

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI



**TÜRKİYE'DE FARKLI SEKTÖRLERDE KATKI HAM
MADDESİ OLARAK KULLANILAN BENTONİT MİNERALİNİN
KİMYASAL VE RADYOMETRİK KARAKTERİZASYONU**

ONUR METİN

DOKTORA TEZİ

PROF. DR. ŞEREF TURHAN

ŞUBAT - 2023
KASTAMONU

TEZ ONAYI

ONUR METİN tarafından hazırlanan “TÜRKİYE’DE FARKLI SEKTÖRLERDE KATKI HAM MADDESİ OLARAK KULLANILAN BENTONİT MİNERALİNİN KİMYASAL VE RADYOMETRİK KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **14.02.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Şeref TURHAN Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN Çankırı Karatekin Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Tuba ÖZDEMİR ÖGE Bartın Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Halit MUĞLU Kastamonu Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Osman ÇİÇEK	
----------------	----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde 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, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Onur METİN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TÜRKİYE’DE FARKLI SEKTÖRLERDE KATKI HAM MADDESİ OLARAK KULLANILAN BENTONİT MİNERALİNİN KİMYASAL VE RADYOMETRİK KARAKTERİZASYONU

ONUR METİN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. ŞEREF TURHAN

Bentonit minerali; alüminyum, sodyum ve potasyum açısından zengin, yumuşak, gözenekli ve kolay şekillendirilebilen ve soğurucu (emici) bir malzemedir. Bentonitler, çeşitli endüstrilerde (seramik, kozmetik, boya, tekstil, döküm, inşaat vb.) sondaj çamuru, cevher peletleme, absorban, adsorban, ağartma maddesi, su empedansı, kaplama, ham madde veya dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bentonitlerin bu sektörlerde etkin ve verimli kullanımı, kimyasal bileşenlerine bağlıdır. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde bulunan yirmi bir ocaktan toplanan bentonit örnekleri; bentonit ocaklarının doğal radyonüklit, majör ve minör element dağılımlarını belirlemek amacıyla analize tabi tutuldu. Bentonitlerin, inşaat sektöründe ham madde olarak kullanılmasına eşlik eden ve ocaklarda çalışanların maruz kalabileceği radyolojik riskler; aktivite derişim indisi (I), açık ortamda soğurulan gama doz hızı (D_{RI}) ve karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu (E_I); kapalı ortamda soğurulan gama doz hızı (D_{RO}) ve karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu (E_O) ve yaşam boyu kanser riski (C_R) hesaplanarak değerlendirildi. Bentonit örneklerinde gama-ışını spektrometrik yöntemi kullanılarak ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin ortalama aktivite derişimi, sırasıyla $50,3 \pm 4,7$ Bq/kg, $76,2 \pm 3,9$ Bq/kg ve $372,8 \pm 18,6$ Bq/kg olarak bulundu. ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın en büyük aktivite derişim değerleri, sırasıyla Konya, Edirne ve Tokat ilindeki ocaklarda ölçüldü. Bentonit örneklerinde, enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometrik yöntem ile analiz edilen SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 ve MnO oksidinin ortalama derişimi, sırasıyla %54,12; %15,24; %4,65; %4,36; %3,25; %2,78; %1,40; %0,58; %0,35; %0,20 ve %0,10 olarak bulundu. En yüksek SiO_2 ve Fe_2O_3 derişimi Ordu ve Çorum'da, en yüksek K_2O , SO_3 , Na_2O ve CaO derişimleri Trabzon'da, en yüksek TiO_2 derişimi Çankırı'da ve en yüksek Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 ve MnO derişimleri ise Konya'da bulunan bentonit ocaklarında analiz edildi. Her bir bentonit örneği için hesaplanan I , D_{RI} , D_{RO} , E_I , E_O ve C_R 'nin ortalama değerleri, sırasıyla 0,7; 159,1 nGy/h, 84,8 nGy/h, 0,2 mSv/y, 0,8 mSv/y ve $7,0 \times 10^{-4}$ olarak bulundu. Radyolojik değerlendirme sonuçları, incelenen bentonitlerin yapı malzemelerinde ham madde olarak güvenle kullanılabilmesini ve bentonit ocaklarında çalışan işçiler için düşük seviyede radyolojik risk olduğunu ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Bentonit; Doğal radyoaktivite; Majör oksitler; Minör oksitler; Gama doz hızı; Yıllık etkin radyasyon; Aktivite derişim indisi; Yaşam boyu kanser riski

Şubat 2023, 98 Sayfa



ABSTRACT

PH. D THESIS

CHEMICAL AND RADIOMETRIC CHARACTERIZATION OF BENTONITE MINERAL USED AS RAW MATERIAL IN DIFFERENT SECTORS IN TURKEY

ONUR METİN

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

SUPERVISOR: PROF. DR. ŞEREF TURHAN

Bentonite mineral is a soft, porous and easily shaped and absorbent mineral rich in aluminum, sodium and potassium. Bentonites are used as drilling mud, ore pelletizing, absorbent, adsorbent, bleaching agent, water impedance, coating and raw material or filling material in various industries (ceramic, cosmetics, paint, textile, casting, construction, etc.). The effective and efficient use of bentonites in these sectors depends on their chemical components. In this study, bentonite samples collected from twenty-one quarries located in different geographical regions of Turkey were analyzed to determine the natural radionuclide, major and minor element distributions of bentonite quarries. The radiological risks that may be caused by use of bentonites as building materials and to which workers may be exposed were evaluated by estimating the activity concentration index (I), indoor absorbed gamma dose rate (D_{RI}) and the corresponding annual effective radiation dose (E_I); outdoor absorbed gamma dose rate (D_{RO}) and the corresponding annual effective radiation dose (E_O) and the lifetime cancer risk (C_R). The average activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K radionuclide measured in bentonite samples using gamma-ray spectrometric method were found as 50.3 ± 4.7 Bq/kg, 76.2 ± 3.9 Bq/kg and 372.8 ± 18.6 Bq/kg, respectively. The average concentrations of SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 and MnO oxides in bentonite samples analyzed by energy dispersion X-ray fluorescence spectrometer were found as 54.12%, 15.24%, 4.65%, 4.36%, 3.25%, 2.78%, 1.40%, 0.58%, 0.35%, 0.20% and 0.10%, respectively. The highest concentrations of SiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O and SO_3 , and TiO_2 were analyzed in samples collected from bentonite quarries located in Ordu, Çorum, Trabzon, and Çankırı provinces, respectively; the bentonite quarries in Konya province have the highest concentrations of Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , and MnO , while the bentonite quarry in Trabzon province has the highest concentrations of Na_2O and CaO . The average values of I , D_{RI} , D_{RO} , E_I , E_O and C_R calculated for each bentonite sample were estimated as 0.7, 159.1 nGy/h, 84.8 nGy/h, 0.2 mSv/y, 0.8 mSv/y and 7.0×10^{-4} , respectively. The radiological evaluation results reveal that the examined bentonites can be used safely as raw materials in building materials and that there is a low level of radiological risk for workers working in bentonite quarries.

KEYWORDS: Bentonite; Natural radioactivity; Major oxides; minor oxides; gamma dose rate; Annual effective radiation dose; Activity concentration index; Lifetime cancer risk

February 2023, 98 Page



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca tecrübe ve bilgilerinden istifade ettiğim, daima sabır ve hoşgörü ile yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Şeref TURHAN'a saygılarımla teşekkür ederim.

Örneklerin radyoaktivite ölçümleri konusunda yardımcı olan Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Aslı KURNAZ'a, içtenlikle teşekkür ederim.

Doktora yapmam konusunda beni teşvik eden Dr. Öğretim Üyesi Mustafa EĞİLMEZ'e teşekkür ederim.

Çalışma süresince göstermiş olduğu nazik rehberlik ve denetim için Tez İzleme Komitesi üyeleri olan Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI ile Doç. Dr. Halit MUĞLU'ya, Doç. Dr. Celalettin DURAN'a Fizik Bölüm Başkanlığına ve Fen Bilimleri Enstitüsü çalışanlarına teşekkür ederim.

Eşim Çiğdem METİN ile biricik kızlarım Erva ve Meva METİN'e sevgi ve destekleri için minnettarım.

Bu çalışmayı benim için çok kıymetli olan aileme ithaf ediyorum.

Onur METİN

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
GRAFİKLER DİZİNİ	xiii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiv
HARİTALAR DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgi	1
1.2 Literatürdeki Çalışmaların Değerlendirilmesi	3
1.2.1 Bentonit Mineralinin Elemental İçeriklerinin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar	6
1.2.2 Bentonit Mineralinin İçerdiği Radyoaktivitenin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmaların Değerlendirilmesi	7
1.3 Tezin Amacı.....	8
1.4 Tezin Kapsamı	8
1.5 Tezin Yapısı	9
2. MALZEME VE YÖNTEM	11
2.1 Bentonit Mineralinin Önemi	11
2.2 Bentonitin Kullanım Alanları	11
2.2.1 Sondaj Sanayi	11
2.2.2 Döküm Sanayi.....	12
2.2.3 Pelet Sanayi.....	12
2.2.4 Adsorban Kil.....	12
2.2.5 Gübre ve Hayvan Yemi Sanayi	12
2.2.6 Kâğıt Sanayi.....	13
2.2.7 Boya Sanayi	13
2.2.8 Bentonit Rezervleri	13
2.3 Bentonit Örneklerinin Toplanması	15
2.4 Bentonit Örneklerinin Analiz İşlemleri İçin Hazırlanması	20
2.5 Radyoaktivite ile İlgili Temel Bilgi	22
2.5.1 Radyoaktivite	22
2.5.2 Radyoaktif Bozunum süreçleri	25
2.5.3 Radyoaktif Kaynaklar	27
2.5.4 Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi	31
2.5.5 Karakteristik X-ışınlarının Oluşumu	35
2.6 Analiz Yöntemleri.....	38
2.6.1 Gama-ışın Spektrometresinin Elektronığı	39
2.6.1.1 Dedektör ön gerilim kaynağı.....	40

2.6.1.2 Ön yükselteç	41
2.6.1.3 Doğrusal yükselteç	42
2.6.1.4 Analog sayısal dönüştürücü	43
2.6.1.5 Çok kanallı analizör	44
2.6.2 Radyoaktivite Analizinde Kullanılan Gama-Işını Spektrometresi	44
2.6.3 X-ışını Floresans Spektrometrik Analiz Yöntemi	45
2.6.4 Element Analizinde Kullanılan EDXRF Spektrometresi	47
2.7 Gama Doz Hızı Ölçme Yöntemi	48
2.8 Radyasyon Doz Birimleri ve Radyasyon Biyolojik Etkileri	49
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	52
3.1 Bentonit Ocaklarında Ölçülen Gama Doz Hızı	52
3.2 Bentonit Örneklerinin Radyonüklit İçeriği	54
3.3 Radyolojik Riskin Değerlendirilmesi	60
3.3.1 Aktivite Derişim İndisi	60
3.3.2 Alfa İndisi	63
3.3.3 Kapalı Ortamda Soğurulan Gama Doz Hızı	65
3.3.4 Kapalı Ortam Yıllık Etkin Radyasyon Dozu	68
3.3.5 Dış Ortamda Soğurulan Gama Doz Hızı	70
3.3.6 Dış Ortam Yıllık Etkin Radyasyon Dozu	73
3.3.7 Yaşam Boyu Kanser Riski	76
3.4 Bentonit Örneklerinin Majör ve Minör Oksit Derişimleri	78
3.5 Kozmik Radyasyondan Kaynaklanan Gama Doz Hızı	84
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Uranyum radyoaktif serisi (Özçıtak, 2012)	29
Şekil 2.2 Toryum radyoaktif serisi (Özçıtak, 2012).....	30
Şekil 2.3 Fotoelektrik olay (Temirci, 2017).....	31
Şekil 2.4 Compton saçılması (Temirci, 2017)	33
Şekil 2.5 Çift oluşum	34
Şekil 2.6 Karakteristik X-ışınının oluşması (Brouwer, 2013; Yıldırım, 2018).....	35
Şekil 2.7 Enerjiye karşı soğurulma (Brouwer, 2013; Yıldırım, 2018).....	36
Şekil 2.8 K, L ve M elektronları için flüoresans verim (Yıldırım, 2018)	36
Şekil 2.9 Ana çizgiler ve elektron geçişleri (Yıldırım, 2018)	37
Şekil 2.10 Gama- veya X-ışını etkileşme süreçleri ve fotopik oluşumu (Sultan, 2020).....	39
Şekil 2.11 Gama spektrometresi için basit bir şematik elektronik sistem (Solmaz, 2008).....	40
Şekil 2.12 Direnç geri beslemeli ön yükselteci şematik gösterimi (Gilmore, 2008)	42
Şekil 2.13 Yığılmış direnç geri beslemeli ön yükselteci ve istenen dönüştürülmüş darbe (Gilmore, 2008)	43
Şekil 2.14 XRF analiz sisteminin blok diyagramı (Brouwer, 2013).....	47

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Dünyadaki bentonit üretimleri (x1000 ton)(USGS, 2022)	14
Tablo 2.2 Bentonit ocakları hakkında bilgi.....	15
Tablo 2.3 Bentonit örneklerinin konum bilgisi	16
Tablo 2.4 Doğal radyoaktif serilere ait olmayan radyonüklitler	28
Tablo 2.5 HPGe dedektörünün özellikleri (Sultan, 2020).....	45
Tablo 2.6 Farklı radyasyonlar için KF değerleri (Temirci, 2017).....	51
Tablo 3.1 Gama doz hızlarına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	52
Tablo 3.2 Gama doz hızlarının ortalama ve aralık değerleri.....	53
Tablo 3.3 Radyonüklitlerin aktivite derişimleri ile ilgili bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	56
Tablo 3.4 Radyonüklitlerin ortalama ($\pm$ standart hata) ve aralık ($\pm$ belirsizlik) değerleri	57
Tablo 3.5 Aktivite derişim indisi ile ilgili bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler.....	61
Tablo 3.6 Aktivite derişim indisinin ortalama ve aralık değerleri	62
Tablo 3.7 Alfa indisi ile ilgili bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler.....	64
Tablo 3.8 Alfa indisinin ortalama ve aralık değerleri	64
Tablo 3.9 Kapalı ortamda soğurulan gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	66
Tablo 3.10 Kapalı ortamda soğurulan gama doz hızının ortalama ve aralık değerleri	67
Tablo 3.11 Kapalı ortam yıllık etkin radyasyon dozuna ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	69
Tablo 3.12 Kapalı ortam yıllık etkin radyasyon dozu ortalama ve aralık değerleri	69
Tablo 3.13 Dış ortamda soğurulan gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	71
Tablo 3.14 Dış ortamda soğurulan gama doz hızı ortalama ve aralık değerleri	72
Tablo 3.15 Dış ortam yıllık etkin radyasyon dozuna ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	74
Tablo 3.16 Dış ortam yıllık etkin radyasyon dozunun ortalama ve aralık değerleri	74
Tablo 3.17 Yaşam boyu kanser riskine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	77
Tablo 3.18 Yaşam boyu kanser riski ortalama ve aralık değerleri.....	77
Tablo 3.19 Majör oksitlerin derişimlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	79
Tablo 3.20 Minör oksitlerin derişimlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	79
Tablo 3.21 Bentonit ocaklarında analiz edilen majör oksitlerin dağılımları.....	80
Tablo 3.22 Bentonit ocaklarında analiz edilen minör oksitlerin dağılımları	81
Tablo 3.23 Kozmik gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler	85
Tablo 3.24 Kozmik gama doz hızlarının ortalama, en küçük ve en büyük değerleri	86

GRAFİKLER DİZİNİ

Sayfa

Grafik 2.1 Foton etkileşmesinin bağıl önemi (Knoll, 2000)	34
Grafik 3.1 Ocaklarda ölçülen ortalama gama doz hızı değerlerinin karşılaştırılması	54
Grafik 3.2 Bentonit örneğinin gama-ışını spektrumu	55
Grafik 3.3 Bentonit örneklerinde ölçülen ²²⁶ Ra radyonüklitinin frekans dağılımı	58
Grafik 3.4 Bentonit örneklerinde ölçülen ²³² Th radyonüklitinin frekans dağılımı	59
Grafik 3.5 Bentonit örneklerinde ölçülen ⁴⁰ K radyonüklitinin frekans dağılımı	59
Grafik 3.6 Radyonüklitlerin ortalama derişim değerleri ile yer kabuğu ortalamasının karşılaştırılması	60
Grafik 3.7 Aktivite derişim indisinin ortalama değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması	63
Grafik 3.8 Alfa indisinin ortalama değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması	65
Grafik 3.9 KGDH ortalama değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması	68
Grafik 3.10 KYED ortalama değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması	70
Grafik 3.11 DGDH ortalama değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması	73
Grafik 3.12 DYED ortalama değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması	75
Grafik 3.13 YKR değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması.....	78
Grafik 3.14 Majör oksitlerin ortalama derişimlerinin yer kabuğu ile karşılaştırılması	81
Grafik 3.15 Minör oksitlerin ortalama derişimlerinin yer kabuğu ile karşılaştırılması	82
Grafik 3.16 Kozmik gama doz hızı ortalama değerlerinin karşılaştırılması	85

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Sayfa

Fotoğraf 2.1 Bentonit örneklerinin toplanması	20
Fotoğraf 2.2 Bentonit örneklerinin kurutulması.....	21
Fotoğraf 2.3 Ölçme işlemi için hazırlanan bentonit örnekleri	21
Fotoğraf 2.4 Gama-ışını spektrometresi.....	46
Fotoğraf 2.5 EDXRF spektrometresi	48
Fotoğraf 2.6 Gama doz hızlarının ölçülmesi.....	49



HARİTALAR DİZİNİ

Sayfa

Harita 2.1 Bentonit ocaklarının konumları.....	16
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
^7Be	: Berilyum
^{14}C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum oksit
CO	: Kobalt
CO_3	: Karbonat
Fe_2O_3	: Demir oksit
^3H	: Hidrojen
^{40}K	: Potasyum
K_2O	: Potasyum oksit
^{138}La	: Lantan
^{176}Lu	: Lütisyum
MgO	: Magnezyum oksit
MnO	: Mangan oksit
^{22}Na	: Sodyum
Na_2O	: Sodyum oksit
Pd	: Paladyum
P_2O_5	: Difosfor pentaoksit
^{226}Ra	: Radyum
^{87}Rb	: Rubidyum
Rn	: Radon
SiO_2	: Silisyum oksit
^{147}Sm	: Samaryum
SO_3	: Kükürt trioksit
^{232}Th	: Toryum
TiO_2	: Titanyum oksit
^{238}U	: Uranyum

Kısaltmalar

AC	: Aktivite
ADC	: Analog dijital dönüştürücü
AK	: Avrupa Komisyonu
BET	: Yüzey alanı ve mikro gözenek ölçüm cihazı
Bq	: Bekerel
BQ	: Bentonit ocağı
CAB	: Kalsiyum bentonit
DC	: Doğru akım
DGDH	: Dış ortamda soğrulan gama doz hızı
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı

DSP	: Sayısal sinyal işleme
DTA	: Diferansiyel termal analiz
DYED	: Dış ortam yıllık etkin radyasyon dozu
EC	: Avrupa komisyonu
ED	: Enerji dağılımı
EDXRF	: Enerji dağılımı X-ışını floresans spektrometresi
FET	: Alan etkili transistör
GPS	: Küresel konumlama sistemi
Gy	: Gray
HPGe	: Yüksek saflıkta germanyum dedektörü
I	: Aktivite derişim indisi
IR	: Kızıl ötesi
I_α	: Alfa indisi
KDK	: Katyon değıştirme kapasitesi
keV	: Kilo elektron volt
kg	: Kilogram
KGDH	: Kapalı ortamda soğrulan gama doz hızı
KYED	: Kapalı ortam yıllık etkin radyasyon dozu
LLD	: Alt seviye ayıklayıcı
MCA	: Çok kanallı analizör
MCS	: Çok kanallı ölçekleyici
mg	: Miligram
μg	: Mikrogram
Mt	: Milyon ton
NAB	: Sodyum bentonit
NAI(Tl)	: Sodyum iyodür(talyum) dedektörü
N₀	: Başlangıçtaki (t=0) çekirdek sayısı N(t),
N(t)	: t zaman aralığında bir örnek içindeki radyoaktif çekirdek sayısı,
Opal-CT	: Kristobalit-tridimit
PHA	: Darbe yüksekliği analizörü
PMT	: Foto çoğaltıcı tüp
ppm	: Milyonda bir birim
R	: Röntgen
S	: Sievert
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SCA	: Tek kanal analizörü
TAEK	: Türkiye Atom Enerji Kurumu
TEM	: Transmisyon elektron mikroskobu
TGA	: Termal gravimetrik analiz
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
ULD	: Üst seviye ayıklayıcı
UNSCEAR	: Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi
USGS	: Birleşmiş Milletler Jeoloji araştırmaları
V	: Volt
WD	: Dalga boyu dağılımlı
WDXRF	: Dalga boyu dağılımı X-ışını floresans spektrometresi
XRD	: X-ışını kırınım ölçer

XRF	: X-ışını floresans spektrometresi
YKR	: Yaşam boyu kanser riski
λ	: Bozunum sabiti
τ	: Ortalama ömür



1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgi

Endüstriyel mineral ve kayaçlar, yıllardır insan yaşamında ve ülkelerin ekonomik ve kültürel gelişmesinde büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden mineraller, toplumların yaşamındaki ve ülkelerin kalkınmasında büyük önem taşır (Krista, 2021; Tokat, 2020). Dünya çapında faaliyet gösteren endüstriyel mineral ve kayaç sektörleri, seramikten plastiğe, evden arabaya, refrakter malzemelerden kâğıda kadar birçok ürünün imalatında kullanılan ham maddeleri üretmektedir. Bu nedenle, büyük ekonomik öneme sahip birçok mineralin bulunabilirliği, çıkarılması ve dağıtımı, tarihte olduğu gibi günümüzde de önemli bir rol oynamaktadır (Jeffrey, 2006).

Endüstriyel mineraller ve kayaçlardan, bentonit depolama dolguları, baca gazı kükürt giderme için kireç taşı, zeolit moleküler elekler ve su arıtımı için granat ve kireç gibi çevre koruma ve temizlemede yaygın olarak kullanılan birçok mineral üretilir ve günlük yaşantımızda kullanılan araç ve gereçlerde bulunan metallerin kaynağını, mineraller oluşturmaktadır (Krista, 2021; Tokat, 2020). Türkiye, jeolojik ve Tethyan Metalojenik Kemer üzerindeki konumu nedeniyle, mineral çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda dünyanın en zengin ülkelerindendir. Türkiye, ticari olarak değerlendirilen elli farklı mineral bakımından da dünyadaki en zengin ülkelerdendir (Krista, 2021; Tokat, 2020). Türkiye, 2019 yılında, 1,5 milyon ton (Mt) bentonit üretimi ile Çin, Amerika ve Hindistan'dan sonra dördüncü büyük bentonit üreticisi olmuştur (Reichl ve Schatz, 2021).

Volkanik külün sulu ortamlarda kimyasal bozunmasıyla oluşan bentonit, esas olarak smektit grubundan montmorillonitten oluşan bir kil kayasıdır (Eisenhour ve Reisch, 2006). Bentonitin jeolojik özellikleri, kalsiyum (Ca), sodyum (Na) ve Ca-Na montmorillonitten oluşmasına bağlı olarak bölgeden bölgeye değişir. Yüksek katyon absorpsiyonu, katyon değişim kapasitesi, geniş yüzey alanı, küçük kristal boyutu, kimyasal bileşimi, şişme davranışı ve hidrasyon gibi önemli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan bentonitler genellikle iki ana çeşitte bulunur: (1) En yaygın olarak bulunan kalsiyum (veya şişmeyen) bentonit ve (2) endüstriyel olarak daha

önemli olan sodyum (veya şişen) bentonit (Eisenhour ve Reisch, 2006; Reichl ve Schatz, 2021). Bentonitler, bu önemli fiziksel ve kimyasal özelliklerinde dolayı, petrol, boya, kauçuk, gıda, seramik, kâğıt, plastik, ilaç, inşaat mühendisliği ve benzeri endüstrilerde, dökümhane prosesleri, sondaj, demir cevheri peletleme, filtreleme, adsorban, berraklaştırma, renk giderme gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Eisenhour ve Reisch, 2006). Bunların yanı sıra bentonit, ülkemizde ve birçok ülkede kedi kumu olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

İnsanlar, yer kabuğu kökenli malzemelerin veya bu malzemelerde kullanılan ürünlerdeki doğal radyonüklitlerden yayınlanan ve farklı enerjilerde bulunan iyonlaştırıcı radyasyonlara, iç (dâhili) ışınlama ve dış (harici) ışınlama olmak üzere iki farklı şekilde maruz kalmaktadırlar. Bireyler, ev, okul, fabrika, iş yeri gibi kapalı ortamlarda ve/veya dışarıda açık havada, bu radyonüklitlerin sebep olduğu gama radyasyonuna doğrudan maruz kalırlar. Bu şekilde gama radyasyonuna maruz kalma dış ışınlama olarak isimlendirilir. Bireyler, kapalı ortamlardaki yapı malzemelerinden, musluk sularından ve binaların zeminindeki toprak ve kayaçlardan ve/veya dış ortamda (açık havada) bulunan toprak, kayaç ve minerallerden ortama salınan ve solunum ile vücuda alınan radon (^{222}Rn) ve yarı ömürleri kısa olan bozunum ürünlerinden yayınlanan alfa ve beta radyasyonuna maruz kalmaktadırlar. Akciğer kanser riskini artıran bu maruziyet, iç ışınlama olarak isimlendirilir. Bina ve işyerlerinin kapalı ortamlarındaki radon gazının birincil kaynağı, binanın oturduğu temelde toprak kaya ve bina duvarlarında kullanılan yapı malzemeleridir. Kapalı ortamlarda bulunan radon gazı derişiminin yaklaşık %30'una, yer kabuğu kökenli yapı malzemeleri neden olur.

Bireylerin maruz kaldıkları yıllık etkin radyasyon dozu, radyoaktivitesi normal düzeyden daha yüksek yapı malzemelerini içinde bulunduran ev ve iş yerlerinde yaşamlarını geçirmeleri ile artış gösterebilir. Bundan dolayı bireylerin veya bu sektörlerde çalışanların, çevresel radyoaktiviteden kaynaklanan maruz kaldıkları yıllık dozun değerlendirilmesinin yapılabilmesi için yer kabuğu kökenli malzemelerin ve/veya katkı ham maddesi olarak kullanılan malzemelerin içerdiği doğal radyonüklitlerdeki aktivite derişim değerlerinin hesaplanması büyük önem taşır.

1.2 Literatürdeki Çalışmaların Değerlendirilmesi

Literatürde, genellikle bentonit kullanılarak sulu çözeltilerden boyar maddelerin, bazı radyoaktif maddelerin ve farklı iyonların soğrulmasına ve/veya yüzeyde tutulmasına; bentonitlerin şişme, jelleşme ve nem alıcı özelliğine, çevresel kirliliğin önlenmesinde bentonitlerin kullanılmasına yönelik çalışmalar yer almaktadır (Akar 2019; Akbulut 1995; Altın ve Başçetin 2006; Borrelli vd., 2013; Can 2002; Chen vd., 2014; Cerit 2013; Çandır 2018; Demirel vd. 1995; Fındıkçı, 2020; Gümüşer 1997; Günay vd., 2001; İpekoğlu vd., 1997; Kocakuşak vd., 1997; Namlı 2011; Shakibaei 2012; Şimşek 2001; Uyanık, 2022; Yıldız vd., 2006). Ancak bentonit mineralinin içerdiği radyoaktivitenin belirlenmesine yönelik çok az sayıda ulusal ve uluslararası çalışma yapılmıştır. 1995 ile 2022 yılları arasındaki çalışmalar kronolojik olarak aşağıda özetlendi ve değerlendirildi.

Demirel vd. (1995) tarafından yapılan çalışmada, soğurucu (absorbant) olarak kullanılan bentonitlerin, soğurma (absorbans) özellikleri, kullanım alanları, üretimi ve pazara sürümü incelenmiş ve bentonitin yığın yoğunluğu, rutubet miktarı ve soğurma kapasitesi tespit edilmiştir. Belirli süreçlerden geçirilen bentonitin soğurma ve mekanik dayanımındaki değişiklikler incelenmiştir.

Akbulut (1995) tarafından yapılan çalışmada, sondaj bentonitlerinde Ankara (Kalecik) ile Tokat (Reşadiye) yataklarından farklı yeni yataklar aramak amacıyla Tokat-Niksar-Yazıcık yöresindeki bentonit yataklarından alınan bentonit örneklerinin jeolojisi, element analizleri, katyon değişim kapasiteleri, soğurma kapasiteleri ve sıvı sınırları araştırılmıştır. Bentonit aramaları sırasında yaklaşık yirmi sondaj yapılarak 120 adet örnek toplanmıştır. Toplanan bentonit numunelerinde X ışını kırınım ölçer (XRD), kırıntı yüzdesi için elek analizi, smektit tenörüne yönelik "Metilen Mavisi" deneyi ile Ca-CO_3 analizi yapılmıştır. Bentonitin soğurmuş olduğu "Metilen Mavisi" meq/100 g cinsinden belirtilmiştir. XRD analizleri sonucunda Yazıcık yöresinden toplanan bentonit örneklerinin montmorillonit-illit karışık katmanlı kil minerallerinden olduğu ortaya çıkarılmıştır. Feldspat ve kuvars gibi kil olmayan mineraller ile çoğunlukla da analime

rastlanılmıştır. Örneklerdeki K_2O miktarının yüksek olmasının sebebi olarak, Yazıcıık yöresindeki bentonitlerin, alkali ve volkanik kökenli olmasını göstermişlerdir.

İpekoğlu vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada, seramik ham maddesi olarak Türkiye'deki bentonit potansiyeli genel olarak ele alınmış ve bentonit yataklarının kimyasal dağılımı verilmiştir.

Kocakuşak vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada, silan bileşikleriyle modifiye edilmiş bentonit üretim yöntemi araştırılmıştır. Çalışmada, bentonit örnek tozlarının yüzeyleri, metil metoksi silan ve oktil-tri etoksi silan gibi silan kaplama malzemeleri ile işleme alınmıştır. Çalışmada Tokat (Reşadiye) bentonit yatağından temin edilen bentonit örnekleri kullanılmış ve bu örneklerle ilişkin kimyasal dağılım verilmiştir. Reşadiye bentonitinin içerdiği kimyasal dağılım, farklı çalışmalarda yapılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Şimşek (2001) tarafından yapılan çalışmada, poliakrilamid bentonit ve poliakrilamid fitrik asit kompozitlerinin metal adsorpsiyonunda kullanım kolaylığı ve adsorpsiyon kapasitesi incelenmiş, bu adsorplayıcıların çevre kirliliğine neden olan metallerin uzaklaştırılmasında etkin olarak kullanılabileceği vurgusu yapılmıştır.

Günay vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada, döküm sektöründe kullanılan bentonitin, sahip olması gereken fiziksel özellikleri tartışılmış ve ülkemizdeki bentonit yatakları bu açıdan incelenmiştir. Çalışmada ayrıca Türkiye'deki bentonitlerin fiziksel özellikleri de karşılaştırılmıştır.

Yıldız vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada, Ordu (Fatsa) ilinden toplanan bentonit örnekleri analiz edilmiştir. Toplanan bentonit örnekleri ile sentezlenmiş olan organobentonit, X-ışınları difraktogramı, organik karbon içeriği, tanecik boyut dağılımı ve yüzey alan analizleri ile karakterize edilmiştir. Analiz sonuçlarının incelenmesiyle toplanan bentonit örnekleri ve organobentonit örneklerinin özellikleri arasında farklılıklar olduğu saptanmıştır. Çalışmada kullanılan Ordu (Fatsa) bentonit örneklerinin tanecik boyut dağılımlarının belirlenmesinde Lazer Tanecik Büyüklük Analizör cihazı kullanılmıştır.

Namlı (2011) tarafından yapılan çalışmada, verimli bir bentonit enjeksiyonuyla zemin ile beton boru ara yüzeyindeki sürtünme katsayısı yaklaşık %87 oranında azaltılıp bu sayede toplam maliyette %20 oranında tasarruf sağlanmış ve yeni bir enjeksiyon sistemi önerilmiştir.

Shakibaei (2012) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye Edirne ilinin Lalapaşa ilçesi ve Tokat ilinin Reşadiye ilçesindeki bentonitler kullanılmış ve bentonitlerin su geçiriminin çok az olması üzerinde durulmuştur. Yeraltı suyunun üstyapıya ulaşım mukavemetini azaltmasını, fiziksel deformasyona uğramasını önlemek için, en uygun malzeme karışımlarını elde etmek için bentonitin karışma oranı %6, %8, %10, %12 ve %18 olarak belirlenmiştir.

