrupa Birliği limitinin altında olduğu belirtilmiştir.

Turhan, Arıkan, Yücel, Varinlioğlu ve Köse (2010) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'deki kömür ile çalışan termik santrallerinden elde edilen uçucu kül (%10, %20 ve %30 oranında) katkılı 155 adet beton örneğinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik olarak radyum eşdeğer aktivite indisi, dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hız ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Baykara, Karatepe ve Doğru (2011) tarafından yapılan çalışmada, Elazığ İlinde yapı malzemesi olarak kullanılan çimento, alçı, tuğla, kum, mermer, kireçtaşı ve gaz beton örneklerinin içerdiği ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, NaI(Tl) dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ve bu malzemelerin saldığı radon derişimi ve radon salım hızları pasif yöntem ile CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada ayrıca radyum eşdeğer aktivite, dış ve iç ışınlama indisleri ve yıllık etkin radyasyon doz hızı hesaplanmıştır. ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, sırasıyla 3,5-114,1 Bq/kg, 1,6-20,7 Bq/kg ve 201,4-4928,0 Bq/kg aralığında ve kapalı ortamdaki ortalama radon aktivite derişimi ise 364 Bq/m^3 olarak bulunmuştur.

Turhan, Arıkan, Demirel ve Güngör (2011) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'deki seramik endüstrisinde üretilen 146 adet duvar ve yer kaplaması seramik örnekleri ve katkı ham maddelerinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik olarak dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Bavernegin, Vahabi-Moghaddam, Babakhani ve Fathabadi (2012) tarafından yapılan çalışmada, İran'ın Ramsar şehrindeki marketlerden alınan ve inşaatlardan toplanan yapısal ve kaplama malzemelerinin (mermer, granit, tuğla, traverten, beton, alçı ve mozaik) içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimi, bir HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi ve bu malzemelerin radon yüzey salım hızları ise aktif gaz analizörü (AlphaGUARD 2000) kullanılarak ölçülmüştür.

Trevisi, Risica, D'Alessandro, Paradiso ve Nucetelli (2012) tarafından yapılan çalışmada, Avrupa Birliği üye ülkelerde yapı malzemesi olarak kullanılan tuğlalar, çimento, fosfojips, sedimanter, tortul ve volkanik blok kayaların içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimine ilişkin 10000 deneysel verinin toplandığı bir veri tabanı oluşturulmuştur.

Sharaf ve Hamideen (2012) tarafından yapılan çalışmada, Ürdün'de yaygın olarak yapı malzemesi olarak kullanılan granit, mermer, kireçtaşı, seramik, tuğla ve beton örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, gama-ışını spektrometrik yöntem ile sırasıyla 3-42 Bq/kg, 1- 58 Bq/kg ve 4-897 Bq/kg aralığına ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasına yönelik olarak dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hız ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Lu, Yang ve Ren (2012) tarafından yapılan çalışmada, Çin- Xianyang'tan toplanan kireç, çimento beton, kum, çakıl, delikli tuğla, kil tuğla, kiremit ve çatı asbest örneklerinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, NaI(Tl) dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile sırasıyla 13-70 Bq/kg, 13- 99 Bq/kg ve 125- 915 Bq/kg aralığına ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik olarak radyum eşdeğer aktivite indisi, dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hız ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmış ve bu malzemelerin kullanılmasında herhangi bir radyolojik riskin olmadığı vurgulanmıştır.

Turhan (2012) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de iç ve dış kaplama malzemesi ve mutfak tezgâhı olarak kullanılan 42 farklı granit örneğinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th

ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile sırasıyla 9-193 Bq/kg, 8- 345 Bq/kg ve 92- 4156 Bq/kg aralığına ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik olarak dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Aykamış, Turhan, Ugur, Baykan ve Kılıç (2013) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de kaplama ve/veya dekorasyon amaçlı olarak kullanılan 22 farklı granit örneğinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite derişimi, bir HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüş ve ^{226}Ra aktivite derişimi esas alınarak bu granit örneklerinin ortama saldığı radon aktivite derişimi, radon kütle ve yüzey salım hızları hesaplanmıştır. Çalışmada, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, sırasıyla 10-187 Bq/kg, 16-354 Bq/kg ve 104-1630 Bq/kg aralığında ölçülmüş ve radonun aktivite derişimi, radon yüzey salım hızı ve radon kütle salım hızının ortalama değeri, sırasıyla 196 Bq/m^3 , $10,5 \text{ Bq/m}^2\cdot\text{h}$ ve $0,27 \text{ Bq/kg}\cdot\text{h}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, granit örneklerinin kaplama malzemesi olarak kullanılmasından kaynaklanan radyolojik riskler gama indisi, kapalı ortam dış ışınlama ve iç ışınlama yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanarak değerlendirilmiştir.

Szabó, Völgyesi, Nagy, Szabó, Kis ve Csorba (2013) tarafından yapılan çalışmada, Macaristan'da kullanılan tuğla, kömür cürüflü beton vb. 40 yapı malzemesindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin aktivite derişim, bir HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasına ilişkin olarak radyum eşdeğer aktivite indisi, aktivite derişim indisi, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve buna eşlik eden yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Topçu, Bıçak, Çam ve Ereeş (2013) tarafından yapılan çalışmada, İzmir ve Manisa illerinden toplanan kum, çakıl, kaya, çimento, granit, mermer, karo, seramik ve tuğla örneklerinin radon kütle ve yüzey salım hızları pasif yöntem ile CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçülmüştür.

Ahmad vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, Pakistan'ın Dera İsmail Kahn şehrindeki binaların yapımında kullanılan çimento, fırınlanmış ve fırınlanmamış tuğla örneklerinden salınan radon gazı aktivite derişimi ve bu malzemelerin radon yüzey salım hızları, hem aktif (RAD7 cihazı ile) ve pasif (CR-39 nükleer iz dedektörleri ile) yöntemle ölçülmüş ve radon gazının sebep olduğu yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda aktif yöntem ile pasif yöntem arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir. Çimento, fırınlanmış ve fırınlanmamış tuğla örneklerinin ortalama radon yüzey salım hızları, sırasıyla 0,4 Bq/m².h, 1,2 Bq/m².h ve 1,4 Bq/m².h olarak bulunmuştur.

Abd El-Mageed, El-Azab Farid, Saleh, Mansour ve Mohammed (2014) tarafından yapılan çalışmada, Yemen-Aden'de yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerindeki radyoaktivite, gama-ışını spektrometresi ile ölçülmüş, ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'in aktivite derişimi, sırasıyla 21-69 Bq/kg, 16-95 Bq/kg ve 117-2637 Bq/kg aralığında bulunmuş ve bu malzemelerin kullanılmasına ilişkin radyum eşdeğer aktivite, dış ve iç ışınlama indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve buna karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda incelenen yapı malzeme örneklerinin kullanılmasının radyolojik açıdan herhangi bir sakınca oluşturmayacağı öngörülmüştür.

Saad, Al-Awami ve Hussein (2014) tarafından yapılan çalışmada, Libya'da konut yapımında ve konutların iç dekorasyonunda kullanılan 37 adet yapı malzemesi örneğinin radon yüzey ve kütle salım hızları, CR-39 nükleer iz dedektörü kullanılarak ölçülmüştür.

Shoeib ve Thabayneh (2014) tarafından yapılan çalışmada, Mısır'da yapı malzemesi olarak kullanılan toplam 30 adet kil tuğla, kum, çimento blokları, çimento, beyaz çimento alçı, granit, seramik örneklerinin içerdiği ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K'in aktivite derişimi, bir gama-ışını spektrometresi ile sırasıyla 8-289 Bq/kg, 4- 78 Bq/kg ve 4-1314 Bq/kg aralığına ve bu malzemelerin radon kütle ve yüzey salım hızları ise pasif yöntem ile LR-115 nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada, bu yapı malzemelerinin kullanılmasına yönelik olarak radyum eşdeğer aktivite indisi,

dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Solak, Turhan, Uğur, Gören, Gezer, Yeğingil ve Yeğingil (2014) tarafından yapılan çalışmada, Adana İlinde kullanılan 14 farklı toplam 117 yapı malzemesi örneğinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik olarak dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Sola, Srinuttrakul ve Kewsuwan (2015) tarafından yapılan çalışmada, Tayland'da kaplama ve mutfak tezgâhı olarak kullanılan 18 granit örneğinden salınan radon derişimi ve radon yüzey salım hızı iyonizasyon odası (ATMOS 12 DPX) kullanılarak ölçülmüş ve radondan kaynaklanan yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır. Granit örneklerinin ortalama radon yüzey salım hızı $20 \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{h}$ olarak bulunmuştur.

Sharma, Mahur, Yadav, Sonkawade, Sharma, Ramola ve Prasad (2015) tarafından yapılan çalışmada, Hindistan'da inşaat sektöründe kullanılan çimento örneklerinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin aktivite derişimi, NaI(Tl) dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ve bu malzemelerin radon kütle salım hızları ise pasif yöntemle LR-115 tip II nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümü yapılan yapı malzemelerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişiminin, sırasıyla 9-28 Bq/kg, 21-43 Bq/kg ve 280-544 Bq/kg aralığında olduğu bulunmuştur.

Kaynar, Özbey ve Ereeş (2015) tarafından yapılan çalışmada, İstanbul'da kullanılan 63 yapı malzemesinin radon aktivite derişimi, pasif yöntem olan katı-hal nükleer iz dedektörleri (CR-39) ve toz haline getirilmiş 18 yapı malzemesi örneğindeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimi ise Na(Tl) dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada, ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerinin sırasıyla, 45-114 Bq/kg, 2-34 Bq/kg ve 3-639 Bq/kg aralığına değıştiği bulunmuş ve bu değerler temel alınarak radyasyon risk indisleri (radyum eşdeğer aktivite, dış ve iç ışınlama risk indisi) hesaplanmıştır.

Janik, Omori ve Yonehara (2015) tarafından yapılan çalışmada, Japonya’da kullanılan tuğla ve granit örekelerinin radon ve toron salım hızlarının neme olan bağımlılığı araştırılmış ve sonuç olarak salım hızlarının neme bağlı olarak 2 faktör ile değiştiği gözlenmiştir.

Amin (2015) tarafından yapılan çalışmada, Suudi Arabistan’ın Jizan İlinden toplanan 21 yapı malzemesi örneğinin radon kütle ve yüzey salım hızları pasif yöntem ile CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak 1,6- 16,7 mBq/kg.h ve 29,7- 998,9 mBq/m².h aralığında ölçülmüştür.

Yousef, El-Farrash, Abu Ela ve Merza (2015) tarafından yapılan çalışmada, Mısır’ın Dakahlia Bölgesinden toplanan 40 yapı malzemesinden salınan radon aktivite derişimi ve radon yüzey ve kütle salım hızları pasif yöntemle LR-115 nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçülmüştür. Siyah çimento, beyaz çimento, alçı, kum, seramik, mermer, tuğla, çakıl ve granitin ortalama radon derişimi, radon yüzey ve radon kütle salım hızları, sırasıyla 200 Bq/m³, 258 mBq/m².h ve 4 mBq/kg.h, 68 Bq/m³, 88 mBq/m².h ve 1 mBq/kg.h, 81 Bq/m³, 104 mBq/m².h ve 2 mBq/kg.h, 247 Bq/m³, 318 mBq/m².h ve 3 mBq/kg.h, 95 Bq/m³, 123 mBq/m².h ve 2 mBq/kg.h, 219 Bq/m³, 282 mBq/m².h ve 3 mBq/kg.h, 127 Bq/m³, 164 mBq/m².h ve 2 mBq/kg.h, 321 Bq/m³, 413 mBq/m².h ve 5 mBq/kg.h, 116 Bq/m³, 150 mBq/m².h ve 2 mBq/kg.h ve 845 Bq/m³, 1089 mBq/m².h ve 12 mBq/kg.h olarak bulunmuştur.

Amin (2015) tarafından yapılan çalışmada, Irak’ta kullanılan bazı yapı malzemelerinden salınan radon aktivite derişimi ve bu malzemelerin radon yüzey ve kütle salım hızları pasif yöntemle CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçülmüştür.

Stajic ve Nikezic (2015) tarafından yapılan çalışmada, Sırbistan’da yapı malzemesi olarak kullanılan çimento, beyaz çimento, kil tuğla, kiremit, kireç, seramik, mermer ve kum örneklerinin radon kütle ve yüzey salım hızları aktif yöntem ile RAD7 cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

Manić, Manić, Nikezić ve Krstić (2015) tarafından yapılan çalışmada, Sırbistan’da yapı malzemesi olarak kullanılan yerli ve ithal edilen kum, çakıl, kuvarslı kum, kireç,

alçı, klinker, Portland çimento, beyaz çimento, tuğla, beton, gaz beton ve kayaç (mermer, granit, dolomit, kumtaşı) örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasında dolayı bireylerin alabileceği açık ortam yıllık etkin dozu 0,047 mSv/y ve kapalı ortam yıllık etkin radyasyon dozu ise 0,24 mSv/y olarak hesaplanmıştır.

Turhan, Atıcı ve Varinlioğlu (2015) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de iç ve dış kaplama malzemesi ve tuğla gibi iç ve dış duvarların inşasında kullanılan volkanik tuf örneklerinin içerdiği ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile sırasıyla 3-389 Bq/kg, 8- 401 Bq/kg, 2-263 Bq/kg ve 99- 2107 Bq/kg aralığına ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik olarak dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Awhida, Ujić, Vukanac, Durašević, Kandić, Ćeliković ve Lončar (2016) tarafından yapılan çalışmada, yapı malzemelerinin radon salım hızlarının sadece HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi kullanılarak ölçen yeni bir yöntem sunulmuş ve sonuçlar diğer yöntemler ile edilenlerle karşılaştırılmıştır.

Jang, Chung, Ji, Lim, Kim, Kang ve Choi (2016) tarafından yapılan çalışmada, Kore'de kullanılan 26 yapı malzemesindeki radyoaktivite, gama-ışını spektrometresi ile ölçülmüş, ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 57 Bq/kg, 39 Bq/kg ve 323 Bq/kg bulunmuş ve bu malzemelerdeki radyoaktiviteden dolayı erkek ve kadınların aldığı ortalama yıllık etkin radyasyon dozu, ICRP referans fantom ile sırasıyla 0,51 mSv/y ve 0,52 mSv/y olarak hesaplanmıştır.

Ravisankar, Raghu, Chandrasekaran, Gandhi, Vijayagopal ve Venkatraman (2016) tarafından yapılan çalışmada, Hindistan'ın Tiruvannamalai bölgesine bağlı Polur kasabasında kullanılan yapı malzemesi örneklerinin (tuğla, kil, toprak ve çimento) ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, NaI(Tl) dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile sırasıyla 2-88 Bq/kg, 25- 359 Bq/kg ve 103-634 Bq/kg aralığına

ölçülmüş ve bu malzemelerin kullanılmasına yönelik olarak radyum eşdeğer aktivite indisi, dış ve iç sağlık indisleri, kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hız ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, bu tür yapı malzemelerinin kullanılmasının herhangi bir radyolojik risk oluşturmayacağı öngörülmüştür.

Kayakökü, Karatepe ve Doğru (2016) tarafından yapılan çalışmada, Bitlis İlinden toplanan perlit, ponza ve Ahlat taşı örneğinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, bir gama-ışını spektrometresi ve bu malzemelerin saldığı radon derişimi ise CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada bu tür malzemelerin kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesine yönelik olarak radyum eşdeğer aktivite, dış ve iç ışınlama indisleri, yaşam boyu kanser riski ve kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızı hesaplanmıştır.

Mohamed, Algamdi ve Al-shamani (2016) tarafından yapılan çalışmada, Suudi Arabistan'ın Medine şehrinde kaplama malzemesi ve mutfak tezgâhı olarak kullanılan yerli ve ithal edilen 60 adet granit ve mermer örneklerindeki ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ile ölçülmüş ve bu örneklerin kullanılmasını radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla radyum eşdeğer aktivite, dış ve iç ışınlama indisleri ve yıllık etkin radyasyon dozu hesaplanmıştır.

Döse, Silfwerbrand, Jelinek, Trägårdh ve Isaksson (2016) tarafından yapılan çalışmada, İsveç'te üretilen betonlarda katkı malzemesi olarak kullanılan çakıllı kumda ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi sonuçları sunulmuş ve yapı malzemelerindeki radyoaktivitenin kontrolüne yönelik olarak AB tarafından önerilen aktivite derişim indisi, son zamanlarda Hofmann tarafından geliştirilen doz modeli ile kıyaslanmış ve aktivite derişiminin yoğunluğa bağlı olarak %16-%19 arasında daha küçük olabileceği öngörülmüştür.

Safarov, Safarov, Azimov ve Darby (2017) tarafından yapılan çalışmada, Özbekistan'da kullanılan yapı malzemelerindeki radyoaktiviteyi hızlı bir şekilde ölçen ve radyum eşdeğer aktiviteyi belirleyen NaI(Tl) dedektörlü düşük maliyetli bir ölçme sistemi geliştirilmiştir.

Kovler (2017) tarafından yapılan çalışmada, İsrail’de inşaatlarda kullanılmak üzere 2012-2014 yılları arasında üretilen 109 adet beton örneğinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın aktivite derişimi ve bu malzemelerin radon salım hızları ölçülmüş ve sonuçlar Avrupa Birliği Üye ülkelerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, uçucu kül katkılı beton örneklerinin radon salım hızlarının, uçucu kül kullanılmayan çimento örneklerinin radon salım hızlarından daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Kovács, Shahrokhi, Sas, Vigh ve Somlai (2017) tarafından yapılan çalışmada, mangan madeninde atık olarak ortaya çıkan mangan çamurunun katkı malzemesi olarak kullanıldığı 20 adet tuğla örneğinin ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K ’ın aktivite derişimi, HPGe dedektörlü bir gama spektrometresi ile ve bu malzemelerin radon salım hızları ise AlphaGurad radon monitörü kullanılarak ölçülmüştür.

Literatür değerlendirmesi, bireylerin maruz kaldıkları radyasyon dozlarının, radyoaktivitesi normal düzeyin üzerinde olan yapı malzemelerinin kullanıldığı konut, okul ve işyerlerinde yaşamaları hâlinde artabileceğini göstermiştir. Bu yüzden yapı malzemelerindeki radyonüklitlerin derişimlerinin bilinmesi, bu tür malzemelerin kullanımı sonucunda bireyler için olası radyolojik riskin değerlendirilmesi ve yapı malzemeleri ile ilgili standartların geliştirilmesine ilişkin yol gösterici bilgilerin oluşturulması açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, 1) Kastamonu’da yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin doğal olarak içerdiği ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimlerini belirlemek, 2) bu malzemelerin radon kütle ve radon yüzey salım hızlarını ölçmek, 3) bu tür yapı malzemelerinin kullanılmasına yönelik radyum eşdeğer aktivite indis, aktivite derişim indis ve alfa indisini hesaplamak ve 4) kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızını ve buna karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozunu ve yaşam boyu kanser riskini hesaplayarak bu tür malzemelerin kullanılmasından kaynaklanabilecek radyolojik riskleri değerlendirmektir. Bu amaca yönelik olarak tez beş bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde, yapı malzemelerindeki doğal radyoaktivitenin ölçülmesinin radyolojik açıdan önemine değinildi, yapı malzemelerinin içerdiği doğal ve yapay radyoaktivitenin belirlenmesine ilişkin literatürde yer alan çalışmalar özetlendi ve çalışmanın amacı açıklandı. İkinci bölümde, radyoaktivite, bozunum süreçleri, doğal radyasyon kaynakları, iyonlaştırıcı radyasyon, iyonlaştırıcı

radasyonun madde ile etkileşmesi, radasyon doz birimleri ve radasyonun sağlık üzerindeki etkileri kısaca özetlendi ve ayrıntılı bilgi için okuyucu ilgili kaynaklara yönlendirildi. Üçüncü bölümde, yapı malzemesi örneklerinin toplanması ve örneklerin ölçme işlemine hazırlanması, ölçme işleminde kullanılan yöntem ve ölçme işlemi için kullanılan yüksek saflıktaki yarı iletken germanyum dedektörlü (HPGe) gama-ışını spektrometresi ve radon ölçme sistemi ayrıntılı olarak ele alındı. Dördüncü bölümde, ölçme sonuçları ve hesaplanan veriler, tablo ve şekiller hâlinde sunuldu, sonuçları hem birbirleriyle hem de literatürdeki veriler ile karşılaştırıldı ve hesaplanan radyolojik parametreler, ulusal ve uluslararası ölçüt değerler ve/veya tavsiye edilen sınır değerler ile karşılatıldı. Beşinci bölümde ise bu malzemelerin kullanılmasına yönelik öneriler yer aldı.

