

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**KARACA VE ÇAL MAĞARALARI'NDA RADON KONSANTRASYONU VE
RADYOAKTİVİTE SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYHAN KARA

**HAZİRAN 2008
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FİZİK ANABİLİM DALI

**KARACA VE ÇAL MAĞARALARI'NDA RADON KONSANTRASYONU VE
RADYOAKTİVİTE SEVİYESİNİN BELİRLENMESİ**

Ayhan KARA

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Yüksek Lisans (Fizik)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 05.06.2008
Tezin Savunma Tarihi : 26.06.2008**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ali VAN**

Enstitü Müdür Vekili: Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

ÖNSÖZ

Karaca ve Çal mağaralarında Radon gazı konsantrasyonu ve radyoaktivite seviyesinin tespiti için yapılan bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlandı.

Deneysel çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Atom ve Molekül Fiziği ve Katıhal Fiziği Araştırma laboratuvarında gerçekleştirildi.

Yüksek Lisans tez çalışmamda deneysel ve teorik bilgi yönünden yararlandığım, ayrıca çalışma yapılan bölgelere her defasında bizzat katılan, öğrenciliğimin her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen saygı değer hocam Prof. Dr. Uğur ÇEVİK'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Fizik Bölümü Atom ve Molekül Fiziği ve Katıhal fiziği laboratuvarlarında çalışmalarım boyunca ilgilerini ve desteklerini esirgemeyen K.T.Ü. Fizik Bölümü Başkanı Sayın Prof. Dr. Ali İhsan KOBYA'ya en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yardımlarından (ve desteklerinden) dolayı Yrd. Doç. Dr Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, Jeoloji Mühendisliği Öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Ali VAN'a ve dedektörlerin yerleştirilmesi, toplanması ve numune alınması konusunda benimle birlikte çalışma bölgelerine gelip yardım eden Arş. Gör. Necati ÇELİK'e, Arş. Gör. Ahmet ÇELİK'e, Doktora öğrencisi Selim KAYA'ya ve Yüksek lisans öğrencisi Özkan YEŞİLBAĞ'a yine laboratuvar çalışmalarında benden yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Nevzat DAMLA'ya teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarım süresince maddi ve manevi destekleriyle sürekli beni cesaretlendiren ve yanımda olan aileme en içten saygı ve sevgilerimi iletirim.

Ayrıca bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı tarafından 2007.111.01.3 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Ayhan KARA

Trabzon 2008

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Özeti.....	3
1.3. Radyoaktivite ve Radyasyon.....	6
1.3.1. Radyoaktivite.....	6
1.3.1.1. Radyoaktif Bozunum Kanunu.....	7
1.3.1.2. Peş Peşe Parçalanma Kanunu.....	9
1.3.1.3. Yarı -Ömür.....	11
1.3.1.4. Radyoaktif Denge.....	13
1.3.1.4.1. Geçici Denge.....	13
1.3.1.4.2. Sürekli Denge.....	14
1.3.2. Radyoaktif Bozunma Türleri.....	15
1.3.2.1. Alfa Bozunması.....	15
1.3.2.2. Beta Bozunması.....	17
1.3.2.3. Gama Bozunması.....	17
1.4. Doğal Radyasyon Kaynakları.....	18
1.4.1. Kozmik Radyasyon Kaynakları.....	20
1.4.2. Toprak da Bulunan Radyoaktivite.....	21
1.4.3. İnsan Vücudunda Bulunan Radyoaktivite.....	21
1.5. Yapay Radyasyon Kaynakları.....	22
1.6. İyonlaştırıcı Radyasyonlar ve Madde ile Etkileşimleri.....	23
1.7. Aktivite ve Radyasyon Birimleri.....	25
1.7.1. Aktivite Birimleri.....	25

1.7.2.	Işınlama Birimi	25
1.7.3.	Soğurulmuş Doz	25
1.7.4.	Eşdeğer Doz.....	26
1.8.	Nükleer Radyasyon Ölçüm Yöntemleri.....	26
1.8.1.	Yarıiletken Dedektörler	26
1.8.2.	Pasif Radon Dedektörleri.....	29
1.9.	Radon Gazı ve Doğal Radon Düzeyleri.....	30
1.9.1.	Radon.....	30
1.9.2.	Radonun Bozunma Ürünleri	31
1.9.3.	Yeryüzünde Doğal Radon Düzeyleri.....	32
1.9.3.1.	Havadaki Doğal Radon Düzeyleri	32
1.9.3.2.	Evlerde Radon Düzeyleri.....	32
1.9.3.3.	Yeraltı Madenlerinde Radon Düzeyleri.....	34
1.9.3.4.	Mağara Atmosferinde Doğal Radon Düzeyleri	36
1.10.	Radyasyonun Sağlık Üzerine Etkileri.....	37
1.10.1.	Radon Gazının Akciğer Kanseri Üzerine Etkileri	38
1.11.	Mağaraların Oluşumu	39
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
2.1.	Çalışma Yapılan Mağralar	42
2.1.1.	Karaca Mağarası	43
2.1.2.	Çal mağarası	46
2.2.	Numunelerin Alınması.....	48
2.3.	Kullanılan Cihazlar	48
2.3.1.	X Işını Difraktometresi (XRD).....	48
2.3.2.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	49
2.3.3.	Enerji Ayrımlı X Işını Spektrometresi (EDXRF).....	50
2.3.4.	HPGe Dedektörü.....	50
2.3.4.1.	Enerji Kalibrasyonu	52
2.3.4.2.	Verim Kalibrasyonu.....	53
2.3.4.3.	Gama Spektrumunun Analizi ve Aktivitenin Hesaplanması.....	55
2.3.5.	LR-115 Pasif Radon Dedektörü.....	55
3.	BULGULAR.....	57
3.1.	Karaca Mağarası Numunelerinin Yapısal ve Kimyasal Özellikleri	57
3.1.1.	X Işını Difaktometresi (XRD) Analizi	57

3.1.2.	Enerji Ayrımlı X Işını Spektrometresi (EDXRF) Analizi	58
3.1.3.	Yüzey Morfolojisi (SEM) Analizi	61
3.2.	Karaca Mağarası Radyoaktif Özellikler	63
3.2.1.	Gama Spektroskopik Analiz Sonuçları.....	63
3.2.2.	Karaca Mağarası Radon Konsantrasyonu.....	65
3.2.2.1.	Karaca Mağarası Yaz Sezonu İçin Radon Konsantrasyonu	65
3.2.2.2.	Karaca Mağarası Kış Sezonu İçin Radon Konsantrasyonu	67
3.2.2.3.	Karaca Mağarası Yıllık Ortalama Radon Konsantrasyonu	69
3.3.	Karaca Mağarasında Ra ve Rn Arasındaki İlişki.....	71
3.4.	Karaca Mağarası İçin Doz hesabı	73
3.4.1.	Gama Spektrumundan Alınan Doz.....	73
3.4.2.	Radon Konsantrasyonundan Alınan Doz.....	75
3.5.	Çal Mağarası Numunelerinin Yapısal ve Kimyasal Özellikleri	81
3.5.1.	X Işını Difakrometresi (XRD) Analizi	81
3.5.2.	Enerji Ayrımlı X Işını Spektrometresi (EDXRF) Analizi	83
3.5.3.	Yüzey Morfolojisi (SEM) Analizi	86
3.6.	Çal Mağarası Radyoaktif Özellikler	88
3.6.1.	Gama Spektroskopik Analiz Sonuçları.....	88
3.6.2.	Çal Mağarası Radon Konsantrasyonları	90
3.6.2.1.	Çal Mağarası Yaz Dönemi Radon Konsantrasyonu	90
3.6.2.2.	Çal Mağarası Kış Dönemi Radon Konsantrasyonu	91
3.6.2.3.	Çal Mağarası Yıllık Ortalama Radon Konsantrasyonları.....	93
3.7.	Çal Mağarasında Ra ve Rn Arasındaki İlişki	94
3.8.	Çal Mağarası İçin Doz Hesabı.....	96
3.8.1.	Gama Spektroskopisinden Alınan Doz.....	96
3.8.2.	Radon Konsantrasyonundan Alınan Doz.....	98
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	104
5.	ÖNERİLER.....	108
6.	KAYNAKLAR	109
7.	EKLER	113
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yürütülen bu çalışmanın amacı, turizme açık mağaralarda radon gazının insanlar üzerinde bırakabileceği olumsuz etkiye dikkat çekebilmektir. Bunun için çok sayıda turist tarafından ziyaret edilen ve dünya çapında da tanınan Gümüşhane ili sınırları içinde bulunan Karaca mağarası ve Trabzon ili sınırları içinde bulunan Çal Mağarası'nda bu çalışma yürütülmüştür. Bu mağaralarda konsantrasyonu yüksek seviyelere ulaştığında insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen hatta akciğer kanserine dahi sebep olabilen radon gazı konsantrasyonu ölçümleri, yaz ve kış sezonları için ayrı ayrı yapılmıştır.

Mağaralardaki doğal radyoaktivite seviyesinin tespiti için toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinin gama spektroskopisi incelemesi de yapılmış ve mağaraların atmosferlerindeki radon gazıyla ilişkilendirilmiştir. Bu sonuçların tetkiki ile her iki mağarada da hem turizm rehberlerinin hem de ziyaretçilerin maruz kaldıkları yıllık etkin doz belirlenmiştir.

LR-115 pasif radon dedektörü kullanılarak yapılan bu çalışmada, Karaca Mağarası'nın genelinde radon konsantrasyonu yaz sezonunda ortalama 823 Bq/m^3 , kış sezonunda 1023 Bq/m^3 'tür. Çal Mağarası'nda ise, mağara genelinde radon gazı konsantrasyonu ortalaması yaz sezonunda 473 Bq/m^3 , kış sezonunda 320 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mağara, Radon, Radyoaktivite, Kanser

SUMMARY

Determination of the radon concentration and radioactivity levels in Karaca and Çal Caves

The purpose of this study conducted in the Eastern Blacksea region is to emphasize the negative effects of radon gas on people in the caves which are open to tourism. Karaca Cave (Gümüşhane) visited by many tourists and Çal Cave which is in Trabzon was selected as the study regions. In these caves, the measurements of radon gas concentration which affects the health of humanbeings negatively and even causes the lung cancer when it reaches high points have been done for the summer and winter season.

Moreover, to find out the natural radioactivity in the caves, the gamma spectroscopic analysis of soil, stone and stalagmite samples were carried out and their relations with the radon gas in the cave atmosphere were analyzed. The effective annual dose to which tourist guides and visitors are exposed were calculated for both caves.

LR-115 passive radon detector was used to determine radon concentrations in the caves both winter and summer. The average radon concentration in the Karaca Cave is 823 Bq/m³ and 1023 Bq/m³ for the summer and winter season, respectively. It was also found that the average radon gas concentration in Çal Cave in the summer season is 473 Bq/m³ while it is 320 Bq/m³ in winter season.

Key Words : Cave, Radon, Radioactivity, Cancer

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Radyoaktif bir numunede çekirdek sayısının zamanla değişimi	8
Şekil 2. Zincirleme (peşpeşe) bozunma grafiği	11
Şekil 3. Alfa bozunumu	15
Şekil 4. Bir sis odasından geçen alfa taneciklerinin bıraktığı izler.....	16
Şekil 5. ⁶⁰ Co çekirdeğinin β^- bozunma şeması.....	18
Şekil 6. Dünya genelinde doğal ve yapay radyoaktif kaynaklarından alınan dozların oranı	19
Şekil 7. Alfa, beta ve gama ışınlarının madde ile etkileşimleri	24
Şekil 8. Tipik bir yarıiletken dedektörün şematik gösterimi	28
Şekil 9. Dedektörlerin ayırma güçleri.....	29
Şekil 10. Radon Atomunun Mineral Taneleri Arasındaki Gözeneklerden Geçışı (Günaydı, 2004).....	31
Şekil 11. Radonun ev ortamına giriş şekli (URL-4, 2008).....	34
Şekil 12. Radyasyonun DNA zincirine verdiği zarar.	37
Şekil 13. Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Güvenlik Konseyi önlenebilir ölümlerdeki ölümler için 2002 raporu (URL-1, 2008).....	39
Şekil 14. Mağara oluşumu (KTÜ Arge proje no 90.112.005.2, 1994)	41
Şekil 15. Karaca ve Çal Mağaraları'nın Türkiye haritasındaki yeri.....	42
Şekil 16. Karaca Mağarası	43
Şekil 17. Karaca Mağarası'nın jeolojik haritası (Bekaroğlu, 2006)	44
Şekil 18. Karaca Mağarası'nda dedektör konulan ve numune alınan yerler	45
Şekil 19. Çal Mağarası.....	46
Şekil 20. Çal Mağarası'nın jeolojik haritası (Ofloğlu, 1993) ve dedektör konulan ve numune alınan yerler	47
Şekil 21. Rigaku D/Max-IIIC marka X-ışını difraktometresi.....	49
Şekil 22. JEOL JEM-5510 Elektron tarama mikroskobu	49
Şekil 23. Epsilon 5, PANalytical EDXRF cihazı	50
Şekil 24. Ortec GEM55P4 Model HPGe Dedektörü	51
Şekil 25. HPGe dedektörünün bağlı olduğu gama spektroskopisi çalışma düzeneği.....	52
Şekil 26. Karaca sağ yol 76 metre toprak numunesinin Enerji - sayım grafiği	53
Şekil 27. Enerji – kanal grafiği	54

Şekil 28.	Enerji – verim eğrisi	54
Şekil 29	LR-115 dedektörü.....	56
Şekil 30.	Karaca Mağarası girişten 80 m de uzaklıkta ki toprak numunesinin X-ışını kırınım deseninin dikit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) ile uyumu JCPDS no : 010-0446.....	57
Şekil 31.	Karaca Mağarası girişten 55 m de uzaklıkta ki yan kayaç umunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit ($CaCO_3$) ile uyumu JCPDS no : 047 - 1743	58
Şekil 32.	Karaca Mağarası Sarkıt numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit ($CaCO_3$) ile uyumu JCPDS no : 005 - 0586	58
Şekil 33.	Karaca Mağarası 53. metre toprak numunesinin SEM fotoğrafı.....	62
Şekil 34.	Karaca Mağarası 53. metre yan kayaç numunesinin SEM fotoğrafı.....	62
Şekil 35.	Karaca Mağarası sarkıt numunesinin SEM fotoğrafı	63
Şekil 36.	Karaca Mağarası yaz sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyon değişimi	67
Şekil 37.	Karaca Mağarası kış sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyonu	69
Şekil 38.	Karaca Mağarası yaz-kış sezonu ortak mesafedeki radon konsantrasyonu değişimi	71
Şekil 39.	Karaca Mağarası'nın 3 farklı bölgesindeki radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması.....	72
Şekil 40.	Karaca Mağarası'nda girişten uzaklığa göre radon-radyum aktivitesinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 41.	Çal Mağarası'nın girişinden 165 m uzaklıkta ki toprak numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit($CaCO_3$) ile uyumu JCPDS no:005-0586	82
Şekil 42.	Çal Mağarası'nın girişinden 155 m uzaklıkta ki yan kayaç numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit ($CaCO_3$) ve dolomit($CaMg(CO_3)_2$) ile uyumu JCPDS no : 047 – 1743, 036 - 0426	82
Şekil 43.	Çal Mağarası Sarkıt numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit($CaCO_3$) ile uyumu JCPDS no : 047 - 1743	83
Şekil 44.	Çal Mağarası 80. metre toprak numunesinin SEM fotoğrafı.....	87
Şekil 45.	Çal Mağarası 80. metre yan kayaç numunesinin SEM fotoğrafı.....	87
Şekil 46.	Çal Mağarası sarkıt numunesinin SEM fotoğrafı.....	88
Şekil 47.	Çal Mağarası yaz sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyon değişimi	91
Şekil 48.	Çal Mağarası kış sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyon değişimi	92
Şekil 49.	Çal Mağarası yaz- kış sezonu ortak mesafedeki radon gazı konsantrasyon değişimi	94
Şekil 50.	Çal Mağarasının 3 farklı bölgesindeki radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması.....	95

Şekil 51. Çal Mağarası'nda girişten uzaklığa göre radon-radyum aktivitesinin karşılaştırılması.....	96
---	----

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Dünyada ki bazı mağaralarda radon konsantrasyonu (Przylibski, 1999).....	5
Tablo 2. Doğada bilinen dört radyoaktif seri.....	6
Tablo 3. Bazı izotopların yarı-ömürleri.....	13
Tablo 4. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan çalışmalarda hesaplanan, insanların maruz kaldığı yıllık ortalama etkin eşdeğer doz değeri.....	20
Tablo 5. Kayaçlardaki radyoaktif çekirdeklerin yıllık radyasyon dozları (Damla, 2005).....	21
Tablo 6. İnsan vücudunda bulunan radyoaktif elementler.....	22
Tablo 7. Yapay radyoaktif çekirdekler.....	23
Tablo 8. Radon ve ürünlerinin karakteristik özellikleri.....	32
Tablo 9. Bazı ülkeler için evlerde ölçülmüş ²²² Rn konsantrasyonları (UNSCEAR, 2000).....	33
Tablo 10. Dünyadaki bazı kömür madenlerindeki ortalama radon konsantrasyonlar (Veiga vd., 2004).	35
Tablo 11. Çeşitli madencilik türlerinde yıllık ortalama etkin dozlar (UNSCEAR, 2000)..	36
Tablo 12. Karaca Mağarası'nda dedektör konulan ve numune alınan yerlerin girişten uzaklığı.....	45
Tablo 13. Çal Mağarası'nda dedektör konulan ve numune alınan yerlerin girişten uzaklığı.....	48
Tablo 14. Enerji kalibrasyonunda kullanılan kaynaklar.....	52
Tablo 15. Karaca Mağarası toprak numunelerinin kimyasal analizleri.....	59
Tablo 16. Karaca Mağarası yan kayaç numunelerinin kimyasal analizleri.....	60
Tablo 17. Karaca Mağarası sarkıt numunesinin kimyasal analizi.....	61
Tablo 18. Karaca Mağarası toprak numunelerinin gama aktiviteleri.....	64
Tablo 19. Karaca Mağarası yan kayaç numunesinin gama spektroskopisinin aktivitesi....	65
Tablo 20. Karaca Mağarası sarkıt numunesinin gama spektroskopisinin aktivitesi.....	65
Tablo 21. Karaca Mağarası yaz dönemi radon konsantrasyonu.....	66
Tablo 22. Karaca Mağarası kış dönemi radon konsantrasyonu.....	68
Tablo 23. Karaca Mağarası yaz ve kış dönemi radon konsantrasyonları dikkate alınarak hesaplanan yıllık radon konsantrasyonu ortalaması.....	70
Tablo 24. Karaca Mağarası radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması.....	72
Tablo 25. Karaca Mağarası'nda girişten uzaklığa göre çalışan bir kişinin soğurulan doz ve yıllık aldığı etkin doz miktarları.....	74

Tablo 26. Karaca Mağarası'nda yaz döneminde girişten uzaklığa göre çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz.....	76
Tablo 27. Karaca Mağarası'nda yaz döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz.....	77
Tablo 28. Karaca Mağarası yaz döneminde girişten uzaklığa göre bir ziyaretçinin aldığı tahmini yıllık etkin doz.....	77
Tablo 29. Karaca Mağarası'nda yaz döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz.....	78
Tablo 30. Karaca Mağarası kış döneminde çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz....	79
Tablo 31. Karaca Mağarası'nda kış döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kalacağı yıllık etkin doz.....	79
Tablo 32. Karaca Mağarası kış döneminde bir ziyaretçinin alacağı tahmini yıllık etkin doz	80
Tablo 33. Karaca Mağarasında kış döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz.....	80
Tablo 34. Karaca Mağarasında mağaranın geneli ve bölümleri arasında yıllık alınan dozlar arasında yaz-kış karşılaştırması.....	81
Tablo 35. Çal Mağarası toprak numunelerinin kimyasal analizleri.....	84
Tablo 36. Çal Mağarası yan kayaç numunelerinin kimyasal analizi	85
Tablo 37. Çal Mağarası sarkıt numunesinin kimyasal analizi	86
Tablo 38. Çal Mağarası toprak numunelerinin gama aktiviteleri	89
Tablo 39. Çal Mağarası yan kayaç numunelerinin gama aktiviteleri	89
Tablo 40. Çal Mağarası sarkıt numunesinin gama aktivitesi.....	89
Tablo 41. Çal Mağarası yaz dönemi radon konsantrasyonu.....	90
Tablo 42. Çal Mağarası kış dönemi radon konsantrasyonu.....	92
Tablo 43. Çal Mağarası yaz ve kış dönemi radon konsantrasyonları ve ortalaması.....	93
Tablo 44. Çal Mağarası radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması.....	95
Tablo 45. Çal Mağarası'nda girişten uzaklığa göre çalışan bir kişinin soğrulan doz ve yıllık aldığı etkin doz miktarları	97
Tablo 46. Çal Mağarası yaz döneminde çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz	98
Tablo 47. Çal Mağarası'nda yaz döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz.....	99
Tablo 48. Çal Mağarası yaz döneminde bir ziyaretçinin aldığı yıllık tahmini doz.....	99
Tablo 49. Çal Mağarası'nda yaz döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz.....	100
Tablo 50. Çal Mağarası kış döneminde çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz	101
Tablo 51. Çal Mağarasında kış döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz.....	101

Tablo 52. al Mağarası kış döneminde bir ziyaretçinin aldığı yıllık tahmini doz	102
Tablo 53. al Mağarası'nda kış döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz.....	102
Tablo 54. al Mağarası'nda mağaranın geneli ve bölümleri arasında yıllık alınan dozlar arasında yaz-kış karşılaştırması.....	103

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Aktivlik
D	: Soğrulan doz
N	: Radyoaktif çekirdek sayısı
R	: Dedektör rezölasyonu
Bq	: Becquerel
Ci	: Curie
Gy	: Gray
$FWHM$: Bir pikin yarı maksimumdaki tam genişliği
KF	: Kalibrasyon faktörü
N_0	: İntegrasyon sabiti
Rem	: Röntgen equivalent man
Sv	: Sievert
$T_{1/2}$: Yarı ömür
$TAEK$: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
$UNSCEAR$: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
Q	: Radyoaktif bozunma sonucu açığa çıkan enerji
W	: Yarı maksimumdaki puls genişliği
λ	: Bozunma sabiti
τ	: Ortalama ömür

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yaşadığımız dünya olduğundan beri radyoaktiftir. İnsanoğlunun yaşadığı sürece doğal kaynaklardan gelen iyonlayıcı radyasyona maruz kalması sürekli ve kaçınılmaz bir olgudur. Her canlı iyonlaşmış radyasyona maruz kalır. Şimdiye kadar insanoğlunun radyasyona maruz kaldığı en geniş oran doğal radyasyondan kaynaklanır. Bu doğal kaynaklar, kozmik ve karasal radyasyonu içeren dış kaynaklardan ve radyoaktif malzemelerin soluma ve sindirilmesinden oluşmaktadır. Çevresel radyasyon ölçümlerinin temel amacı insanoğlunun çevresindeki kaynaklardan(unsurlardan) aldığı radyasyon dozunun belirlenmesi ve oluşturabileceği sağlık riskinin değerlendirilmesidir. İnsanlar, yıllık ortalama olarak kozmik ışınlardan %16; insan vücudundan kaynaklanan ışınlamadan %10; gama radyasyonlarından %19; radon ve ürünlerinden %55 ışınlamaya maruz kalmaktadırlar (UNSCEAR, 2000).

^{222}Rn (Radon), ^{238}U 'in bozunum ürünü içinde üretilen hareketsiz, yarı ömrü 3,82 gün olan kokusuz bir gazdır (Gillmore vd., 2002). Radon gazı topraktan, kayalardan, tortulardan ve sudan sızar ve bozunum ürünlerini havaya bırakır. Radon ve radonun bozunum ürünlerinin solunumu, doğal radyasyon kaynaklarından dolayı insanlar tarafından alınan yıllık ortalama etkin dozun yaklaşık yarısından sorumludur (Sainz vd., 2006).

Uzun süre radon gazına maruz kalmak sağlığımız için olumsuz etkilere sebep olabilir. Uranyum madenlerinde yürütülen çalışmalardan da anlaşıldığı üzere yüksek konsantrasyonlu radon gazına maruz kalmanın bronşiyal dokulara zarar vererek akciğer kanserine sebebiyet verdiği kabul edilir. Yüksek radyoaktifiteli yerlerdeki radon gözlemleri, örneğin yeraltı madenleri veya mağaralar gibi yerler meslekî olarak çalışanlar ve ara sıra buraları ziyaret edenler için önemli bir radyolojik risk oluşturur (Lario vd., 2005).

^{238}U , Dünya kabuğunun içinde hemen her yerinde dağılmış haldedir. Uranyum sık sık yeraltı suları tarafından taşınır ve kireçtaşlarında ve mermerlerde birikir. Bazı mağaralarda yüksek radon seviyesi ^{238}U ve ^{226}Ra 'nın varlığından kaynaklanabilir.

^{238}U ve ^{226}Ra 'nin bozunma ürünü olan ^{222}Rn , topraktan moleküler difüzyon veya konveksiyonla sızarak yerden havaya doğru hareket etmekte ve atmosfere ulaşmaktadır.

Ancak bir kısmı yüzey altında kalıp suda çözünerek yeraltı sularına karışmaktadır. Havadaki radonun dağılımı meteorolojik şartlara bağlı olmakla birlikte radon konsantrasyonu yükseklikle azalmaktadır. Radon bir seri bozunma ile yine radyoaktif olan kısa ömürlü bozunma ürünleri üretir. Bu radyoaktif maddeler Po, Bi ve Pb elementlerinin radyoizotoplarıdır. Bu ürünlerin radondan farkı, gaz halinde olmamalarıdır. Bu izotoplar havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak radyoaktif aerosoller oluşturmakta ve solunum yoluyla akciğerlere alınmaktadırlar. Radon ve bozunma ürünlerinin solunması önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır. Solunum sisteminde ortaya çıkan bozunma sonucunda, bronşsal epiteldeki radyasyon dozu artmakta, bozunma ürünleri kararlı hale gelinceye kadar bozunma devam etmekte ve bu sürecin her aşamasında radyasyona maruz kalınmaktadır. Bu ise akciğer dokusunda hasara ve dolayısıyla zaman içerisinde kansere sebep olabilmektedir. Solunum sistemindeki radyasyon dozu, solunmuş havadaki radon ve bozunma ürünleri konsantrasyonuna, toz içerisindeki parçacıkların büyüklüğüne ve fizyolojik parametrelere bağlıdır (Baldık, 2005).

Yüksek Radon konsantrasyonuna maruz kalan madenciler arasında radonun malin kansere sebep olduğu şu anda yaygınca bilinmektedir. 1970'lerde fark edildi ki yüksek radon konsantrasyonu diğer yer altı formasyonlarında da bulunabilir (Przylibski, 1999).

Açık hava ortamında radon önemli bir sağlık riski göstermez çünkü yüksek konsantrasyona asla ulaşamaz. Fakat iyi havalandırılmamış kapalı yerleşim yerleri binalar, mağara ve madenler gibi alanlarda radon gazı serbest kaldığında problem oluşturur. Radon ve onun kısa süreli bozunum ürünlerinin kapalı alanlardaki konsantrasyonu havalandırma oranı ve çeşitli kaynaklardan üretim oranı veya giriş ile ilişkili olarak başlıca birkaç faktöre bağlıdır (Sainz vd., 2007).

Uluslararası Radyasyon Korunması Komitesi (UNSCEAR), Radona maruz kalma konusunu inceleyerek "Evde ve İşyerinde Radon Gazına Karşı Korunma" konusunda 65 No'lu bir rapor hazırlamıştır. Bu raporda Radona maruz kalma sınırları belirlenerek, bazı sınır değerler tavsiye edilmiş ve senelik doz için bir eylem seviyesi tespit edilmiştir. Eylem seviyesi 3–10 mSv/yıl arasında kabul edilmiştir. Bu dozlara karşılık gelen Radon yoğunluğu evlerde 200–600 Bq / m³, işyerlerinde ise 500–1500 Bq / m³ arasındadır. Avrupa ülkelerinde bu değer yılda 400 Bq/m³, Kanada'da ise 800 Bq/m³ olarak kabul edilmiştir. Ülkemizde TAEK (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği'nde solunum yoluyla izin verilen Radon yoğunluğu sınırlarının, yıllık ortalama olarak evlerde 400 Bq/m³, iş yerlerinde ise 1000 Bq/m³ değerini aşamayacağı bildirilmiştir.

Dünyada ve ülkemizde bazı mağaralarda Radonterapi ve Speleoterapi olarak bilinen mağara tedavileri kullanılmaktadır. Speleoterapi, kronik bronşit ve bronşiyal astım gibi üst solunum yolu hastalıklarının tedavisi için alternatif tıp olarak görülmektedir. Mağara içerisindeki nem, sıcaklık gibi faktörlerin bu hastalığa sahip olanlarda belli bir düzelme sağladığı düşünülmektedir, fakat seçilen bu gibi iyileştirici özelliği olduğuna inanılan mağaralarda, radon konsantrasyonları hesaplanmalı ve içerde kalma süreleri konusunda hastalar veya ziyaretçiler uyarılmalıdır.

Turistik mağara tanıtımcıları, çalışanları ve ziyaretçiler bazı yüksek radon konsantrasyonlu mağaralardan etkilenebilir. Bu etkilenmeyi azaltmak için havalandırma yapılabilir fakat havalandırma mağaranın içindeki nemi değiştirebilir ve ayrıca ilgi çekici jeolojik formasyonu veya figürleri etkileyebileceği için böyle bir korunma yönteminin kullanılması mümkün değildir. Rehberler, diğer çalışanlar ve ziyaretçilerin radona maruz kalma seviyelerini azaltabilmenin tek yolu mağarada harcanan zaman miktarını sınırlama temelinde, radyasyondan korunma sistemlerinin uygulanmasıdır.

1.2. Literatür Özeti

Ülkemizde ve dünyada oluşumlarındaki ilgi çekici özellikler ve görsel güzelliklerinden dolayı bazı mağaralar her yıl binlerce ziyaretçi tarafından ziyaret edilmektedir. Çoğu turizme açık mağaralar, kapalı bir ortama sahiptir ve genelde içerilerindeki hava dolaşımı azdır. Bu sebeple toprak, kayaç ve çatlaklardan kolayca sızabilen radon gazı mağara ortamında birikebilir ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek konsantrasyonlara ulaşabilir. Mağara ziyaretçilerinin ve onlara kılavuzluk eden çalışanların maruz kaldığı radon gazı konsantrasyonu ve bu konsantrasyondan alınan yıllık doz miktarı birçok ülkede ve ülkemizde de bazı mağaralarda incelenmiştir.

Türkiye’de Zonguldak ilinde 3 Temmuz- 3 Eylül tarihleri arasında Gökgöl ve Cehennem mağaralarında radon gazı konsantrasyonu ölçülmüş ve Gökgöl Mağarası’nda ortalama konsantrasyon $1918,8 \text{ Bq/m}^3$ olarak tespit edilmiş ve bir ziyaretçinin 30 dk içerde kaldığı varsayılarak yıllık $3,76 \mu\text{Sv/yıl}$ ’lık doza maruz kaldığı belirlenmiştir. Cehennem mağarası’nda ise radon gazı konsantrasyonunun ortalama değerinin 657 Bq/m^3 olduğu ve bir ziyaretçinin ortalama 20 dk içerde kaldığı varsayılarak radon gazından yıllık aldığı doz miktarının $0,86 \mu\text{Sv/yıl}$ olduğu tespit edilmiştir (Aytekin vd., 2005).

Gillmore ve arkadaşları, İngiltere’de Mother Grundy ve Robin Hood mağaralarında ortalama radon konsantrasyonlarını sırasıyla 2873 ve 200 Bq/m³ olarak belirlemiştir (Gillmore vd., 2002). Yine bir başka çalışma İspanya’da Altamira Mağarası’nda gerçekleştirilmiş ve yıllık sürekli radon gazı ölçümü yapılarak radon gazı konsantrasyonu 3562 Bq/m³ tespit edilmiştir (Lario vd., 2005).

Polonya da Niedwiedzia ve Radochowska mağaralarında 1995’den 1997’ye kadar çeşitli zamanlarda ölçümler alınmış ve Radochowska Mağarası’nda en düşük radon konsantrasyonunu 1996 yılının Aralık ayında 60 Bq/m³ olarak, en yüksek radon konsantrasyonu 1996 yılının Ağustos ayında 1370 Bq/m³ olarak gözlenmiştir. Niedwiedzia Mağarası’nda ise aylık en düşük radon gazı konsantrasyonu 1996 yılının Ocak ayında 100 Bq/m³ ve en yüksek radon konsantrasyonu değeri 1997 yılının Mart ayında 4180 Bq/m³ olarak ölçülmüştür (Przylibski, 1999).

İspanya’da Nerja Mağarası’nda 2003 yılının Temmuz ayından 2004 yılının Haziran ayına kadar sürekli radon gazı ölçümleri alınmıştır. Ortalama olarak değerler Ocak ayında 65, Şubat ayında 60, Mart ayında 65, Nisan ayında 72, Mayıs ayında 80, Haziran ayında 368, Temmuz ayında 422, Ağustos ayında 425, Eylül ayında 450, Ekim ayında 135, Kasım ayında 66 ve Aralık ayında 61 Bq/m³ olarak ölçülmüştür. (Duenas vd., 2005).

Hanan Al- Mustafa ve arkadaşları Suudi Arabistan’da 5 çöl mağarasında yaptıkları radon gazı konsantrasyonu ölçümünde Abu Sakheel-1 Mağarası’nda ortalama radon konsantrasyonu 103 Bq/m³, Abu Sakheel-2 Mağarası’nda 114 Bq/m³, Bin-gazi Mağarası’nda 74 Bq/m³, Al Farry Mağarası’nda 81 Bq/m³, Abu - Wrken Mağarası’nda 451 Bq/m³ olarak tespit etmişlerdir (Hanan Al-Mustafa vd., 2005).