Cerit (2013) tarafından yapılan çalışmada, farklı ağırlıkta bentonitler ile polipirol-bentonit kompozitleri oluşturulmuştur. Bentonit miktarının artmasıyla elde edilen kompozitin termal kararlılık ve camsı geçiş sıcaklığının arttığı ve bentonit etkileşiminin dielektrik davranışı sırasında bentonit miktarının artmasıyla, dielektrik kayıplarının da artmakta olduğu gözlemlenmiştir.

Çandır (2018) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'deki Edirne, İstanbul, Ordu ve Tokat illerinden alınan örneklerin mineralojik-kimyasal analiz ve fiziksel testleri yapılmış ve bentonitlerin genleşen kil agregası olarak da değerlendirilebileceği, özellikle ara tip bentonitlerin, Ca-bentonitlere göre daha iyi genleşme gösterdiği belirlenmiştir.

Akar (2019) tarafından yapılan çalışmada, ülkemizde işlenen Na-Bentonit ile Polivinilalkolün sulu solüsyonları ayrı ayrı karıştırılmış ardından birleştirilerek kompozitler üretilip yapısal, termal ve dielektrik özelliklerin belirlenmesi için analizler yapılmıştır. Üretilen kompozitlerde düşük dielektrik sabitlere ulaşılmıştır.

Fındıkçı (2020) tarafından yapılan çalışmada bentonit örnekleri üzerinde farklı laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneyler ile bentonit kilinin özellikleri belirlenip bentonit kilinin cam fiber ile iyileştirilip iyileştirilemeyeceği üzerinde durulmuştur. Cam fiber ile bentonitin dayanımı önemli oranda artmış ve cam fiberin basınca karşı dayanımı, bentonitin dayanımına katkı sağlamıştır.

Ait vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, Nador'daki (Kuzey-Doğu Fas) bentonit yatakları, X-ışını kırınımı (XRD) ile incelenmiştir. Adsorpsiyon testleri, bu doğal minerallerde bulunan ve %8,72 ile %76,23 arasında değişen fenolik bileşikler azaltmadaki etkinliğini ve ham bentonitler üzerindeki mikro elementler aracılığıyla ağır metal tutma etkinliğini doğrulamıştır.

Uyanık (2022) tarafından Orta Karadeniz Bölgesi'nde bulunan Reşadiye (Tokat) yöresi ve çevresinde yapılan çalışmada bentonit ocaklarının dağılımları ve oluşumunun belirlenmesi nedeniyle detaylı incelemeler yapılmıştır. Mineralojik analiz için polarizan mikroskop, X-ışınları difraktometresi, infrared spektrum, termal gravimetri ve diferansiyel termal analiz ile mikromorfolojik analiz için enerji dağılımlı X-ışın spektrometresi ve taramalı elektron mikroskobu yöntemleri kullanılmıştır.

1.2.1 Bentonit Mineralinin Elemental İçeriklerinin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar

Literatürde, bazı bentonit ocaklarının jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal özellikleri ve bentonitin yapı malzemelerinde katkı ham maddesi olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar da yer almaktadır (Bakır 2010; Bozdoğan 1990; Dumlupınar 2008; Ertürk 2006; Güngör 1992; Güngörmüş 2003; Karahanoğlu 2001; Kocabaş 2006; Özalp 1991; Targan 2002; Yüksel 2006;). Ancak bentonit örneklerinin majör, minör ve iz element analizleri ile ilgili az sayıda çalışma mevcuttur.

Alemdar (1995) tarafından yapılan çalışmada, Ünye ve Çankırı (Kurşunlu) bentonit yataklarından temin edilen bentonit örneklerinin nitel ve nicel element analizleri nötron aktivasyon analiz yöntemi ile yapılmıştır.

Yıldız ve Çalimli (2002) tarafından yapılan çalışmada, Çankırı ve Kütahya illerinden alınan üç bentonit örneğinin içerdiği minör ve majör oksit derişimleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca bu örneklerin X-ışını kırınımı (XRD), termogravimetrik ve diferansiyel termal (TGA, DTA) ve kızılötesi (IR) spektroskopik analizleri de yapılmıştır.

Karakaya vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, Ordu ilinden alınan on dört adet sodyum ve kalsiyum bentonit örneklerinin element derişimleri belirlenmiştir. Çalışmada montmorillonitin, her iki bentonitte de ana mineral olduğu ve montmorillonit dışında, Ca-bentonitlerin opal-CT, az miktarda kuvars, feldspat ve biyotit ve (nadiren) pirit ve kalsit içerdiği; Na-bentonitlerin ise simektit, az miktarda opal-CT, kuvars ve feldspat içerdiği gözlenmiştir.

Çoban (2014) tarafından yapılan çalışmada, Balıkesir (Bigadiç) ilinden alınan 15 bentonit örneğinin mineralojik ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Bentonitleşme esnasında ana, eser ve nadir toprak element davranışları incelenip, XRD analiz yöntemi ile yapılan incelemelerde bentonit yataklarının ana kil mineralinin Ca-montmorillonit olduğu anlaşılmıştır.

Kalpaklı (2018) tarafından yapılan çalışmada, Kütahya ilinden toplanan bentonit örneğinin elemental analizleri, XRF spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, bentonit örneğinin parçacık boyutu dağılımı analizi, spesifik yüzey alanı ve katyon değiştirme kapasitesi yöntemleriyle belirlenmiştir.

Ge vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, Güney Çin'deki altı alandan toplanan bentonit örneklerinin mineralojik ve jeokimyasal incelemeleri gerçekleştirmiştir. İnce kesitlerin petrolojik özellikleri, X-ışını kırınım verileri ve ana element sonuçları, bentonitlerin de kuvars, mikroklin, albit ve pirit içerdiğini göstermiştir.

1.2.2 Bentonit Mineralinin İçerdiği Radyoaktivitenin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmaların Değerlendirilmesi

Şimdiye kadar endüstriyel bentonit mineralinin içerdiği radyonüklitlerin aktivite düzeylerinin belirlenmesine yönelik çok az çalışma bulunmaktadır (Agayeva vd., 2018; Pantelić vd., 2015).

Pantelić vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Sırbistan ülkesi genelinde bulunan yapı malzemesinde kullanılmakta olan on beş bentonit örneğindeki ²²⁶Ra, ⁴⁰K ve ²³²Th'nin aktivite derişim değerleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörlü (HPGe) bir gama ışın spektrometresi ile belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca incelenen bentonit

örneklerinin inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılması, radyolojik risk açısından değerlendirilmiştir.

Agayeva vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Azerbaycan'da bulunan üç ocaktan toplanan beş bentonit örneğindeki ^{40}K , ^{137}Cs , ^{210}Pb , $^{226-228}\text{Ra}$, ^{232}Th ve $^{235-238}\text{U}$ 'ün aktivite derişim değerleri, HPGe dedektörlü bir gama ışını spektrometresi ile belirlenmiştir.

1.3 Tezin Amacı

Yukarıda yapılan literatür değerlendirmesinde de anlaşılağı gibi, Türkiye'de ticari olarak işletilen ve/veya potansiyel olarak mevcut olan bentonit ocaklarındaki elemental ve radyonüklit dağılımlarının belirlenmesi ve bu bentonitlerin inşaat sektöründe yapı ham maddesi veya katkı malzemesi olarak kullanılmasının radyolojik açıdan değerlendirilmesi ile ilgili ayrıntılı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bağlamda bu tezin amacı,

- (1) Ülkemizdeki mevcut bentonit ocaklardan temin edilen bentonit örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinin aktivite derişimlerini ölçmek,
- (2) Bentonit örneklerinin; seramik, çimento ve beton üretiminde katkı ham maddesi olarak kullanılmasını radyolojik açıdan değerlendirmek,
- (3) Bentonit ocaklarında çalışan işçilerin maruz kalabileceğı radyasyon dozunu hesaplamak ve
- (4) Bentonit ocaklarının majör ve minör oksit dağılımlarını belirlemektir.

1.4 Tezin Kapsamı

Türkiye'deki ocaklardan toplanan bentonit örnekleri, bentonit örneklerinin içerdiği majör-minör oksitler, örneklerdeki oksitlerin nitel ve nicel analizleri için kullanılan enerji dağılımlı X-ışını floresans (EDXRF) spektrometresi, bentonitler örneklerindeki doğal radyonüklitlerin (^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K) aktivite derişimlerinin

belirlenmesinde kullanılan yüksek saflıkta germanyum (high purity germanium, HPGe) dedektörlü bir gama-ışını spektrometresi ve bentonit örneklerinin yapı malzemesi olarak kullanılmasından kaynaklanan radyolojik riskin değerlendirilmesi için hesaplanan radyolojik parametreler (aktivite derişim indisi, açık ortamda soğurulan gama doz hızı ve karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu; kapalı ortamda soğurulan gama doz hızı ve karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu ve yaşam boyu kanser riski) bu tez kapsamındadır.

1.5 Tezin Yapısı

Bu tez dört bölümden oluşmuş olup bu bölümlerin içeriği aşağıda belirtilmiştir:

Çalışmanın birinci bölümünde, minerallerin kullanılması, Türkiye'nin mineral rezervi, bentonitler, bentonitlerin kullanılması, doğal radyoaktivite, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalma, bentonitler ile ilgili yapılan literatür çalışmaları, tezin amacı ve tezin kapsamı ile ilgili genel bilgiler verildi.

İkinci bölümde, bentonit mineralinin önemi, bentonitin kullanım alanları, bentonit rezervleri, bentonit örneklerinin toplanması, örneklerin analiz işlemleri için hazırlanması, elektromanyetik radyasyonun madde ile etkileşmesi (fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşum), gama-ışını spektrometrik yöntem, tez kapsamında kullanılan gama-ışın spektrometresi, X-ışını floresans (XRF) spektrometrik yöntem, tez kapsamında kullanılan enerji dağılımlı XRF spektrometresine ilişkin öz bilgi verildi ve okuyucular ayrıntılı bilgi için ilgili literatüre yönlendirildi.

Üçüncü bölümde, yirmi bir bentonit ocağından toplanan her bir bentonit örneğinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite değerleri, her bir bentonit örneği için hesaplanan radyolojik parametre değerleri, her bir ocakta ölçülen gama doz hızı değerleri ve majör-minör oksit değerleri, tablo ve grafik hâlinde sunuldu.

Dördüncü bölümde, bentonit örneklerinde analiz edilen radyonüklitlerin aktivite derişimleri ve oksit derişimleri, yer kabuğu ortalamasıyla karşılaştırıldı. Ayrıca her

bir bentonit örneği için hesaplanan radyolojik parametre değerleri, ölçüt veya azami değerlerler ile karşılaştırıldı ve bazı öneriler sunuldu.



2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Bentonit Mineralinin Önemi

Karmaşık bir yapı ve minerallerden oluşan bentonitler genellikle; sondaj sanayi, döküm sanayi, pelet sanayi, kedi kumu, gübre ve hayvan yemi sanayi kâğıt sanayi, ilaç sanayi, boya sanayi gibi birçok endüstri dalında kullanılan bir malzeme grubunu oluştururlar. Killeri oluşturan mineral yapıları ve kimyasal bileşimlerindeki farklılıklar nedeniyle değişik özellikler gösterirler. Killerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi ve bu killerdeki bazı özelliklerin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar, ticari killerin hangi endüstri dalında verimli ve etkin bir şekilde kullanılması açısından büyük önem arz etmektedir (Malayoğlu, 1995).

Magnezyum ve alüminyumca zengin volkanik lav ve küllerin ayrışmasından oluşan ve yoğun olarak montmorillonitten oluşan killer bentonit olarak adlandırılır. Bentonitin ticari anlamı ise gelişmiş sıvı emici ve koloidal özelliği olan kil demektir. (Akbulut, 1996). Bentonitler magnezyum ve alüminyumca içeriği zengin volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal bozulması veya ayrışması sonucunda oluşurlar (Mitchell ve Soga, 2005). Bentonitin jeolojik özellikleri, kalsiyum, sodyum ve kalsiyum-sodyum montmorillonitlerden oluşmasına göre bölgeden bölgeye değişim göstermektedir (DPT, 2001).

2.2 Bentonitin Kullanım Alanları

2.2.1 Sondaj Sanayi

Bentonitler petrol ve gaz arama amaçlı sondaj sıvılarında, su, maden arama ve çevre izleme kuyuları için küçük çaplı delikler açmak için kullanılan sıvılarda da temel bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Buna ek olarak, sondaj borusunu ve kesme kafasını yağlama ve sondaj deliğinden kolayca çıkarılabilecek şekilde sürtünmeyi azaltmasından dolayı özellikle sondaj uygulamaları için uygundur (Eisenhour, 2006; İpekoğlu vd., 1997).

2.2.2 Döküm Sanayi

Döküm sanayisi, bentonitin en önemli güncel kullanım alanları arasındadır. Motor blokları, fren kampanaları, şanzıman muhafazaları, rögar kapakları, sokak giderleri, pirinç su armatürleri, dökme demir tavalar ve daha fazlası, bentonit içeren dökümhane kalıplarından üretilir. Dünyadaki çoğu demir içeren ve birçok demir dışı dökümhanede bentonit, yaş kum kalıplama olarak bilinen bir işlemde bentonitin koloidal özelliği ve plastisitesi sayesinde bir bağlayıcı madde olarak kullanılır (Akbulut, 1996; Çinku, 1999; Eisenhour, 2006).

2.2.3 Pelet Sanayi

Pelet sanayinde bentonit bir bağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır. Demir cevheri konsantresinin inceliği nakliye sırasında ve yüksek fırında işleme sırasında kullanım sorunları az miktarda bentonit ve suyun ince öğütülmüş demir cevheri konsantresi ile karıştırılması ve ardından karışımın yaklaşık 1 cm çapında küresel topakların üretilmesi için bir peletleyiciden geçirilmesiyle çözülür. Bazı durumlarda, bentonit ile karıştırılmış demir cevheri konsantreleri, briket yapmak için yüksek basınç altında sıkıştırılır. Küresel bentonit üretiminin yaklaşık %20'si demir cevheri peletleme işleminde tüketilmektedir (İpekoğlu vd., 1997).

2.2.4 Adsorban Kil

Na-bentonitin topaklaşan kedi kumu yapmak için ideal olduğu keşfedildi. Na-bentonit, evcil hayvan atıklarını, çöp kutusundan kolayca ve tamamen alınabilen emici kil yığınları içine hapsederek çöp israfını azaltır ve çöp kutularını temiz ve kokusuz tutar. Bentonit, sepiyolit ve atapulgit gibi adsorban özelliğe sahip olduğundan dolayı son yıllarda topaklaşan kedi kumu pazarında önemli bir kullanım alanına sahiptir (Demirel vd., 1995; Driscoll, 1992).

2.2.5 Gübre ve Hayvan Yemi Sanayi

Bentonit genellikle tavuk, hindi, kaz, bıldırcın gibi kümes hayvanlarının yemlerine katılarak yumurta verimleri ve büyüme hızlarının arttırılması için hayvan yem

sanayinde kullanılmaktadır. Büyük baş hayvanlarda yine büyüme hızını arttırmasına ilave olarak hayvan dışkılarının kötü kokularını da gidermektedir. Yemlere katkı maddesi olarak ilave edilen bentonit, sulu yemlerde bulunabilen yüksek derişimli amonyumdaki toksik etkileri azaltarak sindirimi kolaylaştırmaktadır (Ali, 1996; Avcı, 2009; Çinku, 1996; Jalil vd., 1996).

2.2.6 Kâğıt Sanayi

Bentonit, kağıt yapımı sırasında selüloz liflerini topaklaştırmak için katyonik polimerlerle kombinasyon halinde yaygın olarak kullanılır. Bentonit kullanımı, kağıt makinelerinin ıslak ucunda katı madde tutma, drenaj oranı ve düzgün tabaka oluşumu dahil olmak üzere birkaç önemli işlemi geliştirir (Eisenhour, 2006). Ağırılıkça yalnızca %0,2 bentonit eklenmesi, bir kâğıt fabrikasında kâğıt üretimini %30'a kadar artırabilir. Asitle aktive olan bentonitler, tipik olarak üç yapraktan oluşan karbonsuz kopya kâğıdı yapımında kullanılır. Orta ve alt tabakaların üst yüzeyleri, üst iki tabakanın alt taraflarına sabitlenmiş mikrokapsüllü boyalarla reaksiyona giren katı bir asit görevi gören kil ile kaplanmıştır. Üst tabakaya basınç uygulandığında, renksiz boyanın mikrokapsülleri kırılır ve asidik kil ile reaksiyona girerek kalıcı renkli bir boya oluşturur (Avcı, 2009).

2.2.7 Boya Sanayi

Adsorbe özelliği ile bentonit, boyanın içindeki ham maddelerinde kalıcı süspansiyon oluştururlar. Bu sayede bentonit boyanın çökmesini engellediği gibi boyanın uygulanmasından sonra akmasını önlemektedir. Boya sanayinde çalışanlara, katkı maddesi olarak kullanılan bentonit katkısı sayesinde büyük kolaylık sağlanmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bentonit solvent bazlı ve su bazlı boyalarda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Fındıkçı, 2020).

2.2.8 Bentonit Rezervleri

ABD, Rusya, Almanya, Yunanistan, Japonya, İtalya, İngiltere ve İspanya bentonit rezervi bakımından dünyanın en önemli ülkeleridir. Bununla birlikte dünyadaki bentonit rezervlerinin yaklaşık %20'si (370 milyon ton) ise Türkiye'de (Ankara,

Çankırı, Edirne, Artvin, Çorum, Giresun, Konya, Ordu, Tokat ve Trabzon) bulunmaktadır. Tablo 2.1’den de görülebileceği gibi son iki yıldaki dünya bentonit üretimi 18 milyon ton civarındadır. Dünya bentonit üretiminin ülkelere göre dağılımına bakıldığında en önemli bentonit rezervine sahip olan Amerika Birleşik Devletleri üretimde ilk sırayı almaktadır. Hindistan, Çin ve Türkiye üretim sıralamasında Amerika Birleşik Devletlerini takip etmektedir.

Tablo 2.1 Dünyadaki bentonit üretimleri (x1000 ton)(USGS, 2022)

ÜLKE	2020	2021
ABD	4240	4300
Almanya	360	350
Brezilya	217	200
Çekya	226	230
Çin	2500	2500
Hindistan	3500	3500
İran	425	420
İspanya	221	220
Meksika	25	20
Özbekistan	25	20
Türkiye	1500	1700
Ukrayna	180	180
Diğer ülkeler	3480	3500
TOPLAM	18200	18000

Türkiye rezervleri sondaj, döküm ve ağartma bentoniti niteliklerinde olup, toplam rezerv 350.000.000 ton (görünür+muhtemel) olarak verilmiştir (USGS, 2008). Türkiye maden rezervlerinin zenginlik sınıflandırmasında “çok zengin” sınıfında yer almaktadır. Tokat-Reşadiye’de bulunan yataklar, Na-bentonit; Trakya ve Karadeniz bölgesinde bulunan yataklar, Ca-bentonit ve diğer bölgelerde bulunanlar ise ara tip-bentonit yataklarıdır. Türkiye Ca-bentonit yatakları açısından zengin bir ülkedir.

2.3 Bentonit Örneklerinin Toplanması

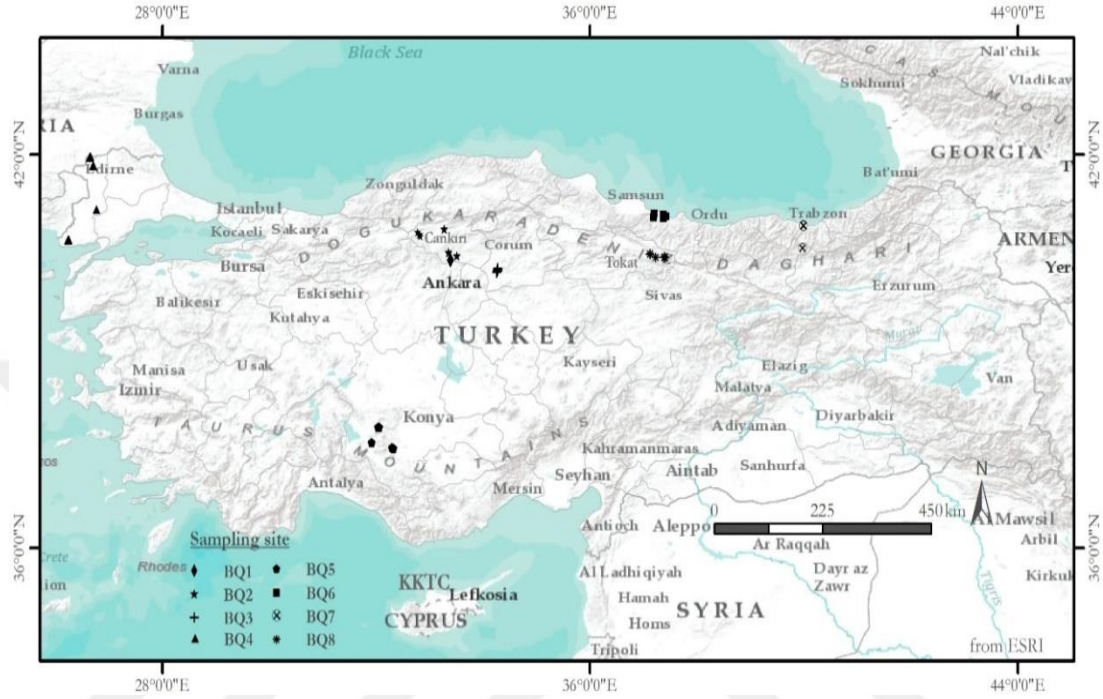
Daha önce de ifade edildiği gibi Türkiye, beyaz bentonitler ve kurutucu dereceli Ca-bentonitler dâhil olmak üzere yaklaşık 370 milyon ton (Mt) bentonit rezervine sahiptir. Türkiye'deki bentonit yataklarının büyük bir kısmı, deniz veya göl ortamlarında depolanan volkanik tüf veya kül formundaki malzemenin alterasyonu sonucu oluşmaktadır (Gül ve Yücel, 2018). Tablo 2.2'de gösterildiği gibi Türkiye'nin Na-bentonit yatakları, Ca-bentonit yataklarına göre daha azdır. Na-bentonit yatakları, Ankara, Çankırı, Çorum ve Tokat illerinde yer alırken, Ca-bentonit yatakları ise Konya, Edirne, Trabzon, Ordu, Giresun ve Balıkesir illerinde bulunmaktadır (Gül ve Yücel, 2018). Tez kapsamında bentonit örnekleri, Harita 2.1'de gösterilen bentonit ocaklarından toplandı.

Tablo 2.2 Bentonit ocakları hakkında bilgi

Ocak kodu	Ocak sayısı	Yer (İl/Bölge)	Bentonit tipi
BQ-1	1	Ankara/ Orta Anadolu	Na-bentonit
BQ-2	4	Çankırı/Orta Anadolu	Na-bentonit
BQ-3	2	Çorum/Karadeniz	Na-bentonit
BQ-4	3	Edirne/Marmara	Ca-bentonit
BQ-5	2	Konya/ Orta Anadolu	Ca-bentonit
BQ-6	4	Ordu/Karadeniz	Ca-bentonit
BQ-7	2	Trabzon/Karadeniz	Ca-bentonit
BQ-8	3	Tokat/Karadeniz	Na-bentonit

Her bir ocağı temsil edecek sayıda bentonit örnekleri, Gieger Müller (G-M) tüplü radyasyon ölçme aleti ile belirlenen havada soğurulan gama doz hızı dikkate alınarak toplandı. Her bir örnek noktasının konumu, Magellan Explorist 110 el tipi GPS cihazı kullanılarak kaydedildi. Kütleleri 1-1,5 kg aralığında değişen bentonitler, ilk olarak örnek hazırlama laboratuvarına getirildi ve daha sonra toplandığı yerlerin koordinatlarını içerecek şekilde Tablo 2.3'de verildiği gibi kodlandı. Fotoğraf 2.1'de

gösterildiği gibi yerden 1 m yükseklikte havada soğurulan gama doz hızı ölçümleri aynı noktada 5 kez tekrarlandı. Her bir noktanın ortalama değeri, ölçülen değerlerin ortalaması alınarak $\mu\text{R/h}$ cinsinden verildi.



Harita 2.1 Bentonit ocaklarının konumları

Tablo 2.3 Bentonit örneklerinin konum bilgisi

Örnek kodu	Yeri	Koordinatlar
BQ-1-1	Kalecik (Ankara) (Hançılı Köyü)	40°22'53,2"K / 33°23'34,4"D
BQ-1-2		40°22'59,8"K / 33°23'36,5"D
BQ-1-3		40°23'11,0"K / 33°23'30,7"D
BQ-1-4		40°23'16,5"K / 33°23'31,6"D
BQ-1-5		40°23'14,6"K / 33°23'33,5"D
BQ-1-6		40°23'0,80"K / 33°23'37,1"D
BQ-1-7		40°23'6,40"K / 33°23'50,2"D
BQ-1-8		40°23'9,60"K / 33°23'53,8"D
BQ-2-1	Kurşunlu (Çankırı)	40°51'35,3"K / 33°16'37,1"D
BQ-2-2		40°51'38,6"K / 33°16'37,2"D
BQ-2-3		40°51'39,4"K / 33°16'34,0"D

Tablo 2.3'ün devamı

BQ-2-4		40°51'34,6"K / 33°15'59,8"D
BQ-2-5		40°45'19,0"K / 32°49'17,5"D
BQ-2-6	Çerkeş (Çankırı) (Karga köyü / Bayındır)	40°46'24,0"K / 32°48'35,2"D
BQ-2-7		40°46'25,4"K / 32°48'34,0"D
BQ-2-8		40°48'54,8"K / 32°46'36,8"D
BQ-2-9		40°49'8,20"K / 32°46'41,9"D
BQ-2-10		40°30'37,3"K / 33°21'11,8"D
BQ-2-11	Şabanözü (Çankırı)	40°30'39,1"K / 33°21'11,5"D
BQ-2-12		40°30'32,8"K / 33°21'27,8"D
BQ-2-13		40°29'18,4"K / 33°21'25,9"D
BQ-2-14		40°27'5,0"K / 33°30'53,60"D
BQ-2-15		40°27'5,80"K / 33°30'53,5"D
BQ-2-16		40°27'5,40"K / 33°30'52,8"D
BQ-2-17	Eldivan (Çankırı) (Küçük Hacıbey Köyü)	40°27'6,10"K / 33°30'52,3"D
BQ-2-18		40°27'5,90"K / 33°30'51,6"D
BQ-2-19		40°27'5,90"K / 33°30'51,1"D
BQ-2-20		40°27'5,50"K / 33°30'50,4"D
BQ-2-21		40°27'5,50"K / 33°30'49,7"D
BQ-2-22		40°26'58,8"K / 33°30'54,6"D
BQ-2-23		40°26'58,2"K / 33°30'52,7"D
BQ-2-24		40°26'54,3"K / 33°30'54,8"D
BQ-3-1		40°14'31,3"K / 34°16'25,9"D
BQ-3-2		40°14'3,90"K / 34°16'25,3"D
BQ-3-3	İmirli (Çorum) (Sungurlu)	40°14'3,40"K / 34°16'24,8"D
BQ-3-4		40°14'32,3"K / 34°16'24,1"D
BQ-3-5		40°15'43,6"K / 34°16'37,8"D
BQ-3-6		40°15'44,2"K / 34°16'37,7"D
BQ-3-7		40°12'08,9"K / 34°15'35,6"D
BQ-3-8	Tatlısu (Çorum) (Sungurlu)	40°12'9,0"K / 34°15'36,60"D
BQ-3-9		40°12'09,3"K / 34°15'36,2"D
BQ-3-10		40°12'10,2"K / 34°15'35,6"D
BQ-3-11		40°12'11,0"K / 34°15'35,7"D

Tablo 2.3'ün devamı

BQ-4-1		40°41'46,0"K / 26°14' 52,9"D
BQ-4-2		40°41'47,0"K / 26°14' 54,2"D
BQ-4-3	Enez (Edirne)	40°41'47,4"K / 26°14' 51,7"D
BQ-4-4		40°41'45,3"K / 26°14' 43,1"D
BQ-4-5		40°41'24,3"K / 26°14' 42,0"D
BQ-4-6		40°41'26,4"K / 26°14' 36,6"D
BQ-4-7		41°09'28,1"K / 26°46' 09,1"D
BQ-4-8		41°09'32,0"K / 26°46' 09,4"D
BQ-4-9	Uzunköprü (Edirne)	41°10'16,4"K / 26°45' 21,0"D
BQ-4-10		41°57'20,4"K / 26°38' 25,1"D
BQ-4-11		41°57'52,6"K / 26°39' 31,2"D
BQ-4-12		41°57'52,7"K / 26°39' 29,3"D
BQ-4-13		41°49'32,5"K / 26°42' 56,6"D
BQ-4-14	Lalapaşa (Edirne)	41°49'33,1"K / 26°42' 54,2"D
BQ-4-15		41°49'38,2"K / 26°43' 60,5"D
BQ-4-16		41°49'36,4"K / 26°42' 58,8"D
BQ-5-1	Seydişehir (Konya)	37°36'13,0"K / 31°55'17,2"D
BQ-5-2	(Çavuşköy)	37°36'58,7"K / 31°55'2,00"D
BQ-5-3		37°50'17,9"K / 32°03'26,4"D
BQ-5-4	Meram (Konya)	37°50'17,8"K / 32°03'26,3"D
BQ-5-5	(Sağlık köyü)	37°50'24,8"K / 32°02'19,8"D
BQ-5-6	(Çomaklar köyü)	37°31'41,8"K / 32°18'1,90"D
BQ-5-7		37°31'10,5"K / 32°19'40,3"D
BQ-6-1	Fatsa (Ordu)	41°03'51,0"K / 37°25'53,5"D
BQ-6-2	(Ahmetler Köyü)	41°03'51,1"K / 37°25'53,2"D
BQ-6-3		41°03'44,6"K / 37°25'56,9"D
BQ-6-4		41°06'24,2"K / 37°12' 15,1"D
BQ-6-5		41°06'23,1"K / 37°12' 16,5"D
BQ-6-6	Ünye (Ordu)	41°06'21,5"K / 37°12' 17,9"D
BQ-6-7	(Göbü Köyü)	41°06'21,4"K / 37°12' 16,3"D

Tablo 2.3'ün devamı

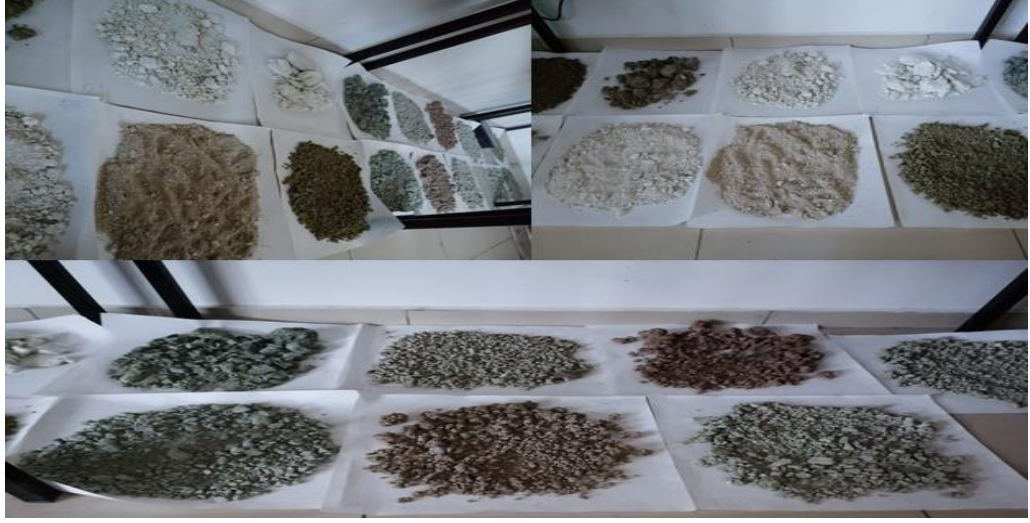
BQ-6-8	Ünye (Ordu) (İnkur Köyü)	41°02'47,4"K / 37°12' 06,9"D
BQ-6-9		41°02'47,2"K / 37°12' 06,1"D
BQ-6-10		41°02'46,8"K / 37°12' 05,4"D
BQ-6-11	Ünye (Ordu) (Gölcüğe Köyü)	41°05' 15,6"K / 37°23' 01,4"D
BQ-6-12		41°05' 15,0"K / 37°23' 2,90"D
BQ-6-13		41°05' 16,2"K / 37°23' 2,70"D
BQ-6-14		41°02'08,6"K / 37°22' 47,8"D
BQ-6-15		41°02'06,9"K / 37°22' 46,2"D
BQ-6-16		41°02'05,0"K / 37°22' 46,3"D
BQ-6-17		41°02'4,9"K / 37°22' 43,10"D
BQ-6-18		41°02'06,2"K / 37°22' 43,2"D
BQ-6-19		41°02'7,4"K / 37°22' 43,30"D
BQ-6-20		41°02'08,2"K / 37°22' 43,7"D
BQ-7-1	Yomra (Trabzon) (Yenice)	40°54'38,0"K / 39°59'20,7"D
BQ-7-2		40°54'15,2"K / 39°59'38,6"D
BQ-7-3	Arsin (Trabzon)	40°34'17,5"K / 39°58'40,4"D
BQ-8-1	Niksar (Tokat) (Yazıcık)	40°28'40,1"K / 37°08' 10,0"D
BQ-8-2		40°28'38,3"K / 37°08' 9,50"D
BQ-8-3		40°28'48,3"K / 37°07' 50,6"D
BQ-8-4		40°28'48,9"K / 37°07' 52,0"D
BQ-8-5	Reşadiye (Tokat) (Akdoğan Köyü)	40°25'59,0"K / 37°23' 54,4"D
BQ-8-6		40°26'12,7"K / 37°24' 13,4"D
BQ-8-7		40°25'55,4"K / 37°23' 46,7"D
BQ-8-8		40°25'56,7"K / 37°23' 47,2"D
BQ-8-9		40°25'53,2"K / 37°24' 06,3"D
BQ-8-10		40°25'55,3"K / 37°24' 7,20"D
BQ-8-11	Reşadiye (Tokat) (Büşürüm)	40°25'37,7"K / 27°13' 49,8"D



Fotoğraf 2.1 Bentonit örneklerinin toplanması

2.4 Bentonit Örneklerinin Analiz İşlemleri İçin Hazırlanması

Kastamonu Üniversitesinde bulunan Merkezi Araştırma Laboratuvarında toplanmış olan bentonit örnekleri atmosfer ortamında 4 hafta boyunca kurutulmaya bırakıldı (Fotoğraf 2.2). Bentonit örneklerindeki nemi uzaklaştırmak amacıyla örnekler, sıcaklığı 110 °C olan etüvde 5-10 saat boyunca kurutuldu.