2. KURAMSAL BİLGİ

2.1. Radyoaktivite

Radyoaktif çekirdekler, rastgele bir süreçte bozunuma uğrarlar. Bir radyoaktif çekirdeğin, bir zaman aralığında bozunuma uğrama ihtimali zamandan bağımsızdır. Eğer t zaman aralığında bir örnek içinde N tane radyoaktif çekirdek varsa ve örnek içine yeni çekirdek ilavesi söz konusu değilse, bir dt süresinde bozunuma uğrayan çekirdek sayısı dN, N ile orantılıdır ve

$$\lambda = -\frac{(dN/dt)}{N} \quad (2.1)$$

bağıntısı ile verilir (Krane, 1988). Burada, λ ; bozunum sabitidir. (2.1) bağıntısının çözümünden,

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

radyoaktif bozunumun üstel yasası elde edilir. Burada, N_0 ; integrasyon sabitidir ve başlangıçtaki ($t=0$) çekirdek sayısını verir. Başlangıçtaki çekirdek sayısının, bozunum süreci ile yarıya düşmesi için geçen süreye yarılanma süresi ($T_{1/2}$) denir ve (2.2) bağıntısında, N yerine $N_0/2$ konulduğunda,

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.3)$$

elde edilir. Aktivite (A), bozunum hızı, (2.2) bağıntısının diferansiyeli alınarak

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

elde edilir ve aktivite aynı zamanda

$$A = \lambda \cdot N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

bağıntısına eşittir (Krane, 1988). Burada, A_0 başlangıçtaki ($t=0$) aktivitedir ve λN_0 'a eşittir. N; radyoaktif çekirdek sayısı ve

$$N = \frac{h(\%) \cdot m(\text{g}) \cdot N_{Av}}{W} \quad (2.6)$$

ile verilir. Burada h; kararsız atomun izotopik bolluğu, m; örneğin kütlesi, N_{Av} ; Avagadro sayısı ve W; atom ağırlığıdır. Bir radyoaktif örneğin aktivitesi tam olarak birim zaman başına örneğin içerdiği çekirdeklerin bozunum sayısıdır ve geleneksel birimi bozunum/s dir. Diğer ölçme birimi, bir gram radyumun aktivitesini gösteren curie (Ci) dir ve basitçe

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ bozunum/s} \quad (2.7)$$

ile verilir. Laboratuvarlarda sıklıkla kullanılan radyoaktif kaynakların aktiviteleri, mikrocurie (μCi)- milicurie (mCi) aralığındadır. Aktivitenin uluslararası birimi becquerel (Bq) dir ve saniye başına bozunum (1 Bq=bozunum/s) olarak verilir.

2.2. Radyoaktivite Bozunum Süreçleri

Bazı kararsız atomlar daha kararlı duruma geçebilmek için tanecik yayınlamalıdır. Alternatif olarak uyarılmış durumda olan bir çekirdek, elektromanyetik quanta formunda olan enerji yayınlamalıdır. Alfa (α), beta (β) ve gama (γ) olmak üzere üç temel radyoaktif bozunum süreci vardır (Krane, 1988).

Alfa tanecikleri, ilk defa Ernest Rutherford tarafından 1899 yılında uranyum ile yapılan deney sonucunda keşfedildi (Krane, 1988). Rutherford, 1909 yılında alfa taneciklerinin helyum atomunun çekirdeği olduğunu ve iki proton ve iki nötrondan oluştuğunu gösterdi. Alfa taneciği, elektrik yükü ve külesinden dolayı ortamda fazla ilerleyemez bu sebepten nüfuz etme derinliği düşüktür. Alfa taneciğinin, özellikle ağır çekirdeklere (kütle numarası 210'a eşit veya daha büyük olan çekirdekler) etkin olan Coulomb itmesi etkisi ile meydana gelmektedir. Çekirdek içindeki protonlar arasındaki Coulomb itme kuvveti, çekirdek büyüklüğü (kütle numarası) ile çekirdek bağlanma kuvvetine göre daha hızlı bir oranda artar. Bir alfa taneciğinin kendiliğinden yayınlanması,



ile gösterilebilir. Burada, X; başlangıçtaki çekirdeğin kimyasal simgesi, Y; nihai çekirdeğin kimyasal simgesi, A; kütle numarası ve Z; atom numarasıdır. Alfa bozunumunda, başlangıçtaki çekirdeğin Z ve N'si iki azalırken A'sı 4 azalmaktadır. Bu bozunum sürecinde nötron sayısı, proton sayısı, enerji, doğrusal ve açısal momentum korunur. Alfa bozunumu, günlük hayatımızda karşılaştığımız doğal radyasyonun oluşmasını katkıda bulunmaktadır. Örneğin, toprak, kayaç, su, yer kabuğu kökenli yapı malzemelerinin doğal olarak içerdiği radyoaktif uranyum, radyum ve toryum çekirdekleri genellikle alfa bozunumu yaparak yaşadığımız ortamda iyonlaştırıcı radyasyon oluşmasına sebep olmaktadır. Radyum (^{226}Ra) alfa bozunum yaparak aşağıda verilen tepkime ile renksiz, kokusuz ve tatsız ve kimyasal olarak tepkimeye girmeyen radyoaktif radon (^{222}Rn) gazını oluşturur.



^{226}Ra 'nın yarılanma süresi 1600 yıl, ^{222}Rn 'un yarılanma süresi 3,8 gün ve tepkime sonucunda yayınlanan α -taneciğinin kinetik enerjisi 4,8 MeV'dir (Krane, 1988). ^{222}Rn 'de alfa bozunumu yaparak kararsız polonyum (^{218}Po) çekirdeğine dönüşür.

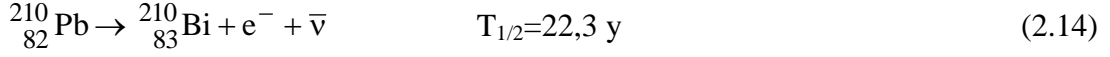


^{218}Po 'nın yarılanma süresi 3,05 dakika ve tepkime sonucunda yayınlanan α -taneciğinin kinetik enerjisi 6 MeV'dir.

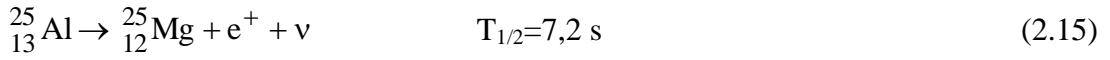
Beta tanecikleri, Henri Becquerel tarafından 1900 yılında keşfedildi (Krane, 1988). Beta bozunumunda, başlangıçtaki çekirdeğin Z ve N'si değişirken A'sı değişmemektedir. Beta bozunumunda, bir proton nötrona dönüşerek nötron sayısını, nötron protona dönüşerek proton sayısını artırabilir. Beta bozunumu aşağıda verildiği gibi üç farklı şekilde gerçekleşebilir:



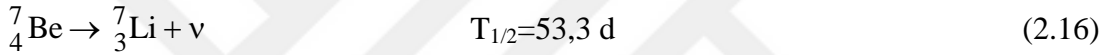
burada ν ve $\bar{\nu}$, elektrik olarak yüksüz olan nötrino ve anti-nötrinodur. 1)'de verilen bozunum süreci, negatif beta (β^-) bozunumu veya negatron bozunumu olarak isimlendirilir. β^- bozunumuna örnek olarak



tepkimesi verilebilir. 2)'de verilen bozunum süreci, pozitif beta (β^+) bozunumu veya pozitron bozunumu olarak isimlendirilir. β^+ bozunumuna örnek olarak



tepkimesi verilebilir. 3)'te verilen bozunum süreci, elektron yakalama (EY) bozunumu olarak isimlendirilir. EY bozunumuna örnek olarak



tepkimesi verilebilir.

Radyoaktif gama (γ) yayımı, optik veya X-ışını geçişleri gibi atomik radyasyon yayımına benzer bir süreçtir. Uyarılmış bir durundaki çekirdek, daha düşük (daha az uyarılmış) seviyeye veya taban (uyarılmamış) duruma nükleer durumlara arasındaki enerji farkına eşit bir enerjide gama fotonunu veya gama-ışınını veya gama radyasyonunu yayınlamak bozunuma uğrar. Gama-ışını yayımı, uyarılmış bağlı durumlara sahip olan kütle numarası 5 den büyük ($A>5$) olan bütün çekirdeklere gözlenir ve genellikle ürün çekirdeğin uyarılmış durumlarını oluşturan α ve β bozunumu sürecine eşlik eder. Örnek olarak (2.10) bağıntısında verilen alfa bozunumuna 186,21 keV enerjili gama-ışını eşlik eder. Yarılanma süreleri saat veya gün olan gama-ışını yayımları hariç gama-ışını yayımlarının yarılanma süreleri çok kısadır ve genellikle 10^{-9} s'de daha küçüktür. Yarılanma süreleri uzun olan geçişler, izomerik geçişler ve uzun ömürlü uyarılmış durumlar ise izomerik durumlar veya izomerler veya yarı kararlı durumlar olarak isimlendirilir (Krane, 1988). Bu sürecin bir alternatifi de iç dönüşüm (İD) olarak isimlendirilen bozunum sürecidir. Bu süreçte fazla enerji foton olarak yayınlanmaz ve gama fotonu, çekirdeğe en yakın olan iç yörüngedeki elektronla etkileşerek elektronun atomdan koparılmasına sebep olur. Bu durumda, atomun Z'si veya N'si değişmez ancak atom iyonlaşır.

2.3. Doğal Radyasyon Kaynakları

Canlıların yaşamları boyunca kaçınılmaz olarak maruz kaldıkları ve yaşadıkları bölgeye, yaşam kalitesine vb. faktörlere bağlı olarak değişebilen doğal iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, uzay ve yer kabuğu kökenli olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (UNSCEAR, 2000).

Dünya sürekli olarak uzaydan gelen yüksek enerjili tanecikler tarafından bombardımana maruz kalmaktadır. Atmosfer yüzeyine gelen bu galaktik kozmik ışınların %98'i nükleonik bileşenden ve geriye kalan %2'lik kısım ise elektronlardan oluşmaktadır. Bu nükleonik bileşen, birincil olarak protonlar (%88'i), alfa tanecikleri (%11'i) ve geriye kalanlar ise daha ağır çekirdeklerdir (UNSCEAR, 2000). Bu birincil kozmik tanecikler 10^8 eV- 10^{20} eV aralığında bir enerji spektrumuna sahiptir. Bu kozmik ışınlar veya tanecikleri veya radyasyon, atmosferi oluşturan atom ve moleküllerin çekirdekleri ile ardışık tepkimeler ile etkileşir ve şiddeti uçuş yüksekliği ile yer arasındaki atmosfer derinliğine bağlı olarak azalan kozmik ışınlanmaya katkıda bulunan ikincil ürünler oluşur (UNSCEAR, 2000). Bu kozmik ışın etkileşimleri aynı zamanda kozmojenik radyonüklitler olarak bilinen birçok radyoaktif çekirdeğin meydana gelmesini de sağlar. Kozmojenik ürünlerin oluşması, yüksekliğe bağlı olduğu gibi boylama da bağlıdır ve kozmik ışınların nüfuz etmesini dünyanın manyetik alan ile yavaşlatan 11-yıl güneş çevrimi ile de değişir. İnsan vücut metabolizmasında rol oynayan elementler olan trityum (^3H), karbon (^{14}C) ve sodyum (^{22}Na) hariç kozmojenik radyonüklitler, bireylerin maruz kaldığı radyasyon dozuna düşük seviyede katkıda bulunurlar. Bu radyonüklitler, ana olarak atmosferde ve hidrolojik sistemlerde izleyici element olarak belirginleşirler (UNSCEAR, 2000).

Yer kabuğu kökenli radyonüklitler, uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) ve aktinyum (^{235}U) doğal radyoaktif serilerine ait radyonüklitlerden ve potasyum (^{40}K), rubidyum (^{87}Rb), lantan (^{138}La), samaryum (^{147}Sm) ve lütesyum (^{176}Lu) gibi radyonüklitlerden oluşmaktadır. Aktinyum serisindeki radyonüklitlerin, ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm ve ^{176}Lu gibi diğer radyonüklitlerin, bireylerin maruz kaldıkları radyasyon dozuna olan katkıları düşük seviyededir (UNSCEAR, 2000). Uranyum, toryum ve aktinyum serisindeki

radyonüklitlerin fiziksel verileri, sırasıyla, Tablo 2.1, Tablo 2.2 ve Tablo 2.3 verilmektedir.

2.4. İyonlaştırıcı Radyasyon

Radyasyon, enerjinin tanecik ve/veya elektromanyetik dalga olarak uzayda yayılması veya taşınması olarak tarif edilebilir. Radyasyon etkileşmesine göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olmak üzere ikiye ayrılır. İyonlaştırıcı radyasyon, etkileştiği maddenin içerdiği atom veya molekülün dış yörüngesinden bir elektron koparmak için yeterli enerjiye sahip radyasyondur. Coulomb etkileşmesi yapan yüklü radyasyonlar doğrudan iyonlaştırıcı radyasyon olarak yükü olmayan ise dolaylı iyonlaştırıcı radyasyon olarak isimlendirilebilir.

Tablo 2.1. *Uranyum serisindeki radyonüklitler*

Element	İzotop	Yarılanma süresi	Bozunum süreci
Uranyum	²³⁸ U	4,47 x 10 ⁹ yıl	Alfa (% 100)
Toryum	²³⁴ Th	24,1 gün	Beta (% 100)
Protaktinyum	^{234m} Pa	1,17 dakika	Beta (%99,8) ve İD (%0,2)*
Uranyum	²³⁴ U	2,45 x 10 ⁵ yıl	Alfa (% 100)
Toryum	²³⁰ Th	7,54 x 10 ⁴ yıl	Alfa (% 100)
Radyum	²²⁶ Ra	1600 yıl	Alfa (% 100)
Radon	²²² Rn	3,82 gün	Alfa (% 100)
Polonyum	²¹⁸ Po	3,05 dakika	Alfa (%99,98) ve Beta (%0,02)
Kurşun	²¹⁴ Pb	26,8 dakika	Beta (% 100)
Bizmut	²¹⁴ Bi	19,9 dakika	Alfa (%0,02) ve Beta (%99,98)
Polonyum	²¹⁴ Po	164 x10 ⁻⁶ saniye	Alfa (% 100)
Kurşun	²¹⁰ Pb	22,3 yıl	Beta (% 100)
Bizmut	²¹⁰ Bi	5,013 gün	Beta (% 100)
Polonyum	²¹⁰ Po	138,4 gün	Alfa (% 100)
Kurşun	²⁰⁶ Pb	Kararlı	Kararlı

*İD: İç dönüşüm

Tablo 2.2. Toryum serisindeki radyonüklitler

Element	İzotop	Yarılanma süresi	Bozunum süreci
Toryum	²³² Th	1,4 x 10 ¹⁰ yıl	Alfa (%100)
Radyum	²²⁸ Ra	5,75 yıl	Beta (%100)
Aktinyum	²²⁸ Ac	6,15 saat	Beta (%100)
Toryum	²²⁸ Th	1,912 yıl	Alfa (%100)
Radyum	²²⁴ Ra	3,66 gün	Alfa (%100)
Radon	²²⁰ Rn	55,6 saniye	Alfa (%100)
Polonyum	²¹⁶ Po	0,145 saniye	Alfa (%100)
Kurşun	²¹² Pb	10,64 saat	Beta (%100)
Bizmut	²¹² Bi	60,55 dakika	Alfa (%36) ve Beta (%64)
Polonyum	²¹² Po	0,3 x10 ⁻⁶ saniye	Alfa (%100)
Talyum	²⁰⁸ Tl	3,053 dakika	Beta (%100)
Kurşun	²⁰⁸ Pb	Kararlı	Kararlı

Tablo 2.3. Aktinyum serisindeki radyonüklitler

Element	İzotop	Yarılanma süresi	Bozunum süreci
Uranyum	²³⁵ U	7,038 x 10 ⁸ yıl	Alfa (%100)
Toryum	²³¹ Th	25,52 saat	Beta (%100)
Protaktinyum	²³¹ Pa	32760 yıl	Alfa (%100)
Aktinyum	²²⁷ Ac	21,77 yıl	Alfa (%1,4) ve Beta (%98,6)
Toryum	²²⁷ Th	18,72 gün	Alfa (%100)
Fransiyum	²²³ Fr	21,8 dakika	Beta (%100)
Radyum	²²³ Ra	11,44 gün	Alfa (%100)
Radon	²¹⁹ Rn	3,96 saniye	Alfa (%100)
Polonyum	²¹⁵ Po	1,78 x10 ⁻³ saniye	Alfa (%100)
Kurşun	²¹¹ Pb	36,1 dakika	Beta (%100)
Bizmut	²¹¹ Bi	2,14 dakika	Alfa (%99,7) ve Beta (%0,3)
Talyum	²⁰⁷ Tl	4,77 dakika	Beta (%100)
Kurşun	²⁰⁷ Pb	Kararlı	Kararlı

Alfa, beta, proton, iyonize olmuş yüklü hızlandırılmış enerjik hâle getirilmiş atomlar, yükü olan doğrudan iyonlaştırıcı tanecik radyasyonuna örnek olarak verilebilir.

Elektromanyetik spektrumun yüksek frekans bölgesinde yer alan elektromanyetik dalga özelliğine sahip gama ve X-ışınları ile nötronlar yükü olmayan dolaylı iyonlaştırıcı radyasyona örnek olarak verilebilir.

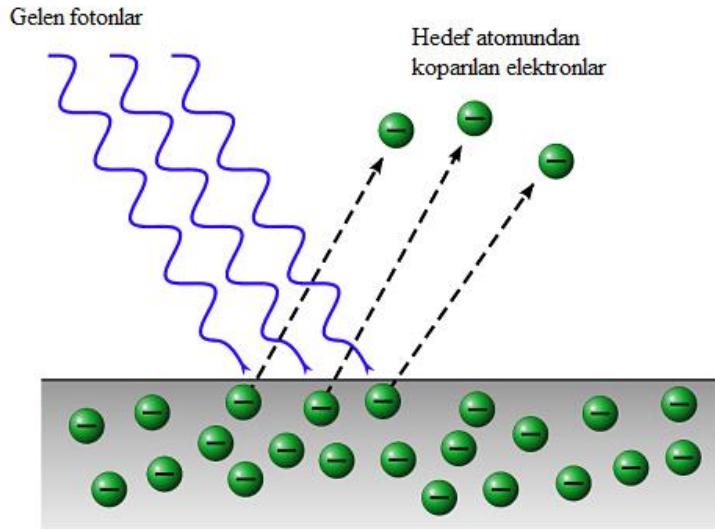
2.5. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Herhangi bir radyasyon dedektörünün çalışması, temel olarak algılanacak veya ölçülecek radyasyonun dedektör malzemesi ile etkileşmesine bağlıdır. Bu yüzden bir dedektörün vereceği tepkinin anlaşılması, radyasyonun dedektörle etkileştiği ve dedektör maddesi içinde enerji kaybettiği temel mekanizmaların iyi bilinmesini gerektirir. Alfa tanecikleri gibi ağır yüklü tanecikleri, esas olarak, pozitif yüklü olmaları sebebiyle hedef malzemenin atomlarının negatif yüklü orbital elektronları ile Coulomb kuvveti ile etkileşirler. Taneciklerin hedef malzemenin atom çekirdekleri ile etkileşmeleri (Rutherford saçılmasında veya alfa taneciğinin oluşturduğu çekirdek tepkimelerinde olduğu gibi) mümkün olmasına rağmen bu tür olaylar nadiren gerçekleşir ve normal olarak radyasyon dedektörlerinin tepkisinde önemli değildirler. Hâlbuki yüklü tanecik dedektörlerinde, dedektör tepkisi olarak elektronlar ile etkileşme esas alınmalıdır. Yüklü tanecikler herhangi bir ortama girer girmez aynı anda hemen birçok elektronla etkileşirler. Çekici Coulomb kuvveti etkisi altında meydana gelen bu etkileşmeler, elektronların bir kısmının bir veya daha üst elektronik seviyelere uyarılması veya bir kısmının da tamamen atomdan uzaklaştırılması dolayısıyla hedef atomlarının iyonlaşması ile sonuçlanır. Etkileşme sonucunda elektrona aktarılan enerji, olarak yüklü taneciğin kaybettiği ve hızının azalmasına sebep olan enerjidir. Bu enerji toplam enerjinin küçük bir kesri olduğundan asıl parçacık, bir soğurucu malzeme içinden geçişi esnasında bu tür birçok etkileşme ile enerjini kaybetmelidir. Verilen bir zamanda, parçacığın hızının sürekli olarak azalması ve malzeme içinde tam olarak durdurulabilmesi için birçok elektronla etkileşiyor olması gereklidir. Soğurucu malzeme içinde oluşan bu etkileşmelerin ürünleri, uyarılmış atomlar veya iyon çiftleridir. Her bir iyon çifti, bir serbest elektrondan ve elektronunun tam olarak uzaklaştırıldığı soğurucu malzemeyi oluşturan pozitif yüklü atomdan oluşur. İyon çiftleri doğal olarak yüksüz atom formunu oluşturmak için tekrar birleşmeye meyillidir. Ancak bazı dedektör tiplerinde

bu tekrar birleşme olayı baskındır ve bu çiftler, dedektör tepkisi olarak kullanılabilir.