Dünyada ki bazı mağaralarda ki radon konsantrasyonu Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Dünyada ki bazı mağaralarda radon konsantrasyonu (Przylibski, 1999)

Mağaralar	²²² Rn (Bq.m ⁻³)	
Niedzwiedzia Mağarası (Polonya)	1300	
Radochowska Mağarası (Polonya)	400	
Mammoth Mağarası ulusal park (Amerika)	3100	
Altamira Mağarası (İspanya)	3200	
Moestroff Mağarası (Lüksemburg)	4300	
Postojina Mağarası (Slovenya)	1500	
Planina Mağarası (Slovenya)	200	
Tabor Mağarası (Slovenya)	3500	
Gorjanska Mağarası (Slovenya)	2000	
Szemlő Hill Mağarası (Macaristan)	5300	
Pal Valley Mağarası (Macaristan)	3300	
Gyokkusen-do Mağarası (Japonya)	1500	
	yaz	kış
Nerja mağarası (İspanya)	48	168
Postojna mağarası (Slovenya)	6000	500
Mystery mağarası (Amerika)	25000	20000
Perama mağarası (Yunanistan)	925	1311

1.3. Radyoaktivite ve Radyasyon

1.3.1. Radyoaktivite

Çekirdek fiziğinde çok önemli gelişmelere yol açan radyoaktivite 1896 yılında Fransız fizikçi Henry Becquerel tarafından bir rastlantı sonucu keşfedilmiştir. Radyoaktivite ya da radyoaktif bozunma, enerji fazlalığı olan kararsız atom çekirdeklerinin bir parçacık veya ışın çıkararak daha kararlı başka bir çekirdeğe dönüşmesi olayıdır.

Bir başka ifadeyle kararsız atom çekirdeğinin kararlı duruma geçebilmek için çeşitli ışın veya parçacık yaymasına radyoaktivite, yayınlanan ışın veya parçacıklara da radyasyon denir.

Bir çekirdeğin kararlılığı sahip olduğu nötronlarının ve protonlarının oranına bağlıdır. Teorik olarak, nötronlarının, protonlarına oranı $\left(\frac{n}{p}\right)$ yaklaşık olarak 1 olan elementler kararlıdır. Bu şart, düşük atom numaralı elementler için kolaylıkla sağlanabilmektedir. Yüksek atom numaralı elementlerde ise bu oranın 1'den uzaklaştığı ve çekirdeğin kararsız olma olasılığının arttığı görülmektedir, bu durumda "Kararsız veya Radyoaktif Çekirdek" ortaya çıkmaktadır. Kararsız olan çekirdekler alfa (α), beta (β) parçacıkları ve gamma (γ) gibi yüksek enerjili fotonlar salarlar, bu olay çekirdek kararlı hale gelinceye kadar devam eder.

Tablo 2. Doğada bilinen dört radyoaktif seri

Seri Adı	Türü	Son Çekirdek	Ana Çekirdek	Yarı Ömür (yıl)
Toryum	4n	$^{208}_{82}Pb$	$^{232}_{90}Th$	$1,41 \times 10^{10}$
Neptünyum	4n+1	$^{209}_{83}Bi$	$^{237}_{93}Np$	$2,14 \times 10^6$
Uranyum	4n+2	$^{206}_{82}Pb$	$^{238}_{92}U$	$4,47 \times 10^9$
Aktinyum	4n+3	$^{207}_{82}Pb$	$^{235}_{92}U$	$7,04 \times 10^8$

1.3.1.1. Radyoaktif Bozunum Kanunu

Radyoaktifliğin keşfedildiği 1896 yılını izleyen üç yılda, saf bir radyoaktif numunenin zamanla bozunma hızının üstel kanuna uyduğu gösterilmiştir. Radyoaktifliğin tüm numunede değil de tek tek atomlarda değişikliği temsil ettiğinin anlaşılması için daha birçok yılın geçmesi gerekmiştir. Bozunmanın istatistiksel yapıda olduğunun, yani herhangi bir atomun ne zaman bozunacağına bilinememesi ve bu hipotezin doğrudan üstel kanuna uyduğunun anlaşılması ise iki yıl almıştır. Kuantum teorisinin gelişmesinden önce, bu durumun kabul edilmesi oldukça zor olmuştur (Krane, 2001).

Eğer bir t anında N radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye yeni çekirdekler ilave edilmiyorsa dt süresi içinde bozunan dN çekirdek sayısı, N ile orantılı olur;

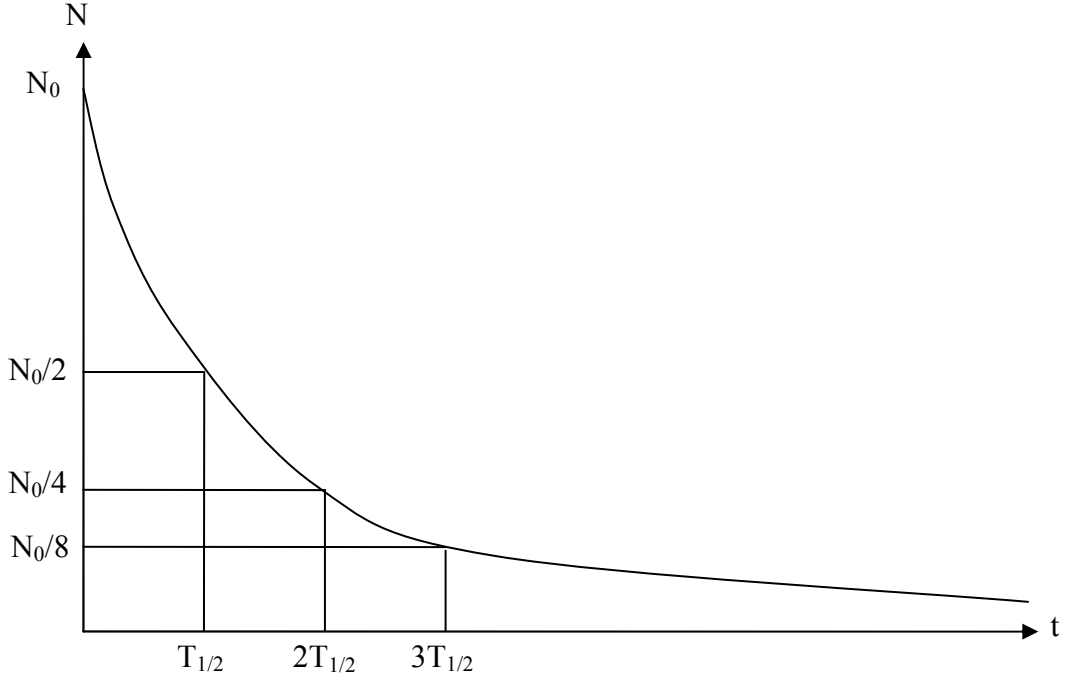
$$\lambda = -\frac{(dN/dt)}{N} \quad (1)$$

Burada λ bozunma veya parçalanma sabitidir (λ radyoaktif çekirdekler için ayırt edici bir özellik olup mesela radon için değeri $\lambda=0,0075/\text{saat}=0,000125/\text{dakika}$ 'dır). Bu denklemin sağ tarafı bir atomun birim zamanda bozunma olasılığıdır, yani bu olasılık, atomun yaşı ne olursa olsun sabit olup radyoaktif bozunmanın istatistiksel teorisinin temel varsayımdır. Bu denklemin integrali alınırsa,

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad \longrightarrow \quad \int \frac{dN(t)}{N(t)} = -\int \lambda dt \quad (2)$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

üstel radyoaktif bozunma kanunu elde edilir. Burada N_0 integrasyon sabiti, $t = 0$ 'da henüz bozunmamış çekirdeklerin sayısıdır.



Şekil 1. Radyoaktif bir numunede çekirdek sayısının zamanla değişimi

Bozunma yasası denkleminin her iki tarafı λ ile çarpılırsa yukarıda bahsedilen aktivite için bir ifade bulunur.

$$\lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

İfadedeki $N\lambda$ 'ya numunenin bozunma hızı ya da aktifliği denir ve birim zaman başına bozunma sayısını verir. I ile gösterilir ve birimi bozunma/saniye'dir.

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Burada

$$I_0 = N_0 \lambda \quad (6)$$

radyoaktif izotopun $t=0$ anındaki aktivitesi (bozunma/saniye)

$$I = N\lambda \quad (7)$$

ise radyoaktif izotopun t anındaki aktivitesidir (bozunma/saniye).

1.3.1.2. Peş Peşe Parçalanma Kanunu

Hem tabii olarak bulunan radyoaktif izotoplarda hem de suni olarak meydana getirilen radyoaktif izotoplarda, bozunma peş peşe parçalanmalar şeklinde meydana gelebilir. Ana radyoaktif element başka bir ürüne bozunur. Şayet bu üründe radyoaktif ise bu da başka bir elemente bozunur ki buna (grand-daughter) adı verilir. Birçok durumda bu peş peşe bozunma ana maddenin ürüne ve ürününde kararlı bir elemente bozunmasıyla sınırlıdır. Herhangi bir t anında, λ_1 bozunma katsayısıyla ürüne bozunacak ana elementin atomlarının sayısı N_1 olsun. Ürün elementin atomlarının sayısını N_2 ile gösterelim. Bunlar da λ_2 bozunma katsayısı ile başka bir elemente bozunacaktır. Bu kararlı elementteki atomların sayısı ise N_3 olsun. Ayrıca, $t = 0$ iken $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_{20}$, $N_3 = N_{30}$ olduğunu farz edelim. Aktivliğin saniyede bozunma sayısı şeklindeki tanımından;

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (8)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (9)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad (10)$$

8 bağıntısı N_1 'in bozunma hızını verir. 9 bağıntısı N_2 tipindeki atomların $\lambda_1 N_1$ hızıyla üretildiklerini ve $\lambda_2 N_2$ hızıyla gözden kaybolduklarını göstermektedir. 10 bağıntısı ile N_3 atomlarının üretim hızı elde edilir.

(8) denkleminde $t = 0$ da $N_1 = N_{10}$ integrali alınır

$$N_1 = N_{10}e^{-\lambda_1 t} \quad (11)$$

elde edilir. N_1 'in bu değeri denklem 9'da yerine konulacak olursa

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10}e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (12)$$

olur. Bu bağıntının iki tarafı $e^{\lambda_2 t}$ ile çarpılırsa

$$\frac{d}{dt}(N_2 e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_{10} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (13)$$

bulunur. İntegral alınır

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (14)$$

Benzer şekilde 9 bağıntısı $t=0$ 'da $N_3 = N_{30} = 0$ şartıyla çözümlerse

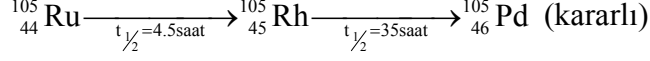
$$N_3 = N_{10} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad (15)$$

elde edilir.

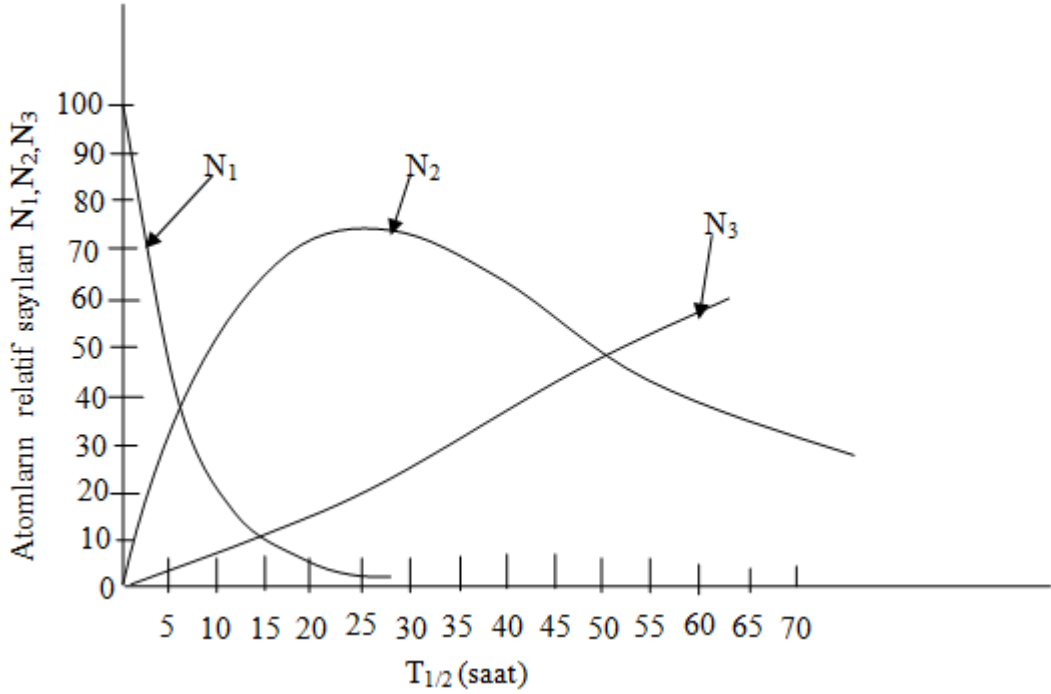
(11),(14),(15) eşitlikleri yardımıyla herhangi bir t anında mevcut olan atomların sayısı bulunabilir. Bu eşitlikler, $t=0$ da $N_1 = N_{10}$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ özel durumları için üretildi.

Bundan sonra N_{20} ve N_{30} , $t=0$ iken sıfır olmasalar bile N_1 , N_2 ve N_3 için bağıntılar üretmek mümkündür.

(11), (14), (15) bağıntılarının nasıl kullanılacağına örnek olarak



$t=0$ iken $N_{10} = 100$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ şartları altında başlayan bu ${}^{105}_{44}\text{Ru}$ bozunmasıyla oluşan N_1 , N_2 ve N_3 'ün t 'ye göre değişimi Şekil 2'de verilmektedir (Arya, 1999).



Şekil 2. Zincirleme (peşpeşe) bozunma grafiği

1.3.1.3. Yarı -Ömür

Radyoaktif bozunma yasasını ifade eden denklem (3), herhangi bir t anında bozunmadan kalabilen çekirdek sayısını verir. Kuramsal olarak bakıldığında numunedeki tüm çekirdeklerin bozunması için sonsuz zaman geçmesi gerekir. Yani ancak $t \rightarrow \infty$ için $N(t) = 0$ olur. Bununla ilgilenmek yerine radyoaktif maddenin ayırt edici bir özelliği olan

yarı ömür kavramı kullanılır. Yarı ömür radyoaktif bir elementin başlangıçtaki çekirdek sayısının yarıya inmesi için geçen zamandır. $T_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömrü şöyle bulunur:

$$N = \frac{N_0}{2} \quad (16)$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \quad (17)$$

$$T_{1/2} = -\frac{0,693}{\lambda} \quad (18)$$

Radyoaktif izotopların yarı ömürleri çok değişiktir. Bilinen en kısa yarı ömürlü çekirdek 10^{-21} sn ile He, en uzun yarı ömürlü çekirdek ise 10^{17} yıl ile ^{204}Pb dür.

Bozunmanın üstel ifadesi, radyoaktif atomların sayısının sıfır olması için sonsuz zaman olması gerektiğini gösterir. Radyoaktivitenin istatistiksel karakteri nedeni ile radyoaktif bir atomun ömrü, sıfır ile sonsuz arasında herhangi bir değer olabilir. Buna göre bir atomun ne kadar yaşayacağı bilinmez, ancak bir grup atomun ortalama ömründen söz edilebilir.

Bu nedenle radyoaktif atomlar için yarı ömürden farklı bir tanım verilir. τ ortalama ömür (bazen yalnızca ömür de denir) radyoaktif atomların tek tek ömürleri toplamının ortalamasıdır. t_1, t_2, \dots ömürlerine sahip atomların sayıları sırası ile $dN_1(t), dN_2(t), \dots$ ise ortalama ömür aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\tau = \frac{t_1 dN_1(t) + t_2 dN_2(t) + \dots}{dN_1(t) + dN_2(t) + \dots} = \frac{t dN(t)}{dN(t)} \quad (19)$$

Burada ($dN \rightarrow 0$) için:

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN(t)}{\int_0^{N_0} dN(t)} = \frac{\int_0^{N_0} t dN(t)}{N_0} \quad (20)$$

Denklem (2) ve $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ bağıntısı yerine konursa

$$\tau = -\lambda \frac{\int_0^{\infty} t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (21)$$

elde edilir. Burada ortalama ömür, yarı ömürden daha büyüktür ve aralarındaki ilişki;

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693\tau \quad (22)$$

şeklinindedir. Bu üç kavramdan birinin bilinmesi diğerinin bulunması için yeterlidir (Arya, 1999) .

Tablo 3. Bazı izotopların yarı-ömürleri

İzotop	Yarı- Ömür	Radyoaktiflik türü
${}_{90}\text{Th}^{232}$	1.39×10^{10} yıl	α, γ
${}_{92}\text{U}^{238}$	4.5×10^{10} yıl	α, γ
${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1620 yıl	α, γ
${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3.82 gün	α

1.3.1.4. Radyoaktif Denge

1.3.1.4.1. Geçici Denge

Bir ana çekirdeğin λ_1 bozunma sabitiyle birinci ürüne bozunduğunu ve bunun da λ_2 bozunma sabitiyle bozunduğunu düşünelim. Eşitlik 14,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (23)$$

ifadesinde $\lambda_2 < \lambda_1$ olduğunda yeterli derecede uzun bir zaman sonunda $e^{-\lambda_1 t}$ terimi $e^{-\lambda_2 t}$ 'ye göre ihmal edilebilir olacağından,

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \quad (24)$$

elde edilir. Bu ise belli bir zamandan sonra birinci ürün elementinin kendisi için belirlenmiş olan λ_2 bozunma sabitiyle bozunacağı anlamına gelir.

1.3.1.4.2. Sürekli Denge

Denklem 13'te $\lambda_1 \ll \lambda_2$ durumunu ele alalım. $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$ ve $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$ yazabiliriz. Böylece bu ifade,

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (25)$$

olarak elde edilir. Ürün çekirdeğin miktarı, zamanın artmasıyla $e^{-\lambda_2 t}$ terimi sıfıra gideceğinden bir denge durumuna yaklaşır ve denge durumunda,

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_2 \quad (26)$$

elde edilir. λ_1 çok küçük olduğundan $\lambda_1 N_{10} \approx 0$ olacaktır. Buradan ana çekirdeğin çok büyük yarı ömre sahip olduğu anlaşılır.

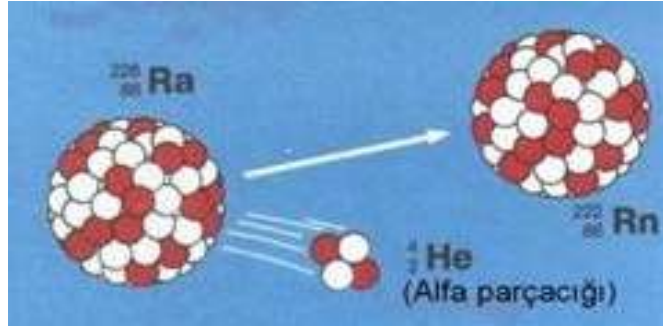
1.3.2. Radyoaktif Bozunma Türleri

1.3.2.1. Alfa Bozunması

Alfa bozunması, ana çekirdeğin bir ürün çekirdeğe ve bir alfa parçacığına parçalanması işlemidir. Alfa bozunmasında ana çekirdek iki proton ve iki nötron kaybederek kütlesi dört birim azalır; yani $\Delta A = -4$ ve $\Delta Z = -2$ olur. Bu nükleer parçalanma,

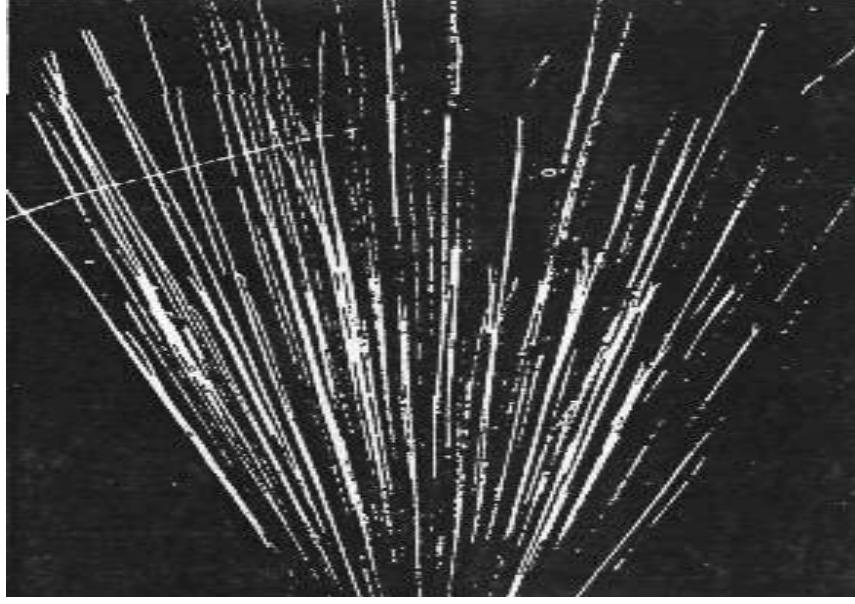


bağıntısıyla temsil edilir.



Şekil 3. Alfa bozunumu

Alfa yayınlanması bir Coulomb itmesi olayıdır. Bu durum ağır çekirdekler için gittikçe artan bir öneme sahiptir; çünkü itici Coulomb kuvveti, yaklaşık olarak A ile artan nükleer bağlanma kuvvetinden daha hızlı (yani Z^2 ile) artar. Radyoaktif atomun çekirdeğinden ışık hızının $1/20$ 'si kadar bir hızla ve 3 ile 9 MeV'lik enerji ile yayılırlar. Alfa parçacıkları, çok küçük bir madde kalınlığı ile örneğin bir kâğıt parçası ile durdurulabilir.



Şekil 4. Bir sis odasından geçen alfa taneciklerinin bıraktığı izler

Alfa tanecikleri çıplak iki pozitif elektron yükü taşıdığından, bir ortam içinden geçerken, ortamın atom veya moleküllerini kolaylıkla iyonlaştırırlar. Bu nedenle alfa taneciklerinin herhangi bir ortamdaki menzili çok kısadır. Çıkış enerjisi E (MeV) olan alfa taneciklerinin havadaki menzili

$$R = 0,318 E^{3/2} \quad (28)$$

formülü ile hesaplanır. Burada R 'nin birimi santimetredir.

Alfa taneciklerinin katı cisimlerdeki menzili Bragg-Kleeman formülü yardımı ile bulunabilir.

$$R_K = \frac{3,2 \times 10^4 \times R \times A^{1/2}}{d} \quad (29)$$

Burada (d) katının yoğunluğu, (A) katının kütle sayısı ve (R) havadaki menzildir (Kınacı, 1970).

1.3.2.2. Beta Bozunması

Çekirdekdeki nötron fazlalığından ortaya çıkan bir bozunmadır ve bu bozunmada elektronlarla aynı olan negatif beta parçacığı yayınlanır. Negatif beta parçacıkları ışık hızına yakın çok yüksek hızlarla kararsız olan atom çekirdeğinden fırlatılırlar. Bu β^- 'ler, atom çekirdeğindeki fazla nötronlardan birisi protona dönüşürken meydana gelirler. Bu bozunma atomun kütlesi üzerine etki etmez, çünkü β^- 'lerin kütlesi ihmal edilecek kadar küçüktür.



Bu ifade, nötronun bozularak bir proton, bir elektron ve bir antinötrino parçacığının meydana geldiğini göstermektedir. Nötrinin elektrik yükü olmadığından, varlığı diğer son parçacıkların kimliğini etkilemez.

1.3.2.3. Gama Bozunması

Radyoaktif bir çekirdek alfa veya beta yayınlamasından sonra çoğu zaman kararlı durumda kalmayabilir. Bir başka deyişle, radyoaktif parçalanmadan sonra geride kalan çekirdek uyarılmış halde kalabilir. Bu çekirdek, oluştuğundan çok kısa bir zaman sonra bir veya birkaç gama ışını yayınlamaya başlayarak üzerindeki fazla enerjiyi atar ve kararlı hale gelir. Çekirdek ne kadar yüksek enerji seviyesinde uyarılmış olarak kalmışsa, çıkacak gama ışınları o kadar yüksek enerjili olacaklardır.

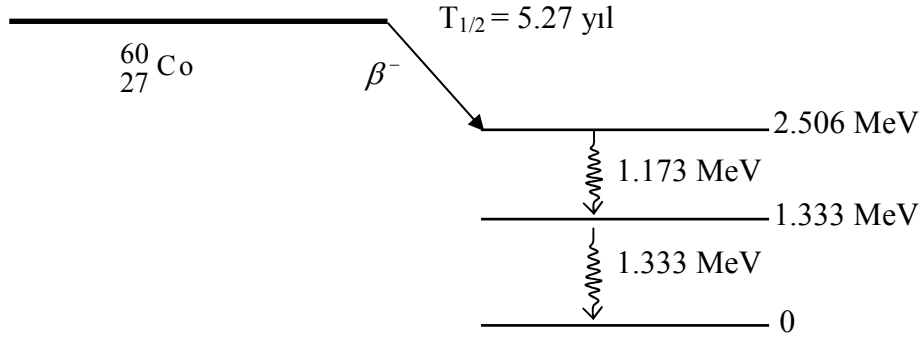
Yüksek bir enerji durumundan (E_i), daha düşük bir enerji durumuna (E_s) geçen bir çekirdekten yayınlanan gama ışınının enerjisi,

$$E = h\nu = E_i - E_s \quad (31)$$

bağıntısı ile verilir. Şayet E_s temel hale karşılık ise daha fazla foton yayınlanması mümkün olmayacak, ancak aksi halde çekirdek temel hale gitmeden önce bir veya daha fazla foton yayınlacaktır.

γ yayınlanması ile yarışan bir olay iç dönüşümdür. Bu olayda bir çekirdek enerjisini doğrudan doğruya bir atom elektronuna aktararak bozunur serbest elektron gözlenir. Bu β bozunumunda çok farklıdır. Z ve N sayıları değişmez, atom uyarılmış durumda kalır.

^{60}Co 'ın β^- bozunma şeması Şekil 5 ile temsil edilebilir. Burada çekirdek β^- bozunumuna uğradıktan sonra taban duruma geçebilmek için iki farklı enerjide γ ışını salmaktadır.

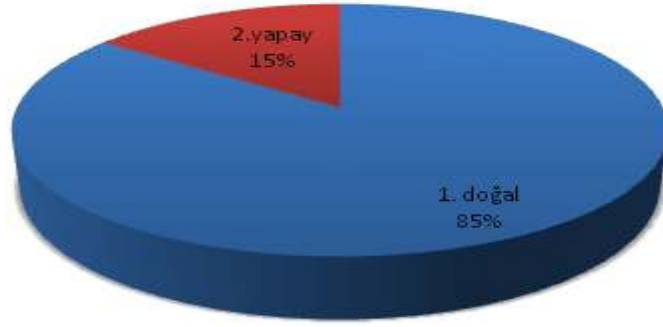


Şekil 5. ^{60}Co çekirdeğinin β^- bozunma şeması

Alfa ve beta bozunmasından farklı olarak, gama bozunması çekirdeğin atom veya kütle numarasında bir değişikliğe sebep olmaz. Alfa ve beta yayınlayıcılara kıyasla gama yayınlayıcılar çok küçük yarı-ömürlere sahiptirler.

1.4. Doğal Radyasyon Kaynakları

İnsanlar, hayatın bir parçası olarak dış uzay ve güneşten gelen kozmik ışınlar, yer kabuğunda bulunan radyoizotoplar dolayısıyla toprak ve yapı malzemeleri, su ve gıdalar gibi doğal kaynaklardan ışınlanmaktadır. Bunlara ilave olarak enerji üretimi, tıp, endüstri, araştırma, tarım, hayvancılık gibi pek çok alanda kullanımı kaçınılmaz olan yapay kaynaklar nedeni ile doz almaktadır. Yaşam standartları, yaşadıkları ortamların fiziksel özellikleri ve coğrafi şartlara bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte dünya genelinde kişi başına yaklaşık $2,8$ mSv yıllık doza maruz kalınmaktadır.



Şekil 6. Dünya genelinde doğal ve yapay radyoaktif kaynaklarından alınan dozların oranı

Doğal radyasyonun bir kısmını uzaydan gelen kozmik ışınlar oluşturur. Kozmik radyasyonlar kökenlerine göre hapsolmuş parçacık radyasyonlar ve solar radyasyonlar olarak sınıflandırılırlar. Parçacık radyasyonlar elektronlar ve protonlardır. Bu radyasyonlar manyetik alan etkisiyle dünya etrafında bulunan radyasyon kuşaklarında tutulurlar. Solar radyasyonlar ise süper novalardan, galaktik çekirdeklerden ve yıldızlar arası ortamlardan gelirler. Parçacık radyasyonlara göre daha düşük enerjiye sahiptirler (Çavaş, 2006)

Dünya yaşamında doğal kaynaklardan kaynaklanan iyonize radyasyona insanların maruz kalması sürekli ve kaçınılmaz bir durumdur. Tablo 4'te Amerika Birleşik Devletleri'nde, insanların maruz kaldığı yıllık ortalama etkin eşdeğer doz değerleri verilmektedir. İnsanların çoğu için bu maruz kalma insan yapımı kaynakların toplamını da aşar. Doğal radyasyona maruz kalmaya iki temel katkı vardır..

Dünya atmosferine giren yüksek enerjili kozmik ışın parçacıkları, Radyonüklidler ki, onlar dünyanın kabuğunda ve insanın kendi vücudu da dahil çevremizde her yerde mevcuttur (UNSCEAR, 1993).

Tablo 4. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan çalışmalarda hesaplanan, insanların maruz kaldığı yıllık ortalama etkin eşdeğer doz değeri

Kaynak	Ortalama yıllık etkin eşdeğer doz ($\mu\text{Sv/yıl}$)
Soluma (radon ve bozunum ürünleri)	2000
Diğer dahili radyonüklid kalıntıları	390
Karasal radyasyon	280
Kozmik radyasyon	270
Kozmojenik radyoaktivite	10
Doğal radyasyonlardan kaynaklanan toplam radyasyon	3000
Yapay kaynaklardan kaynaklanan toplam radyasyon	600
Toplam	3600

1.4.1. Kozmik Radyasyon Kaynakları

Uzaydan dünya atmosferine giren yüksek enerjili radyasyon, birincil kozmik ışınlar olarak bilinir. Birincil radyasyonun %87'sini protonlar, %11'ini alfa parçacıkları, % l'ini atom sayısı 4 ile 26 arasında olan çekirdekler ve % l'ini yüksek enerjili elektronlar oluşturur. Ortalama enerjileri 10 eV ve maksimum enerjileri 10^{19} eV'dur (Çelebi, 1995).

Kozmik radyonüklitler uzun yarı ömürlü olabilirler, fakat büyük bir kısmı dünyanın oluşumundan beri var olan Uranyum, Toryum gibi elementlerden daha kısa yarı ömre sahiptirler. Diğer bazı kozmik radyonüklitler de ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{81}Kr , ^{14}C , ^{32}Si , ^{39}Ar , ^{22}Na , ^{35}S , ^{37}Ar , ^{33}P , ^{32}P elementleridir (UNSCEAR, 2000).

1.4.2. Toprak da Bulunan Radyoaktivite

Toprakta bulunan ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K gibi doğal radyoaktif çekirdekler toprağın radyoaktif hale gelmesine sebep olmaktadır. Doğal radyoaktif çekirdekler volkanik, fosfat, granit ve tuz kayaçlarında yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar (Damla, 2005).

Volkanik kayaçların radyoaktivite kütle konsantrasyonları, tortul kayaçlardan daha yüksektir. Tortul ve fosfat kayaçlarda oldukça yüksek radyoaktivite içermektedir. En düşük radyoaktivite konsantrasyonu kireç kayaçlarda bulunmaktadır. Başkalaşım kayaçları ise oluştukları kayaçların konsantrasyonuna sahiptirler (Çelebi, 1995).

Tablo 5. Kayaçlardaki radyoaktif çekirdeklerin yıllık radyasyon dozları (Damla, 2005)

Kayaç tipi		Çekirdek	Radyasyon dozu (mrad/yıl)
Volkanik kayaçlar		^{226}Ra	24
		^{235}U	26
		^{232}Th	37
		^{40}K	35
Tortul Kayaçlar	Kumtaşı	^{226}Ra	13
		^{235}U	7,7
		^{232}Th	18
		^{40}K	5
	Kireçtaşı	^{226}Ra	7,7
		^{235}U	8,4
		^{232}Th	4
		^{40}K	4
	Kiltaşı	^{226}Ra	20
		^{235}U	7,7
		^{232}Th	31
		^{40}K	36

1.4.3. İnsan Vücudunda Bulunan Radyoaktivite

İnsan, doğal radyonüklitleri vücuduna sindirim veya solunum yoluyla alır. ^{40}K , ^{226}Ra , ^{238}U 'nin bozunma ürünleri ve çok az oranlarda ^{14}C ve ^3H , vücuda sindirim yoluyla alınan doğal radyonüklitlerin başında gelir. Potasyum doğada nispeten bol miktarda bulunur. 70 kg ağırlığında bir insanda ortalama 140 mg potasyum bulunur. Bu miktar potasyumda bulunan ^{40}K miktarı $3,7 \times 10^3$ μCi civarındadır. Biyosferde bulunan karbon, hidrojen ve kozmojenik

radyonüklitler, kozmik ışın nötronlarının atmosferdeki azotla etkileşmeleri sonucu ortaya çıkarlar.

Tablo 6. İnsan vücudunda bulunan radyoaktif elementler

Radyoizotop	Vücutta bulunan radyoizotopların toplam miktarı	Vücutta bulunan radyoizotopların toplam aktivitesi	Günlük alınan radyoizotoplar
Uranyum	90 μg	30 pCi (11 Bq)	1,9 μg
Toryum	30 μg	3 pCi (0,11 Bq)	3 μg
Potasyum - 40	17 μg	120 nCi (4,4 kBq)	0,39 mg
Radyum	31 μg	30 pCi (1,1 Bq)	2,3 pg
Karbon -14	95 μg	0,490 μCi (15 kBq)	1,8 μg
Tritiyum	0,06 pg	0,6 nCi (23 Bq)	0,003 pg
Polonyum	0,2 pg	1 nCi (37 Bq)	$\approx 0,6 \mu\text{g}$

İnsan iç ışınlamalarda en büyük radyasyon dozunu Rn'dan almaktadır. Bu radyoaktif gaz atomları, yerde ve atmosferde difüzyonla ortaya çıkan toryum ve uranyum atomlarının, bozunuma uğraması sonucu üretilirler. Radon (^{238}U 'in bozunum ürünü ^{222}Rn 'dir) ve toronun (^{232}Th 'nin bozunum ürünü ^{220}Rn 'dir) bozunma ürünlerine ilave olarak, alfa ve beta ışınlarıyla birlikte gama ışınları da yayınlayan ^{210}Po , ^{210}Pb ve ^{210}Bi atomları teneffüs yoluyla vücuda girerler. İnşaat ve yapı malzemelerinden çıkan radyoaktif ^{222}Rn 'de evlerde teneffüsle vücuda alınan en önemli radionüklitdir (Karahana, 1997).