Fotoğraf 2.2 Bentonit örneklerinin kurutulması



Fotoğraf 2.3 Ölçme işlemi için hazırlanan bentonit örnekleri

Kurutulan bentonit örnekleri, yüksek saflıkta germanyum dedektörü verimi kalibrasyonunda kullanılan sertifikalı uranyum (RGU-1), toryum (RGTh-1) ve potasyum (RGK-1) referans malzemeleriyle benzer geometriye gelebilmesi için

öğütülerek toz hâle getirildi. Daha sonra örnekler, gözenek büyüklüğü 1 mm olan elekten geçirildi ve ebatları 5x5,5 cm olan kaplara konulup tartıldı. Kaplar, radon gazının kaçmasını engellemek amacıyla sızdırmaz bir şekilde parafilm ile kapatıldı. Kapatıldıktan sonra radyum (^{226}Ra) ile radyoaktif ürünlerin çekirdeği arasındaki kalıcı dengeye ulaşması için 4 hafta bekletildi. Radyoaktivite ölçme işlemi için hazır duruma getirilen bentonit örnekleri, Fotoğraf 2.3'te gösterildi.

2.5 Radyoaktivite ile İlgili Temel Bilgi

Bu bölümde, radyoaktivite, radyoaktif kaynaklar, iyonlaştırıcı radyasyon ile iyonlaştırıcı radyasyonun madde ile etkileşimi, radyasyonun biyolojik etkileri, radyasyon doz birimlerine ilişkin bilgiler verildi ve ayrıntılı bilgiler için okuyucu ilgili kaynaklara yönlendirildi.

2.5.1 Radyoaktivite

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin, daha kararlı bir duruma gelebilmek için kendiliğinden ve rastgele bir bozunuma uğrayarak yeni elementlerin oluşumuyla sonuçlanan nükleer dönüşümleri olarak tanımlanabilir (Krane, 1987). Bu tür kararsız çekirdek, radyonüklit veya radyoizotop olarak isimlendirilir. Genel olarak radyoaktif bozunum süreci, alfa, beta (elektron veya pozitron taneciği yayınlanması), gama ve elektronunun yakalanması ile karakterize edilir. Radyoaktivite, radyonüklitin kimyasal ve fiziksel durumlarından bağımsızdır; sadece nükleer faktörlerle belirlenir ve ilgili radyonüklite özgüdür (Sultan, 2020).

Radyoaktivite basınç, sıcaklık ve nem gibi kontrol edemeyeceğimiz, yavaşlatamayacağımız veya durduramayacağımız dış parametrelerden ve maddenin katı, sıvı ve gaz olma hâlinden bağımsız olarak azalan bir tempo ile süre gelen fiziksel bir olaydır (Krane, 1987). Bir t zaman aralığında bir örnekte N tane radyoaktif çekirdek mevcutsa ve örnekte yeni çekirdek eklemesi söz konusu değilse, bir dt süresince bozunuma uğrayan çekirdek sayısı dN , N ile orantılı olup

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

denklemini ile bulunur. Buradaki, λ ; bozunum sabitini ifade eder. (2.1) denkleminin sonucundan,

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

radioaktif bozunum denklemini bulunur ve radioaktif bozunum yasası olarak adlandırılır. Buradaki, $N(t)$; t zaman aralığında bir örnek içindeki radioaktif çekirdek sayısı, N_0 ; başlangıç anında yani $t=0$ olduğu andaki çekirdek sayısıdır. Başlangıç anındaki çekirdek sayısı, bozunum sürecinde yarıya düşmesi için geçen süre yarılanma süresi olarak isimlendirilir ve (2.2) denkleminde, N yerine $N_0/2$ kullanıldığında, yarılanma süresi (T veya $T_{1/2}$),

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

ifadesiyle belirlenmektedir. Kararsız çekirdeğin, bozunum sürecinde geçirdiği ortalama süre ortalama ömür olarak isimlendirilip τ ile gösterilir ve (2.4) denklemini ile ifade edilir (Krane, 1987):

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot \left[\frac{dN}{dt} \right] \cdot dt}{\int_0^{\infty} \left[\frac{dN}{dt} \right] \cdot dt} \quad (2.4)$$

Paydadaki terimden toplam bozunum sayısı bulunur, integralinin alınmasıyla ortalama ömür,

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.5)$$

denklemleriyle bozunum sabiti tersi ile ifade edilir (Krane,1987). (2.2) denkleminin diferansiyeli alınması sonucunda, Aktivite (AC),

$$AC = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

denklemleri ile ifade edilir. Aktivite (2.7)'de verilen denklem kullanılarak bulunabilir (Krane, 1987).

$$AC = \lambda \cdot N(t) = AC_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

Buradaki, AC_0 başlangıç anındaki yani $t=0$ olduğu andaki aktivite olup λN_0 'a eşit olur. Herhangi bir radyoaktif örnekteki aktivite birim zaman başına örnekte bulunan çekirdeklerin bozunum sayısı olup birim olarak bozunum/s şeklinde ifade edilir. Aktivite birimlerinden bir diğeri bir gram radyumun aktivitesine eşdeğer olan curie (Ci) olup

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ bozunum/s} \quad (2.8)$$

ifadesiyle verilir. Laboratuvar ortamlarındaki deneylerde genellikle kullanılmakta olan radyoaktif kaynak aktivite değerleri, μCi - mCi aralığında olmalıdır. Aktivitenin uluslararası birimi, saniye başına bozunum olarak tanımlanan becquerel (Bq) dir ve

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ bozunum/s} \quad (2.9)$$

ifadesi ile verilir. Aktivite derişimi kütle veya hacim ile ilgilidir ve katılar için Bq/kg, sıvı ve gazlar için ise Bq/L veya Bq/m³ ile verilir.

Radyoaktif bozunum yasası, yalnız kararsız bir çekirdek kararlı bir bozunum çekirdeğe dönüştüğünde tek bir bozunum sürecinde geçerli olmaktadır. Ancak bozunum ürünü olan çekirdeğin kararsız durumda olmasına radyoaktif bozunum serisi denir ve bu durum, aşağıda verilen denklem ile ifade edilir.

$$\frac{dN}{dt} = \lambda_{i-1} \cdot N_{i-1} - \lambda_i \cdot N_i \quad (2.10)$$

Buradaki, N_i ; t zamanındaki, i . çekirdekteki radyoaktif çekirdek sayısını ve λ_i ; i . çekirdek bozunum sabitini ifade eder (Gruber, 2009). Bir radyoaktif seride, ana-bozunum ürünü dönüşümünün ara adımından sonra bozunum denklemi,

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot a_{10} (e^{-\lambda_1 \cdot t} - e^{-\lambda_2 \cdot t}) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot a_{10} \left(e^{-\frac{\ln 2}{T_1} \cdot t} - e^{-\frac{\ln 2}{T_2} \cdot t} \right) \quad (2.11)$$

İle ifade edilir. Çoklu çekirdeklerde Bateman denklemi uygulandığında,

$$a_n = a_{10} \cdot T_1 \left(K_1 e^{-\frac{\ln 2}{T_1} \cdot t} + K_2 e^{-\frac{\ln 2}{T_2} \cdot t} + \dots + K_n e^{-\frac{\ln 2}{T_n} \cdot t} \right) \quad (2.12)$$

$$K_n = \frac{T_n^{n-2}}{(T_n - T_1) \cdot (T_n - T_2) \dots (T_n - T_{n-1})} \quad (2.13)$$

denklemleri elde edilir (Gruber, 2009). Buradaki a_n ; n . çekirdek aktivitesini, a_{10} ; $t=0$ başlangıç anında ana çekirdek aktivitesini, $\lambda_1 \dots n$; $1 \dots n$. çekirdek bozunum sabiti ve $T_1 \dots n$; $1 \dots n$ çekirdek yarılanma süresini ifade eder. 2.13’de verilen denklem, ana çekirdek ile bozunum ürünü olan çekirdeklerin yarılanma sürelerine bağlı olarak radyoaktif dengeye (a_1/a_2 =sabit) ulaşma zamanını gösterir.

2.5.2 Radyoaktif Bozunum süreçleri

Kararsız çekirdekler, enerji parçacık yayınlarak kararlı duruma geçebilir, ayrıca uyarılmış durumdaki çekirdekte elektromanyetik radyasyon şeklinde enerji yayınlarak taban duruma geçebilir. Radyoaktivite ile ilgili sürekli bozunum çeşitleri araştırılmıştır. Sonuç olarak üç doğal radyoaktif bozunum (alfa (α), beta (β) ve gama (γ)) zincirinde meydana gelen radyoaktif geçiş türleri öne çıkmaktadır (Krane, 1987). Alfa ve beta radyoaktif bozunum sürecinde kararsız bir çekirdek, bir

α veya β parçacığı yayınlamak daha kararlı duruma geçmek ister. Gama radyoaktif bozunum sürecinde, alfa veya beta bozunumu sonucunda uyarılmış duruma ulaşmış bir çekirdek, γ - ışını (radyasyonu) yayınlamak nükleer özelliğini kaybetmeden taban duruma geçiş yapar.

Tüm bozunum modlarında ortak bir özellik, iyonlaştırıcı radyasyon yayınlanmasıdır, yani serbest bırakılan parçacıkların veya fotonların enerjisi, elektronları sırasıyla atomlardan ve moleküllerden uzaklaştırmaya yetecek kadar yüksektir.

Alfa tanecikleri incelendiğinde, iki nötron ve iki protondan helyum atomunun çekirdeğidir. Alfa bozunumu, genellikle ağır çekirdeklerde ($A \geq 210$ olan çekirdekler) etkin olan Coulomb itmesi etkisi ile oluşmaktadır. Coulomb itme kuvveti, proton sayısının karesi (Z^2) ile yükselirken kütle numarası (A) ile de yükselir. Bir alfa taneciği kendiliğinden yayınlanırsa,



ile ifade edilebilir. Buradaki ifadede, X; başlangıçtaki çekirdeğin kimyasal simgesi ve Y; nihai çekirdeğin kimyasal simgesidir. Alfa bozunumunda, başlangıçtaki çekirdeğin proton sayısı ile nötron sayısı iki azalırken kütle numarası dört azalmaktadır. Gerçekleşen bu süreçte, nötron sayıları, proton sayıları, enerji, doğrusal ve açısal momentum korunmaktadır. Örneğin ${}^{226}\text{Ra}$ 'nın α bozunum yapıp 2.15'de verilen tepkimeyle kimyasal olarak tepkimeye girmeyen radyoaktif radon (${}^{222}\text{Rn}$) gazını oluşturmaktadır. (Temirci, 2017).



Beta bozunumu incelendiğinde, başlangıçtaki çekirdeğin proton sayısı ve nötron sayısı değişirken kütle numarası değişmez. Beta bozunumunda, bir proton nötrona dönüşerek nötron sayısını, nötron protona dönüşerek proton sayısını artırabilir. Beta bozunumu aşağıda verildiği gibi farklı şekillerde gerçekleşmektedir:

$$(1) \quad {}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z+1} Y_{N-1} + \beta^-(e^-) + \bar{\nu} \quad n \rightarrow p + e^- \quad (2.16)$$

$$(2) \quad {}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1} + \beta^+(e^+) + \nu \quad p \rightarrow n + e^+ \quad (2.17)$$

$$(3) \quad {}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1} + \nu \quad p + e^- \rightarrow n \quad (2.18)$$

verilen tepkimelerde 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 adlandırılır buna örnek olarak 2.19'deki tepkime gösterilebilir.

$${}^{210}_{82} \text{Pb} \rightarrow {}^{210}_{83} \text{Bi} + e^- + \bar{\nu} \quad T_{1/2} = 22,3 \text{ yıl} \quad (2.19)$$

(2)'de verilen bozunum süreci, pozitif beta (β^+) bozunumu veya pozitron bozunumu olarak adlandırılır buna örnek olarak 2.20'deki tepkime gösterilebilir.

$${}^{25}_{13} \text{Al} \rightarrow {}^{25}_{12} \text{Mg} + e^+ + \nu \quad T_{1/2} = 7,2 \text{ saat} \quad (2.20)$$

(3)'te verilen bozunum süreci, elektron yakalama (EY) bozunumu olarak adlandırılır buna örnek olarak 2.21'deki tepkime gösterilebilir.

$${}^7_4 \text{Be} \rightarrow {}^7_3 \text{Li} + \nu \quad T_{1/2} = 53,3 \text{ dakika} \quad (2.21)$$

Gama bozunumu sırasında uyarılmış halde bulunan çekirdek, daha düşük seviyeye veya taban yani uyarılmamış duruma geçebilmek için, nükleer durumlarla arasındaki enerji farkına eşit bir enerjide gama-ışını yayınlamaktadır. Gama-ışını yayını, uyarılmış durumlarda olan ve kütle numarası beşten büyük çekirdeklerin hepsinde gözlenebilir (Krane, 1987; Temirci, 2017).

2.5.3 Radyoaktif Kaynaklar

Radyoaktif kaynaklar, yapay ve doğal radyoaktif kaynaklar olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Temirci, 2017; UNSCEAR, 2000). Bir kişinin doğal ve yapay kaynaklardan

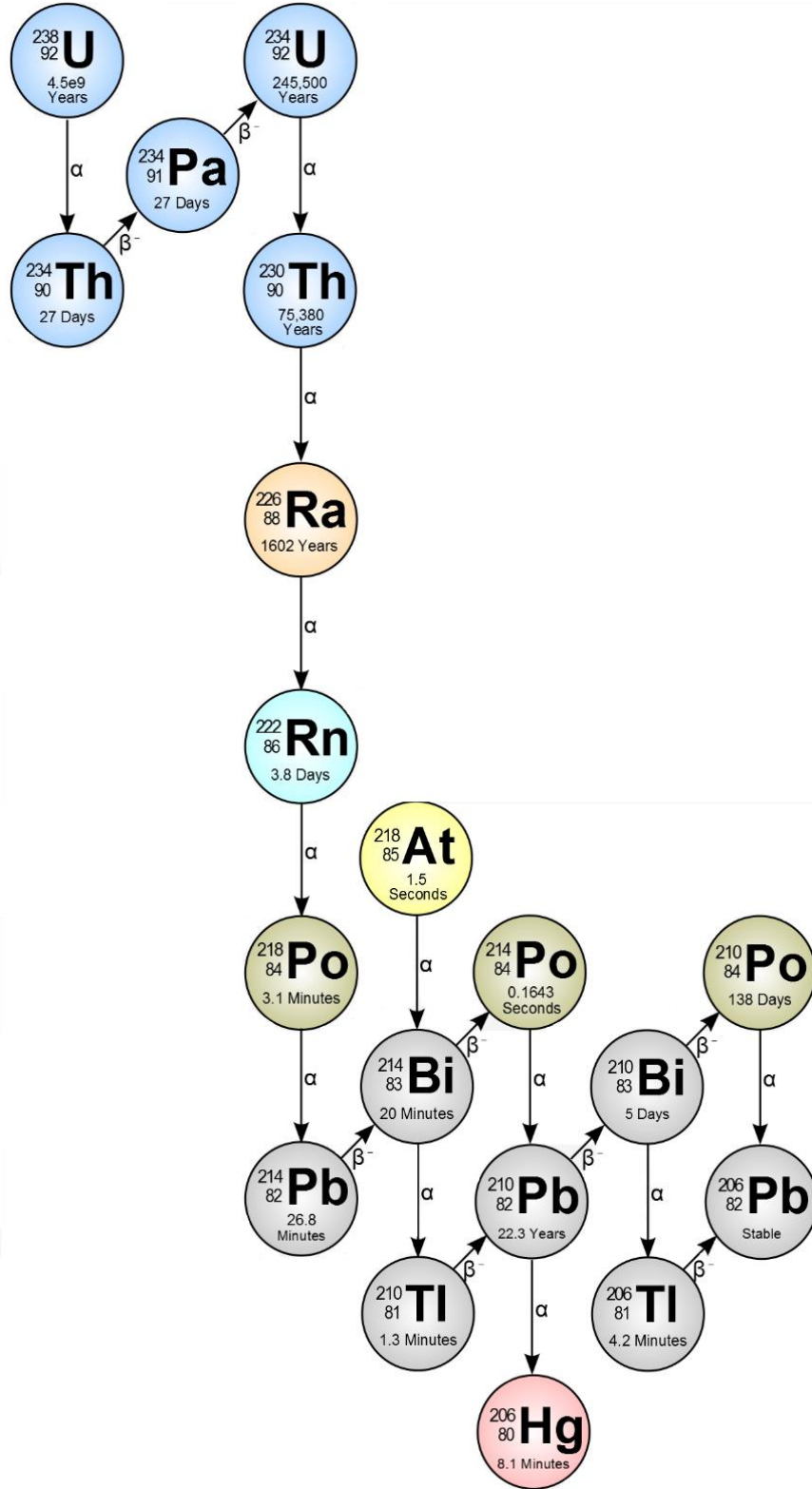
yayınlanan iyonlaştırıcı radyasyona bağlı olarak almış olduğu ortalama yıllık etkin radyasyon dozu, 3 mSv'tir. Bu ortalama radyasyon dozunun yaklaşık %80'i (2,4 mSv'i) doğal radyoaktif kaynaklardan, yaklaşık %20'si (0,6 mSv'i) ise yapay radyoaktif kaynaklardan ileri gelmektedir. (UNSCEAR, 2008).

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2' de Uranyum serisi ve bozunum ürünleri ile toryum serisi ve bozunum ürünleri gösterilmektedir. Doğal radyoaktif serisinde yer alan radyonüklitlerin yanı sıra ^{40}K 'ın dışında Tablo 2.4'de verilen radyonüklitlerin iç ve dış ışınlamaya katkıları çok düşük seviyededir.

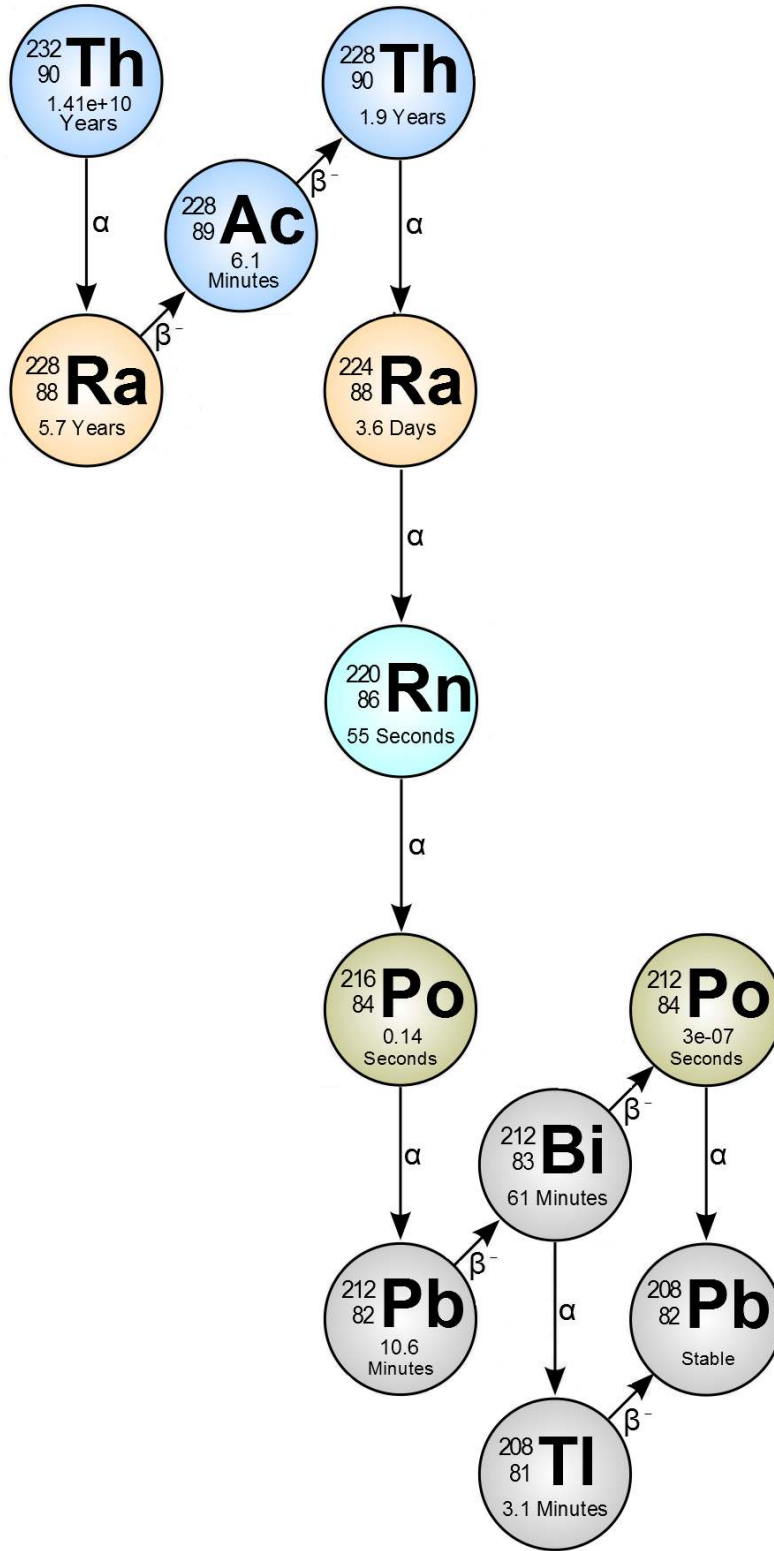
Yapay radyoaktif kaynakları, (1) tıbbi kaynaklar, hastalıkların teşhisinde kullanılan X-ışını (röntgen) makineleri ile kanser gibi hastalıkların teşhisi ve tedavisi için nükleer tıpta kullanılan radyonüklitler, (2) atmosferik nükleer silah deneyleri ve nükleer yakıt döngüsü (nükleer enerji, santral kazaları) sonrasında doğrudan atmosfere salınan radyonüklitlerden oluşur (Alzaridi, 2020; Özçitak, 2012).

Tablo 2.4 Doğal radyoaktif serilere ait olmayan radyonüklitler

Radyonüklit	Yayınlanan radyasyon	Yarılanma süresi (yıl)	Yer kabuğu aktivite derişimi (Bq/kg)
^{40}K	β, γ	$1,26 \times 10^9$	$6,3 \times 10^2$
^{87}Rb	β	$4,8 \times 10^{10}$	7×10^1
^{147}Sm	α	$1,05 \times 10^{11}$	7×10^{-1}
^{176}Lu	β^-, γ	$2,20 \times 10^{10}$	4×10^{-2}
^{138}La	β, γ	$1,12 \times 10^{11}$	2×10^{-2}



Şekil 2.1 Uranyum radyoaktif serisi (Özçıtak, 2012)

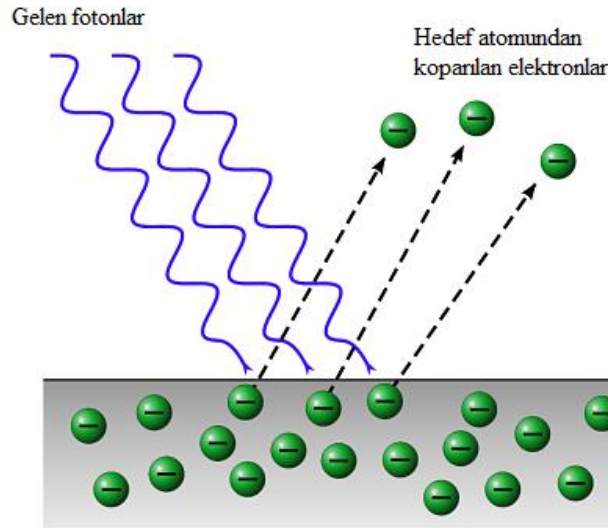


Şekil 2.2 Toryum radyoaktif serisi (Özçıtak, 2012)

2.5.4 Elektromanyetik Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi

Gama ve X-ışınının, maddeyle farklı şekillerde etkileşme süreçlerinin olduğu bilinmektedir. Ancak radyasyon ölçümleri için bu etkileşim süreçlerinden, en önemli olan üç tanesi Compton saçılması, çift oluşum ve fotoelektrik olaydır. Gama ışınlarının maddeyle olan baskın etkileşim tarzı, gelen fotonların enerjisine ve etkileştikleri maddenin atom sayısına bağlıdır. Düşük enerjiler için ve atom numarası yüksek olan malzemelerde fotoelektrik olay etkileşim süreçleri, orta enerjiler için ve atom numarası düşük olan malzemelerde Compton saçılması etkileşim süreçleri, çok yüksek enerjiler için ise çift oluşum etkileşim süreçleri ön plana çıkmaktadır (Gillmore, 2008).

Fotoelektrik olayda, hedefteki malzeme atomları ile gama ışını etkileşim durumunda bütün enerji elektronlara aktarılabilir. Foton elektronu bağlı bulunduğu seviyeden çıkarabilecek kadar enerjiye sahipse, foton tamamen soğrulabilir ve elektron da belirli bir enerjiyle saçılabilir. Bu olaya fotoelektrik olay denir ve Şekil 2.3'te verilmiştir. Etkileşim yalnız serbest elektronla gerçekleşmeyip, bütün olarak atom ile de gerçekleşmektedir (Arıcı, 2012).



Şekil 2.3 Fotoelektrik olay (Temirci, 2017)

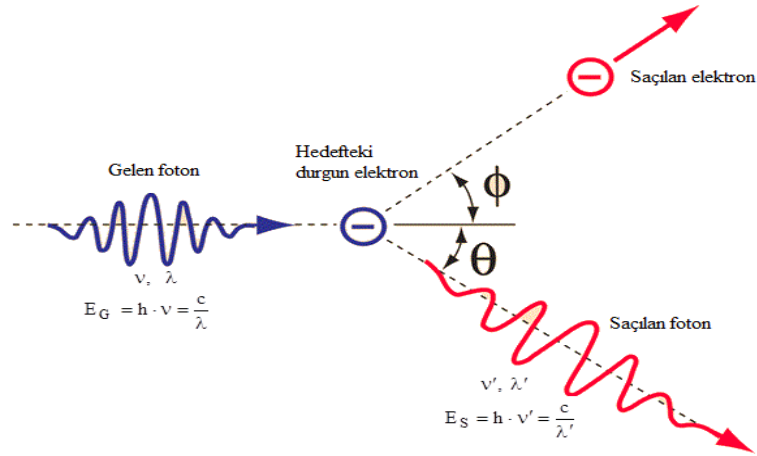
Yeterli enerjisi bulunan X-ışını ve gama ışını için fotoelektron, atoma en zayıf halde bağlı durumda olduğu K kabuğundan fırlatılan bir elektrondur, bu durumda fotoelektron enerjisi,

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.22)$$

denklemleri ile ifade edilir. Buradaki, ν , gelen ışın frekansı; h , Planck sabiti ve E_b : Fotoelektronun bağlanma enerjisini belirtir. Birkaç yüz keV'den daha yüksek enerjideki gama ışını ve X ışını için fotoelektronlar, özgün foton enerjisinin büyük bir kısmına sahip olmaktadır. Foto elektrona ek olarak etkileşim aynı zamanda elektron tabakasındaki boşluk olan iyonlaşmış soğurucu atomu meydana getirmektedir. Burada oluşan elektron boşluğunun hızlı bir şekilde doldurulması için, ortamdaki serbest bir elektron yakalanmalı ve/veya atomdaki elektron tabakalarında bulunan elektronlar yeniden düzenlenmelidir. Sonuçta bir veya daha fazla karakteristik X ışınları yayınlanır (Temirci, 2017).

Genel olarak fotoelektrik olayda, belirli bir materyale gelen radyasyonun sıklığı için, fotoelektronların fırlatma hızları ile gelen radyasyon yoğunluğu doğru orantılı olur. Ayrıca belirli olan malzeme için, herhangi bir fotoelektronun yayılmayacağı belirli bir asgari radyasyon sıklığı mevcuttur. Buradaki frekans “eşik frekansı” olarak adlandırılır. Eşik frekansı üzerinde, yayılan fotoelektronun en yüksek kinetik enerjisi, gelen radyasyonun yoğunluğundan bağımsız olur, fakat frekansa bağlıdır (Angüner, 2008; Knoll, 2000).

Compton Saçılması atomun hemen hemen serbest olan herhangi dış yörüngesindeki bir elektronun, enerjisi kendi enerjisinden çok daha yüksek enerjili bir foton ile çarpışması olayıdır. Compton saçılması sürecinde, gelen X ışını veya gama ışınıyla soğurucu malzemedeki atomun bir elektronu arasında gerçekleşmektedir. Şekil 2.4'den görülebileceği gibi gelen foton özgün yönüne göre bir θ açısıyla saçılmaktadır. Foton bir kısım enerjisini saçılma başlangıcında hareketsiz olduğu kabul edilmiş elektrona aktarır bir ϕ açısı ile saçılmasını sağlamış olur (Knoll, 2000).



Şekil 2.4 Compton saçılması (Temirci, 2017)

Enerjinin aktarım ifadesiyle herhangi bir etkileşimdeki açısını momentum ve enerjinin korunum denklemleriyle kolayca hesaplanır. Saçılan fotondaki enerji,

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 \cdot c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.23)$$

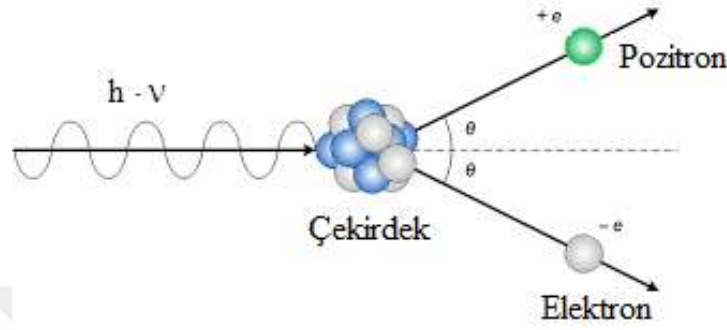
denklemini ile ifade edilir. Buradaki, $h\nu'$, saçılan foton enerjisini; ν' , saçılan foton frekansını, $h\nu$, gelen foton enerjisini; ν , gelen foton frekansını; $m_0 c^2$, elektrondaki durgun kütle enerjisini (0,511 MeV) ve θ ise gelen fotonun geliş açısına bağlı olan saçılma açısını ifade eder. Diğer bir ifadeyle Compton kayması ($\Delta\lambda$), saçılan foton dalga boyu (λ_S) ile gelen foton dalga boyu (λ_G) arasında meydana gelen farkı,

$$\lambda_S - \lambda_G = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 \cdot c} (1 - \cos \theta) \quad (2.24)$$

denklemini ile ifade edilir. Soğurucu malzemede bulunan atom başına Compton saçılması olasılığı, hedef atomlardaki elektron sayısına bağlı olup atom numarası ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır (Temirci, 2017).