Elektromanyetik spektrumun yüksek frekans aralığında yer alan gama (tipik olarak frekansı $> 10^{20}$ Hz) ve X-ışınlarının (frekans aralığı: 10^{16} Hz- 10^{20} Hz), madde ile birçok sayıda mümkün etkileşme mekanizmaları bilinmesine rağmen radyasyon ölçümlerinde fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu olarak bilinen üç etkileşme büyük bir rol oynamaktadır. Bu etkileşme süreçlerinde, gama ve X-ışını fotonlarının enerjisinin bir kısmı veya tamamı elektrona aktarılır.

Fotoelektrik soğurma sürecinde bir foton, tam olarak soğurulacağı soğurucu malzemeyi oluşturan atomlar ile etkileşmeye maruz kalır ve süreç sonucunda fotonun yerini soğurucu atomun dış yörüngesinden fırlatılan enerjik foto-elektron alır. Fotoelektrik etki şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Fotoelektrik etkinin şematik gösterimi

Yeterli enerjiye sahip gama ve X-ışınları için foto-elektron, en muhtemel atoma en zayıf şekilde bağlı K-kabuğundan fırlatılan elektrondur ve foto-elektronun enerjisi,

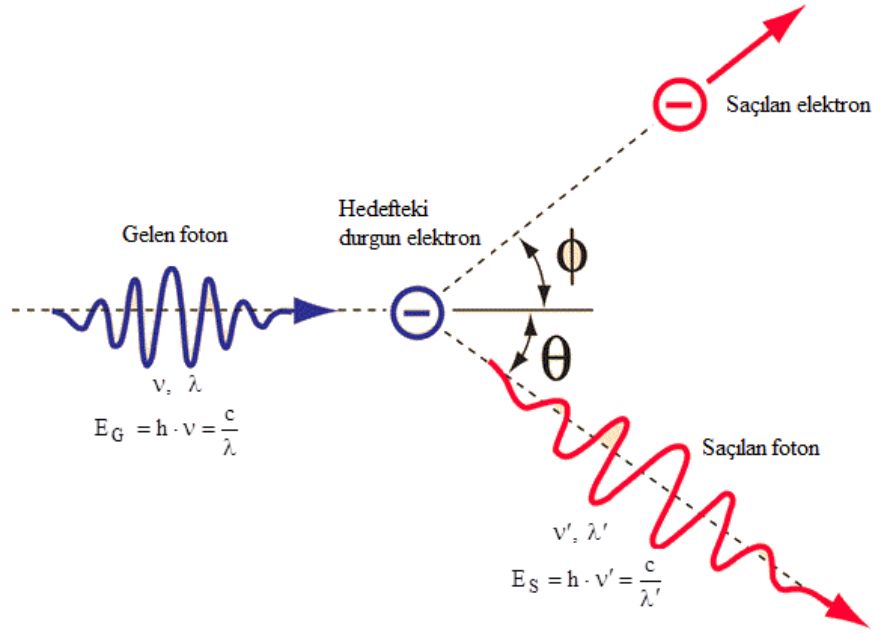
$$E_e = hv - E_b \quad (2.17)$$

ile verilir. Burada, E_b ; foto-elektronun bağlanma enerjisidir. Birkaç yüz keV'den daha büyük enerjili gama-ışınları için foto-elektronlar, orijinal foton enerjisinin büyük bir kısmına sahip olur. Foto-elektrona ilave olarak etkileşme aynı zamanda elektron tabakasında boşluk olan iyonlaşmış soğurucu atomu da meydana getirir. Bu elektron boşluğu, ortamdaki serbest bir elektronun yakalanması ve/veya atomunun elektron tabakalarındaki elektronların yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir şekilde doldurulur ve sonuç olarak bir veya daha fazla karakteristik X-ışınları yayınlanabilir. Birçok durumda, bu X-ışınları fotoelektrik soğurma ile en yakın bölgede tekrar soğurulmasına rağmen bunların hareketi ve radyasyon dedektörlerinde olası kaçışları dedektör tepkisini etkileyebilir. Bu durumların bazı bölümlerinde, bir Auger elektron yayınlanması, karakteristik X-ışının yerine alabilir. Fotoelektrik etki, bağıl olarak düşük enerjili gama ve X-ışınları için baskın bir etkileşme sürecidir. Süreç, aynı zamanda atom sayısı yüksek olan (yüksek Z 'li) soğurucular için de etkilidir. Bütün gama veya X-ışını enerjilerini (E_γ veya E_X) ve Z 'leri kapsayacak şekilde atom başına foto-elektrik soğurma ihtimali için geçerli tek bir analitik tanım olmamakla birlikte kaba bir yaklaşım,

$$\tau \cong \text{sabit} \times \frac{Z^n}{E_{\gamma,X}^{3,5}} \quad (2.18)$$

bağıntısı ile verilebilir (Knoll, 2000). Burada n ; ilgilenilen gama-ışını ile ilgili olarak 4-5 aralığında değişmektedir. Fotoelektrik soğurma ihtimalinin soğurucunun atom sayısına keskin bağımlılığı, yüksek Z 'li soğurucu malzemelerin gama ve X-ışını kaynaklarının zırhı için etkin bir şekilde tercih edilme sebebidir.

Compton saçılması etkileşme süreci, gelen gama veya X-ışını ile soğurucu malzemenin atomundaki bir elektron arasında gerçekleşir. Compton saçılması, bilinen bir radyoizotop kaynaktan yayınlanan tipik bir enerji değerindeki gama-ışını için genellikle etkin bir mekanizmadır. Compton saçılması şematik olarak Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Compton saçılmasında, gelen foton orijinal yönüne (geliş açısına) göre bir θ açısı ile saçılır. Foton enerjisinin bir kısmını başlangıçta hareketsiz olarak kabul edilen elektrona aktararak onun da bir ϕ açısı ile saçılmasını sağlar. Saçılmalar bütün açılarda mümkün olduğundan elektrona aktarılan enerji, sıfırdan gama-ışını enerjisinin önemli bir kısmına kadar değişebilir (Knoll, 2000).



Şekil 2.2. Compton saçılmasının şematik gösterimi

Enerji aktarımı ile ilgili ifade ve verilen herhangi bir etkileşim için saçılma açısı enerji ve momentum korunumu formülleri ile kolayca elde edilebilir. Saçılan fotonun enerjisi,

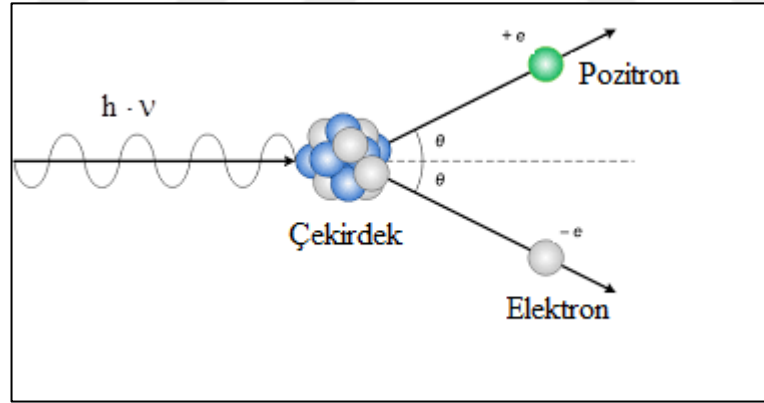
$$E_S = \frac{E_G}{1 + \frac{E_G}{m_0 \cdot c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.19)$$

bağıntısı ile verilir. Burada E_S ; saçılan fotonun enerjisi, ν' ; saçılan fotonun frekansı, h ; Planck sabiti ($E_S = h \cdot \nu'$), E_G ; gelen fotonun enerjisi, ν ; gelen fotonun frekansı ($E_G = h \cdot \nu$), m_0 ; elektronun durgun enerjisi (0,511 MeV) ve θ ; gelen fotonun geliş açısına göre saçılma açısıdır. Compton kayması ($\Delta\lambda$) olarak bilinen saçılan fotonun dalga boyu (λ_S) ile gelen fotonun dalga boyu (λ_G) arasındaki fark,

$$\lambda_S - \lambda_G = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 \cdot c} (1 - \cos \theta) \quad (2.20)$$

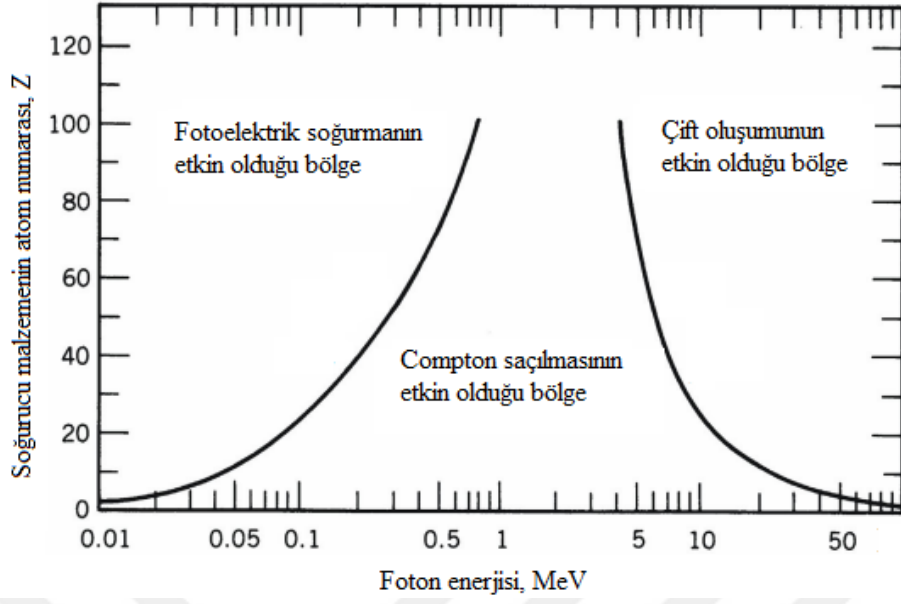
bağıntısı ile verilir. Soğurucu malzemenin içerdiği atom başına Compton saçılma ihtimali, hedef atomlarının elektron sayısına bağlıdır ve bu yüzden atom numarası Z ile doğru orantılı olarak artar.

Çift oluşumu, foton ile madde etkileşmesinde üçüncü önemli süreçtir. Gelen fotonun enerjisi bir elektronun durgun kütle enerjisi olan 0,511 MeV'den iki kat daha büyükse ($>1,02$ MeV), çift oluşumu sürecinin meydana gelmesi enerjik olarak mümkündür. Uygulamada, bu etkileşmenin olma ihtimali, foton enerjisi birkaç MeV'e yaklaşıncaya kadar çok düşüktür ve bu yüzden çift oluşumu baskın olarak yüksek enerjili fotonlar için etkindir (Knoll, 2000). Çift oluşumu, şematik olarak Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Bir çekirdeğin Coulomb alanında meydana gelmesi gereken etkileşme sürecinde, gama veya X-ışını fotonu, yerini bir elektron-pozitron çiftine bırakarak kaybolur. Çift oluşumu için gerekli olan 1,02 MeV enerjinin üzerinde bir enerjiye sahip fotonun sahip olduğu fazla enerjinin tamamı pozitron ve elektron tarafından paylaşılacak şekilde kinetik enerjiye dönüşür. Pozitron, soğurucu ortamda bir elektronla birleşerek yok olmak suretiyle yok olma radyasyonu olarak bilinen ve gama-ışını dedektörlerinde önemli rol oynayan her birinin enerjisi 0,511 MeV olan iki gama-ışınına dönüşür. Çekirdek başına çift oluşumu ihtimalini veren basit bir formül olmamakla birlikte ihtimalin büyüklüğü, soğurucu malzemenin atom sayısının karesi (Z^2) ile değişmektedir (Knoll, 2000).



Şekil 2.3. Çift oluşumunun şematik gösterimi

Yukarıda sözü edilen üç etkileşme sürecinin farklı soğurucu malzemeler için izafi önemi veya hangi enerji aralıklarında etkili olabildikleri Grafik 2.1'de verilmektedir.

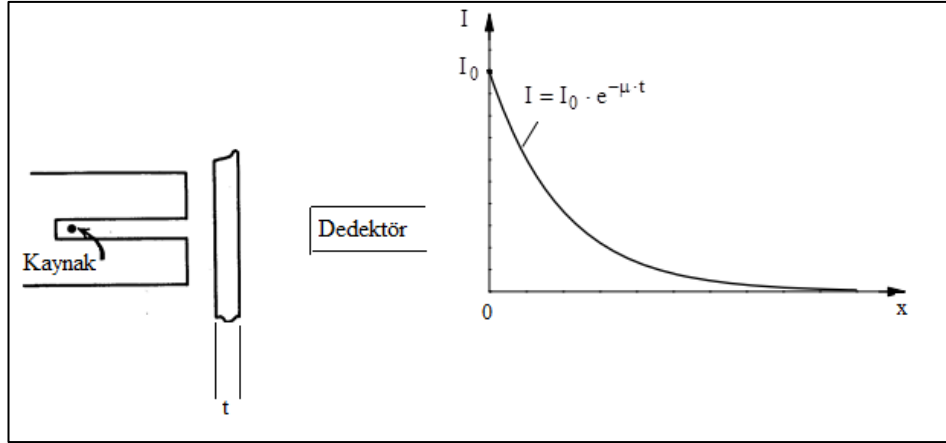


Grafik 2.1. Foton etkileşmesinin üç ana tipinin bağıl önemi (Knoll, 2000)

Grafik 2.1’de gösterilen sol taraftaki çizgi, fotoelektrik soğurma ile Compton saçılması ihtimallerinin, soğurucu malzemenin atom sayısına bağılı olarak eşit olduğu enerji değeridir. Sağ taraftaki çizgi ise, Compton saçılması ile çift oluşumu ihtimallerinin, soğurucu malzemenin atom sayısına bağılı olarak eşit olduğu enerji değeridir.

Compton saçılmasına ilave olarak saçılmanın diğer bir tipi de gama veya X-ışını fotonunun bağdaşık (uyumlu) olarak soğurucu malzemenin içerdiği atom elektronlarının tamamı ile etkileşmesidir. Etkileşme sonucunda herhangi bir elektron uyarılmasının veya iyonlaşmanın olmadığı bu süreç, Rayleigh saçılması veya bağdaşık (coherent) saçılma olarak bilinir. Bununla birlikte meydana gelme ihtimali, tipik olarak birkaç yüz keV düşük enerjili fotonlar için önem kazanan ve Z’si yüksek soğurucu malzemelerde belirgin olan bu saçılma sürecinde, fotonun yönü değişmektedir.

Dar demet hâlinde kolime edilmiş tek enerjili gama veya X-ışınlarının, Şekil 2.4’deki gibi t kalınlığında soğurucu malzemenin içinden geçtikten sonra dedektör üzerinde düştü kabul edildiğinde, gama veya X-ışınlarının şiddeti, yine Şekil 2.4’ün sağ tarafındaki grafikte gösterildiği üstel olarak zayıflar.



Şekil 2.4. Gama-ışını şiddetinin üstel zayıflatma eğrisi (Knoll, 2000)

Yukarıda sözü edilen etkileşme süreçlerinden her biri, soğurma veya saçılma yolu ile gama veya X-ışını fotonunu demetten uzaklaştırır ve bu durum, soğurucu kalınlık içinde alınan birim yol uzunluğu başına meydana gelen ihtimali ile karakterize edilebilir (Knoll, 2000). Bu ihtimallerin toplamı, basitçe gama veya X-ışını fotonunun demetten uzaklaştırıldığı birim yol uzunluğu başına ihtimaliyettir ve

$$\mu = \tau \text{ (fotoelektrik)} + \sigma \text{ (Compton)} + \kappa \text{ (çift oluşumu)} \quad (2.21)$$

bağıntısı ile verilir ve μ , doğrusal zayıflatma katsayısı olarak isimlendirilir. Burada τ ; fotoelektrik soğurma sürecinin, σ ; Compton saçılması sürecinin ve κ ; çift oluşum sürecinin olma ihtimalini gösterir. Bu yüzden geçen fotonların sayısının (I 'nin), başlangıçtaki (bir soğurucu olmadan) sayısına (I_0 'a) oranı,

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu \cdot t) \quad (2.22)$$

bağıntısı ile ifade edilir.

2.6. Radyasyon Doz Birimleri

Nükleer radyasyonun en yaygın özelliği, etkileştiği ortamdaki atomlardan elektron kopararak atomun iyonlaşmasını sağlama kapasitesidir. Hava içinden geçen gama ve X-ışını fotonları, havanın içerdiği atom ve moleküller ile fotoelektrik, Compton ve çift oluşumu süreci ile etkileşerek serbest elektronların oluşmasını sağlar. Bu ikinci

elektronlar iyonlaştırmayı oluştururlar. Kütlesi m olan havada oluşturulan iyonların toplam yükü Q ise ışınlama X,

$$X = \frac{Q}{m} \quad (2.23)$$

bağıntısı ile verilir ve uluslararası birim sisteminde birimi kilogram başına coulomb (C/kg) olarak ifade edilir (Krane, 1988). Önceki yıllarda bu birim yerine, normal şartlar altında (0 °C ve 760 mm basınçta) 1 cm³ (0,001293 g) havada, 1 elektrostatik yük birimi (eyb) (yaklaşık 2,08 x 10⁹ iyon çifti) oluşturan ışınlama olarak tarif edilen röntgen (R) birimi kullanılmaktaydı. 1 R, ışınlama (X) cinsinden,

$$1 R = \frac{1 \text{ eyb}}{0,001293 \text{ g}} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (2.24)$$

ile verilir. Gama veya X-ışınına maruz kalma, radyasyon doz ölçümünde önemli olduğundan, ışınlama hızının, noktasal bir radyasyon kaynağından itibaren bilinen bir mesafede hesaplanması daha makuldür. Bozunum başına gama veya X-ışını veriminin kesin olarak bilindiği bir radyoizotop kaynağın kullanıldığı kabul edildiğinde, bilinen bir mesafede, kaynağın aktivitesi başına ışınlanma aşağıda verilen şartlarda kolayca ifade edilebilir:

- a) Kaynak küresel geometrik özelliğe sahip olacak şekilde yeteri kadar küçükse (foton akısı, kaynağa olan uzaklık d'nin karesi ile ters orantılıdır (1/d²),
- b) Gama veya X-ışınlarının şiddeti, hava veya kaynak ile ölçme noktası arasında bulunabilecek diğer malzemeler tarafından zayıflatmaya uğratılmazsa ve
- c) Sadece kaynaktan ölçme noktasına doğrudan geçen gama veya X-ışınları, ışınlamaya katkı verirse ve etraftaki malzemeler tarafından saçılmaya uğratılan gama veya X-ışınlarının etkisi ihmal edilirse ışınlama hızı,

$$\dot{X} = \Gamma \cdot \frac{A}{d^2} \quad (2.25)$$

bağıntısı ile verilir (Knoll, 2000). Burada A; nokta kaynağın aktivitesi ve Γ ; belirli bir radyoizotop için ışınlama hız sabiti olarak tarif edilir ve örnek olarak ^{137}Cs için 3,3, ^{60}Co için 13,2, ^{57}Co için 0,9, ^{131}I için 2,2 ve ^{54}Mn için 4,7 olarak hesaplanmıştır.