1.5. Yapay Radyasyon Kaynakları

Nükleer reaktör veya hızlandırıcılarda üretilen bir radyoizotopun bozunuma uğraması olayına yapay radyoaktivite denir. Son yüzyılda nükleer silah denemeleri ve nükleer güç tesislerinin kurulmasıyla doğal radyasyon düzeylerinde artışlar olmuştur. Radyasyonun barışçıl amaçlı kullanımı ise bugün hayatımızın hemen her alanında işimizi kolaylaştırmaktadır. Doğal kaynaklı çevre radyasyonu herkesi etkilediği halde, yapay radyasyonlar belli zamanlarda ve ilgili kişileri etkilemektedir (meslekleri gereği veya teşhis ve tedavi amaçlı, vb).

Başlıca yapay radyoaktif çekirdekler Tablo 7’de verilmiştir. Doğal radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan radyasyondan alınan doz, yapay radyoaktif çekirdeklerden alınan radyasyon dozuna oranla daha yüksek olmasına rağmen, insan yapımı radyoaktif çekirdeklerden yayınlanan radyasyon, yaydıkları radyasyon türü gereği daha fazla endişeye yol açarlar.

Tablo 7. Yapay radyoaktif çekirdekler

Çekirdek	Yarı Ömür	Yayılan Radyasyon
⁶⁰ Co	5,3 (yıl)	β, γ
⁶⁵ Zn	244 (gün)	γ
⁹⁰ Sr	29 (yıl)	β
⁹⁰ Y	64 (saat)	β
¹²⁵ I	60 (gün)	X
¹³¹ I	8 (gün)	β, γ
¹³⁴ Cs	2,1 (yıl)	β, γ
¹³⁷ Cs	30 (yıl)	β, γ
¹⁵⁵ Eu	4,96 (yıl)	β, γ
²³⁸ Pu	87,7 (yıl)	α
²³⁹ Pu	2,4x10 ² (yıl)	α,γ
²⁴⁰ Pu	6,5x10 ³ (yıl)	α
²⁴¹ Pu	14,4 (yıl)	β

1.6. İyonlaştırıcı Radyasyonlar ve Madde ile Etkileşimleri

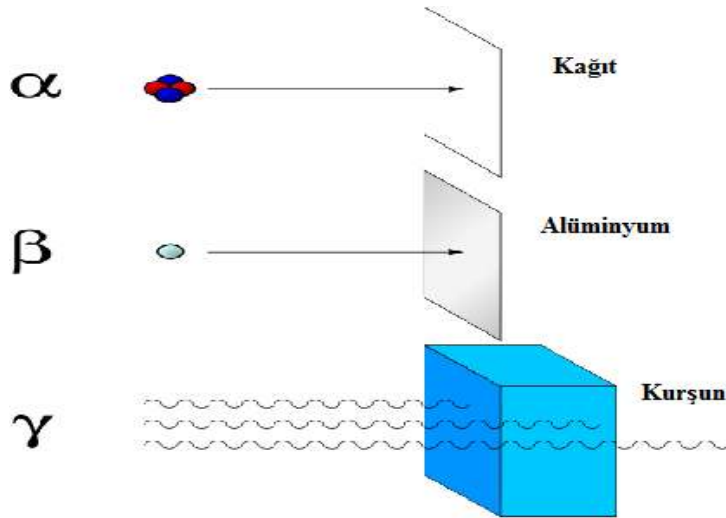
Radyasyonun madde ile etkileşimi, radyasyon tipine bağlı olarak farklı olabilmektedir. Bu bakımdan, doğal radyoaktivitede sıkça rastlanan alfa, beta ve gama radyasyon tiplerinin madde ile etkileşimlerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu husus doğal radyasyonun ölçülmesi açısından da önem arz etmektedir.

Alfa parçacıklarının enerjisi 9 MeV’in altında olup madde içerisinden geçerken elektrik yükleri nedeniyle yoğun bir iyonlaşmaya uğrayarak tamamen soğururlar ve

enerjilerini kaybederler. Alfa tanecikleri, pozitif yüklü iki proton ve iki nötrondan meydana geldikleri için bir elektrona yaklaştıklarında, aralarında kuvvetli bir elektrostatik çekim kuvveti meydana gelir. Bu taneciklerin kütlesi yaklaşık olarak elektronunkinin 8000 katı kadardır. Hızları $1,6 \times 10^7$ m/s mertebesindedir. Enerjilerini esnek ve esnek olmayan çarpışmalarla kaybederler. Alfa tanecikleri çoğunlukla, içinden geçtikleri ortamdaki atomların elektronlarıyla etkileşim yaptıkları için geçtikleri yol üzerinde birçok iyon çifti oluştururlar (Bilge, 1985). Alfa tanecikleri +2 elektrik yüklerinden dolayı madde içinden geçerken kuvvetle iyonizasyona neden olurlar. Alfa parçacıklarının kütlesi ağır olduğundan madde içindeki menzili kısadır. Bu tanecikleri bir kâğıtla bile durdurmak mümkündür.

Beta parçacıklarının madde içinden geçmesi ve iyon çifti oluşturmaları alfa parçacıklarına benzer. Ancak yine de aralarında önemli farklar vardır. Beta parçacıklarının kütleleri alfa parçacıklarından küçük olduğundan aynı enerjide oluşturdıkları özgül iyonizasyon daha küçüktür. Beta parçacıkları, kütlelerinin küçük olması ve bir tek elementer yükleri nedeniyle, alfalar gibi kolayca durdurulamazlar ise de, yüksek enerjilere çıkmadıkça madde içine fazla nüfuz edemezler (Damla, 2005).

Gamma ışınlarının madde ile etkileşmesi üç ayrı şekilde olur. Bunlar fotoelektrik olayı, Compton saçılması ve çift oluşumudur.



Şekil 7. Alfa, beta ve gama ışınlarının madde ile etkileşmeleri

1.7. Aktivite ve Radyasyon Birimleri

1.7.1. Aktivite Birimleri

Aktivite birimi Becquerel olup saniyede bir bozunma meydana getiren herhangi bir radyoaktif madde miktarı olarak tanımlanmaktadır. Eskiden kullanılan aktivite birimi Curie'dir. Herhangi bir radyoaktif madde miktarı eğer saniyede $3,7 \cdot 10^{10}$ bozunma hızına sahipse aktivitesi 1 Curie olarak tanımlanmaktadır. Ancak Curie çok büyük bir birimdir. Bu nedenle alt birimleri kullanılmaktadır. Curie' nin yaygın olarak kullanılan alt birimleri microcurie ve picocurie'dir. Becquerel ve Curie arasındaki bağıntı şöyledir:

$$1 \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci} = 37000 \text{ bozunma/sn}$$

$$1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci} = 0,037 \text{ bozunma/sn}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ci} = 27 \text{ pCi}$$

1.7.2. Işınlama Birimi

Işınlama, X ve gama ışınlarının havayı iyonlaştırmalarının bir ölçüsüdür. Işınlama birimi ise Röntgen'dir ve normal hava şartlarında (0 °C ve 760 mm Hg basınçta) havanın 1 kg'ında $2,58 \cdot 10^{-4}$ C'luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan X ve gama ışını miktarıdır.

1.7.3. Soğurulmuş Doz

Radyasyonlarla ışınlanan bir maddenin birim miktarındaki soğurulan radyasyon enerjisidir. SI birim sisteminde soğurulan doz birimi Gray (Gy) olup, Gray, 1 kg'lık bir maddeye 1 Joule (J)'lük enerji veren herhangi bir iyonlayıcı radyasyonun dozudur. Eski özel birimi rad (radiation absorbed dose) olup, 1 rad, herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg'lik enerji soğurumuna eşdeğerdir.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J.kg}^{-1} = 100 \text{ erg.g}^{-1}$$

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

1.7.4. Eşdeğer Doz

Radyasyonun biyolojik etkileri göz önünde bulundurularak tanımlanan birim rem'dir. Doku ve organlarda, birim kütlede soğurulan enerji miktarlarıyla orantılı bir değerdir. Vücut için eşdeğer doz olarak tanımlanır. SI birim sisteminde eşdeğer doz birimi Sievert (Sv)'dir.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$$

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

1.8. Nükleer Radyasyon Ölçüm Yöntemleri

Nükleer radyasyonları tespit etmek için kullanılan tüm dedektörlerin temel çalışma prensipleri benzer özelliktedir. Radyasyon ya da başka bir deyişle ışınım dedektöre girer ve dedektörün atomları ile etkileşmeye girer ve enerjisinin bir kısmını ya da tamamını kaybeder. Bu sırada atom yörüngelerinden düşük enerjili elektronların salınmasına sebep olurlar. Bu elektronlar elektronik bir devre tarafından toplanır ve analiz edilebilmesi için akım pulsuna veya voltaj pulsuna dönüştürülür.

Radyasyon ölçüm yöntemlerini aktif ve pasif olmak üzere iki türe ayırabiliriz. Aktif ölçümde anlık ölçümler alınır, örneğin gaz dolu dedektörler sintilasyon dedektörleri ve yarı iletken dedektörler bu tip ölçümlere örnek gösterilebilir. Pasif radyasyon ölçümlerinde ise uzun süreli ölçümler yapılır ve genelde nükleer iz dedektörleri kullanılır ve bu tip ölçümler radon gazı ölçmek için yapılır. Aşağıda iki alt başlıkta aktif ve pasif dedektörlerin çalışma prensipleri örnek olarak verilmiştir.

1.8.1. Yarıiletken Dedektörler

Germanyum (Ge) ya da silisyum (Si) gibi son yörüngelerinde dört elektron bulunan bir kristale katkı maddeleri (B-bor, P-fosfor vb.) katarak p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler elde edilir. p ve n- tipi yarıiletken maddeleri kullanarak, diyot elemanında olduğu gibi p-n eklemleri yapılır. Bu ekleme uygun yönde (diyota göre ters) bir gerilim uygulanırsa serbest yüklerden yani elektron ve boşluklardan arındırılmış bir bölge elde edilir. Bu bölgeye gelen

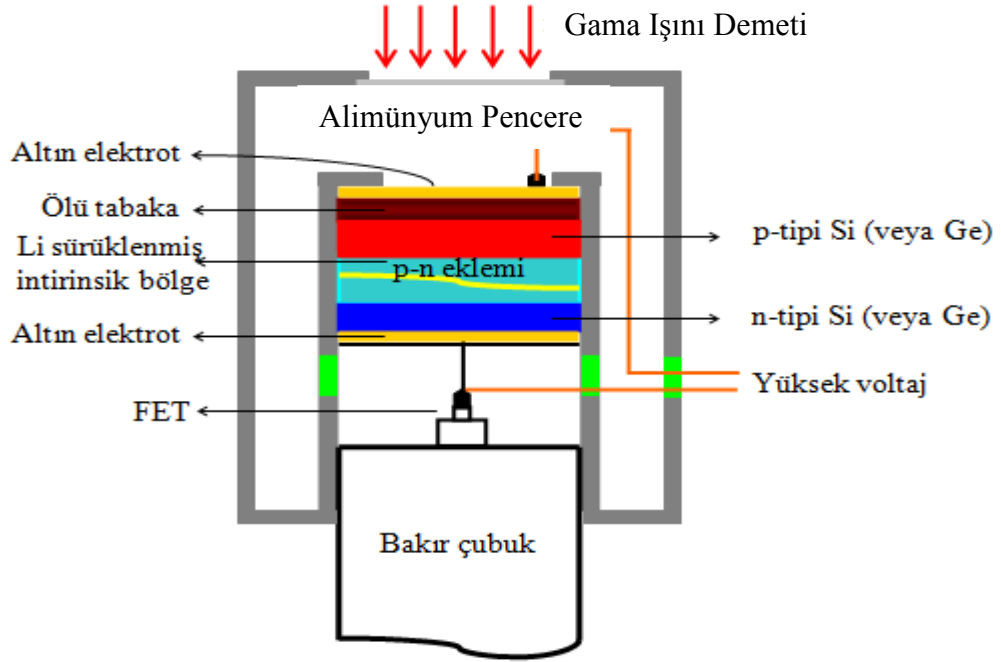
radasyonun etkisi ile iyonlaşma olur ve elektron - boşluk çiftleri oluşur. Bunlar elektrik alanın etkisi ile dedektörde bir akım pulsu oluştururlar. Yarıiletkenlerde bir elektron hole çifti oluşturabilmek için Si'da 3,76 eV, Ge'da ise 2,96 eV enerji gereklidir. Gaz dolu dedektörlerde bu değer 30-35 eV mertebesinde. Bu da yarıiletken dedektörlerde gaz dolu dedektörlere göre on kat fazla iyon çifti oluşturmaktadır. Bu nedenle yarıiletken dedektörlerin enerji ayırma gücü daha yüksektir (Baldık, 2005).

p- tipi ve n-tipi materyaller birbirleriyle temas ettirilirse, n-tipi materyalden çıkan elektronlar p-tipi materyale eklem boyunca yayılırlar ve boşluklar ile birleşirler. Yük taşıyıcılarının eklem yakınında yüksüz hale geldikleri bölgeye tüketim bölgesi adı verilir. n-tipi bölgeden çıkan elektronların sayımları sonucunda, arkada iyonlaşmış verici bölgeler bırakırken, p-tipi bölgeden çıkan deliklerin benzer yayılmaları sonucunda, arkada negatif yüklü sabit alıcı durumları kalır. Sabit bölgelerden çıkan uzay yüklerinin oluşturduğu elektrik alan sonuçta göçü durdurur. Eğer radyasyon, tükenme bölgesine girer ve elektron-delik çiftleri yaratırsa, iyonlaşma odasındakine çok benzer bir sonuç ortaya çıkar. Elektronlar bir yönde hareket ederken, delikler diğer yönde hareket ederler ve biriken elektronların toplam sayısı bir elektronik puls oluşturur. Bu pulsun genliği radyasyonun enerjisi ile orantılıdır.

Bu dedektörler, pratikte, ters besleme gerilimleriyle (1000–3000 V) çalıştırılırlar. Bu gerilim iki etkiye sahiptir: Tükenme bölgesindeki elektrik alan büyüklüğünü, yük birikimini daha verimli yaparak artırır ve bir tip materyalden diğerine daha fazla yük taşıyıcısını sürükleyecek bir kuvvet uygulayarak tükenme bölgesinin boyutlarını ve dolayısıyla dedektörün duyarlı hacmini artırır.

Büyük hacimli dedektörlerden yükleri toplamak için gerekli zaman 10–100 ns aralığında olabilir. Dedektör geometrisine (düzlem veya koaksiyal) ve radyasyonun elektronlara göre giriş noktasına bağlı olarak değişimler ortaya çıkabilir.

Şekil 8'de yarıiletken dedektör yapımında kullanılan n ve p tipi materyaller gösterilmiştir. Ge ve Si kristalleri ile 5 değerlikli bir atom yer değiştirdiği zaman kovalent bağı paylaşmayan bir elektron iletim bandına uyarlanır. Bu n-tipi bir yarı iletken olur. 3 değerlikli bir atom kullanıldığı zamansa değerlik bandından bir elektron kolayca alınabileceği için delik oluşur. Buda p-tipi bir yarıiletkendir (Krane, 2001).



Şekil 8. Tipik bir yarıiletken dedektörün şematik gösterimi

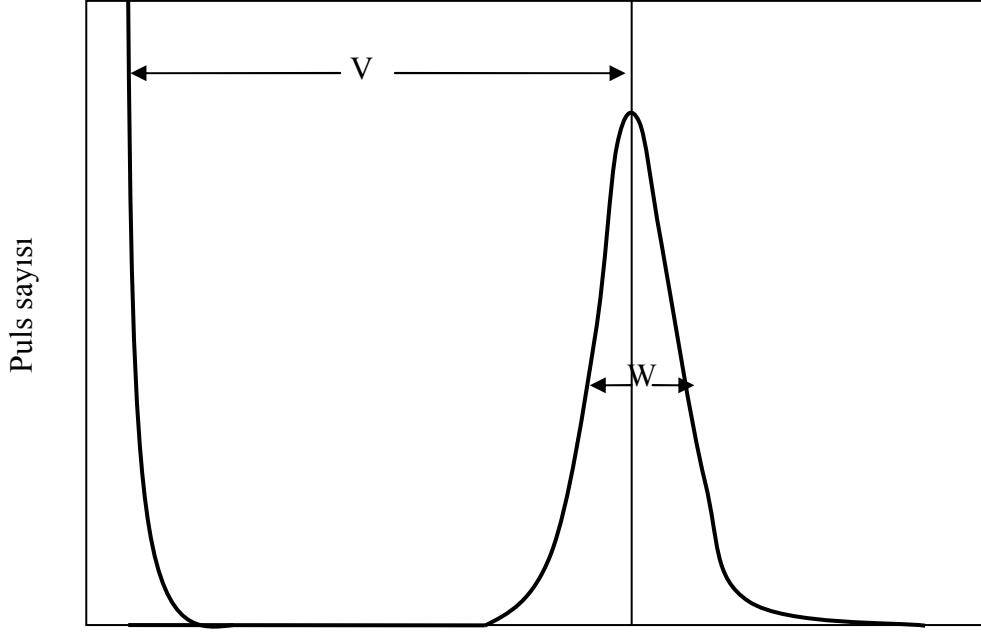
Bir dedektörün ayırma gücü veya spektrumun yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM), o dedektörün kullanıldığı enerji aralığındaki enerjeyi tam olarak ifade eder. Şekil 9'da görüldüğü gibi dedektörün ayırma gücü genellikle R ile gösterilip

$$R = \frac{W}{V} \quad (32)$$

şeklinde ifade edilir. Burada W yarı maksimumdaki puls genişliği ve V ise ortalama genişliktir. Bir pikin yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) ise;

$$FWHM = W \times E \quad (33)$$

şeklinde verilmektedir. Burada E , elektronvolt cinsinden foton enerjisidir.



Şekil 9. Dedektörlerin ayırma güçleri

1.8.2. Pasif Radon Dedektörleri

Radonun radyoaktif bozunumu sırasında verdiği alfa parçacıklarının, pasif radon dedektörleri üzerinde bıraktığı izlerin kimyasal işlemle görünür hale getirilmesi ve bu izlerin mikroskopla sayılmasını baz alır. Nükleer iz kazıma yöntemi olarak da isimlendirilen bu yöntem, evlerde işyerlerinde, madenlerde ve de mağaralarda uzun süreli olarak havada radon ölçümleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Pasif radon dedektörüyle radon ölçüm işleminin kısaca basamakları şöyledir;

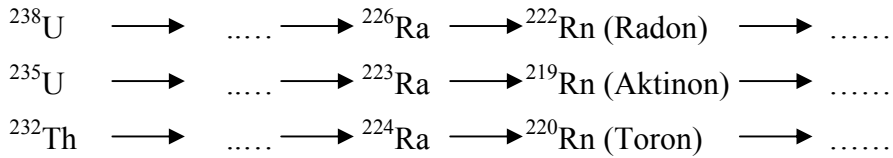
1. Ölçüm yapılması düşünülen yerlere dedektörlerin yerleştirilmesi ve 2 veya 3 ay radona maruz bırakılması.
2. Etching (Kimyasal kazıma işlemi) Dedektör filmi üzerine düşen, alfa parçacıklarının görünür hale getirilmesi.
3. Dedektörlerin üzerindeki izlerin, Radometre mikroskobu ile sayılması, bilgisayar programı ile verilerin alınması, radona maruz kalma süresi de bilinerek değerlendirilmesi ve radon aktivite konsantrasyonunun (RAK) hesaplanmasıdır.

1.9. Radon Gazı ve Doğal Radon Düzeyleri

1.9.1. Radon

Radon elementinin ilk kez 1900 yılında Alman Kimyacı Friedrich Ernst Dorn tarafından bulunduğu kabul edilmektedir. Ancak esasen ilk kez 1898 yılında ünlü Fizikçi Ernst Rutherford tarafından keşfedilmiştir.

Radon, renksiz, kokusuz, tatsız bir gazdır ve Rn sembolü ile gösterilmektedir. 86 atom numarası ile elementlerin Periyodik Tablosunda asal gazlar grubu denilen 8A grubunda ve 6. periyotta bulunmaktadır. Asal gazlar periyodik tabloda sıfır ya da 8A grubunda Rn ile birlikte yer alan Helyum (He), Neon (Ne), Argon (Ar), Kripton (Kr) ve Xenon (Xe) elementlerinden oluşmaktadır. Tamamı doğal şartlarda gaz halde bulunmaktadır ve önemli bir özelliği radyoaktif olmasıdır. Atmosferden sıvı havanın damıtılması yoluyla elde edilirler. ^{219}Rn - ^{226}Rn arasında toplam 28 izotopu bulunan bir kimyasal elementtir. Bozunma şeması aşağıdaki gibidir (URL-3, 2008)



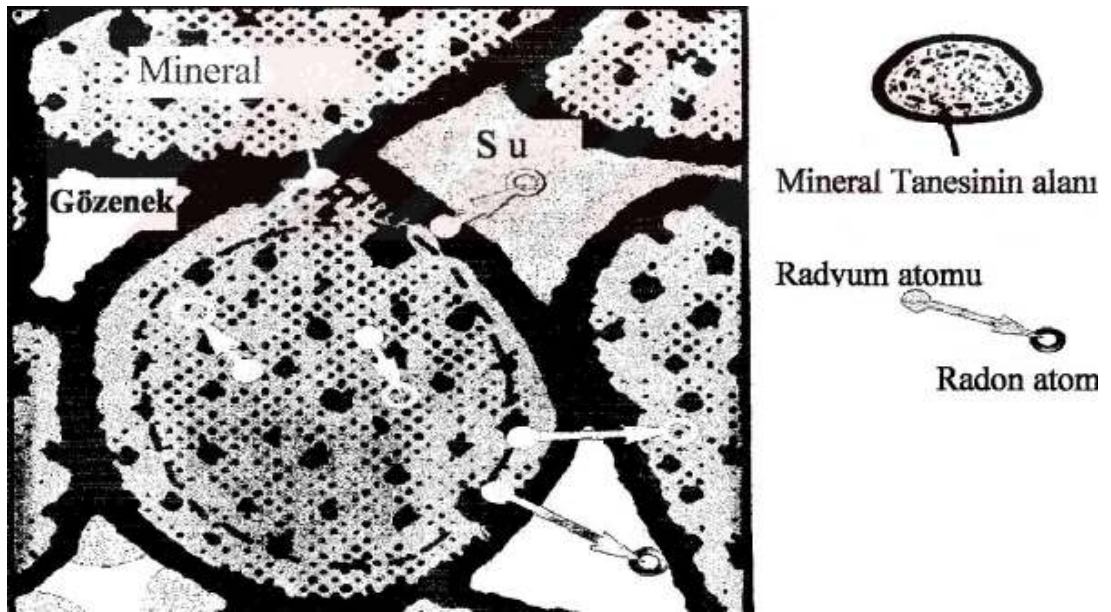
Aktinon (^{219}Rn): Doğal radyoaktif çevrede çok az bulunur. Çünkü toprağın yüzey tanecikleri arasında oluşsa bile yarı ömrünün çok kısa (3,98 s) olması sebebiyle hemen bozunmaya uğrar. Ayrıca dizi başı elementi ^{235}U 'un doğadaki bolluğu (%0,70) çok düşük olduğundan fazla bir önemi yoktur.

Toron (^{220}Rn): Yarı ömrü (54,5 s) aktinona göre daha uzun olduğundan toprak gazında ve yer atmosferinde bir yoğunluk oluşturur.

Radon (^{222}Rn): Üç radon izotopu arasında en uzun yarı ömürlüsü (3,85 gün) ^{222}Rn 'dir. Seri başı elementi ^{238}U 'un doğada bol ve yaygın dağılımı nedeniyle toprak gazında ve atmosferde önemli bir yoğunluk oluşturur. ^{226}Ra 'nın bozunumu sonucu oluşur. Radon izotopları içinde gerek doğada bulunma çokluğu gerekse yarı ömrünün gün mertebesinde olması nedeniyle ^{222}Rn , diğer radon izotoplarından daha çok atmosferde bulunur.

Radon, toprak, kayaç, tortu ve sudan gelir, havada bozunum ürünleri üretir. Doğal radyasyonun %55 ile en büyük kısmı radondur. Uzun süreli radona maruz kalmak sağlığımızı olumsuz olarak etkileyebilir. Uranyum madenlerinde yapılan çalışmalarda da görüldüğü gibi aslında yüksek radon gazı konsantrasyonunun bronşiyal dokulara zarar verdiği ve akciğer kanserine sebep olduğu kabul edilir. Yüksek radyoaktifliğin gözlendiği yerler, yeraltı madenleri veya mağaralar gibi mekânlar, ziyaretçiler ve çalışanlar için radyolojik olarak dikkate değer riskler oluşturması önemlidir (Lario vd., 2005).

Radon gazı kimyasal olarak inaktif, soy gazlar grubuna dahildir. Radon ürünleri katı taneciklerdir. Toprak veya kayaç içerisinde oluşan radon gazı zamanla çatlak ve gözeneklere kaçar (Şekil 10) ve buralardan yayılma yolu ile atmosfere geçer. Çatlak ve gözeneklerden atmosfere geçen radon gazı miktarı radonun yayılma gücü olarak tanımlanır ve bu değer %1 - %80 arasında değişmektedir.



Şekil 10. Radon Atomunun Mineral Taneleri Arasındaki Gözeneklerden Geçişini (Günaydı, 2004).

1.9.2. Radonun Bozunma Ürünleri

Radon radyoaktif bir gaz olduğundan, hava ortamında bozularak yeni meydana gelen radon ürünleri (^{218}Po , ^{214}Pb ve ^{214}Bi) atmosfer içindeki herhangi bir parçacığa yapışmak eğilimindedir. Böylece havadaki parçacıklara soğurma yolu ile yapışan ürünler,

bu parçacıkları radyoaktif hale getireceklerdir. Kendisinin bozunmasını kısa ömürlü radon ürünleri olarak bilinen dört radyoizotop izlemektedir. Bunlar, Po- 218, Pb-214, Bi-214 ve Po-214'tür ve yarı ömürleri sırasıyla 3,05 dk, 26,8 dk, 19,7 dk ve $1,5 \cdot 10^{-4}$ sn'dir.

Tablo 8. Radon ve ürünlerinin karakteristik özellikleri

İzotop	Yarı ömrü	Bozunma sabiti (sn^{-1})	Temel radyasyon enerjileri (MeV)		
			α	β	γ
^{222}Rn	3,82 gün	$2,1 \times 10^{-6}$	5,48		
^{218}Po	3,05 dk	379×10^{-3}	6,00		
^{214}Pb	26,8 dk	$4,31 \times 10^{-4}$		0,65	0,295
^{214}Bi	19,7 dk	$5,86 \times 10^{-4}$		3,13	1,050
^{214}Po	$1,5 \times 10^{-4}$ sn	$4,62 \times 10^3$	7,69		

1.9.3. Yeryüzünde Doğal Radon Düzeyleri

1.9.3.1. Havadaki Doğal Radon Düzeyleri

Havadaki radon konsantrasyonu bölgeye, zamana, yerden yüksekliğe ve meteorolojik şartlara bağlıdır. Radonun kaynağının toprak olmasından ve çok kısa yarı ömre sahip olmasından dolayı radon konsantrasyonu yükseklikle sabit bir şekilde azalma gösterir. Coğrafik yerleşim önemlidir: Adalar ve Kutup Bölgesi gibi radon çıkışını sağlayan toprağın, azaldığı yerleşim bölgelerinde, radon konsantrasyonu düşüktür.

1.9.3.2. Evlerde Radon Düzeyleri

Radon ürünleri konsantrasyonları, ev içi ortamlarda dış ortamlardan daha fazladır. Tropikal bölgelerde bu oran değişebilir. Havalandırılması iyi yapılan evlerin içinde ve dışında bu oran birbirine yakın çıkabilir. Radonun üç tane doğal izotopu vardır. ^{219}Rn (aktinon), ^{235}U 'in bozunmasıyla ortaya çıkar. ^{220}Rn (toron), ^{232}Th 'nin bozunma ürünüdür. ^{222}Rn (radon), ^{238}U 'in bozunma ürünüdür. Radonun havadaki konsantrasyonu Bq/m^3 birimi olarak veya birim hacim

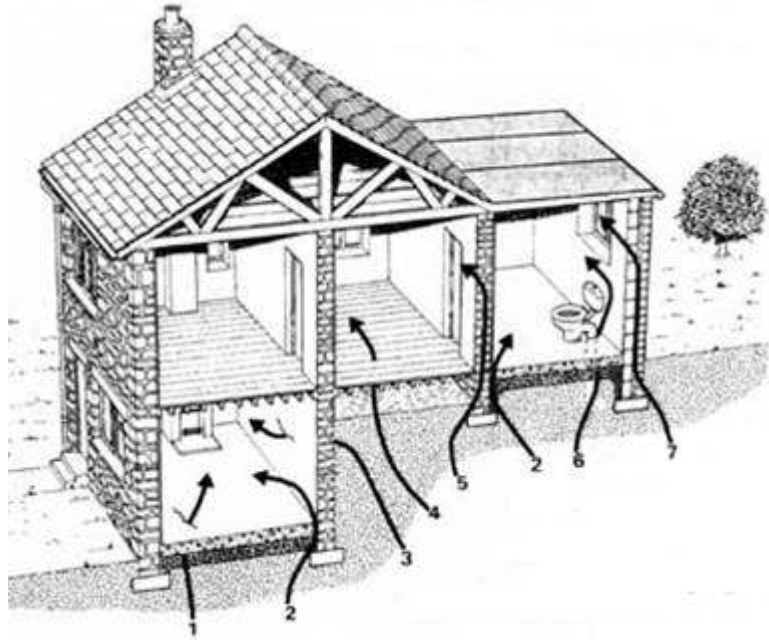
başına serbest kalan toplam alfa enerjisi (MeV/l) ile değerlendirilir. Radonun ev içi ortamdaki konsantrasyonu evin havalandırılmasıyla doğrudan ilgilidir. Gözenekli materyallerde radonun hareketi, konsantrasyon ve basınç değişimlerine sebep olur. Radonun ortamdaki hareketi moleküler difüzyon yoluyla olmaktadır (Karahan, 1997).

Tablo 9. Bazı ülkeler için evlerde ölçülmüş ^{222}Rn konsantrasyonları (UNSCEAR, 2000)

Ülke	^{222}Rn konsantrasyonu (Bq/m ³)
Mısır	9
Kanada	34
Danimarka	53
Almanya	50
Norveç	73
Romanya	45
İsviçre	70
İngiltere	20
ABD	46
Çin	24

Evlere radon; zemin çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası boşluklarından girmekte, ayrıca yapı malzemeleri, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gaz ve içme sularında bulunan radon da bina içi konsantrasyonu artırmaktadır. Binalardaki radon kaynağının büyük kısmı (%90), binanın temelindeki toprak ve kayalardır.

Evlere radon konsantrasyonu zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Evlerde radon seviyesi gün boyunca değiştiği gibi mevsimlere bağlı olarak da değişim göstermektedir (URL-4, 2008).



1. Zemindeki kırık ve çatlaklardan
2. Yapıdaki birleşme ve bağlantı noktalarından
3. Toprak altında kalan duvarlardaki çatlaklardan
4. Zemin yapısında bulunan boşluklardan
5. Duvarlardaki çatlaklardan
6. Tesisat vb boruların çevrelerindeki boşluklardan
7. Duvarların içerisinde olabilecek mağaracıklardan

Şekil 11. Radonun ev ortamına giriş şekli (URL-4, 2008).

1.9.3.3. Yeraltı Madenlerinde Radon Düzeyleri

Radon ve ürünlerinin oluşturduğu sağlık riskinin belirlenmesi amacıyla yapılan epidemiolojik çalışmalar, özellikle yeraltı uranyum madeni işçileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tür ocaklar radon ve ürünlerine maruz kalma ile akciğer kanseri arasındaki korelasyonun geliştirilmesi ve maruz kalınan konsantrasyonların limit değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan araştırmalar için en uygun çalışma ortamlardır. Bunun nedeni, cevherin yapısı gereği bu tür ocakların havasında radon ve ürünlerinin yüksek konsantrasyonlarda bulunma olasılığıdır. Yeraltı madenlerinde yapılan epidemiolojik araştırmalara göre madenlerde çalışan 68.000 maden işçisi içinden 2.700 işçinin radona bağlı mesleki akciğer kanserine yakalanmış olduğu ortaya çıkmıştır (Fişne, 2002).

Yeraltı maden ocaklarında işçi sağlığı açısından mesleki risk oluşturan unsurlardan biri de işçilerin ocak havasındaki radyonüklitlerden dolayı aldıkları radyasyon dozlarıdır. Maden işçileri havadaki radon ve onun kısa ömürlü bozunma ürünleri ile jeolojik yapıdaki

doğal radyoaktif elementlerden yayımlanan gama radyasyonuna maruz kalmaktadır. Epidemiyolojik çalışmalar uzun süre radyasyona maruz kalmanın akciğer kanseri riskini artırdığını ortaya koymuştur (Planiniç vd., 2002). Genellikle uranyum madenlerinde yüksek seviyelere ulaşarak, maden çalışanları için önemli sağlık riskleri oluşturduğu bilinen radon gazının diğer madencilik dallarında çalışanlar için de tehlikeli seviyelere ulaşabileceği yapılan araştırmalarla belirlenmiştir (Hewson ve Ralph, 1994).

Tablo 10. Dünyadaki bazı kömür madenlerindeki ortalama radon konsantrasyonlar (Veiga vd., 2004).

Ülke	Kömür madenlerinin sayısı	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)
İngiltere	12	74 (22-518)
Hindistan	2	145 (46-354)
İran	10	320 (146-520)
Polonya	71	740 (0-7000)
Türkiye	5	(31-185)
Pakistan	6	192 (121-408)
Brezilya	1	1650 (170-6100)

Uluslararası Radyasyon Koruma Komitesi (ICRP), maden ocakları için özellikle radon gazının sürekli olarak izlenmesini tavsiye ederek sınır değerleri belirlemiştir. Buna göre, yıllık radyasyon dozu 3-10 mSv arasında sınırlandırılmıştır. Bu doz değerlerine karşılık gelen radon konsantrasyonu 500-1500 Bq/m³ olup, eylem seviyesinin de bu aralıktan seçilmesini tavsiye edilmiştir (ICRP-65, 1993).

Türkiye'de TAEK (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği'nde, solunum yoluyla alınmasına izin verilen radon konsantrasyon değerinin yılda ortalama olarak; 1000 Bq/m³ değerlerini aşamayacağı belirtilmiştir (URL-3, 2008).

Dünyada yaklaşık 4 milyon kömür madeni işçisi, yaptıkları işin niteliği gereğince doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Dünya genelinde kömür madeni dışında kalan

madenlerde sayıları 1 milyon civarında olan çalışanın aldığı doz ise ortalamanın üstündedir.

Tablo 11. Çeşitli madencilik türlerinde yıllık ortalama etkin dozlar (UNSCEAR, 2000).

Maden ocağı türü	Doz (mSv/yıl)
Uranyum madenciliği	4,5
Metal Madenciliği	2,7
Kömür Madenciliği	0,7

1.9.3.4. Mağara Atmosferinde Doğal Radon Düzeyleri

Mağaralarda uzun vadeli radon konsantrasyonu çalışmalarında aylık ve mevsimlik zaman ölçeklerinde ölçüm yapılabilir. Yapılan çalışmalar genellikle mevsimsel ve 30 ile 90 gün arasında değişen, genelde pasif radon dedektörlerinin kullanıldığı, az sayıda da olsa sürekli ölçümlerin alındığı literatürden anlaşılmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda konsantrasyonların atmosferdeki konsantrasyon değerlerine göre çok yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür. Dünyada ki bazı mağaralarda radon düzeyleri, literatür özeti ve Tablo 1 de gösterilmiştir.

Mağara havasındaki radon konsantrasyonu çok sayıda faktörden etkilenir. Örneğin kayaçlardaki radyum konsantrasyonu, gözenelilik, hava ve su akımı atmosferik basınç, depremler vs. (Cigna, 2005).

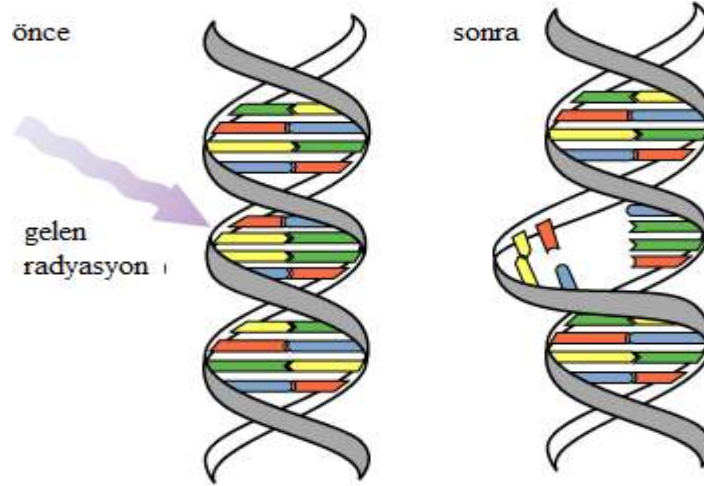
1.10. Radyasyonun Sağlık Üzerine Etkileri

Radyasyonun insan sağlığı üzerinde yaratabileceği zararlı etkiler uzun zamandır bilinmektedir. Bu etkiler radyasyon yanıkları, radyasyon hastalıkları, doğal ömür süresinin kısalması, kanser ve kalıtsal bozukluklardır. Hatta çok büyük miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalınması halinde ani ölümlere bile rastlamak mümkündür.

İnsan bedeni fazla miktarda radyasyon soğurduğu zaman istenmeyen olaylar meydana gelir. Bütün canlı hücreler sitoplazma denilen bir sıvı ile çevrilen aktif bir çekirdek ihtiva ederler ve çekirdeğin içinde bütün irsi faktörleri taşıyan kromozomlar bulunur. Canlı hücrenin davranışı, terkinde bulunan protein moleküllerindeki son derece karışık kimyasal değişmelerle idare edilir ve hassas denge ile kontrol edilir. Girici radyasyon böyle hücrelerden geçtiği zaman iyonizasyon meydana gelir (Yaramış, 1974).

İyonlaştırıcı radyasyonun bir canlıda biyolojik bir hasar yaratabilmesi için radyasyon enerjisinin hücre tarafından soğurulması gerekir. Bu soğurma sonucu hedef moleküllerde iyonlaşma ve uyarılmalar meydana gelir.

Daha sonra ortaya çıkabilecek biyolojik hasarların başlatıcı olayları olan bu iyonlaşmalar, hücrenin genetik bilgilerini taşıyan DNA zincirlerinde kırılmalara ve hücre içerisinde kimyasal toksinlerin üremesine neden olabilir. (Togay, 2002)



Şekil 12. Radyasyonun DNA zincirine verdiği zarar.

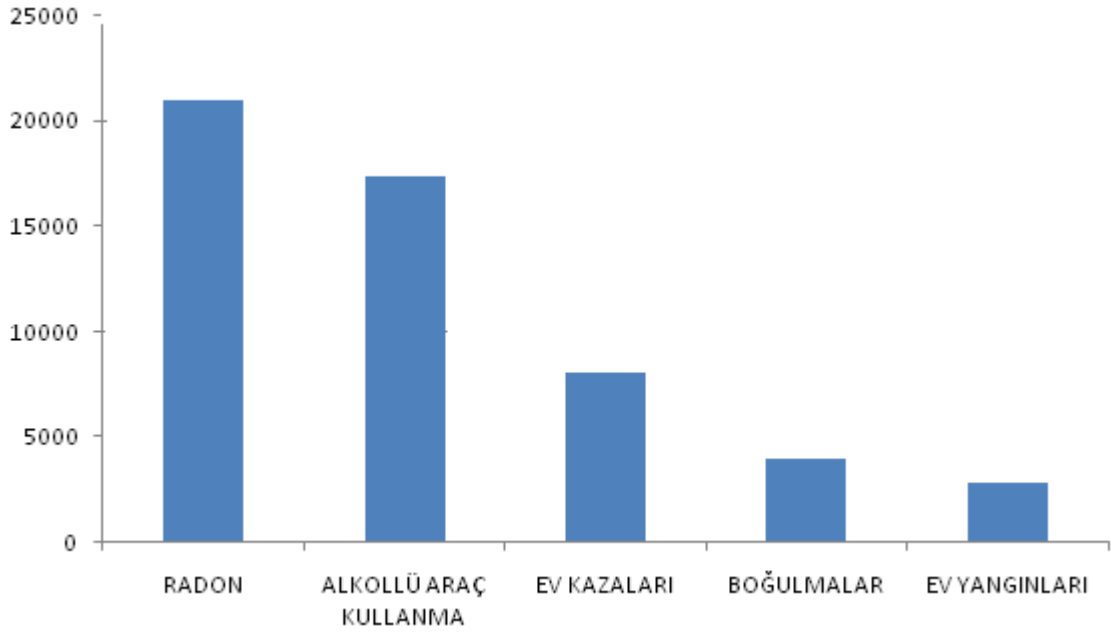
Radyasyonun vücutta oluşturabileceği hasarın derecesi (büyüklüğü) ya da hasar oluşma olasılığı (riski) genellikle aşağıdaki etkenlere bağlıdır (Atakan, 2006).

- 1- Dozun büyüklüğü: Doz arttıkça, risk de artar.
- 2- Dozun süresi: “Belirli Bir Dozun” alındığı süre uzadıkça, etkisi azalır ve bu nedenle risk de azalır.
- 3- İyonlayıcı ışının cinsi: Aynı enerji dozundaki yoğun iyonlayıcı ışınlar (Alfalar gibi), seyrek iyonlayıcı ışınlarla göre (beta, gama) daha etkin olduklarından, yoğun iyonlayıcılarla risk artar.
- 4- Hedef dokunun cinsi ya da duyarlılığı: Doku ne kadar farklılık gösteriyorsa iyonlayıcı ışınlarla karşı direnci artar.
- 5- Işınlanan canlının yaşı: Organların oluşmakta olduğu embriyo, anne karnındaki bebekler ve çocuklar iyonlayıcı ışınlarla, yetişkinlerden çok daha duyarlıdır.

1.10.1. Radon Gazının Akciğer Kanseri Üzerine Etkileri

Radon ve bozunma ürünleri akciğer ve üst solunum yolu organları için oldukça tehlikelidir. Yapılan çalışmalar radon ürünlerinin radondan daha tehlikeli olduğunu göstermektedir. Ürünlerin bir kısmı atmosfer içindeki herhangi bir parçacığa yapışır, bazıları ise serbest radyoaktif atomlar olarak kalırlar. Bozunma ürünlerini taşıyan hava solunduğu zaman serbest atomlar üst solunum yollarına tutulurlar. Bu ürünlerin yarı ömrü birkaç saatten bir güne kadar olduğundan yayınlanan tüm alfa parçacıkları enerjilerini akciğer hücrelerine aktararak hücreyi tahrip ederler (Yaşar, 1970).

Şekil 13’de Amerika Birleşik Devletlerinde 2002 yılında radona bağlı ölümlerin diğer ölümlerle karşılaştırıldığı bir grafik verilmiştir.



Şekil 13. Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Güvenlik Konseyi önlenebilir ölümlerdeki ölümler için 2002 raporu (URL-1, 2008).

İnsanın solunum yoluyla aldığı radyasyon dozunun büyük bir kısmı yapı malzemelerinden ve hava ortamında bulunan radyoaktif çekirdeklerden çıkan ^{222}Rn 'den kaynaklanır. Radon, birkaç günlük yarı ömre sahip olmakla birlikte gaz olması nedeniyle geniş bir alana dağılır. Yapı malzemelerinde doğal olarak bulunan radon vücudun içerisini alfa parçacığı ışınmasına maruz bırakır. Alfa parçacıklarının iyonlaşma yapabilme kabiliyeti yüksek olduğundan, solunum yoluyla akciğerlere alındıklarında yaydıkları ışınlarla hücrelerin yapısını bozarak akciğer kanserine yol açabilir. Radon binaların çevresindeki kayalardan, topraktan, su kaynaklarından ve doğal ortamdan vücuda alınabilir (Felmlee ve Cadigan, 1987).

1.11. Mağaraların Oluşumu

Karstlaşma kireçtaşı ve dolomit gibi kayaların asit özellikli sularla reaksiyona girerek çözümleri sonucunda meydana gelen bir olay sonucu mağaralar oluşur. Bu olay $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CaCO}_3$ sisteminde aşağıdaki etaplardan sonucunda gerçekleşir:

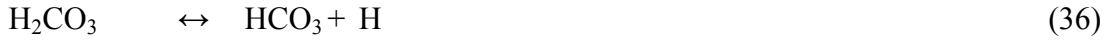
- 1- Yağış sürecinde atmosferdeki CO_2 'in suya difüzyon etmesi.



2- Fiziksel olarak çözülen CO₂'in su ile reaksiyona girerek karbonik aside dönüşmesi.



3- Meydana gelen CO₂'in suda iyonlaşması.



Eğer pH 8,5'tan büyükse;



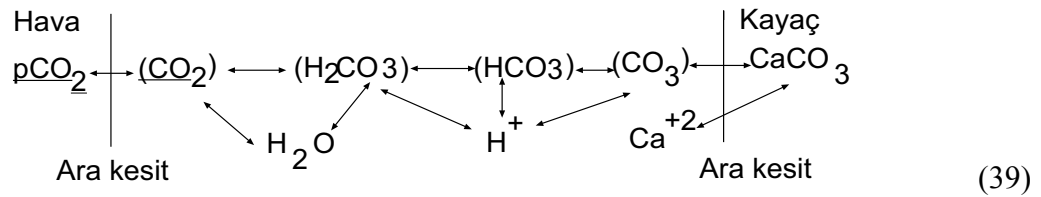
şeklinde reaksiyon oluşur ama bunun miktarı son derecede azdır.

4- Karbonik asidin kireçtaşıyla teması sonucunda kireçtaşı çözünür.



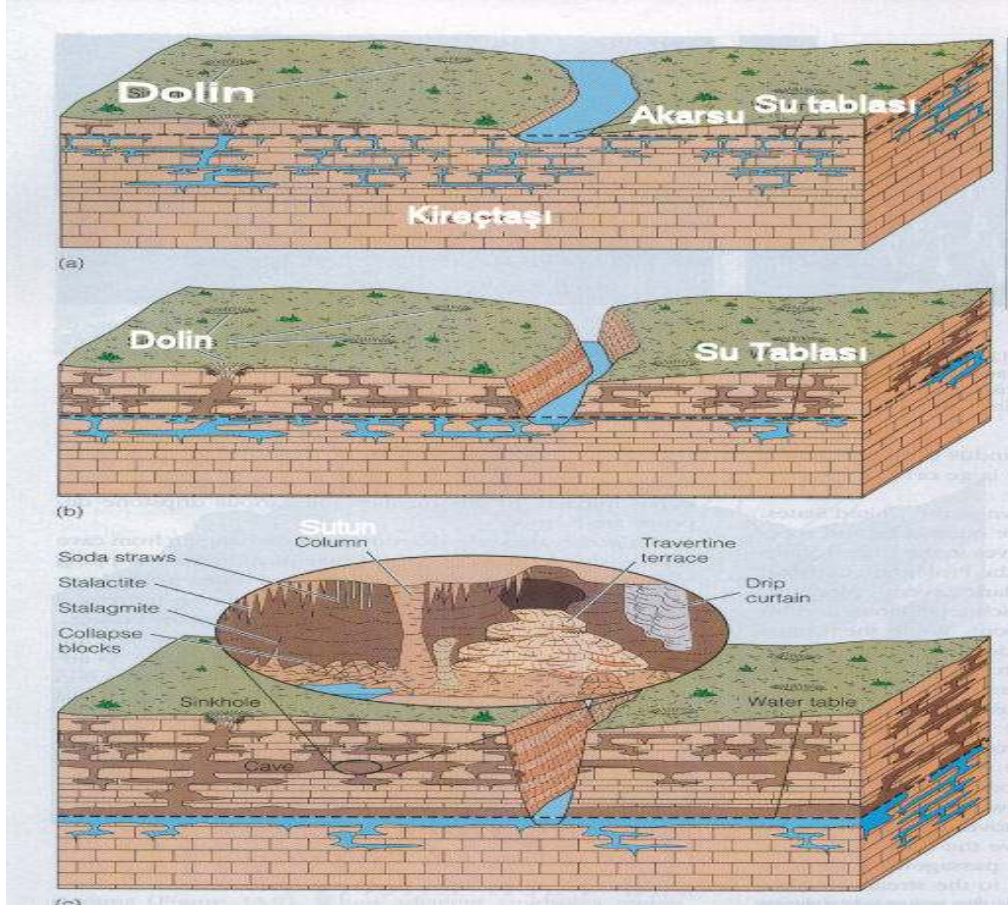
5- Üçüncü etaptaki H⁺ ile 4 etaptaki CO₃ birleşerek karbonik asit oluşturur.

Bu aşamalar birleştirilirse;



Başlangıçta olaylar laminer rejimdedir, yeraltı suyunun birbirleriyle bağlantılı süreksizlikler boyunca hareket etmesi laminer rejimdedir. Zamanla suyun hareket ettiği yolun açıklanan reaksiyonlar yardımıyla genişlemesi sonucu su akımı türbülanslı rejime dönüşür.

Yukarıda görüldüğü gibi bütün bu olaylar koşullara bağlı olarak çift yönlü oluşurlar. Reaksiyonların soldan sağa oluşması karstlaşma olayına (kireçtaşının çözünmesine) sağdan sola meydana gelmesi ise kalsiyum karbonat çökelimine yani karstik mağaralarda sarkıt dikit gibi oluşumların meydana gelmesine neden olur (Leet ve Judson, 1963)



Şekil 14. Mağara oluşumu (KTÜ Arge proje no 90.112.005.2, 1994)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Yapılan Mağralar

Çalışmamızda Doğu Karadeniz Bölgesi'nin ve hatta ülkemizin önemli mağaralarından ikisine yer verilmiştir. Bunlar Karaca ve Çal mağaralarıdır. Bölgede birçok mağara olmasına rağmen radon gazının insanlar üzerinde bırakabileceği olumsuz etkiye dikkat çekebilmek için turizme açık ve çok sayıda turist tarafından ziyaret edilen, dünya çapında tanınan Gümüşhane ili sınırlarında bulunan Karaca Mağarası ve Trabzon ili sınırları içinde bulunan Çal Mağarası seçilmiştir.

Karaca Mağarası, Gümüşhane'nin 17 kilometre kuzeybatısında Korum Vadisi'nin güneydoğu yamacı üzerinde Torul ilçesine bağlı Cebeli Köyü'nde bulunmaktadır. 2007 yılı yaz sezonunda (15 Nisan - 15 Kasım 2007) Karaca Mağarası'nı yaklaşık 51.469 kişi ziyaret etmiştir. Bunların 17.309'u öğrenci ve 34.160'ı ise sivilidir.

Çal Mağarası ise Trabzon ilinin Düzköy ilçesinin 5 km güneyinde, denizden 1050 m yüksekliktedir. 2007 yılı yaz sezonunda bu mağarayı yaklaşık 25.000 kişi ziyaret etmiştir.



Şekil 15. Karaca ve Çal Mağaraları'nın Türkiye haritasındaki yeri.

2.1.1. Karaca Mağarası

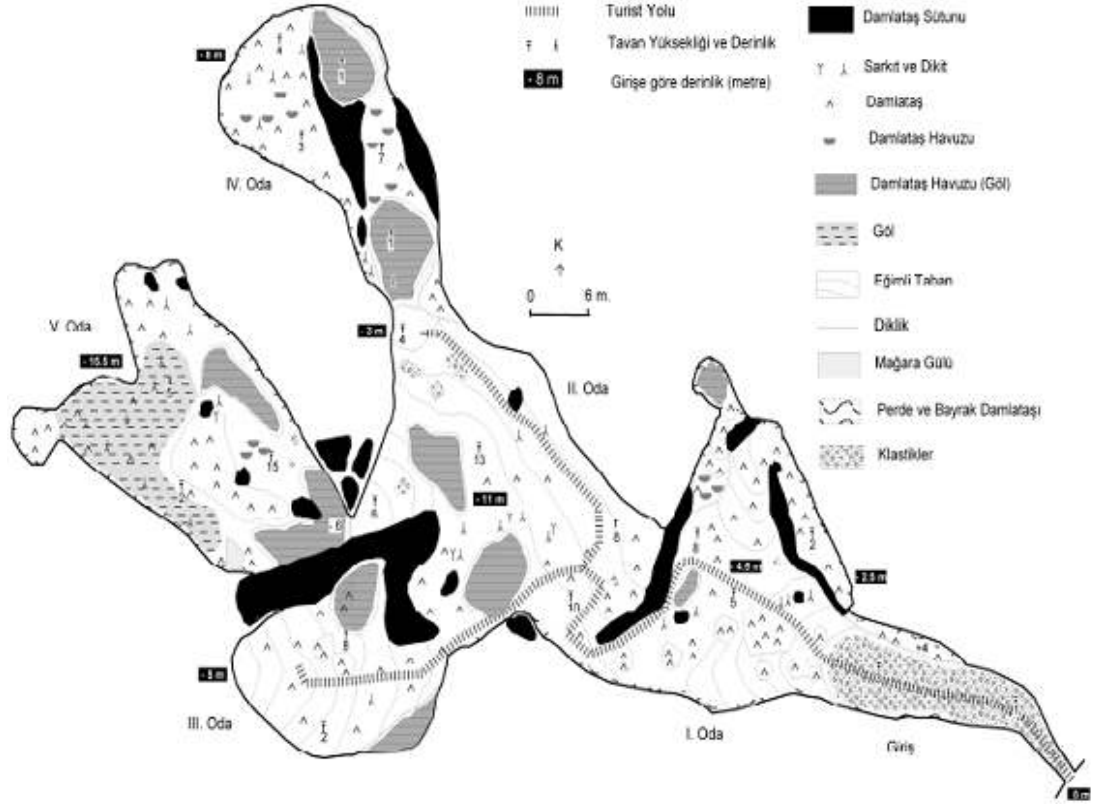
Denizden yüksekliği 1550 metre olan mağaranın yakın çevresindeki tepelerin yüksekliğinin Kayalarbaşı 1911 metre, Balaban Taşı 2042 metre olduğu düşünülürse, mağaranın oldukça yüksek bir konumda bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu yüksekliğin etkisiyle havalandırma sınırında bulunan mağaranın içindeki damlataşı oluşumu hâlâ devam etmektedir.



Şekil 16. Karaca Mağarası

Uzunluğu 105 metre olan Karaca Mağarası damlataşları, çeşitlilik ve renk bakımından çok zengin bir yapı sergiler. Bu yapılar sarkıtlar, dikitler, sütunlar, bayrak şekilleri, org desenli duvarlar, mağara çiçekleri, mağara incileri, traverten havuz ve basamaklarından oluşmaktadır. Travertenlerin renk olarak beyazdan laciverte kadar çeşitlenmesi ise damlataşı şekillerini oluşturan suyun içinde, demir ve mangenez gibi erimiş mineral maddelerin çokluğunu kanıtlamaktadır. Yatay yönde bir gelişme gösteren Karaca Mağarası'nın dört salonu da elips biçiminde şekillenmiştir. Salonlardan ilki çatlaklardan sızan suların oluşturduğu dev boyutlu duvar damlataşları ile ikiye bölünmüştür. Girişte ana salonun uzunluğu 28 metre, yükseklik yer yer değişkenlik göstermesine rağmen 10 metre dolaylarında seyretmektedir. Org biçimli damla taşlardan

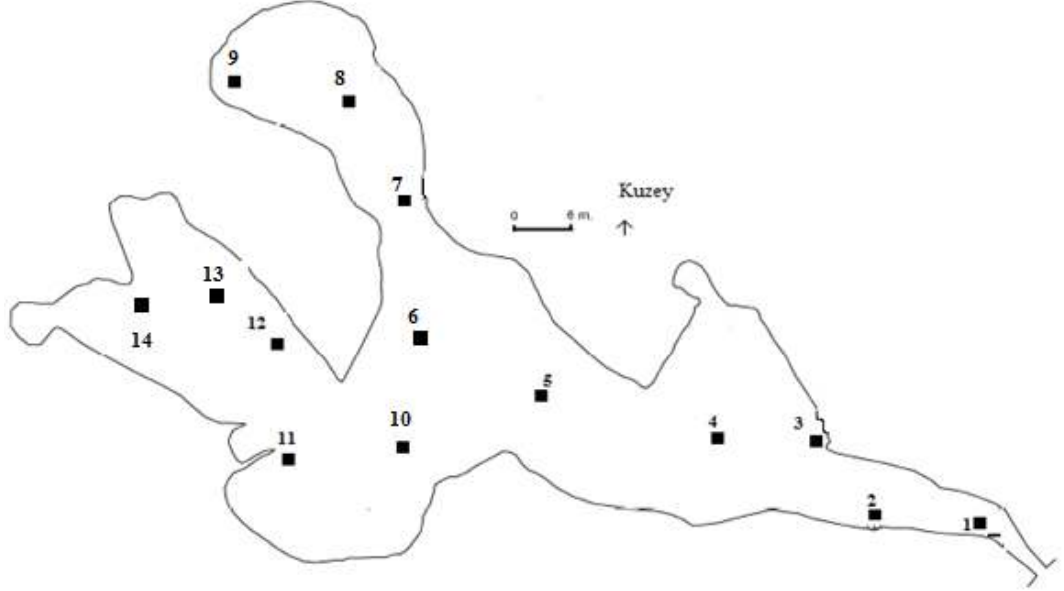
oluşan duvar, salonu öyle kapatmıştır ki, salona geçmek için küçük bir damlataş tünelinin içine girmek gerekmektedir (URL-2, 2008).



Şekil 17. Karaca Mağarası'nın jeolojik haritası (Bekaroğlu, 2006)

Karaca Mağarası'nda 09.07.2007 – 27.10.2007 tarihleri arasında yaz (1. dönem) ve 26.12.2007 – 25.03.2008 kış (2. dönem) olmak üzere, yerleştirilen pasif radon dedektörleri vasıtasıyla iki defa radon gazı konsantrasyonu ölçülmüştür. Mağaranın geometrik özellikleri de göz önüne alınarak belli uzaklıklara girişten itibaren LR-115 dedektörleri yerleştirilmiştir. Bu ölçümlerin bir yıl içerisinde hem yaz hem de kış ayları için tekrarlanmasının sebebi ortalama değerlerin net anlaşılabilmesini sağlamak ve değerlerde olabilecek muhtemel değişiklikleri tespit etmek amacına yöneliktir. Yaz (1. Dönem) ayları için dedektör bırakılan noktalara kış (2. Dönem) aylarında da dedektör bırakmaya özellikle dikkat edilmiştir. Gama spektroskopisini incelemek ve radon konsantrasyonu ile ilişki kurabilmek için mağaranın çeşitli yerlerinden toprak, yan kayaç ve sarkıt örnekleri gama spektroskopisi analizi, kimyasal analiz, XRD analizi ve yüzey morfolojisi analizi için alındı.

Mağara içerisine yerleştirilen dedektörler ve bu dedektörlere yakın noktalardan alınan numunelerin yerleri aşağıda Şekil 18’de gösterilmiştir. Tablo 12’de de bu dedektörlere karşılık gelen uzaklıklar verilmiştir.



Şekil 18. Karaca Mağarası’nda dedektör konulan ve numune alınan yerler

Tablo 12. Karaca Mağarası’nda dedektör konulan ve numune alınan yerlerin girişten uzaklığı

Dedektör no	Girişten uzaklık (m)
1	8
2	15
3	24
4	33
5	43
6	53
7	Sağ yol 76
8	Sağ yol 82
9	Sağ yol 90
10	Sol yol 65
11	Sol yol 74
12	Sol yol 79
13	Sol yol 84
14	Sol yol 90

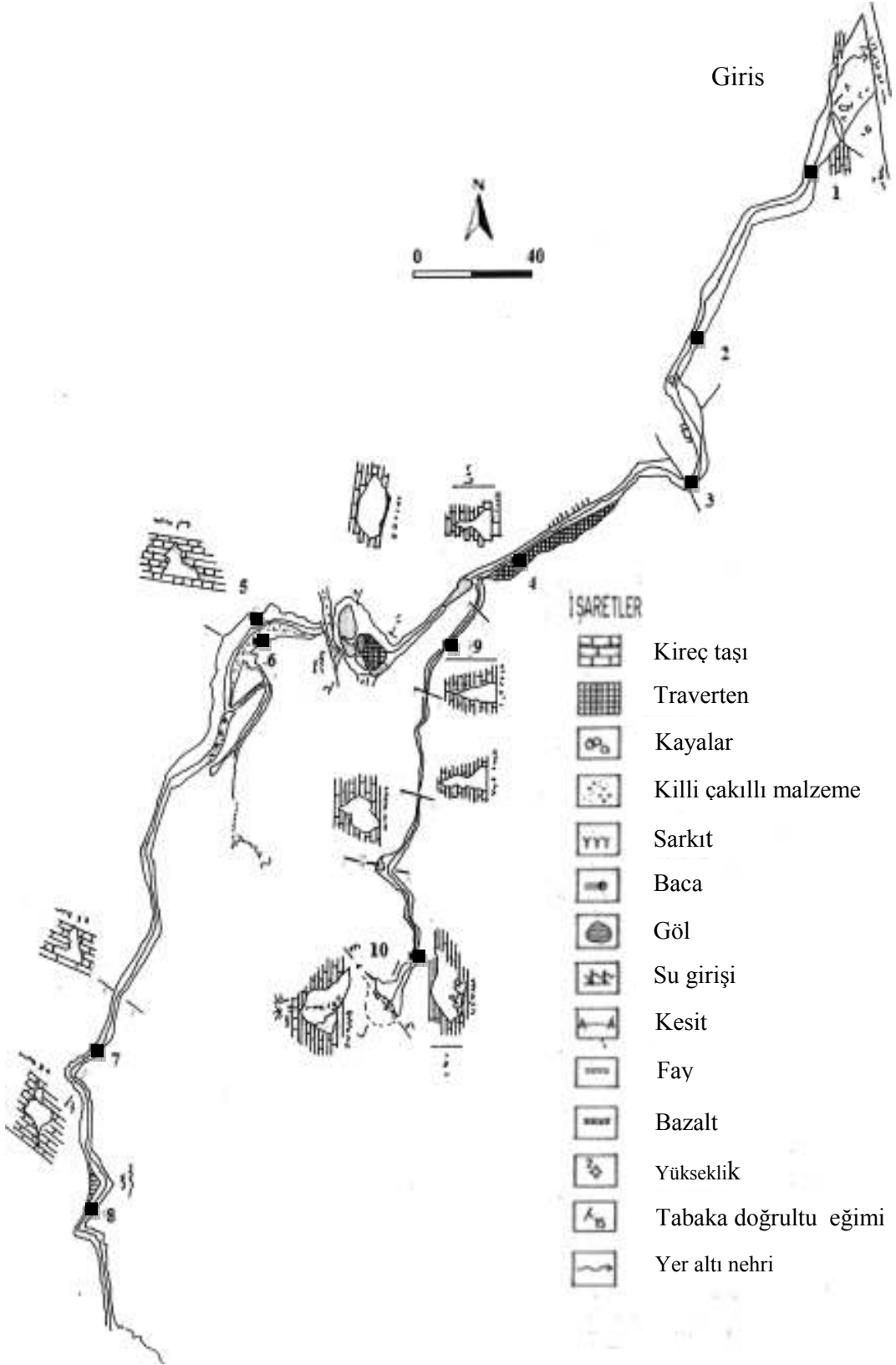
2.1.2. Çal Mağarası

Trabzon'un Düzköy ilçesinin Çalköy'ü civarında bulunur. Malm-Erken Kretase yaşlı kireçtaşları içinde yer alır. Toplam ulaşılan uzunluğu 500 metredir ve tavan yükseklikleri yer yer 40 m'ye ulaşmaktadır. Çal Mağarası bir yeraltı su kanalını takip eder. Halen içinden Çal deresi akmaktadır su derinlikleri yer yer 1 metreye varmaktadır. Mağaranın içinde dış atmosfere dolinlerle olan irtibat nedeniyle rahat bir hava hareketi vardır. Girişte kuru olan mağara atmosferinin mağaranın içerisinden akan dere nedeniyle iç kısımlarda nemi bir kat daha artmaktadır.



Şekil 19. Çal Mağarası

Çal Mağarası'nda 26.06.2007 – 15.09.2007 tarihleri arasında yaz (1.dönem) ve 27.12.2007 – 26.03.2008 tarihleri arasında kış (2. dönem) olmak üzere yerleştirilen dedektörler ile iki defa radon gazı konsantrasyonu ölçülmüştür. Karaca mağarasında yapıldığı gibi Çal Mağarası içerisine de LR-115 dedektörleri yerleştirildi ve yerleştirilen noktalara yakın yerlerden toprak, sarkıt ve yan kayaç örnekleri gama spektroskopisi analizi, kimyasal analiz, XRD analizi ve yüzey morfolojisi analizi için alındı. Mağara içerisine yerleştirilen dedektörler ve alınan örnekler aşağıda Şekil 20'de gösterilmiştir. Tablo 13'de de bu dedektörlere karşılık gelen uzaklıklar verilmiştir. Sağ kol 8. dedektörden sonra yürüme yolu bitmiş ve bu noktadan sonra dedektör yerleştirilmemiştir.



Şekil 20. Çal Mağarası'nın jeolojik haritası (Ofloğlu, 1993) ve dedektör konulan ve numune alınan yerler

Tablo 13. al Mağarası'nda dedektör konulan ve numune alınan yerlerin girişten uzaklığı

Dedektör no	Girişten uzaklık (m)
1	20
2	80
3	Sağ yol 130
4	Sağyol 190
5	Sağ yol sağ taraf 240
6	Sağ yol sol taraf 240
7	Sağyol 365
8	Sağ yol 405
9	Sol yol 240
10	Sol yol 320

2.2. Numunelerin Alınması

Mağaraların içerisine belirli mesafelerle yerleştirilen pasif radon dedektörlerinin yakınlarından alınan numuneler (toprak, yan kayaç ve sarkıt) 1-1,5 kilogram arasında alınıp temiz naylon poşetlere konulup etiketlenmiştir. Numuneler belli bir süre için kurumaya bırakılmış bu işlemde sonra ince elekte elenip un kıvamına getirilmiştir. Daha sonra özel kaplara konularak ağızları sıkıca kapatılmıştır. Radyum, toryum ve bunların bozunma ürünlerinin dengeye gelmesi için 30-40 gün bekletilmiş ve sonra HPGe dedektöründe numuneler 20.000 saniye süreyle sayılmıştır. Ayrıca numunelerin X ışını kırınım desenleri ve kimyasal analizleri için laboratuardaki özel araç ve gereçler kullanılmıştır.

2.3. Kullanılan Cihazlar

2.3.1. X Işını Difraktometresi (XRD)

Mağaralardan aldığımız numunelerin X-ışınları kırınım desenleri Rigaku D/Max-IIIC difraktometresinde CuK_α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, kV, 30 mA) ışınımı kullanılarak elde edildi. Tüm ölçümler, oda sıcaklığında, 2θ açıları 3° - 70° aralığında $3^\circ/\text{dak}$. tarama hızında ve $0,02^\circ$ 'lik aralıklarla örneklendi.



Şekil 21. Rigaku D/Max-IIIC marka X-ışını difraktometresi

2.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinin yüzey morfolojisi JEOL JEM-5510 cihazında incelendi.



Şekil 22. JEOL JEM-5510 Elektron tarama mikroskobu

2.3.3. Enerji Ayrımlı X Işını Spektrometresi (EDXRF)

Toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinin EDXRF analizi (Epsilon 5, PANalytical) cihazında yapıldı. Numuneler ilk olarak içlerindeki suyu buharlaştırmak için 105 °C'de 4 saat kurutuldu. 20 saniye boyunca 7 tonluk hidrolik basınç uygulayarak küçük tabletler haline getirildi. Bu tabletlerin çapı 40 mm ve kütleleri yaklaşık olarak 400 ± 2 mg'dır.



Şekil 23. Epsilon 5, PANalytical EDXRF cihazı

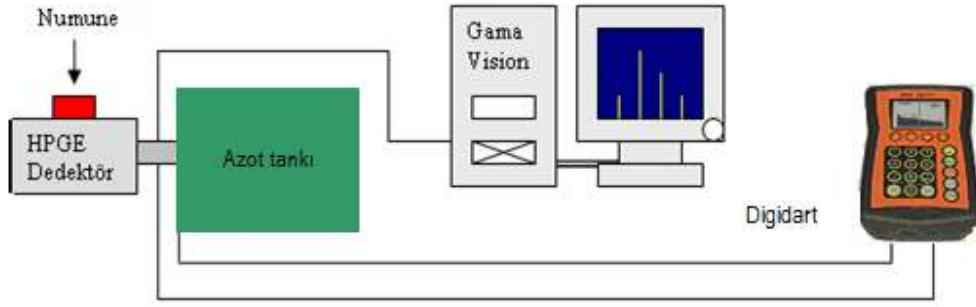
2.3.4. HPGe Dedektörü

Numunelerimizin gama spektroskopik ölçümleri için ORTEC GEM55P4 Model HPGe dedektörü kullanıldı. Bu dedektör özden yarı iletken prensibine göre çalışan yarı iletken kristalden oluşmaktadır.



Şekil 24. Ortec GEM55P4 Model HPGe Dedektörü

HPGe dedektörlerinde cm^3 'te yaklaşık olarak 10^{10} safsızlık atomu vardır. Özden yarıiletkenler için elektron ve delik oranı yaklaşık 1'dir. HPGe dedektörünün çalıştırılırken karakteristik özelliği gereğince yarı iletken kristal düşük sıcaklıklarda tutulmalıdır. Çünkü düşük sıcaklıklarda termal gürültü azalır ve bu da piklerin düzgün oluşmasına neden olur. HPGe dedektörü %55 relatif verime sahip olup 1700 voltta çalışmaktadır. Gama spektroskopisi sisteminde önyükseltici, yüksek voltaj kaynağı, analog dijital dönüştürücü (ADC) ve çok kanallı analizör (MCA) digidart adı verilen bir sistem de bulunup aynı zamanda dedektörün taşınabilir (portatif) olarak kullanılmasına imkân vermektedir. Ayrıca ölçümler Gama Vision yazılımı kullanılarak elde edilmiştir.



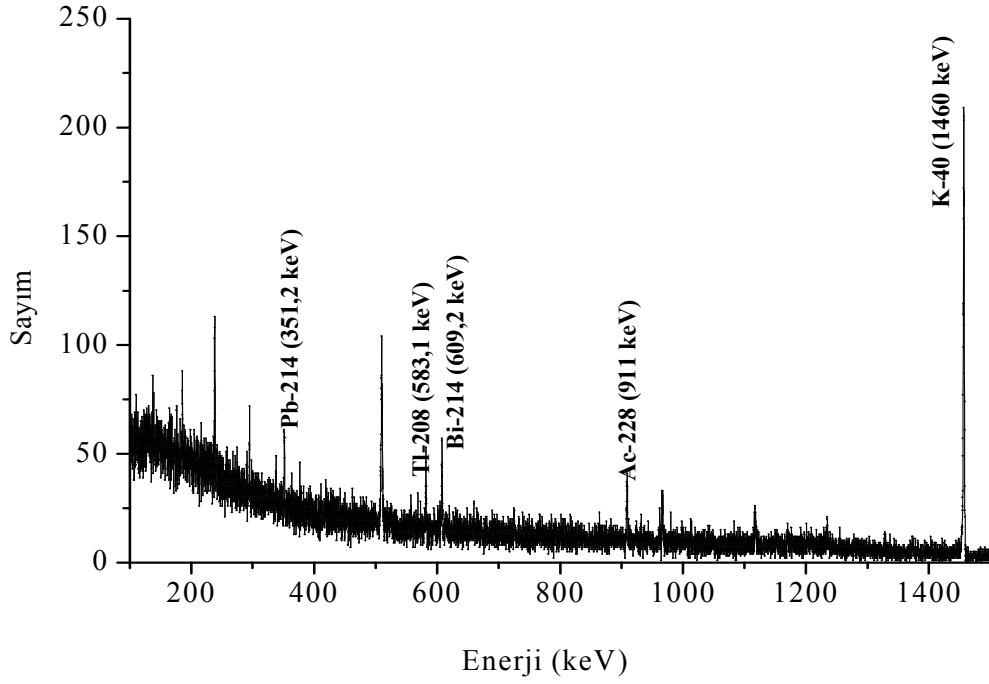
Şekil 25. HPGe dedektörünün bağlı olduğu gama spektroskopisi çalışma düzeneği

2.3.4.1. Enerji Kalibrasyonu

Enerji kalibrasyonunun yapılabilmesi için önceden enerjileri bilinen çekirdeklerden oluşmuş standart kaynaklara ihtiyaç vardır. Çünkü gama spektrumlarının analiz edilebilmeleri için, hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Enerji kalibrasyonu için enerjileri 80–1400 keV arasında değişen ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{54}Mn ve ^{60}Co 'ın piklerini içeren standart nokta kaynaklar kullanıldı. Enerji kalibrasyonunda kullanılan kaynaklar ve özellikleri Tablo 14'de verilmiştir. Örnek bir numunenin Enerji-Sayım grafiği Şekil 26'da ve Enerji-kanal grafiği Şekil 27'de verilmiştir.

Tablo 14. Enerji kalibrasyonunda kullanılan kaynaklar

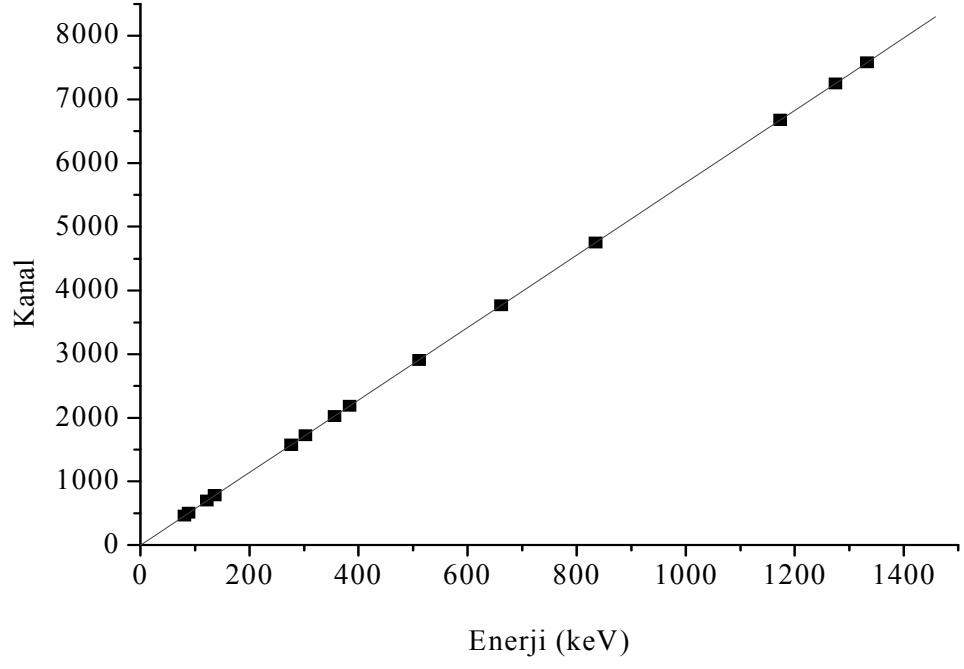
İzotoplar	Enerji (keV)	Yarı-ömür (gün)	Bolluk (%)
^{133}Ba	81	3830	33
^{109}Cd	88	464	3,72
^{57}Co	122,1	271	86
^{57}Co	136,5	271	11
^{133}Ba	276,4	3830	6,9
^{133}Ba	302,8	3830	19
^{133}Ba	383,8	3830	8,7
^{22}Na	511	946	180
^{137}Cs	661,6	11022	85
^{54}Mn	834,8	313	100
^{60}Co	1173,2	1922	100
^{22}Na	1274,5	946	100
^{60}Co	1332,5	1922	100



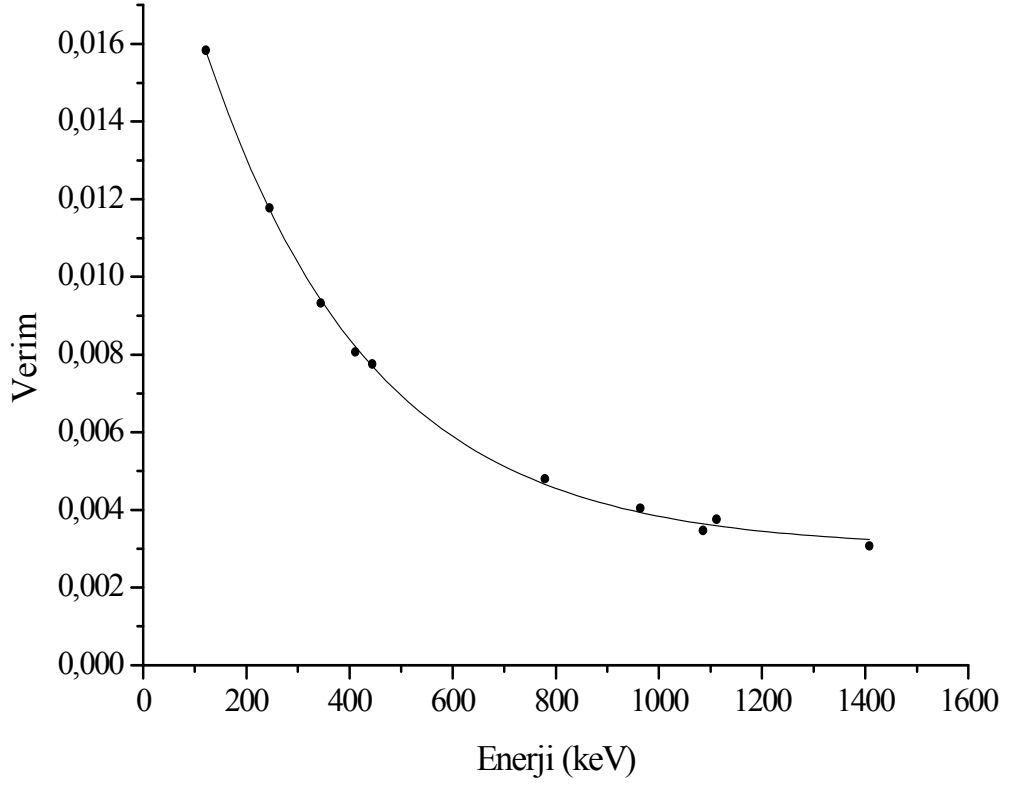
Şekil 26. Karaca sağ yol 76 metre toprak numunesinin Enerji - sayım grafiği

2.3.4.2. Verim Kalibrasyonu

Dedektör verimi, dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların sayısının, dedektöre gelen fotonların sayısına oranı ya da dedektörde sayılabilir büyüklükte puls üreten fotonların yüzdesi olarak tanımlanır. Dedektör verimliliğinin tayini için standart kaynaklara ihtiyaç vardır. Bu kaynakların bozunmalarında foton yayımlama ihtimali değerleri bilinmelidir. Dedektör verimliliğini etkileyen faktörleri kolimatör faktörü, dedektör maddesi, dedektörün hassas bölgesi, imalat faktörü ve kıyılardan kaçmalar şeklinde sıralayabiliriz. Dedektörümüzün verim kalibrasyonu için Eu-152 (Europium) radyoaktif kaynağı kullanılmıştır. Kaynağın şekli farklı olduğunda, kaynak homojen olarak foton yayımlayamayacağından bu durum dedektör verimini etkiler. Bunun için kaynağın en çok fotonları yaydığı bölgesi dedektörün ortasına gelecek şekilde yerleştirilmeli ve kaynak sabitleştirilmelidir. Enerji-verim eğrisi Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 27. Enerji – kanal grafiği



Şekil 28. Enerji – verim eğrisi

2.3.4.3. Gama Spektrumunun Analizi ve Aktivitenin Hesaplanması

Gama spektrumunun analizinde U-238 serisi için Pb-214 (351,9 keV), Bi-214 (609,3 keV) enerjilerindeki, Th-232 serisi için Tl-208 (583,2 keV), Ac-228 (911,2 keV) enerjilerindeki piklerinin alanlarının ortalaması ve K-40 için (1460,8 keV) enerjisindeki pikin alanı alınmıştır. Bu enerjilerdeki alanların seçilmesinin sebebi doğada bulunma yüzdelilerinin diğer izotoplara göre daha fazla olmasıdır.

Aktivite, aşağıdaki formül ile bulunur:

$$\text{Aktivite (Bq/kg)} = \text{Net Alan} / (\text{Sayım Süresi} \times \text{Verim} \times \text{Bozunma Olasılığı} \times \text{Kütle}) \quad (40)$$

Burada net alan, piklerin altında kalan alandan boş sayım (background) sonucu elde ettiğimiz alanın çıkarılmasıyla bulunur ve sayım süresi, dedektör verimi, numune kütlesi ve olasılıkla çarpımına bölümü aktiviteyi verir. Her numune HPGe dedektöründe 20.000 sn sayılmıştır.

2.3.5. LR-115 Pasif Radon Dedektörü

Karaca ve Çal mağaralarında radon konsantrasyonunu belirlemek için LR-115 dedektörleri kullanıldı. Bu dedektör pasif radon dedektörü olup ^{222}Rn izotopunun yayınladığı alfa parçacıklarının dedektör filmi üzerine iz bırakması esasına göre çalışmaktadır. Diğer izotopların dedektör üzerinde iz bırakmaması, kullanılan filtre ve etching tekniği ile sağlanır. Dedektör filmi nitroselülozdan yapılmıştır. Belirli bir süre radona maruz bıraktığımız LR-115 dedektörlerinin analizi Fransada Kodak dosirad laboratuvarlarında yapılmıştır. Burada ilk olarak dedektör filmi özel kazıma ünitesine takılır. Dedektörler daha sonra 20 ile 22 °C'de Ph değeri yaklaşık 3 olan HCl çözeltisinde 1 saat bekletildikten sonra, musluk suyuyla durulanır. Kazıma işlemi bittikten sonra filmler yüzeylerinin daha net görülebilmesi için özel bir vernikle fırçalanır. Yüzeydeki izler belirdikten sonra Kodak Eikonix CCD kamera ile (4096 × 4096 piksel) sayım bilgisayarında görülür hale gelir ve dağıtılış ve toplanış tarihleri de dikkate alınarak aktivitesi hesaplanır (Andru, 2002).



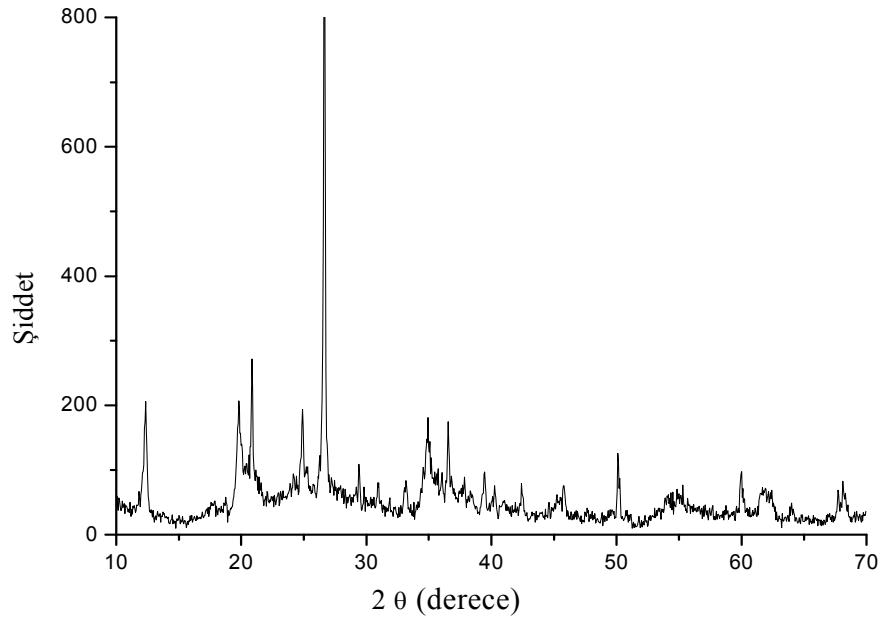
Şekil 29 LR-115 dedektörü

3. BULGULAR

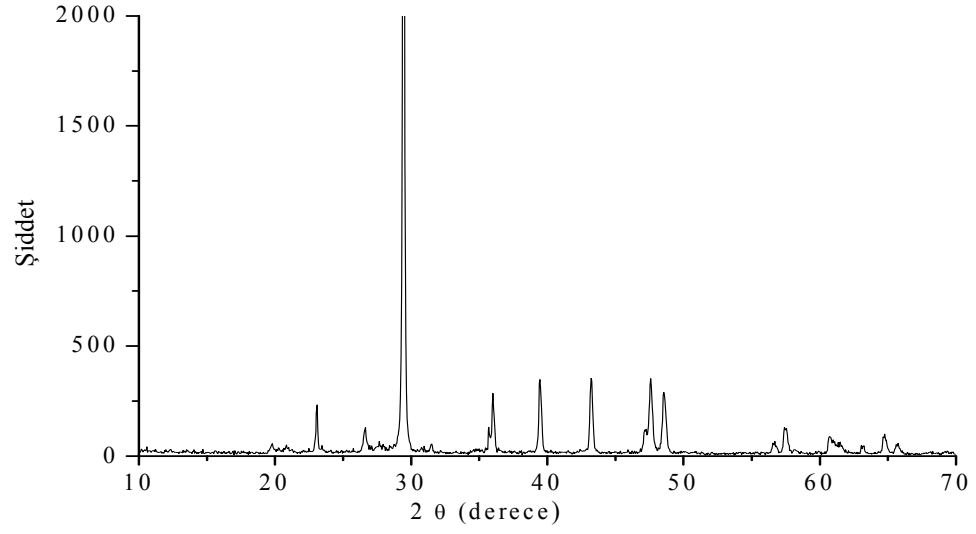
3.1. Karaca Mağarası Numunelerinin Yapısal ve Kimyasal Özellikleri

3.1.1. X Işını Difakrometresi (XRD) Analizi

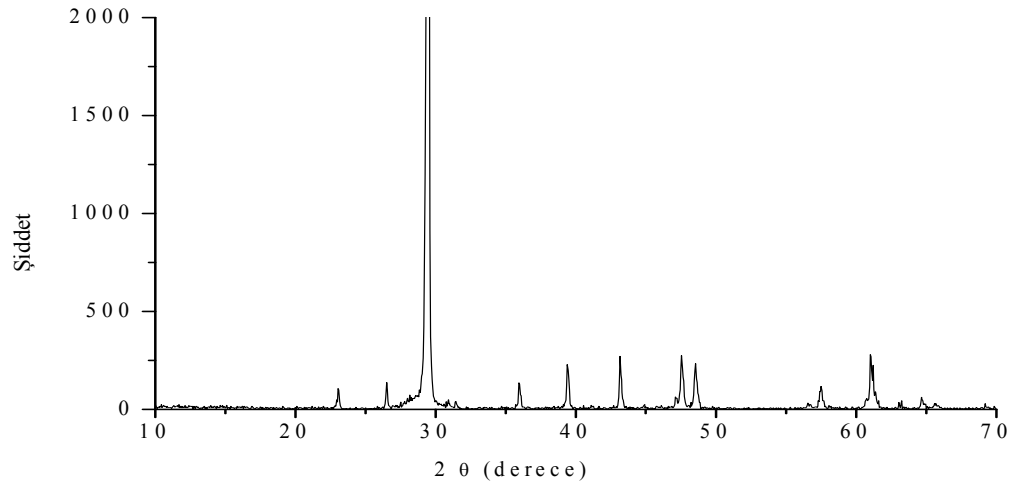
Karaca Mağarası'ndan alınan toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinin X-ışını kırınım desenleri toprak, yan kayaç ve sarkıt olarak grafikler halinde verilmiştir. Toprak numunesinin piklerinin dikit, taş ve sarkıt numunelerinin kalsit ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu durum Karaca Mağarası'nın bir kireç taşı mağarası olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 30. Karaca Mağarası girişten 80 m de uzaklıkta ki toprak numunesinin X-ışını kırınım deseninin dikit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) ile uyumu JCPDS no : 010-0446



Şekil 31. Karaca Mağarası girişten 55 m de uzaklıkta ki yan kayaç umunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit (CaCO_3) ile uyumu JCPDS no : 047 - 1743



Şekil 32. Karaca Mağarası Sarkıt numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit (CaCO_3) ile uyumu JCPDS no : 005 - 0586

3.1.2. Enerji Ayrımlı X Işını Spektrometresi (EDXRF) Analizi

Numunelerimizin kimyasal analizleri toprak, yan kayaç ve sarkıt olarak tablolar vasıtasıyla verilmiştir. Toprakta çoğunlukla yüzde olarak Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 tespit

edilirken, yan kayaç numunelerinde çoğunlukla Al_2O_3 , SiO_2 , CaO tespit edilmiştir. Sarkıt numunelerin de ise özellikle CaO oranı oldukça yüksektir.

Tablo 15. Karaca Mağarası toprak numunelerinin kimyasal analizleri

Kimyasal Bileşik	Birim	Konsantrasyon (80 m)	Konsantrasyon (sağ yol 82 m)
MgO	%	2,65	2,44
Al_2O_3	%	29,17	27,88
SiO_2	%	44,14	59,49
K_2O	%	4,08	2,16
CaO	%	0,98	1,18
TiO_2	ppm	0,62	0,67
V_2O_5	ppm	416	217
Cr_2O_3	ppm	311	184
MnO	ppm	816	885
Fe_2O_3	%	10,26	5,67
NiO	ppm	108	119
CuO	ppm	39	43
ZnO	ppm	92	101
Rb	ppm	49	66
SrO	ppm	73	103
ZrO_2	ppm	120	182
BaO	ppm	387	649
La_2O_3	ppm	50	85
CeO_2	ppm	59	105
PbO	ppm	13	17

Tablo 16. Karaca Mağarası yan kayaç numunelerinin kimyasal analizleri

Kimyasal Bileşik	Birim	Konsantrasyon (28 m)	Konsantrasyon (54 m)
MgO	%	1,62	16,02
Al ₂ O ₃	%	12,26	9,69
SiO ₂	%	17,79	12,72
K ₂ O	%	1,96	0,35
CaO	%	49,01	57,27
TiO ₂	ppm	0,16	0,11
V ₂ O ₅	ppm	117	104
Cr ₂ O ₃	ppm	119	59
MnO	ppm	586	2260
Fe ₂ O ₃	%	3,21	3,43
NiO	ppm	Belirlenemedi	Belirlenemedi
CuO	ppm	21	17
ZnO	ppm	31	109
Rb	ppm	25	9
SrO	ppm	565	343
ZrO ₂	ppm	Belirlenemedi	Belirlenemedi
BaO	ppm	91	185
La ₂ O ₃	ppm	Belirlenemedi	Belirlenemedi
CeO ₂	ppm	Belirlenemedi	Belirlenemedi
PbO	ppm	10	90

Tablo 17. Karaca Mağarası sarkıt numunesinin kimyasal analizi

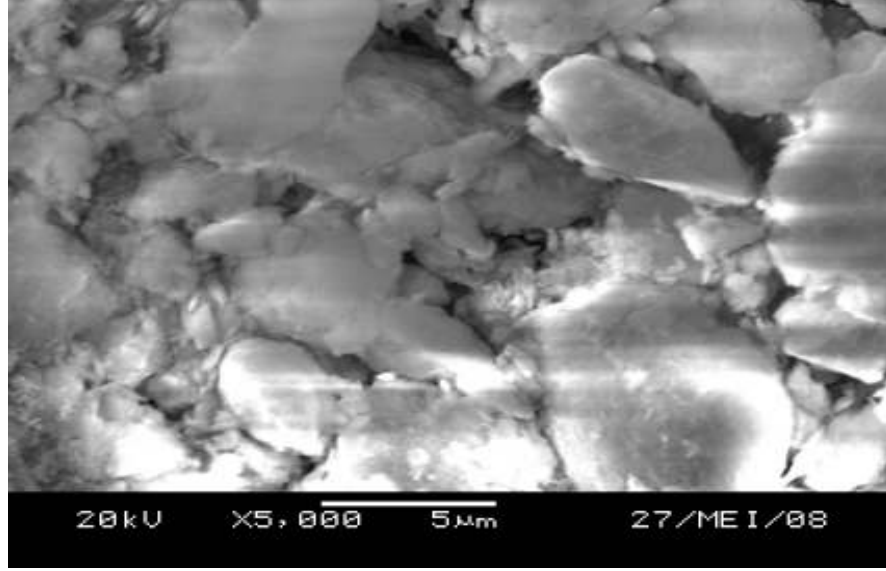
Kimyasal Bileşik	Birim	Konsantrasyon
MgO	%	1,15
Al ₂ O ₃	%	Belirlenemedi
SiO ₂	%	Belirlenemedi
K ₂ O	%	Belirlenemedi
CaO	%	67,15
TiO ₂	ppm	Belirlenemedi
V ₂ O ₅	ppm	Belirlenemedi
Cr ₂ O ₃	ppm	Belirlenemedi
MnO	ppm	117
Fe ₂ O ₃	%	0,59
NiO	ppm	Belirlenemedi
CuO	ppm	486
ZnO	ppm	237
Rb	ppm	Belirlenemedi
SrO	ppm	138
ZrO ₂	ppm	Belirlenemedi
BaO	ppm	61
La ₂ O ₃	ppm	Belirlenemedi
CeO ₂	ppm	Belirlenemedi
PbO	ppm	43

Tablo 17’de bazı elementler girişimden dolayı (EDXRF cihazında) saptanamamıştır.

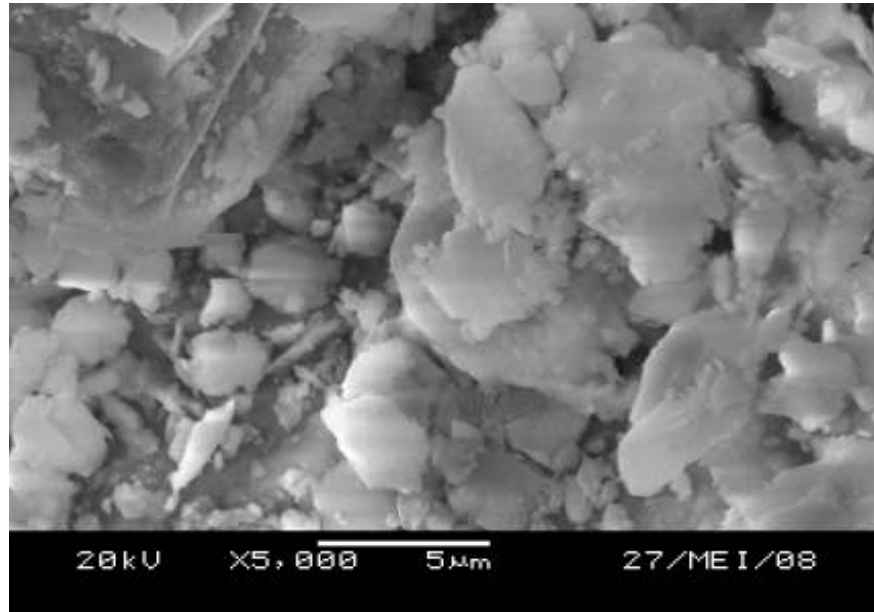
3.1.3. Yüzey Morfolojisi (SEM) Analizi

Yüzey morfolojisi incelendiğinde toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinde parçacıkların tahmini boyutunun 10 µm’nin altında olduğu düşünülmektedir. Mağara atmosferindeki radon konsantrasyonu çok sayıda faktörden etkilenir. Örneğin kayaçlardaki radyum konsantrasyonu, gözenelilik, hava ve su akımı atmosferik basınç, depremler vs. (Cigna, 2005). Her üç numunenin yüzey yapısı incelendiğinde, çok gözenekli bir yapı görünmekte olup, mağaraya yer kabuğundan sızan radon gazının ana kaynak olarak kırık

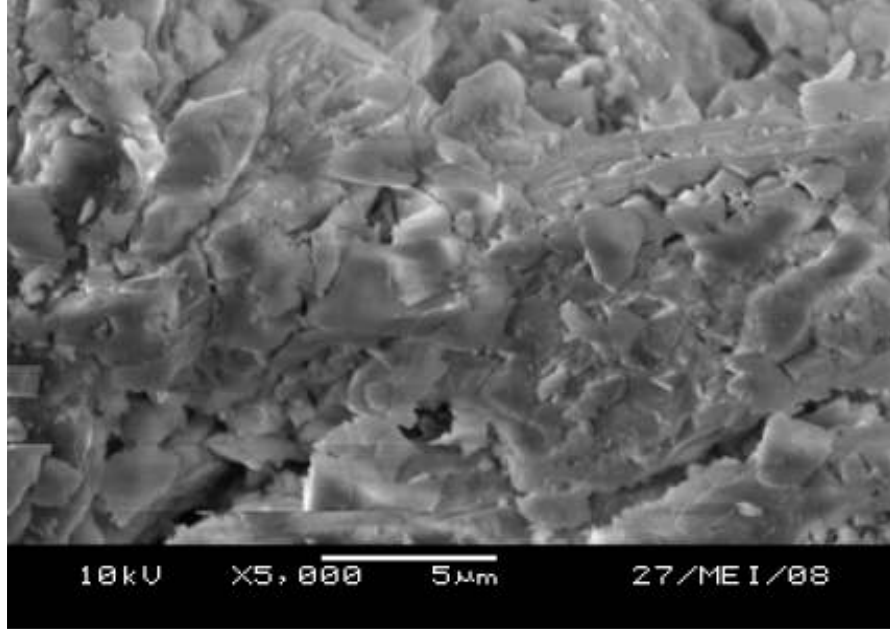
hatlarına bağlı olduğunu ve böylece mağara tabanını kaplayan malzemenin gözenekli olması ile mağara içinde kolayca dağıldığı saptanmıştır.



Şekil 33. Karaca Mağarası 53. metre toprak numunesinin SEM fotoğrafı



Şekil 34. Karaca Mağarası 53. metre yan kayaç numunesinin SEM fotoğrafı



Şekil 35. Karaca Mağarası sarkıt numunesinin SEM fotoğrafı

3.2. Karaca Mağarası Radyoaktif Özellikler

3.2.1. Gama Spektroskopik Analiz Sonuçları

Gama spektroskopisi sisteminde HPGe dedektörünün kullanılmasıyla toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinde ölçülen doğal radyoaktivite seviyeleri aşağıdaki tablolarda ayrı ayrı verilmektedir. Sonuçlar Bq/kg cinsinden verilmiştir. Ölçümlerimiz neticesinde Chernobyl sonrası bölgemize ulaşan yapay radyoaktif elementlerden herhangi bir ürüne rastlanmamıştır. Bu ölçümlerde özellikle mağara içindeki radon konsantrasyonu ile bağlantı kurmak açısından ^{238}U serisinin bozunma ürünleri gözlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 18. Karaca Mağarası toprak numunelerinin gama aktiviteleri

Toprak numunesi (m)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
8	20 ± 2	29 ± 3	504 ± 11
15	27 ± 3	30 ± 4	296 ± 7
24	68 ± 4	23 ± 3	279 ± 7
33	57 ± 4	15 ± 2	298 ± 7
43	67 ± 4	29 ± 3	344 ± 8
53	37 ± 3	11 ± 2	98 ± 2
Sağ yol 76	84 ± 5	25 ± 3	136 ± 3
Sağ yol 82	45 ± 4	29 ± 3	337 ± 8
Sağ yol 90	25 ± 3	24 ± 3	429 ± 10
Sol yol 65	34 ± 3	3 ± 1	111 ± 3
Sol yol 74	23 ± 2	15 ± 2	66 ± 2
Sol yol 79	49 ± 4	13 ± 2	231 ± 5
Sol yol 84	24 ± 2	9 ± 1	57 ± 2
Sol yol 90	42 ± 4	17 ± 2	488 ± 11
Ortalama	43 ± 20	19 ± 9	262 ± 152

Tablo 19. Karaca Mağarası yan kayaç numunesinin gama spektroskopisinin aktivitesi

Taş numunesi (m)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
28	5 ± 1	17 ± 3	183 ± 12
54	12 ± 2	3 ± 1	31 ± 3

Tablo 20. Karaca Mağarası sarkıt numunesinin gama spektroskopisinin aktivitesi

Sarkıt numunesi	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
	6 ± 1	9 ± 1	98 ± 3

3.2.2. Karaca Mağarası Radon Konsantrasyonu

3.2.2.1. Karaca Mağarası Yaz Sezonu İçin Radon Konsantrasyonu

Karaca mağarasında yaz dönemindeki radon konsantrasyonunu belirlemek için 09.07.2007 – 27.10.2007 tarihleri arasında dedektörler mağaraya yerleştirildi. Karaca mağarasındaki yaz sezonu radon konsantrasyonu 2, 6 ve 8 numaralı dedektörler yerlerinde bulunamadığı için, bu 3 dedektör hariç Tablo 21’de verilmiştir.

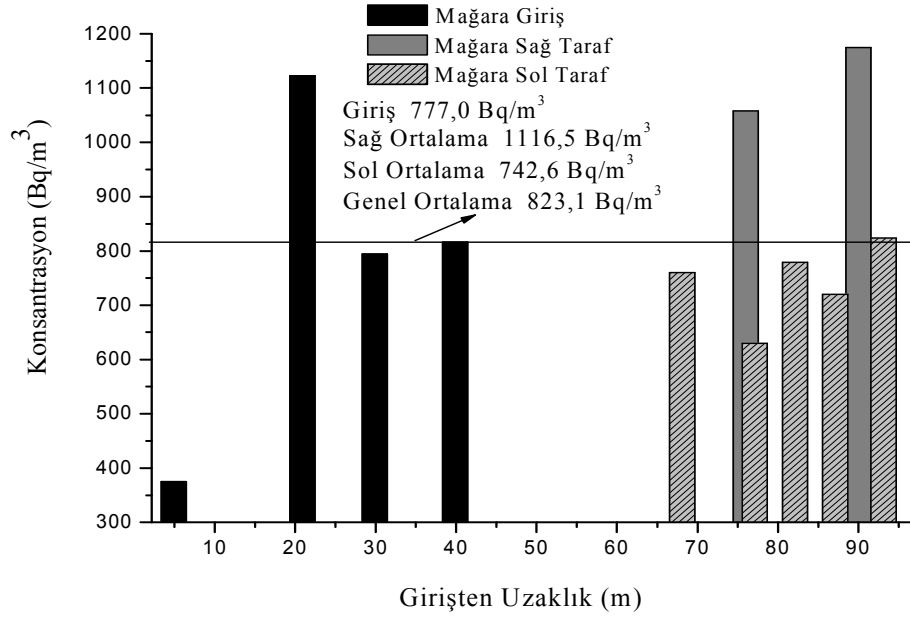
Karaca Mağarası girişten itibaren 53. metreye kadar (6 numaralı dedektöre kadar) tek bir yol üzerinde uzanmakta ve bundan sonra iki kola ayrılmaktadır.

Bu yüzden mağara 53. metreden itibaren iki bölüm, giriş ile birlikte 3 bölüm halinde incelendi. Mağaranın girişinde ortalama 777,0 Bq/m³, sağ bölümünde ki kolda ortalama 1116,5 Bq/m³, sol bölümündeki kolda 742,6 Bq/m³ ve mağara genelindeki genel radon gazı konsantrasyonu ortalaması 823,1 Bq/m³ olarak tespit edilmiştir.

Tablo 21. Karaca Mağarası yaz dönemi radon konsantrasyonu

Dedektör no	Konsantrasyon (Bq/m ³)
1	375
2	-
3	1123
4	794
5	816
6	-
7	1058
8	-
9	1175
10	760
11	630
12	779
13	720
14	824
Ortalama	823

Mağaranın girişinden uzaklaştıkça radon konsantrasyonu Şekil 36'daki gibi değişmektedir.



Şekil 36. Karaca Mağarası yaz sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyon değişimi

3.2.2.2. Karaca Mağarası Kış Sezonu İçin Radon Konsantrasyonu

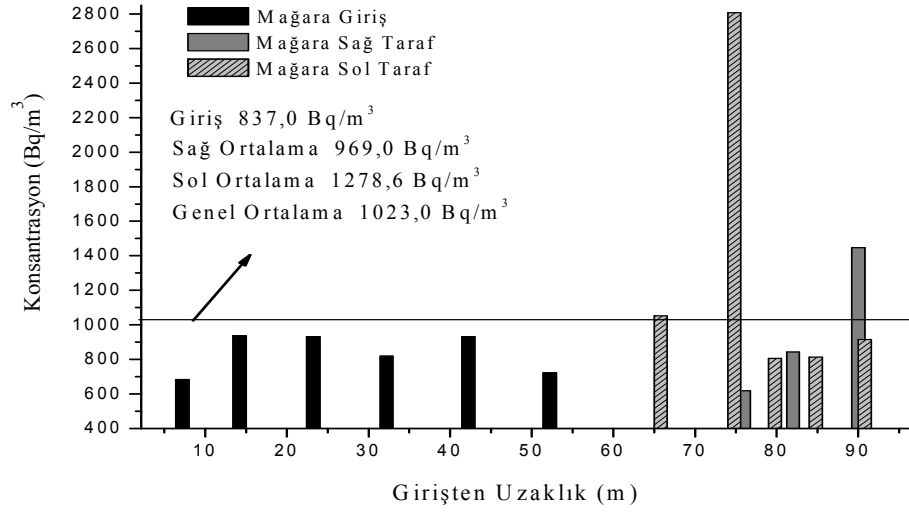
Kış dönemindeki radon konsantrasyonunun belirlenmesi için 26.12.2007 – 25.03.2008 tarihleri arasında dedektörler Karaca Mağarasına yerleştirilmiştir. Karaca Mağarası'ndaki kış sezonu radon konsantrasyonu Tablo 22'de verilmiştir. Bu dönemde yaz dönemindekinden farklı olarak mağara turizme kapalı olduğu için kullanılan tüm dedektörlerden sonuç alınmıştır.

Karaca Mağarası'ndaki kış sezonu radon gazı konsantrasyonunu yaz sezonundaki gibi giriş, sağ bölüm ve sol bölüm olmak üzere 3 bölüm olarak incelendi. Giriş bölümünde $837,0 \text{ Bq/m}^3$, Sağ bölümdeki kolda $969,0 \text{ Bq/m}^3$, sol bölümde ki kolda $1278,6 \text{ Bq/m}^3$ ve genel ortalama 1023 Bq/m^3 olarak radon konsantrasyonları tespit edildi.

Tablo 22. Karaca Mağarası kış dönemi radon konsantrasyonu

Dedektör no	Konsantrasyon (Bq/m ³)
1	683
2	936
3	932
4	817
5	932
6	722
7	617
8	842
9	1448
10	1052
11	2809
12	805
13	813
14	914
Ortalama	1023

Dedektörlerimizden elde ettiğimiz sonuçlara göre mağarada ki radon gazı konsantrasyonunun girişten itibaren uzaklıkla değişimi Şekil 37'deki gibidir.



Şekil 37. Karaca Mağarası kış sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyonu

3.2.2.3. Karaca Mağarası Yıllık Ortalama Radon Konsantrasyonu

Karaca Mağarası'nda yaz döneminde dağıtılan 14 dedektörden 2, 6 ve 8 numaralı dedektörler yerlerinde bulunamadığı için ortalama konsantrasyon değerine bu 3 dedektör dahil edilmemiştir.

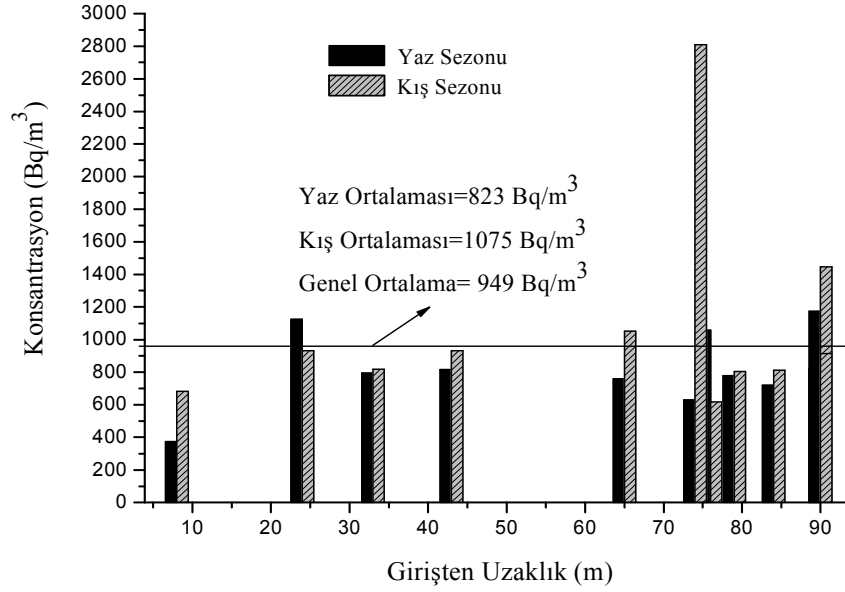
Bir yıl içerisinde atmosferik değişimlerin radon gazı konsantrasyonunu değiştirmesi ve her mağaranın kendine özgü durumuna bağlı olarak farklı mevsimlerde farklı sonuçlar alınabilir. Amerika'da Mammoth Ulusal Park Mağarası'nda en yüksek radon konsantrasyonu sonbaharda gözükürken en düşük konsantrasyon seviyesi yazın tespit edilmiştir. Japonya'da Gyokusen-do mağarasında en yüksek radon konsantrasyonu yaz'ın tespit edilmiş, en düşük konsantrasyon ise kış mevsiminde tespit edilmiştir. Mağaralar atmosferik etkilerden iyi izole olmuşsa yani kötü bir hava sirkülasyonu varsa radon konsantrasyonu sabit ve kalıcıdır. Mevsimsel olarak da mağara atmosferindeki radon konsantrasyonu için en önemli olan unsur hava sirkülasyonudur (Przylibski, 1999).

Karaca Mağarası'nda, kış dönemindeki ölçümlerde 3 ve 7 numaralı dedektörler hariç, diğer tüm dedektörlerin ölçtüğü konsantrasyonlarda, yaz dönemine göre belli bir artış gözlenmektedir. Bu artışın nedeni, mağaranın kışın ziyaretçilere kapalı olmasından dolayı sürekli kapısının kapalı kalması ve radon gazının içerde birikmesinden kaynaklanmış olabilir.

Tablo 23. Karaca Mağarası yaz ve kış dönemi radon konsantrasyonları dikkate alınarak hesaplanan yıllık radon konsantrasyonu ortalaması

Dedektör no	Yaz dönemi (Bq/m ³)	Kış dönemi (Bq/m ³)	Yıllık (Bq/m ³)
1	375	683	529
2	-	936	-
3	1123	932	1028
4	794	817	806
5	816	932	874
6	-	722	-
7	1058	617	838
8	-	842	-
9	1175	1448	1312
10	760	1052	906
11	630	2809	1719
12	779	805	792
13	720	813	767
14	824	914	869
Ortalama			949

Karaca Mağarası'ndaki yaz ve kış dönemi radon gazı konsantrasyonunun değişimi, Şekil 38'de girişten itibaren uzaklığa göre verilmiştir. Yaz döneminde 2, 6 ve 8 numaralı dedektörler yerlerinde bulunamadığı için, kış aylarında bunlara denk gelen dedektörlerden sonuç almamıza rağmen, kış dönemi verilerinde istatistiğe dâhil edilmemiştir.



Şekil 38. Karaca Mağarası yaz-kış sezonu ortak mesafedeki radon konsantrasyonu değişimi

3.3. Karaca Mağarasında Ra ve Rn Arasındaki İlişki

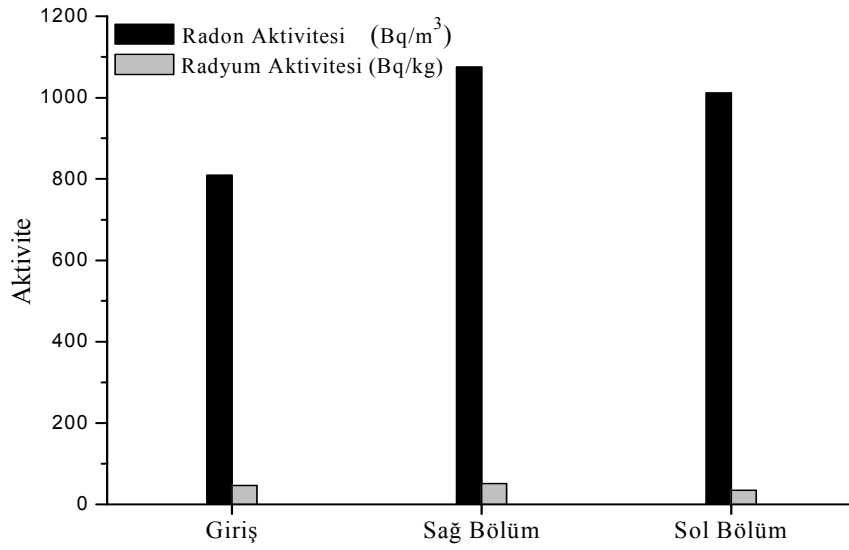
Radon gazı, ^{238}U 'in bozunum ürünü olan ^{226}Ra 'nın, alfa ışınması sonucu oluşan radyoaktif bir gazdır. Mağaradaki radon gazının mevcudiyeti, ^{226}Ra 'dan kaynaklanmaktadır. Radon gazının radyum ile ilişkisini incelemek için mağarayı 3 bölüme ayırmak daha uygun olur. Mağaranın 2 ayrı kola ayrıldığı ve 2 bölüm olduğu düşünülürse, mağara girişi ile birlikte 3 kısımdan oluşur. 53. metreye kadar giriş, buradan sonra sağ ve sol 90. metrelere kadar sağ ve sol bölüm olarak mağarayı ayırabiliriz. Bu bölümlerdeki radon konsantrasyonu ve radyum aktivitesi Tablo 24'de gösterilmiştir.

Tablo24'ü incelediğimizde girişte yıllık radon gazı konsantrasyonu 809 Bq/m^3 iken radyum aktivitesi 46 Bq/kg , sağ bölümde radon konsantrasyonu $1074,5 \text{ Bq/m}^3$ iken radyum aktivitesi 51 Bq/kg 'dir. Sol bölümde ise $1010,6 \text{ Bq/m}^3$ olan radon konsantrasyonuna karşılık gelen 34 Bq/kg radyum aktivitesi tespit edilmiştir. Mağaranın sol bölümünde radon konsantrasyonuna göre girişten daha düşük radyum aktivitesi tespit edilmiştir. Karaca Mağarası'nda girişten belli bir mesafe ilerledikten sonra, bir merdivenle aşağı inilir, mağaranın sol bölümü de bu iniş kısmından sonra başlar, radon gazının havadan yaklaşık 8 kat daha ağır olduğunu göz önüne alırsak, sol bölümün girişe göre daha aşağıda

kalmasından dolayı radon gazı bu bölümde daha fazla birikmiş ve girişteki radyum aktivitesine göre, fazla beklediğimiz radon konsantrasyonunu geçmiş olabilir.

Tablo 24. Karaca Mağarası radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması

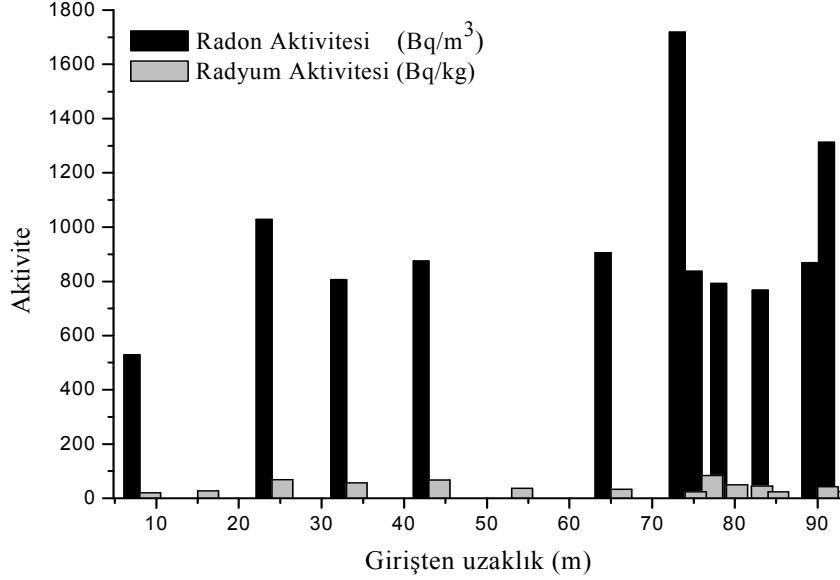
Karaca Mağarası	Yıllık ortalama radon (Rn) konsantrasyonu (Bq/m ³)	Ortalama radyum (Ra) aktivitesi (Bq/kg)
Giriş	809	46
Sağ bölüm	1074,5	51
Sol bölüm	1010,6	34



Şekil 39. Karaca Mağarası'nın 3 farklı bölgesindeki radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması

Karaca Mağarası'na, belirli mesafelerle yerleştirilen 14 dedektöre karşılık gelen toprak numunelerinin radyum aktivitesi ile her dedektörün okuduğu radon konsantrasyonu arasında yapılan pair sample testinde korelasyon katsayısı, negatif yönde 0,225 olup önem değeri %5 in çok üstünde olduğu için, Karaca Mağarası'nda radon ve radyum arasında girişten itibaren belirli mesafelerde anlamlı bir ilişki bulunmamaktadır. Karaca

Mağarası'nda radyum – radon konsantrasyonlarının mesafelere göre karşılaştırması Şekil 40 da gösterilmiştir.



Şekil 40. Karaca Mağarası'nda girişten uzaklığa göre radon-radyum aktivitesinin karşılaştırılması

3.4. Karaca Mağarası İçin Doz Hesabı

3.4.1. Gama Spektrumundan Alınan Doz

Mağara içerisindeki çalışanlar ve mağara ziyaretçilerin, gama radyasyonundan dolayı maruz kaldıkları doz miktarları, havadan alınan doz ve yıllık alınan doz olarak hesaplamak için, UNSCEAR'ın önerdiği aşağıdaki formüller kullanıldı. Eğer topraktaki radyonüklitlerin aktivitesi biliniyorsa, yerden 1 metre yukarıdaki havada soğurulmuş doz hızı hesaplanabilmektedir. Karasal gama radyasyonunun havadaki soğurulmuş doza katkısını bulmak için havadan alınan soğurulan doz miktarı,

$$D \text{ (nGy.h}^{-1}\text{)} = 0,462 \times C_{Ra} + 0,604 \times C_{Th} + 0,0417 \times C_K \quad (41)$$

ve yıllık alınan etkin doz miktarı,

$$\text{Yıllık Etkin Doz Miktarı (}\mu\text{Sv)} = D \times 720 \times 0,7 \times 0,2 / 1000 \quad (42)$$

formüllerinden hesaplanır.

Yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanırken UNSCEAR (1982) raporunda, çevresel gama ışınlamaları için doz dönüşüm faktörü 0.7 Sv/Gy, ev dışında geçirilen zaman için (günün % 20'si) 0.2 faktörünün alınması önerilmektedir. Yıllık alınan doz miktarı UNSCEAR'ın belirttiği formülün mağaraya göre düzenlenmesiyle hesaplandı (UNSCEAR, 2000).

Karaca Mağarası'nda, çalışan bir kişinin yıllık 720 saat, mağarada kaldığı düşünülerek, mağarada gama dozlarından aldığı soğurulan ve yıllık etkin doz miktarları aşağıda Tablo 25'de gösterilmiştir.

Tablo 25. Karaca Mağarası'nda girişten uzaklığa göre çalışan bir kişinin soğurulan doz ve yıllık aldığı etkin doz miktarları

Numune yerleri (m)	Soğurulan Doz, D (nGy.h ⁻¹)	Yıllık Etkin doz, E (μSv/yıl)
8	47,8	4,8
15	42,9	4,3
24	56,9	5,7
33	47,8	4,8
43	62,8	6,3
53	27,8	2,8
Sağ yol 76	59,6	6,0
Sağ yol 82	52,4	5,3
Sağ yol 90	43,9	4,4
Sol yol 65	22,1	2,2
Sol yol 74	22,4	2,3
Sol yol 79	40,1	4,0
Sol yol 84	18,9	1,9
Sol yol 90	50,0	5,0
Ortalama	42,3	4,3

⁴⁰K, ²³⁸U ve ²³²Th'dan dolayı dünya üzerinde insanların, maruz kaldıkları yıllık doz oranı 70 μSv/yıl'dır (UNSCEAR, 2000). Karaca mağarası'nda ise yıllık alınan doz miktarı bu değerin çok altındadır.

3.4.2. Radon Konsantrasyonundan Alınan Doz

Karaca Mağarası'nda girişten uzaklığa göre mağarada yaz ayları için gelen ziyaretçilere rehberlik yapmak amacıyla çalışanların ve ziyaretçilerin radon ve ürünlerinden dolayı maruz kaldıkları radyasyon dozları aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$E = C_{(Rn)} \cdot F \cdot t \cdot d \cdot u \quad (43)$$

Bu formülde E yıllık alınan etkin doz olup birimi mSv/yıl'dır. $C_{(Rn)}$ radon konsantrasyonu, F radon ve onun bozunma ürünleri arasındaki denge faktörü ve t (saat) mağarada yıllık bulunma süresidir. d doz çevirme faktörü olup değeri, 4 mSv/(mj.saate.m³)'tür. u ise birim faktördür ve değeri 5,6.10⁻⁶ (mj/m³)/(Bq/m³)'tür (UNSCEAR, 2000; Aytekin vd., 2005, Baldık, 2005). Hesaplarda kullanılan F denge faktörü kireçtaşı mağaralarda efektif dozu temsil eder (Baldık, 2005; Lario vd., 2006). Kireç taşı mağaralarda F denge faktörü 0,5'tir (Gillmore vd., 2002; Aytekin vd., 2005; Lario vd., 2005).

Karaca Mağarası'nda çalışan kişilerin belirttiği bilgiler doğrultusunda ortalama olarak günde mağara içerisinde 6 saat çalıştığı ve bir sene içerisinde 4 ay mağarada bulunduğu varsayılarak yıl içerisinde aldıkları etkin doz Tablo 26'da verilmiştir. 2, 6 ve 8 numaralı dedektörler yerlerinde bulunamadığı için bu dedektörler ortalama doz miktarına katılmamıştır.

Tablo 26. Karaca Mağarası'nda yaz döneminde girişten uzaklığa göre çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (mSv/yıl)
1	375	1,06
3	1123	3,17
4	794	2,24
5	816	2,30
7	1058	2,99
9	1175	3,32
10	760	2,15
11	630	1,78
12	779	2,20
13	720	2,03
14	824	2,33
Ortalama	823	2,32

Karaca Mağarası'nın 2 ayrı kola ayrıldığı ve 2 bölümden oluştuğu düşünülürse mağarayı giriş ile birlikte 3 kısımda incelemek daha uygun olur. Bu durumda ziyaretçilere rehberlik etmek için çalışan bir kişinin 2 bölümde de eşit süre kalacağını (günlük 2,5 saat) varsayarsak ki 2 bölümde hemen hemen aynı boyutta sayılır ve giriş kısmında da 1 saat kalacağını düşünürsek bu kişilerin alacağı yıllık doz Tablo 27'de tespit edilmiştir.

Tablo 27. Karaca Mağarası'nda yaz döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz

Karaca Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süresi (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (mSv/yıl)
Giriş	120	777,0	0,37
Sağ bölüm	300	1116,5	1,31
Sol bölüm	300	742,6	0,87

Karaca Mağarası'na gelen bir ziyaretçinin, ortalama olarak içeride yarım saat kaldığı varsayılarak ve yılda sadece bir gün geldiği düşünülerek, mağara genelinde radon gazından dolayı maruz kaldığı yıllık etkin doz, Tablo 28'de verilmiştir. Bu sonuçlar genelde mikrosievert mertebesindedir.

Tablo 28. Karaca Mağarası yaz döneminde girişten uzaklığa göre bir ziyaretçinin aldığı tahmini yıllık etkin doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (μSv/yıl)
1	375	0,74
3	1123	2,20
4	794	1,55
5	816	1,60
7	1058	2,07
9	1175	2,30
10	760	1,49
11	630	1,23
12	779	1,53
13	720	1,41
14	824	1,62
Ortalama	823	1,61

Mağarayı, mağarada çalışan bir kişide olduğu gibi ziyaretçiler içinde üç kısım da inceleyecek olursak, sağ ve sol bölümlerde 0,21 saat, giriş kısmında da 0,08 saat harcayacağını varsayarak, radon gazından dolayı maruz kaldığı yıllık etkin doz Tablo 29’da verilmiştir.

Tablo 29. Karaca Mağarası’nda yaz döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz

Karaca Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süresi (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (μSv/yıl)
Giriş	0,08	777,0	0,24
Sağ bölüm	0,21	1116,5	0,92
Sol bölüm	0,21	742,6	0,61

Mağarayı tanıtmakla görevli bir kişi için hem de ziyaretçi olarak mağara içinde bir süreliğine bulunan kişiler için yıllık alınan etkin doz miktarları, çalışanlar için 2,32 mSv’dir. Dünyada insanların tüm doğal radyasyon kaynaklarından yıllık olarak 2,4 mSv doza maruz kaldığı düşünülürse (UNSCEAR, 2000), Mağarada çalışan bir kişinin, sadece radon gazından dolayı maruz kaldığı doz 2,32 mSv olduğu düşünülürse bu miktar neredeyse insanların yıllık aldıkları doza yakındır. Ziyaretçilerin aldıkları doz, mikrosievert mertebesinde olduğundan ortalama değerin çok altındadır.

Karaca Mağarası kış döneminde de açık kalsaydı, hem çalışanlar hem de ziyaretçiler için alınan doz değerleri hesaplınsaydı, sonuçlar Tablo 30’da verildiği gibi olurdu. Bu varsayım çalışmaya yaz dönemi sonuçlarıyla mukayese imkânı vermesi amacı ile yapılmıştır. Karaca Mağarası kış dönemi sonuçları yaz dönemindekilerle uyum sağlaması için yaz döneminde kullanılmayan 2, 6 ve 8 numaralı dedektörler, kış döneminde de değerlendirilmeye katılmamış ama dedektörlerin okuduğu değerler verilmiştir.

Tablo 30. Karaca Mağarası kış döneminde çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (mSv/yıl)
1	683	1,93
2	936	2,64
3	932	2,63
4	817	2,30
5	932	2,64
6	722	2,03
7	617	1,74
8	842	2,38
9	1448	4,09
10	1052	2,97
11	2809	7,93
12	805	2,27
13	813	2,29
14	914	2,58
Ortalama	1023	2,89
2, 6, 8. dedektörler hariç ortalama	1075	3,03

Tablo 31. Karaca Mağarası'nda kış döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kalacağı yıllık etkin doz

Karaca Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süresi (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E(mSv/yıl)
Giriş	120	841,0	0,40
Sağ bölüm	300	1032,5	1,21
Sol bölüm	300	1278,6	1,50

Tablo 32. Karaca Mağarası kış döneminde bir ziyaretçinin alacağı tahmini yıllık etkin doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (μSv/yıl)
1	683	1,34
2	936	1,83
3	932	1,83
4	817	1,60
5	932	1,83
6	722	1,41
7	617	1,21
8	842	1,65
9	1448	2,84
10	1052	2,06
11	2809	5,51
12	805	1,58
13	813	1,59
14	914	1,79
Ortalama	1023	2,00
2, 6, 8. dedektörler hariç ortalama	1075	2,10

Tablo 33. Karaca Mağarasında kış döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz

Karaca Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süres (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (μSv/yıl)
Giriş	0,08	841,0	0,26
Sağ bölüm	0,21	1032,5	0,84
Sol bölüm	0,21	1278,6	1,05

Karaca Mağarası, kış döneminde de açık kalsaydı, Çalışanlar yaz döneminde kine mukayese olarak 2,32 mSv'lik miktardan daha fazla olan 3,03 mSv'lik doza maruz kalacaklardı. Tüm dedektörler düşünülürse 2,89 mSv doza maruz kalacaklardı. Doğal kaynaklardan insanların yıllık aldıkları ortalama dozun 2,4 mSv olduğu düşünülürse bu miktar ortalama değer üzerindedir. Ziyaretçilerin maruz kaldıkları yada kalabilecekleri doz ise mikro sievert düzeyinde olup önem arzetmemektedir.

Karaca Mağarası'nda kış sezonun da alınan doz ile yaz sezonun da alınan doz değerleri mukayese etmek amacı ile Tablo 34 de gösterilmiştir.

Tablo 34. Karaca Mağarasında mağaranın geneli ve bölümleri arasında yıllık alınan dozlar arasında yaz-kış karşılaştırması

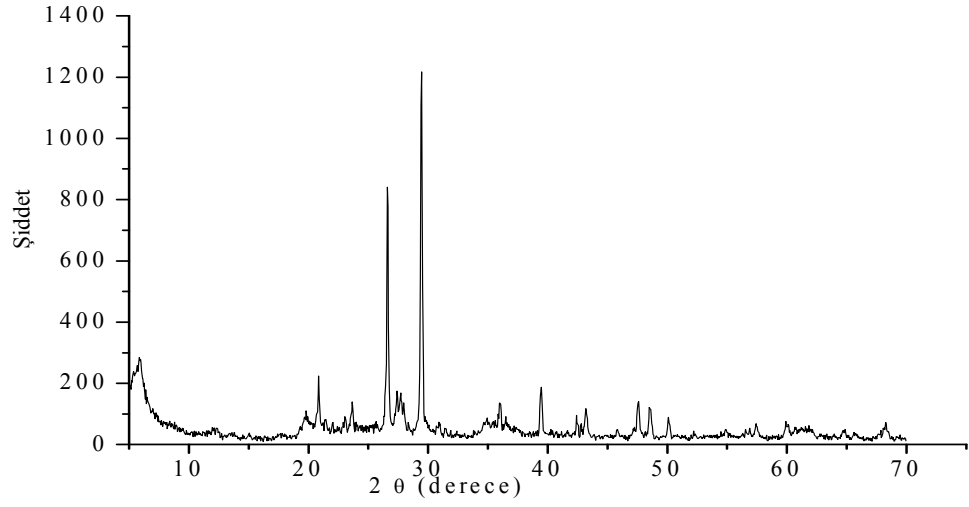
Karaca Mağarası	Yaz dönemi bir çalışanın aldığı doz, E (mSv/yıl)	Kış dönemi bir çalışanın aldığı doz, E (mSv/yıl)	Yaz dönemi bir ziyaretçinin aldığı doz, E (μ Sv/yıl)	Kış dönemi bir ziyaretçinin aldığı doz, E (μ Sv/yıl)
Giriş	0,37	0,40	0,24	0,26
Sağ bölüm	1,31	1,21	0,92	0,84
Sol Bölüm	0,87	1,50	0,61	1,05
Toplam	2,32	3,03	1,61	2,10

Karaca Mağarası'nda yaz ve kış radon konsantrasyonları karşılaştırdığımız bölüm 3.2.2.3'de de belirtildiği gibi eğer kış döneminde ziyaretçi alınmış olsaydı, bu durum da mağaranın kapıları açık kalabileceğini ve radon konsantrasyonunun düşebileceğini dikkate almak bu çalışma için önem arz etmektedir.

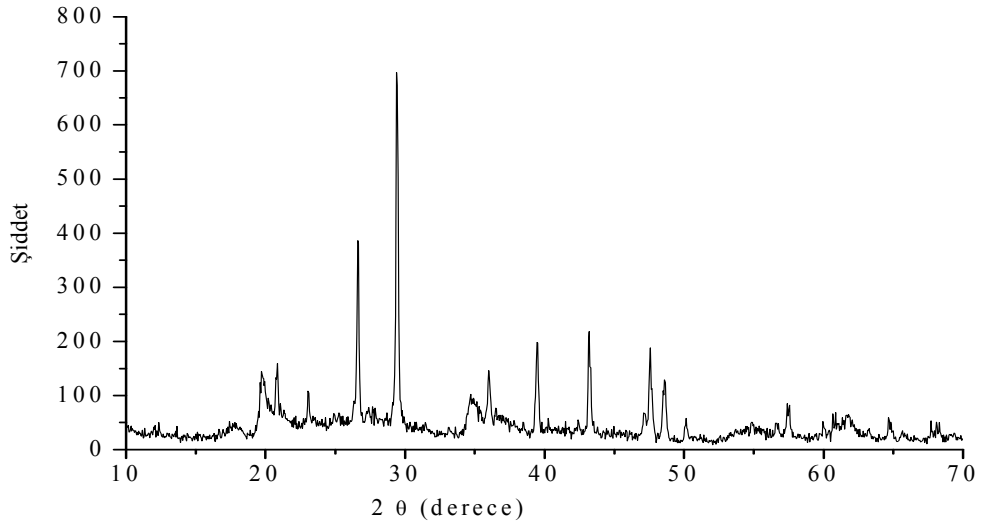
3.5. Çal Mağarası Numunelerinin Yapısal ve Kimyasal Özellikleri

3.5.1. X Işını Difakrometresi (XRD) Analizi

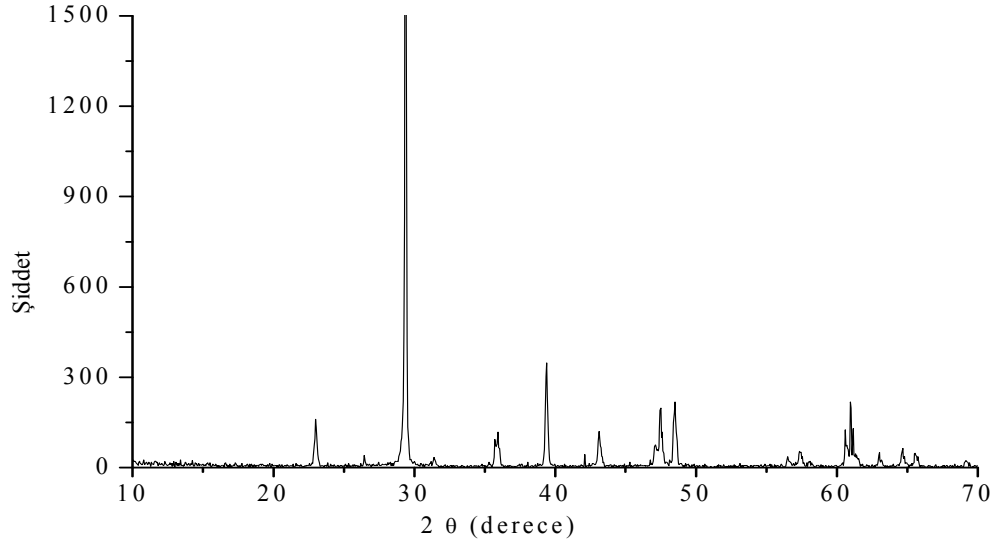
Çal Mağarası'nda da Karaca Mağarası'nda olduğu gibi toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinin X-ışını kırınım desenleri toprak, yan kayaç ve sarkıt olarak grafikler halinde verilmiştir. Toprak, yan kayaç ve sarkıt numunesinin kalsit ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu durum Çal Mağarası'nın bir kireç taşı mağarası olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 41. Çal Mağarası'nın girişinden 165 m uzaklıkta ki toprak numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit(CaCO_3) ile uyumu JCPDS no:005-0586



Şekil 42. Çal Mağarası'nın girişinden 155 m uzaklıkta ki yan kayaç numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit (CaCO_3) ve dolomit($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ile uyumu JCPDS no : 047 – 1743, 036 - 0426



Şekil 43. Çal Mağarası Sarkıt numunesinin X-ışını kırınım deseninin kalsit(CaCO_3) ile uyumu JCPDS no : 047 - 1743

3.5.2. Enerji Ayrımlı X Işını Spektrometresi (EDXRF) Analizi

Karaca Mağarası'nda olduğu gibi, Çal mağarası'nda da numunelerimizin kimyasal analizlerinin sonuçları toprak, yan kayaç ve sarkıt olarak tablolar vasıtasıyla verilmiştir. Toprak numunelerinde, çoğunlukla Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 tespit edilirken, yan kayaç numunelerinde Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO tespit edilmiştir. Sarkıt numunelerinde ise özellikle CaO gözlenmiştir.

Tablo 35. al Mağarası toprak numunelerinin kimyasal analizleri

Kimyasal Bileşik	Birim	Konsantrasyon	
		52 m	155 m
MgO	%	2,7	3,28
Al ₂ O ₃	%	21,63	20,08
SiO ₂	%	61,01	43,24
K ₂ O	%	1,65	3,44
CaO	%	3,59	8,79
TiO ₂	ppm	0,83	0,87
V ₂ O ₅	ppm	369	823
Cr ₂ O ₃	ppm	128	495
MnO	ppm	1079	1469
Fe ₂ O ₃	%	6,49	13,68
NiO	ppm	45	74
CuO	ppm	81	132
ZnO	ppm	82	121
Rb	ppm	59	55
SrO	ppm	497	469
ZrO ₂	ppm	227	148
BaO	ppm	705	447
La ₂ O ₃	ppm	79	Belirlenemedi
CeO ₂	ppm	106	57
PbO	ppm	18	20

Tablo 36.Çal Mağarası yan kayaç numunelerinin kimyasal analizi

KimyasalBileşik	Birim	Konsantrasyon	
		20 m	320 m
MgO	%	8,46	3,29
Al ₂ O ₃	%	5,91	19,61
SiO ₂	%	4,94	52,76
K ₂ O	%	3,85	1,39
CaO	%	54,07	14,91
TiO ₂	ppm	514	0,66
V ₂ O ₅	ppm	53	361
Cr ₂ O ₃	ppm	53	85
MnO	ppm	531	1314
Fe ₂ O ₃	%	2,17	6,93
NiO	ppm	Belirlenemedi	23
CuO	ppm	13	88
ZnO	ppm	37	64
Rb	ppm	6	39
SrO	ppm	369	589
ZrO ₂	ppm	Belirlenemedi	87
BaO	ppm	91	703
La ₂ O ₃	ppm	Belirlenemedi	61
CeO ₂	ppm	Belirlenemedi	73
PbO	ppm	5	11

Tablo 37. Çal Mağarası sarkıt numunesinin kimyasal analizi

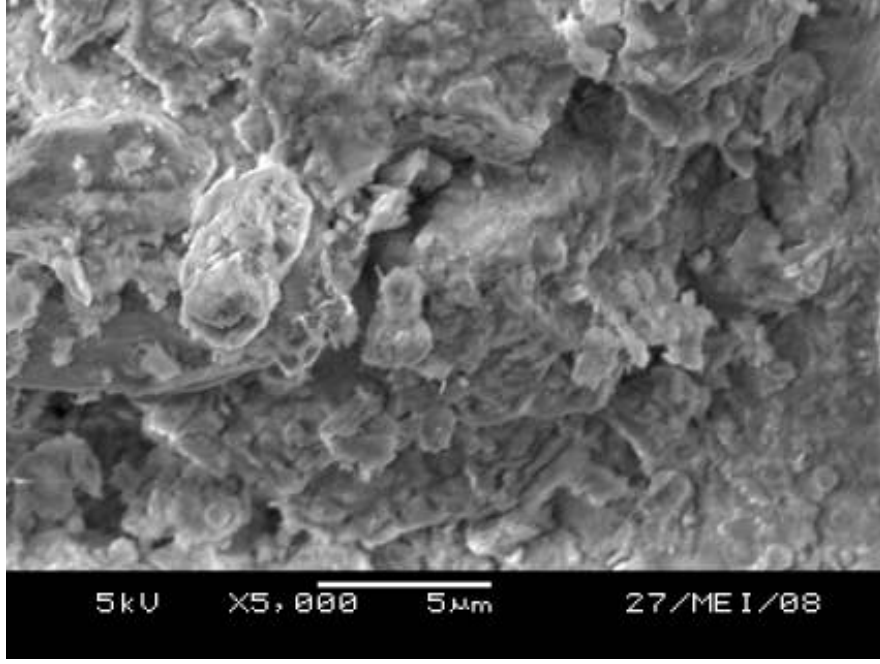
Kimyasal Bileşik	Birim	Konsantrasyon
MgO	%	Belirlenemedi
Al ₂ O ₃	%	Belirlenemedi
SiO ₂	%	Belirlenemedi
K ₂ O	%	Belirlenemedi
CaO	%	68,30
TiO ₂	ppm	194
V ₂ O ₅	ppm	Belirlenemedi
Cr ₂ O ₃	ppm	Belirlenemedi
MnO	ppm	39
Fe ₂ O ₃	%	3,01
NiO	ppm	Belirlenemedi
CuO	ppm	308
ZnO	ppm	156
Rb	ppm	Belirlenemedi
SrO	ppm	305
ZrO ₂	ppm	Belirlenemedi
BaO	ppm	73
La ₂ O ₃	ppm	Belirlenemedi
CeO ₂	ppm	Belirlenemedi
PbO	ppm	19

Tablo 37’de bazı elementler girişimden dolayı (EDXRF cihazında) saptanamamıştır.

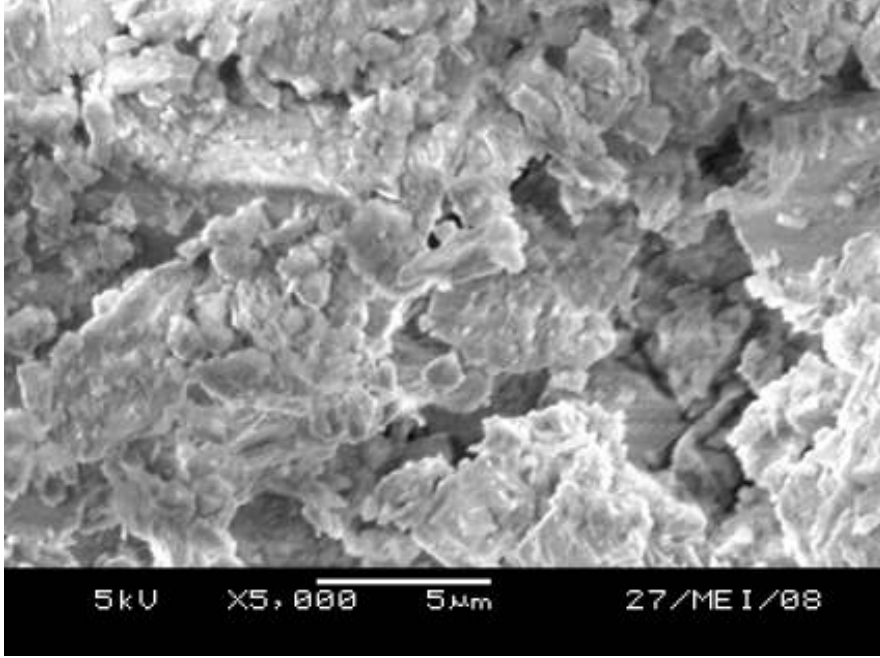
3.5.3. Yüzey Morfolojisi (SEM) Analiz

Çal Mağarası’nda yüzey morfolojisi analizinde toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinde, bazı parçacıkların boyutunun 10 µm’den büyük, bazı parçacıkların tahmini boyutunun ise 10 µm’nin altında olduğu gözükmemektedir.

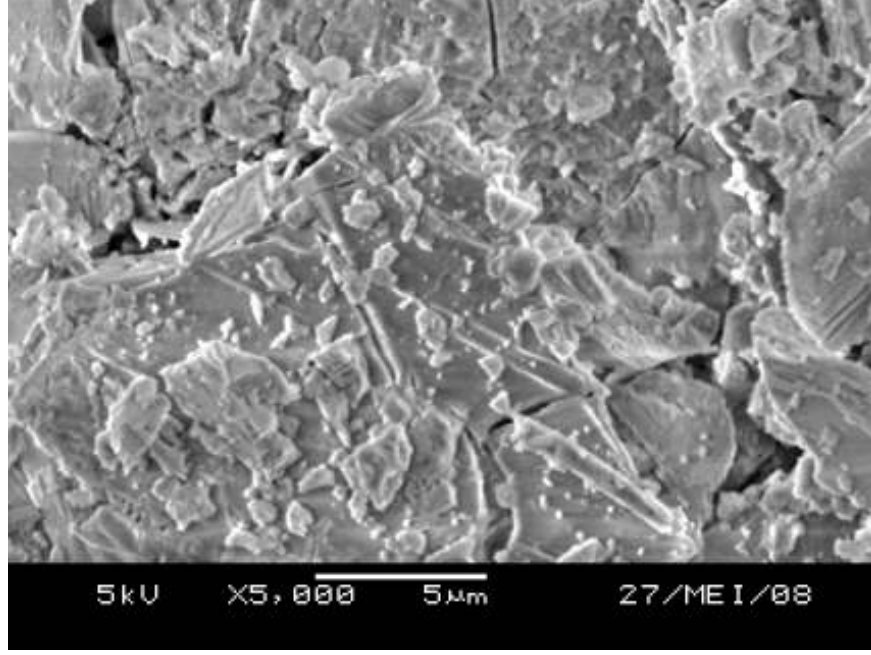
Çal Mağarası’nda her üç numunenin fotoğrafından da anlaşılacağı gibi çok gözenekli bir yapı olduğu düşünülmektedir. Bu analize göre mağaraya yerkabuğundan sızan radon gazının ana kaynak olarak kırık hatlarına bağlı olduğunu ancak mağara tabanını kaplayan malzemenin, gözenekli olması sebebi ile mağara içinde kolayca dağıldığı saptanmıştır.



Şekil 44. Çal Mağarası 80. metre toprak numunesinin SEM fotoğrafı



Şekil 45. Çal Mağarası 80. metre yan kayaç numunesinin SEM fotoğrafı



Şekil 46. Çal Mağarası sarkıt numunesinin SEM fotoğrafı

3.6. Çal Mağarası Radyoaktif Özellikler

3.6.1. Gama Spektroskopik Analiz Sonuçları

Gama spektroskopisi sistemimizde Karaca Mağarası'nda da olduğu gibi toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinde ölçülen doğal radyoaktivite seviyeleri Bq/kg cinsinden aşağıdaki tablolarda verilmektedir. Bu ölçümlerde de yapay radyoaktif elementlerden herhangi bir ürüne rastlanmamıştır.

Tablo 38. al Mağarası toprak numunelerinin gama aktiviteleri

Toprak numunesi (m)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
20	35 ± 3	28 ± 3	515 ± 11
80	38 ± 4	26 ± 3	622 ± 15
Sağ yol 130	27 ± 3	25 ± 3	317 ± 7
Sağ yol 190	30 ± 3	27 ± 3	648 ± 15
Sağ yol sağ taraf 240	26 ± 3	25 ± 3	438 ± 10
Sağ yol sol taraf 240	46 ± 4	22 ± 2	531 ± 11
Sağ yol 365	34 ± 3	20 ± 3	500 ± 12
Sağ yol 405	29 ± 3	34 ± 4	196 ± 5
Sol yol 240	34 ± 3	30 ± 3	399 ± 10
Sol yol 320	27 ± 3	29 ± 3	501 ± 11
Ortalama	33 ± 3	27 ± 3	467 ± 11

Tablo 39. al Mağarası yan kayaç numunelerinin gama aktiviteleri

Taş numunesi (m)	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
200	6 ± 1	14 ± 3	157 ± 12
320	5 ± 3	19 ± 4	367 ± 24

Tablo 40. al Mağarası sarkıt numunesinin gama aktivitesi

Sarkıt numunesi	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)
	6 ± 1	6 ± 1	128 ± 3

3.6.2. Çal Mağarası Radon Konsantrasyonları

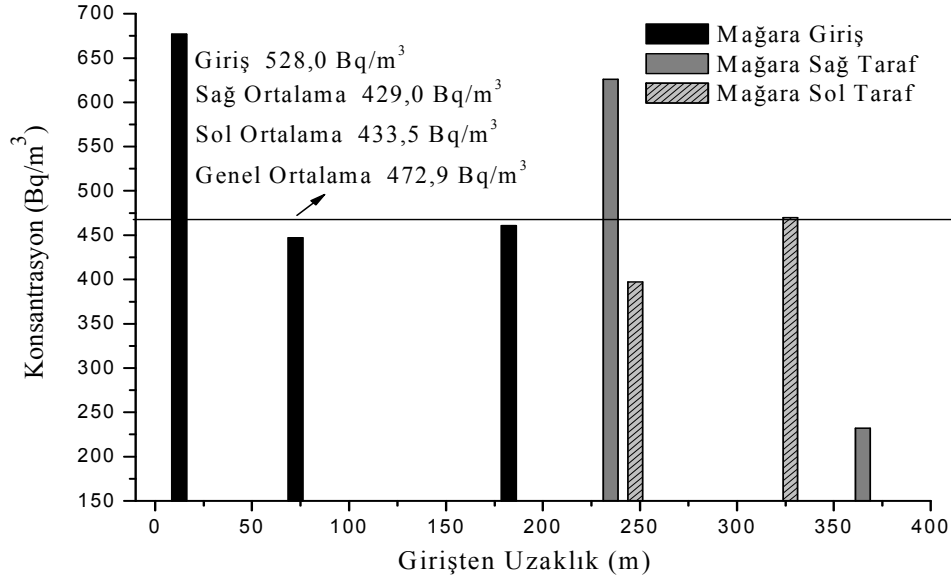
3.6.2.1. Çal Mağarası Yaz Dönemi Radon Konsantrasyonu

26.06.2007 – 15.09.2007 tarihleri arasında Çal Mağarasında yaz dönemi (1. dönem) radon aktivitelerinin belirlenmesi için yerleştirilen LR-115 dedektörlerinin analizi sonucu elde edilen veriler Tablo 41’de verilmektedir. Çal Mağarası’ndaki yaz sezonu radon konsantrasyonları 3, 6 ve 8 numaralı dedektörler yerlerinde bulunamadığı için bu üç dedektör hariç tutularak verilmiştir.

Tablo 41. Çal Mağarası yaz dönemi radon konsantrasyonu

Dedektör no	Konsantrasyon (Bq/m ³)
1	677
2	447
3	-
4	461
5	626
6	-
7	232
8	-
9	397
10	470
Ortalama	473

Çal Mağarası da Karaca Mağarası gibi girişten itibaren 200. metreye kadar (4. dedektöre kadar) sabit bir yol ve bu uzaklıktan sonra iki kola ayrılmaktadır. Bu yüzden mağara 200. metre den itibaren iki ayrı kolda ve giriş ile birlikte 3 bölüm halinde incelendi. Mağaranın giriş bölümünde 528,0 Bq/m³, sağ bölümünde ki kolda ortalama radon gazı konsantrasyonu 429 Bq/m³, sol bölümündeki kolda 433,5 Bq/m³ ve mağara genelinde ki genel ortalama 472,9 Bq/m³ olarak tespit edilmiştir. Çal Mağarası’nda girişten itibaren radon gazı konsantrasyonu Şekil 47’de ki gibi değişmektedir.



Şekil 47. Çal Mağarası yaz sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyon değişimi

3.6.2.2. Çal Mağarası Kış Dönemi Radon Konsantrasyonu

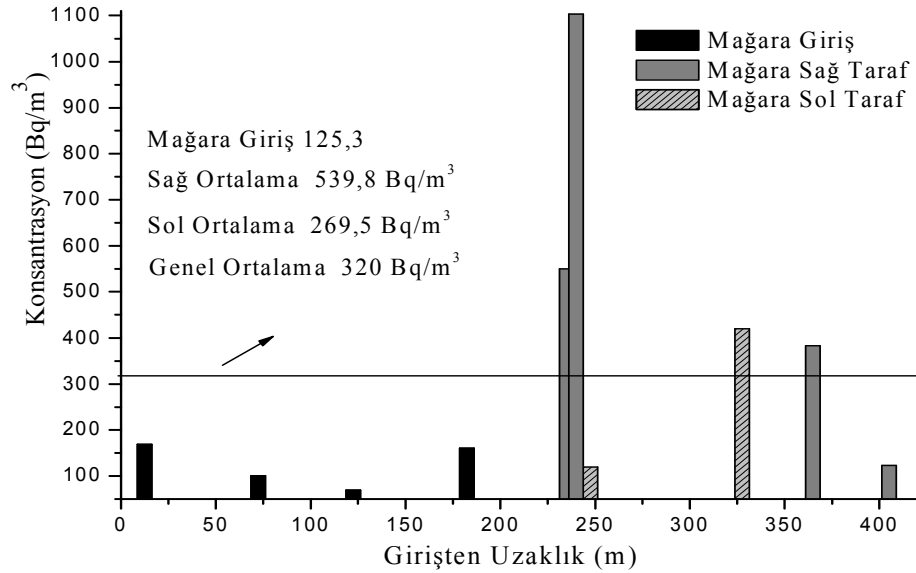
Bu çalışma 27.12.2007 – 26.03.2008 tarihleri arasında Çal Mağarası'nda kış dönemi (2. dönem) için yapılmıştır. Bu çalışmada yaz döneminden farklı olarak kullandığımız tüm dedektörlerden sonuç alınmıştır.

Çal Mağarası'ndaki kış sezonu radon gazı konsantrasyonu yaz sezonundaki gibi iki kısımda sağ bölüm ve sol bölüm olmak üzere giriş ile birlikte 3 bölüm halinde incelendi ve girişte 125,3 Bq/m³ sağ bölümdeki kolda 539,8 Bq/m³ sol bölümde ki kolda 269,5 Bq/m³ ve genel ortalama 320,0 Bq/m³ olarak tespit edildi. Çal Mağarası kış dönemi radon konsantrasyonu Tablo 42' de verilmiştir.

Tablo 42. al Mağarası kış dönemi radon konsantrasyonu

Dedektör no	Konsantrasyon (Bq/m ³)
1	169
2	101
3	70
4	161
5	550
6	1103
7	383
8	123
9	119
10	420
Ortalama	320

Dedektörlerimizden elde ettiğimiz sonuçlara göre mağarada ki radon gazı konsantrasyonunun girişten itibaren uzaklıkla değişimi aşağıdaki Şekil 48’de ki gibidir.



Şekil 48. al Mağarası kış sezonu girişten uzaklığa göre radon gazı konsantrasyon değişimi

3.6.2.3. Çal Mağarası Yıllık Ortalama Radon Konsantrasyonları

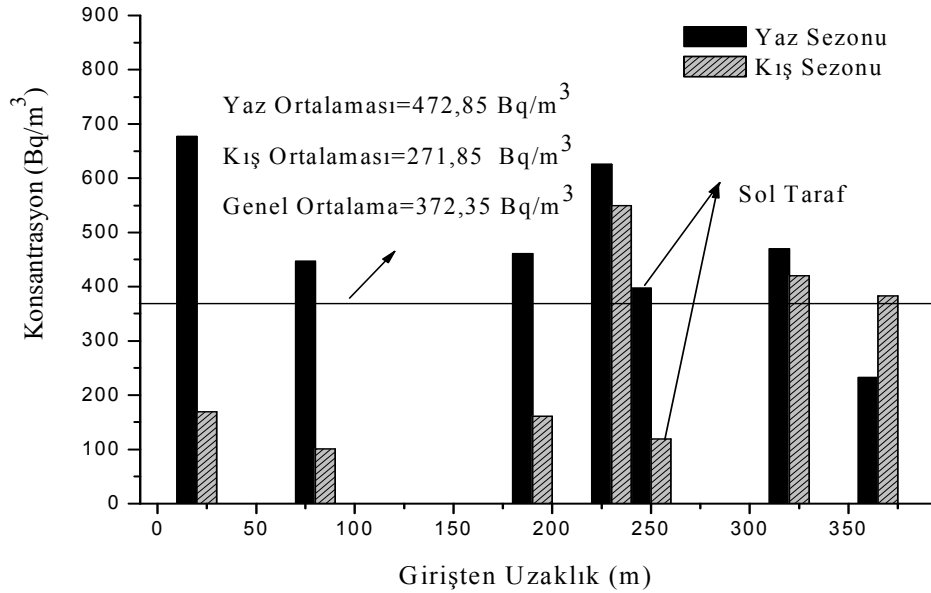
Çal Mağarası'nda yaz dönemi için belli noktalara bırakılan 10 dedektörden 3, 6 ve 8 numaralı dedektörlerin yerlerinde bulunamamasından dolayı bu 3 dedektör ortalamaya dâhil edilmemiştir.

Tablo 43. Çal Mağarası yaz ve kış dönemi radon konsantrasyonları ve ortalaması

Dedektör no	Yaz dönemi radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Kış dönemi radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)
1	677	169	423
2	447	101	274
3	-	70	-
4	461	161	311
5	626	550	588
6	-	1103	-
7	232	383	307,5
8	-	123	-
9	397	119	258
10	470	420	445
Ortalama			372

Çal Mağarası'nda kış döneminde 7 numaralı dedektör hariç diğer tüm dedektörlerdeki ölçümlerde belli bir oranda düşüş mevcuttur. Bu durum literatürdeki bazı mağaralarda tespit edilen durumla benzerlik gösterse de örneğin, Postojna Mağarası'nda (Slovenya) ve Mystery Mağarası'nda (Amerika) olduğu gibi (Przylibski, 1999). Karaca Mağarası'nda yaz ve kış konsantrasyonlarının karşılaştırılması 3.2.2.3 bölümünde de bahsedildiği gibi Przylibski'nin yaptığı çalışmada da anlatıldığı üzere, her mağaranın kendine özgü bir durumu söz konusudur. Çal Mağarası kış mevsiminde sürekli olarak turizme kapalı ve bu sebeple kapısı sürekli kapalıdır. Bu duruma göre, radon konsantrasyonunda kış mevsiminde ki düşüş beklenen bir sonuç değildir. Bölüm 2.1.2'de Çal Mağarası hakkında verilen bilgilerde de belirtildiği gibi, Çal Mağarası hem yaz hem de

kış mevsimi için ortam olarak nemli bir mağaradır. Bunun sebebi mağaranın içinden görünür şekilde hatta zaman zaman derinliği bir metreyi geçen Çal deresinin akmasıdır. Bu derenin suları kışın büyük ölçüde yükselmekte, hatta mağaranın duvarlarında ki nem gözle görünür hale gelmektedir. Çal Mağarası'nda, kışın artması beklenen radon gazı konsantrasyonunun azalmasının sebebi radon gazının suda çözünmesinden ve su moleküllerinin içinde hapis kalmasından kaynaklanmış olabilir. Ayrıca Çal Mağarası kışın turizme kapalı olmasına rağmen dışarıdaki hava ile sirkülasyonunu kesebilecek özelliğe sahip, muhafızlı bir kapıya sahip değildir. Bu durum da dikkate alınması gereken bir özelliktir.



Şekil 49. Çal Mağarası yaz- kış sezonu ortak mesafedeki radon gazı konsantrasyon değişimi

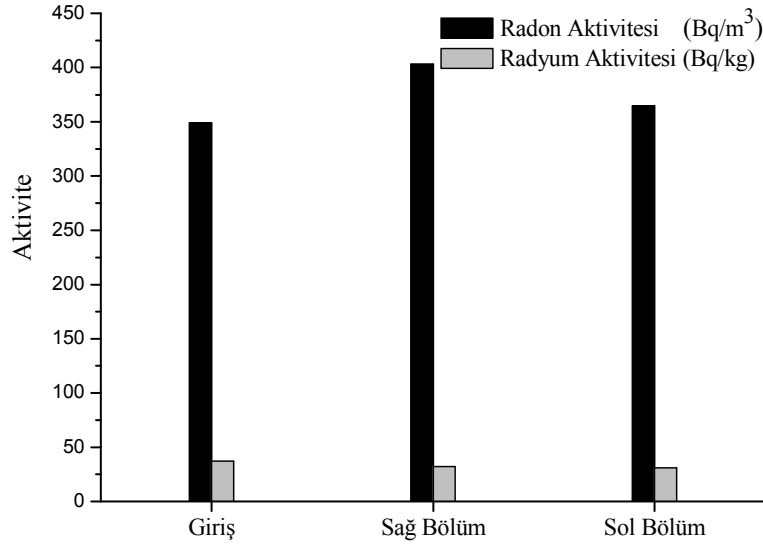
3.7. Çal Mağarasında Ra ve Rn Arasındaki İlişki

Çal Mağarası'nda ki radyum – radon ilişkisini, Karaca Mağarası'nda olduğu gibi mağarayı 3 kısma ayırarak incelemek daha uygun olur. Girişten itibaren 200. metreye kadar giriş ve bu noktadan sonra sağ yol 405 metreye kadar sağ bölüm, sol yol 320 metreye kadar da sol bölüm olmak üzere bu mağarayı da 3 bölüme ayırabiliriz. Bu bölümlerdeki radon konsantrasyonu ve radyum aktivitesi değerleri Tablo 44'de gösterilmiştir.

Tablo 44. Çal Mağarası radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması

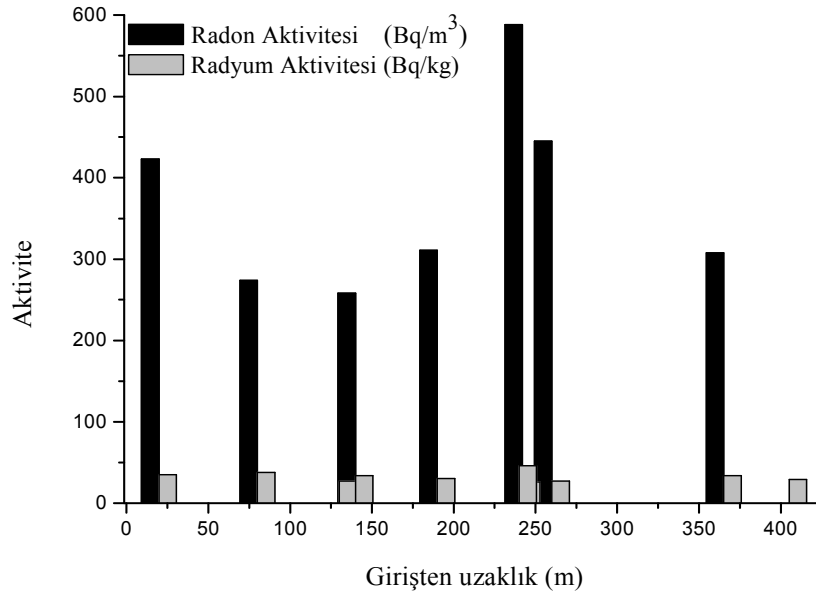
Çal mağarası	Ortalama Rn konsantrasyonu (Bq/m ³)	Ortalama Ra aktivitesi (Bq/kg)
Giriş	336	37
Sağ bölüm	448	32
Sol bölüm	352	31

Tablo 44’de de görüldüğü gibi, giriş kısmındaki radyum aktivitesine göre, radon konsantrasyonunun daha yüksek olması beklenir. Fakat bu mağarada Karaca Mağarasındakinden farklı bir durum söz konusudur. Çal Mağarası’nın tek giriş kapısı olan demir kapı, parmaklı ve boşluklu bir yapıya sahiptir ve sürekli olarak, dışarıdaki hava sirkülasyonu, giriş kısmında ki radon konsantrasyonunu değiştirmektedir. Giriş kısmında daha yüksek beklenen radon konsantrasyonu bu sebepten düşük çıkmış olabilir. Sağ ve sol bölüm arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa, az da olsa radyum ve radon aktiviteleri arasında bir uyum gözlenmektedir.



Şekil 50. Çal Mağarasının 3 farklı bölgesindeki radyum – radon aktivitesinin karşılaştırılması

Çal Mağarası'nda da Karaca Mağarasına benzer şekilde belirli mesafelerle yerleştirilen, 10 dedektöre karşılık gelecek toprak numunesinin, radyum aktivitesi ile her dedektörün okuduğu radon konsantrasyonu arasında yapılan pair sample testinde korelasyon katsayısı, negatif yönde 0,736 olup, fakat önem değeri %'5 in üzerinde olduğu için radon ve radyum arasında bir bağıntı saptanamamıştır. Radyum ve radon konsantrasyonları arasındaki karşılaştırma Şekil 51'de gösterilmiştir.



Şekil 51. Çal Mağarası'nda girişten uzaklığa göre radon-radyum aktivitesinin karşılaştırılması

3.8. Çal Mağarası İçin Doz Hesabı

3.8.1. Gama Spektroskopisinden Alınan Doz

Çal Mağarasında çalışan bir kişinin yıllık 600 saat mağarada kaldığı düşünülerek mağarada gama spektroskopisinden aldığı anlık ve yıllık doz miktarı aşağıda Tablo 45'te gösterilmiştir. Çalışanların aldığı doz miktarları UNSCEAR'ın belirtmiş olduğu formülün mağaraya göre uyarlanması ile tespit edilmiştir. Havadan alınan soğurulan doz miktarı,

$$D(\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}) = 0,462\times C_{\text{Ra}}+0,604\times C_{\text{Th}}+0,0417\times C_{\text{K}} \quad (44)$$

formülü ile hesaplanır.

Çal Mağarası'nda Karaca Mağarası'ndan farklı olarak mağarayı tanıtma görevli bir kişinin mağara içerisinde yıllık bulunma süresi 600 saat olduğu düşünülürse yıllık alınan etkin doz miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$\text{Yıllık etkin doz miktarı } (\mu\text{Sv}) = D\times 600\times 0,7\times 0,2/1000 \quad (45)$$

Tablo 45. Çal Mağarası'nda girişten uzaklığa göre çalışan bir kişinin soğurulan doz ve yıllık aldığı etkin doz miktarları

Çal mağarası (m)	Soğurulan Doz, D (nGy.h ⁻¹)	Yıllık alınan Etkin doz, E (μSv/yıl)
20	54,6	4,6
80	59,2	5,0
Sağ yol 130	40,8	3,4
Sağ yol 190	57,2	4,8
Sağ yol sağ taraf 240	45,4	3,8
Sağ yol sol taraf 240	56,7	4,8
Sağ yol 365	48,7	4,1
Sağ yol 405	42,1	3,5
Sol yol 240	50,5	4,2
Sol yol 320	50,9	4,3
Ortalama	50,6	4,3

⁴⁰K, ²³⁸U ve ²³²Th'dan dolayı çalışanların maruz kaldıkları yıllık doz miktarı, Karaca Mağarası'nda ki gibi UNSCEAR'ın belirttiği ortalama olan 70 μSv/yıl'ın çok aşağısındadır.

3.8.2. Radon Konsantrasyonundan Alınan Doz

Çal Mağarası'nda, yaz aylarında gelen ziyaretçilere rehberlik amacıyla çalışan kişiler ortalama olarak günde 5 saat çalışmakta ve mağara bir sene içerisinde yaklaşık 4 ay turizme açık bulunmaktadır. Bu bilgiler ışığında rehberlerin yıl içerisinde mağarada 600 saat kaldığı düşünülürse, radon gazından aldıkları doz girişten uzaklığa göre, Karaca Mağarası'nda ki gibi denklem (43) kullanılarak hesaplandı ve değerler Tablo 46'da verilmiştir.

Tablo 46. Çal Mağarası yaz döneminde çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (mSv/yıl)
1	677	1,59
2	447	1,05
3	-	-
4	461	1,08
5	626	1,47
6	-	-
7	232	0,55
8	-	-
9	397	0,93
10	470	1,10
Ortalama	473	1,11

Çal Mağarası'da 2 ayrı kola ayrıldığı ve 2 bölüm oluştuğu düşünülürse, giriş kısmı ile birlikte bu mağarayı da 3 kısımda incelemek, daha uygun olur. Bu durumda ziyaretçilere rehberlik etmek için çalışan bir kişinin Karaca Mağarası'ndan farklı olarak iki bölümde farklı süreler harcayacağını düşünmek daha uygun olur. Mağaranın sol kısma ayrılan bölümü sağ kısma ayrılan bölümden küçüktür ve yaklaşık olarak yarısı kadardır. Basit bir orantı ile sol bölümde tahminen 1,5, sağ bölümünde ise 3 saat ve giriş kısmında da 0,5 saat harcayacağını varsayarsak bu kişilerin alacağı yıllık doz aşağıdaki Tablo 47'de verilmiştir.

Tablo 47. Çal Mağarası'nda yaz döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz

Çal Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süresi (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (mSv/yıl)
Giriş	60	528	0,12
Sağ bölüm	360	429	0,60
Sol bölüm	180	434	0,31

Çal Mağarası'na gelen bir ziyaretçinin ortalama olarak içeride yarım saat kaldığı varsayılarak ve yılda sadece bir gün geldiği düşünülerek mağara genelinde radon gazından dolayı maruz kaldığı yıllık etkin doz Tablo 48'de belirtilmiştir. Bu sonuçlar genel de μSv mertebesindedir.

Tablo 48. Çal Mağarası yaz döneminde bir ziyaretçinin aldığı yıllık tahmini doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E ($\mu\text{Sv/yıl}$)
1	677	1,33
2	447	0,88
3	-	-
4	461	0,90
5	626	1,23
6	-	-
7	232	0,45
8	-	-
9	397	0,78
10	470	0,92
Ortalama	473	0,93

Mağarayı mağarada çalışan bir kişide olduğu gibi ziyaretçiler içinde üç kısım da inceleyecek olursak sağ bölümde 0,3 saat sol bölümde ise 0,15 giriş kısmında da 0,05 saat harcadığı varsayılarak bu durumda radon gazından dolayı maruz kalınan yıllık etkin doz Tablo 49'da belirtilmiştir.

Tablo 49. Çal Mağarası'nda yaz döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz

Çal Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süresi (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (µSv/yıl)
Giriş	0,05	528	0,10
Sağ bölüm	0,30	429	0,50
Sol bölüm	0,15	434	0,25

Mağarayı tanıtmakla görevli bir kişi için hem de ziyaretçi olarak mağara içinde bir süreliğine bulunan kişiler için yıllık alınan etkin doz miktarları, çalışanlar için 1,11 mSv'dir. Dünyada insanların tüm doğal radyasyon kaynaklarından yıllık olarak 2,4 mSv doza maruz kaldığı düşünülürse (UNSCEAR, 2000), Mağarada çalışan bir kişinin, sadece radon gazından dolayı yıllık maruz kaldığı doz 1,11 mSv olduğu düşünülürse bu miktar yıllık doğal kaynaklardan maruz kalınan ortalama değer altındadır. Fakat yılda sadece 600 saatlik çalışma sonucunda maruz kalınan miktar olduğu için önem arz etmektedir. Ziyaretçilerin aldıkları doz, mikrosievert mertebesinde olduğundan ortalama değer çok altındadır.

Çal Mağarası kış döneminde de açık kalsaydı ve hem çalışanlar hem de ziyaretçiler için alınan doz değerleri hesaplınsaydı sonuçlar Tablo 50'de verildiği gibi olurdu. Bu varsayım çalışmaya yaz dönemi sonuçlarıyla mukayese imkânı vermesi amaç ile yapılmıştır. Çal Mağarası kış dönemi sonuçlarının yaz dönemindekilerle uyum sağlaması için, yaz döneminde 3, 6 ve 8 numaralı dedektörler kullanılmadığı için kış döneminde de değerlendirilmeye katılmamış ama dedektörlerin okuduğu değerler verilmiştir.

Tablo 50. Çal Mağarası kış döneminde çalışan bir kişinin aldığı yıllık tahmini doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (mSv/yıl)
1	169	0,40
2	101	0,24
3	70	0,16
4	161	0,38
5	550	1,29
6	1103	2,59
7	383	0,90
8	123	0,29
9	119	0,28
10	470	1,11
Ortalama	325	0,76
3, 6 ve 8. dedektörler hariç ortalama	279	0,66

Tablo 51. Çal Mağarasında kış döneminde çalışan bir kişinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz

Çal Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süresi (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (mSv/yıl)
Giriş	60	125	0,03
Sağ bölüm	360	540	0,76
Sol bölüm	180	270	0,19

Tablo 52. Çal Mağarası kış döneminde bir ziyaretçinin aldığı yıllık tahmini doz

Dedektör no	Radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (μSv/yıl)
1	169	0,33
2	101	0,20
3	70	0,14
4	161	0,32
5	550	1,08
6	1103	2,16
7	383	0,75
8	123	0,24
9	119	0,23
10	470	0,92
Ortalama	325	0,64
3, 6 ve 8. dedektörler hariç ortalama	279	0,55

Tablo 53. Çal Mağarası'nda kış döneminde bir ziyaretçinin mağaranın 3 bölümünde maruz kaldığı yıllık etkin doz

Çal Mağarası	Yıllık mağarada bulunma süresi (saat)	Ortalama radon konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık alınan etkin doz, E (μSv/yıl)
Giriş	0,05	125	0,02
Sağ bölüm	0,3	540	0,63
Sol bölüm	0,15	270	0,16

Çal Mağarası, kış döneminde de açık kalsaydı, Çalışanlar yaz döneminde kine mukayese olarak 1,11 mSv'lik miktardan daha az olan 0,66 mSv'lik doza maruz kalacaklardı. Tüm dedektörler düşünülürse 0,76 mSv doza maruz kalacaklardı. Doğal kaynaklardan alınan ortalama dozun 2,4 mSv olduğu düşünülürse, bu mikarlar ortalama değer altındadır. Ziyaretçilerin maruz kaldıkları yada kalabilecekleri doz ise mikro sievert düzeyinde olup önem arzetmemektedir.

Çal Mağarasında kış sezonunda alınan doz ile yaz sezonunda alınan doz değerleri Tablo 54’de gösterilmiştir.

Tablo 54. Çal Mağarası’nda mağaranın geneli ve bölümleri arasında yıllık alınan dozlar arasında yaz-kış karşılaştırması

Çal Mağarası	Yaz dönemi bir çalışanın aldığı doz, E (mSv/yıl)	Kış dönemi bir çalışanın aldığı doz, E (mSv/yıl)	Yaz dönemi bir ziyaretçinin aldığı doz, E (µSv/yıl)	Kış dönemi bir ziyaretçinin aldığı doz, E (µSv/yıl)
Giriş	0,12	0,03	0,10	0,02
Sağ bölüm	0,60	0,76	0,50	0,63
Sol Bölüm	0,31	0,19	0,25	0,16
Toplam	1,11	0,66	0,93	0,55

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Karaca ve Çal mağaralarında yürütülen bu çalışmada, radon konsantrasyonu ve gama spektroskopisine ilaveten, mağara içinden alınan toprak, yan kayaç ve sarkıt gibi numunelerin X- ışını kırınım desenleri ve yüzey morfolojisi incelenirken, kimyasal analizleri de yapılmıştır.

Gama spektroskopisinden ve radon gazı konsantrasyonundan, hem mağara çalışanlarının hem de mağara ziyaretçilerinin mağara içerisinde belirli süre kalabileceği öngörülerek soğurulmuş ve yıllık etkin doz miktarları hesaplanmıştır. Radon gazı konsantrasyonundan alınan doz hesaplanırken;

$$E = C(Rn) \cdot F \cdot t \cdot d \cdot u \quad (46)$$

formülasyonu kullanıldı. Bu formülde kullanılan F denge faktörü, kireçtaşı mağaralarda E efektif dozu temsil eder. Kireç taşı mağaralarda F denge faktörü 0,5'tir (Gillmore vd., 2002; Aytekin vd., 2005; Lario vd., 2005). F denge faktörü ölçümü yapılmak istenen yerlere göre değişiklik gösterebilir, örneğin evler madenler vd... Karaca ve Çal mağaralarının kireç taşı mağaralar olup olmadığı numunelerin X-ışını kırınım desenleri ve kimyasal analizleri ile teyit edildi. Yapılan XRD analizlerine göre Karaca Mağarası'nda toprak numunesinde piklerin önemli bölümünün bir kil minerali olan dikite, taş ve sarkıt numunelerinin ise kalsitten oluştuğu, Çal Mağarası'nda ise toprak, yan kayaç numunesinin birinin ve sarkıt örneğinin kalsit kristalleri içerdiği, diğer yan kayaç örneğinin ise kireçtaşlarını kesen bazalt kayacından alındığı saptanmıştır. Mağaraların oluşumu bölümünde de belirtildiği üzere mağara oluşumunda ortaya çıkan kimyasal reaksiyon şöyledir; $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{+2} + \text{CO}_3$. Bu reaksiyonların soldan sağa oluşması karstlaşmayı, olayın sol tarafa meydana gelmesi ise kalsiyum karbonat çökelimine yani kireç taşı mağaralarda sarkıt, dikit gibi oluşumların meydana gelmesine neden olur. Alınan yan kayaç ve sarkıt numunelerinden de anlaşılacağı gibi her iki mağaranın bu tür numunelerinin X-ışını kırınım desenleri kalsit (CaCO_3) ile uyumaktadır. Burada yapılan çalışmada belirleyici unsur yan kayaç ve sarkıt numuneleridir. Toprak, mağaraya su akışı gibi benzer yollarla dışardan gelebilir. Yapılan analize göre her iki mağaranın da kireç taşı mağaralar olduğu teyit edilmiştir.

Kimyasal analiz sonuçlarına göre Karaca Mağarası'nda, toprakta çoğunlukla yüzde olarak Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 tespit edilirken, yan kayaç numunelerinde çoğunlukla Al_2O_3 , SiO_2 , CaO tespit edilmiştir. Sarkıt numunelerin de ise özellikle CaO oranı oldukça yüksektir. Çal Mağarası'nda ise toprak numunelerinde, çoğunlukla Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 tespit edilirken, taş numunelerinde Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO tespit edilmiştir. Sarkıt numunelerinde ise özellikle CaO gözlenmiştir. Karaca Mağarası'nda toprak numunelerinde CaO oranı % 1,18 iken Çal Mağarası'nda % 8,79, Karaca Mağarası yan kayaç numunesinde CaO oranı % 57,27 iken Çal Mağarası'nda ise % 14,91 ve yine Karaca Mağarası'nda sarkıt numunesinde CaO oranı % 67,15 iken Çal Mağarası'nda % 68,30'dur. Burada CaO aslında $CaCO_3$ 'yu temsil eder. Kimyasal analiz de sonuçlar oksit ve türevleri olarak belirlenir. Bu analizde de XRD sonuçlarında olduğu gibi yan kayaç ve sarkıt numunelerine göre her iki mağaranında kireç taşı mağaralar olduğu teyit edilmiştir.

XRD ve EDXRF analizlerinden de anlaşılacağı üzere mağaralar kireç taşı olduğu teyit edilmiş ve radondan alınan yıllık etkin dozu hesaplarırken Kireç taşı mağaralar için belirlenen F denge faktörü 0,5 kullanılmıştır.

Yapılan yüzey morfolojisi çalışmalarında parçacık boyutları Karaca Mağarası'nda genelde $10 \mu m$ 'nin altında, Çal Mağarası'nda ise bazı parçacıkların boyutunun $10 \mu m$ 'den büyük, bazı parçacıkların tahmini boyutunun ise $10 \mu m$ 'nin altında olduğu gözükmemektedir. Mağara havasındaki radon konsantrasyonu çok sayıda faktörden etkilenir. Örneğin kayaçlardaki radyum konsantrasyonu, gözenelilik, hava ve su akımı atmosferik basınç, depremler vs (Cigna, 2005). SEM fotoğraflarından da anlaşılacağı gibi Karaca Mağarası'ndan alınan toprak, yan kayaç ve sarkıt numunelerinin Çal Mağarası'ndan alınanlara göre daha gözenekli olduğu görülmüştür. Böylece, mağara atmosferine yer kabuğundan sızan radon gazının, ana kaynak olarak kırık hatlarına bağlı olduğunu ve mağara tabanını kaplayan malzemenin gözenekli olması sebebi ile mağara içinde kolayca dağıldığı söylenebilir. Bundan dolayı, Karaca Mağarası'nda radon gazının mağaranın genelde her yerinden eşit sızabileceği, Çal Mağarası'nda ise kısmen eşit ya da ona yakın bir oranda sızabileceği düşünülebilir.

Gama spektroskopik analiz sonuçlarına göre Karaca Mağarası'nın genelinde Ra-226 aktivitesi 43 Bq/kg, Th-232 19 Bq/kg ve K-40 259 Bq/kg'dır. Çal Mağarası'nda ise mağaranın genelinde Ra-226 aktivitesi 33 Bq/kg, Th-232 27 Bq/kg ve K-40 ise 467 Bq/kg'dır. Bu sonuçlara göre Çal Mağarası'nda Ra-226 hariç gama aktiviteleri Karaca Mağarası'na göre daha yüksektir.

Radon gazı konsantrasyonu Karaca Mağarası'nda yaz döneminde 823 Bq/m^3 , kış döneminde 1023 Bq/m^3 ve yıllık ortalama 949 Bq/m^3 'tür. Çal Mağarası'nda ise yaz döneminde 473 Bq/m^3 , kış döneminde 320 Bq/m^3 ve yıllık ortalama 372 Bq/m^3 'tür. Bu durumda yaz, kış ve yıllık ortalamalar göz önüne alınırsa Karaca Mağarası'nın Çal Mağarası'na göre radon konsantrasyonu daha yüksektir.

Karaca Mağarası'ndaki kış dönemi ölçümlerinde 3 ve 7 numaralı dedektörler hariç, diğer tüm dedektörlerin ölçtüğü konsantrasyonlarda, yaz dönemine göre belli bir artış gözlenmektedir. Bu artışın nedeni, kaynaklardan yayılım hızına bağlı olabileceği gibi, mağaranın kışın ziyaretçilere kapalı olmasından dolayı sürekli kapısının kapalı kalması ve radon gazının içerde birikmesinden de kaynaklanmış olabilir. Çal Mağarası'nda ise bunun aksi bir durum söz konusudur. Yazın yüksek olan radon konsantrasyonu kışın düşmüştür. Mağaranın kışın sürekli kapalı kalmasından dolayı radon gazının kış döneminde daha yüksek olması beklenirdi. Bunun sebebi, kaynaklardan yayıma bağlı olabileceği gibi Çal Mağarası'nın Karaca Mağarası'na göre daha nemli olması hatta mağaranın altından kışın 1 metreyi dahi geçen Çal deresinin akması ve radon gazının suda çözünmesi olabilir. Ayrıca Çal Mağarası'nın kapısının dışarıdaki hava sirkülasyonunu kesebilecek bir özelliğe sahip olamayışı da etkili olabilir.

Radon gazının Radyum-226'nın bozunum ürünü olmasından dolayı her iki mağaradaki Ra-226 oranı radon gazı konsantrasyonu ile kıyaslanmalıdır. Karaca Mağarası'nda 43 Bq/kg 'lık Radyum-226 belirlenirken bu aktiviteden kaynaklandığı düşünülen yıllık radon konsantrasyonu 949 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. Keza Çal Mağarası'nda bu durum 33 Bq/kg 'a 372 Bq/m^3 'tür. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere iki mağaradaki radyum – radon konsantrasyonları arasında bir orantı mevcuttur. Lakin, Karaca Mağarası'na, belirli mesafelerle yerleştirilen dedektörlere karşılık gelen toprak numunelerinin radyum aktivitesi ile her dedektörün okuduğu radon konsantrasyonu arasında yapılan pair sample testinde korelasyon katsayısı, negatif yönde 0,225 olup önem değeri %5 in çok üstünde olduğu için, Karaca Mağarası'nda radon ve radyum arasında girişten itibaren belirli mesafelerde anlamlı bir ilişki bulunmamaktadır. Çal Mağarası'nda da benzer şekilde yapılan pair sample testinde korelasyon katsayısı, negatif yönde 0,736 olup, fakat önem değeri %'5 in üzerinde olduğu için radon ve radyum arasında bir bağıntı saptanamamıştır.

Karaca Mağarası'nın Çal Mağarası'yla radyum konsantrasyonlarının karşılaştırılmasında Karaca Mağarası'nda daha fazla radyum aktivitesi tespit edilmesine

rağmen, Çal Mağarası'nda Th-232 ve K-40 aktivitesi daha fazladır. Gama spektroskopisinden mağarada çalışan bir kişinin alacağı soğurulan ve yıllık efektif dozların hesaplanmasından Karaca Mağarası'nda soğurulan dozun $42,3 \text{ nGy.h}^{-1}$, Çal Mağarası'nda ise $50,6 \text{ nGy.h}^{-1}$ olduğu belirlenmiştir. Yıllık etkin doz ise Karaca Mağarası'nda $4,3 \text{ } \mu\text{Sv}$ iken Çal Mağarası'nda $4,2 \text{ } \mu\text{Sv}$ hesaplanmıştır. Çal Mağarası'nda yüksek aktiviteye göre daha fazla alınması beklenen yıllık dozun düşük olmasının sebebi Çal Mağarası'nda çalışan bir kişinin Karaca Mağarası'nda çalışan bir kişiden yıllık olarak 120 saat daha az çalışmasıdır. Eğer Çal Mağarasında çalışan kişide yılda 720 saat çalışmış olsaydı yıllık maruz kalacağı etkin doz $5,1 \text{ } \mu\text{Sv}$ olacaktı. Her iki mağarada da çalışan bir kişinin gama spektroskopisinden alacağı yıllık etkin doz UNSCEAR'ın belirttiği ortalama olarak insanların topraktan aldığı $70 \text{ } \mu\text{Sv}$ 'in çok aşağısındadır.

Yapılan bir başka çalışmada radon gazından alınan dozdur. Karaca Mağarası'nda yaz döneminde yıllık mağarada bulunma süresi 720 saat olan bir çalışanın alacağı ortalama yıllık etkin doz $2,32 \text{ mSv}$ iken kışında mağara açık kalsaydı radon gazının kışın artmasından dolayı $3,03 \text{ mSv}$ olacaktı. Yaz döneminde bir ziyaretçinin mağarada 30 dakika bulunma süresine göre alacağı yıllık ortalama doz $1,61 \text{ } \mu\text{Sv}$ iken kışın mağara açık kalsaydı bu değer $2,10 \text{ } \mu\text{Sv}$ olacaktı. Çal Mağarası'nda ise yaz döneminde yıllık mağarada bulunma süresi 600 saat olan bir çalışanın alacağı ortalama yıllık etkin doz $1,11 \text{ mSv}$ iken kışın mağara açık kalsaydı radon gazındaki düşüşten dolayı $0,66 \text{ mSv}$ olacaktı. Yaz döneminde bir ziyaretçinin mağarada 30 dakika bulunması durumunda alacağı yıllık ortalama doz $0,93 \text{ } \mu\text{Sv}$ iken kışın mağara açık kalsaydı bir ziyaretçinin ortalama alacağı yıllık doz, radon gazı konsantrasyonunun düşmesinden dolayı $0,55 \text{ } \mu\text{Sv}$ olacaktı. Doğal kaynaklardan yıllık maruz kalınan doz miktarı $2,4 \text{ mSv}$ olduğu gözönüne alınırsa Karaca mağarasında yaz döneminde çalışan bir kişinin maruz kaldığı doz miktarı neredeyse bu değere yakındır. Çal mağarasında ise yaz döneminde çalışan bir kişinin maruz kaldığı doz ortalama değerinin altında olmasına rağmen yine de yüksek sayılabilir. Her iki mağarada da Ziyaretçilerin maruz kaldıkları doz ise mikro sievert düzeyinde olup önem arzetmemektedir.

5. ÖNERİLER

Doğu Karadeniz Bölgesi'nde, ülkemizde ve hatta dünya çapında bilinen ve her yıl binlerce turisti misafir eden Karaca ve Çal mağaralarında yürütülen bu çalışmanın sonuçlarından da anlaşılacağı gibi, Karaca mağarası'nda çalışan bir kişinin neredeyse Dünyada doğal kaynaklardan alınan doz miktarı olan 2,4 mSv yıla yakın oranda doz aldığı, Çal mağarasında çalışan bir kişinin ise ortalama değere yakın olmasada yüksek miktardadır. Mağaralarda çalışan kişilerin sayısı arttırılarak vardiyalı olarak çalışması sağlanırsa çalışan kişilerin maruz kaldığı doz miktarı azaltılabilir. Bu çalışma yaz mevsimi için ve ayrıca ileriki dönemlerde kış döneminde de hizmet vermesi durumunda kış mevsimi içinde yapılmıştır. Yaz ve kış mevsimleri için tasarlanan bu çalışma bahar ayları da eklenerek ve hatta 2 veya daha fazla yıl olarak tekrarlanırsa mağara atmosferindeki radon konsantrasyonunda, tüm mevsimlere ve yıllara göre daha iyi bir istatistik sağlanabilir.

Çalışanların mağara içinde gama spektroskopisinden aldığı yıllık doz UNSCEAR'ın belirttiği ortalama 70 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'ın çok aşağısındadır. Gama spektroskopisi içerisine dahil olan radyum ve onun bozunum ürünü olan radon gazının, radyum ile orantısını belirlemek için numuneleme daha sık ve uzun dönemli yapılırsa geniş bir istatistiğe sahip olunabilir.

Dünyada bazı mağaralar, Radonterapi ve Speleoterapi merkezi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca başka bir çalışma yapılarak, her iki mağaranın Radonterapi ve Speleoterapi merkezi olarak kullanılıp kullanılmayacağı bu çalışmanın sonuçları ve başka çalışmalar yapılarak incelenebilir ve turizm tanıtımlarına katkı sağlanabilir.

Yapılan tüm çalışmalar bölgemizde ve Türkiye'nin sahip olduğu tüm turistik mağaralarda yapılarak, hem halk sağlığını korumak hem de bu konuda ülkemizin belirli mağaralarının terapi merkezleri olarak kullanılıp kullanılmayacağı incelenmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Al-Mustafa, H., Al-Jarallah, M.I., Ur-Rehman, F. ve Abu-Jarad, F., 2005. Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia, Radiation measurements., 40, 707-710.
- Andru, J., 2002. "Dosirad "Radon Laboratory" operation and procedures.
- Arya A P. (Edit: Şahin, Y.), 1999. "Çekirdek Fiziğinin Esasları", Aktif Yayın, Dağıtım LTD. ŞTİ., İstanbul.
- Atakan, Y., 2006. İyonlayıcı Radyasyon, Etkileri ve Sağlık Riski, Radyasyon ve Çevre Sempozyumu, 3.Sempozyum Tebliği, Çanakkale.
- Aytekin, H., Baldık, R., Çelebi, N., Ataksor, B., Taşdelen, M and Kopuz G., 2005. Radon Measurement in the Caves of Zonguldak (Turkey), Radiation Protection Dosimetry, 118, 117-121.
- Baldık, R., 2005. Gököl ve Cehennemağzı Mağaraları ile Amasra Taşkömürü İşletmesinde Radon-222 Ölçümü, Yüksek Lisans Tezi, Zoguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Bekaroğlu, C.E., 2006. Karaca Mağarasının Mikroklimatolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara
- Bilge, A.N., 1985 Nükleer Tekniklerin Endüstriye Uygulanması, Bilimsel Yayın No:1, TAEK/ÇNAEM Matbaası, İstanbul.
- Cigna, A.A., 2005. Radon in Caves, International Journal of Speleology, 34, 1-2, 1-18
- Çavaş, M., 2006. NaI Dedektörü ile Topraktaki Radyasyonun Ölçümü ve Maruz Kalınan Dozların Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Çelebi, N., 1995.Çevresel Örneklerde Uranyum, Radyum ve Radon Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Damla, N., 2005. Doğu Karadeniz Bölgesi İçme Sularında Toplam Alfa, Toplam Beta ve Gama Aktivitesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Duenas, C., 2005. Fernandez, M.C., Canete, S., ²²²Rn concentrations and the radiation exposure levels in the Nerja cave, Radiation Measurements 40, 630-632

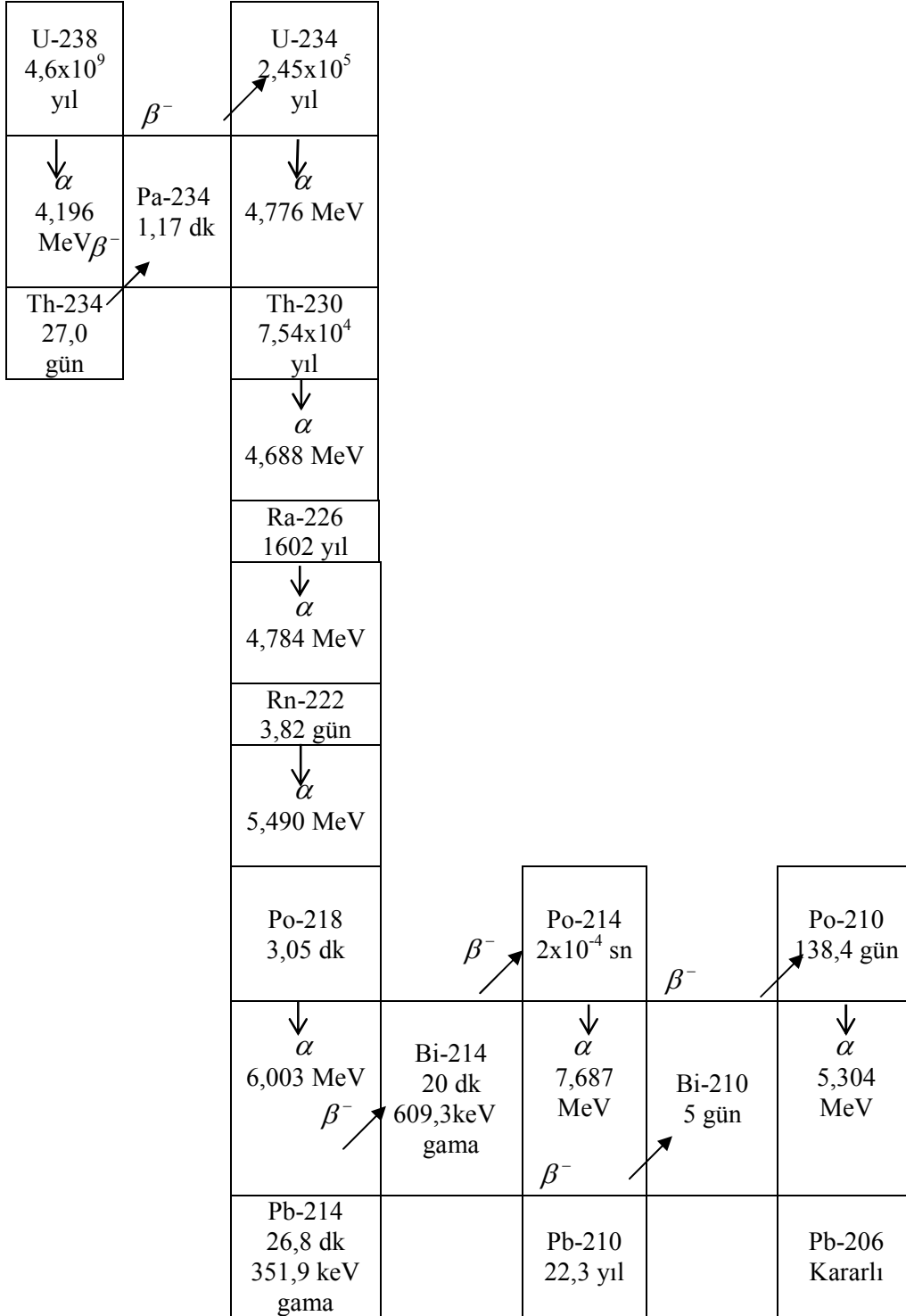
- Felmlee, J.K. ve Cadigan, R.A., 1987. Radium and Uranium Data for Mineral Springs in Eight Western States, United States Department of the Interior Geological Survey, Open- File Report 78-561.
- Fişne, A., Ökten, G. ve Çelebi, N. 2004. Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) Yer altı Maden Ocaklarında Radon Gazı Yayılımının İncelenmesi Zonguldak.
- Fişne, A., 2002. Yer altı Madenlerinde Radon Gazı Konsantrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi ve İşçi Sağlığı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gillmore, G.K., Phillips, P.S., Denman, A.R. ve Gilbertson, D.D., 2002. Radon in the Creswell Crags Permian Limestone Caves, Journal of Environmental Radioactivity, 62, 165-179.
- Günaydı, T., 2004. İzmir-Dikili Jeotermal Sahalarına Yakın Yerleşim Alanlarında Radon Konsantrasyonlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hewson, G.S. ve Ralph, M. I., 1994. An investigation into radiation exposure in underground non-uranium mines in Western Australia. Journal of Radiological Protection 14, 4, 359-370.
- IAEA., 1989. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, Vienna.
- ICRP-65, 1995. Protection againsts Radon-222 at home at work, International Commission on Radiological Protection (ICRP), Annals of ICRP, No: 65 oxford Pergamon Press.
- Karahan, G., 1997. İstanbul'un Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Tayini ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Kınacı, S.R., 1970. Çekirdek Işınlımları ve Radyoizotoplar, Ege Üniversitesi Matbaası.
- Krane, S. K. (Edit: Şarer, B.), 2001 Nükleer Fizik 1. Cilt Ders Kitabı, Birinci Baskı, Palme Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., Ankara.
- Lario, J., Sanchez-Moral, S., Canaveras, J.C., Cuezva, S. ve Soler, V., 2005. Radon Continuous Monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to Assess User's Annual Effective Dose, Journal Environmental Radioactivity, 80, 161-174.
- Lario, J., Sanchez-Moral, S., Cuezva, M, Taborda S. ve Soler, V., 2006. High ²²²Rn levels in a show cave (Castanar de Ibor, Spain); Proposal and application of management measures to minimize the effects on guides and visitors, Atmospheric Environment, 40, 7395-7400.
- Leet, L.D. ve Judson, S., 1963. Physical Geology, 2. Baskı, Englewood Clifts, New Jersey, Amerika.

- Ofluođlu, S., 1993. alky – Alazlı (Düzköy – Trabzon) yresinin karstlaşma ynnden incelenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Planini, J., Faj, D., Vukovi, B., Faj, Z., Radoli, V. ve Suveljak, B., 1993. Radon exposure and lung cancer. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 256, 2, 349-352.
- Przylibski, T. A., 1999. Radon Concentration Changes in The Air of Two Caves in Poland, Journal of Environmental Radioactivity, 45, 81-94.
- Sainz, C., Quindos, L.S., Fuente, I., Nicolas, J. ve Quindos, L., 2007. Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces : The case of tourist caves, Journal of Hazardous Materials, 145, 368 – 371.
- KT 1994, Arge Proje no 90.112.005.2, Trabzon Gmřhane Yresinde ki Karstik Mağaraların Jeolojik ve Hidrojeolojik İncelenmesi ve Turizme Kazandırılması.
- Togay, Y.E., 2002. Radyasyon ve Biz, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Radyasyon Sağlığı ve Gvenliđi Dairesi, Ankara.
- UNSCEAR 1982, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Annex A, Terrestrial Sources of radiation.
- UNSCEAR 1993, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Annex B Exposure from natural radiation sources.
- UNSCEAR 2000, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Annex B Exposure from natural radiation sources.
- Van, Ali., 2008. Jeoloji Bölümü Ođr. yesi, Kiřisel grřme, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Veiga, L.H.S., Melo, V., Koifman, S. ve Amara, E.C.S., 2004. High Radon Exposure in a Brazilian Underground Coal Mine, . Journal of Radiological Protection 24, 295-305.
- Yaramış, B., 1974. Neutron Fiziği, İstanbl Üniversitesi Fen Fakültesi Basımevi, İstanbl.
- Yaşar, S. 1970. Uranyum madenciliđin de radyasyon tehlikeleri, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara.
- URL-1, <http://www.safeguardradon.com>, 10 Nisan 2008,
- URL-2, <http://www.gumushane.gov.tr/turizm/magara.asp>, 25 Mart 2008.
- URL-3, http://www.taek.gov.tr/bilgi/elkitabi_brosur/brosurler/radon/radon.htm, 22Nisan 2008.

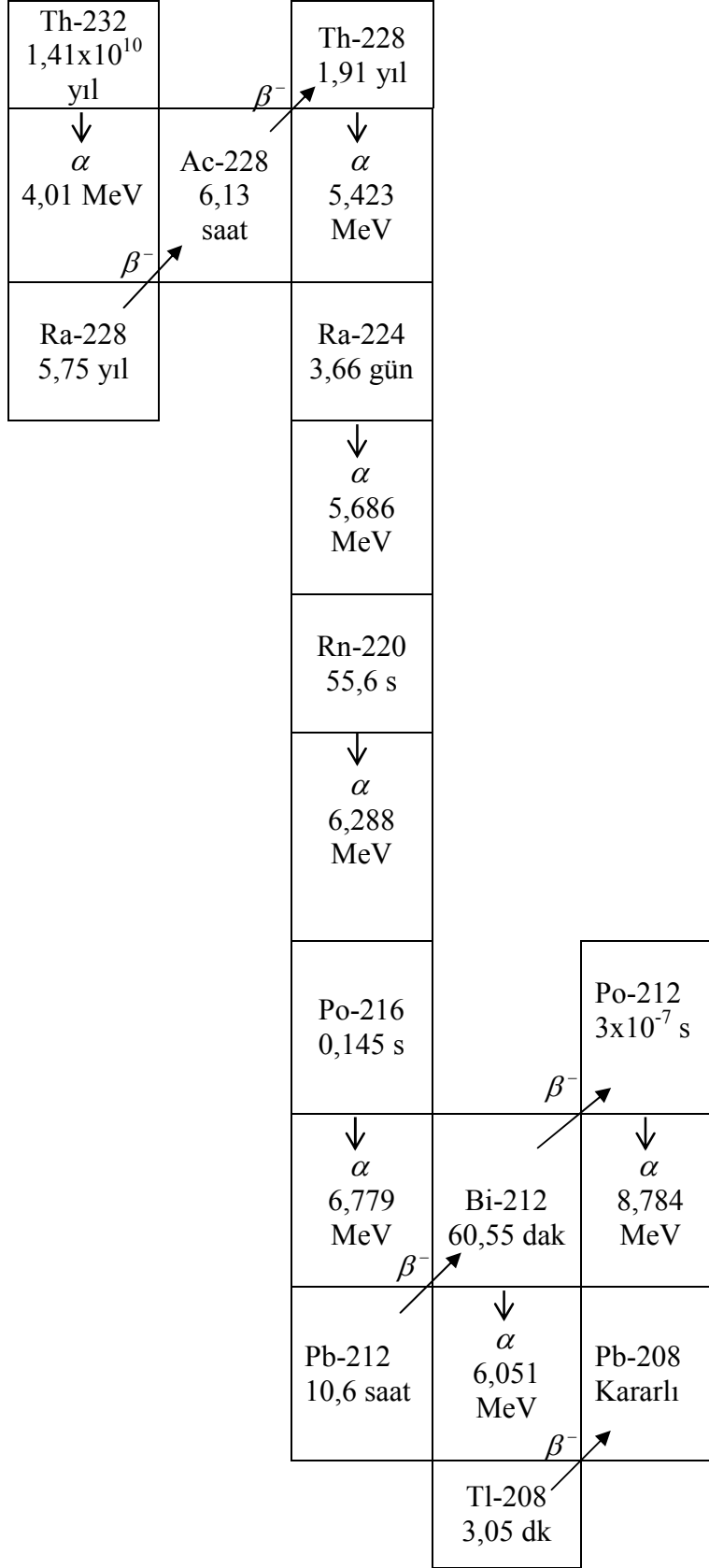
URL-4, http://www.taek.gov.tr/sanaem/html/saglik_fizik_birimi.html, 10 Şubat 2008.

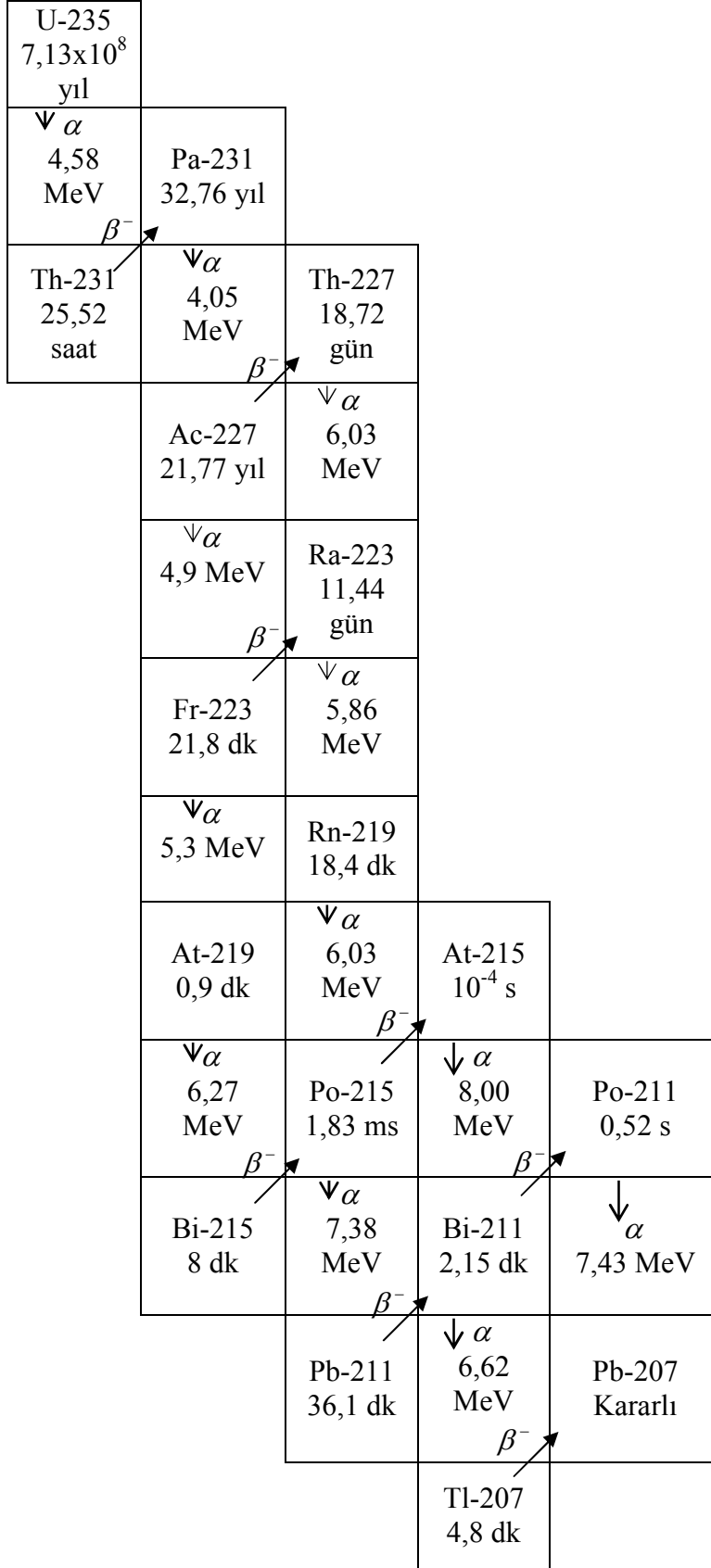
URL-5, <http://en.wikipedia.org/wiki/Radon>, 11 Nisan 2008.

7. EKLER



Ek Şekil 1. Doğal radyoaktif ²³⁸U serisi

Ek Şekil 2. Doğal radyoaktif ²³²Th serisi



Ek Şekil 3. Aktinyum radyoaktif bozunma serisi

ÖZGEÇMİŞ

16.04.1979 yılında Giresun'da doğdu. İlkokulu 1985–1990 yılları arasında Cumhuriyet İlköğretim okulunda, ortaokulu 1990-1993 tarihleri arasında Giresun Mehmet Akif Ersoy ortaokulunda, lise öğrenimini 1 yılı yabancı dil olmak üzere Giresun Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı Lise)'nde 1993-1997 tarihleri arasında tamamladı.

Üniversite Lisans öğrenimini Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde 2001-2005 yılları arasında tamamladı.

2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik anabilim dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı ve lisansüstü öğrenimine başladı, ders aşamasını tamamladı ve tez çalışmalarına devam etmektedir. Araştırmacı İngilizce bilmektedir.