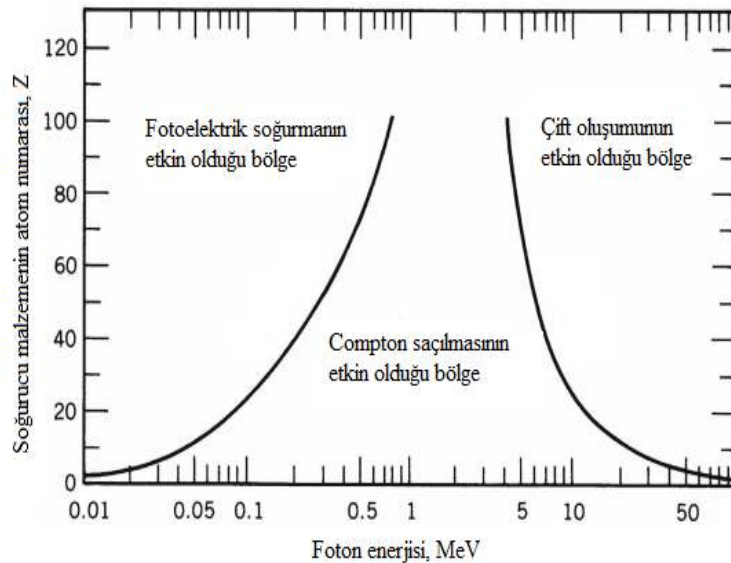
Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, gama ışınları hedefteki malzeme elektronları veya çekirdek elektrik alanı ile etkileşip, elektrik alanın altında bir elektron ve pozitron çifti üretmesi olayına çift oluşum denir. Gelen foton enerjisi bir elektrondaki durgun

kütle enerjisi 511 keV'den iki kat daha büyük olursa, çift oluşum olayının gerçekleşmesi enerjik olarak muhtemeldir. Etkileşim olayının gerçekleşme olasılığı, fotonun enerjisi birkaç yüz keV'e gelene kadar çok zayıftır ve bu nedenle çift oluşum genellikle yüksek enerjiye sahip fotonlarda etkindir. (Knoll, 2000; Krane, 2001).



Şekil 2.5 Çift oluşum

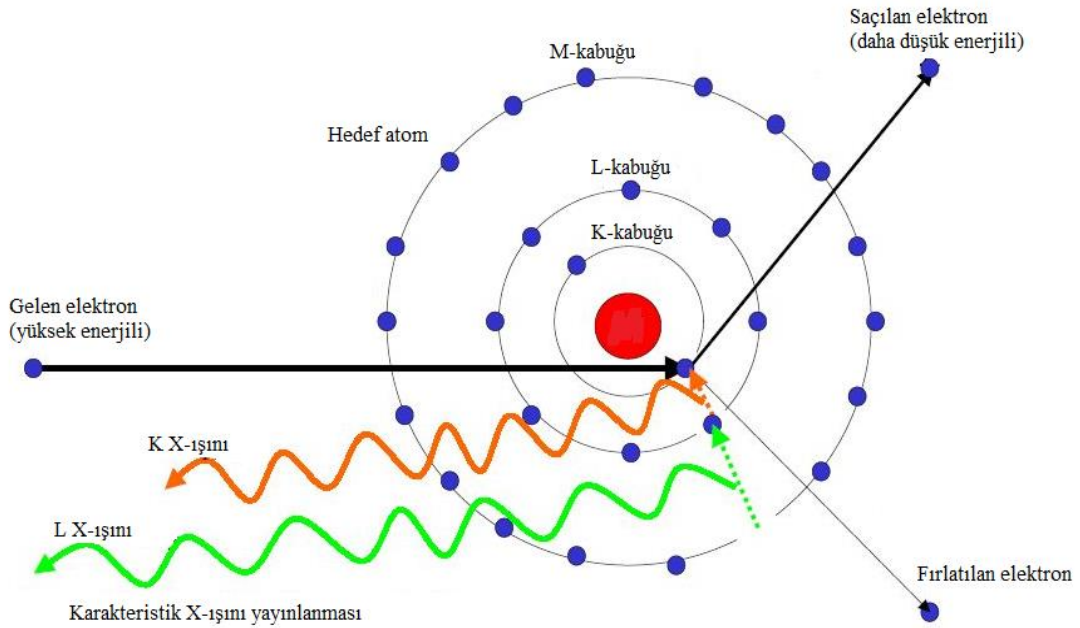
Bahsedilen bu üç etkileşim süreçleri Grafik 2.1'de verildiği gibi her bir soğurucu malzemeler farklı enerji aralıklarında etkili olabilirler. Grafik 2.1'den gösterilmiş olan soldaki çizgi, fotoelektrik soğurma ile Compton saçılması olasılıklarının, soğurucu malzemedeki atom sayısına bağlı olarak eşit olduğu enerji değerini ifade eder. Sağdaki çizgi, Compton saçılmasıyla çift oluşum olasılıklarının, soğurucu malzemedeki atom sayısına bağlı olarak eşit olduğu enerji değerini ifade eder (Temirci, 2017).



Grafik 2.1 Foton etkileşiminin bağlı önemi (Knoll, 2000)

2.5.5 Karakteristik X-ışınlarının Oluşumu

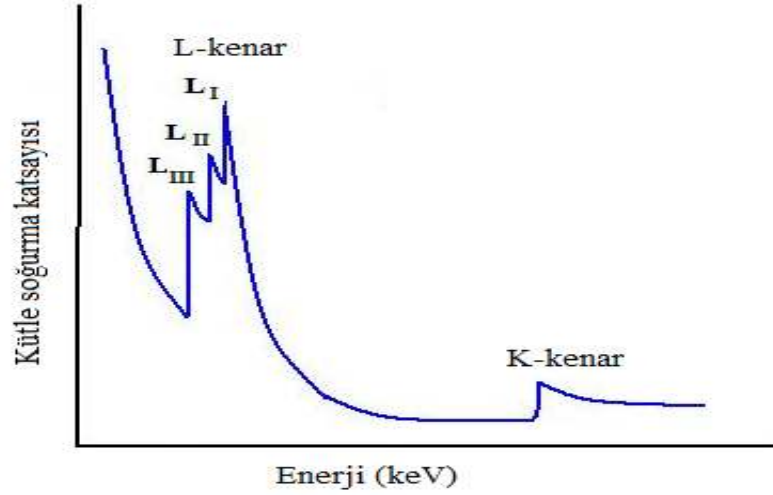
Atom çekirdeğinde içten dış tarafa elektronların var olduğu kabuk ve/veya tabakalar mevcuttur. Bu kabuklar K kabuk, L kabuk ve M kabuk gibi isimler alırlar. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi Gama fotonu, X-ışını fotonu, yeterli enerjisi bulunan elektronlar, elektromanyetik radyasyon veya alfa gibi enerjik tanecikler hedefteki madde atomları ile etkileşim gerçekleştirdiğinde, atomdan elektronlar koparabilir. Böylece elektron hangi kabuktan koparıldıysa, o kabukta bir boşluk oluşmuş olur ve kararsız atom daha yüksek enerjili seviyeye uyarılmış olur. Atom kararlı duruma gelebilmek nedeniyle oluşan bu elektron boşluğu daha dıştaki kabukta bulunan elektron ile doldurulur. Bu boşluğun doldurulması sırasında meydana gelen fazla enerji karakteristik X ışını fotonu yayınlar ve spektrumda bu bir çizgi olarak görülmektedir. Tüm atomların kendisine ait sahip oldukları enerji seviyelerinden, yayınlanan radyasyon da, bu atomun karakteristiğini temsil eder (Brouwer, 2013; Yıldırım, 2018).



Şekil 2.6 Karakteristik X-ışınının oluşması (Brouwer, 2013; Yıldırım, 2018)

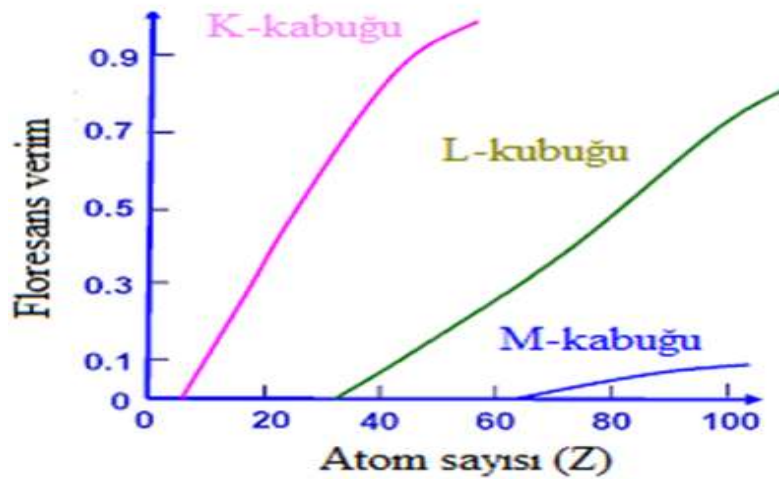
Gelen fotonlardaki enerji, bağlama enerjisinden daha küçük ise, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi K kabuğuna karşılık gelen K kenarı ile L kabuğuna karşılık gelen L kenarı benzeri kenarlar görülebilmektedir (Garad, 2019; Yıldırım, 2018). Şekil 2.8'de gösterildiği gibi K, L ve M kabuklarının flüoresans verimi, atom sayısının bir

fonksiyonu olarak değişir. Yüksek enerjiler keskin şekilde soğurulurken düşük flüoresans oluşturur. Hafif elementlerdeki flüoresans verimi düşük olmasından dolayı ölçümleri diğer elementlerden zordur. Farklı çizgileri göstermek için Seigbahn notasyonu bu çizgileri göstermenin yollarından birisidir.

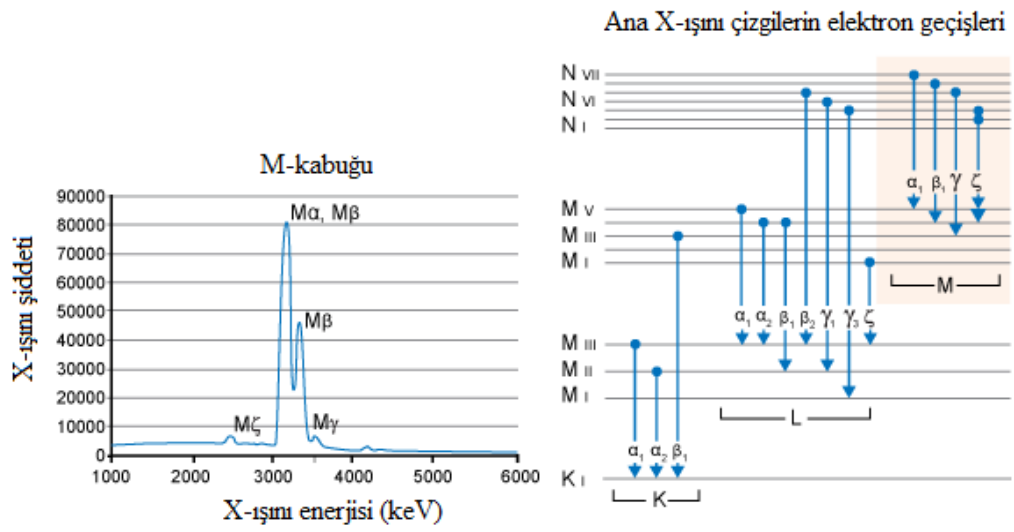
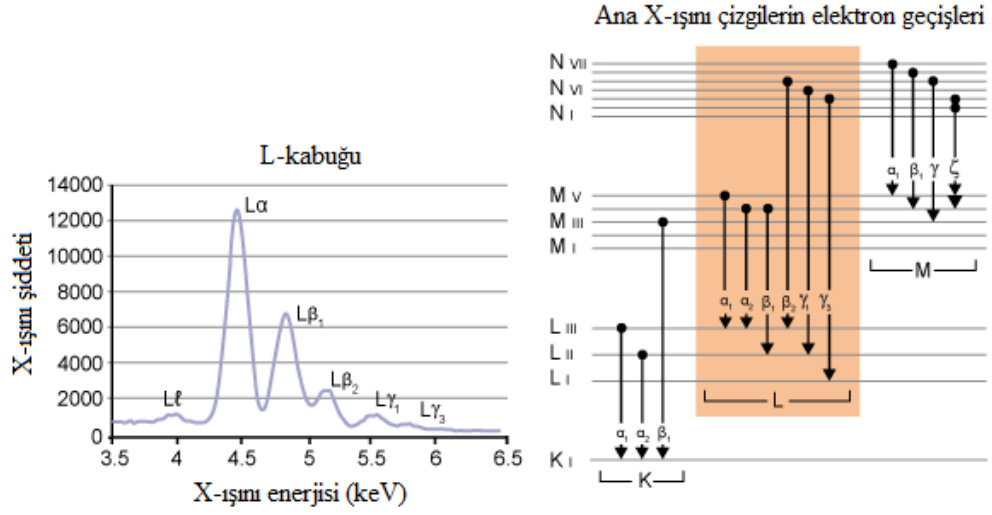
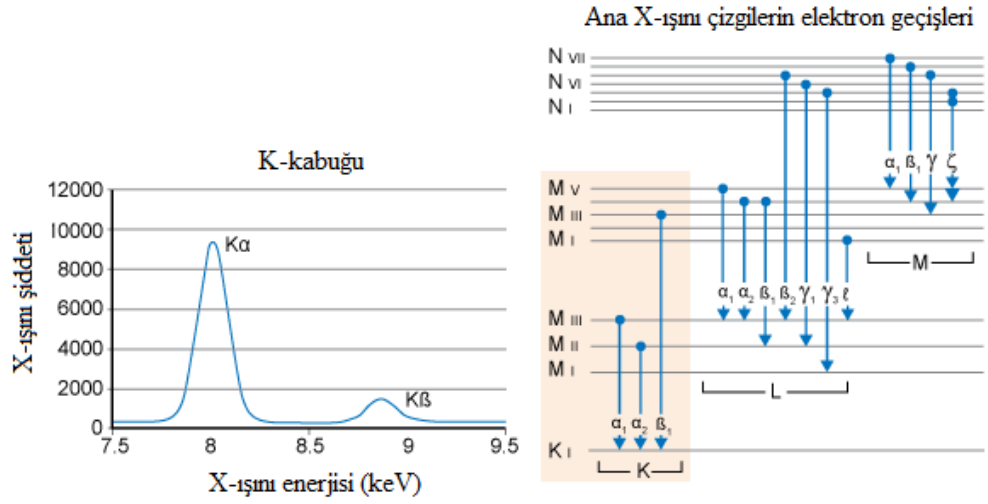


Şekil 2.7 Enerjiye karşı soğurulma (Brouwer, 2013; Yıldırım, 2018)

Element sembolünü takip eden kabuk ismi ile bir çizgiyi Seigbahn notasyonu göstermektedir. Başlangıçtaki elektron boşluğu, bağlı olarak çizgi şiddetini ifade eden Yunan harfleri ile gösterilmektedir. Geçişler ve bunlara eşlik eden notasyonlar, Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Yıldırım, 2018).



Şekil 2.8 K, L ve M elektronları için flüoresans verim (Yıldırım, 2018)



Şekil 2.9 Ana çizgiler ve elektron geçişleri (Yıldırım, 2018)

2.6 Analiz Yöntemleri

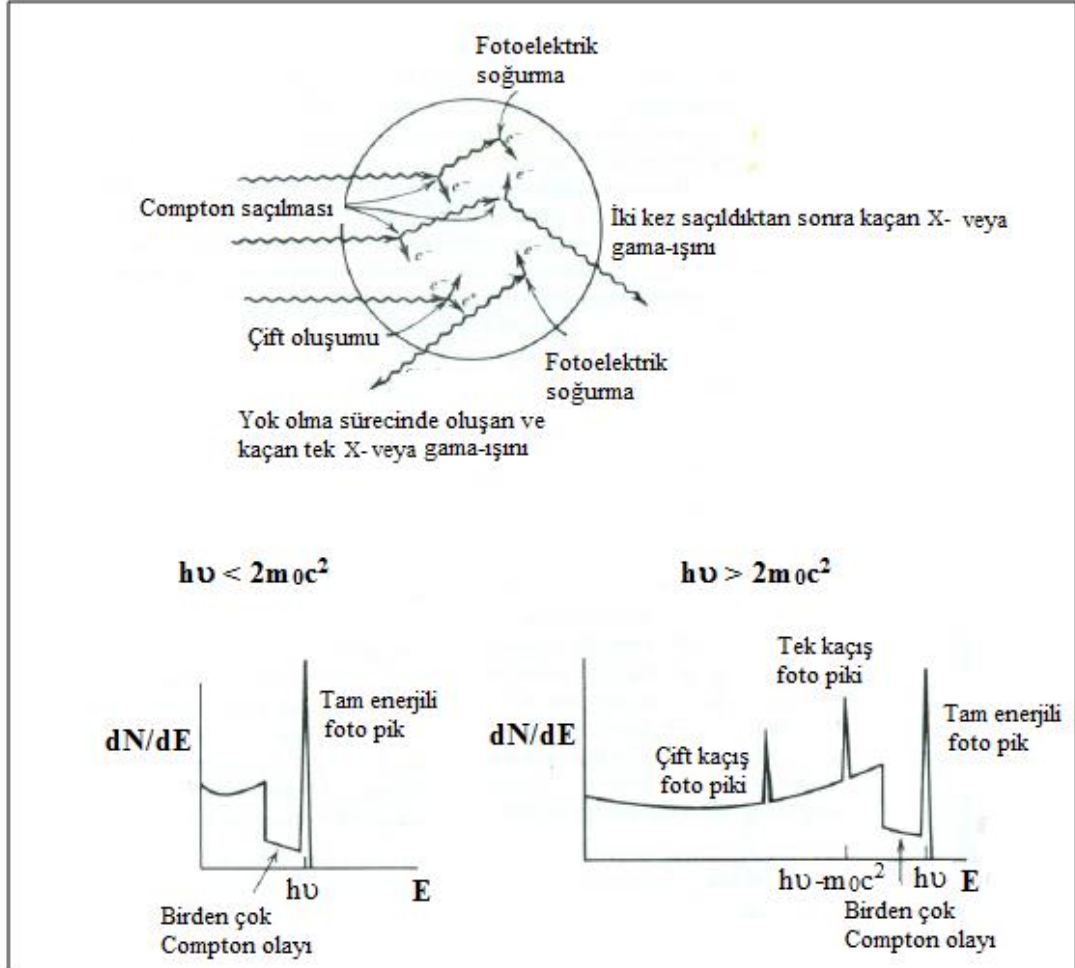
Bu tez kapsamında bentonit örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerdeki aktivite derişimi hızlı, doğrudan, tahribatsız ve güvenilir analiz yöntemi gama ışın spektrometrik yöntem ile ölçüldü. Bentonit örneklerinin içerdiği majör ve minör oksit (element) derişimleri ise hızlı, güvenilir, tekrarlanabilirliği ve kesinliği yüksek analiz yöntemi X-ışını floresans spektrometrik yöntem ile ölçüldü (Grieken ve Margui, 2013; Yıldırım, 2018).

Gama ve X-ışınları etkileşimi ile elektronların oluşturulduğu ortam olan dedektör, spektrometredeki en önemli kısımdır. Gama ışın spektrometresinde Li(Eu), NaI(Tl), CsI(Tl), BGO vb. inorganik sintilasyon dedektörleri veya yarı iletken HPGe dedektörleri ve Si veya Si(Li) yarı iletken dedektörler ise XRF spektrometresinde kullanılır. Bununla birlikte gama ışını spektrometresinde genel olarak sodyum iyodür (talyum) dedektörü (NaI(Tl)) veya yüksek saflıkta germanyum dedektörü (HPGe) kullanılır. NaI(Tl) dedektörlerdeki algılama verimi yüksektir fakat ayırma gücü zayıftır. HPGe dedektöründe ise algılama verimi düşüktür fakat ayırma gücü yüksektir (Knoll, 2000). Gama ışını fotonlarını algılayabilmek ve ölçebilmek için HPGe dedektöründe uygun çözünürlük ve algılama verimine 77K sıcaklığa sahip sıvı azot sıcaklığında tutulmalı ve geri besleme gerilimi de 4000 volta kadar olacak bir değerde çalıştırılmalıdır (Knoll, 2000; Temirci, 2017). Gama veya X-ışınının algılanabilmesi ve ölçülebilmesi, dedektörde bulunan malzeme ile etkileşim sürecine dayanmaktadır. Bu etkileşim süreci sırasında ve sonucunda oluşan fotopiklerin meydana getirdiği X ışını veya gama ışını spektrumu, Şekil 2.10'da gösterildi.

Dedektör sistemindeki duyarlılık, direkt olarak dedektör verimiyle orantılıdır. Dedektör verimi, bir kaynaktan yayınlanan belli sayıdaki X veya gama ışınlarının kaç tanesinin elektrik darbesi oluşturduğunun bir ölçüsü olmaktadır. Bu nedenle verimi, karakteristik X-ışını veya bir radyoaktif kaynaktan yayınlanan gama ışınındaki fotonların dedektörlerde bir olay meydana getirme kesri olarak bilinir. Buradaki verimi (ε),

$$N = \varepsilon \cdot A \quad (2.25)$$

denklemleri ile ifade edilir. Buradaki, A , kaynak aktivitesi, N ise dedektörde oluşan olayların sayısıdır.



Şekil 2.10 Gama- veya X-ışını etkileşme süreçleri ve fotopik oluşumu (Sultan, 2020)

2.6.1 Gama-ışın Spektrometresinin Elektronik

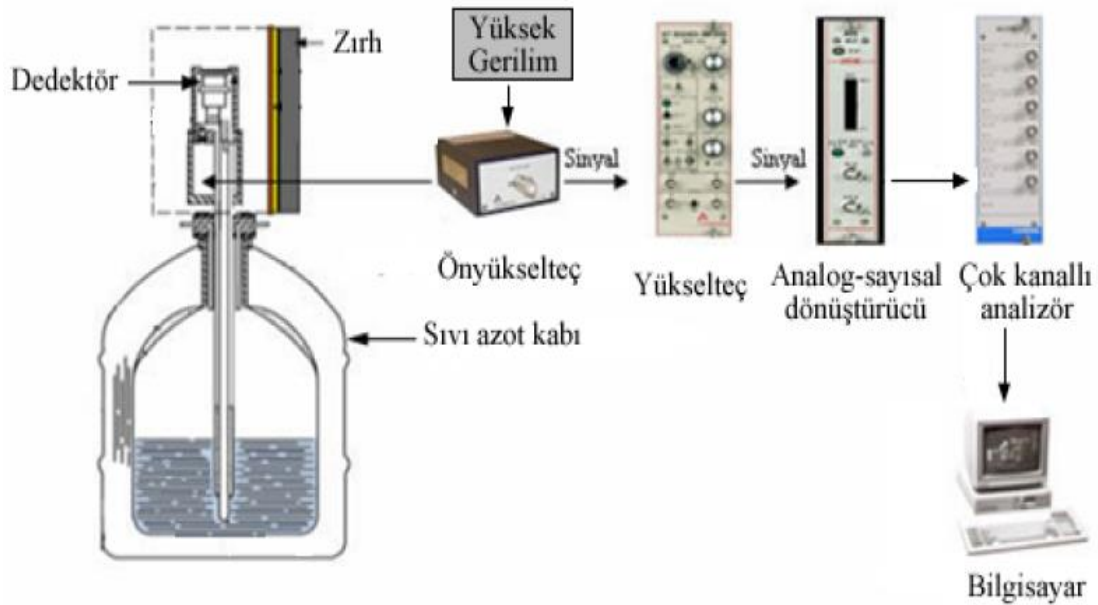
Gama-ışını spektrometresi için tipik bir basit elektronik sistem, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi olabilir (Debertin ve Helmer, 1988). Sistem dedektör ön gerilim kaynağı, ön yükselteç, doğrusal yükselteç, analog dijital dönüştürücü (ADC), çok kanallı analiz cihazı (MCA) ve istenmesi durumunda darbe üretici, dc düzenleyici ve bilgisayardan oluşur.

Ön gerilim kaynağı, ön yükselteç tarafından da toplanan elektron deliği çiftlerini taramak için elektrik alanını meydana getirir. Spektrometre sistemlerinde, toplanan yük daha sonra bir gerilim darbesine dönüştürülür. Doğrusal yükselteç darbe şeklini

değiştirir ve boyutunu artırır. DC düzenleyici bu darbelerden eksi değerde olanları artı değerlere çıkarıp analog dijital dönüştürücünün (ADC) hatasız çalışmasını sağlar. Çok kanallı analiz cihazı (MCA), darbeleri darbe yüksekliği ile sıralar ve bireysel darbe yükseklik aralıkları içindeki darbelerin sayısını sayar. Veri edinimini kontrol etmek, veriyi depolamak ve en sonunda, yararlı bir forma dönüştürmek için bilgisayar kullanılabilir.

2.6.1.1 Dedektör ön gerilim kaynağı

Dedektörlerin, genellikle “dedektör ön gerilim” adı verilen bir gerilim uygulamasına ihtiyacı vardır. Detektörde biçimlemiş olan yükleri toplama işleminin gerçekleşmesi içi dedektöre güç gerilimi uygulanmalıdır. Bu nedenle, yüksek gerilim kaynağı (ön gerilim kaynağı) elektronik sayaç sisteminin temel bileşenidir. Bu gerilim kaynağı, farklı tipteki dedektörlerin gereksinimlerini karşılamak için bir dizi sabit DC gerilimi verebilmelidir (Angüner, 2008; Bortoletto, 2010).



Şekil 2.11 Gama spektrometresi için basit bir şematik elektronik sistem (Solmaz, 2008)

Gerilim kaynağı birimleri normalde tipik bir yüksek saflıkta germanyum dedektörü için gerekli olan yaklaşık 3000 V ile 5000 V'a kadar tedarik edebilirler. Ön gerilim kaynağı, ön yükselteç aracılığıyla dedektöre iletilir ve eş eksenli (koaksiyel) kablo ile ön yükseltece uygulanır (Gilmore, 2008). Ön gerilim, sınır geriliminin çok üzerinde

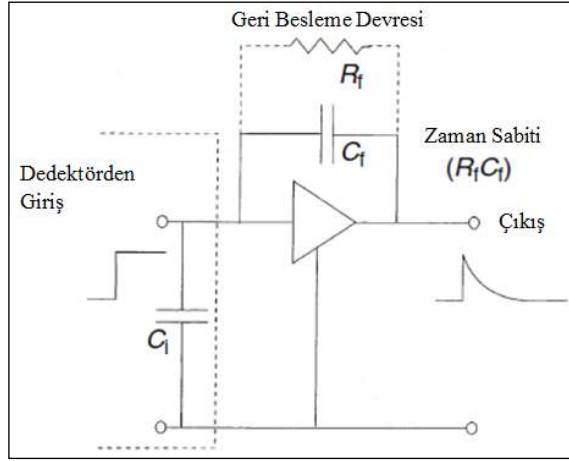
olduğu sürece, yük toplama, ön gerilimdeki değişikliklerden büyük ölçüde etkilenmez ve ön gerilim tedarikinin istikrarı kritik değildir. Ön gerilim değeri yavaşça ayarlanmalıdır bunun için ön gerilim kaynakları çok turlu potansiyometre ile kontrol edilir.

Gerilim uygulandığı sürece dedektörün sıcak kalmaması gerektiğinden, sıvı nitrojen soğutucusunun seviyesi azaldığında veya dedektör sıcaklıkları yükselmeye başladığında ön gerilim kaynağı kapatılmalıdır. Ön geriliminin kapatılmaması durumunda, ön yükselteç bileşenlerinin içinden akan yüksek akımlar hasara neden olacaktır. Bu yüzden ön gerilim besleme üniteleri, ön yükselteç üzerinden dedektör kristaline yakın bölgeye monte edilen bir sıcaklık sensörüne bağlanabilen otomatik kapatma devrelerini içerir (Debertin ve Helmer, 1988; Gilmore, 2008).

2.6.1.2 Ön yükselteç

Gama-ışını ile etkileşime girerek dedektörde oluşturulan yük ön yükseltici tarafından toplanır. Ayrıca ön yükselteç dedektör ile yükselteç arasındaki elektriksel direnci uyumlu hâle getirip gelen darbenin yükselteç tarafından en iyi şekilde algılanmasını sağlar. Buna rağmen ön yükselticinin işlevi darbeleri yükseltmek değildir, dedektörü yükselticiye bağlar ve gama-ışınının soğurulmasıyla oluşan yükü toplar (Gilmore, 2008).

Ön yükselticide alan-etkili transistör (FET) kullanılır ve bu transistörler ile dedektörler elektronik gürültüyü en aza indirmek için soğutulur. Ön yükseltici optimize etmek için, transistörün kullanıldığı giriş aşamasının sıcaklığı, oda sıcaklığındaki dedektör muhafazasından bir miktar ısının sızmasına izin verilerek dedektörden daha sıcak tutulabilir. Ön yükselteçlerden gelen darbenin yüksekliği veya genliği, dedektörde harcanan toplam yük miktarıyla orantılı olmalıdır ve eğer tüm foton enerjisi dedektörde emilirse, bu enerji ile de orantılı olmalıdır (Debertin ve Helmer, 1988). Ön yükselticide darbe tarafından taşınan bilgi yükselen kenarındadır. İdeal olarak, yüksekliği dedektör tarafından emilen gamma ışını enerjisi ile orantılıdır.

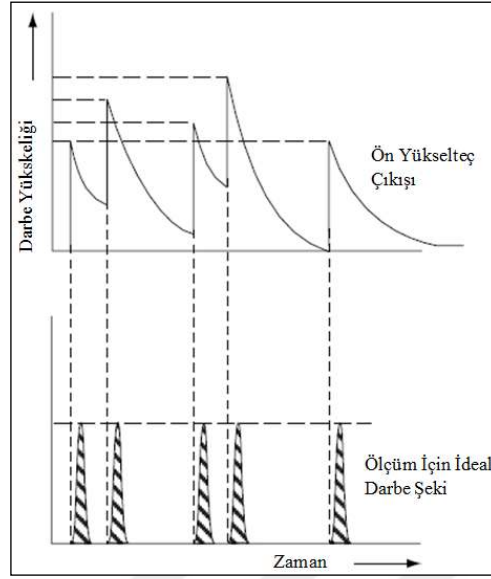


Şekil 2.12 Direnç geri beslemeli ön yükseltici şematik gösterimi (Gilmore, 2008)

Geleneksel yüke duyarlı bir ön yükselticinin şematik düzenlemesi Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Dedektörden gelen yük, bir süre boyunca kondansatör C_f üzerinde toplanır ve dedektör şarj darbesini etkili bir şekilde birleştirir. Yük toplandığında, kapasitördeki gerilim (ve en sonunda ön yükseltici çıkışında) yükselir ve gerilimde bir adım değişikliği meydana getirir. Başka bir işlem yapılmazsa, girişteki gerilim bu seviyede kalır. Yükün sızmasına ve sonraki darbe için girişin hazırlanmasına izin vermek için, geri besleme rezistansı olarak adlandırılan büyük bir direnç olan R_f kondansatör ile paralel olarak bağlanır. Bu tip ön yükselteçlere dirençli geri besleme ön yükseltici denir (Gezer, 2011; Gilmore, 2008).

2.6.1.3 Doğrusal yükselteç

Ön yükselteç tarafından gelen keskin ve kuyruklu darbeler, darbe yüksekliği ölçümünün yapılabilmesine uygun değildir. Keskin ve kuyruklu darbeler yükselteç ile büyütülüp daha kısa oluşma zamanına sahip ve daha hızlı azalma zamanlı darbe şekillerine dönüştürülmelidir (Knoll 2000). Çok keskin tepeler, pik yüksekliğinin doğrudan ölçümü için uygun değildir. Her durumda, düşük sayım oranları dışında kaçınılmaz olan yığılmalar, yükselteç başlangıç gerilimine göre darbe yüksekliğinin basit bir şekilde ölçülmesini engeller. Bu, Şekil 2.13'de gösterilmiş olup, burada, aynı basamak yüksekliğine sahip bir dizi darbe, yığıldığında, farklı yüksekliklerde pik gerilimleri üretmektedir.



Şekil 2.13 Yığılmış direnç geri beslemeli ön yükselteci ve istenen dönüştürülmüş darbe (Gilmore, 2008)

Bu yükselteçlerin önemli özellikleri, doğrusallık, çıkış darbe şekli, kazanç sabitliği ve gürültü seviyesidir. Modernize sistemlerde en büyük çıkış darbe genliği 7 ila 10 voltur (Şahiner, 2010).

2.6.1.4 Analog sayısal dönüştürücü

Analog sayısal dönüştürücüler (ADC), analog olan elektrik sinyalinin sayısal sinyale dönüşümünü gerçekleştiren elektronik elemanlardır. Gama ışın spektrometresinde yükselteçten gelen çıkış darbesi analog sayısal dönüştürücülerde eşdeğer bir sayıya dönüştürülür. ADC performansı dönüşüm hızı, dönüşüm doğrusallığı ve dönüşüm ayırma gücü özellikleriyle de tanımlanabilir.

Gama ışın spektrometresi sistemlerinde, iki ADC türünden birini kullanır, bunlar; Wilkinson ADC ve Ardışık Yaklaşım ADC'dir. Wilkinson ADC zamanla lineer olarak artış gösteren bir saat ve gerilimin eşzamanlı olarak başlaması prensibine dayanır. Darbe yüksekliği ölçümü analog darbe bir eşiğin üzerine çıktığında, bir kapasitörün şarj edilmesiyle başlar. Kondansatör üzerindeki gerilim dengelendikten sonra, doğrusal bir deşarj tetiklenir ve aynı zamanda bir zamanlama kapısı açılır. Kondansatördeki gerilim sıfıra ulaştığında, bu kapı kapalıdır.