Havadan başka diğer malzemeler iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında, bu malzemelerin enerji soğurma hızları havanınkinden farklı olacaktır. Bu yüzden iyonlaşma sebebiyle farklı malzemelerin soğurduğu enerjiyi tanımlamak için bir standart gerekmektedir. Bu nicelik, malzeme tarafından soğurulan doz (D) olarak isimlendirilir ve malzemenin birim kütlesi başına iyonlaştırıcı radyasyonunun sebep olduğu soğurulan enerjinin ölçüsünü verir. Yaygın olarak kullanılan soğurulan doz birimi, İngilizce “radiation absorbed dose” olarak verilen ifadenin baş harflerinin oluşturduğu ve bir gram kütle başına 100 erg değerini gösteren “rad” dır ($\text{rad}=100 \text{ erg/g}$). Böylece havada 1 R’lik ışınlama, 0,88 rad soğurulmuş doza eşittir ($1 \text{ R}=0,88 \text{ rad}$). Uluslararası birim sisteminde soğurulan doz değeri gray (Gy) dir ve bir kilogram kütle başına 1 J’luk enerji değerini gösterir ($1 \text{ Gy}=\text{J/kg}$). 1 Gy, 100 rad’a eşittir ($1 \text{ Gy}=100 \text{ rad}$). 1 C/kg’lık ışınlama, 33,8 J/kg’a eşittir ($1 \text{ X}=33,8 \text{ Gy}$).

Radyasyonun, canlı organizmalar üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, farklı ışınlama şartlarında birim kütle başına eşit miktarda enerji soğurulması aynı biyolojik etkiyi göstermez. İyonlaştırıcı radyasyonun oluşturduğu biyolojik hasar, radyasyonun sebep olduğu uyarma veya iyonlaşma etkisinde olan biyolojik moleküllerin kimyasal değişimi ile izlenebilir. Bu değişimlerin büyüklüğü ve kalıcılığı, doğrudan doğrusal enerji aktarımı olarak bilinen parçacığın aldığı yol boyunca enerji birikimin yerel hızı ile ilgilidir (Krane, 1988). Bu yüzden bireylerin radyasyondan korunması için standartlar tanımlamak için farklı tipteki iyonlaştırıcı radyasyonların bazı biyolojik etkilerinin ölçülmesi gereklidir. Belirli bir radyasyon dozunun, aynı biyolojik etkiye oluşturan X-ışınlarının dozuna oranı olarak bilinen bağıl biyolojik etkinlik (RBE) tanımlanmıştır. RBE’nin, bağıl olarak ölçülmesi zor olduğundan RBE’nin yerini, birim yol boyunca biriken enerjiye göre bir iyonlaştırıcı radyasyonun enerjisi ve tipi için hesaplanabilen kalite faktörü (KF) almıştır. Bazı iyonlaştırıcı radyasyon tipleri için KF değerleri Tablo 2.4’de verilmektedir. Böylece belirli bir radyasyonun bir biyolojik sistem üzerindeki etkisi, soğurulan doza (D) ve

radasyonun kalite faktörüne bağıdır. Bu niceliklerin çarpımı olan eşdeğer doz (ED),

$$ED = D \cdot KF \quad (2.26)$$

ile verilir. Burada D, rad olarak verildiğinde, eşdeğer dozun birimi rem dir (İngilizce “roentgen equivalent man” teriminin baş harfleri). D, Gy olarak verildiğinde, eşdeğer dozun birimi sievert (Sv) dir ve 1 Sv=100 rem dir.

Tablo 2.6. Farklı radyasyonlar için KF değerleri

Radyasyonun tipi	KF
Beta, gama ve X-ışınları	1
Düşük enerjili (~ keV) proton ve nötronlar	2-5
Enerjik (~ MeV) proton ve nötronlar	5-10
Alfa ışınları	20

2.7. Radyasyonun Etkileri

İyonlaştırıcı radyasyonun bir canlı üzerinde biyolojik etki yapabilmesi için radyasyon enerjisinin canlıyı oluşturan hücreler ve dokular tarafından soğurulması ve bu enerjinin dokularda dağılması gerekmektedir. Radyasyon enerjisinin soğurulması ile biyolojik etkinin ortaya çıkması arasında geçen süre içinde birbirini izleyen dört kademeli olay meydana gelir. Birinci kademede, radyasyonu soğuran maddenin moleküllerinde uyarılma ve/veya iyonlaşma olayları meydana gelir. Bu ilk kademede etkileşmeler sonucu ortaya çıkan ürünler, çok kısa süre içinde (10^{-10} s) ikincil tepkimelerin oluşmasına sebep olurlar ve ikincil tepkime ürünleri ortaya çıkar. İkincil tepkimeler radyasyon etkisinin ikinci kademesini, fiziko-kimyasal kademe oluşturur. Üçüncü kademede olan kimyasal kademede, serbest atom veya radikaller hem birbirleriyle hem de ortamdaki moleküller ile tepkimeye girerler. Bir organizmada radyasyon etkisi ile oluşan moleküler değişiklikler ise biyolojik kademe olarak isimlendirilen dördüncü kademeyi başlatır (Atıcı, 2016). Bu kademeler sonucunda, kromozomda meydana gelen hasarlar bir takım biyolojik etkilerin oluşmasına yol açarlar. Genlerde hasar meydana gelirse, kanser oluşabilir. Bu,

hücrenin üreme hızını kontrol etme yeteneğini kaybettiği anlamına gelir. Üreme organlarında genler hasar görürse, mutasyon meydana gelebilir. Böyle bir mutasyon çocuklara geçirilebilir. Kanserler ve kalıtsal mutasyonlar, ihtimali olan (stokastik) etkiler olarak adlandırılır. Organın soğurduğu radyasyon dozu yüksek de olsa düşük de olsa kanser veya mutasyon aynı davranır ve bu değişimlerin tamamı, bir kanser oluşumu veya bir mutasyon meydana gelme ihtimalidir. Bununla birlikte, bazı kanser türleri, belirli bir radyasyon dozu için diğerlerinden daha büyük bir hız artışı gösteriyor. Kanser riskleri, maruz kalma ve erişilen yaşta yaşa göre değişmekte ve çocuklar olarak maruz kalanlar için riskler daha yüksektir. Belirleyici etkilere yönelik eşişinin altındaki radyasyon dozları, hücrenel hasarlara sebep olabilir. Ancak bu durum, zorunlu olarak bireysel zarar vermeye götürmez ve etkiler doğası gereği ihtimali veya rastgeledir. İstatistiksel olarak önemli risk, 0-100 mSv aralığında ve 50-100 mSv'e kadar düşük dozlar için yararlı risk tahminleri bulunmaktadır. Her yaş ve kanser tipleri için ortalama risk faktörü, yaklaşık mSv başına 10.000'de 1'dir. Kalıtsal bir mutasyonu oluşturma riski, mSv başına 100.000'de yaklaşık 2 olarak tahmin edilmektedir. Hücre hasarının doğası gereği, aynı miktarda radyasyon dozuna maruz kalan herkes kanser hastası olmayabilir. Bu çalışmalar radyasyonla oluşturulan etkilerin kanıtını gösterirken, epidemiyolojik araştırmaların sonucu, birkaç on mSv'in altındaki dozlarda istatistiksel önemi olan etkilerin olduğunu kesin olarak ortaya koyamamıştır. Bununla birlikte, ihtimali olan etkiler için herhangi bir eşik gösterilmediği ve sağlık standartlarının oluşturulmasında temkinli olması için, yüksek dozlarda gözlemlenen risk ve doz arasındaki orantılığın, tüm düşük doz seviyeleri boyunca sifira kadar devam ettiği varsayılmaktadır. Yüksek dozda iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmanın zararlı etkiler doğurabileceği bilen bir gerçektir. Ancak düşük dozlardaki etkiler hakkındaki bilimsel belirsizlik devam etmektedir. Bireylerin özellikle radyasyon çalışanlarının rutin olarak düşük seviyedeki radyasyon dozuna maruz kalmaları durumunda, sağlık etkilerinin epidemiyolojik delilleri çok az veya hiç yok gibidir. Radyasyondan korunma standartları, radyasyona maruz kalmayı tamamen yok etmenin mümkün olmadığı gerçeğini kabul eder ancak gerekli olmayan radyasyon maruziyetini ortadan kaldırmaya ve radyasyon maruziyet dozunu, küçük doz aralığında tutmaya yönelik bir kontrol sisteminin temin edilmesini zorunlu koşar. Tüm vücut aşırı radyasyon dozuna (10 Sv veya üzerinde) kısa süre içinde maruz kaldığında, iç organlar ve

vücutun dokular öyle zarar görür ki hayati sistemlerinin işlevleri sona erer ve ölüm günler veya haftalar içinde gerçekleşir. Çok yüksek dozlara (1 Sv-10 Sv aralığında) kısa süre içinde maruz kaldığında, hayati organların ve sistemlerin işlevlerini yerine getiremeyecek şekilde çok sayıda hücreyi ölür. Mide bulantısı, kusma, cilt ve derin doku yanıkları ve vücudun enfeksiyonla mücadele kabiliyetinin bozulması gibi ani görülen (akut) sağlık etkileri saatler, günler veya haftalar sonrasında ortaya çıkabilir. Zararın büyüklüğü radyasyon dozu arttıkça artar. Bu etkilere, belirli (deterministik) etkiler denir ve eşik değerlerin altındaki radyasyon dozlarında gözlenmez. Radyasyon dozları, eşik değerlerin altındaki seviyelere sınırlandırılarak belirli etkiler tamamen engellenebilir.



3. MALZEME VE ÖLÇME YÖNTEMİ

Yaşamlarının büyük bir kısmını konut, okul ve işyeri gibi kapalı ortamlarda geçiren bireylerin yapı malzemelerinin içerdiği radyonüklitlerden yayınlanan gama-ışını gibi iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmaları sebebiyle aldıkları yıllık etkin radyasyon dozunun kesin bir şekilde değerlendirilebilmesi için yapı malzemesi örneklerindeki doğal radyoaktivite düzeyinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Kastamonu İl merkezindeki konut, okul ve işyeri inşaatında yaygın olarak kullanılan bazı yapı malzemesi örneklerinin içerdiği ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyonüklitlerin aktivite derişimleri, gama-ışını spektrometrik yöntem ile belirlenmiştir. Tezin bu kısmında, yapı malzemesi örneklerinin toplanması, aktivite ölçümü için hazırlanması ve ölçme yöntemlerine ilişkin bilgi verildi.

3.1. Örneklerin Toplanması

Batı Karadeniz bölgesinde $41^{\circ} 21'$ kuzey enlemi ile $33^{\circ} 46'$ doğu boylamları arasında yer alan Kastamonu İlinin yüzölçümü $13.108,1 \text{ km}^2$ ve rakımı 775 m dir. Kastamonu İlinin 2016 sayımlarına göre merkez nüfusu 146.103 olmak üzere toplam nüfusu 376.945 ve kilometrekareye düşen insan sayısı 29 dur. Son yıllarda ülkemizin tamamında olduğu gibi Kastamonu İlinde de inşaat sektöründe kayda değer gelişmeler olmakta ve konut inşaatları artan bir hızda devam etmektedir. Bu tez kapsamında, Kastamonu'da yaygın olarak kullanılan yapısal ve kaplama malzemelerinden oluşan 30 adet yapı malzemesi örneği, devam eden inşaat alanlarından ve bu tür malzemelerin satıldığı marketlerden toplandı (Tablo 3.1). Tablo 3.1'den de görülebileceği gibi 30 adet farklı örneği, 9 adet yapısal malzeme ve 21 adet kaplama malzeme örneği oluşturmaktadır.

3.2. Örneklerin Radyoaktivite Ölçme İşlemi İçin Hazırlanması

Toplanan örnekler Kastamonu Meslek Yüksekokulu Laboratuvarına taşınarak kodlandı ve kurutulmaya bırakıldı. Daha sonra çimento, alçı, vb. toz hâlinde olamayan granit, mermer ve fayans örnekler, radyoaktivite ölçümünde kullanılan HPGe dedektörünün verim kalibrasyonu için kullanılan standart kaynağa benzer

geometriye sahip olabilmesi öğütücüden geçirilerek toz hâline getirildi (Fotoğraf 3.1). Örnekler, 105°C'de etüvde 15-20 saat bekletilerek kurutuldu, standart kalibrasyon kaynakları ile aynı boyuta sahip 1 L hacmindeki Marinelli kaplarına aktarıldı ve net kütlelerini belirlemek için tartıldı (Fotoğraf 3.1). Tartım işleminden sonra ^{226}Ra ve ürün çekirdeği olan ^{222}Rn arasındaki kalıcı dengeyi sağlamak amacıyla örneklerin içinde bulunduğu Marinelli kaplar sızdırmaz bir şekilde kapatılarak en az bir ay bekletildi (Fotoğraf 3.1).

Tablo 3.1. İncelenen yapı malzemesi örnekleri

Örnek kodu	Yapı malzemesi	Türü
B1	Briket	Yapısal malzeme
B2	Briket	
KUM1	Kum	
KUM2	Kum	
TUĞ	Tuğla	
Ç1	Çimento	
Ç2	Çimento	
BÇ	Beyaz Çimento	
GB	Gaz Beton	
G	Granit	
M1	Mermer	
M2	Mermer	
A1	Alçı	
A2	Alçı	
FAY1	Fayans	
FAY2	Fayans	
SER	Seramik	
SA1	Saten alçı	
SA2	Saten alçı	
S1	Sıva	
S2	Sıva	
S3	Sıva	
KİR	Kireç	
KA1	Kalekim	
KA2	Kalekim Beyaz	
KA3	Kalekim	
KA4	Kalekim	
K1	Kartonpiyer	
K2	Kartonpiyer	
SD	Silikon Derz	

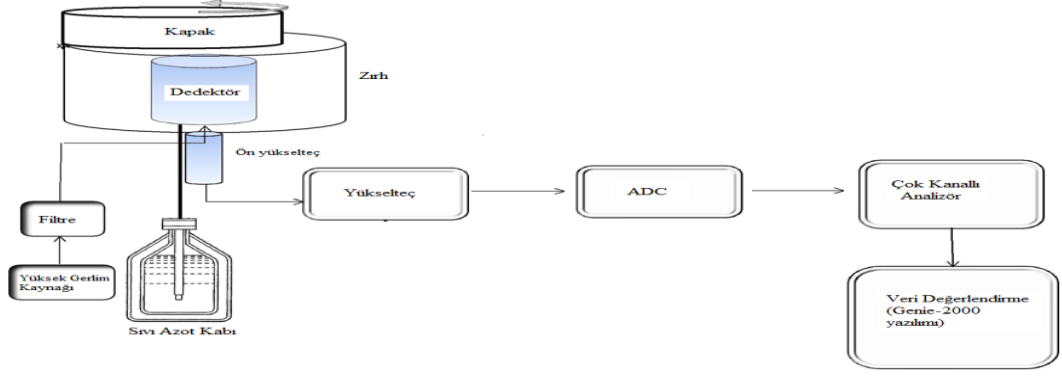


Fotoğraf 3.1. Ölçme işlemine hazırlama süreci

3.3. Radyoaktivite Ölçme Yöntemi

Yapı malzemelerinin içerdiği doğal radyoaktivite, doğrudan, tahribatsız, hızlı, güvenilir ve bir veya birden fazla gama-ışını yayınlayan radyonüklitleri aynı anda ölçebilen gama-ışını spektrometrik yöntem (GSY) kullanılarak ölçüldü. GSY, şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilen dedektör, dedektör zırhı, yüksek gerilim kaynağı, ön yükselteç, yükselteç, analog-sayısal dönüştürücü (ADC), çok kanallı analizör veya bilgisayar ve yazıcıdan oluşan bir gama-ışını spektrometresini esas almaktadır (Atıcı, 2016). Ancak son yıllarda yapılan gama-ışını spektrometrelerinde, yükselteç ve ADC’nin yerine sayısal sinyal işleme (DSP, digital signal processing) elektroniği kullanılmaktadır. Bu sistemin fonksiyonu, elektrik sinyal darbelerini oluşturan elektronları toplamak, bu darbeleri işlemek ve yüksekliğe veya enerjiye göre sıralamaktır. Gama-ışını spektrometresinde, aşağıda verilen aşamalardan sonra gama-ışınlarının foto-piklere dönüşerek bir gama-ışını spektrumu oluşturur:

1. Aşama: Gama-ışını fotonu dedektör kristali ile etkileşir ve elektronlar oluşur,
2. Aşama: Oluşan elektronlar uygulanan geri besleme gerilimi ile kristalden uzaklaştırılır,
3. Aşama: Elektronun akımı, sinyal darbesine dönüştürülür,
4. Aşama: Sinyal darbesinin büyüklüğü (şiddeti), ön yükselteç ile artırılır,
5. Aşama: Sinyal darbe şiddeti yükselteçte daha da yükseltilir ve şekillenir,
6. Aşama: Sinyal darbeleri, ADC ile sayısal değere dönüştürülür,
7. Aşama: Sayısal değerler çok kanallı analizöre veya bilgisayar ortamına gönderilir,
8. Aşama: Analizör veya bilgisayarda, sayısal değerlerin, kanal numarasına veya enerjiye göre histogram oluşturulur ve böylece gama-ışını spektrumu elde edilir.



Şekil 3.1. Gama-ışını spektrometre diyagramı (Abbasi, 2013).

Gama-ışınlarının etkileşerek elektronları ürettiği ortam olarak bilinen dedektörler, gama-ışını spektrometresinin kalbi durumundadır. Gama-ışını spektrometresinde, NaI(Tl), CsI(Tl), Li (Eu), BGO, ZnS(Ag), CaF₂(Eu) vb. inorganik sintilasyon dedektörleri veya yarı iletken dedektörler kullanılmaktadır. Bununla birlikte dünya genelinde 200.000'den fazla gama-ışını spektrometresinin büyük çoğunluğunda NaI(Tl) veya yüksek saflıktaki germanyum (HPGe) dedektörü kullanılmaktadır (Reguigui, 2006). Bu iki dedektörün birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Örnek olarak NaI(Tl) dedektörlerinin algılama (dedeksiyon) verimi yüksek ancak çözme (ayırma) gücü zayıf ve HPGe dedektörünün çözme gücü yüksek ancak algılama veriminin düşüktür (Knoll, 2000).

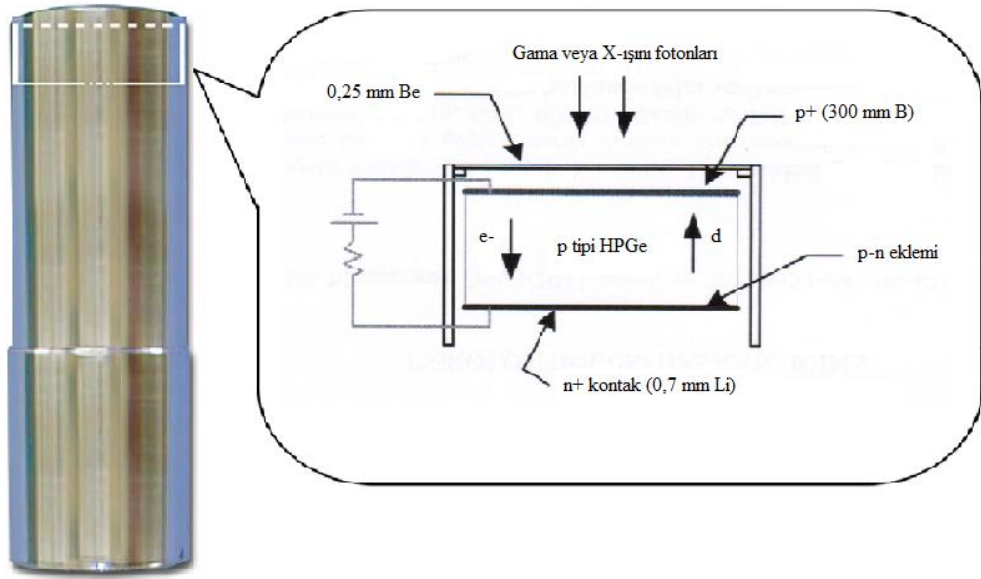
HPGe dedektörlerinin performansı, uzun süreden beri denenmiş ve uluslararası standartlar ile onaylanmıştır (Reguigui, 2006). Özellikleri, Tablo 3.2'de özetlenen germanyum detektörleri, farklı boyutlarda düzlemsel, silindirik veya eş eksenli olmak üzere farklı geometrilerde üretilmektedir. Konfigürasyonu (düzlemsel p-tipi bir HPGe dedektörü için) Şekil 3.2'de verilen germanyum dedektörleri, gama veya X-ışını gibi iyonlaştırıcı radyasyona duyarlı I (intrinsic) bölgesi olmak üzere P-I-N yapısına sahip yarı iletken diyotlardır. Ters beslemede, elektrik alanı boşaltım (depleted) bölgesine kadar etki alanı oluşturur. Gelen gama-ışını fotonu, detektörün boşaltım hacmindeki malzeme ile etkileştiğinde, yük taşıyıcılar (deşik ve elektronlar) üretilir ve elektrik alanı ile P ve N elektrotlarına doğru süpürülür. Soğurulan enerji ile orantılı olan bu yük, yüke duyarlı bir ön yükselteç ile bir gerilim darbesine dönüştürülür. Gama fotonlarının algılanması ve ölçülmesine yönelik olarak uygun çözünürlük ve algılama verimi, bir HPGe dedektörünün, 4000 V'a kadar bir geri

besleme geriliminde çalıştırılması ve 77 K sıcaklıktaki sıvı azot sıcaklığında tutulması ile temin edilmektedir. Sıvı azotun kullanılması aynı zamanda ısı uyarılma ile sonuçlanabilecek elektronik gürültüyü en aza indirgeyebilir. Dedektör çalıştırılmadığı durumlarda, oda sıcaklığında muhafaza edilebilir.