Böylece, giriş darbesinin yüksekliği zamana dönüştürülmüş olunur. Bu süre, zamanlama geçidinden geçen kristal kontrollü bir saat tarafından üretilen yüksek frekanslı bir darbe akışı ile ölçülür. Darbe geçişi, kapı açılıncaya kadar bloke edilir kapıdan geçen darbelerin sayısı giriş darbesinin yüksekliğiyle orantılıdır ve analog darbe yüksekliği bir dijital sayıya dönüştürülür (Gilmore, 2008).

2.6.1.5 Çok kanallı analizör

Çok kanallı analizörün (MCA) birçok fonksiyonu vardır; darbeleri toplayıp sınıflandırma işlemi yapar. Daha sonra bu sınıflandırdığı verileri depolayabilir, çeşitli analizler yapıp, çıktı için sonuçlar hazırlar. MCA darbelerden oluşan giriş sinyallerinin dağılımlarını ölçebilen önemli bir laboratuvar aracıdır.

Birden fazla enerjinin radyasyonları dedektöre çarptığında, farklı genlikte pikler üretilecektir. Eğer belirli bir radyasyon enerjisinden sadece biri ilgilenirse, ilgili enerjiye karşılık gelen darbeler “ayırıcı” olarak adlandırılan bir cihaz ile seçilebilir. Bu, önceden ayarlanmış genliklerin üstünde veya arasında sadece darbeleri kabul edecek şekilde ayarlanabilen elektronik cihazlar ile yapılabilir. Bir alt seviye ayıklayıcı (LLD) alt genlik limitini ayarlarken, üst seviye bir ayıklayıcı (ULD) üst limitleri ayarlar. Hem LLD hem de ULD'nin önceden ayarlanmasına izin veren basit bir ayırıcı cihazı, bir Tek kanal analizörü (SCA) olarak adlandırılır. MCA artımlı dar pencerelere sahip bir dizi SCA olarak kabul edilebilir. MCA, tüm gerilim aralıklarındaki darbeleri bir kerede toplar ve bu bilgiyi gerçek zamanlı olarak gösterir ve SCA spektrum analizine göre büyük bir iyileşme sağlar. Çok kanallı analizör, tüm enerji aralığını tarayabilir ve kanalların her birinde saydıkları darbe sayısını kaydedebilir (Angüner, 2008).

2.6.2 Radyoaktivite Analizinde Kullanılan Gama-Işını Spektrometresi

Bentonit örneklerindeki mevcut olan ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin aktivite derişim değerleri, Fotoğraf 2.4’de gösterilen gama-ışını spektrometresi kullanılarak belirlendi (Sultan, 2020). Spektrometrede kullanılan HPGe (GEM50P4-83) dedektörünün teknik özellikleri, Tablo 2.6’da verildi.

Tablo 2.5 HPGe dedektörünün özellikleri (Sultan, 2020)

Dedektör modeli	ORTEC GEM50P4-83
Bağıl verim	% 50
Enerji ayırma gücü (çözünürlük)	1,9 keV (1,33 MeV enerjide)
Pik/Compton oranı	66:1
Dedektör geometrisi ve kristal tipi	Kapalı uçlu, eş eksenli ve p-tipi HPGe
Çap ve yükseklik	62,5 mm
Pencereden uzaklık	5 mm
Çalışma gerilim değeri	+3000 V dc
Kriyostat ve azot kabı hacmi	Dikey geometrili ve 30 L

HPGe dedektörü, laboratuvar ortamı radyasyonunu en aza indirmek amacıyla kurşundan yapılmış yüksek performanslı, ultra düşük arka plana (background) sahip kurşun zırh içine yerleştirilmiştir. 30 litre hacminde vakumlu ve çift duvara sahip sıvı azot kabının amacı azot soğutmasını sağlamaktır. Dedektör, dedektör ara yüz modülüne ve dijital sinyal işleme (DSP) sahip, tüm özellikli 16-K çok kanallı sayısal spektrum analizörüne (DSPEC-50) bağlıdır. DSPEC-50, fotopikleri otomatik bulup değerlendirebilen ve belirsizlik hesabı yapabilen, kütüphanesi sayesinde ihtiyaç duyulduğunda radyonüklitleri belirleyip ve aktivite analizleri yapan GammaVision gama spektroskopisi yazılımı ile çalışmaktadır.

2.6.3 X-ışını Floresans Spektrometrik Analiz Yöntemi

XRF spektrometrik yöntem, katı, sıvı ve toz örneklerinin içerdiği çoklu elementlerin (berilyumdan uranyuma kadar) nitel ve nicel analizlerini (ppm seviyesinden %100'e kadar) hızlı, güvenli ve hassas olarak yapabilen tahribatsız bir analiz yöntemidir (Brouwer, 2013).

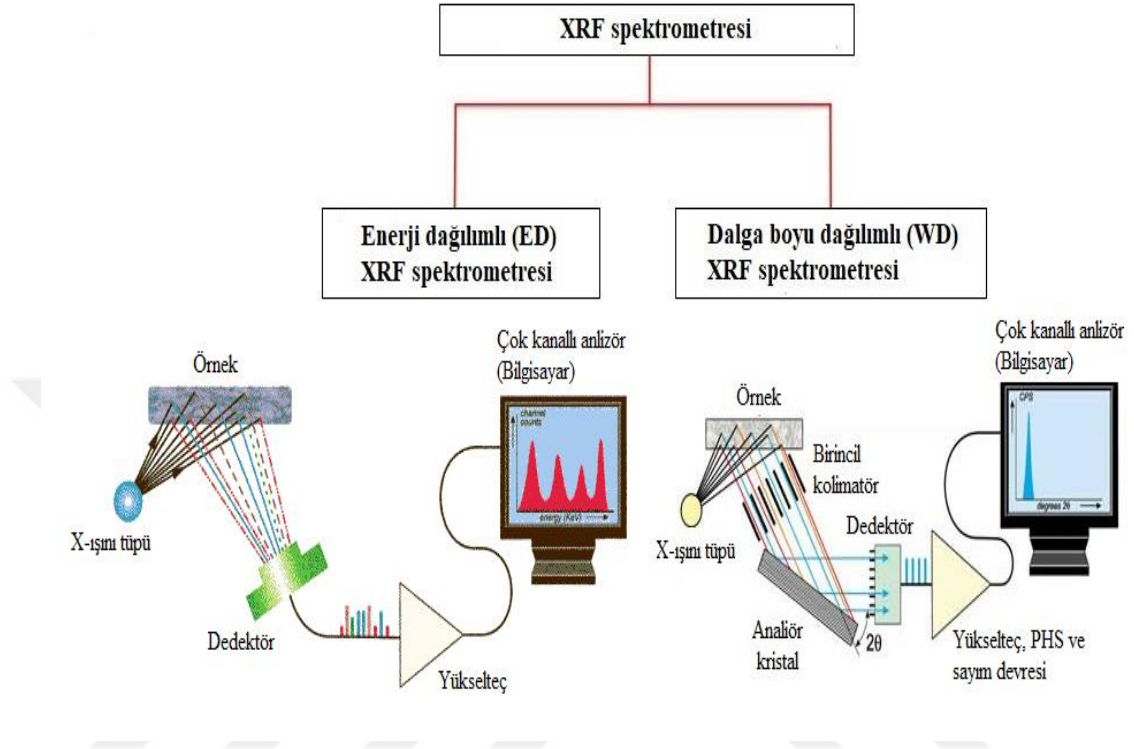
XRF analiz yöntemi dalga boyu dağılımlı (WD) ve enerji dağılımlı (ED) olarak iki farklı tipi vardır. Algılama sistemi nedeniyle bu iki tip arasında temel bir fark vardır. XRF'de örnek tarafından direkt olarak gelen ve farklı enerjilere sahip karakteristik ışınları ölçme kapasitesinde bir dedektör kullanılır. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi dedektör örnek tarafından gelmekte olan radyasyonu, örneğin içinde bulunan elementlerden gelen radyasyona ayırabilmektedir.



Fotoğraf 2.4 Gama-ışını spektrometresi

WDXRF spektrometresi düşük seviyelerdeki bir kaç elektron voltluk ve yüksek enerjide çözme (ayırma) gücüne sahipken, EDXRF spektrometresi 150 eV ve daha yüksek enerjide çözme (ayırma) gücü mevcuttur. Bu yüzden karmaşık spektrumlarda bulunan birbirine yakın çizgiler ve genellikle kuvvetli çizgilerin yanında bulunan zayıf çizgileri duyarlı bir şekilde ayrılabilmek WDXRF spektrometresi ile daha basit olarak gerçekleştirilir. WDXRF spektrometresinde X-ışınlarının şiddeti dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ölçülür. Spektrometre sistemi içinde bir odaklama çemberi çevresine yerleştirilen kristal, ikincil X-ışını radyasyonun kırınımını (difraksiyonu) sağlar ve difraksiyona uğrayan ışınların dalga boyları Bragg şartını sağlayarak dedektör vasıtasıyla algılanır. Kırınımın oluşabilmesi için kristal ve sayaç (dedektör) hareket eder; örnek, kristal ve dedektör odaklama çemberi üzerinde bulunur. Analiz sürecinde örneklerin bulunduğu hazne vakum altında bulundurulup hafif elementlerin karakteristik ışınlarının hava tarafından soğurulması engellenmesi sağlanır. Her bir elemente ait farklı bir enerjide yayımlanan karakteristik X-ışını fotonları, akışkan ve parıldamalı dedektörler ile sayılarak ve standart kalibrasyon

doğruları vasıtasıyla, örnek içindeki elemente ait miktarlar belirlenir (Yıldırım, 2018; Grieken, 2013).



Şekil 2.14 XRF analiz sisteminin blok diyagramı (Brouwer, 2013)

Enerji dağılımlı XRF spektrometresi, örnek tarafından direkt olarak gelen farklı enerjideki karakteristik ışınları ölçebilme kapasitesi olan bir dedektör kullanılır. Bu dedektör, örnek tarafından gelen radyasyonu, örnekte bulunan elementler tarafından gelen radyasyona ayırabilmektedir. Bu işlem enerji dağılımı olarak adlandırılır (Garad, 2019).

2.6.4 Element Analizinde Kullanılan EDXRF Spektrometresi

Bentonit örneklerinde bulunan minör ve majör element (oksitlerinin) analizleri, enerji dağılımlı XRF spektrometresi ile yapıldı. EDXRF spektrometrik yöntemde, ikili kalın Pd/Co karışım bulunan anot X-ışını tüpü (50 W, 60 kV) mevcuttur. Kutuplaşma ve ikincil hedefler kullanılıp uyarılmayı optimize eden EDXRF spektrometresinde mevcut olan hedef değiştirici, sodyum elementinden uranyum elementine kadar tüm elementlerin belirlenmesi işini en güzel şekilde yapmayı sağlayacak birçok farklı uyarım şartları mevcuttur. Ölçüm işlemi, helyum gazı

ortamında yapılır. EDXRF spektrometresi ile aynı zamanda 12 tane örneği cihaza yerleştirebilir. Ayrıca bu cihaz örneklerin analizinin yapılabileceği yazılım ile donatılmıştır (Krista, 2021; Sultan, 2020).

Fotoğraf 2.5’te gösterilen Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda mevcut olan EDXRF spektrometresi ile ölçümler yapıldı. Her bir bentonit örneğine ait X-ışını spektrumu, örnek kaplarına konularak otomatik örnekleyiciye yerleştirilip 2 saat sayılması ile elde edildi. Sayım sonrasında elde edilen her bir spektrum, sistemde yüklü olan yazılım (SPECTRO XRF Analyzer Pro) yardımı ile değerlendirildi.



Fotoğraf 2.5 EDXRF spektrometresi

2.7 Gama Doz Hızı Ölçme Yöntemi

Türkiye genelinde belirlenen bentonit ocaklarında yerden 1 m yükseklikte havada soğurulan gama doz hızı, Türkiye Atom Enerjisi Kurumunda (TAEK’de) üretilen Gieger Müller (G-M) tüplü sayım cihazı ile ölçüldü (Fotoğraf 2.6). Ölçümler, aynı noktada 5 kez tekrarlandı. Her bir noktanın ortalama değeri, 5 noktada $\mu\text{R/h}$

cinsinden ölçülen değerlerin ortalaması olarak verildi. Farklı noktalarda ölçülen yer kabuğu ve kozmik radyasyondan elde edilen gama doz hızı sonuçları, $\mu\text{R/h}$ 'den nGy/h 'ye dönüştürmek için 8,8 katsayısı ile çarpılmıştır.



Fotoğraf 2.6 Gama doz hızlarının ölçülmesi

2.8 Radyasyon Doz Birimleri ve Radyasyon Biyolojik Etkileri

Radyasyonun en önemli özelliği, etkileştiği ortamlardaki atomları iyonlaştırmasıdır. Hava içinden geçen alfa, beta, gama ve X ışınları, havada bulunan molekül ve atomları iyonlaştırır ve kütlesi m olan havada meydana getirilen iyonlardaki toplam yük Q ise ışınlama X ,

$$X = \frac{Q}{m} \quad (2.26)$$

formülü ile ifade edilir. Uluslararası birim sisteminde birim olarak kilogram başına coulomb (C/kg) olarak gösterilir (Krane, 1987; Temirci, 2017). Önceki senelerde 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) meydana getiren ışınlama olarak da ifade edilen röntgen (R) birimi kullanılıyordu. 1 röntgen ışınlama (X) cinsinden,

$$1 R = \frac{1 \text{ eyb}}{0,001293 \text{ g}} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (2.27)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Hava dışındaki farklı malzemelere iyonlaştırıcı radyasyon uygulandığında, bu malzemelerdeki enerjinin soğurma hızı havadakinden farklıdır. Bundan dolayı iyonlaşma nedeniyle farklı malzemelerdeki soğurulan enerjiyi tanımlayabilmek için farklı birim ve standart gereklidir.

Radyasyondan kaynaklanan canlı organizmaların üzerinde meydana gelen etkiler incelendiğinde, başka ışınlama şartlarındaki, birim kütle başına eşit miktarlarda enerjinin soğurulmasıyla aynı biyolojik etkiyi gösteremez. İyonlaştırıcı radyasyon tarafından meydana gelen biyolojik hasarlar, radyasyondan kaynaklanan uyarma veya iyonlaşma etkisi ile olan biyolojik moleküllerdeki kimyasal değişim ile izlenmektedir (Krane, 1987; Temirci, 2017). Bireyleri radyasyon etkisinden koruyabilmek için standartlar tanımlanması için farklı tiplerdeki iyonlaştırıcı radyasyonlar bazı biyolojik etkilerin ölçülebilmesinde gerekmektedir. Belirli bir radyasyon dozundaki, benzer biyolojik etkiyi meydana getiren X-ışınının dozuna oranı olarakta bilinen bağıl biyolojik etkinlik (RBE) tanımlanır. RBE'nin, bağıl olarak ölçülmesinin güç olması nedeniyle RBE'nin yerini, birim yol boyunca biriken enerjiye göre bir iyonlaştırıcı radyasyonun enerjisi ve tipi için hesaplanabilen kalite faktörü (KF) alır. Bazı iyonlaştırıcı radyasyon tiplerindeki kalite faktörü değerleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir. Böylece belirli bir radyasyonun bir biyolojik sistem üzerindeki etkisi, soğurulan doz (D) ve radyasyondaki KF değerine bağlı olarak değişir. Hesaplanacak eşdeğer doz (ED),

$$ED = D \cdot KF \quad (2.28)$$

denklemleriyle ifade edilir. Buradaki soğurulan dozun birimi rad olarak verilirse, eşdeğer doz birimi rem (roentgen equivalent man) olur. Soğurulan dozun birimi gray olarak verilirse, eşdeğer doz birimi sievert (Si) olur ve 1 Sv=100 rem dir (Temirci, 2017).

Tablo 2.6 Farklı radyasyonlar için KF değerleri (Temirci, 2017)

Radyasyon tipi	KF
Beta, X ve gama ışınları	1
Düşük enerjideki (~ keV) nötron ve protonlar	2-5
Enerjik (~ MeV) nötron ve protonlar	5-10
Alfa ışınları	20

İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalınması sonucunda, kromozomda meydana gelebilecek hasarlar bir takım biyolojik etkilerin meydana gelmesine yol açar. Genlerde meydana gelecek hasarlar nedeniyle, kanser oluşur. Üreme organlarında bulunan genlerde hasar meydana gelirse, mutasyon oluşabilir. Oluşan mutasyon çocuklara da geçebilir. Kanser ve kalıtsal mutasyonlar, stokastik etkiler olarak isimlendirilir. Organın soğurduğu radyasyon dozu, düşükte olsa yüksekte olsa kanser veya mutasyon da aynı davranmaktadır. Bu değişimlerin tamamı, bir kanser oluşumu veya bir mutasyon meydana gelme ihtimalini oluşturur. Tüm vücut, aşırı dozlara (1 Sv-10 Sv aralığında) kısa sürede maruz kalsa bile hayati organlar ve sistemler işlevlerini yerine getiremeyecek biçimde çok sayıda hücre ölmektedir. Kusma, mide bulantısı, cilt ve derin doku yanıkları, vücudun enfeksiyon ile mücadelesindeki kabiliyetin bozulması gibi ani görülen (akut) sağlık etkileri saatler, günler veya haftalar sonrasında da ortaya çıkmaktadır (Temirci, 2017).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, her bir bentonit ocağında ölçülen gama doz hızı değerleri, her bir bentonit örneğinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerin aktivite derişimleri, incelenen bentonit örneklerinin yapı malzemesi olarak kullanılmasına eşlik eden radyolojik risk değerlendirme sonuçları ve bentonit örneklerin içerdiği majör-minör oksit derişimleri (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 ve MnO) ile ilgili elde edilen bulgular, tablolar ve grafikler hâlinde sunuldu.

3.1 Bentonit Ocaklarında Ölçülen Gama Doz Hızı

Bentonit ocaklarının farklı noktalarında ölçülen gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler Tablo 3.1’de ve her bir ocak için gama doz hızlarının ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri Tablo 3.2’de verildi. Gama doz hızı ortalamalarının birbirleri ile karşılaştırılması ise Grafik 3.1’de verildi.

Tablo 3.1 Gama doz hızlarına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

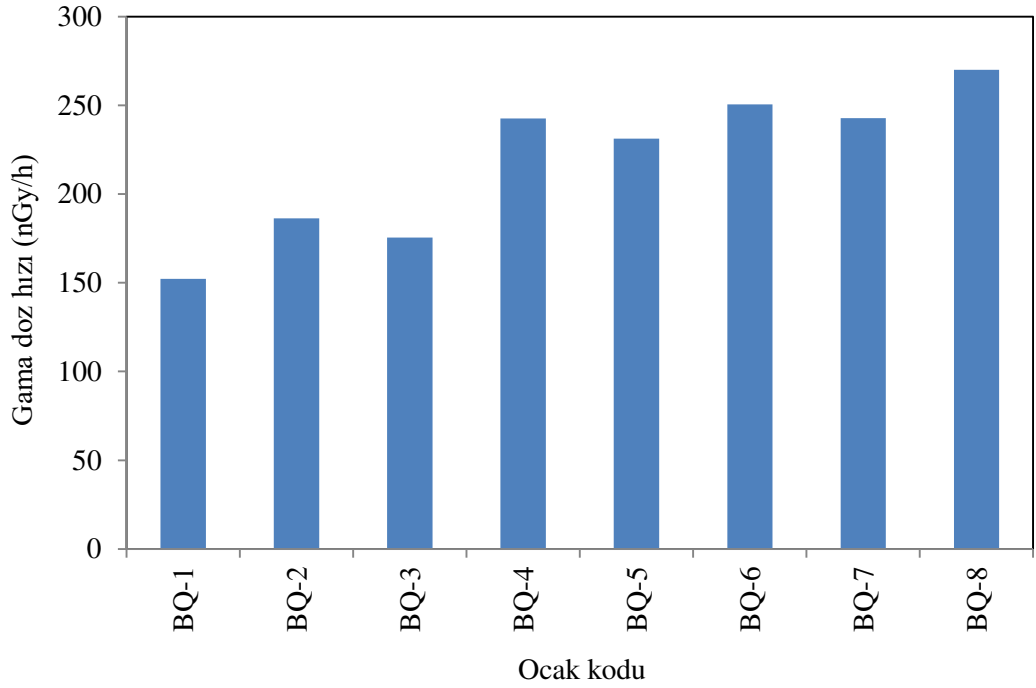
	Gama doz hızı (nGy/h)
Ortalama	218,3
Standart hata	6,72
Ortanca	217
Standart sapma	67,2
Çarpıklık	0,34
Basıklık	-0,7
En küçük	105
En büyük	377
Örnek sayısı	100

Tablo 3.2’den de görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5,BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 ocaklarında ölçülen gama doz hızları ortalama değerleri, sırasıyla 152 (aralık: 105 - 225) nGy/h, 186 (aralık: 109 - 303) nGy/h, 176 (aralık: 130 - 257) nGy/h, 243 (aralık: 151 - 375) nGy/h, 231 (aralık: 149 - 320) nGy/h, 251(aralık: 180 - 366) nGy/h, 243(aralık: 175 - 303) nGy/h ve 270 (aralık: 160 - 377) nGy/h olarak bulundu.

Tablo 3.2'den de görülebileceği gibi en yüksek gama doz hızlarının sırasıyla BQ-8, BQ-4 ve BQ-6 bentonit ocaklarında ölçülürken, en düşük gama doz hızları ise, sırasıyla BQ-1, BQ-2 ve BQ-3 ocaklarında ölçülmüştür. Bentonit ocaklarında ölçülen ortalama gama doz hızları artan sırada şu şekilde sıralanır: BQ-1 < BQ-3 < BQ-2 < BQ-5 < BQ-7 < BQ-4 < BQ-6 < BQ-8.

Tablo 3.2 Gama doz hızlarının ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu İl	Gama doz hızı (nGy/h)	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	152
			En küçük	105
			En büyük	225
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	186
			En küçük	109
			En büyük	303
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	176
			En küçük	130
			En büyük	257
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	246
			En küçük	151
			En büyük	375
BQ-5	2	Konya	Ortalama	231
			En küçük	149
			En büyük	320
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	251
			En küçük	180
			En büyük	366
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	243
			En küçük	175
			En büyük	303
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	270
			En küçük	160
			En büyük	377



Grafik 3.1 Ocaklarda ölçülen ortalama gama doz hızı değerlerinin karşılaştırılması

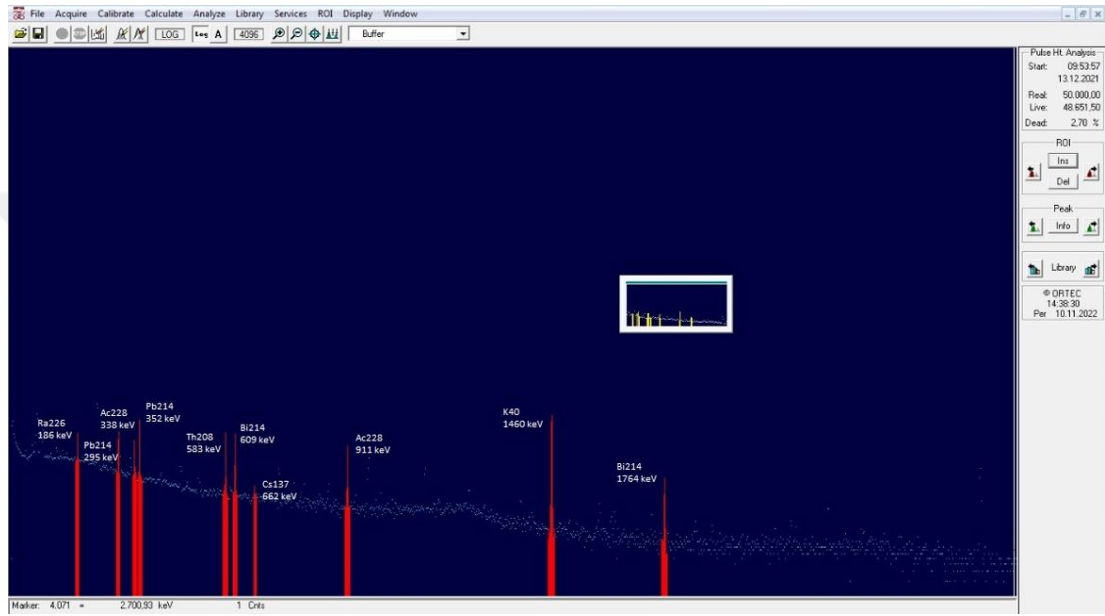
3.2 Bentonit Örneklerinin Radyonüklit İçeriği

Her bir bentonit örneğine ait gama-ışını spektrumu, zırh içindeki dedektör üzerine yerleştirilen örneklerin, 50000 s sayılması ile elde edildi. Bir bentonit örneğinin gama-ışını spektrumu, Grafik 3.2’de gösterildi. Elde edilen gama-ışını spektrumlarında, ^{226}Ra için 351,9 keV, 609,3 keV ve 1764,5 keV enerjili, ^{232}Th için 911,2 keV ve 583,2 keV enerjili ve ^{40}K için 1460,8 keV enerjili gama-ışını fotopikleri seçildi.

İlgili gama-ışınlarının net fotopik alanları (sayımları), belli aralıklarla yapılan laboratuvar ortamı ölçümlerine ait gama-ışını spektrumundaki ilgili gama-ışını fotopiklerin alanları çıkartılarak elde edildi. Bentonit örneklerinin içerdiği radyonüklitlerin aktivite derişimleri (A),

$$A = \frac{C}{\varepsilon(E_\gamma) \cdot P_\gamma \cdot M \cdot t} \quad (3.1)$$

ifadesi kullanılarak bulundu (Sultan, 2020). Buradaki, C, gama ışın spektrumu gama ışınındaki sayım; ε ($E\gamma$), gama ışını verimi; P_γ , gama ışını yayınlanma olasılığı; t, sayım süresi ve M, örnek kütlesidir. Sistemdeki tam enerjili fotopik verim (ε) kalibrasyonu, Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (International Atomic Energy Authority, IAEA) tarafından hazırlanan RGU-1, RGTh-1 ve RGK-1 referans malzemeler kullanılarak yapıldı (Sultan, 2020).



Grafik 3.2 Bentonit örneğinin gama-ışını spektrumu

Ölçme belirsizliği ise,

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_\gamma}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2} \quad (3.2)$$

ifadesi ile hesaplandı. Buradaki, A; aktivite, ΔA ; belirsizlik, ε ; ilgili fotopik için verim, $\Delta \varepsilon$; belirsizlik, P_γ yayınlanma olasılığı, ΔP_γ ; belirsizlik; C; ilgili fotopikin net alanı, ΔC ; belirsizlik; M; örneğin kütlesi ΔM ise belirsizliktir.

Bentonit örneklerinde ölçülebilir en düşük aktivite (ÖEA) değeri denklem (3.3)'teki ile bulundu (Currie, 1968):

$$\text{ÖEA}(\text{Bq/kg}) = \frac{1,64 \cdot \sigma_B}{\varepsilon_\gamma \cdot P_\gamma \cdot t \cdot M} \quad (3.3)$$

buradaki, kapsam faktörü, 1,64, %95 güvenilirlik seviyesinde elde edilen değer ve σ_B , ilgilenilen fotopiklerin laboratuvar ortamındaki standart sapması olarak alınır. Ortalama ÖEA değeri, bentonit örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonükliti için sırasıyla, 0,2 Bq/kg, 0,3 Bq/kg ve 5,3 Bq/kg olarak belirlendi.

Bentonit örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler Tablo 3.3'de ve her bir ocak için bu radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri ise Tablo 3.4'de verildi. Radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin frekans dağılımları, sırasıyla Grafik 3.3, Grafik 3.4 ve Grafik 3.5'te gösterildi.

Tablo 3.3 Radyonüklitlerin aktivite derişimleri ile ilgili bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

	Aktivite derişimi (Bq/kg)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Ortalama	50	76	373
Standart hata	5	4	19
Ortanca	32	67	353
Standart sapma	44	30	177
Çarpıklık	1,9	0,6	0,7
Basıklık	3,5	-0,8	0,7
En küçük	7	19	26
En büyük	232	175	953
Örnek sayısı	100	100	100

Tablo 3.3'den de görülebileceği gibi yüz bentonit örneğinde ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 50 ± 5 (aralık: 7 - 232) Bq/kg, 76 ± 4 (aralık: 19 - 175) Bq/kg ve 373 ± 19 (aralık: 26 - 953) Bq/kg olarak bulundu. Tablo 3.3'den de görülebileceği gibi en yüksek ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K derişimlerinin, sırasıyla BQ-5, BQ-4 ve BQ-8 bentonit ocaklarında ölçülürken, en düşük derişimleri ise, sırasıyla BQ-2, BQ-7 ve BQ-3 bentonit ocaklarında ölçüldü. Bentonit ocakları, artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama ^{226}Ra değerine göre BQ-2 < BQ-7 < BQ-3 < BQ-1 < BQ-6 < BQ-4 < BQ-5 < BQ-8, ^{232}Th değerine göre BQ-3 < BQ-2 < BQ-1 < BQ-5 < BQ-7 < BQ-8 < BQ-4 < BQ-6 ve ^{40}K değerine göre BQ-1 < BQ-6 < BQ-3 < BQ-5

< BQ-2 < BQ-8 < BQ-7 < BQ-4. Her bir bentonit ocağında ölçülen ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama değerleri ile yer kabuğunda ölçülen ortalama değerlerin karşılaştırılması Grafik 3.6'da gösterildi.

Pantelić vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Sırbistan'da kullanılan bentonit örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 35 Bq/kg, 68 Bq/kg ve 530 Bq/kg olarak ölçülmüştür. Agayeva vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Azerbaycan bentonit örneklerindeki ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimleri, sırasıyla 38 Bq/kg, 61 Bq/kg ve 201 Bq/kg olarak belirlenmiştir. Türk bentonitlerinde ölçülen ^{226}Ra ve ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişimleri, Sırbistan ve Azerbaycan bentonitlerinde ölçülen değerlerden daha yüksektir. Ancak ^{40}K 'ın ortalama aktivite derişimi, Sırbistan bentonitlerinde ölçülen değerden daha düşük iken, Azerbaycan bentonit değerlerinden daha yüksektir.

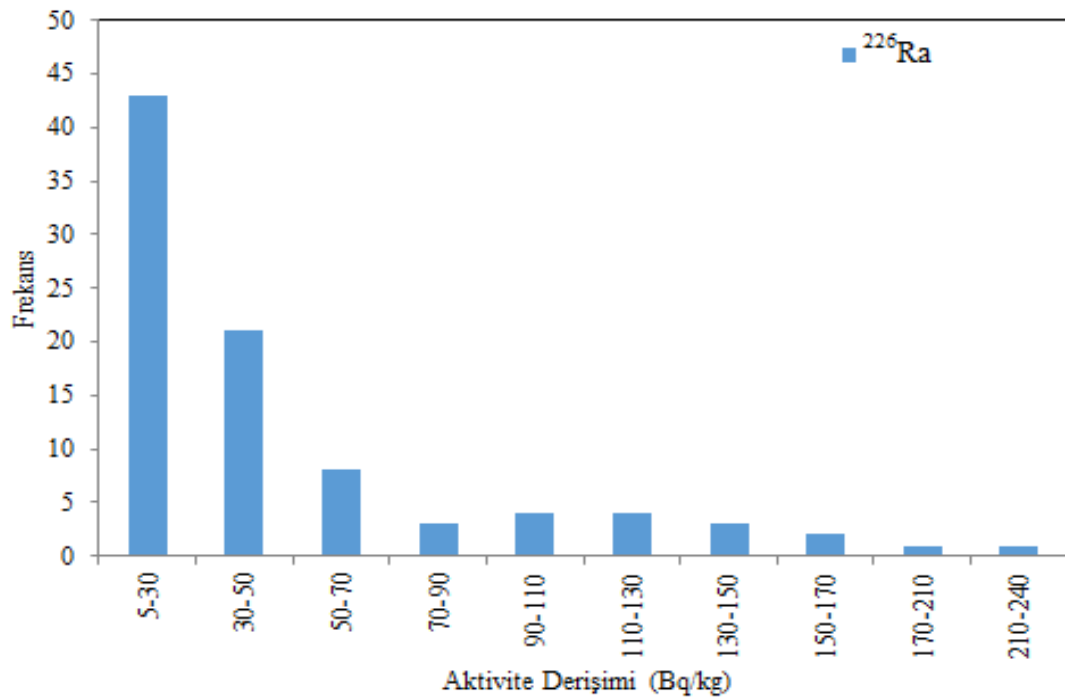
Tablo 3.3'te verilen çarpıklık ve basıklık değerlerinden, Grafik 3.3, Grafik 3.4 ve Grafik 3.5'ten görülebileceği gibi ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın frekans dağılımları, normal olmayan dağılım sergilemektedir. Radyonüklitlerin ortalama derişim değerleri ile yer kabuğu ortalamasının karşılaştırılması Grafik 3.6'da verilmiştir.