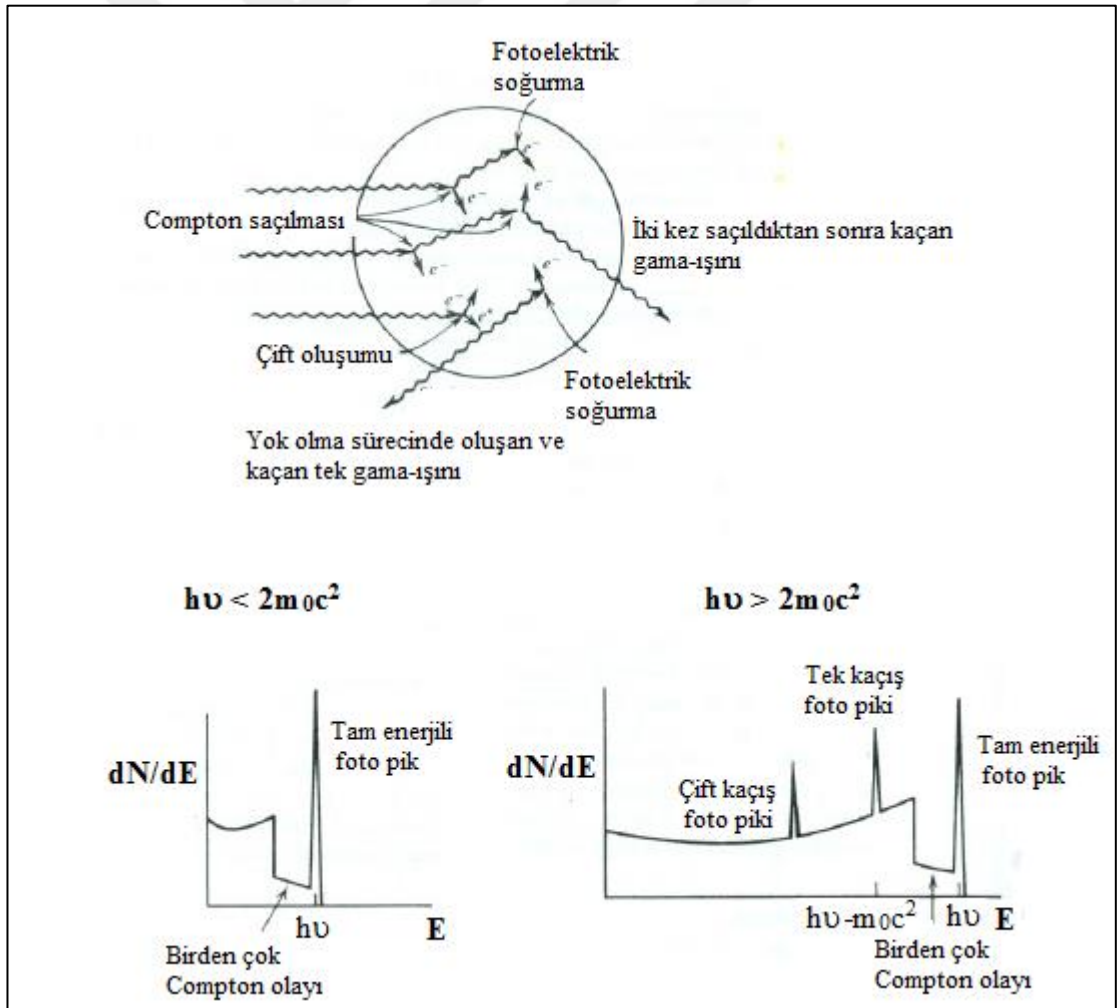
Gama-ışınının algılanması ve ölçülmesi, dedektör malzemesi ile etkileşme sürecine dayanır. Dedektörün boşaltım bölgesinde oluşan yük taşıyıcılar, foton ile dedektör malzemesi arasındaki fotoelektrik, Compton saçılması ve çift oluşumu süreci sonucunda oluşur. Bu etkileşme süreçleri ve süreç sonucunda meydana gelen foto piklerin oluşturduğu gama-ışını spektrum, Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

Tablo 3.2. *Germanyumun kristalinin özellikleri (Knoll, 2000; Atıcı, 2016)*

Atom numarası	32
Kütle numarası	72,6
Yoğunluğu, g/cm ³ (300 K'de)	5,32
Atom numarası/cm ³	4,41 x 10 ²²
Dielektrik sabiti	16
Yasaklı enerji bölgesi, eV (300 K'de)	0,665
Yasaklı enerji bölgesi, eV (0 K'de)	0,746
Taşıyıcı yoğunluğu (öz), cm ³ (300 K'de)	2,4 x 10 ¹³
Direnç (öz), Ω .cm (300 K'de)	47
Elektron mobilitesi cm ² /V.s (300 K'de)	3900
Deşik (hole) mobilitesi cm ² /V.s (300 K'de)	1900
Elektron-deşik başına enerji, eV (77 K'de)	2,96
Fano faktör	0,129



Şekil 3.2. Düzlemsel geometrili p-tipi HPGe dedektörü (Reguigui, 2006)



Şekil 3.3. Etkileşme süreçleri ve foto-pik oluşumu (Knoll, 2000)

Bir dedektör sisteminin duyarlılığı, doğrudan dedektörün verimi ile orantılıdır. Verim, bir kaynaktan yayınlanan belli sayıdaki gama-ışınlarından kaç tanesinden elektrik darbesi meydana geldiğinin bir ölçüsüdür. Dolayısıyla verim, bir radyoaktif kaynaktan yayınlanan bütün gama-ışını fotonlarının dedektörde bir olay oluşturma kesridir ve verim (ϵ),

$$N = \epsilon \cdot A \quad (3.1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, A; bir kaynağın aktivitesi ve N; dedektörde meydana gelen olay sayısıdır. Bir HPGe dedektörü için geçerli olan dört farklı verim tarifi aşağıda verilmektedir:

a) Mutlak verim: Dedektörün oluşturduğu olay sayısının, herhangi bir radyoaktif kaynaktan bütün yönlerde yayınlanan gama-ışını sayısına oranıdır.

b) Kristal özgün (intrinsic) verimi: Dedektörün oluşturduğu darbe sayısının, dedektör kristaline çarpan gama-ışını sayısına oranıdır.

c) Bağlı (relative) verim: HPGe dedektörlerinin tam enerjili foto pik veriminin, genelde, 7,62 cm x 7,62 cm ebadındaki NaI (Tl) sintilasyon dedektörüne 25 cm'lik mesafede bulunan bir ^{60}Co kaynağından yayınlanan 1,33 MeV enerjili gama-ışınının tam enerjili foto pik verimine göre belirlenmesidir.

d) Tam enerjili foto pik verimi: Gama-ışınına ilişkin bir darbe veriminden ziyade sadece tam enerjili darbeler için oluşan verimdir. Bir dedektörün foto pik verimi, dedektör ile etkileşen gama-ışını fotonunun enerjisine bağlıdır.

Bir dedektörün çözünürlüğü (ayırma gücü), belirli bir enerjide tek bir enerji pikinin yarı yüksekliğindeki tam genişliğinin (YYTG) ölçüsüdür. HPGe dedektörleri için keV ve NaI(Tl) dedektörleri için ise ilgili enerjinin yüzdesi cinsinden verilir (Reguigui, 2006).

Compton, çift oluşumu ve nihai olarak fotoelektrik süreci sonucunda soğurulan gama-ışını fotonlarının oluşturduğu elektrik darbeleri, çok kanallı analizörde veya bilgisayarda darbe yüksekliklerine karşılık gelen kanallarda toplanmaktadır. Enerji

kalibrasyonu, kanal numarasına karşılık gelen enerji değerinin bilinmesi amacıyla gama-ışını enerjileri bilinen standart kaynaklar kullanılarak yapılmaktadır. Standart kaynak, spektrometrede belli bir süre sayılarak ilgili gama-ışını foto-pik(ler)i elde edilir ve bu foto-pik(ler)in orta noktasına karşılık gelen kanal numarası tespit edilerek kaydedilir. Bu veriler, bir birinci (gerektiğinde ikinci veya üçüncü) dereceden bir polinoma fit edilerek kanal sayısı ile gama-ışını enerjisi arasındaki ilişki bulunur.

Tam enerjili foto-pik verim kalibrasyonu, kaynak-dedektör uzaklığına, radyoaktif standart kaynağın geometrisine bağlıdır. Bir dedektörün tam enerjili foto-pik verim kalibrasyonu, nükleer verileri (yarılanma süreleri, aktiviteyi, gama-ışını yayınlanma ihtimalleri) bilinen standart veya referans radyoaktif kaynaklar kullanılarak istenen enerji aralığında, gama-ışını enerjilerinin bir fonksiyonu olarak doğrudan deneysel ölçmeler sonucunda belirlenir. Verim kalibrasyonu amacıyla nokta, ampul, çeşitli hacimlerdeki Marinelli kabı gibi farklı geometrilerde tek enerjili veya çoklu enerjili gama-ışını yayınlayan katı veya sıvı radyoaktif standart kaynaklar kullanılarak aşağıda verilen bağıntı ile belirlenir (Demir, 2015).

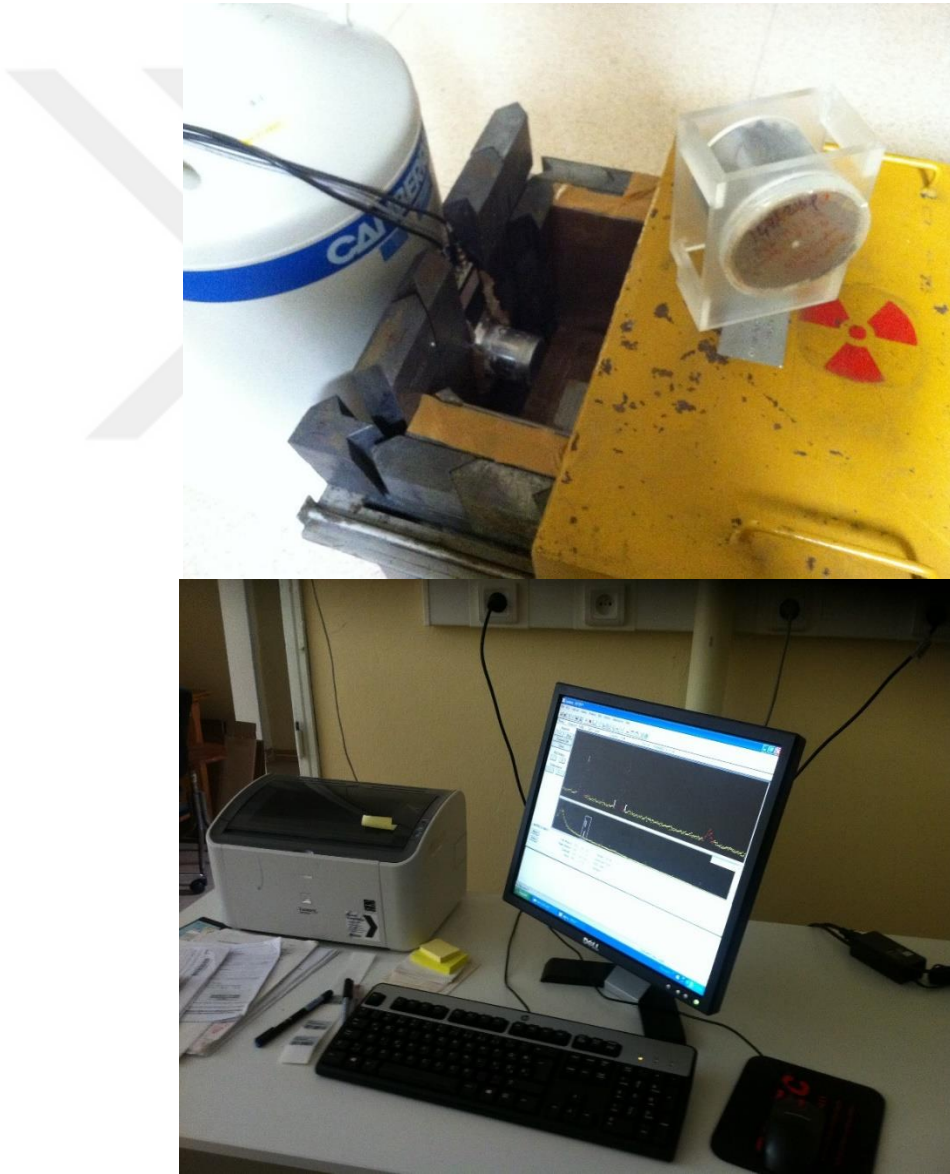
$$\varepsilon = \frac{NA}{P_{\gamma} \cdot t \cdot A \cdot D} \quad (3.2)$$

Burada, NA; ilgilenilen gama-ışını foto-pikine ait net alan (sayım), P_{γ} ; ilgili gama-ışınının yayınlanma ihtimali, t; sayım süresi (s), A; standart kaynağın aktivitesi (Bq) ve D; $e^{-\lambda t_d}$ ile verilen düzeltme faktörüdür ve yarılanma süreleri uzun olan radyonüklitler için ihmal edilebilir. Burada λ : Bozunum sabiti ($\lambda=0,693/T_{1/2}$), $T_{1/2}$: Yarılanma süresi ve t_d : Standart kaynağın referans tarihinden ölçme işlemi için kullanıldığı tarihe kadar geçen süredir.

Tez kapsamında, yapı malzemesi örneklerinin radyoaktivite ölçümü, özellikleri Tablo 3.3'te verilen yatay geometri ve 50 L hacminde vakumlu bir sıvı azot kabına monte edilmiş eş eksenli bir p-tipi HPGe dedektörü, analizör, DSA-1000 ve Genie-2000 gama-ışını spektroskopisi yazılımının yüklü olduğu bilgisayar ve dedektör, zırhından oluşan ve Fotoğraf 3.2'de gösterilen gama-ışını spektrometresi kullanıldı.

Tablo 3.3. HPGe dedektörünün özellikleri (Demir, 2015; Atıcı, 2016)

Dedektör modeli	Canberra GX3018
Bağıl verimi	% 30
Enerji ayırma gücü (çözünürlük)	1,8 keV (^{60}Co 'ın 1333 keV enerjili foto-pikin YYTG değeri)
Pik/Compton oranı	60:1
Dedektör geometrisi ve kristal tipi	Kapalı uçlu, eş eksenli ve p-tipi HPGe
Çapı ve yüksekliği	62,5 mm
Pencereden uzaklık	5 mm
Çalışma gerilimi	+2500 V dc
Kriyostat ve azot kabı hacmi	Yatay geometrili ve 50 L



Fotoğraf 3.2. Radyoaktivite ölçümü için kullanılan gama-ışını spektrometresi

3.4. Radon Aktivite Derişimini ve Radon Salım Hızını Ölçme Yöntemi

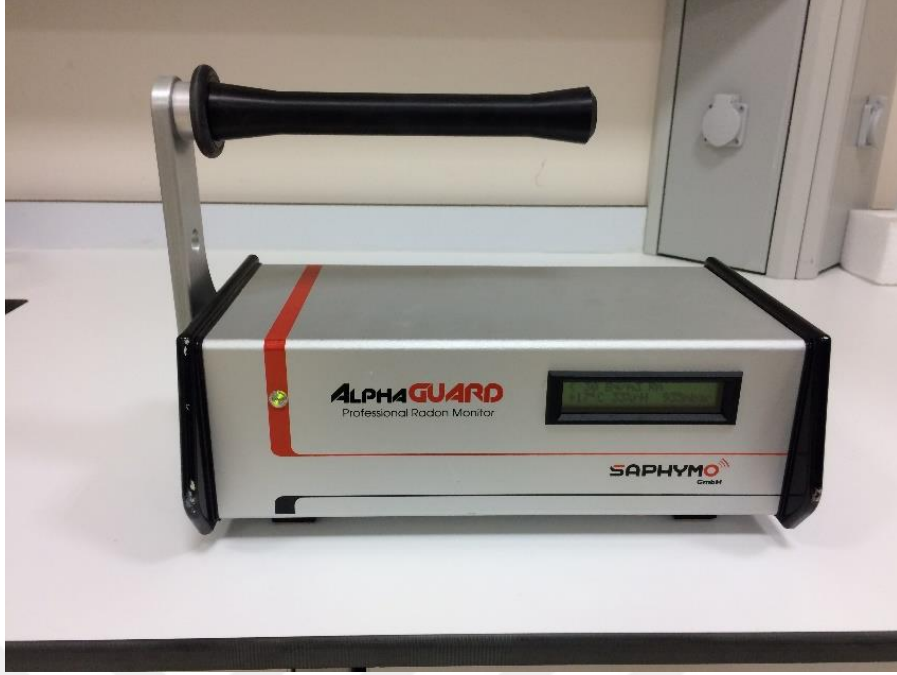
Radon veya radon salım hızı ölçümü, doğrudan radon veya dolaylı olarak radon ve bozunum ürünleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Radyoaktif bozunum sürecinde alfa radyasyonu yayınlayan radon ve bozunum ürünleri (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb ve ^{210}Bi), aynı zamanda beta bozunumu yaparak beta radyasyonu ve bu bozunuma eşlik eden gama-ışını da yayınlamaları. Dolayısıyla radon, alfa, beta veya gama-ışını ölçümleri yapılarak ölçülebilmektedir. Radon ölçümü için pasif ve aktif olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Pasif ölçme yönteminde, CR-39, LR-115 vb. katı-hal iz dedektörleri, alfa kart, kömür aktifli sıvı sintilasyon dedektörleri, termoluminesans dedektörler, katı-hal elektronik dedektörler, iyon odaları ve elektrometreler gibi elektrik enerjisine ihtiyaç duymayan cihazlar kullanılmaktadır. Pasif cihazlar, kapalı ortamda uygun bir yere yerleştirilerek uzun süreyle radona maruz bırakılırlar. Aktif yöntemde, sürekli radon izleme ve sürekli çalışma seviyesi izleme gibi elektrik güç kaynağına ve içine gazın pompalanmasını sağlayan düzeneğe ihtiyaç duyan cihazlar kullanılmaktadır.