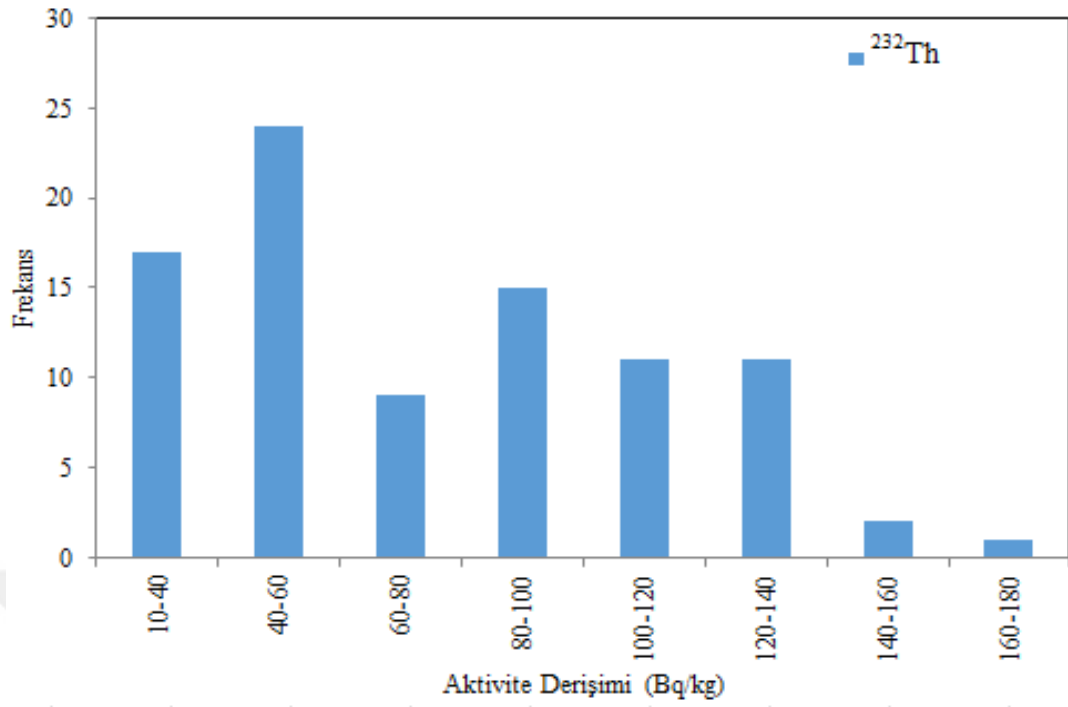
Tablo 3.4 Radyonüklitlerin ortalama ($\pm$ standart hata) ve aralık ($\pm$ belirsizlik) değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu İl		Aktivite derişimi (Bq/kg)		
				^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	31,2 $\pm$ 4,6	52,4 $\pm$ 5,4	253,5 $\pm$ 27,7
			En küçük	10,7 $\pm$ 0,6	32,3 $\pm$ 1,2	185,6 $\pm$ 11,7
			En büyük	50,5 $\pm$ 2,0	81,5 $\pm$ 3,3	431,9 $\pm$ 28,1
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	25,9 $\pm$ 3,6	44,1 $\pm$ 1,9	387,3 $\pm$ 31,6
			En küçük	7,1 $\pm$ 0,2	34,3 $\pm$ 1,2	137,1 $\pm$ 9,5
			En büyük	66,7 $\pm$ 2,7	61,9 $\pm$ 2,2	651,1 $\pm$ 43,6
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	30,4 $\pm$ 3,7	39,4 $\pm$ 1,4	368,5 $\pm$ 57,0
			En küçük	24,0 $\pm$ 0,8	33,5 $\pm$ 1,2	25,8 $\pm$ 1,8
			En büyük	59,6 $\pm$ 2,1	48,4 $\pm$ 1,8	550,6 $\pm$ 36,9

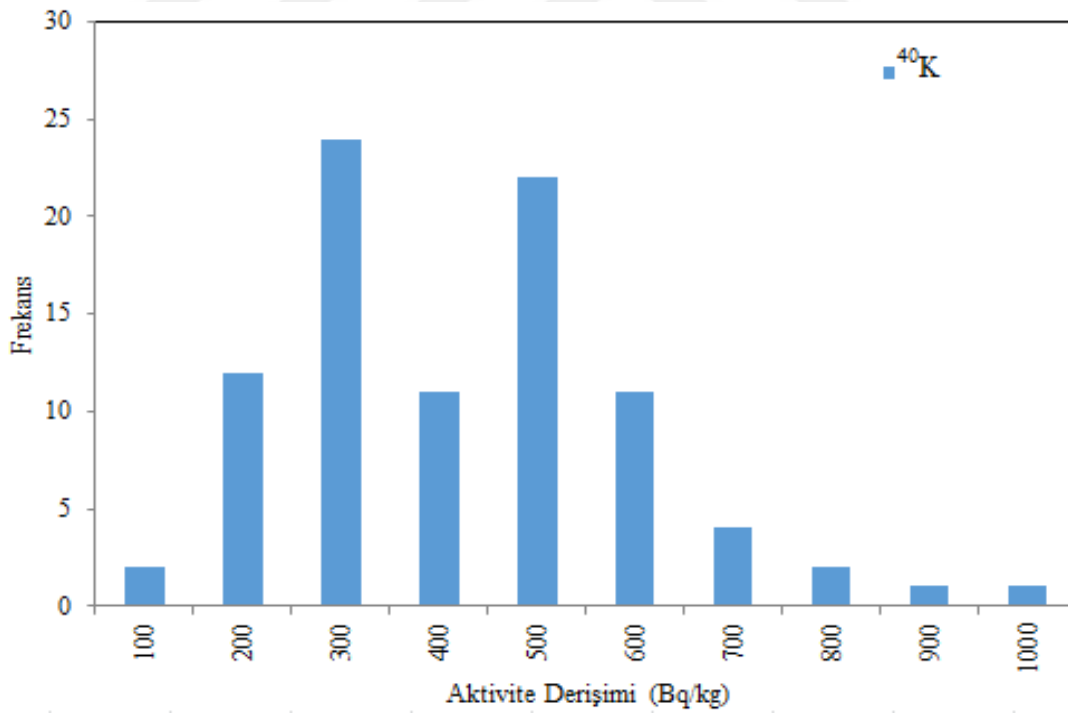
Tablo 3.4'ün devamı

BQ-4	3	Edirne	Ortalama	47,3±6,8	99,7±10,3	463,0±36,2
			En küçük	16,5±0,7	44,3±1,6	232,9±14,4
			En büyük	93,1±4,3	175,2±6,8	748,6±48,7
BQ-5	2	Konya	Ortalama	108,9±38,7	55,0±6,0	383,9±48,0
			En küçük	10,8±0,4	37,3±1,3	217,9±13,5
			En büyük	231,6±8,1	71,8±2,4	560,0±35,3
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	40,9±5,5	122,6±2,7	311,6±50,8
			En küçük	8,9±0,3	98,1±3,2	54,2±3,6
			En büyük	115,6±4,0	151,6±5,3	880,0±59,8
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	30,3±7,8	60,1±23,0	456,2±141,1
			En küçük	18,4±0,6	18,9±0,7	176,7±11,0
			En büyük	45,0±1,6	98,3±3,4	633,4±39,9
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	116,9±10,9	80,5±4,2	405,8±61,1
			En küçük	24,2 ±0,8	41,2±1,4	237,8±15,2
			En büyük	158,8±5,6	94,8±3,3	952,7±64,8

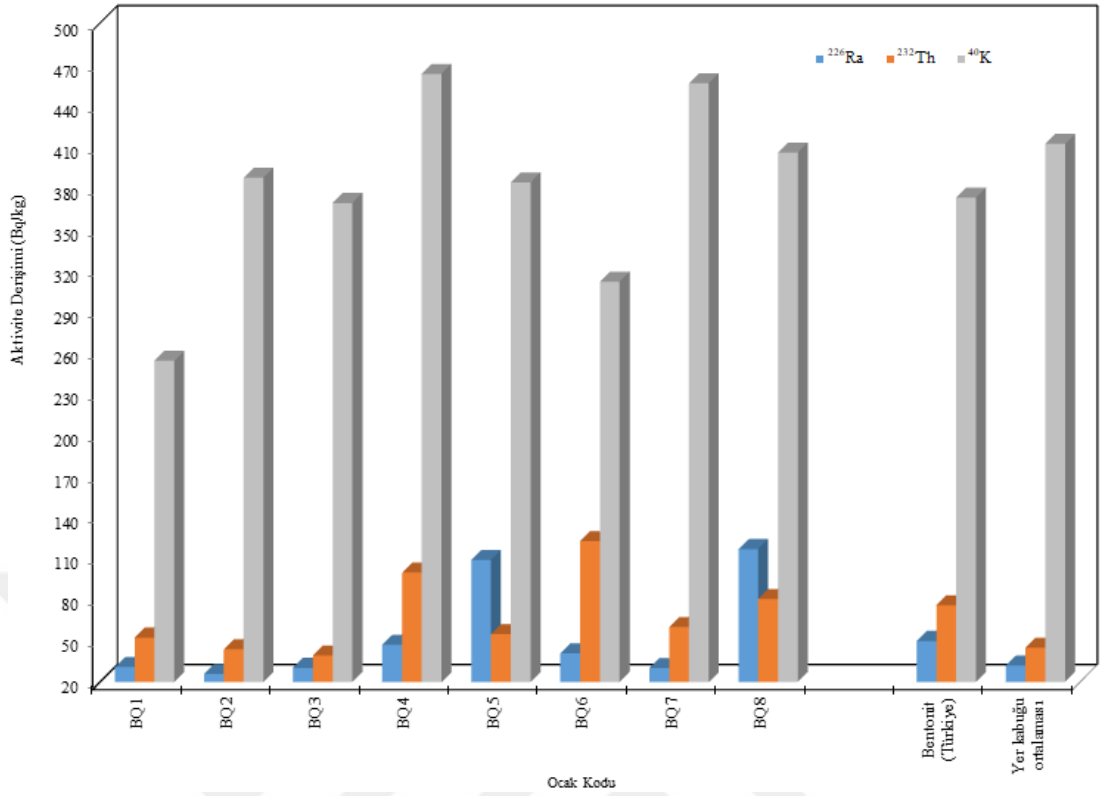
Grafik 3.3 Bentonit örneklerinde ölçülen ^{226}Ra radyonüklitinin frekans dağılımı



Grafik 3.4 Bentonit örneklerinde ölçülen ^{232}Th radyonüklitinin frekans dağılımı



Grafik 3.5 Bentonit örneklerinde ölçülen ^{40}K radyonüklitinin frekans dağılımı



Grafik 3.6 Radyonüklitlerin ortalama derişim değerleri ile yer kabuğu ortalamasının karşılaştırılması

3.3 Radyolojik Riskin Değerlendirilmesi

Bu kısımda bentonit örneklerinin, farklı sektörlerde katkı ham maddesi olarak kullanılması radyolojik açıdan değerlendirilmiştir. Radyolojik değerlendirmeler için dış ışınlama (external exposure) radyolojik parametreleri (aktivite derişim indisi, kapalı ortamda (indoor) soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin radyasyon dozu, dış ortamda (outdoor) soğurulan gama doz hızı ve yıllık etkin radyasyon dozu ile yaşam boyu kanser riski) ve iç ışınlama (internal exposure) radyolojik parametresi (alfa indisi) hesaplandı.

3.3.1 Aktivite Derişim İndisi

Zamanın büyük bir kısmını kapalı ortamlarda (ev, işyeri, okul vb.) geçiren bireyler, yer kabuğundan türetilen yapı malzemelerindeki doğal radyonüklitlerden yayılan gama ışınlarına maruz kalırlar. Yapı malzemesi ürünlerinde endüstriyel mineraller veya endüstriyel atıklar (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) kullanıldığında, yapı

malzemelerindeki radyonüklitlerin yüksek aktivite derişimleri nedeniyle kapalı ortamlarda yüksek doz oranları oluşabilir (Gezer vd., 2019). Avrupa Komisyonu (AK) tarafından önerilen aktivite derişim indisi, yapı malzemelerindeki radyonüklitlerden yayılan aşırı gama ışınlarını değerlendirmek için kullanılmaktadır (EC, 1999). Aşağıda formülü verilen aktivite derişim indisi (I), bir doz ölçütünün (kriterinin) karşılanıp karşılanmadığını belirlemek için türetilmiştir (EC, 1999):

$$I = \left(\frac{A_{Ra}}{300 \text{ (Bq/kg)}} + \frac{A_{Th}}{200 \text{ (Bq/kg)}} + \frac{A_K}{3000 \text{ (Bq/kg)}} \right) \times F \quad (3.4)$$

burada A_{Ra} , A_{Th} ve A_K , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimidir (Bq/kg) ve F , kullanma oranıdır. Bu indis, yalnızca kullanıma hazır yapı malzemesi ürünleri için bir tarama aracı olarak düşünölmelidir ve malzemenin türü ve kullanım oranı da değerlendirilebilir. Eğer $I \leq 1$ ise yapısal malzemelerdeki (beton, tuğla, çimento vb.) iyonlaştırıcı radyasyonun sebep olduğu yıllık etkin radyasyon dozu, 1 mSv/y'den küçük veya eşittir. Eğer $I \leq 0,5$ ise, yıllık etkin radyasyon dozu, 0,3 mSv/y'den küçük veya eşittir. Bu ölçüt, muafiyet seviyesi olarak da isimlendirilir (EC, 1999).

Bentonit örnekleri için hesaplanan aktivite derişim indisi değerlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler Tablo 3.5'te ve her bir ocak için hesaplanan aktivite derişim indisinin ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri ise Tablo 3.6'da verildi. Aktivite derişim indisi değerlerinin, sınır değer ile karşılaştırılması Grafik 3.7'de gösterildi

Tablo 3.5 Aktivite derişim indisi ile ilgili bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

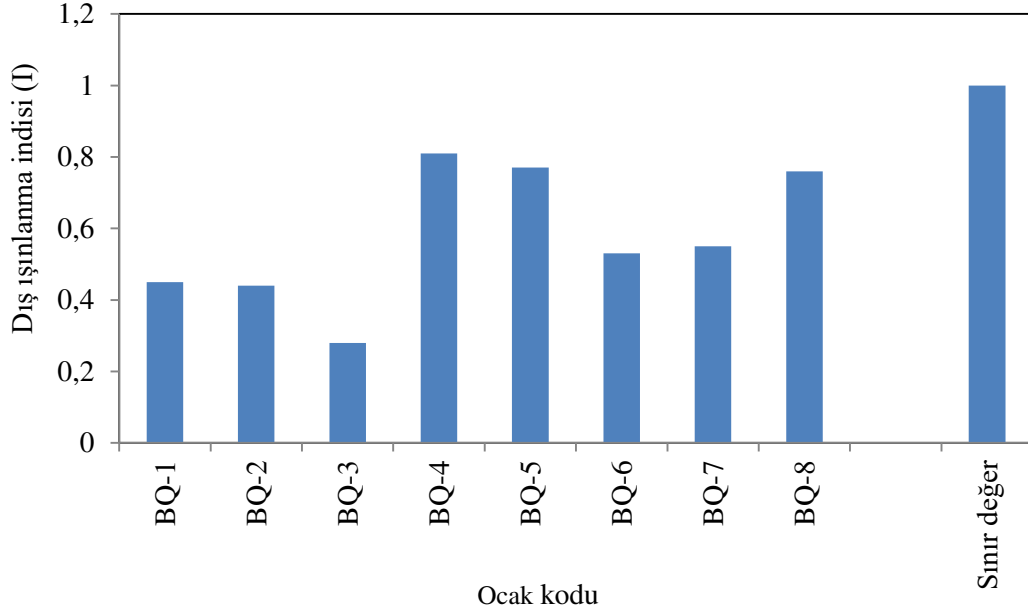
	I
Ortalama	0,66
Standart hata	0,025
Ortanca	0,62
Standart sapma	0,25
Çarpıklık	0,31
Basıklık	-1,18
En küçük	0,29
En büyük	1,28
Örnek sayısı	100

Tablo 3.6 Aktivite derişim indisinin ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il	I	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	0,45
			En küçük	0,32
			En büyük	0,59
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	0,44
			En küçük	0,30
			En büyük	0,64
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	0,28
			En küçük	0,36
			En büyük	0,48
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	0,81
			En küçük	0,42
			En büyük	1,02
BQ-5	2	Konya	Ortalama	0,77
			En küçük	0,30
			En büyük	1,13
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	0,53
			En küçük	0,68
			En büyük	1,28
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	0,55
			En küçük	0,37
			En büyük	0,70
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	0,76
			En küçük	0,42
			En büyük	1,11

Tablo 3.6'dan görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 bentonit ocakları için hesaplanan ortalama I değerleri sırasıyla, 0,45 (aralık: 0,32 - 0,59), 0,44 (0,30 - 0,64), 0,41 (aralık: 0,36 - 0,48), 0,81 (aralık: 0,42 - 1,02), 0,77 (aralık: 0,30 - 1,13), 0,85 (aralık: 0,68 - 1,28), 0,55 (aralık: 0,37 - 0,70) ve 0,93 (aralık: 0,42 - 1,11) aralığında değişmektedir. Tablo 3.6'dan da görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan aktivite derişim indisi sırasıyla BQ-4, BQ-5 ve BQ-8 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan aktivite derişim indisleri ise, sırasıyla BQ-3, BQ-2 ve BQ-1 ocaklarında hesaplandı. Bentonit ocaklarında hesaplanan aktivite derişim indisi artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama BQ-3 < BQ-2 < BQ-1 < BQ-6 < BQ-7 < BQ-8 < BQ-5 < BQ-4. En büyük I değeri, BQ-6-7 kodlu örnek (Ünye Ordu Göbü Köyü) için ve en küçük değer ise BQ-2-14 kodlu

örnek (Eldivan Çankırı Küçük Hacıbey Köyü) ile BQ-5-2 kodlu örnek (Seydişehir Konya Çavuşköy) için hesaplandı.



Grafik 3.7 Aktivite derişim indisinin ortalama değeriinin sınır değeri ile karşılaştırılması

3.3.2 Alfa İndisi

Yapı malzemelerinden kaynaklanan radon gazı solunumundan kaynaklanan aşırı alfa radyasyonunun değerlendirilmesi ile ilgili alfa indisi (I_α) aşağıdaki eşitlik ile hesaplandı (Righi, 2006; Atıcı, 2016).

$$I_\alpha = \frac{A_{Ra}}{200 \text{ (Bq/kg)}} \quad (3.5)$$

Burada, A_{Ra} ; ^{226}Ra 'nin yapı malzemesindeki Bq/kg cinsinden aktivite derişimidir. Bir yapı malzemesinin ^{226}Ra aktivite derişimi 200 Bq/kg değerini aştığında yani $I_\alpha > 1$ olduğu durumlarda iç mekân radon derişimlerine neden olması mümkündür. (Righi, 2006; Atıcı, 2016).

Bentonit örnekleri için hesaplanan alfa indisi değerlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, Tablo 3.7'de ve her bir ocak için hesaplanan alfa indisinin ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri ise Tablo 3.8'de verildi.

Hesaplanan I_a iç ışınlama indis değerlerinin sınır değer ile karşılaştırılması Grafik 3.8’de gösterildi.

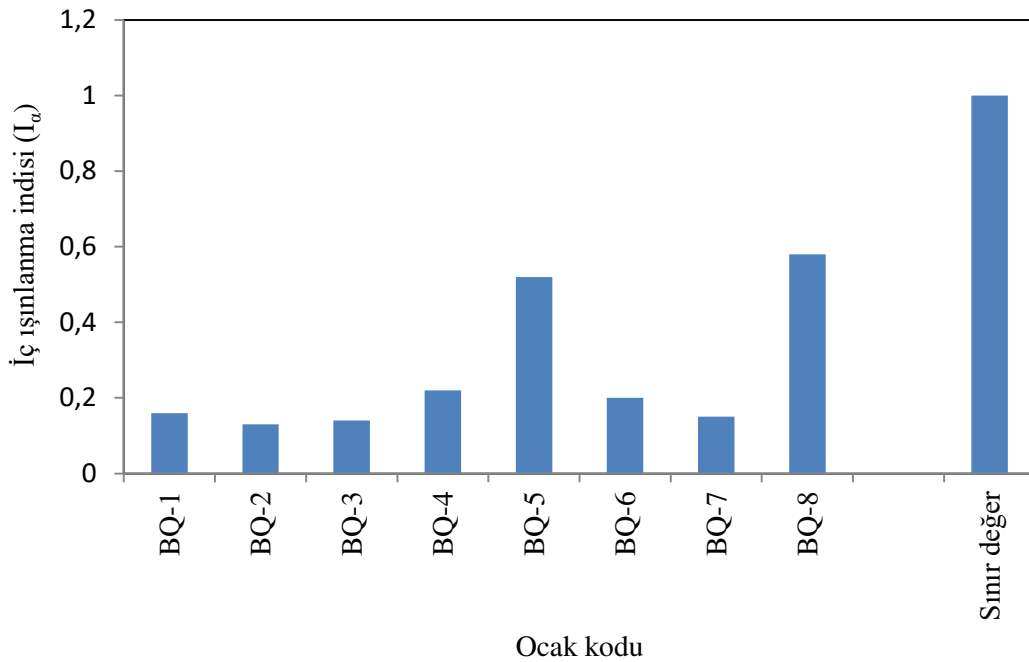
Tablo 3.7 Alfa indisi ile ilgili bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

	I_a
Ortalama	0,240
Standart hata	0,021
Ortanca	0,150
Standart sapma	0,21
Çarpıklık	1,990
Basıklık	4,080
En küçük	0,035
En büyük	1,160
Örnek sayısı	100

Tablo 3.8 Alfa indisinin ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il		I_a
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	0,16
			En küçük	0,05
			En büyük	0,25
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	0,13
			En küçük	0,04
			En büyük	0,33
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	0,14
			En küçük	0,10
			En büyük	0,30
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	0,22
			En küçük	0,04
			En büyük	0,47
BQ-5	2	Konya	Ortalama	0,52
			En küçük	0,05
			En büyük	1,16
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	0,20
			En küçük	0,04
			En büyük	0,58
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	0,15
			En küçük	0,09
			En büyük	0,23
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	0,58
			En küçük	0,12
			En büyük	0,79

Tablo 3.8'den de görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 bentonit ocakları için hesaplanan ortalama I_a değerleri sırasıyla, 0,16 (aralık: 0,05 - 0,25), 0,13 (0,04 - 0,33), 0,14 (aralık: 0,10 - 0,30), 0,22 (aralık: 0,04 - 0,47), 0,52 (aralık: 0,05 - 1,16), 0,20 (aralık: 0,04 - 0,58), 0,15 (aralık: 0,09 - 0,23) ve 0,58 (aralık: 0,12 - 0,79) aralığında değişmektedir. Tablo 3.8'den de görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan alfa indisi sırasıyla BQ-8, BQ-5 ve BQ-4 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan alfa indisleri ise, sırasıyla BQ-2, BQ-3 ve BQ-7 ocaklarında hesaplandı. Bentonit ocaklarında hesaplanan alfa indisi artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama BQ-2 < BQ-3 < BQ-7 < BQ-1 < BQ-6 < BQ-4 < BQ-5 < BQ-8. En büyük I_a değeri, BQ-5-5 kodlu örnekte (Meram Konya) ve en küçük değerler BQ-2-10 (Şabanözü Çankırı), BQ-4-15 (Lalapaşa Edirne) ile BQ-6-1 (Fatsa Ordu) kodlu örneklerde hesaplandı.



Grafik 3.8 Alfa indisinin ortalama değerlerinin sınır değeri ile karşılaştırılması

3.3.3 Kapalı Ortamda Soğurulan Gama Doz Hızı

Kapalı ortamda soğurulan gama doz hızı (KGDH), EC (1999) raporunda verilen kabuller ve simülasyon sonucunda elde edilen bilgiler ışığında, aşağıda verilen formül ile hesaplandı (EC, 1999):

$$\text{KGDH (nGy/h)} = 0.92 \times A_{\text{Ra}} + 1.1 \times A_{\text{Th}} + 0.080 \times A_{\text{K}} \quad (3.6)$$

burada A_{Ra} , A_{Th} ve A_{K} , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimidir (Bq/kg).

Bentonit, kaolin, feldspat, marn, zeolit, mika gibi bazı mineraller seramik, çimento, beton gibi yapı malzemelerinin üretiminde ham madde olarak maksimum %35 oranında kullanılmaktadır (Gezer vd., 2021). Ham madde olarak kullanılan bentonitlerden yayılan iyonlaştırıcı radyasyonların sebep olduğu kapalı ortamdaki (bina içindeki) dış ışınlamaya ilişkin radyolojik parametre değerleri, Tablo 3.6'da verildi. Tamamı bentonitten yapılmış yapı malzemeleri söz konusu olduğunda ($F=1$ için), her bir bentonit ocağından toplanan örnekler için hesaplanan ortalama aktivite derişim (I) değerleri, kalıcı yapısal malzemeler için önerilen ölçüt değer olan 1 değerinin altındadır. Kalıcı yapısal malzemelere azami olarak %35 bentonit eklendiğinde ($F=0,35$), her ocaktan toplanan örnekler için hesaplanan ortalama I değerleri, 0,5 ölçüt değerinin altındadır. Bu durum da, bentonit örneklerinin kapalı ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozuna ortalama katkısının, 0,3 mSv/y'lik muafiyet seviyesinden daha düşük olduğunu gösterir.

Bentonit örnekleri için hesaplanan kapalı ortamda soğurulan gama doz hızı değerlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, Tablo 3.9'da ve her bir ocak için hesaplanan kapalı ortamda soğurulan gama doz hızının ortalama ve aralık (en küçük–en büyük) değerleri ise Tablo 3.10'da verildi. Hesaplanan KGDH değerlerinin, dünya ortalaması ile karşılaştırılması Grafik 3.9'da gösterildi.

Tablo 3.9 Kapalı ortamda soğurulan gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

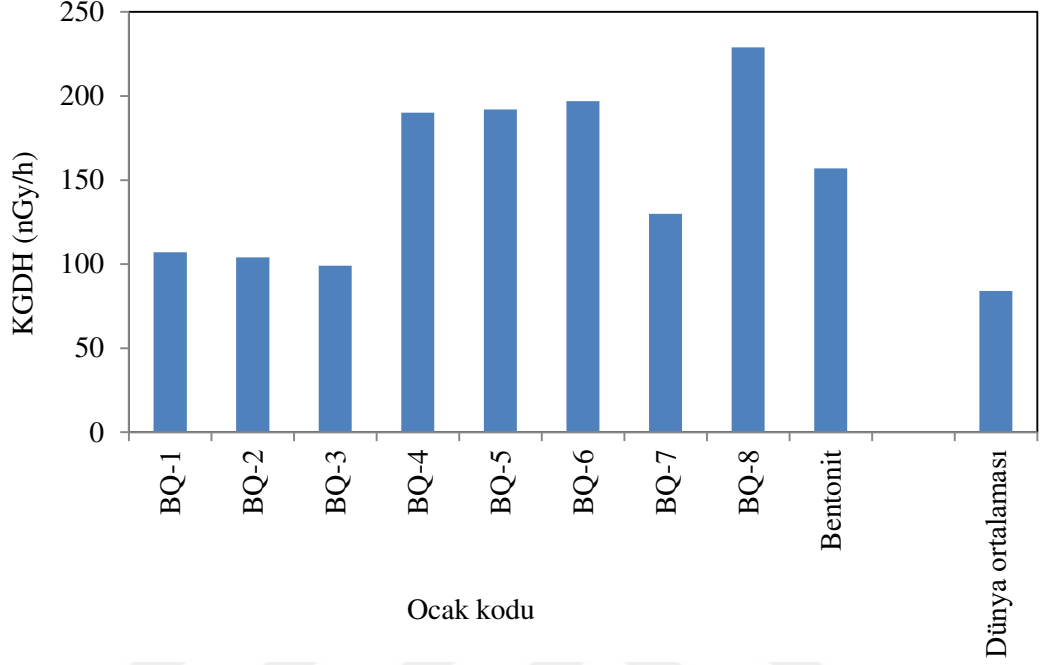
	KGDH (nGy/h)
Ortalama	156,82
Standart hata	6,18
Ortanca	147,4
Standart sapma	61,83
Çarpıklık	0,43
Basıklık	-0,94
En küçük	68,42
En büyük	307,08
Örnek sayısı	100

Tablo 3.10 Kapalı ortamda soğurulan gama doz hızının ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il	KGDH (nGy/h)	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	107
			En küçük	74
			En büyük	139
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	104
			En küçük	69
			En büyük	155
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	99
			En küçük	87
			En büyük	114
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	190
			En küçük	98
			En büyük	234
BQ-5	2	Konya	Ortalama	192
			En küçük	68
			En büyük	292
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	197
			En küçük	154
			En büyük	307
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	130
			En küçük	91
			En büyük	164
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	229
			En küçük	99
			En büyük	276

Tablo 3.10'dan da görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 bentonit ocakları için hesaplanan ortalama KGDH değerleri sırasıyla, 107 (aralık: 74 - 139) nGy/h, 104 (aralık: 69 - 155) nGy/h, 99 (aralık: 87 - 114) nGy/h, 190 (aralık: 98 - 234) nGy/h, 192 (aralık: 68 - 292) nGy/h, 197 (aralık: 154 - 307) nGy/h, 130 (aralık: 91 - 164) nGy/h ve 229 (aralık: 99 - 276) nGy/h aralığında değişmektedir. Tablo 3.10'dan da görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan kapalı ortamda soğurulan gama doz hızı sırasıyla BQ-8, BQ-6 ve BQ-5 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan kapalı ortamda soğurulan gama doz hızları ise, sırasıyla BQ-3, BQ-2 ve BQ-1 ocaklarında hesaplandı. Bentonit ocakları, artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama KGDH değerine göre BQ-3 < BQ-2 < BQ-1 < BQ-7 < BQ-4 < BQ-5 < BQ-6 < BQ-8. En büyük KGDH değeri, BQ-6-7 kodlu

örnekte (Ünye Ordu) ve en küçük değerler BQ-5-2 (Seydişehir Konya) ile BQ-2-14 (Eldivan Çankırı) kodlu örneklerde hesaplandı.



Grafik 3.9 KGDH ortalama değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması

3.3.4 Kapalı Ortam Yıllık Etkin Radyasyon Dozu

Denklem 3.4'de göre soğurulan gama doz hızına karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu (KYED) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı (EC, 1999):

$$KYED \text{ (mSv/y)} = KGDH \times DDF \times TK \times 10^{-6} \quad (3.7)$$

burada KGDH, Denklem 3.4'de verilen kapalı ortamda soğurulan gama dozu hızıdır; DDF, soğurulan dozunu, etkin radyasyon dozuna dönüştüren faktör (0,7 Sv/Gy) ve TK, bir bireyin kapalı ortamda geçirdiği zamanın oranıdır ve 0,8 olarak alındı. Bu değer de ortalama olarak yıllık zamanın %80'inin iç mekânlarda geçirildiğini gösterir (UNSCEAR, 2008).

Bentonit örnekleri için hesaplanan kapalı ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozu değerlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, Tablo 3.11'de her bir ocak için hesaplanan kapalı ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozunun ortalama ve aralık

(en küçük–en büyük) değerleri ise Tablo 3.12'de verildi. Hesaplanan KYED değerlerinin, dünya ortalaması ile karşılaştırılması Grafik 3.10'da gösterildi.