Tez kapsamında, bazı yapı malzemesinin radon derişimi ve radon salım hızları (yüzey ve kütle), sürekli aktif AlphaGUARD PQ2000 PRO radon cihazı kullanarak ölçüldü. Teknik özellikleri Tablo 3.4’de verilen AlphaGUARD PQ2000, silindirik iyonlaşma odasına sahip, taşınabilir, hava, su ve topraktaki radon ve bozunum ürünlerinin sürekli olarak belirlenmesine yönelik olarak tasarlanmış yüksek algılama verimine, geniş ölçme aralığına, derişimdeki ani değişimlere hızla tepki verebilen ve bakımı kolay bir cihazdır (Fotoğraf 3.2). İyonlaşma odasının aktif hacmi 0,56 L’dir. Radon derişimi ölçme aralığı 2-200 000 000 Bq m⁻³’tür . Sistem herhangi bir dizüstü veya masa üstü bilgisayara kolaylıkla bağlanabilmektedir. Sistem ortam ölçümünü (background ölçümü) otomatik olarak yapabilmekte ve herhangi bir bulaşma (kontaminasyon) durumunda uyarabilmektedir.

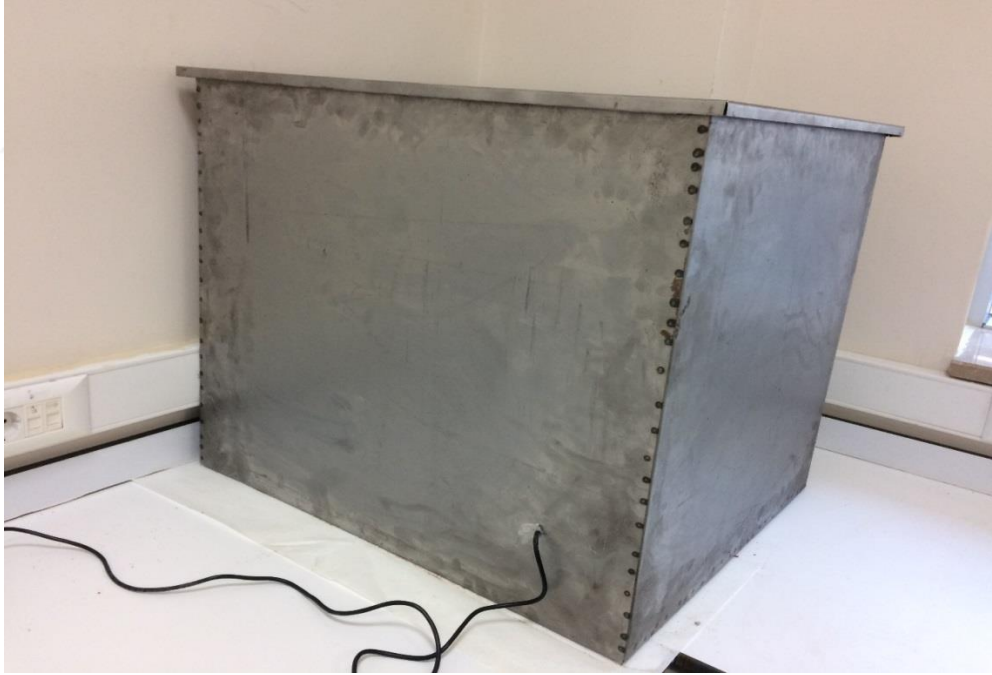
Tez kapsamında toplanan yapı malzemelerinden kapalı ortama salınan radon gazı derişiminin ve bu malzemelerin radon yüzey ve kütle salım hızlarının ölçülmesi için 0,2 cm'lik saçtan 60 cm x 70 cm x 70 cm boyutlarında bir model hücre yapıldı (Fotoğraf 3.4). Ölçme işlemine başlamadan önce radon ölçme cihazı, bu model hücrenin içine yerleştirilerek ortam radon derişimi ölçüldü. Daha sonra ölçüme tabi tutulan her bir malzeme ve radon ölçme cihazı bu hücrenin içine yerleştirildi ve hücrenin kapağı kapatıldı (Fotoğraf 3.4). Her bir malzeme için ölçme işlemi, radon ve bozunum ürünleri arasındaki dengenin sağlanması amacıyla en az bir ay sürdü.

Tablo 3.4. Radon cihazının teknik özellikleri

Radon dedektör tipi	İyonlaşma odası, Yüksek gerilim=750 VDC
Çalışma modu	3D alfa spektroskopi ve akım modu
Toplam/aktif dedektör hacmi	0,62 L/0,56 L
Dedektör dolma mekanizması	Akış modu (1/10 dakika çevrim)
Kalibrasyon hatası	%3 (artı birincil standardın belirsizliği)
Kısa süreli tepki fonksiyonu (zaman gecikmesi)	Sinyal > %30 10 dakikadan sonra/sinyal > %70 20 dakikadan sonra/ sinyal > %90 30 dakikadan sonra
Dedektörün duyarlılığı	20 Bq/m ³ 'de 1 CPM
İç dedektör bulaşma sebebiyle ortam sinyali	< 1 Bq/m ³
Çalışma aralığı	-10...+50 °C / 700...1.100 mbar / % 0.99 rH
Ölçüm aralığı	2 - 2,000,000 Bq/m ³
Ağırlığı ve boyutu	4,5 kg ve 120x315x175 mm



Fotoğraf 3.3. AlphaGUARD PQ2000 PRO radon cihazı



Fotoğraf 3.4. Radon ve salım hızları için yapılan model hücre



Fotoğraf 3.4'ün devamı Radon ve salım hızları için yapılan model hücre

4. ELDE EDİLEN BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Radyoaktivite Ölçme Sonuçları

Radyoaktivite ölçümünde kullanılan Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi Radyoaktivite Ölçme Laboratuvarında bulunan ve Fotoğraf 3.2’de gösterilen gama-ışını spektrometresinin enerji kalibrasyonu, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co ve ^{40}K noktasal standart kaynaklar ile elde edilen veriler birinci dereceden polinoma uydurularak (fit edilerek) yapıldı (Demir, 2015; Atıcı, 2016). HPGe dedektörünün tam enerjili foto-pik verim kalibrasyonu, 1 litrelik Marinelli geometrisinde, epoksi matrisi içine homojen bir şekilde dağıtılmış çoklu radyoizotop içeren sertifikalı standart kaynak (Eckert&Ziegler Isotope Products) kullanılarak yapıldı (Demir, 2015; Atıcı, 2016). ^{238}U ’in aktivite derişiminin ölçümünde, ^{238}U - ^{226}Ra ve ^{226}Ra - ^{222}Rn arasında dengenin var olduğu kabul edilerek, uranyum serisinde yer alan ^{214}Pb ’e ait 352 keV ve ^{214}Bi ’e ait 609 keV enerjili gama-ışını foto-pikleri; ^{232}Th ’nin aktivite derişiminin ölçümünde, ^{228}Ac ’e ait 911,2 keV ve ^{208}Tl ’e ait 583,2 keV enerjili gama-ışını foto-pikleri; ^{226}Ra ’un aktivite derişiminin ölçümünde 186 keV enerjili kendi gama-ışını foto-piki, bu foto-pike girişimde bulunan ^{235}U ’in gama-ışını foto-pikinin katkısı dikkate alınarak (seçilen gama-ışını foto-pikinin toplam alanının 0,574’ü alınarak) ve ^{40}K ’ın aktivite derişiminin ölçümünde ise 1461 keV enerjili kendi gama-ışını foto-piki kullanıldı (Demir, 2015; Atıcı, 2016).

Her bir örneğe ait Marinelli kabı dedektör üzerine yerleştirildi ve yukarıda bahsedilen (ilgilenilen) foto-piklerin pik belirsizlikler %3’ün altında kalacak şekilde ölçme işlemine tabi tutularak gama-ışını spektrumu elde edildi. Her bir örneğe ve belli aralıklarla yapılan laboratuvar ortamı (background) ölçümlerine ait gama-ışını spektrumundaki ilgilenilen gama-ışını foto-piklerinin alanları ve belirsizlikleri, Genie-2000 yazılımı kullanılarak bulundu (Demir, 2015; Atıcı, 2016). İlgilenilen gama-ışını foto-piklerinin net alanları, gama-ışını foto piklerinin alanlarından, ortalaması alınan laboratuvar ortamı gama-ışını foto piklerinin alanları çıkarılarak hesaplandı. Bu radyonüklitlerin kg başına Becquerel (Bq/kg) cinsinden aktivite derişimleri (A),

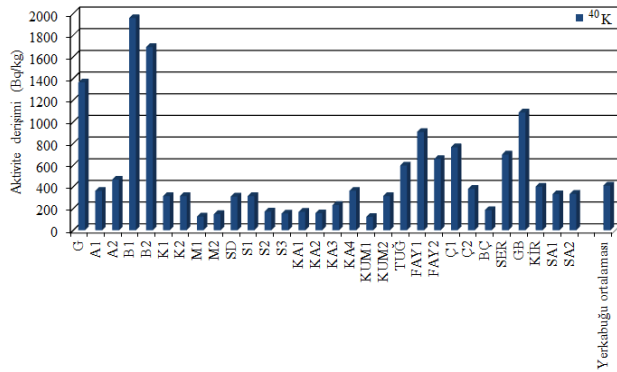
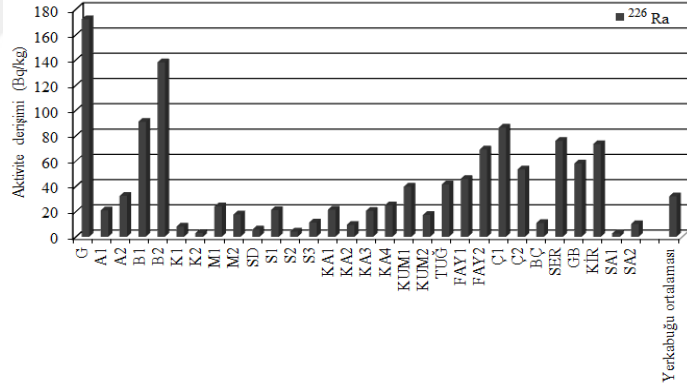
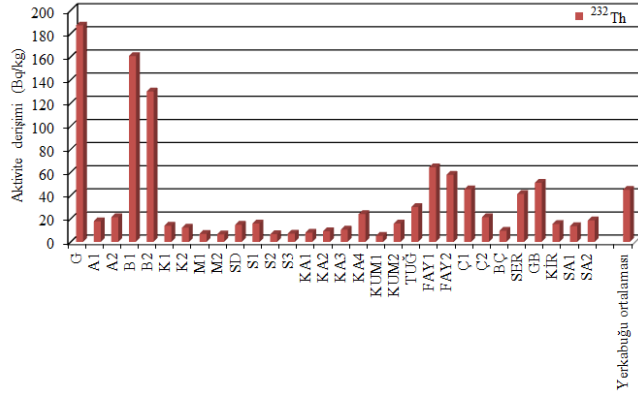
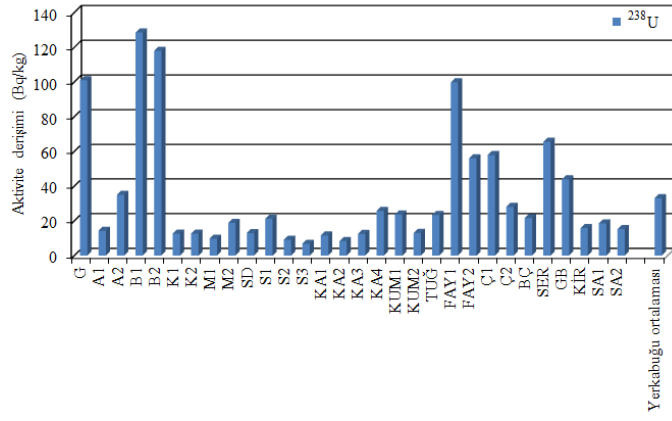
$$A = \frac{SH}{\varepsilon \cdot P_{\gamma} \cdot M} \quad (4.1)$$

bağıntısı ile hesaplandı (Demir, 2015; Atıcı, 2016). Burada, SH; sayım hızı (gama-ışını spektrumunda ilgilenilen gama-ışını foto-pikine ait net sayımın, sayım süresine bölümü ile elde edilir), ε ; (3.2) bağıntısı ile belirlenen tam enerjili foto-pik verimi, P_{γ} ; ilgilenilen gama-ışınının yayınlanma ihtimali, M; kg cinsinden örneğin kütlesidir. Gama-ışını spektrometresinde, ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K için ortalama ölçülebilir en düşük aktivite derişimi, sırasıyla 1,86 Bq/kg, 1,3 Bq/kg, 4,4 Bq/kg ve 20,8 Bq/kg olarak ölçüldü.

İncelenen yapı malzemesi örneklerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişim değerleri Tablo 4.1'de verilmektedir. Bu tablodan da görülebileceği gibi ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi, sırasıyla $6,7 \pm 0,4$ - $128,6 \pm 3,7$ Bq/kg, $5,2 \pm 0,6$ - $187,0 \pm 2,4$ Bq/kg, $2,6 \pm 0,8$ - $172,2 \pm 7,6$ Bq/kg ve $12,3 \pm 17,0$ - $1958,0 \pm 83,4$ Bq/kg aralığındadır. En düşük ^{238}U aktivite derişimi sıva örneğinde, en yüksek briket örneğinde; en düşük ^{232}Th aktivite derişimi kum örneğinde, en yüksek granit örneğinde; en düşük ^{226}Ra aktivite derişimi saten alçı örneğinde, en yüksek granit örneğinde ve en düşük ^{40}K aktivite derişimi kum örneğinde, en yüksek briket örneğinde ölçüldü. UNSCEAR (2008) raporunda, yerkabuğundaki ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, sırasıyla 33 Bq/kg, 45 Bq/kg, 32 Bq/kg ve 412 Bq/kg olarak verilmiştir (UNSCEAR, 2008). Yapı malzemelerinde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerinin yerkabuğu ortalaması ile karşılaştırılması, sırasıyla Grafik 4.1'de gösterilmektedir. Grafik 4.1'den de görülebileceği gibi granit, briket, fayans, seramik, alçı, çimento ve gaz beton örneklerinde ölçülen ^{238}U aktivite derişimi, yerkabuğu ortalamasından daha büyüktür. Granit, briket, fayans, çimento ve gaz beton örneklerinde ölçülen ^{232}Th aktivite derişimi, yerkabuğu ortalamasından daha büyüktür. Granit, alçı, tuğla, briket, kum, fayans, çimento, seramik, gaz beton ve kireç örneklerinde ölçülen ^{226}Ra aktivite derişimi, yerkabuğu ortalamasından daha büyüktür. Granit, alçı, tuğla, briket, fayans, çimento, seramik ve gaz beton örneklerinde ölçülen ^{40}K aktivite derişimi, yerkabuğu ortalamasından daha büyüktür.

Tablo 4.1. Örneklerde ölçülen ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K 'ın aktivite derişimi

Örnek kodu	Aktivite derişimi (Bq/kg)			
	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K
G	101 ± 2,4	172 ± 7,6	187 ± 2,4	1365 ± 29,1
A1	14,2 ± 0,8	20,8 ± 4,2	17,8 ± 1,8	363,5 ± 46,8
A2	35 ± 1,4	32,4 ± 5,9	21,2 ± 2,2	467,4 ± 58,4
B1	128,6 ± 3,7	91 ± 11,9	161 ± 6,4	1958 ± 83,4
B2	118 ± 3,4	138 ± 9,5	130 ± 5,4	1691 ± 75,8
K1	12,6 ± 0,6	8 ± 2,1	13,9 ± 1,3	315,4 ± 41,0
K2	12,6 ± 0,5	2,9 ± 0,7	12,3 ± 1,2	315 ± 42,1
M1	9,7 ± 0,4	24 ± 2,8	6,9 ± 0,5	126,8 ± 14,9
M2	18,8 ± 3,6	17,6 ± 2,3	6,4 ± 0,5	149,5 ± 16,3
SD	12,9 ± 0,6	5,7 ± 0,6	14,7 ± 1,2	311,1 ± 33,3
S1	21,1 ± 0,5	21,1 ± 7,6	15,8 ± 0,8	315,5 ± 16,7
S2	9,1 ± 0,4	4,1 ± 0,3	6,6 ± 0,7	172,4 ± 19,6
S3	6,7 ± 0,4	11,2 ± 2,4	7,1 ± 0,7	155,3 ± 18,1
KA1	11,6 ± 0,4	21,4 ± 1,9	7,9 ± 0,6	170,6 ± 15,6
KA2	8,3 ± 0,4	9,4 ± 0,9	9,2 ± 0,6	156,8 ± 16,7
KA3	12,5 ± 2,9	20,4 ± 1,6	10,5 ± 1,5	233,7 ± 17,1
KA4	25,7 ± 0,6	24,8 ± 1,9	23,9 ± 0,8	364,7 ± 17,1
KUM1	23,6 ± 0,6	39,7 ± 2,6	5,2 ± 0,6	123,3 ± 17,0
KUM2	13 ± 3,4	17,3 ± 1,7	15,8 ± 0,7	315 ± 15,3
TUĞ	23,3 ± 0,6	41,3 ± 3,1	30 ± 1,7	597,8 ± 16,7
FAY1	99,8 ± 1,3	45,8 ± 3,7	64,3 ± 4,2	906,7 ± 22,2
FAY2	56 ± 2,4	69 ± 2,3	58 ± 2,1	658 ± 25,1
Ç1	57,9 ± 1,9	86,4 ± 6,2	45,3 ± 2,8	766,1 ± 29,6
Ç2	28 ± 1,3	53,3 ± 2,6	21,2 ± 0,7	382,3 ± 20,0
BÇ	21,6 ± 2,8	10,9 ± 2	9,6 ± 0,5	185 ± 17,7
SER	65,6 ± 1,1	75,8 ± 5,5	41,4 ± 2,3	699,5 ± 21,7
GB	43,9 ± 8,3	57,9 ± 2,8	50,9 ± 1,9	1087 ± 63,7
KİR	15,8 ± 0,8	73,3 ± 4,9	15,4 ± 1,8	402,1 ± 19,6
SA1	18,5 ± 0,6	2,6 ± 0,8	13,5 ± 0,6	333,7 ± 41,2
SA2	15,2 ± 0,5	10 ± 1,7	18,6 ± 0,9	336,2 ± 39,9



Grafik 4.1. Aktivite derişimlerinin karşılaştırılması

Granit, mermer, fayans, yer karosu, tuğla, briket ve gaz beton örneklerinin kapalı ortama saldığı radon aktivite derişimi, Teknik özellikleri Tablo 3.4’de verilen radon ölçme cihazı ve Şekil 3.4’deki düzenek kullanılarak ölçüldü. Ölçme işlemi, radon ve bozunum ürünleri arasındaki denge sağlandıktan sonra (üç haftadan sonra) her bir 10 dakika alınan verilerin ortalaması alınarak bulundu. Ortam değeri çıkarıldıktan sonra elde edilen radon aktivite derişim sonuçları Tablo 4.2’de verilmektedir. Tablo 4.2’den, en yüksek radonun granit örneğinden en düşük ise mermer örneğinden salındığı görülmektedir.

Tablo 4.2. Bazı yapı malzemelerinin saldığı radon aktivite derişimi

Yapı malzemesi	Radon aktivite derişimi (Bq/m ³)
Granit	1660 ± 20
Mermer	1 ± 0,1
Fayans	6 ± 0,2
Yer karosu	3 ± 0,1
Tuğla-1	74 ± 1,5
Briket-1	212 ± 3,8
Gaz beton	204 ± 20,9
Tuğla-2	22 ± 0,6
Briket-2	10 ± 0,3

4.2. Radon Salım Hızı Ölçme Sonuçları

Radon salım hızı birim zamanda birim yüzey veya kütle başına salınan radon aktivite derişiminin miktarıdır. Yüzey salım hızı malzemenin yüzey alanı ve kütle salım hızı ise kütle ile ilgilidir. Radon salım hızı radyum içeriğine, radon emanasyon faktörüne, verilen malzemedeki radon difüzyon katsayısına bağlıdır. Radon yüzey salım hızı (RYSH) aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır (Abbasi, 2013):

$$RYSH \text{ (Bq/m}^2 \cdot \text{h)} = \frac{A_{Rn} \cdot \lambda \cdot V}{YA} \quad (4.2)$$

Burada, A_{Rn} ; yapı malzemesinin salığı radon derişimi (Bq/m^3), λ ; radon buzunum sabiti ($7,56 \times 10^{-3} 1/h$), V ; model hücrenin hacmi (m^3) ve YA ; her bir örneğin alanı (m^2) dir. Radon kütle salım hızı (RKSH) aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır (Sharma vd., 2015):

$$RKSH (Bq/kg \cdot h) = \frac{A_{Rn} \cdot \lambda \cdot V}{M} \quad (4.3)$$

Burada, A_{Rn} ; yapı malzemesinin salığı radon derişimi (Bq/m^3), λ ; radon buzunum sabiti ($7,56 \times 10^{-3} 1/h$), V ; model hücrenin hacmi (m^3) ve M ; her bir örneğin kütlesi (kg) dir.

İncelenen bazı yapı malzemeleri için ölçülen RYSH değerleri ($mBq/m^2.h$), Tablo 4.3'ün ikinci sütununda verilmektedir. Tablo 4.3'ten görülebileceği gibi RYSH'nin en yüksek değeri, granit için en düşük değeri ise mermer örneği için ölçüldü. Yapı malzemeleri için ölçülen RKSH değerleri ($mBq/kg.h$), Tablo 4.3'ün üçüncü sütununda verilmektedir. Tablo 4.3'ten görülebileceği gibi RKSH'nin en yüksek değeri, granit için en düşük değeri ise mermer örneği için ölçüldü. Tablo 4.4'de granit ve mermer örneklerinde ölçülen RYSH ve RKSH değerleri, literatürde yer alan değerler ile karşılaştırıldı.

Tablo 4.3. Bazı yapı malzemeleri için ölçülen radon salım hızları

Yapı malzemesi	RYSH ($mBq/m^2.h$)	RKSH ($mBq/kg.h$)
Granit	$2734,6 \pm 32,8$	$53,866 \pm 0,646$
Mermer	$2,9 \pm 0,1$	$0,033 \pm 0,001$
Fayans	$16,7 \pm 0,5$	$1,140 \pm 0,031$
Yer karosu	$7,7 \pm 0,2$	$0,377 \pm 0,011$
Tuğla-1	$79,3 \pm 1,5$	$5,711 \pm 0,108$
Briket-1	$103 \pm 2,0$	$13,860 \pm 0,278$
Gaz beton	$237,8 \pm 0,7$	$6,891 \pm 0,117$
Tuğla-2	$22,7 \pm 0,7$	$1,630 \pm 0,052$
Briket-2	$28,7 \pm 0,9$	$0,872 \pm ,029$

Tablo 4.4. RYSH ve RKSH değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması

Malzeme	Ülke	RYSH (mBq/m ² .h)	RKSH (mBq/kg.h)	Kaynak
Granit	Kıbrıs	3710	-	Abbasi vd. (2013)
	Tayland	-	20300	Sola vd. (2015)
	Yunanistan	1240	-	Topçu vd. (2013)
	S. Arabistan	1500	-	Topçu vd. (2013)
	Mısır	761-1699	8-19	Yousef vd. (2015)
	Türkiye	157	-	Kaynar vd. (2015)
	Türkiye	2735	54	Bu çalışma
Mermer	Kanada	200	-	Chen vd. (2010)
	Sırbistan	1,4	-	Stajic and Nikezic (2015)
	Türkiye	130	-	Kaynar vd. (2015)
	Libya	132	-	Saad vd. (2010)
	Mısır	153-363	2-4	Yousef vd. (2015)
	Hindistan	26	-	Topçu vd. (2013)
	Pakistan	292	-	Topçu vd. (2013)
	Türkiye	3	0,03	Bu çalışma

4.3. Örneklerin Kullanılmasına Yönelik Radyolojik Değerlendirme

Radyolojik değerlendirmelere yönelik olarak yapı malzemesinin tipi, kullanılma miktarı, duvar kalınlıkları, kapı ve pencerelerin yerleri vb. parametreleri hesaba katan modellerin simülasyonu ile farklı indisler türetildi. Bu tezde, incelenen yapı malzemelerinin kullanılması radyolojik açıdan değerlendirmek amacıyla her bir yapı malzemesi örneği için radyum eşdeğer aktivite indisi, aktivite derişim indisi ve alfa indisi hesaplandı

Radyum eşdeğer aktivite (Ra_{es}) indisi, aktivite derişimi 10 Bq/kg olan ²²⁶Ra'nin, aktivite derişimi 7 Bq/kg olan ²³²Th ve aktivite derişimi 130 Bq/kg ⁴⁰K ile aynı gama-ışını doz hızını oluşturabileceği kabulü esas alınarak aşağıda verilen formül ile hesaplandı (Atıcı, 2016):

$$Ra_{e\text{ş}} = A_{Ra} + 1,43 \cdot A_{Th} + 0,077 \cdot A_K \quad (4.4)$$

Burada, A_{Ra} , A_{Th} ve A_K , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir. Konut, okul ve işyeri binalarında kullanılan yer kabuğu kökenli yapı malzemeleri için $Ra_{e\text{ş}}$ aktivite indisinin sınır değeri, 370 Bq/kg olarak öngörölmüştür (NEA- OECD, 1979; Demir, 2016; Atıcı, 2016). $Ra_{e\text{ş}}$ aktivite indisinin, sınır değerdan küçük veya eşit olması durumunda, yapı malzemelerindeki radyoaktivitenin neden olduğu dış ışınlamaya maruz kalan bireylerin alabileceği azami yıllık etkin radyasyon doz değerdinin 1,5 mSv'den küçük veya eşit olacağı kabul edilmiştir (NEA- OECD, 1979; Demir, 2016; Atıcı, 2016). Bu değerdin üzerinde olan malzemelerinin, konut, okul ve işyeri binalarında kullanılmasının sınırlandırılması tavsiye edilmiştir (NEA- OECD, 1979). İncelenen yapı malzemesi örnekleri için hesaplanan ortalama $Ra_{e\text{ş}}$ aktivite indis değerdleri, Tablo 4.5'te verilmektedir. $Ra_{e\text{ş}}$ aktivite indis değerdleri, 27 Bq/kg ila 544 Bq/kg aralığında değişmektedir. En büyük $Ra_{e\text{ş}}$ aktivite indis değerdri, granit örneği için ve en küçük değerdri ise sıva (S1) örneği için hesaplanmıştır. Hesaplanan $Ra_{e\text{ş}}$ aktivite indis değerdlerinin, birbirleri ve sınır değerdri ile karşılaştırılması, Grafik 4.2'de gösterilmiştir. Grafik 4.2'den görölebileceği gibi granit ve briket örnekleri hariç bütün değerdler, sınır değerdri altındadır.

Konut, okul ve işyeri binalarında kullanılan yapı malzemelerinin içerdđi birden fazla radyonöklitin, yıllık etkin radyasyon dozuna katkıda bulunmasından dolayı izleme amaçlı pratik bir indis olarak önerilen aktivite derişim indisi (I_{ADI}), aşığıda verilen bağıntı ile hesaplandı (EC, 1999; Demir, 2015; Atıcı, 2016):

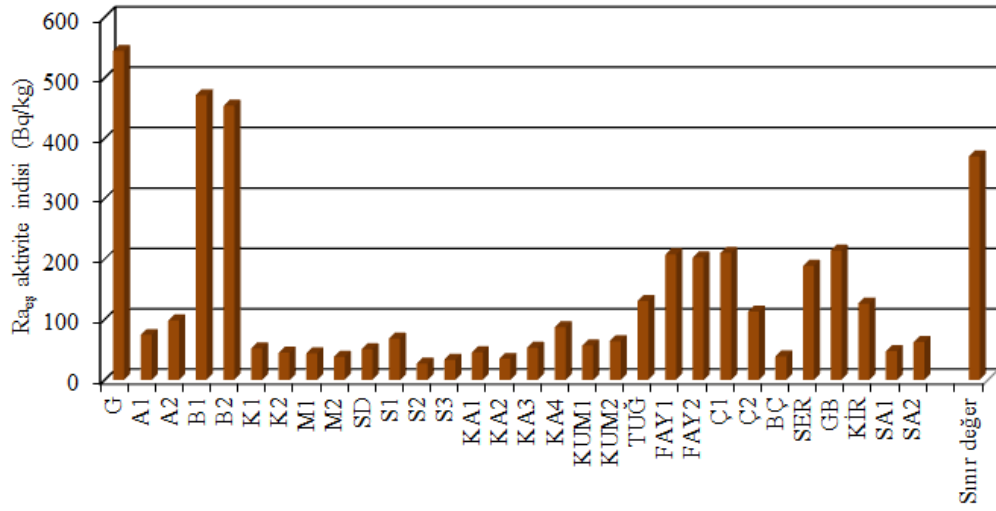
$$I_{ADI} = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000} \quad (4.5)$$

Burada, Burada, A_{Ra} , A_{Th} ve A_K , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimidir. I_{ADI} 'nin tavsiye edilen sınır değerdleri, yıllık etkin doz sınırına, malzemenin yapı içinde kullanılma şekline ve miktarına bağlı olarak Tablo 4.6'da verilmektedir. I_{ADI} 'nin değerdleri, 0,3 mSv'lik yıllık etkin radyasyon dozuna karşılık geldiğinde, yapı malzemesi, radyoaktiviteye yönelik bütün kontrol ve izlemeden muaf tutulur. I_{ADI} 'nin değerdleri, 1 mSv'lik yıllık etkin radyasyon dozuna karşılık geldiğinde, yapı malzemesi, herhangi bir kısıtlama olmadan kullanılabilir. I_{ADI} 'nin değerdleri, 1 mSv'ten daha büyük yıllık etkin radyasyon dozuna karşılık geldiğinde, yapı

malzemelerinin kullanılmamasına ve taşınmasına kısıtla getirilmesi tavsiye edilir (EC, 1999; Demir, 2015; Atıcı, 2016). İncelenen yapı malzeme örnekleri için hesaplanan I_{ADI} değerleri, Tablo 4.5'in üçüncü sütununda verilmektedir. I_{ADI} değerleri, 0,1 ila 2,0 aralığında değişmektedir. Hesaplanan I_{ADI} değerlerinin, birbirleri ve sınır değer ile karşılaştırılması, Grafik 4.3'te gösterilmiştir. Briket için hesaplanan I_{ADI} değerleri, tavsiye edilen sınır değer üzerinde değildir.

Tablo 4.5. *Yapı malzeme örnekleri için hesaplanan indis değerleri*

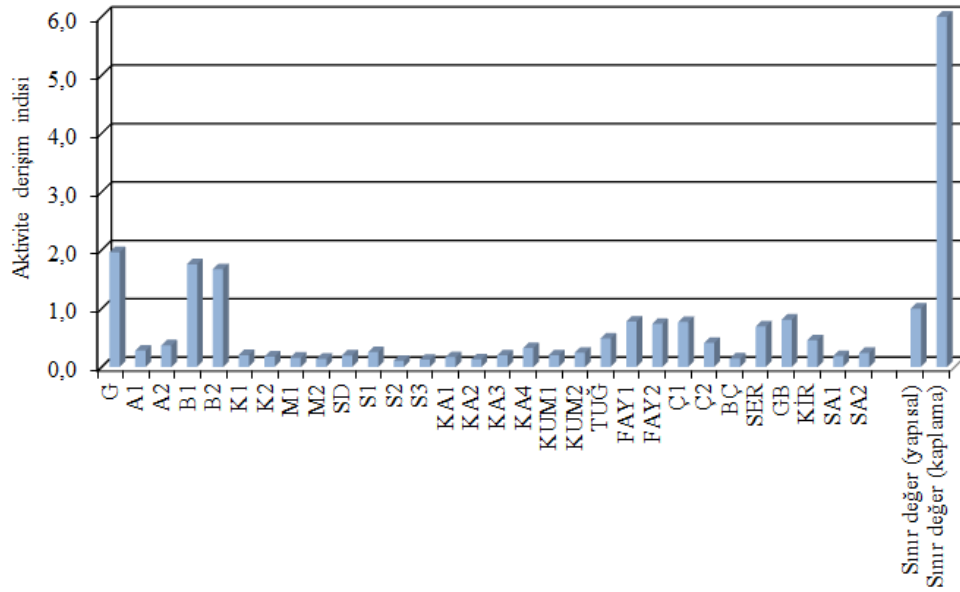
Örnek kodu	$R_{a\text{eş}}$ (Bq/kg)	I_{ADI}	I_{α}
G	544	2,0	0,9
A1	74	0,3	0,1
A2	99	0,4	0,2
B1	471	1,8	0,5
B2	454	1,7	0,7
K1	52	0,2	0,0
K2	45	0,2	0,0
M1	44	0,2	0,1
M2	38	0,1	0,1
SD	51	0,2	0,0
S1	68	0,3	0,1
S2	27	0,1	0,0
S3	33	0,1	0,1
KA1	46	0,2	0,1
KA2	35	0,1	0,0
KA3	53	0,2	0,1
KA4	87	0,3	0,1
KUM1	57	0,2	0,2
KUM2	64	0,2	0,1
TUĞ	130	0,5	0,2
FAY1	207	0,8	0,2
FAY2	202	0,7	0,3
Ç1	210	0,8	0,4
Ç2	113	0,4	0,3
BÇ	39	0,1	0,1
SER	189	0,7	0,4
GB	214	0,8	0,3
KİR	126	0,5	0,4
SA1	48	0,2	0,0
SA2	62	0,2	0,1



Grafik 4.2. Ra_{es} aktivite indisinin sınır değer ile karşılaştırılması

Tablo 4. 6. Doz ölçütünün kontrolüne yönelik I_{ADI} değerleri

Yıllık etkin doz ölçütü	0,3 mSv/y	1 mSv/y
Yapısal malzemeler (beton, tuğla vb.)	I _{ADI} ≤ 0,5	I _{ADI} ≤ 1
Yüzeysel olarak ve sınırlı kullanıma sahip diğer malzemeler (kaplama malzemesi vb.)	I _{ADI} ≤ 2	I _{ADI} ≤ 6

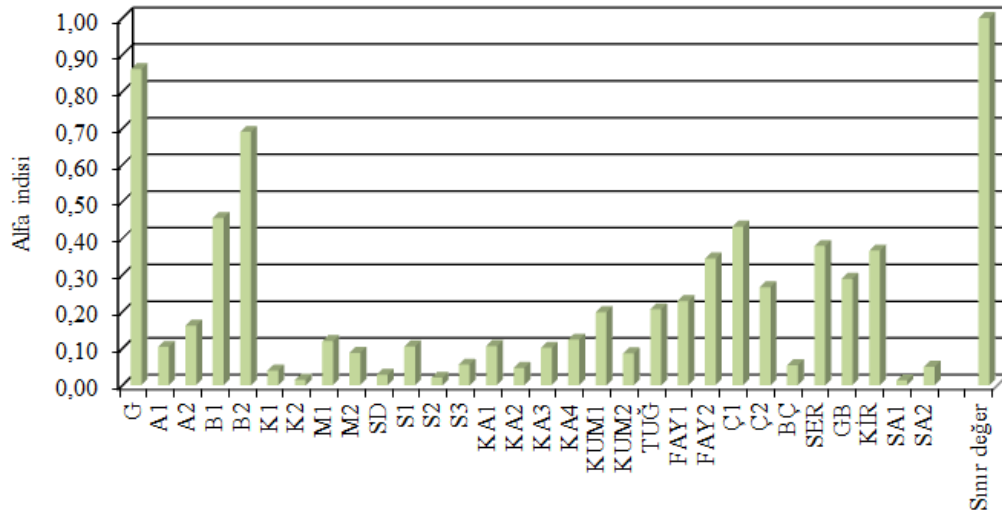


Grafik 4.3. I_{ADI} değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması

Radon gazının solunmasının sebep olduğu ilave alfa radyasyonunun değerlendirilmesi için türetilen alfa indisi (I_α), aşağıdaki bağıntı ile hesaplandı (Demir, 2015; Atıcı, 2016):

$$I_\alpha = \frac{A_{Ra}}{200} \quad (4.6)$$

Burada, A_{Ra} ; ^{226}Ra 'nin aktivite derişimidir. $I_\alpha > 1$ olduğu durumlarda, kapalı ortam veya yapı içi (ev, okul, işyeri) radon aktivite derişimi, sınır değer olan 200 Bq/m^3 'ten daha büyüktür (Demir, 2015; Atıcı, 2016). İncelenen yapı malzemeleri örnekleri için hesaplanan I_α değerleri, Tablo 4.5'in dördüncü sütununda verilmektedir. Hesaplanan I_α değerleri, 0,01 ila 0,9 aralığında değişmektedir. Hesaplanan I_α değerlerinin, birbirleri ve sınır değer ile karşılaştırılması, Grafik 4.4'te gösterilmektedir. Bütün I_α değerleri, sınır değerinin altındadır.



Grafik 4.4. I_α değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması

4.4. Radyasyonun Dozunun Değerlendirilmesi

Tezin bu kısmında, yaşamlarının büyük bir kısmını kapalı ortamda geçiren yetişkin bireylerin yapı malzemelerinin içerdiği radyonüklitlerden yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalmalarında dolayı alabilecekleri doz radyolojik açıdan değerlendirildi. Radyolojik değerlendirme, her bir yapı malzemesi örneği için kapalı ortamda havada soğurulan gama-ışını doz hızı, dış ışınlamadan ve iç ışınlamadan

kaynaklanan yıllık etkin radyasyon dozu ve yaşam boyu kanser riski hesaplanarak yapıldı.

Kapalı ortamdaki havada soğurulan gama-ışını doz hızı (KOGDH),

$$\text{KOGDH (nGy/h)} = \text{DK}_{\text{Ra}} \times A_{\text{Ra}} + \text{DK}_{\text{Th}} \times A_{\text{Th}} + \text{DK}_{\text{K}} \times A_{\text{K}} \quad (4.7)$$

Bağıntısı ile hesaplandı (UNSCEAR, 2008; EC, 1999). Burada A_{Ra} , A_{Th} ve A_{K} , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın Bq/kg cinsinden aktivite derişimi ve DK_{Ra} , DK_{Th} ve DK_{K} , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K için 0,92 nGy/h/Bq/kg, 1,1 nGy/h/Bq/kg ve 0,08 nGy/h/Bq/kg değerindeki doz hızı dönüşüm kat sayısıdır. İncelenen örnekler için hesaplanan ortalama KOGDH değerleri, Tablo 4.7'nin ikinci sütununda verilmektedir. KOGDH değerleri, 25 nGy/h ila 473 nGy/h aralığında değişmektedir. Tablo 4.7'den görülebileceği gibi en küçük KOGDH değeri sıva (S2) örneğine ve en büyük KOGDH değeri ise granit örneğine aittir. UNSCEAR (2008) raporunda, yer kabuğu kökenli radyonüklitlerden kaynaklanan dış ışınlamanın sebep olduğu kapalı ortamda soğurulan gama-ışını doz hızının nüfus ağırlıklı dünya ortalaması 84 nGy/h (aralık: 40 - 200 nGy/h) olarak verilmiştir (UNSCEAR, 2008). Örnekler için hesaplanan KOGDH değerlerinin, birbirleri ve dünya ortalaması ile karşılaştırılması, Grafik 4.5'de gösterilmektedir.

Kapalı ortamda, gama radyasyonuna maruz kalan bireylerin aldıkları yıllık etkin radyasyon doz hızı (ERD), havada soğurulan gama-ışını dozundan etkin doza dönüşüm kat sayısı 0,7 Sv/Gy alınarak ve bireylerin zamanının %80'nini kapalı ortamlarda geçirdiği kabul edilerek,

$$\text{ERD (mSv / y)} = \text{KODGDH} \times 365,25 \text{ gün} \times 24 \text{ h} \times 0,8 \times 0,7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-6} \quad (4.8)$$

bağıntısı ile hesaplandı (UNSCEAR, 2008). Burada, KOGDH; (4,7) bağıntısı ile hesaplanan soğurulan gama-ışını doz hızıdır. İncelenen yapı malzeme örnekleri için hesaplanan ERD değerleri, Tablo 4.7'nin üçüncü sütununda verilmektedir. ERD değerleri, 0,1 mSv/y ila 2,3 mSv/y aralığında değişmektedir. Tablo 4.7'den görülebileceği gibi en küçük ERD değeri sıva (S2) örneğine ve en büyük ERD değeri ise granit örneğine aittir. Binalarda kullanılan yapı malzemelerinin içerdiği radyonüklitlerden yayımlanan gama radyasyonu sebebiyle bireylerin maruz kaldığı kapalı ortam yıllık etkin doz hızı için kontrol ölçütü olarak 1 mSv/y tavsiye edilmiştir ve kontrollerde, doz hızının, 0,3 mSv/y-1 mSv/y aralığındaki bir değer esas

alınması gereği de tavsiye edilmiştir (EC, 1999; Atıcı, 2016). Hesaplanan ortalama ERD değerlerinin, birbirleri ve ölçüt değer ile karşılaştırılması, Grafik 4.6'da gösterilmektedir.