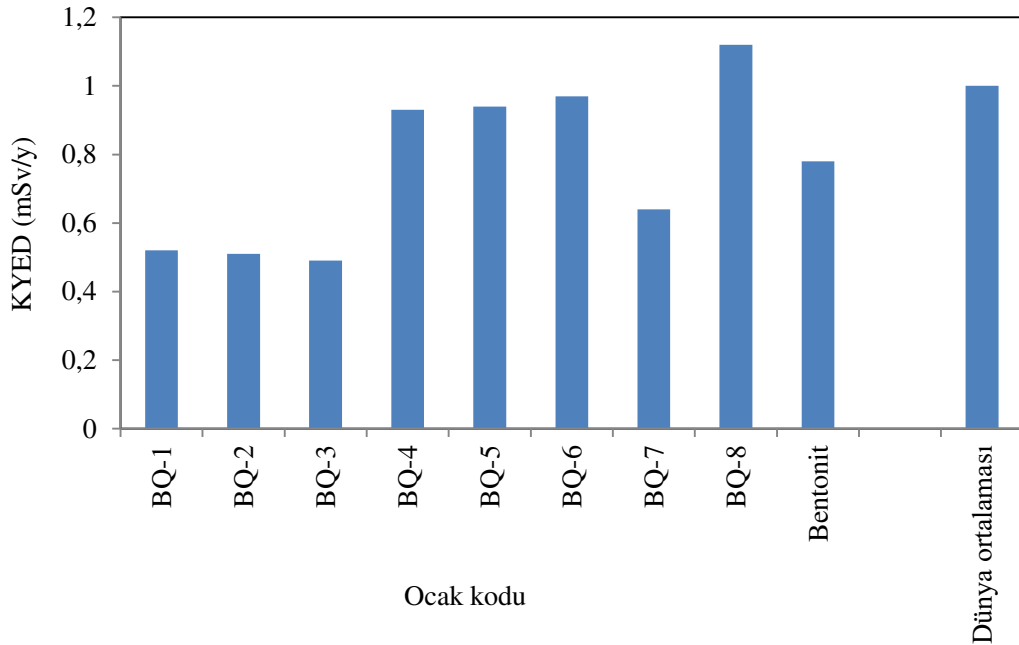
Tablo 3.11 Kapalı ortam yıllık etkin radyasyon dozuna ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

	KYED (mSv/y)
Ortalama	0,78
Standart hata	0,03
Ortanca	0,72
Standart sapma	0,3
Çarpıklık	0,43
Basıklık	-0,94
En küçük	0,33
En büyük	1,5
Örnek sayısı	100

Tablo 3.12 Kapalı ortam yıllık etkin radyasyon dozu ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il	KYED (mSv/y)	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	0,52
			En küçük	0,36
			En büyük	0,68
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	0,51
			En küçük	0,34
			En büyük	0,76
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	0,49
			En küçük	0,42
			En büyük	0,56
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	0,93
			En küçük	0,48
			En büyük	1,15
BQ-5	2	Konya	Ortalama	0,94
			En küçük	0,34
			En büyük	1,43
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	0,97
			En küçük	0,75
			En büyük	1,51
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	0,64
			En küçük	0,45
			En büyük	0,80
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	1,12
			En küçük	0,49
			En büyük	1,36

Tablo 3.12'den de görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 bentonit ocakları için hesaplanan ortalama KYED değerleri sırasıyla, 0,52 (aralık: 0,36 - 0,68) mSv/y, 0,51 (aralık: 0,34 - 0,76) mSv/y, 0,49 (aralık: 0,42 - 0,56) mSv/y, 0,93 (aralık: 0,48 - 1,15) mSv/y, 0,94 (aralık: 0,34 - 1,43) mSv/y, 0,97 (aralık: 0,75 - 1,51) mSv/y, 0,64 (aralık: 0,45 - 0,8) mSv/y ve 1,12 (aralık: 0,49 - 1,36) mSv/y aralığında değişmektedir. Tablo 3.12'den de görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan kapalı ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozu sırasıyla BQ-8, BQ-6 ve BQ-5 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan kapalı ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozları ise, sırasıyla BQ-3, BQ-2 ve BQ-1 ocaklarında hesaplandı. Bentonit ocakları, artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama KYED değerine göre BQ-3 < BQ-2 < BQ-1 < BQ-7 < BQ-4 < BQ-5 < BQ-6 < BQ-8. En büyük KGDH değeri, BQ-6-7 kodlu örnekte (Ünye Ordu) ve en küçük değerler BQ-5-2 (Seydişehir Konya) ile BQ-2-14 (Eldivan Çankırı) kodlu örneklerde hesaplandı.



Grafik 3.10 KYED ortalama değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması

3.3.5 Dış Ortamda Soğurulan Gama Doz Hızı

Her bir bentonit ocağında yerden 1 m yükseklikte havada soğurulan gama doz hızı (DGDH) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplandı (UNSCEAR, 2008):

$$\text{DGDH (nGy/h)} = 0.462 \times A_{\text{Ra}} + 0.604 \times A_{\text{Th}} + 0.0417 \times A_{\text{K}} \quad (3.8)$$

burada A_{Ra} , A_{Th} ve A_{K} , sırasıyla ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın aktivite derişimidir (Bq/kg).

Bentonit örnekleri için hesaplanan dış ortamda soğurulan gama doz hızı değerlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, Tablo 3.13'de ve her bir ocak için hesaplanan dış ortamda soğurulan gama doz hızının ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri ise Tablo 3.14'de verildi. Hesaplanan DGDH değerlerinin, dünya ortalaması ile karşılaştırılması Grafik 3.11'de gösterildi.

Tablo 3.13 Dış ortamda soğurulan gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

	DGDH (nGy/h)
Ortalama	83,17
Standart hata	3,25
Ortanca	78
Standart sapma	32,53
Çarpıklık	0,37
Basıklık	-1,05
En küçük	37
En büyük	163
Örnek sayısı	100

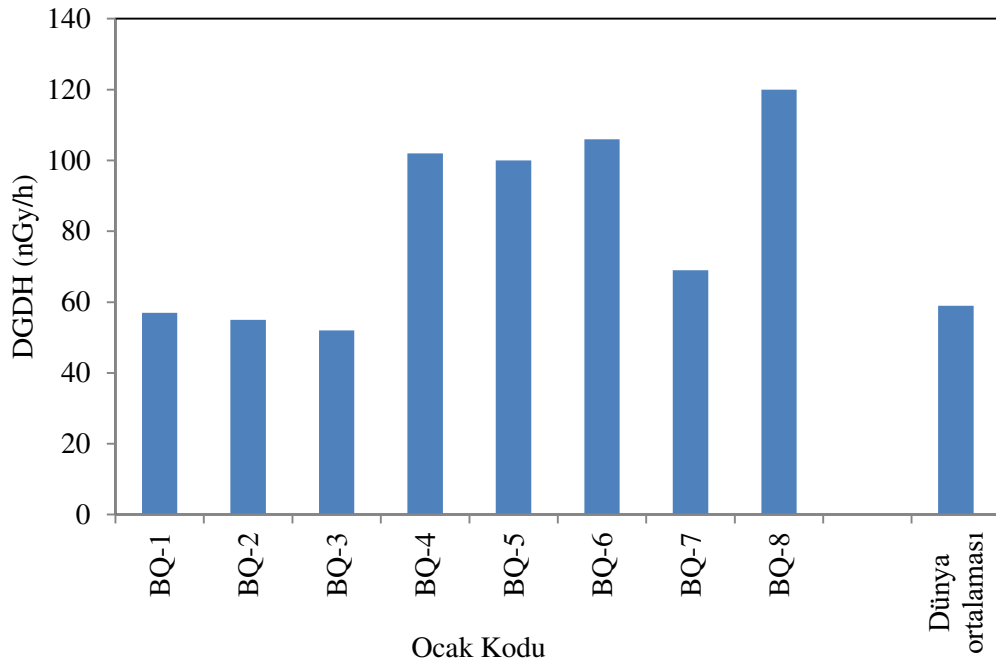
Tablo 3.14'den de görülebileceği gibi radyolojik parametre değerleri BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 bentonit ocakları için hesaplanan dış ortamda soğurulan gama doz hızının (DGDH'nin) ortalama değerleri, sırasıyla 57 (aralık: 40 ila 74) nGy/h, 55 (aralık: 37 ila 82) nGy/h, 52 (aralık: 46 ila 60) nGy/h, 102 (aralık: 52 ila 126) nGy/h, 100 (aralık: 37 ila 150) nGy/h, 106 (aralık: 83 ila 163) nGy/h, 69 (aralık: 47 ila 88) nGy/h ve 120 (aralık: 52 ila 144) nGy/h aralığında değişmektedir.

Tablo 3.14'den de görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan dış ortamda soğurulan gama doz hızı sırasıyla BQ-8, BQ-6 ve BQ-4 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan dış ortamda soğurulan gama doz hızları ise, sırasıyla BQ-3, BQ-2 ve BQ-1 ocaklarında hesaplandı.

Bentonit ocakları, artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama DGDH değerine göre BQ-3 < BQ-2 < BQ-1 < BQ-7 < BQ-5 < BQ-4 < BQ-6 < BQ-8. En büyük DGDH değeri, BQ-6-7 (Ünye Ordu) ile BQ-5-2 (Meram Konya) kodlu örnekte ve en küçük değerler BQ-5-2 (Seydişehir Konya), BQ-2-10 (Şabanözü Çankırı) ile BQ-2-14 (Eldivan Çankırı) kodlu örneklerde hesaplandı.

Tablo 3.14 Dış ortamda soğurulan gama doz hızı ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il	Dış ortamda soğurulan gama doz hızı	
			DGDH (nGy/h)	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	57
			En küçük	40
			En Büyük	74
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	55
			En küçük	37
			En Büyük	82
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	52
			En küçük	46
			En Büyük	60
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	102
			En küçük	52
			En Büyük	126
BQ-5	2	Konya	Ortalama	100
			En küçük	37
			En Büyük	150
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	106
			En küçük	83
			En Büyük	163
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	69
			En küçük	47
			En Büyük	88
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	120
			En küçük	52
			En Büyük	144



Grafik 3.11 DGDH ortalama değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması

3.3.6 Dış Ortam Yıllık Etkin Radyasyon Dozu

Denklem 3.8 ile hesaplanan doz hızına karşılık gelen yıllık etkin radyasyon dozu (DYED), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı (UNSCEAR, 2008):

$$DYED \text{ (mSv/y)} = DGDH \times DDF \times TD \times 10^{-6} \quad (3.9)$$

burada DGDH, Denklem 3.6'da verilen dış ortamda soğurulan gama dozu hızıdır; DDF, soğurulan dozunu, etkin radyasyon dozuna dönüştüren faktör (0,7 Sv/Gy); TD, çalışanların bentonit ocaklarında geçirdiğı ortalama zaman oranıdır ve 0,3 olarak alındı. Bu değer de işçilerinin yıllık zamanlarının yaklaşık %30'unu ocaklarında geçirdiğini gösterir.

Bentonit örnekleri için hesaplanan dış ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozu değerlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, Tablo 3.15'de ve her ocak için hesaplanan dış ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozunun ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri ise Tablo 3.16'da verildi. Hesaplanan DYED değerlerinin, dünya ortalaması ile karşılaştırılması Grafik 3.12'de gösterildi. Tablo

3.16'dan da görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 bentonit ocakları için hesaplanan DYED değerleri sırasıyla, 0,10 (aralık: 0,07 - 0,14) mSv/y, 0,10 (aralık: 0,07 - 0,15) mSv/y, 0,10 (aralık: 0,08 - 0,11) mSv/y, 0,19 (aralık: 0,10 - 0,23) mSv/y, 0,18 (aralık: 0,07 - 0,28) mSv/y, 0,20 (aralık: 0,15 - 0,30) mSv/y, 0,13 (aralık: 0,09 - 0,16) mSv/y ve 0,22 (aralık: 0,10 - 0,26) mSv/y aralığında değişmektedir.

Tablo 3.15 Dış ortam yıllık etkin radyasyon dozuna ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

Dış ortam yıllık etkin radyasyon dozu	
DYED (mSv/y)	
Ortalama	0,15
Standart hata	0,006
Ortanca	0,14
Standart sapma	0,06
Çarpıklık	0,38
Basıklık	-1,05
En küçük	0,07
En Büyük	0,3
Örnek sayısı	100

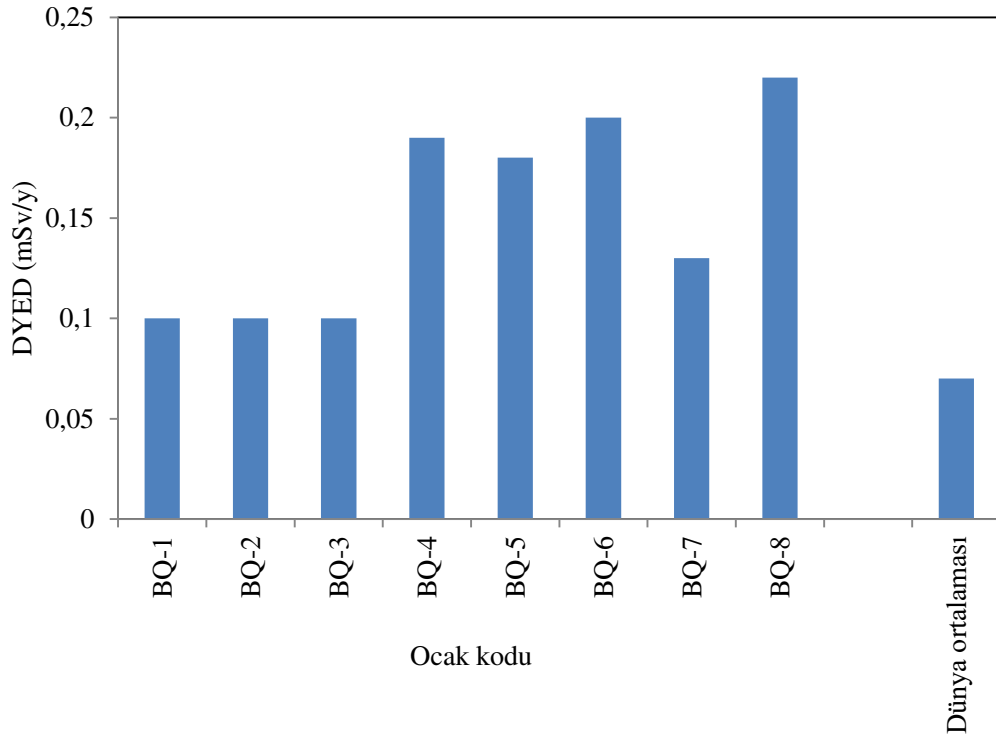
Tablo 3.16'dan da görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan dış ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozu sırasıyla BQ-8, BQ-6 ve BQ-4 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan dış ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozları ise, sırasıyla BQ-3, BQ-2 ve BQ-1 ocaklarında hesaplandı. Bentonit ocakları, artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama DYED değerine göre BQ-3 < BQ-2 < BQ-1 < BQ-5 < BQ-7 < BQ-4 < BQ-6 < BQ-8. En büyük DYED değeri, BQ-6-7 (Ünye Ordu) ile BQ-5-2 (Meram Konya) kodlu örnekte ve en küçük değerler BQ-5-2 (Seydişehir Konya) ile BQ-2-10 (Şabanözü Çankırı) kodlu örneklerde hesaplandı.

Tablo 3.16 Dış ortam yıllık etkin radyasyon dozunun ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il	DYED (mSv/y)	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	0,10
			En küçük	0,07
			En büyük	0,14
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	0,10
			En küçük	0,07
			En büyük	0,15

Tablo 3.16'nın devamı

BQ-3	2	Çorum	Ortalama	0,10
			En küçük	0,08
			En büyük	0,11
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	0,19
			En küçük	0,10
			En büyük	0,23
BQ-5	2	Konya	Ortalama	0,18
			En küçük	0,07
			En büyük	0,28
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	0,20
			En küçük	0,15
			En büyük	0,30
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	0,13
			En küçük	0,09
			En büyük	0,16
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	0,22
			En küçük	0,10
			En büyük	0,26



Grafik 3.12 DYED ortalama değ erlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması

3.3.7 Yaşam Boyu Kanser Riski

Dış ortamda (açık havada) soğurulan gama-ışını sebebiyle oluşan yıllık etkin radyasyon dozuna eşlik eden yaşam boyu kanser riski (YKR) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı (ICRP, 1990):

$$YKR = DYED \times OÖ \times RF \quad (3.10)$$

burada DYED, Denklem 3.7'de verilen yıllık etkin radyasyon dozudur; OÖ yetişkinler için ortalama yaşam süresidir (79 yıl) (TSI, 2022) ve RF, risk faktörüdür (0.057/Sv) (ICRP, 1990).

Bentonit örnekleri için hesaplanan yaşam boyu kanser riski değerlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, Tablo 3.17'de ve her bir ocak için hesaplanan yaşam boyu kanser riskinin ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri ise Tablo 3.18'de verildi. Hesaplanan YKR değerlerinin, dünya ortalaması ile karşılaştırılması Grafik 3.13'de gösterildi. Tablo 3.18'den de görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 bentonit ocakları için hesaplanan ortalama YKR değerleri sırasıyla, $4,7 \times 10^{-4}$ ($3,3 \times 10^{-4} - 6,2 \times 10^{-4}$), $4,5 \times 10^{-4}$ (aralık: $3,1 \times 10^{-4} - 6,8 \times 10^{-4}$), $4,4 \times 10^{-4}$ (aralık: $4,0 \times 10^{-4} - 5,0 \times 10^{-4}$), $8,4 \times 10^{-4}$ (aralık: $4,3 \times 10^{-4} - 1,0 \times 10^{-3}$), $8,3 \times 10^{-4}$ (aralık: $3,0 \times 10^{-4} - 1,2 \times 10^{-3}$), $8,8 \times 10^{-4}$ (aralık: $6,9 \times 10^{-4} - 1,3 \times 10^{-3}$), $5,7 \times 10^{-4}$ (aralık: $3,9 \times 10^{-4} - 7,3 \times 10^{-4}$) ve ortalama: $9,9 \times 10^{-4}$ (aralık: $4,3 \times 10^{-4} - 1,2 \times 10^{-3}$) aralığında değişmektedir.

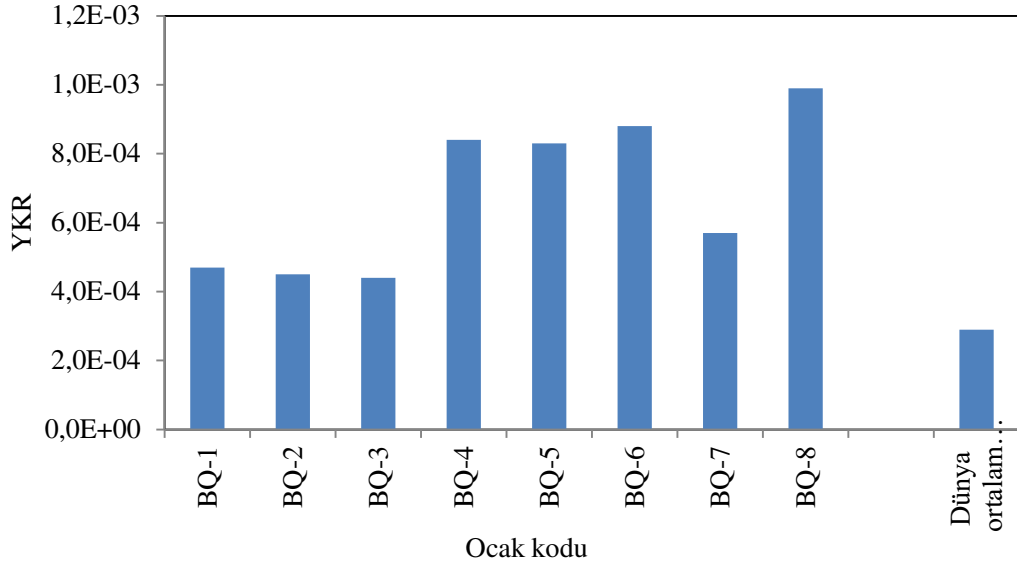
Tablo 3.18'den de görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan yaşam boyu kanser riski sırasıyla BQ-8, BQ-6 ve BQ-4 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan yaşam boyu kanser riski ise, sırasıyla BQ-3, BQ-2 ve BQ-1 ocaklarında hesaplandı. Bentonit ocakları, artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama YKR değerine göre BQ-8 < BQ-6 < BQ-4 < BQ-5 < BQ-7 < BQ-1 < BQ-2 < BQ-3. En büyük YKR değeri, BQ-6-7 (Ünye Ordu) kodlu örnekte ve en küçük değerler BQ-5-2 (Seydişehir Konya), BQ-2-10 (Şabanözü Çankırı) ile BQ-2-14 (Eldivan Çankırı) kodlu örneklerde hesaplandı.

Tablo 3.17 Yaşam boyu kanser riskine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

Yaşam boyu kanser riski	
YKR	
Ortalama	$6,9 \times 10^{-4}$
Standart hata	2,7E-05
Ortanca	$6,5 \times 10^{-4}$
Standart sapma	$2,7 \times 10^{-4}$
Çarpıklık	$3,7 \times 10^{-1}$
Basıklık	-1,06
En küçük	$3,0 \times 10^{-4}$
En Büyük	$1,4 \times 10^{-3}$
Örnek sayısı	100

Tablo 3.18 Yaşam boyu kanser riski ortalama ve aralık değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il	YKR	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	$4,7 \times 10^{-4}$
			En küçük	$3,3 \times 10^{-4}$
			En büyük	$6,2 \times 10^{-4}$
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	$4,5 \times 10^{-4}$
			En küçük	$3,1 \times 10^{-4}$
			En büyük	$6,8 \times 10^{-4}$
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	$4,4 \times 10^{-4}$
			En küçük	$4,0 \times 10^{-4}$
			En büyük	$5,0 \times 10^{-4}$
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	$8,4 \times 10^{-4}$
			En küçük	$4,3 \times 10^{-4}$
			En büyük	$1,0 \times 10^{-3}$
BQ-5	2	Konya	Ortalama	$8,3 \times 10^{-4}$
			En küçük	$3,0 \times 10^{-4}$
			En büyük	$1,2 \times 10^{-3}$
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	$8,8 \times 10^{-4}$
			En küçük	$6,9 \times 10^{-4}$
			En büyük	$1,3 \times 10^{-3}$
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	$5,7 \times 10^{-4}$
			En küçük	$3,9 \times 10^{-4}$
			En büyük	$7,3 \times 10^{-4}$
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	$9,9 \times 10^{-4}$
			En küçük	$4,3 \times 10^{-4}$
			En büyük	$1,2 \times 10^{-3}$



Grafik 3.13 YKR değerlerinin dünya ortalaması ile karşılaştırılması

3.4 Bentonit Örneklerinin Majör ve Minör Oksit Derişimleri

Bentonit örneklerinde analiz edilen majör ve minör oksitlerin derişimlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler, sırasıyla, Tablo 3.19 ve Tablo 3.20’de verildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen majör ve minör oksitlerin ortalama ve aralık (en küçük- en büyük) değerleri, sırasıyla, Tablo 3.21 ve Tablo 3.22’de sunuldu. Türkiye bentonitlerinde analiz edilen majör ve minör oksitlerin ortalama derişimlerinin yer kabuğu ortalaması ile karşılaştırılması, sırasıyla, Grafik 3.14 ve Grafik 3.15’de gösterildi. Tablo 3.19 ile Tablo 3.20’den de anlaşılacağı gibi, yüz adet bentonit örneğinde analiz edilen ortalama oksit derişimler azalan sırada, $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{SO}_3 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$ şekilde sıralandı.

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen SiO_2 derişimleri, ortalaması %54,12 olmak üzere %32,05 ila %80,63 aralığında değişmektedir. Grafik 3.14’de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yaklaşık olarak, yer kabuğu ortalaması olan %54,55’e eşittir (Yaroshevsky, 2006). En yüksek SiO_2 derişimi, BQ-8’de analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama SiO_2 derişimleri, azalan şekilde aşağıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-5 (%61,13) > BQ-4 (%55,41) > BQ-1 (%54,35) > BQ-7 (%54,18) > BQ-6 (%51,39) > BQ-3 (%50,39) > BQ-2 (%49,84) > BQ-8 (%48,27). Türkiye bentonitlerinde analiz edilen Al_2O_3 derişimleri, ortalaması %15,24 olmak üzere %6,86 ila %28,87 aralığında değişmektedir. Grafik 3.14’de de gösterildiği gibi,

bu ortalama değer, yer kabuğu ortalaması olan %16.17'den küçüktür (Yaroshevsky, 2006). En yüksek Al_2O_3 derişimi, BQ-4'te analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama Al_2O_3 derişimleri, azalan şekilde aşığıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-3 (%20,19) > BQ-4 (%19,77 > BQ-7 (%16,55 > BQ-1 (%16,26 > BQ-6 (%15,82) > BQ-2 (%14,45 > BQ-8 (%13,00) > BQ-5 (%12,09).

Tablo 3.19 Majör oksitlerin derişimlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

	Derişim (%)						
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Ortalama	2,78	3,25	15,24	54,12	1,40	4,65	4,36
Standart hata	0,19	0,17	0,44	1,00	0,07	0,44	0,23
Ortanca	2,60	2,99	14,03	52,97	1,33	3,12	4,53
Standart sapma	1,87	1,67	4,33	9,91	0,73	4,31	2,26
Basıklık	-0,47	8,08	-0,17	0,35	-0,52	11,63	-0,71
Çarpıklık	0,62	2,20	0,62	0,55	0,49	2,85	0,13
En küçük	0,32	0,99	6,86	32,05	0,30	0,61	0,51
En büyük	7,80	12,00	28,87	80,63	3,47	29,23	10,03
Örnek sayısı	100	100	100	100	100	100	100
Yer kabuğu	2,66	5,44	15,87	53,54	1,09	9,41	1,10

Tablo 3.20 Minör oksitlerin derişimlerine ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

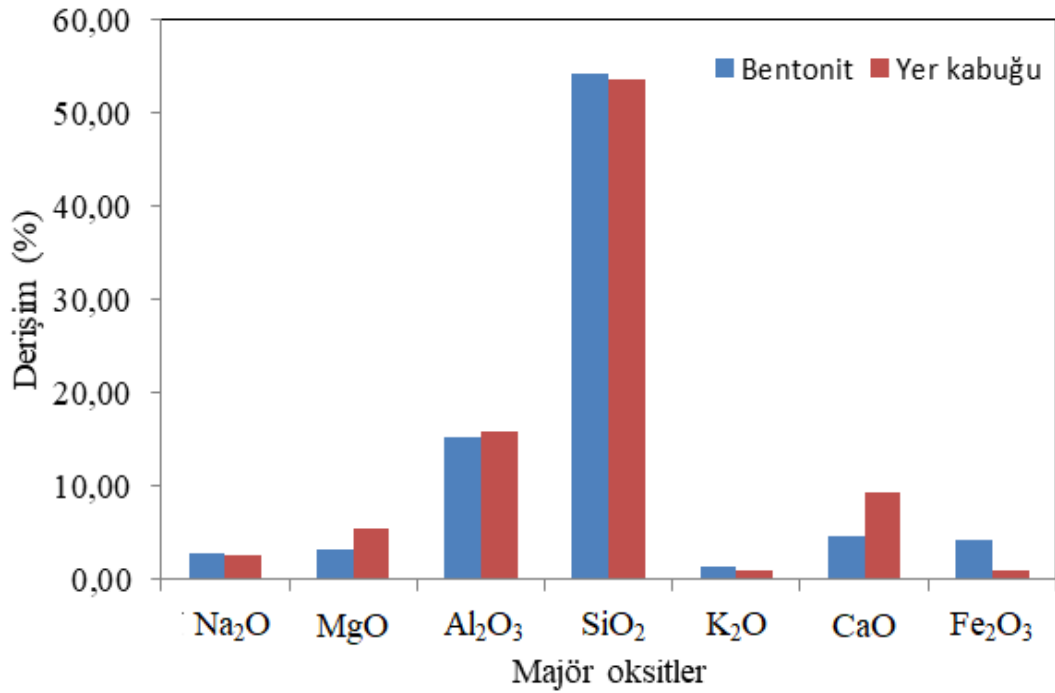
	Derişim (%)			
	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO
Ortalama	0,20	0,35	0,58	0,10
Standart hata	0,02	0,09	0,03	0,01
Ortanca	0,15	0,05	0,59	0,08
Standart sapma	0,24	0,93	0,34	0,13
Basıklık	45,46	27,45	-0,33	51,92
Çarpıklık	5,84	4,89	0,38	6,37
En küçük	0,02	0,001	0,07	0,01
En büyük	2,18	6,67	1,60	1,22
Örnek sayısı	100	100	100	100
Yer kabuğu	0,19	0,052	0,97	0,16

Tablo 3.21 Bentonit ocaklarında analiz edilen majör oksitlerin dağılımları

		Majör oksitlerin derişimi (%)						
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
BQ-1	Ortalama	4,15	3,42	16,26	54,35	1,60	3,49	5,94
	Aralık	0,71-7,80	1,42-6,20	11,53-21,41	41,01-72,20	0,31-2,73	1,31-7,44	2,17-10,03
BQ-2	Ortalama	3,95	4,05	14,45	49,84	0,88	5,26	5,63
	Aralık	2,09-6,21	2,80-5,45	9,06-21,01	32,05-66,90	0,55-1,43	1,34-10,90	3,75-7,32
BQ-3	Ortalama	1,48	4,27	20,19	50,39	1,72	7,11	5,33
	Aralık	0,61-3,01	0,99-12,00	10,60-23,16	40,51-63,11	1,21-2,60	1,44-20,64	4,26-6,53
BQ-4	Ortalama	1,50	3,88	19,77	55,41	1,99	1,81	3,54
	Aralık	0,65-2,03	2,78-5,59	14,16-28,87	46,57-68,12	1,23-2,51	1,41-2,07	2,10-5,93
BQ-5	Ortalama	1,25	2,23	12,09	61,13	1,00	2,76	1,22
	Aralık	0,32-4,12	1,35-3,17	8,17-17,77	44,31-79,26	0,30-2,87	0,61-11,57	0,51-1,80
BQ-6	Ortalama	4,17	2,64	15,82	51,39	1,35	8,47	3,60
	Aralık	1,88-6,05	1,41-4,44	8,20-23,77	41,44-64,44	0,78-3,47	2,25-29,23	2,67-5,03
BQ-7	Ortalama	1,44	3,58	16,55	54,18	1,74	3,73	4,43
	Aralık	0,44-3,22	1,82-8,80	11,77-23,54	45,27-65,74	0,44-3,12	0,72-8,05	1,82-6,15
BQ-8	Ortalama	3,26	3,61	13,00	48,27	1,26	7,07	6,05
	Aralık	1,16-6,29	1,16-8,37	6,86-21,46	35,94-80,63	0,48-2,33	3,04-15,70	3,03-9,37

Tablo 3.22 Bentonit ocaklarında analiz edilen minör oksitlerin dağılımları

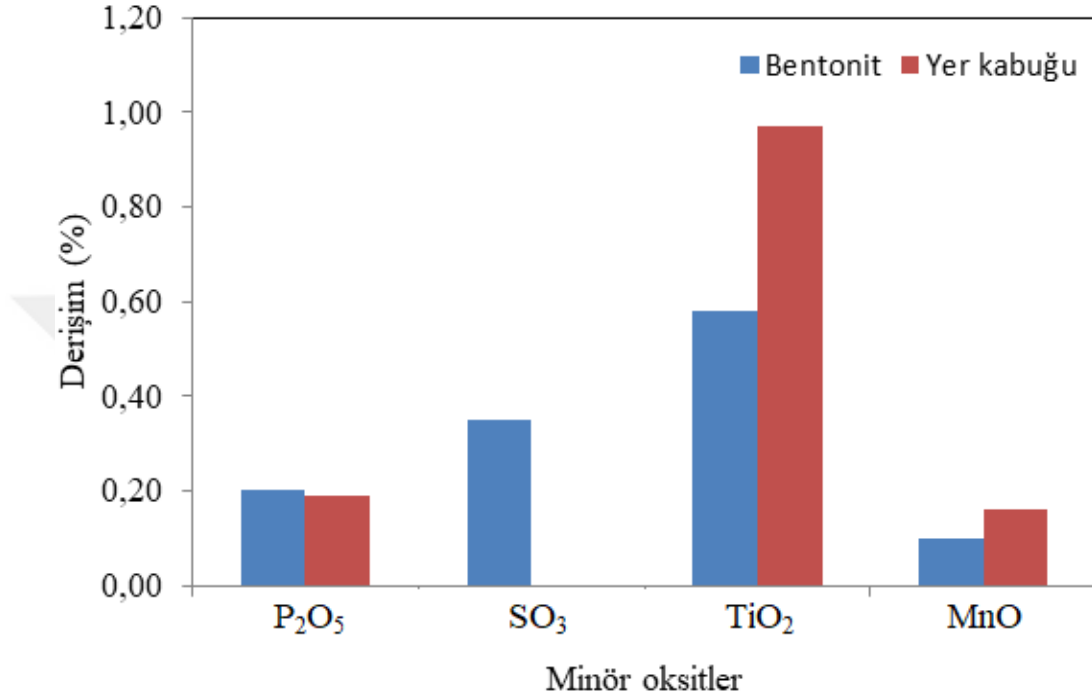
		Minör oksit derişimi (%)			
		P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO
BQ-1	Ortalama	0,23	0,12	0,85	0,10
	Aralık	0,08-0,58	0,01-0,75	0,32-1,28	0,01-0,26
BQ-2	Ortalama	0,11	0,66	0,78	0,15
	Aralık	0,07-0,18	0,29-1,04	0,43-0,97	0,02-0,37
BQ-3	Ortalama	0,62	1,30	0,63	0,26
	Aralık	0,15-2,18	0,07-5,03	0,44-0,86	0,03-1,22
BQ-4	Ortalama	0,10	2,23	0,46	0,06
	Aralık	0,04-0,13	0,01-6,67	0,26-0,75	0,02-0,09
BQ-5	Ortalama	0,04	0,04	0,15	0,07
	Aralık	0,02-0,19	0,001-0,570	0,07-0,23	0,02-0,25
BQ-6	Ortalama	0,20	0,16	0,34	0,11
	Aralık	0,15-0,26	0,03-0,89	0,27-0,44	0,03-0,15
BQ-7	Ortalama	0,20	0,06	0,61	0,10
	Aralık	0,04-0,43	0,002-0,330	0,21-0,99	0,02-0,19
BQ-8	Ortalama	0,27	0,77	0,81	0,09
	Aralık	0,07-0,68	0,01-2,73	0,46-1,60	0,03-0,22



Grafik 3.14 Majör oksitlerin ortalama derişimlerinin yer kabuğu ile karşılaştırılması

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen CaO derişimleri, ortalaması %4,65 olmak üzere %0,61 ila %29,23 aralığında değişmektedir. Grafik 3.14'de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yer kabuğu ortalaması olan %8,72'den yaklaşık iki kat daha küçüktür

(Yaroshevsky, 2006). En yüksek CaO derişimi, BQ-6'da analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama CaO derişimleri, azalan şekilde aşığıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-6 (%8,47) > BQ-3 (%7,11) > BQ-8 (%7,07) > BQ-2 (%5,26) > BQ-7 (%3,73) > BQ-1 (%3,49) > BQ-5 (%2,76) > BQ-4 (%1,81).



Grafik 3.15 Minör oksitlerin ortalama derişimlerinin yer kabuğı ile karşılaştırılması

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen Fe₂O₃ derişimleri, ortalaması %4,36 olmak üzere %0,51 ile %10,3 aralığında değışmektedir. Grafik 3.14'de de gösterildiğı gibi, bu ortalama değıer, yer kabuğı ortalaması olan %0,92'den yaklaşık önemli ölçüde daha büyüktür (Yaroshevsky, 2006). En yüksek Fe₂O₃ derişimi, BQ-1'de analiz edilmiştir. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama Fe₂O₃ derişimleri, azalan şekilde aşığıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-8 (%6,05) > BQ-1 (%5,94) > BQ-2 (%5,63) > BQ-3 (%5,33) > BQ-7 (%4,43) > BQ-6 (%3,60) > BQ-4 (%3,54) > BQ-5 (%1,22). Türkiye bentonitlerinde analiz edilen MgO derişimleri, ortalaması %3,25 olmak üzere %0,99 ila %12,00 aralığında değışmektedir. Grafik 3.14' de de gösterildiğı gibi, bu ortalama değıer, yer kabuğı ortalaması olan %4,91'den daha küçüktür (Yaroshevsky, 2006). En yüksek MgO derişimi, BQ-3'te analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama MgO derişimleri, azalan şekilde aşığıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-3 (%4,27) > BQ-2 (%4,05) > BQ-4 (%3,88) > BQ-8 (%3,61) > BQ-7 (%3,58) > BQ-1 (%3,42) > BQ-6 (%2,64) > BQ-5 (%2,23).

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen Na_2O derişimleri, ortalaması %2,78 olmak üzere %0,32 ila %7,80 aralığında değişmektedir. Grafik 3.14'de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yaklaşık olarak, yer kabuğu ortalaması olan %2,74'e eşittir (Yaroshevsky, 2006). En yüksek Na_2O derişimi, BQ-1'de analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama Na_2O derişimleri, azalan şekilde aşağıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-6 (%4,17) > BQ-1 (%4,15) > BQ-2 (%3,95) > BQ-8 (%3,26) > BQ-4 (%1,50) > BQ-3 (%1,48) > BQ-7 (%1,44) > BQ-5 (%1,25).

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen K_2O derişimleri, ortalaması %1,40 olmak üzere %0,30 ila %3,47 aralığında değişmektedir. Grafik 3.14'de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yaklaşık olarak yer kabuğu ortalaması olan %1,32'den biraz daha büyüktür (Yaroshevsky, 2006). En yüksek K_2O derişimi, BQ-6'da analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama K_2O derişimleri, azalan şekilde aşağıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-4 (%1,99) > BQ-7 (%1,74) > BQ-3 (%1,72) > BQ-1 (%1,60) > BQ-6 (%1,35) > BQ-8 (%1,26) > BQ-5 (%1,00) > BQ-2 (%0,88).

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen TiO_2 derişimleri, ortalaması %0,58 olmak üzere %0,07 ila %1,60 aralığında değişmektedir. Grafik 3.15'de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yaklaşık olarak yer kabuğu ortalaması olan %0,86'dan daha küçüktür (Yaroshevsky, 2006). En yüksek TiO_2 derişimi, BQ-8'de analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama TiO_2 derişimleri, azalan şekilde aşağıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-1 (%0,85) > BQ-8 (%0,81) > BQ-2 (%0,78) > BQ-3 (%0,63) > BQ-7 (%0,61) > BQ-4 (%0,46) > BQ-6 (%0,34) > BQ-5 (%0,15).

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen SO_3 derişimleri, ortalaması %0,35 olmak üzere %0,001 ila %6,67 aralığında değişmektedir. Grafik 3.15'de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yer kabuğu ortalaması olan %0,06'dan daha büyüktür (Yaroshevsky, 2006). En yüksek SO_3 derişimi, BQ-3'te analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama SO_3 derişimleri, azalan şekilde aşağıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-4 (%2,23) > BQ-3 (%1,30) > BQ-8 (%0,77) > BQ-2 (%0,66) > BQ-6 (%0,16) > BQ-1 (%0,12) > BQ-7 (%0,06) > BQ-5 (%0,04).

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen P_2O_5 derişimleri, ortalaması %0,20 olmak üzere %0,02 ila %2,18 aralığında değişmektedir. Grafik 3.15'de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yer kabuğu ortalaması olan %0,02'ye eşittir (Yaroshevsky, 2006). En yüksek P_2O_5 derişimi, BQ-3'te analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama P_2O_5 derişimleri, azalan şekilde aşağıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-3 (%0,62) > BQ-8 (%0,27) > BQ-1 (%0,23) > BQ-6 (%0,21) > BQ-7 (%0,20) > BQ-2 (%0,11) > BQ-4 (%0,10) > BQ-5 (%0,04).

Türkiye bentonitlerinde analiz edilen MnO derişimleri, ortalaması %0,10 olmak üzere %0,01 ila %1,22 aralığında değişmektedir. Grafik 3.15'de de gösterildiği gibi, bu ortalama değer, yer kabuğu ortalaması olan %0,16'dan küçüktür (Yaroshevsky, 2006). En yüksek MnO derişimi, BQ-3'te analiz edildi. Bentonit ocaklarında analiz edilen ortalama MnO derişimleri, azalan şekilde aşağıdaki gibi özetlenmektedir: BQ-3 (%0,26) > BQ-2 (%0,15) > BQ-6 (%0,11) > BQ-7 (%0,10) > BQ-1 (%0,09) > BQ-8 (%0,08) > BQ-5 (%0,07) > BQ-4 (%0,06).

3.5 Kozmik Radyasyondan Kaynaklanan Gama Doz Hızı

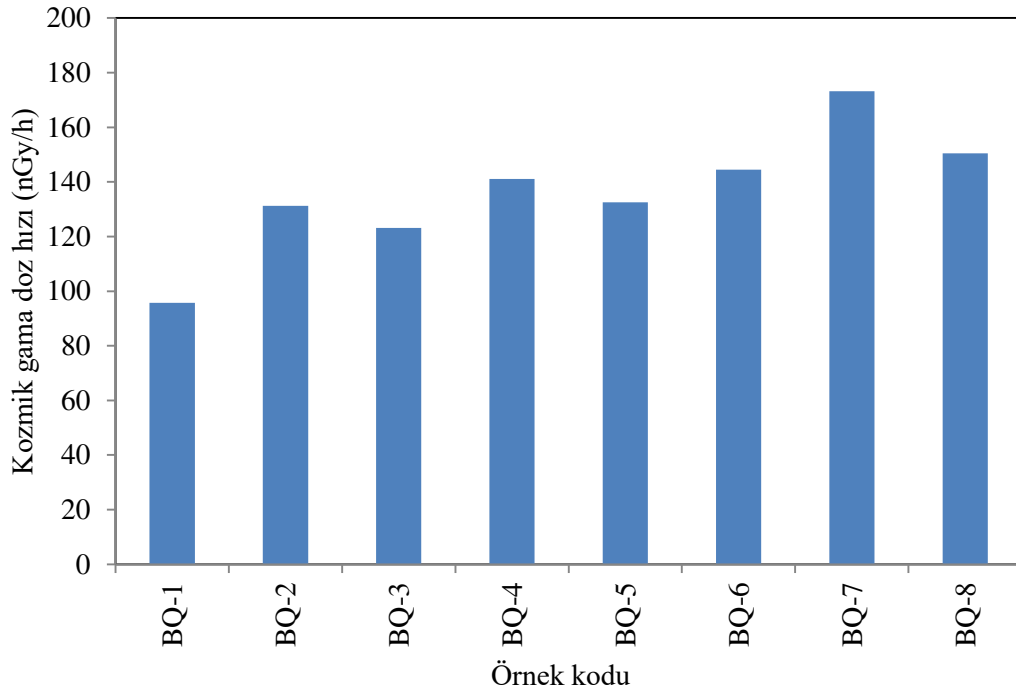
Bentonit ocaklarında hem yer kabuğu hem de kozmik ışınlarından radyasyona gelen katkıyı en iyi şekilde ölçmek sebebiyle 1 m havada radyakmetre ile yapılan ölçümlerde kozmik radyasyon nedeniyle soğrulan gama doz hızı, ölçülen yer kabuğu ve kozmik radyasyondan kaynaklanan gama doz hızı toplam değerlerinden, bentonit örneklerinde ölçülen radyonüklit aktivite derişimleri çıkarılarak elde edilmiştir ve kozmik gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı veriler, Tablo 3.23'de verilmiştir. Bentonit ocaklarında hesaplanan kozmik gama doz hızı ortalamalarının birbirleri ile karşılaştırılması, Grafik 3.16'da verildi. Her bir ocakta hesaplanan kozmik gama doz hızlarının ortalama ve aralık (en küçük – en büyük) değerleri Tablo 3.24'de verildi.

Tablo 3.24'den de görülebileceği gibi BQ-1, BQ-2, BQ-3, BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 ocakları için hesaplanan ortalama kozmik gama doz hızlarının değerleri sırasıyla, 96 (aralık: 48 - 151) nGy/h, 131 (aralık: 53 - 244) nGy/h, 123 (aralık: 77 - 197) nGy/h, 141 (aralık: 49 - 253) nGy/h, 133 (aralık: 9 - 179) nGy/h, 145 (aralık: 24

- 254) nGy/h, 173 (aralık: 102 - 255) nGy/h ve 151 (aralık: 43 - 264) nGy/h aralığında değişmektedir.

Tablo 3.23 Kozmik gama doz hızına ilişkin bazı tanımlayıcı istatistiksel veriler

Kozmik gama doz hızı (nGy/h)	
Ortalama	135,1
Standart hata	5,7
Ortanca	129
Standart sapma	57,3
Çarpıklık	0,35
Basıklık	-0,43
En küçük	9,0
En Büyük	264,0
Örnek sayısı	100



Grafik 3.16 Kozmik gama doz hızı ortalama değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 3.24'den de görülebileceği gibi en yüksek hesaplanan kozmik gama doz hızı sırasıyla BQ-7, BQ-9 ve BQ-6 bentonit ocaklarında hesaplanırken, en düşük hesaplanan kozmik gama doz hızları ise, sırasıyla BQ-1, BQ-3 ve BQ-2 ocaklarında hesaplandı. Bentonit ocakları, artan sırada şu şekilde sıralanır: ortalama kozmik gama doz hızı değerine göre BQ-1 < BQ-3 < BQ-2 < BQ-5 < BQ-4 < BQ-6 < BQ-8 < BQ-7. En büyük YKR değeri, BQ-8-2 (Niksar Tokat) kodlu örnekte ve en küçük

değerler BQ-5-5 (Meram Konya) ile BQ-6-7 (Ünye Ordu) kodlu örneklerde hesaplandı.

Tablo 3.24 Kozmik gama doz hızlarının ortalama, en küçük ve en büyük değerleri

Ocak kodu	Ocak sayısı	Bulunduğu il	Kozmik gama doz hızı (nGy/h)	
BQ-1	1	Ankara	Ortalama	96
			En küçük	48
			En büyük	151
BQ-2	4	Çankırı	Ortalama	131
			En küçük	53
			En büyük	244
BQ-3	2	Çorum	Ortalama	123
			En küçük	77
			En büyük	197
BQ-4	3	Edirne	Ortalama	141
			En küçük	49
			En büyük	253
BQ-5	2	Konya	Ortalama	133
			En küçük	9
			En büyük	179
BQ-6	4	Ordu	Ortalama	145
			En küçük	24
			En büyük	254
BQ-7	2	Trabzon	Ortalama	173
			En küçük	102
			En büyük	255
BQ-8	3	Tokat	Ortalama	151
			En küçük	43
			En büyük	264

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Binalarda kalıcı olarak kullanılmak amacıyla üretilen yapı malzemeleri, endüstriyel mineraller ve yapı malzemelerinin üretiminde ham madde olarak kullanılan endüstriyel atıkların içerebileceği yer kabuğu kökenli doğal radyonüklitlerin aktivite derişimlerinin ölçülmesi, bu malzemelerin kullanımıyla ilişkili radyolojik tehlikelerin (risklerin) değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde bulunan ticari olarak işletilen ve potansiyel olarak var olan ocaklardan toplanan bentonit örneklerin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitinin aktivite seviyeleri, gama-ışını spektroskopisi kullanılarak belirlendi.

^{226}Ra 'nın ortalama aktivite derişimi, dünya (yer kabuğu) ortalaması olan 32 Bq/kg'dan ve ^{232}Th 'nin ortalama aktivite derişimi, dünya ortalaması olan 45 Bq/kg'dan daha yüksektir (UNSCEAR, 2008). Ancak, ^{40}K olan ortalama aktivite derişimi, dünya ortalaması olan 412 Bq/kg değerinin altındadır (UNSCEAR, 2008). Bentonit örneklerinin %51'inde ölçülen ^{226}Ra aktivite derişimi, %74'nde ölçülen ^{232}Th aktivite derişimi ve %24'nde ölçülen ^{40}K aktivite derişimi, her bir radyonüklite karşılık gelen ortalama değerden daha yüksektir.

Bentonit örnekleri için hesaplanan kapalı ortamda soğurulan gama doz hızının ortalama değeri, 156,82 nGy/h (aralık: 68,42 - 307,08 nGy/h) olarak bulundu. Bu ortalama değer, dünya ortalaması olan 84 nGy/h'den (UNSCEAR, 2008) yaklaşık iki kat daha yüksektir. Bu gama doz hızına karşılık gelen kapalı ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozunun (KYED'nin) ortalama değeri, 0,78 mSv/y (aralık: 0,3-1,5 mSv/y) olarak bulundu. Bu ortalama değer, doz ölçütü olarak kabul edilen 1 mSv/y'den daha düşüktür (EC, 1999). Kalıcı yapısal malzemelere azami olarak %35 bentonit eklendiğinde, her bir bentonit ocağı için hesaplanan ortalama KYED değerlerinin, yıllık etkin radyasyon dozuna olan katkıları, 0,2 - 0,3 mSv/y aralığında değişmektedir.

Hesaplanan ortalama dış ortamda soğurulan gama doz hızı (DGDH) değerleri BQ-4, BQ-5, BQ-6, BQ-7 ve BQ-8 için, dünya ortalaması olan 59 nGy/h'den daha yüksektir (UNSCEAR, 2008). Ayrıca, dış mekânda soğurulan gama dozu oranı ve karşılık

gelen yıllık etkin radyasyon dozu ve aşırı yaşam boyu kanser riskleri hesaplanarak bentonit ocağı çalışanlarının maruz kalabileceği radyolojik riskler de değerlendirildi. Dış ortamda soğurulan gama doz hızına karşılık gelen dış ortamdaki yıllık etkin radyasyon dozunun (DYED'nin) tüm ortalama değerleri, dünya ortalaması olan 0,07 mSv/y'den daha yüksektir. Hesaplanan yaşam boyu kanser riski (YKR) ortalama değerleri, dünya ortalaması olan $2,9 \times 10^{-4}$ değerinden daha yüksektir (UNSCEAR, 2008). BQ-4, BQ-5, BQ-6 ve BQ-8 kodlu bentonit ocakları, yer kabuğu ortalamasına göre daha yüksek düzeyde ^{226}Ra ve ^{232}Th içerdiğinden, bentonit mineralinin çıkarılması, işlenmesi ve taşınması aşamalarında çalışan ocak işçilerinin gerekli radyasyondan korunma önlemlerinin alınması kuvvetli bir şekilde tavsiye edilir.

Bentonit örnekleri için hesaplanan aktivite derişim indisi ortalama değeri, 0,66 (aralık: 0,29-1,28) olarak bulundu. Bu ortalama değeri, sınır değeri olan 1'den daha düşüktür. Bentonit örnekleri için hesaplanan iç ışınlama indisi (alfa indisi) ortalama değeri, 0,24 (aralık: 0,03-1,16) olarak bulunmuştur. Bu ortalama değeri, sınır değeri olan 1'den daha düşüktür.

Her bir bentonit örneğinin inşaat sektörlerinde ham madde olarak kullanılması, Avrupa Komisyonu tarafından hazırlanan radyolojik koruma ilkelerine göre radyolojik açıdan değerlendirildi. Yapı malzemesi olarak incelenen bentonit mineral örneklerinin kullanımı için hesaplanan radyolojik parametrelerin ortalama değerlerinin, tavsiye edilen güvenlik ölçütleri veya sınırları içinde olduğu görüldü. Sonuç olarak, bu çalışma, incelenen Türk bentonit örneklerinin önemli bir radyasyon riski oluşturmadığını ve konut yapımında kullanım için güvenli olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, Türk bentonit örneğindeki yedi majör (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O ve K_2O) ve dört minör (TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 ve MnO) oksit derişim seviyeleri, enerji dağılımlı X-ışını floresans spektrometresi kullanılarak belirlendi. Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , TiO_2 , SO_3 ve P_2O_5 'in en düşük ortalama derişimleri, BQ-5 kodlu bentonit ocağında analiz edildi. Bu çalışma, Türkiye'deki bentonit

ocaklarının doğal radyonüklit, majör ve minör oksitlerinin dağılımları üzerine yapılan ilk ayrıntılı çalışmadır.

Bu çalışmada elde edilen veriler,

(1) çevresel radyoaktivitenin değerlendirilmesine ve bu malzemelerin kullanılması, dağıtılması ve yönetilmesi ile ilgili yasal mevzuatın veya standartların hazırlanmasına yönelik olarak kullanılabilecek yol gösterici bilgi mahiyetindedir ve

(2) hem Türkiye'de hem de bentonitin ihraç edildiği Avrupa ülkelerinde farklı alanlarda bentonitlerin verimli bir şekilde değerlendirilmesinde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Ait, H.H., Akodad, M., Baghour, M., Moumen, A., Skalli, A., Azizi, G., Gueddari, H. Maach, M., Aalaoul, M., Anjjar, A., & Daoudi, L. (2021). Valorization of Moroccan bentonite deposits: purification and treatment of margin by the adsorption process. *Molecules*, 26(18). 1-20.
- Agayeva, Z. R., Jabarov, E. E., Yagubov, A. I., Mehdiyeva, R. N., Farkhatova, N. B., & Gasimova A. M. (2018). Radioactivity degree different deposits of bentonites. *Azərbaycan Kimya Jurnalı*, 3, 99-102.
- Akar, Y. (2019). Polivinil Alkol Katkılı Na/Bentonit Kompozitlerin Yapısal, Termal ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kocaeli.
- Akbulut, A. (1996). Bentonit. *MTA Eğitim Serisi*, 78, Ankara.
- Alemdar, A. (1995). Bentonit killlerinin nötron aktivasyon analizi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Ali, Z. (1996). Detoxification of aflatoxin B1 in broiler diet by using adsorptive property of HI-MAX BS7 and its effect on growthtrait. *Ravi Feed Industries Catalogue*. Pakistan.
- Alzaridi, F. M. N. S. (2020). Kastamonu'da tüketilen musluk ve şişe sularının radyometrik ve element analizleri. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Angüner, E. O. (2008). Gamma-Ray Detector Array. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Arıcı, T. (2012). Gama Işını Spektroskopisi İçin Bir Hibrid Dedektör Sisteminin Kurulumu ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Atıcı, E. (2016). Kapadokya Bölgesinde Yapı Taşı Olarak Üretilen Tüflerdeki Doğal Radyoaktivitenin Gama Spektrometrik Yöntemle Ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Nevşehir.
- Avcı, S.B. (2009). Soda ve MgO ile Aktifleştirilmiş Ara Tip Bentonitlerin Sondaj ve Döküm Bentoniti Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Bakır, S. (2010). Göbü (Ordu, Kuzeydoğu Türkiye) yöresi bentonit oluşumlarının mineralojik ve jeokimyasal özellikleri ve kullanım alanlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Konya.

- Başçetin, E., & Atun, G. (2006). Adsorption behavior of strontium on binary mineral mixtures of Montmorillonite and Kaolinite. *Applied Radiation and Isotopes*, 64, 957-964.
- Borrelli, R.A., Thivent, O., & Ahn, J. (2013). Parametric studies on confinement of radionuclides in the excavated damaged zone due to bentonite type and temperature change. *Physics and Chemistry of the Earth*, 65, 32-41.
- Bortoletto, D. (2010). Solid State Detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 623(1). 35-41. doi:10.1016/j.nima.2010.02.1471
- Bozdoğan, İ. (1990). Bazı bentonit türü killerin teknolojik karakteristiklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Brouwer, P. (2013). Theory of XRF-Getting acquainted with the principles. *PANalytical*, EA Almelo.
- Can, M. (2002). Bentonit, zeolit ve çam talaşı üzerine metal kompleks boyalarının adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.
- Chen, C., Zhou, W., Yang, Q., Zhu, L., & Zhu, L. (2014). Sorption characteristics of nitrosodiphenylamine (NDPhA) and diphenylamine (DPhA) onto organo-bentonite from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 240, 487-493.
- Cerit, E. (2013). Farklı Polimer-Na/Bentonit Nanokompozitlerinin Sentezlenmesi Ve Yapısal Karakteristikleri. Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Çandır, İ. (2018). Bentonitlerden Genleşmiş Kil Agregası Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Adana.
- Çinku, K. (1999). Yazır (Trakya) bentonitinin boya sanayinde kıvamlaştırıcı olarak kullanılmak üzere hazırlanması olanaklarının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Çinku, K. (2008). Aktivasyon Yöntemleri ile Bentonitten Su Bazlı Kıvamlaştırıcı Üretiminin Araştırılması. Doktora Tezi. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Çoban, F. (2014). The mineralogy and geochemistry of Bigadiç (Balıkesir) bentonite deposits and the mobility of major, trace and rare earth elements during bentonitization. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, (29,2). 55-68.
- Currie, L.A. (1968). Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Analytical Chemistry*, 40, 586-593.

- Debertin, K., & Helmer, R.G. (1988). Gamma and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors. *Elsevier*, Amsterdam.
- Demirel, H., Karapınar, N., & Akça, K. (1995). Bentonit ve diğer killerin absorbant olarak kullanımı. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 21-24, İzmir.
- Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), (2001). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı.
- Driscoll, M. (1992). European Cat Litter; Absorbing Market Growth. *Industrial Minerals*, 298, 46-65.
- Dumlupınar, İ. (2008). Kapıkaya (Eskişehir) bentonit oluşumlarının jeolojik, mineralojik ve jeokimyasal özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Afyon.
- 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.
- Ertürk, V.E. (2006). Marmara bölgesi bentonit bilgi sisteminin oluşturulması üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Eisenhour, D., & Reisch, F. (2006). Bentonite, in *Industrial minerals and rocks 7th edition*. Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., & Krukowski, S.T. (eds.) *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc.*(pp 357-368). Littleton, Colorado.
- Fındıkçı, B. (2020). Bentonit Kilinin Cam Fiber İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kocaeli.
- Garad, A.M.K. (2019). Kangal Termik Santrali Çevresindeki Yüzey Toprağındaki Ağır Metal Kirliliğinin ve Asitleşmenin Ekolojik Açıdan Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, *Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Ge, X., Mou, C., Wang, C., Men, X., Chen, C., & Hou, Q. (2019). Mineralogical and geochemical characteristics of K bentonites from the Late Ordovician to the Early Silurian in South China and their geological significance. *Geological Journal*, 54(3). 514-528. doi:10.3390/min10010069
- Gezer, F., Turhan, Ş., Kurnaz. A., & Ufuktepe. Y. (2019). Radiometric characterization of zeolite minerals used in many industries and assessment of radiological risks. *Applied Radiation and Isotopes*, 152, 57-63.
- Gezer, F., Turhan, Ş., & Ufuktepe. Y. (2021). Radiometric analysis of micas used in many industries and evaluation of radiological hazards. *Radiochim Acta* 109(8), 643-651.
- Gezer, F. (2011). Fosfojips'in Doğal Radyoaktifliğinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Adana.

- Gilmore, G.R. (2008). Practical Gamma-Ray Spectrometry. *John Wiley and Sons*, 25-38, New York.
- Gruber, V. (2009). Radiation exposure by natural radionuclides in drinking water in Upper Austria. Doktora Tezi. *Universität Für Bodenkultur*. Wien, Austria.
- Gümüşer, G. (1997). Kelkit Vadisi kuzeyi (Reşadiye-Alıcık-Bereketli) bentonit yataklarının mineralojik petrografik ve jeokimyasal incelemesi. Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sivas.
- Günay, Y., Değirmenci, S., şirin, B., & Akarlar, N. (2001). Türkiye'de döküm bentonitinin 2000'lerde iyileştirilmesi. *Metallurji Dergisi*, 126, 13–19.
- Güngör, P. (1992). Çankırı basın Çankırı havzasının güneybatısındaki bentonitlerin mineralojik ve kimyasal özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Güngörmüş, G. (2003). Bentonit uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu uygulanan granüler zeminlerde serbest basınç mukavemetinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Erzurum.
- Grieken, R.V.G., & Margui, E. (2013). X-ray fluorescence spectrometry and related techniques. *Momentum Press*, US-Canada.
- ICRP (1990). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 212, 1-3, publication 60.
- İpekoğlu B., Kurşun. İ., Bilge. Y., & Barut A. (1997). Türkiye Bentonit Potansiyeline Genel Bir Bakış. *2.Endüstriyel Ham maddeler Sempozyumu*, 51-57, İzmir.
- Jalil, H., Rehman, A., & Jehangir, M. (1996). Study on the effect of sodium bentonite supplementation on the performance of the broiler chicks. *Poultry Research Enstitute*. Shamasabad.
- Jeffrey, K., (2006). In Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses, 7th edition. Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M. & Krukowski, S.T. (Eds.), *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, (pp. 3–6). Littleton, Colorado.
- Kalpklı, Y. (2018). Determination of reaction conditions of the zinc adsorption onto raw ca-bentonite. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 7(2). 1004-1012.
- Karadayı, A. (1995). Bazı Maddelerin Gama Işını Soğurma Katsayılarının Ölçümü ve Starcam 4000i Gama Kamerası ile Spect Görüntü Çalışmaları. Yüksek Lisans Tezi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Samsun.
- Karahanoğlu, H. İ. (2001). Uçucu kül ve bentonit ile hazırlanan çimento enjeksiyonlarının kohezyonsuz zeminlerdeki davranış ve özelliklerinin model

- deneylerle araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Erzurum.
- Karakaya, M.Ç., Karakaya, N., & Bakir, S. (2011). Some properties and potential applications of the Na- and Ca- bentonite of Ordu. *Applied Clay Sciences*, 54 (2). 159-65.
- Kocabaş, C. (2006). Yeniköy (Bigadiç) doğusundaki bentonit oluşumlarının mineralojik-jeokimyasal incelemesi. Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Afyon.
- Kocakuşak, S., Akçay, K., Köroğlu, H.J., Yüzer, H., Ayok, T., Savaşçı, Ö.T., & Tolun, R. (1997). Bentonitlerin, silanlama yöntemi ile tiksotropilerinin araştırılması. 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 177-184, İzmir.
- Krista E.M.A. (2021). Manisa (Yatağan) mika mineral ocaklarının elemental dağılımlarının belirlenmesi ve radyojenik isi üretiminin hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi. *Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Knoll, G.F. (2000). Radiation Detection and Measurement. Third education. *John Wiley and Sons*, 29-57, New York.
- Krane, K.S. (1987). Introductory nuclear physics. *John Willey & Sons*, New York.
- Krane, K.S. (2001). Nükleer Fizik 1. Cilt. *Palme Yayıncılık*, Ankara.
- Küçük, M. (2013). Jeofizik Radyometrik Yöntemde Kullanılan Aletler. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 16, 183-186.
- Madee, Y. G.A. (2018). Türkiye’de Endüstriyel Malzeme Olarak Kullanılan Sepiyolit Örneklerinin Radyometrik Karakterizasyonu ve Elemental Dağılımlarının Belirlenmesi. Doktora Tezi. *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Malayoğlu U. & Akar A. (1995). Killerin Sınıflandırılması ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 125-132, İzmir.
- Mitchell, J.K. & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior Third Edition. *John Wiley & Sons*, 577, New York.
- Namlı, M. (2011). Effect Of Bentonite Slurry Injection On Pipe Jacking Forces. Yüksek Lisans Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Özalp, T. (1991). Ankara, Kalecik kuzeydoğusu Hançılı bölgesindeki bentonitlerin ve ilintili kayaçların jeolojisi, mineralojisi, petrografisi ve kimyasal bileşimi. Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.

- Özçıtak, E. (2012). Nevşehir ili ve ilçelerinde tüketilen içme ve kaplıca sularındaki radyoaktivitenin ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Nevşehir.
- Pantelić, G. K., Todorović, D. J., Nikolić, J. D., Rajačić, M. M., Janković, M. M., & Sarap, N.B. (2015). Measurement of radioactivity in building materials in Serbia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303, 2517-2522.
- Reichl, C. & Schatz, M. (2021). World Mining Data 2021. Mineral Production. Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism, 36, Vienna.
- Righi, S., & Bruzzi, L., (2006). Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 88, 158-170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.01.009>
- Shakibaei, S. (2012). Bentonit-Zeolit ve Bentonit-Kum Karışımlarını Kullanarak, Otoyolların Drenaj Şiltelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.
- Solmaz, A.N. (2008). Düşük Seviyeli Radyoaktivite Ölçümü İçin Kullanılan Kuyu Tipi Ge Dedektörlü Bir Gama Spektrometresinin 40-2000 keV Enerji Aralığında Verim Kalibrasyonunun Yapılması. Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü*. Ankara.
- Sultan, D.A.O. (2020). Kastamonu’da yetiştirilen siyez (*Triticum monococcum* L.) buğdayının radyonüklit, esansiyel ve ağır metal içeriklerinin tahribatsız analiz yöntemi ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Şahiner, E. (2010). Doğal Radyoaktif İzotoplarda Gerçek Çakışma Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Şimşek, Ş. (2001). Bentonit, Poliakrilamid Bentonit ve Poliakrilamid Bentonit Fitik Asit Yapılarına Bazı Radyoaktif Metaller İle Demir Ve Çinko Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sivas.
- Targan, Ş. (2002). Kula cürufu, bentonit, kül ve kolemanit atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi. Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.
- Temirci, A.T. (2017). Kastamonu’da kullanılan yapı malzemelerinde doğal olarak bulunan radyonüklitlerin (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Th , ^{222}Rn ve ^{40}K) aktivite derişimlerinin ve bu malzemelerin radon salım hızlarının ölçülmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Tokat, S. (2020). Gördes (Manisa) zeolit ocaklarının kimyasal bileşenlerinin XRF spektrometrik yöntem ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.

- UNSCEAR (2000). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *United Nations Publication*, New York, USA.
- UNSCEAR (2008). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *United Nations Publication*, New York, USA.
- Uyanık, N.Ö. (2022). Reşadiye (Tokat) Geç Kretase Volkano-Sedimanter Birimlerindeki Bentonitlerin Mineralojisi, Jeokimyası ve Kökeni. Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Eskişehir.
- Yaroshevsky A.A. (2006). Abundances of chemical elements in the earth's crust. *Geochemistry International* 44(1). 48-55.
- Yıldırım, A. (2018). Türkiye'deki mevcut volkanik tüf ocaklarının elemental dağılımlarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Yıldız, N. & Çalimli, A. (2002). Alteration of three Turkish bentonites by treatment with Na₂CO₃ and H₂SO₄. *Turkish Journal of Chemistry*, 26 (3). 393-401.
- Yıldız, N., Köroğlu, F., & Çalimli, A. (2006). HDTMA-bentonitinin sentez ve karakterizasyonu. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Dergisi*, 19(2). 21-23.
- Yücel M.B., & Gül Ö. 2018. Dünyada ve Türkiye'de Bentonit (Bentonite in the World and Turkey). *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (General Directorate of Mineral Research and Exploration)*. Ankara.
- Yüksel, A.K. (2006). Balıkesir Çağış köyü ve Savaştepe Yağcılı köyü bentonitlerinin jeoteknik özellikleri ve katı atık sahalarında kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Balıkesir.
- Zeng, G., Zhang, Q., Ge, L., Tan. C., Li. C., Gu. Y., & Cheng. F. (2014). Digital Logarithmic Airbone Gamma Ray Spectrometer. *Chinese Physics*, 38(7). 1245-1283. doi:10.1088/1674-1137/38/7/076001