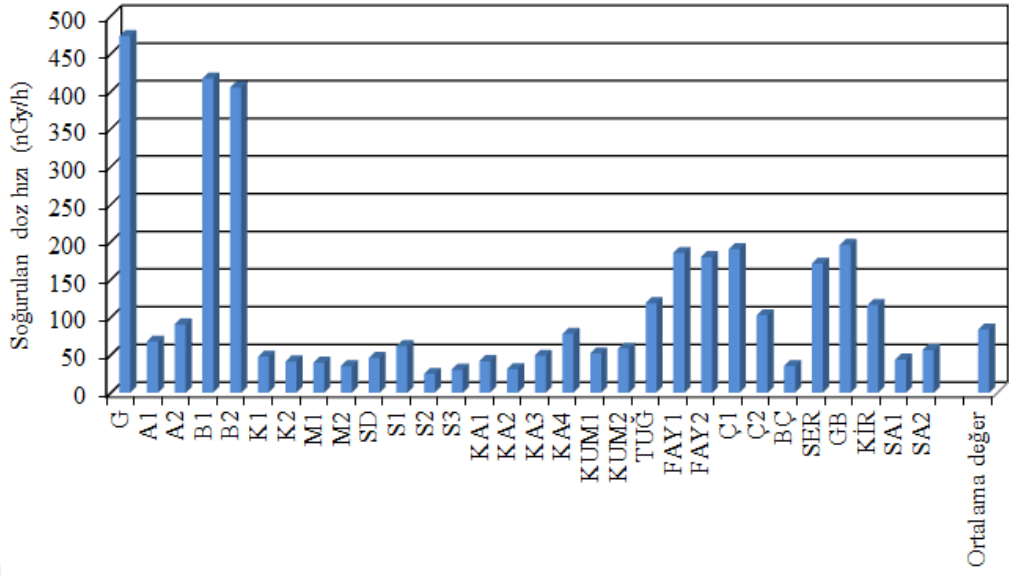
Yaşam boyu kanser riski (YKR), belirli bir seviyedeki iyonlaştırıcı radyasyon dozuna maruz kalan bireyler içinde kanser vakasına yakalanan azami sayıyı gösteren bir değer olarak kabul edilir (ICRP, 1990; Atıcı, 2016). Yapı malzeme örneklerinin yapı içinde yapısal ve yapı içi veya dışında kaplama malzemesi olarak kullanıldığı durumlar için YKR,

$$YKR = ERD \cdot OÖ \cdot RF \quad (4.9)$$

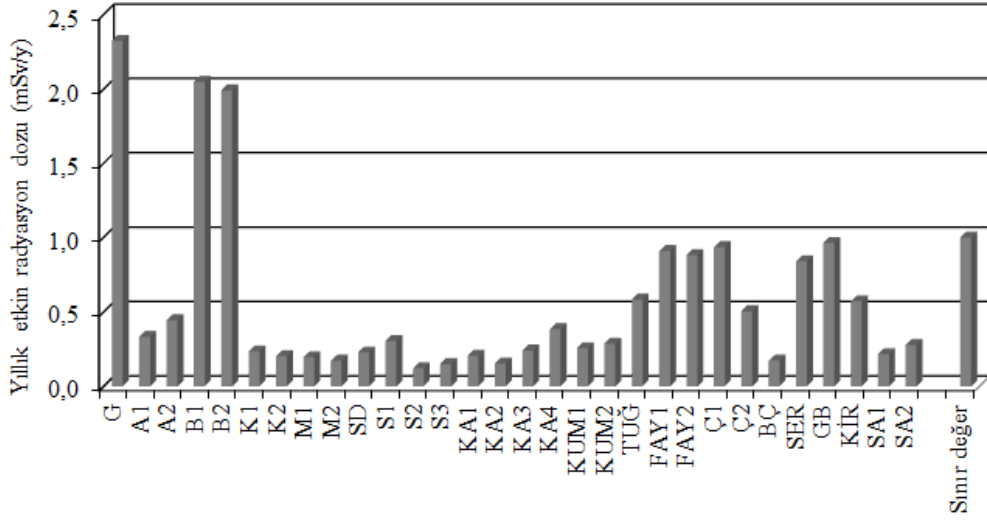
bağıntısı ile hesaplandı (Atıcı, 2016). Burada, ERD; (4.8) bağıntısı ile hesaplanan yıllık etkin radyasyon doz hızı, OÖ; ortalama ömür (70 yıl olarak kabul edildi) ve RF değerleri 0,05 olarak alınan risk faktörüdür. İncelenen yapı malzeme örnekleri hesaplanan YKR değerleri, Tablo 4.7'nin son sütununda verilmektedir. YKR değerleri, $4,3 \times 10^{-4}$ ila $8,1 \times 10^{-3}$ aralığında değişmektedir. Yaşam boyu kanser riski değerinin dünya ortalaması $0,29 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır (Atıcı, 2016).

Tablo 4.7. Örnekleri için hesaplanan KOGDH, ERD ve YKR değerleri

Örnek kodu	KOGDH (nGy/h)	ERD (mSv/y)	YKR
G	473	2,3	$8,1 \times 10^{-3}$
A1	68	0,3	$1,2 \times 10^{-3}$
A2	91	0,4	$1,6 \times 10^{-3}$
B1	417	2,0	$7,2 \times 10^{-3}$
B2	405	2,0	$7,0 \times 10^{-3}$
K1	48	0,2	$8,2 \times 10^{-4}$
K2	41	0,2	$7,1 \times 10^{-4}$
M1	40	0,2	$6,8 \times 10^{-4}$
M2	35	0,2	$6,0 \times 10^{-4}$
SD	46	0,2	$8,0 \times 10^{-4}$
S1	62	0,3	$1,1 \times 10^{-3}$
S2	25	0,1	$4,3 \times 10^{-4}$
S3	31	0,1	$5,2 \times 10^{-4}$
KA1	42	0,2	$7,2 \times 10^{-4}$
KA2	31	0,2	$5,4 \times 10^{-4}$
KA3	49	0,2	$8,4 \times 10^{-4}$
KA4	78	0,4	$1,3 \times 10^{-3}$
KUM1	52	0,3	$9,0 \times 10^{-4}$
KUM2	58	0,3	$1,0 \times 10^{-3}$
TUĞ	119	0,6	$2,0 \times 10^{-3}$
FAY1	185	0,9	$3,2 \times 10^{-3}$
FAY2	180	0,9	$3,1 \times 10^{-3}$
Ç1	191	0,9	$3,3 \times 10^{-3}$
Ç2	103	0,5	$1,8 \times 10^{-3}$
BÇ	35	0,2	$6,1 \times 10^{-4}$
SER	171	0,8	$2,9 \times 10^{-3}$
GB	196	1,0	$3,4 \times 10^{-3}$
KİR	117	0,6	$2,0 \times 10^{-3}$
SA1	44	0,2	$7,5 \times 10^{-4}$
SA2	57	0,3	$9,7 \times 10^{-4}$



Grafik 4.5. KOGDH değerlerinin ortalama değer ile karşılaştırılması



Grafik 4.6. ERD değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması

5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, Kastamonu'daki inşaatlarda kullanılan 9 yapısal ve 21 kaplama malzeme örneğinde doğal olarak bulunan ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimleri, eş eksenli p-tipi HPGe dedektörlü gama-ışını spektrometresi ve ^{222}Rn aktivite derişimi ve bu malzemelerin radon salım hızları da sürekli aktif radon ölçme cihazı kullanılarak belirlendi. Radyonüklitlerin aktivite derişim ölçme sonuçları esas alınarak bu tür yapı malzemelerin kullanılmasına bir sınırlama getirilip getirilmeyeceğine ve bireylerin alabileceği yıllık radyasyon dozuna ilişkin radyolojik değerlendirme yapıldı. Elde edilen sonuçlar, ulusal ve/veya uluslararası tavsiye edilen sınır değerler ile karşılaştırıldı.

Bu tez kapsamında elde edilen bilgiler yapı malzemelerinin kullanılmamı ve taşınmasına yönelik olarak yol gösterici bilgi mahiyetindedir. Sonuçlar ve değerlendirmeler, granit ve briket örneklerinin dışında incelenen yapı malzemesi örneklerinin, Kastamonu'daki konut, okul, iş yeri inşaatlarında kullanılmasında önemli seviye radyolojik riskler olmadığı göstermiştir.

Bu tez kapsamında,

- 1) Bu tez kapsamında incelenen granit kaplama malzemesinin, konut, okul, iş yeri vb. binaların dış mekânların yalıtım ve/veya dekoratif amaçlı kullanılması,
- 2) Konut, okul ve iş yeri binalarının iç ve dış duvarlarının örülmesinde briket kullanıldığında, radyoaktivitesi düşük briketlerin tercih edilmesi öneriler.

KAYNAKLAR

- Abbasi, A. (2013). Environmental Radiation in High Exposure Building Materials. Yayınlanmış Doktora Tezi. *Eastern Mediterranean University Institute of Science*. North Cyprus.
- Abd El-Mageed A. I., El-Azab Farid M., Saleh E. E., Mansour M., & Mohammed A. K. (2014). Natural radioactivity and radiological hazards of some building materials of Aden, Yemen. *Journal of Geochemical Exploration*, 140, 41-45.
- Ahmad N., Jaafar M. S., Khan S. A., Nasir T., Ahmad S., & Rahim M. (2014). Measurement of radon exhalation rate, radium activity and annual effective döşe from bricks and cement samples collected from Dera Ismail Kahn. *American Journal of Applied Sciences*, 11(2), 240-247.
- Amin R. A. (2015). A study of radon emitted from building materials using solşd state nuclear track detectors. *Journal of Radiation Research an Applied Sciences*, 8, 516-522.
- Amin S. A. (2015). Measurements of radon exhalation rates in building materials used in Iraği houses. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 4(4), 437-442.
- Awhida A., Ujić P., Vukanac I., Durašević M., Kandić A., Ćeliković I., & Lončar B. (2016). Novel method of measurement of radon exhalation from building materials. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, 337-343.
- Atıcı, E. (2016). Kapadokya Bölgesinde Yapı Taşı Olarak Üretilen Tüflerdeki Doğal Radyoaktivitenin Gama Spektrometrik Yöntemle Ölçülmesi. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Nevşehir.
- Aykamış A. Ş., Turhan Ş., Uğur F. A., Baykan U. N., & Kılıç A. M. (2013). Natural radioactivity, radon exhalation rates and indoor radon concentration of some granite samples used a construction material in Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 157, 105-111.
- Bavernegin E., Vahabi-moghaddam M., Babakhani A., & Fathabadi N. (2012). Analytical study of radionuclide concentration and radon exhalation rate in market available building materials of Ramsar. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 6(5), 1-6.
- Baykara O., Karatepe Ş., & Doğru M. (2011). Assessment of natural radioactivity and radiological hazards in construction materials used in Elazığ, Turkey. *Radiation Measurements*, 46, 153-158.

- Celik N., Damla N., & Cevik U. (2010). Gamma ray concentrations in soil and building materials in Ordu, Turkey. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 165(1), 1-10.
- Chen J., Rahman N. M., & Atiya İ. A. (2010). Radon exhalation from building materials for decorative use. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 317-322.
- Demir, K. (2015). Briket ve Tuğlanın Radyolojik Açından Karşılaştırılması. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Nevşehir.
- Döse M., Silfwerbrand J., Jelinek C., Trägårdh T., & Isaksson M. (2016). Naturally occurring radioactivity in some Swedish concretes and their constituents- Assessment by using I-index and dose-model. *Journal of Environmental Radioactivity*, 155-156, 105-111.
- 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.
- EC (European Commission), 1997. Radiation protection 88. Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Stand Arts Directive (BSS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources, Directorate- General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- Flores O. B., Estrada A. M., Suárez R. R., Zerquera J. T., & Pérez A. H. (2009). Natural radionuclide content in building materials and gamma dose rate in dwellings in Cuba. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1834-1837.
- Güler Ç., & Çobanoğlu Z., (1997). Radon Kirliliği. Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi 44, Sağlık Bakanlığı, s.1-47.
- IARC (International Agency for Research on Cancer), (1988). Radon manmade mineral fibres. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, vol. 43. Lyon, ISBN 92-832-1243-6.
- ICRP, (1990). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, vol. 212 No.1-3, publication 60.
- Jang M., Chung K. H., Ji Y. Y., Lim J. M., Kim C. J., Kang M. J. & Choi G. S. (2016). Indoor external and internal exposure due to building materials containing NORM in Korea. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307(3), 1661-1666.

- Janik M, Omori Y., & Yonehara H. (2015). Influence of humidity on radon and thoron exhalation rates from building materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 95, 102-107.
- Kayakökü H., Karatepe Ş., & Doğru M. (2016). Measurements of radioactivity and dōşe assessment in some building materials in Bitlis, Turkey. *Applied Radiation and Isotopes*, 115, 172-179.
- Kaynar S.Ç., Özbey E., & Ereeş F.S. (2015). Determination of radon exhalation rate and natural radioactivity levels of building materials used in Istanbul-Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 305, 337-343.
- Knoll G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurements*. 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-07338-5, New York.
- Kovács T., Shahrokhi A., Sas Z., Vigh T., & Somlai J. (2017). Radon exhalation study of manganese clay residue and usability in brick production. *Journal of Environmental Radioactivity*, 168, 15-20.
- Kovler K. (2017). The national survey of natural radioactivity in concrete produced in Israel. *Journal of Environmental Radioactivity*, 168, 46-53.
- Krane, Kenneth S. (1988). *Introductory nuclear physics*. John Wiley and Sons, ISBN: 047180553X, New York..
- 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.
- Manić G., Manić V., Nikezić D., & Krstić D. (2015). The dose of gamma radiation from building materials and soil. *Nukleonika*, 60(4), 951-958.
- Mavi B., & Akkurt İ. (2010). Natural radioactivity and radiation hazards in some building materials used in Isparta, Turkey. *Radiation Physics and Chemistry*, 73, 933-937.
- Mohamed R. I., Algamdi S. K., & Al-shamani N. S. (2016). Evaluation of radionuclide concentrations and associated radiological hazard in marble indices and granite used as building materials in Al-Madinah Al-Munawarah. *Journal of Taibah University for Science* 10, 369-374.
- NEA- OECD, (1979). Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency (NEA), Paris.
- Ngachin M., Garavaglia M., Giovani C., Nourreddine A., Kwato Njock M. G., Scruzzi E., & Lagos L. (2008). ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K contents and radon

exhalation rate from materials used for construction and decoration in Cameroon. *Journal of Radiological Protection*, 28, 269-278.

- Ravisankar R., Raghu Y., Chandrasekaran A., Gandhi M. S., Vijayagopal P., & Venkatraman B. (2016). Determination of natural radioactivity and the associated radiation hazards in building materials used in Polur, Tiruvannamalai District, Tamilnadu, India using gamma ray spectrometry with statistical approach. *Journal of Geochemical Exploration* 163, 41-52.
- Reguigui, N. (2006). *Gamma Ray Spectrometry*. 10/04/2017 tarihinde <http://www.cnstn.rnrt.tn/afraict/NAT/gamma/html/Gamma%20Spec%20V1.pdf> adresinden alınmıştır.
- Saad A. F., Abdalla Y. K., Hussein N. A., Elyaseery I. S. (2010). Radon exhalation rate from building materials used on the Garyounis University campus, Benghazi, Libya. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 34, 67-74.
- Saad A. F., Al-Awami H. H., & Hussein N. A. (2014). Radon exhalation from building materials used in Libya. *Radiation Physics and Chemistry*, 101, 15-19.
- Safarov A. A., Safarov A. N., Azimov A.N., & Darby I. G. (2017). Rapid assessment methodology in NORM Measurements from building materials of Uzbekistan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 169, 186-191.
- Sahoo B. K., Nathwani D., Eappen K. P., Ramachandran T. V., Gaware J. J., & Mayya Y. S. (2007). Estimation of radon emanation factor in Indian building materials. *Radiation Measurements*, 42, 1422-1425.
- Sharaf J.M., & Hamideen M. S. (2012). Measurement of natural radioactivity in Jordanian building materials and their contribution to the public indoor gamma dose rate. *Applied Radiation and Isotopes*, 80, 61-66.
- Sharma A., Mahur A. K., Yadav m, Sonkawade R. G., Sharma A. C., Ramola R. C., & Prasad R. (2015). Measurement of natural radioactivity, radon exhalation rate and radiation hazard assessment in Indian cement samples. *Physics Procedia*, 80, 135-139.
- Shoeib m. Y., & Thabayneh K. M. (2014). Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation rate in various samples of Egyptian building materials. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7, 174-181.
- Sola P., Srinuttrakul W., & Kewsuwan P. (2015). Estimation of the indoor radon and the annual effective dose from granite samples. *Journal of Physics: Conference Series*, 611, 1-6.
- Solak S., Turhan Ş., Uğur F. A., Gören E., Gezer F., Yeğingil Z., & Yeğingil İ. (2014). Evaluation of potential exposure risks of natural radioactivity levels

- emitted from building materials used in Adana, Turkey. *Indoor and Built Environment*, 23(4), 594-602.
- Stajic J. M., & Nikezic D. (2015). Measurement of radon exhalation rates from some building materials used in Serbian construction. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303, 1943-1947.
- Stojanovska Z, Nedelkovski D., & Ristova M. (2010). Natural radioactivity and human exposure by raw materials and product from cement industry used as building materials. *Radiation Measurements*, 45, 969-972.
- Szabó Zs., Völgyesi P., Nagy H.Ě., Szabó Cs., Kis Z., & Csorba O. (2013). Radioactivity of natural and artificial building materials- a comparative study. *Journal of Environmental Radioactivity*, 118, 63-74.
- TAEK TR 2008-7, (2008). Türkiye’de kullanılan yapı malzemelerindeki doğal radyoaktiviteden kaynaklanan radyasyon dozunun değerlendirilmesi. TAEK, Ankara.
- Topçu N., Biçak D., Çam S., & Ereeş F. S. (2013). Radon exhalation rate from building materials using CR-39 nuclear track detector. *Indoor and Built Environment*, 22(2), 384-387.
- Trevisi R., Risica S., D’Alessandro M., Paradiso D., & Nuccetelli C. (2012). Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance. *Journal of Environmental Radioactivity*, 105, 11-20.
- Turhan, Ş., Baykan U. N., & Şen K. (2008). Measurement of the natural radioactivity in building materials used in Ankara and assessment of external doses. *Journal of Radiological Protection*, 28, 83-91.
- Turhan Ş., Arıkan İ. H., Yücel B., Varinlioğlu A., & Köse A. (2010). Evaluation of the radiological safety aspects of utilization of Turkish coal combustion fly ash in concrete production. *Fuel*, 89, 2528-2535.
- Turhan Ş., Arıkan İ. H., Demirel H. & Güngör N. (2011). Radiometric analysis of raw materials and products in the Turkish ceramic industry. *Radiation Physics*, 80, 620-625.
- Turhan Ş. (2012). Estimation of possible radiological hazards from natural radioactivity in commercially-utilized ornamental and countertops granite tiles. *Annals of Nuclear Energy*, 44, 34-39.
- Turhan Ş., Atıcı E., & Varinlioğlu A. (2015). Radiometric analysis of volcanic tuff Stones used as ornamental and structural building materials in Turkey and evaluation of radiological risk. *Radioprotection*, 50(4), 273-280.

UNSCEAR, (2000). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations Publication, New York, USA, 2000.

UNSCEAR, (2008). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations Publication, New York, USA, 2008.

WHO (World Health Organization), (2009). WHO handbook on indoor radon: A public health perspective. Geneva.

Verità S., Righi S., Guerra R., & Jeyapandian M. (2009). Radon exhalation rates from zircon sands and ceramic tiles in Italy. *Radioprotection*, 44(5), 445-451.

Yousef H. A., El-Farrash A. H., Abu Ela A., & Merza Q. (2015). Measurement of radon exhalation rate in some building materials using nuclear track detectors. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 5, 141-148.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alper Tolga TEMİRCİ
Doğum Yeri ve Yılı : Tosya/15.12.1990
Medeni Hali : Bekar
E-posta : alpertolгатemirci@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Kuzeykent Lisesi - Kastamonu
Lisans : Kastamonu Üniversitesi Fen edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü