KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

ORTA VE DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDEKİ KAPLICALARDA VE ÇEVRESİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Selcen UZUN DURAN

HAZİRAN 2013
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

ORTA VE DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDEKİ KAPLICALARDA VE ÇEVRESİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

Selcen UZUN DURAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (FİZİK)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28.05.2013
Tezin Savunma Tarihi : 18.06.2013

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Ana Bilim Dalında

Selcen UZUN DURAN Tarafından Hazırlanan

ORTA VE DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDEKİ KAPLICALARDA VE ÇEVRESİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

başlıklı bu çalışmada, Enstitü Yönetim Kurulunun 28/05/2013 gün ve 1507 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mahmut DOĞRU ……..

Üye : Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU ……..

Üye : Prof. Dr. A. Hakan YILMAZ ……..

Üye : Prof. Dr. Uğur ÇEVİK ……..

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali VAN ……..

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan kaplıcaların sularında havasında ve kaplıca çevrelerindeki topraklarda radyoaktivitenin ölçülmesi, yıllık etkin doz değerlerinin hesaplanıp ulusal ve uluslararası limit değerlerle karşılaştırılması bu tez çalışmasının amacıdır. Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlandı.

Tez çalışmam boyunca karşılaştığım bütün güçlüklerin aşılmasında beni yönlendiren, her türlü desteği ve imkânı sağlayarak değerli bilgilerinden yararlandığım, saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU'na en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarımda bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet Hakan YILMAZ'a ve Prof. Dr. Uğur ÇEVİK'e lisansüstü eğitimim boyunca öğrencisi olduğum tüm KTÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerine, Jeoloji Mühendisliği Öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Ali VAN' a, Yrd. Doç. Dr. Hakan ERSOY' a, Yrd. Doç. Dr. Arzu Fırat ERSOY' a ve Kimya Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Celal DURAN' a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Nevzat DAMLA' ya, Yrd. Doç. Dr. Necati ÇELİK' e, Arş. Gör. Ahmet ÇELİK 'e teşekkür ederim.

Bu çalışmada kullanılan Radon dedektörlerinin analizi, suların gross alfa ve gross beta ölçümleri ile kimyasal analizleri ÇNAEM (Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi)'de yapıldı. Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi'nde yaptığım çalışmalarda yardımlarından dolayı Dr. Halim TAŞKIN, Nesli ALBAYRAK ve Berna ATAKSOR olmak üzere tüm kurum çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım süresince maddi ve manevi destekleriyle daima yanımda bulunan ve arazi çalışmalarımda yanımda olan aileme ve özellikle eşim Mustafa DURAN'a en içten saygı ve sevgilerimi sunuyorum.

Ayrıca bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2008.111.001.6 nolu proje ile desteklenmiştir, desteklerinden dolayı K.T.Ü. Rektörlüğü' ne teşekkür ederim.

Selcen UZUN DURAN
Trabzon 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesindeki Kaplıcalarda Ve Çevresinde Doğal Radyoaktivite Seviyelerinin Belirlenmesi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU'nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/06/2013

Selcen UZUN DURAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET IX
SUMMARY X
ŞEKİLLER DİZİNİ XI
TABLOLAR DİZİNİ XVI
SEMBOLLER DİZİNİ XVIII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Radyoaktivite 7
1.3. Radyasyon Tanımı ve Türleri 9
1.3.1. İyonlaştırıcı Radyasyon 10
1.3.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon 11
1.4. Radyoaktif Bozunma Şekilleri 11
1.4.1. Alfa Bozunması 12
1.4.2. Beta Bozunması 13
1.4.2.1. β^- Bozunumu 14
1.4.2.2. β^+ Bozunumu 15
1.4.2.3. Elektron Yakalama 16
1.4.3. Gama Bozunması 16
1.4.3.1. Fotoelektrik Olay 18
1.4.3.2. Compton Saçılması 19
1.4.3.3. Çift Oluşum 21
1.5. Radyoaktif Bozunma Kanunu 22
1.5.1. Radyoaktif Numunenin Yarı Ömrü ve Ortalama Ömrü 23
1.5.2. Peşpeşe Bozunma Kanunu 25
1.5.2.1. Geçici Denge 27

1.5.2.2. Sürekli Denge 28
1.6. Radyasyon Birimleri 28
1.6.1. Aktivite Birimi 29
1.6.2. Işınlama birimi 29
1.6.3. Soğrulmuş Doz Birimi 30
1.6.4. Eşdeğer Doz Birimi 30
1.7. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (AEDE) 31
1.8. Radyasyon Kaynakları 31
1.8.1. Doğal Radyoaktivite ve Doğal Radyasyon Kaynakları 32
1.8.1.1. Kozmik Radyasyonlar 39
1.8.1.2. Karasal Radyasyonlar 41
1.8.1.3. Radon 43
1.8.1.3.1. Termal Sularda Radyoaktivite ve Radon 46
1.8.1.3.2. Radon Gazının Sağlık Etkileri 47
1.8.1.3.3. Radon Konsantrasyon Limitleri 48
1.8.1.4. Radon Risklerinin Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler 48
1.8.2. Yapay Radyasyon Kaynakları 49
1.8.2.1. Tıbbi Uygulamalar 51
1.8.2.2. Endüstriyel Uygulamalar 51
1.8.2.3. Nükleer Serpinti 52
1.8.2.4. Nükleer Güç Santralleri 52
1.8.2.5. Tüketici Ürünleri 52
1.9. Dedektörler 53
1.9.1. Dedektör Verimi 53
1.9.2. Ayırma Gücü (Rezülasyon) 53
1.9.3. Sodyum İyodür Dedektörü (NaI) 53
1.9.4. HPGe Detektörler 55
1.9.5. NaI(TI) ve Ge Dedektörlerinde Verim ve Çözünürlük 55
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 58
2.1. Ladik-Havza Kaplıcalarının Bulunduğu Bölgenin Jeolojik Yapısı 58
2.2. Ilıcaköy-Ayder (Rize) Kaplıcalarının Bulunduğu Bölgenin Jeolojik Yapısı 60
2.3. Toprak ve Su Örneklerinin Gama Spektrometrik Analizleri 63
2.3.1. Arazi Çalışmaları 63

2.3.2. Örneklerin Analize Hazırlanması 63
2.3.3. Deneysel Sistem 64
2.3.3.1. Deneysel Yöntem 67
2.3.3.1.1. Enerji Kalibrasyonu 67
2.3.3.1.2. Verim Kalibrasyonu 69
2.3.4. Spektrum Analizi 69
2.3.4.1. Aktivite Hesabı 70
2.4. Pasif Radon Ölçümleri 71
2.4.1. Radon Dozimetrelerinin Kaplıcalara Dağıtımı 71
2.4.2. Radon Dozimetrelerinin Analizi 72
2.4.2.1. Deneysel Sistem ve Ölçüm İşlemleri 73
2.5. Aktif Radon Ölçümleri 74
2.5.1. Deneysel Sistem 74
2.5.1.1 AlphaGUARD Detektörünün Yapısı 78
2.5.1.2. Genitron AlphaPUMP 81
2.5.2. AlphaGUARD ile Toprak Gazındaki Radon Yoğunluğunun Ölçümü 82
2.5.3. AlphaGUARD ile Suda Radon Yoğunluğunun Ölçümü 84
2.6. Havadaki Radyoaktivite Ölçümleri 85
2.6.1. Deneysel Yöntem 86
2.6.1.1. Enerji Kalibrasyonu 86
2.7. Toplam Alfa ve Toplam Beta Radyoaktiflik Ölçümleri 87
2.7.1. Deneysel Sistem 87
2.8. Suların Kimyasal Analizleri 89
2.8.1. Su Numunelerinin Kimyasal Analize Hazırlanması 90
2.8.2. Deneysel Sistem 90
3. BULGULAR 91
3.1. Kaplıca Sularının Kimyasal Analizleri 91
3.1.1. Anyon Katyon Değerleri 92
3.1.2. Suların pH Değerleri 93
3.1.3. Piper (Üçgen) Diyagramı ile Kaplıca Sularının Sınıflandırılması 94
3.2. Radyolojik Analiz Sonuçları 95
3.2.1. Radon 95
3.2.1.1. Kaplıca Hava Ortamında Kısa Dönem Aylık Ölçülen Radon Gazı Değerleri 96

3.2.1.1.1. Ayder Kaplıcası 96
3.2.1.1.2. Ilıcaköy Kaplıcası 98
3.2.1.1.3. Havza Kaplıcası 102
3.2.1.1.4. Ladik Kaplıcası 104
3.2.1.2. Kaplıcalar Havasında Mevsimlik Olarak Ölçülen Radon Gazı Değerleri 107
3.2.1.2.1. Ayder Kaplıcası 107
3.2.1.2.2. Ilıcaköy Kaplıcası 111
3.2.1.2.3. Havza Kaplıcası 115
3.2.1.2.4. Ladik Kaplıcası 118
3.2.1.3. Kaplıca Hava Ortamında Pasif Radon Gazı Konsantrasyonları 119
3.2.1.4. Kaplıca Sularında Radon Gazı Değerleri 121
3.2.1.5. Kaplıca Çevresindeki Topraklarda Radon Gazı Değerleri 122
3.2.2. Kaplıca Çevresi Topraklarında Radyonüklid Konsantrasyonu ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri 122
3.2.2.1. Ayder ve Ilıcaköy Kaplıcası Toprak Örneklerinin Radyoaktivite Seviyeleri ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri 123
3.2.2.1.1. Ilıcaköy Kayaç Örneklerinde İnce Kesit Araştırmaları 129
3.2.2.2. Havza ve Ladik Kaplıcası Toprak Örneklerinin Radyoaktivite Seviyeleri ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri 130
3.2.3. Kaplıca Sularında Radyonüklid Konsantrasyonları 137
3.2.4. Kaplıca Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Radyoaktiflik Ölçümleri 137
3.2.5. Kaplıca Ortamında Ölçülen Gama Dozları 138
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 141
5. ÖNERİLER 164
6. KAYNAKLAR 165
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

ORTA VE DOĞU KARADENİZ BÖLGESİNDEKİ KAPLICALARDA VE ÇEVRESİNDE DOĞAL RADYOAKTİVİTE SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

Selcen UZUN DURAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU
2013, 171 Sayfa

Bu çalışmada, Orta ve Doğu Karadeniz'de bulunan ve şifa amaçlı kullanılan kaplıcalardaki doğal radyoaktivite seviyeleri insan sağlığı açısından incelenmiştir. Bu amaçla, Orta ve Doğu Karadeniz'de bulunan kaplıcaların havasında, suyunda ve çevresindeki topraklarda radyoaktivite seviyeleri ölçülerek, yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanıp, insanların sürekli olarak almakta olduğu doğal radyasyona ek olarak kaplıcalardan almış oldukları radyasyon dozu hesaplanmış, uluslar arası limit değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında kaplıcalarda, kaplıca içindeki havada, suda ve kaplıca dışındaki toprakta aktif radon gazı ölçümleri sistematik olarak AlphaGUARD PQ 2000PRO dedektörü ile yapılmıştır. Ayrıca kaplıca havasındaki radon ölçümleri üçer aylık periyotlarla mevsimsel ortalama değeri pasif algılayıcı CR-39 dedektörleri kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar aktif dedektör AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Toprak ve su örneklerindeki doğal ve yapay radyonüklit konsantrasyonları ise HPGe gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Kaplıca sularında toplam alfa ve toplam beta aktiflikleri ölçülüp, suların kimyasal analizleri yapılmış ve suların sınıflandırılması amacı ile kimyasal analizler dikkate alınarak piper diyagramları oluşturulmuştur. Ayrıca kaplıca içinde soğurulan gama doz ölçümleri, portatif çevresel ölçüm cihazı NaI dedektörü (INSPECTOR 1000) kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen gama ışınlama doz hızlarından kaynaklanan eşdeğer dozlar hesaplanmış ve sonuçlar radyasyon güvenliği açısından tartışılmıştır. Elde edilen bulgular ve yapılan hesaplamalar sonucunda çalışılan bölge kaplıcalarına gelen hastalar ve çalışan personel için yıllık etkin doz eşdeğerleri ulusal ve uluslar arası standartlar ile karşılaştırılmış ve Ayder, Havza, Ladik Kaplıcalarında bulguların limit değerlerin altında, Ilıcaköy Kaplıcasında ise personel için limit seviyelerde iken gelen ziyaretçi ve hastalar için limit değerlerin altında olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimler: Radyoaktivite, Radon, Gama Spektrometresi, Yıllık Etkin Doz, AlphaGUARD, Orta ve Doğu Karadeniz, Termal Kaplıcalar

PhD. Thesis

THE DETERMINATION OF NATURAL RADIOACTIVITY LEVELS OF SPAS LOCATED IN THE MIDDLE AND EAST REGIONS OF BLACKSEA COAST, ANATOLIA

SUMMARY

Selcen UZUN DURAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Belgin KÜÇÜKÖMEROĞLU
2013, 171 Pages

In this study, natural radioactivity levels in the therapeutic spas located in the Middle and East Karadeniz regions were analyzed in view of human health. For this purpose, radioactivity levels in air, water, and soil surrounding the spas located in the Middle and East Karadeniz region were measured; annual effective dose equivalent was calculated; radiation dose people were exposed to due to the spas was calculated – including natural radiation which people are constantly exposed to and compared to international limit values. Within the scope of the study, the measurements of effective radon gas in air, water, and surrounding soil for the spas were systematically performed using the detector, AlphaGUARD PQ 2000PRO. Beside this, the indoor radon gas measurements in the spas were quarterly performed with CR-39 passive detectors (seasonal average value), and the results were compared to that of by AlphaGUARD PQ 2000PRO effective detectors. On the other hand, natural and artificial radionuclide concentrations in soil and water samples were measured using HPGe gamma spectrometer. Gross alpha and beta activities in thermal water were measured and the water was chemically analyzed. Considering the chemical analysis results, Piper diagrams were made so as to classify the water. In addition, the measurements of gamma dose absorbed in the spas were carried out using NaI detectors (INSPECTOR 1000), portable environmental measuring device. Equivalent doses by the gamma-irradiation dose rates obtained from the measurements were calculated and the results were discussed in terms of radiation safety. In the light of the findings obtained and the measurements carried out, annual effective dose equivalents for spa staff and patients visiting the spa were compared to national and international standards. As a result of the comparison, it was determined that the calculated values for Ayder, Havza, and Ladik spas were under the limiting values while the values for Ilıcaköy spa were around the limiting values for the staff but these values were under the limiting values for visitors and patients.

Key Words: Radiocativity, Radon, Gamma Spectrometer, Annual Effective Dose, AlphaGUARD PQ 2000PRO, Middle And East Regions of Blacksea, Thermal Spas

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Çekirdeklerdeki proton sayılarının nötron sayılarına göre değişim grafiği 9
Şekil 2. Enerji spektrumu 10
Şekil 3. Radyasyon geçirgenliği 11
Şekil 4. Fotonların enerjilerine bağlı olarak farklı maddeler ile etkileşimi 18
Şekil 5. Fotoelektrik olay 18
Şekil 6. Compton saçılması 20
Şekil 7. Çift oluşum 21
Şekil 8. Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi 23
Şekil 9. Peşpeşe bozunma grafiği 27
Şekil 10. Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri 32
Şekil 11. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri 33
Şekil 12. Uranyum 4n+2 serisi 34
Şekil 13. U^{235} (Aktinyum)'in bozunum serisi 35
Şekil 14. Doğal radyoaktif ^{232}Th serisi 36
Şekil 15. Neptinyum radyoaktif bozunma serisi 37
Şekil 16. Kozmik ışınlardan alınan dozun yüksekliğe göre değişimi 40
Şekil 17. Toryum ve Uranyumun üst kabuk içinde dağılımı 42
Şekil 18. Radonun bozunma şeması 43
Şekil 19. Radonun toprak gazı ile hareketi 44
Şekil 20. Çesitli alanlarda radon konsantrasyonu 45
Şekil 21. Radon ve havalandırma ilişkisi 49
Şekil 22. Dünya genelinde yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri 50
Şekil 23. Sintilasyon dedektörünün bölümleri 54
Şekil 24. NaI (Tl) ve Ge (Li) ile alınan spektrumlarının karşılaştırılması 56
Şekil 25. ^{137}Cs'nin NaI (Tl) ve Ge (Li) ile alınan spektrumlarının karşılaştırılması 57
Şekil 26. Havza ve Ladik (Samsun) sıcak su kaynakları ve çevresine ait genelleştirilmiş jeoloji haritası 59
Şekil 27. Ladik kaplıcası havuzu 60

Şekil 28. Havza kaplıcası havuzu 60
Şekil 29. Ilıcaköy (Ilıcaköy-Rize) ve Ayder (Rize) sıcak su kaynakları ve çevresine ait genelleştirilmiş jeoloji haritası..... 62
Şekil 30. Ayder kaplıcası havuzu 62
Şekil 31. Ilıcaköy kaplıcası havuzu 63
Şekil 32. Su numunelerinin gama spektroskopik analize hazırlamak amacı ile buharlaştırılması 64
Şekil 33. Dedektörün genel görünüşü..... 65
Şekil 34. Gama spektrometre sisteminin blok şeması 65
Şekil 35. Enerji Kalibrasyon Eğrisi 68
Şekil 36. Verim - Enerji Eğrisi 69
Şekil 37. Örnek spektrum 71
Şekil 38. CR–39 Radon dozimetresi..... 72
Şekil 39. Dedektör çipi ve kazıma diski 73
Şekil 40. Radosys ölçüm sistemi ve alfa izlerinin görüntüsü 73
Şekil 41. AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü 74
Şekil 42. AlphaGUARD PQ 2000PRO ölçüm cihazı ile çeşitli yerlerde yapılan ölçümler..... 76
Sekil 43. Nisan ayında Ilıcaköy-Havza'da ana havuzdan alınan grafik örnekleri..... 77
Sekil 44. AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları (P.R.M.A. Kullanım Klavuzu..... 78
Sekil 45. AlphaGUARD iyonizasyon odasının şematik gösterimi (P.R.M.A. Kullanım Klavuzu..... 79
Şekil 46. AlphaPUMP şematik gösterimi (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu) 82
Şekil 47. Toprak gazı radon ölçümünde kullanılan ekipmanın tanıtımı (P.R.M.A. Kullanım Klavuzu..... 83
Şekil 48. Havza Kaplıcası çevresinde toprakta radon gazı ölçümü..... 84
Şekil 49. AlphaGUARD ölçüm cihazı ile su ölçümü 84
Şekil 50. Inspector 1000 portatif dedektör..... 85
Şekil 51. Toplam alfa ve beta sayım cihazının blok diyagramı..... 88
Şekil 52. Toplam alfa ve beta sayım cihazı 88
Şekil 53. Suların toplam alfa toplam beta ölçümüne hazırlanma aşaması..... 89
Şekil 54. ICP-OES kimyasal analiz cihazı..... 90
Şekil 55. Kaplıca sularının piper diyagramı ile sınıflandırılması 94

Şekil 56. Ayder Kaplıcası A1 ortamında aylık maksimum, ortalama, minimum radon gazı değerleri 97
Şekil 57. Ayder Kaplıcası A1 ortamında ölçülen radon gazı seviyelerinin maksimum-minimum-ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması 98
Şekil 58. Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında maksimum, ortalama, minimum radon gazı değerleri 100
Şekil 59. Ilıcaköy Kaplıca I4 hava ortamında maksimum, ortalama, minimum, radon gazı değerleri 101
Şekil 60. Ilıcaköy Kaplıca I1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyelerinin maksimum, minimum, ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması 101
Şekil 61. Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyelerinin maksimum-minimum-ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması 102
Şekil 62. Havza H1 ortamında maksimum, ortalama, minimum Radon gazı değerleri 103
Şekil 63. Havza Kaplıcası H1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyelerinin Maksimum, minimum, ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması 104
Şekil 64. Ladik L1 hava ortamında maksimum , ortalama, minimum Radon gazı değerleri 106
Şekil 65. Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında ölçülen Radon gazı seviyelerinin Maksimum, minimum, ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması 107
Şekil 66. Sonbahar mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri 108
Şekil 67. İlkbahar mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri 109
Şekil 68. Kış mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri 109
Şekil 69. Yaz mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri 110
Şekil 70. Kış mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon, Rn hata değerleri 111
Şekil 71. İlkbahar mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon, Rn hata değerleri 112
Şekil 72. Sonbahar mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon gazı değerleri 112
Şekil 73. Yaz mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon gazı değerleri 113

Şekil 74. Kış mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında radon gazı değerleri 114
Şekil 75. İlkbahar mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında radon gazı değerleri 114
Şekil 76. Kış mevsiminde Havza Kaplıcası H1 hava ortamında radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri..... 115
Şekil 77. İlkbahar mevsiminde Havza Kaplıcası H1 hava ortamında radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri 116
Şekil 78. Sonbahar mevsiminde Havza Kaplıcası H1 hava ortamında radon gazı değerleri 116
Şekil 79. Yaz Mevsiminde Havza Kaplıcası H1 hava ortamında ölçülen radon, Rn hata, sıcaklık, nem konsantrasyonları 117
Şekil 80. İlkbahar mevsimi Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri 118
Şekil 81. Yaz mevsimi Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri..... 119
Şekil 82. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{238} Ukonsantrasyonlarının karşılaştırılması.... 124
Şekil 83. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması .. 125
Şekil 84. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{137} Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması . 125
Şekil 85. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{40} K konsantrasyonlarının karşılaştırılması 126
Şekil 86. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında^{238} U konsantrasyonlarının karşılaştırılması..... 127
Şekil 87. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması..... 128
Şekil 88. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması..... 128
Şekil 89. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması..... 129
Şekil 90. Ilıcaköy Kaplıcası Kayaç örneklerinde tespit edilen zirkon. 130
Şekil 91. Havza Kaplıcası topraklarında ^{238} U konsantrasyonlarının karşılaştırılması... 131
Şekil 92. Havza Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması .. 132
Şekil 93. Havza Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması .. 132
Şekil 94. Havza Kaplıcası topraklarında ^{40}K konsantrasyonlarının karşılaştırılması..... 133
Şekil 95. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{238} U konsantrasyonlarının karşılaştırılması ... 135
Şekil 96. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması... 135
Şekil 97. Ladik Kaplıcası topraklarında^{137} Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması ... 136
Şekil 98. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{40}K konsantrasyonlarının karşılaştırılması..... 136

Şekil 99. Ayder Kaplıcası A1, A2, A3, A4 kısmında aylık olarak ölçülen ortalama radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması 142
Şekil 100. Ayder Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 142
Şekil 101. Ilıcaköy Kaplıcası I1, I2, I3, I4, I5 ortamlarında ölçülen radon gazı seviyelerinin ortalama değerlerinin karşılaştırılması 143
Şekil 102. Ilıcaköy Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 144
Şekil 103. Havza Kaplıcası H1,H2, H3 kısmında aylık olarak ölçülen ortalama radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması 145
Şekil 104. Havza Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 146
Şekil 105. Ladik Kaplıcası L1, L2, L3 kısmında aylık olarak ölçülen ortalama radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması 147
Şekil 106. Ladik Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 147
Şekil 107. Çalışma kapsamındaki 4 kaplıcanın A1, I1, H1, L1 ortamlarında ölçülen radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması 148
Şekil 108. Kaplıca hava ortamında mevsimlik olarak ölçülen radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması 149
Şekil 109. Kaplıcadan alınan su örneklerinde ortalama radon konsantrasyonu değerlerinin karşılaştırılması 150
Şekil 110. Kaplıca çevresinde toprakta ölçülen radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması 151

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Alfa parçacığı yayımlayan bazı radyoizotoplar ve özellikleri 13

Tablo 2. Radyasyon terimleri ve özel birimleri ile SI birimleri arasındaki ilişki 31

Tablo 3. Doğada bilinen dört radyoaktif seri 38

Tablo 4. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan ortalama radyasyon doz değerleri 38

Tablo 5. Kozmik radyoizotoplar 41

Tablo 6. Bazı kayaç türlerindeki ve topraklardaki ortalama radyoaktivite konsantrasyonları 42

Tablo 7. Bazı yapay radyonüklitler 50

Tablo 8. Standart kaynağın özellikleri 68

Tablo 9. Aktivitesi hesaplanan elementler ve bozunma olasılıkları..... 70

Tablo 10. AlphaGUARD monitörünün bazı teknik ve fiziksel özellikleri (P.R.M.A. Kullanım Klavuzu)..... 75

Tablo 11. Kalibrasyon kaynağı..... 86

Tablo 12. Kaplıca suları için kimyasal analiz sonuçları(µg/L) 92

Tablo 13. Kaplıca suları için anyon-katyon sonuçları (mg/L)..... 93

Tablo 14. Kaplıca sularının pH değerleri 94

Tablo 15. Ayder Kaplıcası havada ortalama radon gazı konsantrasyonları 97

Tablo 16. Ilıcaköy Kaplıcası hava ortamında ortalama radon gazı konsantrasyonları..... 99

Tablo 17. Havza Kaplıcası havada ortalama radon gazı konsantrasyonları 103

Tablo 18. Ladik Kaplıcası hava ortalama radon gazı konsantrasyonları..... 105

Tablo 19. Ayder, Ilıcaköy, Havza, Ladik Kaplıcası için CR-39 dedektörü ile alınan sonuçlar..... 120

Tablo 20. Kaplıca sularında ölçülen radon gazı değerleri (Bq/L) 121

Tablo 21. Mevsimlik ölçümlerde kaplıca toprağında radon gazı değerleri..... 122

Tablo 22. Ayder Kaplıcası topraklarında radyonüklit konsantrasyonları..... 124

Tablo 23. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında radyonüklit konsantrasyonları 127

Tablo 24. Havza Kaplıcası topraklarındaki radyonüklit konsantrasyonları 131

Tablo 25. Ladik Kaplıcası topraklarındaki radyonüklit konsantrasyonları..... 134

Tablo 26. Kaplıca sularındaki radyonüklit konsantrasyonları 137

Tablo 27. Kaplıca sularındaki toplam alfa ve toplam beta konsantrasyonları 137

Tablo 28. Ayder Kaplıcası gama dozu değerleri 138
Tablo 29. Ilıcaköy Kaplıcası gama dozu değerleri 139
Tablo 30. Havza Kaplıcası gama dozu değerleri 140
Tablo 31. Ladik Kaplıcası gama dozu değerleri 140
Tablo 32. Mevsimlik ölçümlerde kaplıca toprağında havasında ve suyunda ölçülen radon gazı değerleri 151
Tablo 33. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca sularında, havasında ve çevresindeki topraklarda radon gazı konsantrasyonları 153
Tablo 34. Hastalar ve Kaplıca personeli için CR-39 pasif radon dedektörü sonuçlarına göre hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri (AEDE) 155
Tablo 35. Hastalar ve Kaplıca personeli için AlphaGUARD aktif radon dedektörü sonuçlarına göre hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri (AEDE) 156
Tablo 36. Radon içeren kaplıca sularının içilmesi ile kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğeri 157
Tablo 37. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca çevresi topraklarında radyonüklid konsantrasyonları 158
Tablo 38. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca sularında radyonüklid konsantrasyonları 159
Tablo 39. Bazı radyoçekirdeklerin doz katsayıları 160
Tablo 40. Kaplıca sularındaki radyoaktif çekirdeklerin yıllık etkin doz eşdeğerleri 160
Tablo 41. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca sularında toplam alfa ve toplam beta konsantrasyonları 162
Tablo 42. Ölçülen gama doz değerlerinin mSv/y olarak karşılığı 162

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

A : Aktiflik

BEIR : Biological Effects of Ionizing Radiation

Bq : Becquerel

Ci : Curie

D : Soğurulan doz

Gy : Gray

Sv : Sievert

ppm. : Parts per million

ÇNAEM : Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi

EPA : Environmental Protection Agency

IAEA : International Atomic Energy Agency

IARC : International Agency for Research on Cancer

ICRP : International Commission on Radiological Protection

ICRU : International Commission on Radiation Units

NRPB : National Radiological Protection Board

TAEK : Türkiye Atom Enerji Kurumu

UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

$T_{1/2}$: Yarı ömür

λ : Bozunma sabiti

τ : Ortalama ömür

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Sağlık sorunlarının oluşumunda iki temel neden vardır; bünyesel ve çevresel etmenler. Çevresel etmenler ve bunlara neden olan öğeler halk sağlığı açısından giderek daha önemli olmaktadır ve bu etmenlerin toplum sağlığı üzerindeki etkileri kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Çevrede insan sağlığını doğrudan veya dolaylı etkileyebilecek etkenlerin başında insanların var oldukları günden bu yana birlikte yaşamakta oldukları doğal ve yapay yollardan maruz kaldıkları radyasyon gelmektedir. Radyasyon sürekli iç içe olduğumuz, yaşadığımız çevrenin bir parçasıdır. Radyasyonun temel kaynakları, kayalar ve toprakta bulunan doğal radyonüklidlerden kaynaklanan radyasyon ile havadaki ve yiyeceklerdeki doğal radyoaktif maddeler ve kozmik ışımalardır. Doğal ve yapay olmak üzere ayrılan radyasyon, yaptığı etki bakımında da iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır. Genelde doğal kaynaklardan ortaya çıkan iyonlaştırıcı radyasyon, maddeyle etkileşerek atomlarının elektronik yapısını değiştirebilir ki bu da sağlık sorunlarına sebebiyet verir. Bu sebeple insanların doğal kaynaklar nedeniyle maruz kaldığı radyasyon miktarlarının belirlenmesi amacıyla birçok araştırmalar ve ölçümler yapılmaktadır.

İçinde yaşadığımız dünyanın havasında, suyunda, toprağında doğal radyoaktif maddeler bulunmaktadır. Çevresel radyasyona katkı sağlayan doğal ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K gibi radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları toprak ve kaya tiplerine göre değişir. Aktivite konsantrasyonu, yerden 1 m yükseklikte havadaki soğurulmuş doza karşılık gelen radyasyon şiddetidir (Beck, 1982). Bu nedenle havada ölçülen radyasyon dozu topraktaki radyonüklit konsantrasyonları ile yakından ilgilidir. Volkanik kayaların aktivite konsantrasyonları tortul kayalarınkine nazaran daha yüksektir. Bununla birlikte tortul ve fosfat kayalarda oldukça yüksek aktive konsantrasyonlarına sahiptirler (NCRP, 1977).

Uranyumun doğal bir radyoizotopu olan ^{238}U değişik konsantrasyonlarda kaya ve topraklarda bulunur. ^{238}U' in doğal bozunma zincirinden radyoaktif olan ve soy gaz özelliği gösteren ^{222}Rn oluşur. Yaygın olarak bulunan radonun değişik bölgelerde salınım bakımından farklılık gösterdiği bilinmektedir. Aynı yerleşim bölgesinde bile zamana bağlı olarak değişim söz konusudur. Sonuçta yeraltı kayalarının uranyum derişimi en önemli

radon salınım nedenidir. Radon insan aktivitelerinden değil doğal süreçlerin sonucunda insana zarar verebilen çevresel etmenlerden birisidir.

Termal yeraltı suları ülkelerin değerli doğal kaynaklarından biridir ve sağlık, turizm amaçlı olarak kullanılmaktadırlar. Bu sular yeryüzünün derinliklerinden çıkıp yüzeye ulaşmaktadır ve içerikleri geçtikleri bölgelerin jeolojik yapısı tarafından belirlenmektedir. Yüzeye çıkan su, yeraltı kayaçlarına ve topraklara temas ederek farklı elementleri de beraberinde taşır. Yeraltı suları geçtikleri kayalardaki radyoaktif maddeleri çözündürerek radyoaktif özellik kazanır. Bu sularda sık rastlanılan belli başlı radyoaktif maddeler ^{40}K, ^{232}Th, ^{238}U dir. Ayrıca ^{238}U'in bozunması sonucu ortaya çıkan ^{222}Rn ve ^{226}Ra yeraltı sularında bulunabilir. Yeraltı jeolojik oluşumların içeriğinde bulunan kimyasal bileşikler suda eriyebilme derecelerine göre yeraltı sularına az ya da çok oranda karışır. Çözünmüş maddelerin miktarı, jeolojik oluşumlarla yeraltı suyunun temas süresine, suyun akış hızına ve sıcaklığına, oluşumun cinsine ve ortamın basıncına bağlı olarak değişir(Valkovic, 2000-Al Jundi, 2002). Halkın yaygın olarak kullandığı bu suların kimyasal ve radyoaktivite içeriklerinin bilinmesi önemlidir. Bu sulardaki radon içeriği insan sağlığını yakından ilgilendirmektedir. Bu sular üzerine kurulmuş kaplıcalardan ya da suların doğal oluşum bölgelerinden faydalanan insanlar belli bir düzeyde radona maruz kalır. Radyoaktif bir gaz olan radon, solunumla vücuda alındığında iç ışınlama oluşturmaktadır. Dünyadaki akciğer kanserlerinin sebepleri arasında radon önemli bir yer tutmaktadır (Wichmann vd., 2002).

Radyoaktif maddelerden özellikle radonun bol bulunduğu sularla ve radonlu buharla yapılan uygulamaları içeren kaplıcalarda birçok hastalığın iyileştirilmesine, ağrıların dindirilmesine çalışılmaktadır. Böylelikle deriden radon vücuda işlerken, hastalar, kapalı kaplıca havasındaki yüksek nemli ve radonlu buharı da solunumla akciğerlerine çekmektedirler. Bazı kaplıcalarda da hastaların vücudu radonlu buhar püskürtülerek yıkanmaktadır (Atakan, 2007). Bunun sonucunda hem deriden ve hem de nefes yoluyla akciğerlerden radon kana girmektedir. Bu uygulamalarla vücuttaki ağrıların gitgide azaldığı ve ilaçlara gerek kalmadığı ileri sürülmektedir. Fakat umulan bu olumlu etkiler nedeniyle, radonun vücutta 'ek bir radyasyon dozu' oluşturduğu gerçeği gözardı edilmektedir. İnsanların kaplıcalarda alabileceği bu "ek radyasyon dozu" sürekli olarak almakta olduğumuz "doğal radyasyon dozu" ile karşılaştırılarak ek dozun oluşturabileceği riskler belirlenmelidir.

Literatürde, kaplıcalarda radyasyon düzeylerini belirlemeye yönelik yapılmış sınırlı sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu tür çalışmaların ülkemizde çok az ve

sistematik olmadığı görülürken, dünyadaki diğer ülke kaplıcalarında özellikle radon gazı ön plana alınarak çalışmalar yapılmaktadır.

Ülkemizde kaplıcalar ve çevresinde doğal radyasyon düzeyinin belirlenmesine yönelik çalışmalara örnek vermek gerekirse; Kestanbol (Çanakkale-Ezine) kaplıcasında ve buraya 1 km uzaklıktaki Körüktaşı kasabasında 50 evde iç ve dış gamma dozları ve radon kosantrasyonu belirlenmiştir. Kaplıca çevresindeki evler için yıllık etkin doz hesapları yapılmıştır. Yaz ve kış sezonunda iç ortamda ortalama radon konsantrasyonu 159±22 Bq/m^3 olarak bulunmuştur. Kaplıca çalışanları için iç ortamdan kaynaklanan yıllık etkin doz 1,32 mSv olarak hesaplanmıştır. Körüktaşı beldesinde yerli köylüler için ortalama yıllık etkin doz değeri 2,34 mSv olarak hesaplanmıştır (Çelebi vd., 1997). Marmara Bölgesinde jeolojik olarak aktif olmayan Gebze (Kocaeli) ilçesi ile jeolojik olarak aktif ve kaplıcalar bakımından zengin olan Armutlu (Yalova) ilçesinin topraklarında ve seçilmiş aynı tip binalarında radon gazı konsantrasyonları karşılaştırılmıştır. 1 metre derinliğinde topraktaki radon gazı seviyesi Gebze mevkiinde 12-30 kBq/m^3, kaplıcalar bakımından zengin olan Armutlu mevkiinde 116-148 kBq/m^3 olarak bulunmuştur. Havadaki radon konsantrasyonları 2 hafta süreli olarak aktif olarak radon ölçen Radon Scout aleti ile ölçülmüştür. Gebze mevkiinde 400 Bq/m^3 olan sınır değerden oldukça düşüktür. Armutlu mevkiinde ise sınır değer olan 400 Bq/m^3 den 20 kez daha fazla radon konsantrasyonu olduğu görülmüştür (Seyis vd., 2010). İzmir- Dikili jeotermal bölgesinde beş yerleşim yerinde yapılan bir çalışmada havada radon ölçümleri üç aylık periyotlarla CR-39 dedektörleri kullanılarak yapılmıştır. Kaynak sularında, belediye suyunda, köy çeşmelerinde ve kaplıca sularında radon ölçümü likit sintilasyon dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Her bölgeden toplanan toprak örnekleri analizleri ve ^{226}Ra konsantrasyonları HPGe dedektörü kullanılarak belirlenmiştir. Radondan kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanmıştır. Dikili jeotermal bölgesindeki radon konsantrasyonları 31 ile 280 Bq/m^3 seviyesindedir. Yıllık etkin doz eşdeğeri 2,62 mSv olarak hesaplanmıştır (Yarar vd., 2006). Kahramanmaraş ilinde bulunan Süleymanlı ılıcası ve Ekinözü kaplıcası sularında toplam alfa ve toplam beta radyoaktivite konsantrasyonları ve radyonüklid aktivite konsantrasyonları ölçülmüştür. Bunlara ek olarak, Süleymanlı ılıcası ve Ekinözü kaplıcası sularının elemental analizleri yapılmıştır. Süleymanlı ılıcası sularında ^{232}Th seviyesi 83,6 Bq/kg, ^{238}U seviyesi 140,4 Bq/kg, ^{40}K seviyesi 208 Bq/kg, Ekinözü kaplıcası sularında ^{232}Th seviyesi 165 Bq/kg, ^{238}U seviyesi 1087 Bq/kg, ^{40}K seviyesi 2912 Bq/kg ölçülmüştür. Su numunelerinde toplam alfa ve toplam beta seviyeleri Süleymanlı ılıcası için sırası ile

0,108±0,015 Bq/L, 0,121±0,010 Bq/L, Ekinözü kaplıcası için 0,299±0,084 Bq/L, 0,072±0,008 Bq/L bulunmuştur (Söğüt vd., 2011). İzmir Seferihisar Doğanbey fay hattında yer alan termal sularda yapılan bir çalışmada 2005-Temmuz ve 2007-Aralık tarihleri arasında aylık periyotlarla, belirlenen istasyonlardan su numuneleri alınmıştır. Sularda radon ölçümleri kollektör yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca ilave olarak sularda pH, elektrik geçirgenlik değerleri, Na^2CO_3, Na^+, K^+, Ca^{++} ,Mg^{++}, Cl^-, HCO_3^-, SO_4 ve B analiz edilmiştir. Cumalı İstasyonu termal sularında radon konsantrasyonlarının 0,1-16,6 Bq/L, Karakoç istasyonu termal sularında radon konsantrasyonlarının 0,3-10,2 Bq/L, Doğanbey-1 istasyonu termal sularında radon konsantrasyonunun, 0,3-56,3 Bq/L ve Doğanbey-2 istasyonu termal sularında radon konsantrasyonu, 0,3-7,7 Bq/L arasında değiştiği gözlenmiştir (Camgöz vd., 2010).

Dünyada yapılmış olan çalışmalara örnek vermek gerekirse; İspanya da kaplıcalarca zengin olan Cantabria bölgesinde yapılan bir çalışmada kaplıca suyunda radon ve radyum ile kaplıca havasında radon konsantrasyonu ölçülmüştür. Kaplıcada ölçülen sudaki radon konsantrasyonu 824 Bq/L oda havasında ise 5000 Bq/m^3 ün üzerinde bulunmuştur. Bu nedenle ülkedeki bütün radyoaktif su kaynaklarının radon konsantrasyonunun ölçülmesi, burada çalışan tüm elemanların ise radyasyona karşı koruyucu önlemler alınmaksızın çalıştırılmaması gerektiği belirtilmektedir (Soto vd., 1995). Brezilya'da Lima ve Bonotto 1996'da yeraltı sularında radon konsantrasyonlarını ölçmüşler ve değerlerin 25,47 Bq/L ile 784,11 Bq/L arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir(Lima ve Bonotto, 1996). Sırbistan'ın Niska- Banja kasabasında 2000 yılı mart-haziran ayları arasında 190 ev, daire ve 11 ofiste (6'sı spa tesisli otel) havadaki radon konsantrasyonu ölçülmüştür. Ölçüm sonucuna göre radon konsantrasyonunun %47'si 200 Bq/m^3 ten az, %26'sı 201-600 Bq/m^3 arasında, %27'sinin 600 Bq/m^3 ten fazla olduğu görülmüştür. Çamur banyosu için kullanılan "radyoaktif çamur" adındaki çamurda radyonüklid tayini yapılmıştır. Numuneler HPGe dedektörü ile ölçülmüştür. Ofislerdeki radon konsantrasyonu 45-800 Bq/m^3, Spa kompleksli okullarda 200-1320 Bq/m^3 arasında ölçülmüştür (Manic vd., 2006). Slovenya'da yapılan bir çalışmada beş kaplıca incelenmiş ve bu kaplıcalarda radon gazı ölçülüp, gama doz oranı araştırılmıştır. Etkili havalandırma sistemi nedeni ile tüm kaplıcalarda havada ölçülen radon gazı değeri 200 Bq/m^3 değerinden düşüktür. Gama doz oranı değerlerinin de çalışan personel için limit değerlerden düşük olduğu tespit edilmiştir (Vaupotič vd., 2001). Tunus'taki hidroterapi kaplıca merkezlerinde çalışan personelin ve hastaların radondan kaynaklanan risklerini tahmin etmek amacıyla yapılan bir çalışmada

radon konsantrasyonunu belirlemek için nükleer track dedektörler kullanılmıştır. Radon konsantrasyonu 33-589 Bq/m^3 ölçülüp, potansiyel alfa enerji konsantrasyonu (PAEC) 73-780 nJ/m^3 arasında hesaplanmıştır. Rn-222'den kaynaklanan ışınlanma yıllık doz değerlerini personel ve hastalar için hesaplamışlardır. Personel için 0,1-1,2 mJh/m^3 hastalar içinde $2{,}6.10^{-4}$– $9{,}4.10^{-3}$ mJh/m^3 arasında değerler bulunmuştur. Yıllık etkin doz personel için 0,2-1,7 mSv, hastalar için $2{,}8.10^{-4}$-$1{,}1.10^{-2}$ mSv olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin ICRP limitlerinden düşük olduğu görülmüştür (Labidi vd., 2006). Polonya'da kaplıca bölgesinde yapılan bir çalışmada 24 içme ve 115 kaynak suyunda Rn-222 aktivite konsantrasyonu belirlenmiş ve değerlerin 4,2±0,4 Bq/L ile 1703±55 Bq/L arasında değiştiği görülmüştür (Kozlowska vd., 2010). Balkanlarda birkaç termal ve mineral kaynağın bulunduğu Niska Banja bölgesinde yapılan bir başka çalışmada su sıcaklıkları 12 ^{0}C ile 39 ^{0}C arasında değişen kaplıcalarda çalışılmıştır. Bu çalışmada uzun dönem havada radon-toron konsantrasyonunu ölçmek için UFO ve CR-39 pasif dedektörleri kullanılmıştır. Kısa süreli ölçümler için AlphaGUARD PQ2000 dedektörü kullanılmıştır. Toprakta radon konsantrasyonunu belirlemek için AlphaPUMP radon monitörü cihaza bağlanmıştır. Suda radon ölçümü için AquaKIT ekipmanları kullanılmıştır. Ayrıca iç ve dış ortamda gama doz oranları ölçülmüştür. Topraktaki radyoaktif elementler NaI(TI) dedektörü ile ölçülmüştür. İç ortamdaki havada radon ölçümü pasif dedektörler ile 620-4010 Bq/m^3 arasında, aktif dedektör ile 775 ile 5780 Bq/m^3 arasında değişen değerler almaktadır. Gama doz oranları ise 110 $nSvh^{-1}$ ile 550 $nSvh^{-1}$ arasında değişmektedir. Topraktaki toron konsantrasyonu 20-46 $kBqm^{-3}$ değerleri arasındadır. Topraktaki radon konsantrasyonu oldukça yüksektir. Bazı yerlerde dedeksiyon limitini aşmaktadır (2 MBq/m^3) (Zunic vd., 2006). Yunanistan'ın Lesvos adasında termal sularda radon konsantrasyonu 1999 ve 2002 yaz sezonları arası ölçülmüştür. Her bir kaplıcada tedavi odası ve dinlenme odası olmak üzere iki bölüm ölçülmüştür. Termal sulardaki radon AlphaGUARD PQ2000Pro'nun Aqua Kiti ile ölçülmüştür. Kaplıca içinde radon konsantrasyonu konsantrasyon 10 dakikalık modda ölçülmüştür. Kaplıca suları için radon gazı seviyesi 13,8 Bq/L ile 236,6 Bq/L değerleri arasında bulunmuştur. Kaplıca çalışanları için yıllık etkin doz eşdeğeri 4,55 mSv ile 0,76 mSv hastalar için ise 0,15 mSv ile 0,03 mSv arasında değerler bulunmuştur (Vogiannis vd., 2004). Brezilya'da zengin uranyum ve toryum mineralleri bulunan Minas Gerais şehrinde Termas ve Araxa kaplıcalarında mineralli su ve çamur, terapi amaçlı kullanılmaktadır. Bu kaplıcalarda yapılan çalışmada radon doz hesapları çalışanlar ve hastalar için hesaplanmıştır. Radon ölçümleri pasif metot

ile yapılmış ve 258±20 Bq/m^3 ile 1634±111 Bq/m^3 arasında değişen sonuçlar bulunmaktadır. Hastaların yılda minimum 21 saat, çalışanlar ise günde 8 saatten yılda 2000 saat kaplıcada kaldıkları hesaplanarak doz hesapları yapılmıştır. Etkin doz kaplıca çalışanları için 20 $mSv.y^{-1}$ limit değerinden düşüktür. Hastalar için ise doğal kaynaklardan alınan doz olan 2,4 $mSv.y^{-1}$ değerinden daha düşüktür (Campos vd., 2010). Çin'de (Guangdong) sıcak su kaynağında ve bu çevrede kurulmuş olan 4 tane sıcak su kaynaklı otelde iç ve dış havada NR-667A(III) dedektörleri kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Radon konsantrasyonları kaynak suyunda 53,4–292,5 Bq/L, dış havada 17,2-190,9 Bq/m^3 aralığında bulunmuştur. Topraktan olan gaz sızıntısı, odalarda sıcak su kaynağının kullanılması ve etkisiz havalandırma sistemi içerideki radon seviyesini artırmakta olduğu belirlenmiştir (Gang Song vd. 2005). İtalya'da iki jeotermal bölgede toplam 250 pasif dedektör kullanılarak radon gazı ölçümü yapılmıştır. Sonuçların 98 Bq/m^3 ile 43 Bq/m^3 arasında olduğu görülmüştür (Ciolini vd., 2010). İspanya'da 82 kaplıcada sularda gross-alfa ve gross-beta ile ^{226}Ra ve ^{222}Rn konsantrasyonu belirlenmiştir. Gross-alpha ve gross-beta konsantrasyonu sırası ile dedeksiyon limitinin altında (LLD) ile 17 Bq/L ve LLD ile 60 Bq/L arasında değerler ölçülmüştür. ^{226}Ra konsantrasyonu LLD ile 3,660 mBq/L arasında, ^{222}Rn konsantrasyonu ise LLD ile 1868 Bq/L arasında değerler aldığı görülmüştür (Ródenas vd., 2007). Hindistan'da termal kaynak sularında radyum, radon ve hava ortamındaki radon konsantrasyonunu belirleyip radondan kaynaklanan doz oranı hesaplanmıştır. Havadaki radon konsantrasyonu 84 Bq/m^3 ile 827 Bq/m^3 ve ortalaması 429±12,72 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. Sudaki radon konsantrasyonu 5,65 Bq/L ile 55,66 Bq/L arasında değerler almış ve ortalaması da 28,88±0,85 Bq/L olarak ölçülmüştür (Kant vd., 2005)**.** Sırbistan'ın Niška Banja olarak bilinen bölgesindeki kaplıcalarda radon gazı çeşitli hastalıkların iyileştirilmesinde tıbbi amaçlı kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada termal havuzlarda ve terapi odalarında radon gazı konsantrasyonu belirlenmiştir. Maksimum radon konsantrasyonu 22,90±0,57 kBq/m^3 olarak otelin bodrum katında ölçülmüştür ve burada çalışan personel için radon gazından kaynaklanan doz hesaplanmıştır (Nikolov vd., 2012).

Yapılan literatür çalışmasından da görüldüğü gibi çalışılan kaplıcalar ve çevresindeki radyoaktivitenin tam ve sistematik olarak belirlendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Doğal ve yapay olarak bulunabilen radyoaktif elementlerin insan hayatını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Çeşitli rahatsızlıkları nedeniyle şifa bulmak amacıyla gidilen kaplıcalardaki radyoaktivite düzeyinin tayini ve özellikle doğal radyasyonun büyük çoğunluğunu

oluşturduğu için radon düzeyinin belirlenmesi insan sağlığı açısından çok önemlidir. Bol radonlu sulara ve kaplıcalara girenlerin derilerinden radon kan dolaşımına girer. Bu radonlu sular içilirse de radon mide-bağırsak derisi yoluyla kan dolaşımına girer. Radondan türeyen ağır metal tanecikleri ise özellikle akciğerlere yerleşip yaydıkları alfalar ve diğer ışınlarla uzun süre vücutta oluşturdukları radyasyon dozu ile etkili olurlar. Radyasyon dozu ise iyonlaştırıcı radyasyonun vücutta oluşturabileceği etkinin bir ölçüsüdür. Radyasyon dozu arttıkça insan vücudunda kanser gibi hastalıkların ortaya çıkma olasılıklarının arttığı bilinmektedir. Sağlık örgütlerinin belirlediği seviyenin üzerinde radyasyona maruz kalmak insanlarda çeşitli rahatsızlıklara ve hatta ölümlere sebep olmaktadır. Bu nedenle vücudun aldığı radyasyon dozunun bilinmesi ve gerekiyorsa aşırı radyasyon dozunu önleyici önlemlerle dozu sınırlamak gerekmektedir. Doğu Karadeniz Bölgesinde içme sularında ve doğal kaynak sularında (Kobya, 2011-Damla, 2006) radyonüklid aktiviteleri, toplam alfa, toplam beta analizleri yapılmış ancak kaplıcalarda ise bu türde yapılan bir çalışmaya literatürde rastlanamamıştır. Bu nedenden dolayı, Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan (Ayder, Ilıcaköy, Havza, Ladik) kaplıcaların havasında, suyunda ve çevrelerindeki topraklarda radyoaktivitenin sistematik olarak ölçülmesi, yıllık etkin doz değerlerinin hesaplanıp ulusal ve uluslar arası limit değerlerle karşılaştırılması bu tez çalışmasının amacını oluşturmaktadır. Ayrıca bu tipteki çalışmalar (yaklaşık 80 kaplıca) ülkemizdeki diğer bölgelerde de başlatılıp sistematik (aylık radon) olarak Türkiye için bir kaplıca radon haritası çıkartılmalıdır.

1.2. Radyoaktivite

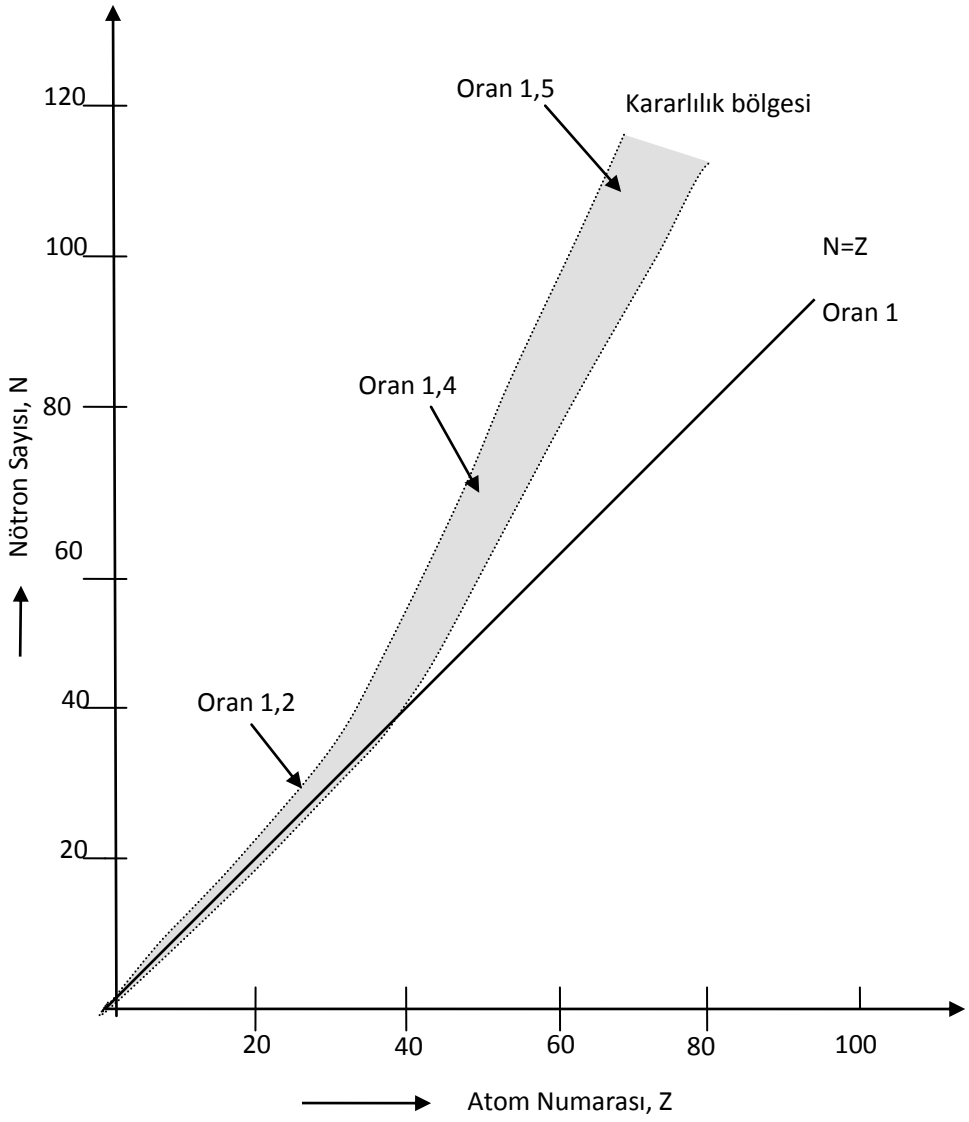
Kararsız atom çekirdeklerinin dışarıdan enerji almadan kendiliğinden bölünerek; elektromanyetik radyasyonlar, alfa ve beta parçacıkları yayınlamak suretiyle başka atom çekirdeklerine dönüşmesine radyoaktivite veya radyoaktif bölünme denir. Radyoizotopların bölünme şekilleri; alfa bozunmaları, beta bozunmaları ve gama yayınımları şeklinde olur.

En basit çekirdek olan hidrojen haricindeki diğer tüm çekirdekler nükleon adı verilen, doğadaki temel yük birimi olan pozitif elektron yüküne sahip proton (p) ve yüksüz nötronlardan (n) oluşurlar. Nükleonlar çekirdek içerisinde Coulomb ve çekirdek etkileşmeleri ile bir arada bulunurlar. Coulomb kuvvetleri hesaba katılmadığı taktirde, bir çekirdek içinde optimum kararlılığa proton ve nötron sayıları yaklaşık olarak birbirine eşit

olduğu zaman erişecektir. Coulomb itme kuvvetlerinin kısa menzilli nükleer kuvvetlere göre önemsiz olduğu hafif çekirdeklerde durum böyledir. Coulomb kuvvetleri atom numarasının 20'den fazla olması halinde gittikçe önem kazanır. Çekirdek içindeki bu itme kuvvetlerindeki önemli artışlar çekirdek içi kararlılık durumunu bozacak ve atom numarasının artması ile çekirdeğin kararlı kalabilmesi için bir nötron fazlalığına ihtiyaç duyulacaktır. Herhangi bir maddenin atom çekirdeğindeki nötronların sayısı protonlarınkinden fazla ise, bu çeşit bir madde kararsızlık göstermektedir. Kararsız çekirdekler radyonüklit olarak adlandırılırlar ve bu fazla enerjiye sahip çekirdekler ışınlar salarak parçalanırlar.

Periyodik tabloda, nötron sayılarının (N) proton sayılarına (Z) oranları (N/Z oranı) yaklaşık 1'e eşit olan elementler kararlı olacaktır. Atom numarası 20'nin üstüne yükseldikçe kararlılık için gerekli olan N/Z oranı da yavaş yavaş artar ve atom numarası 83 olduğunda 1,5 değerini alır. Bu atom numarasının üstünde periyodik tabloda kararlı çekirdek yoktur yani N/Z >1,5 olan tüm çekirdekler kararsızdır. Kararsız olan bir element parçacıklar salarak veya ışıma yaparak bozunacak ve bu olay çekirdek kararlı hale gelene kadar devam edecektir. Her çekirdek kararsız olmadığından radyoaktivite ayırt edici bir fiziksel özelliktir.

Şekil 1'de bilinen çekirdeklerin nötron ve proton sayılarının dağılımı görülmektedir. Bu şekilde, proton ve nötron sayıları eşit olan (N=Z) hafif çekirdekler kararlılık eğrisi ve etrafındaki dar kararlılık bölgesi ile temsil edilirken, daha ağır çekirdeklerde N/Z>1 olan bölge ile temsil edilirler. Atom numarası arttıkça elementlerin kararlılık bölgesinden uzaklaştığı görülmektedir ve kararlı en ağır çekirdek için bu oranın yaklaşık 1,5 olduğu düşünülürse N/Z>1,5 olan tüm çekirdeklerin kararsız olacakları anlaşılacaktır (Krane, 2001).



Şekil 1. Çekirdeklerdeki proton sayılarının nötron sayılarına göre değişim grafiği

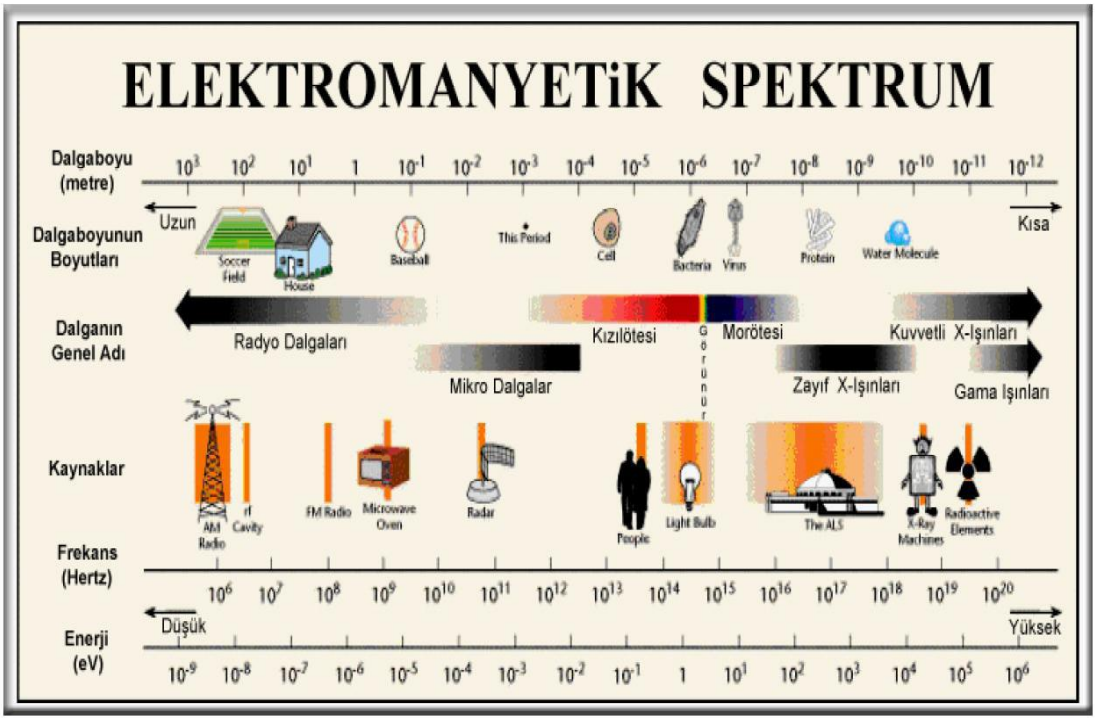
1.3. Radyasyon Tanımı ve Türleri

Kararsız çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmek için dışarı saldıkları hızlı parçacıklar ve elektromagnetik dalga şeklinde taşınan fazla enerjileri radyasyon olarak adlandırılır. Radyasyonu tanımlamada üç ana parametre kullanılır;

- Enerjisi (düşük ve yüksek enerjili radyasyon)
- Türü (parçacık radyasyonu ve elektromanyetik radyasyon)
- Kaynağı (doğal ve yapay radyasyon kaynakları)

Her gün elektromanyetik dalgaların etkisinde kalınmaktadır. Bu enerjiye örnek olarak, görünür ışık, radyo, televizyon dalgaları ile ultraviyole (UV) dalgaları ve

mikrodalga gibi çok geniş bir spektrumu verebiliriz. Şekil 2'de kozmik ışınlardan radyo ve T.V. dalgalarına kadar uzanan elektromanyetik enerji spektrumu görülmektedir. Radyasyon yaptığı etki bakımından iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak ikiye ayrılır.



Şekil 2. Enerji spektrumu (URL-11, 2013)

1.3.1. İyonlaştırıcı Radyasyon

Atomla etkileşime girebilecek kadar güçlü enerji seviyesine sahip, alfa ve beta parçacığı gibi hareket eden yüklü parçacıkların meydana getirdikleri etki iyonlaştırma (iyonizasyon) olarak adlandırılmaktadır. Yüksek enerjili parçacıkların, atom yakınından geçerken oluşturdukları elektron yörüngesindeki değişimler ya da elektronun yörüngesinden çıkması iyonlaştırıcı radyasyonun etkileridir. Elektromanyetik spektrumu oluşturan bütün radyasyonlarda enerji, yüksüz ve kütlesiz fotonlar tarafından taşınmaktadır. Eğer iyonize edici elektromanyetik radyasyon çekirdekten yayımlanıyorsa gama, yörüngeden yayımlanıyorsa X-ışını adını alır.

1.3.2. İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyon

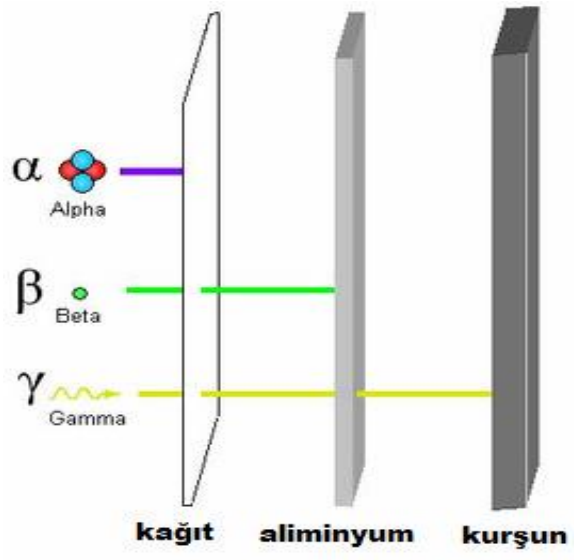
Atomla etkileşime girebilecek kadar güçlü olmayan enerji seviyelerindeki elektromanyetik dalgaların atomların yörüngesinde sebep olduğu değişim organizma üzerinde büyük bir hasara neden olmaz. Bunlar iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak adlandırılır.

Bu tür radyasyona mikrodalga, görünür ışık, radyo, televizyon dalgaları ile ultraviyole (UV) dalgaları örnek olarak verilebilir.

1.4. Radyoaktif Bozunma Şekilleri

Radyoaktif bozunma, kararsız bir atom çekirdeğinin daha kararlı bir duruma geçebilmek için radyasyon yayması olayıdır. Çekirdekler, alfa parçacıkları (helyum çekirdekleri), beta parçacıkları ve gamma ışınları yayınlayarak daha kararlı hale dönmeye çalışırlar. Gama ışınları genellikle beta parçacıkları ile bazen de alfa parçacıkları ile beraber yayınlanırlar.

Şekil 3'de görüldüğü gibi alfa (α), beta (β) ve gama (γ) radyasyonları bazı maddelerden geçebilmekte bazıları tarafından bloke edilmektedir.



Şekil 3. Radyasyon geçirgenliği (URL-5, 2008)

1.4.1. Alfa Bozunması

Alfa parçacıkları ($^{4}_{2}He_{2}$), iki proton ve iki nötrondan oluşmuş bir helyum çekirdeğidir.

α-parçacığının kendiliğinden yayınlanması aşağıdaki reaksiyonla ifade edilebilir.

$$^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}He_{2} \quad (1)$$

Burada A, çekirdeğin kütle numarasını, Z, atom numarasını göstermektedir. X, ana çekirdeği ve Y ise ürün çekirdeği temsil etmektedir. α bozunmasına bir örnek,

$$^{226}_{88}Ra_{138} \rightarrow {}^{222}_{86}Rn_{136} + \alpha \quad (2)$$

dır.

Alfa parçacığı yayınlanması, atom numarası büyük olan izotoplarda görülen bir olaydır. Alfa parçacıkları bir madde içinden geçerken sahip oldukları elektrik yükleri dolayısıyla, madde içinde iyonlaşmaya sebep olurlar ve bundan dolayı enerjilerini çabuk kaybederler. Yine alfa parçacıkları, radyoaktif bir çekirdekten 1,6x10^{7} m/sn gibi büyük bir hızla dışarı fırlatıldıkları için enerjileri fazla olmasına rağmen kütleleri diğer parçacıklara oranla büyük olduğundan erişim mesafeleri düşüktür. Ayrıca, doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerin yayınladıkları alfa parçacıklarının enerjileri 9 MeV'in altında ve dalga boyları küçük olması sebebiyle bunları çok küçük kalınlıktaki bir madde ile durdurmak mümkündür. Bu sebeple bir dış radyasyon tehlikesi yaratmamaktadırlar. Ancak bu parçacıkların sindirim, solunum vs. yollarıyla vücuda girmeleri halinde oluşturacakları iyonizasyon, önemli bir iç radyasyon tehlikesi yaratabilmektedir (BEIR VI, 1999).

Tablo 1'de alfa parçacığı yayımlayan bazı radyoizotopların Mev cinsinden enerjileri ve yarı ömürleri verilmektedir.

Tablo 1. Alfa parçacığı yayımlayan bazı radyoizotoplar ve özellikleri

Radyoizotop	Alfa Enerjisi (MeV) (Oluşma yüzdesi)	Yarı Ömrü
^{232}Th	4,012 (%77) 3,953 (%23)	1,4x10^{10}yıl
^{238}U	4,196 (%77) 4,149 (%23)	4,5x10^{9} yıl
^{226}Rd	4,871 (%100)	1602 yıl
^{241}Am	5,48 (%85,2) 5,44 (%12,8)	433 yıl
^{242}Cm	6,11 (%74) 6,06 (%26)	163 gün
^{222}Rn	5,49 (%100)	3,8 gün

1.4.2. Beta Bozunması

Çekirdek fazla proton veya nötronundan bir protonu nötrona veya bir nötronu protona dönüştürerek kurtulabilir. Bu işlem 3 farklı şekilde gerçekleşebilir. Her üçünde de elektrik yükünün korunabilmesi için başka bir yüklü parçacığın bulunması gerekir (başlangıçta β parçacığı olarak adlandırılan yüklü parçacığın bilinen elektronla özdeş olduğu daha sonra gösterilmiştir). Beta parçacıkları belli bir yük ve kütleye sahip olduklarından madde ile etkileşimleri esnasında iyonizasyona sebep olurlar. Fakat beta parçacıkları alfa parçacıklarına oranla daha hafif ve giricilikleri fazla olduğundan, oluşturdukları iyonizasyon alfa parçacıklarının oluşturduğundan daha azdır. Bu parçacıklar alfa parçacıklarına oranla küçük olan kütleleri ve sahip oldukları yükleri sebebiyle, durdurulmaları alfa parçacıkları kadar olmasa bile, çok yüksek enerjilere sahip değillerse madde içine çok fazla nüfuz edemezler. Giricilikleri, enerjilerine ve etkileştikleri maddenin özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Madde içindeki erişim mesafeleri çok fazla olmasa bile havada oldukça uzun mesafelere kadar yayılabilirler. Beta parçacıkları yayınlayan radyoizotoplar dış radyasyon tehlikesi oluşturabileceği gibi, vücut içine alınması halinde ciddi iç radyasyon tehlikesi de oluştururlar.

1.4.2.1. β^- Bozunumu

β^- ışıması kararsız bir çekirdekten elektron fırlatılması olayıdır. Bu işlem negatif beta bozunumu olarak bilinir ve bir elektronun yaratılıp yayınlanmasını kapsar. Atom çekirdeğinde elektron olmamasına rağmen, β^- yayınlanması işleminde elektrik yükünün korunumu kararsız çekirdekteki fazla olan bir nötronun bir protona ve elektrona dönüşmesini, yani atom numarasının bir artmasını gerektirir. β^- bozunmasında proton çekirdekte kalırken elektron dışarı atılır. Bu bozunmada; atom numarası bir artarken, kütle numarası değişmez. β^- ışınları elektronlardan meydana gelir. Bu nedenle β^- ışınları negatif yüklü tanecikler olduğundan, elektrik ve magnetik alanda sapma gösterirler. Bozunma denklemi,

$$n \rightarrow p + e^- + \upsilon^- \tag{3}$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e(\beta^-) + \upsilon^- \tag{4}$$

şeklindedir. Bu ifade, nötronun bozunarak bir proton, bir elektron ve bir antinötrino parçacığının meydana geldiğini göstermektedir. Nötrinonun elektrik yükü olmadığından, varlığı diğer son parçacıkların kimliğini etkilemez (Krane, 1998).
Bozunma enerjisi,

$$Q_{\beta^-} = [\, M(A,Z) - M(A,Z+1) \,]\, c^2 \tag{5}$$

şeklinde yazılır. K_o kinetik enerjideki net artış olmak üzere,

$$K_o = (\, K_{\beta^-})_{max} + K_{\gamma} \tag{6}$$

şeklindedir ve K_o, bozunma enerjisine eşittir. β^- bozunumuna bir örnek,

$$^{131}_{53}I_{78} \rightarrow {}^{131}_{54}Xe_{77} \quad t_{1/2} = 8{,}0 \text{ d.} \tag{7}$$

dir.

1.4.2.2. β^+ Bozunumu

Bu işlem pozitif beta bozunumu veya pozitron bozunumu olarak adlandırılır ve pozitif yüklü bir elektron yayınlanır. β^+ bozunması bir protonun bir nötrona dönüşmesi olayıdır. Çekirdekteki proton sayısı fazla ise protonlardan biri, bir nötrona, pozitif yüklü bir elektrona (pozitron) ve bir nötrinoya dönüşür. Pozitron çekirdekten dışarı atılırken, nötron çekirdekte kalır. Böylece çekirdeğin atom numarası bir azalır ve bozunma denklemi,

$$p \rightarrow n + e^+ + \upsilon \tag{8}$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{1}e(\beta^+) + \upsilon \tag{9}$$

şeklindedir. Bozunma enerjisi,

$$Q_{\beta^+} = [\, M(A,Z) - M(A,Z\text{-}1)\,]\, c^2 = 2\, m_e c^2 + K_o \tag{10}$$

dır. Burada K_o,

$$K_o = (K_{\beta^+})_{max} + K_\gamma \tag{11}$$

olarak kinetik enerji artışlarının toplamıdır. Bu bozunmanın olabilmesi için $Q > 0$ olması gerekir. Bu şart ancak, ana çekirdek ile ürün çekirdeğin durgun kütle farklarının iki elektronun durgun kütlesinden büyük olduğu durumlarda sağlanır. β^+ bozunumuna bir örnek,

$$^{25}_{13}Al_{12} \rightarrow {}^{25}_{12}Mg_{13} \quad t_{1/2} = 7{,}2 \text{ sn} \tag{12}$$

dir.

1.4.2.3. Elektron Yakalama

Protonu nötronundan çok olan çekirdeklerde [n/p<1] çekirdeğe en yakın olan orbitalinden (1S) bir elektron çekirdek tarafından yakalanır ve bir proton bir nötrona dönüşür. Pozitron yayınlamanın alternatifi olarak da adlandırılır. Atom numarası 1 azalırken, kütle numarası değişmez. Bu olayda elementin izobarı oluşur.

Bozunma denklemi,

$$p + e^- \rightarrow n + \upsilon \tag{13}$$

$$^{A}_{Z}X + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + \upsilon + \gamma \tag{14}$$

şeklindedir. Bu durumda bozunma enerjisi,

$$Q = [\, M(A,Z) - M(A,Z-1) \,]\, c^2 = K_o \tag{15}$$

şeklindedir. Burada K_o,

$$K_o = K_\upsilon + K_\gamma \tag{16}$$

şeklindedir. Burada M(A, Z-1), oluşan çekirdeğin kütlesini, K_υ ve K_γ saçılan nötrino ve gama ışınlarının kinetik enerjileridir. Elektron yakalama olayında da Q > 0 olması gerekir.

1.4.3. Gama Bozunması

Radyoaktif gama yayınlanması, optik veya x-ışını geçişleri gibi atomik radyasyon yayınlanmasına benzer. Bir çekirdekten α veya β parçacığı gibi bir parçacık yayınlanması genellikle çekirdeği uyarılmış durumda bırakır. Uyarılmış bir durum daha düşük bir uyarılmış duruma veya taban duruma nükleer durumlar arasındaki farka eşit bir enerjiyle bir gama ışını yayınlayarak geçer (yayınlanan çekirdeğin geri tepme enerjisi kadar eksik) (Krane, 2001). Gama ışını yayınlanmasından sonra atom, başka bir atoma dönüşmez. Bozunmanın denklemi,

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \qquad (17) $$

şeklindedir.

Kısa dalga boylu elektromanyetik radyasyon olarak bilinen gama ışınları, elektriksel yükleri olmadığı için yüklü parçacıklarda olduğu gibi Coulomb kuvvetine maruz kalmazlar. Bu durum, madde içerisindeki atomları iyonlaştırmadığı anlamına gelmemektedir. Gamma ışınları doğrudan doğruya iyonlaştırıcı değildirler fakat elektromanyetik kuvvet taşıyıcılarıdır ve madde ile iyonlaşmayla ve ortama enerji depolamayla etkileşme yaparlar. Kısacası gama ışınlarının madde içerisindeki davranışları yüklü parçacıklarınkinden oldukça farklıdır. Özellikle, atomun elektronları ile etkileştiklerinde enerjilerinin büyük bir kısmını hatta tamamını kaybedebilirler. Gama ışınlarının yüklü parçacıklarınki gibi menzilleri yoktur. Alfa ve beta ışınlarından daha fazla giricidirler ve yüksüz oldukları için elektrik ve manyetik alanda sapmazlar.

Gama ışınları madde içerisinden geçerken çoğunlukla aşağıdaki etkileşmeleri yaparlar;

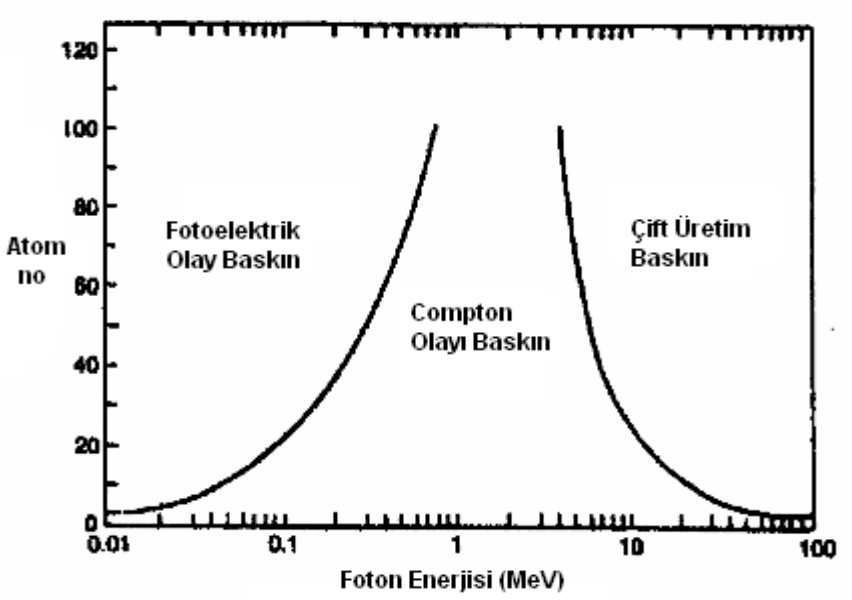
-Fotoelektrik olay

-Compton saçılması

-Çift oluşum

Bu etkileşmeler gama ışınlarının iki önemli özeliklerini açıklamaktadır. Birincisi gama ışınları madde içerisinde yüklü parçacıklarla karşılaştırıldığında daha uzun mesafelere nüfuz edebilirler, ikincisi ise gama ışınları belli bir kalınlıktaki malzemeyi geçince enerjilerinde bir azalma meydana gelmez, yalnızca şiddetlerinde bir azalma olur Özetle, fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu gama ışınlarının madde ile etkileşmesinde katkıda bulunurlar. Şekil 4'de fotonların enerjilerine bağlı olarak farklı maddeler ile etkileşimi görülmektedir.

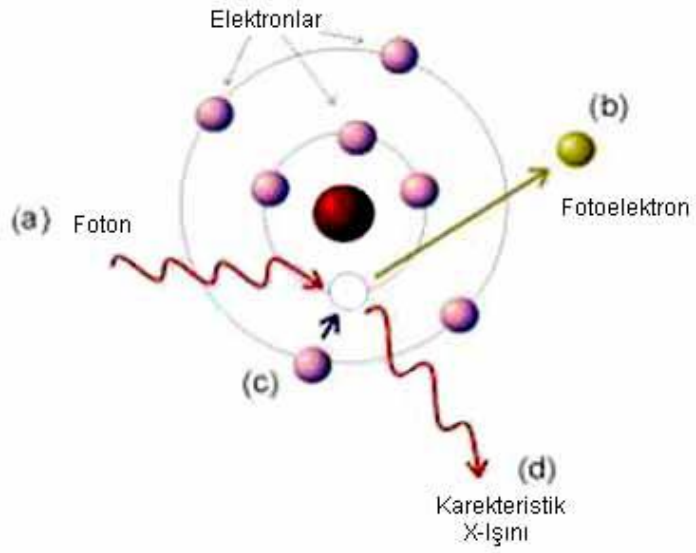
γ-yayınlanmasının yarı-ömrü çok kısadır, genellikle 10^{-9} sn'den daha küçüktür, ancak saat ve hatta gün mertebesinde yarı-ömürlü γ-yayınlanması da vardır. Bu geçişler, izomerik geçişler olarak bilinir.



Şekil 4. Fotonların enerjilerine bağlı olarak farklı maddeler ile etkileşimi (Krane, 2001)

1.4.3.1. Fotoelektrik Olay

Düşük enerjili bir fotonun soğurucu ortamdaki bağlı elektron tarafından soğurularak K_e kinetik enerjisine sahip bir elektronun yayınlanmasıdır. Atomun iç tabakalarından elektron yayınlanırsa, dış tabakalardaki elektronlardan biri bu daha düşük boş seviyeyi doldurur ve bunun sonucunda elektronla birlikte X-ışınıda yayınlanır (Şekil 5).



Şekil 5. Fotoelektrik olay (URL-11, 2013)

Bir atomik elektronun serbest hale gelebilmesi için gerekli enerji I_B ve gelen fotonun enerjisi hν ise enerji korunumundan, fotoelektrik olayda aşağıdaki şekilde verilen Einstein bağıntısı geçerli olacaktır;

$$E_\gamma = h\nu = I_B + K_e \tag{18}$$

Fotoelektrik olay, X-ışını enerji aralığında(keV) büyük tesir kesitine sahiptir. Bu tesir kesiti yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır;

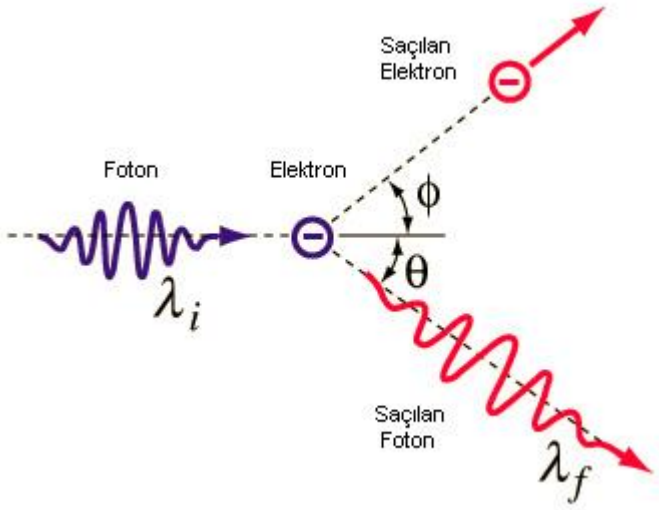
$$\sigma \approx \frac{Z^5}{(h\nu)^{\frac{7}{2}}} \qquad E_\gamma < m_e c^2 \text{ için}$$

$$\sigma \approx \frac{Z^5}{(h\nu)} \qquad E_\gamma > m_e c^2 \text{ için}$$

Bu etkileşme mekanizması yüksek atom numaralı atomlar için oldukça önemlidir ve 1 MeV lik foton enerjilerinde önemini kaybetmektedir.

1.4.3.2. Compton Saçılması

Fotonun madde ile etkileşmesinde en iyi anlaşılan mekanizmalardan birisi Compton saçılmasıdır. Bu olay fotonun serbest bir elektronda esnek saçılmasıdır. Tabiki elektronlar madde içinde bağlı durumdadır. Fakat eğer fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden yüksek ise, bağlanma enerjisi göz ardı edilip elektronun serbest olduğu düşünülür. Gelen foton atomik bağlanma enerjisinin önemli olduğu enerjiye (100 keV altı) sahipse bu olay gerçekleşemez.



Şekil 6. Compton saçılması (URL-11, 2013)

Serbest bir elektron üzerine $h\nu$ enerjili, hν/c momentumlu foton düştüğünde, foton θ açısı altında daha düşük frekansta saçılmakta ve p momentumuna sahip elektron φ açısında ortamdan yayınlanmaktadır (Şekil 6). Fotonun saçılma açısı fotondan elektrona aktarılan enerji miktarına bağlıdır. Compton olayına enerji ve momentum korunumu kanunlarını uygulayarak, saçılan foton ve yayınlanan elektronun enerjileri için aşağıdaki bağıntıları elde ederiz;

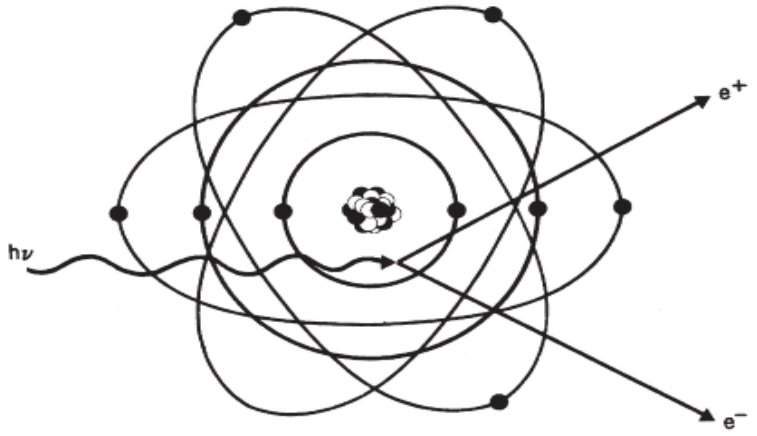
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1+\gamma(1-\cos\theta)} \quad burada \quad \gamma \equiv h\nu / m_e c^2 \tag{19}$$

$$K_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1-\cos\theta)}{1+\gamma(1-\cos\theta)} \tag{20}$$

Compton saçılması tesir kesiti yaklaşık olarak $\sigma \approx \frac{Z}{h\nu}$ ile verilir. Foton enerjisinin 0,1 ile 10 MeV olduğu aralıkta ortamda enerji depolanmasında Compton saçılması baskın olur.

1.4.3.3. Çift Oluşum

Foton yeterli enerjiye sahip olduğunda, madde tarafından soğurulur ve zıt elektrik yüklü parçacıklar meydana getirir. Kısaca, çift oluşum fotonun elektron-pozitron çiftine dönüşmesidir. Bu olay, momentum korunumunu sağlamak için üçüncü bir cismin varlığında meydana gelir. Pozitronun kütlesi elektronun kütlesine eşit olduğundan, elektron-pozitron çift oluşumu için eşik enerjisi $h\nu \approx 2m_e c^2 = 1.02\ MeV$ olacaktır (Şekil 7).



Şekil 7. Çift oluşum (URL-11, 2013)

Çift oluşum tesir kesiti Z^2 ile değişir, burada Z ortamın atom numarasıdır. Çift oluşum eşikten hızlıca yükselir ve foton enerjilerinin 10 MeV den büyük olduğu durumlarda enerji kaybı mekanizmalarında baskın olur. Çok yüksek enerjilerde (>100 MeV), elektron-pozitron çifti tesir kesiti azalır ve ortamın radyasyon uzunluğuna eşit olan sabit soğurma katsayısı ile ifade edilir. Bu oluşan pozitronlar madde içerisinde ilerlerken elektronlar gibi iyonlaşmaya ve radyasyona enerji kaybederler. Pozitron kinetik enerjisinin çoğunu kaybettikten sonra bir elektron yakalayarak pozitronyum diye adlandırılan hidrojen benzeri bir atom meydana getirir. Hidrojen atomunun aksine pozitronyum atomu kararsızdır ve 10^{-10} sn yarı-ömre sahiptir. Dolayısıyla, pozitronyum atomu bozunarak iki foton meydana getirir. Bu yok olma işlemi zıt yönlü eşit enerjili iki foton meydana getirir. Fotonların her biri enerji-momentum korunumunu sağlamak için 0,511 MeV lik enerjiye sahip olmalıdır.

1.5. Radyoaktif Bozunma Kanunu

Bir atomun çekirdeğinin bir alfa parçacığı, bir beta parçacığı, bir gama ışını veya başka herhangi bir parçacık yayınlaması ya da çekirdek kabuğundan bir elektron yakalaması işlemine radyoaktif bozunma adı verilir.

Fiziksel açıdan, bir radyoaktif numune içindeki herhangi bir çekirdeğin ne zaman bozunacağını bilmek mümkün değildir. Radyoaktif bozunma zamana göre gelişi güzel ve rastgele gerçekleşir ve ancak istatistik ve olasılık kuramları çerçevesinde bazı özellikleri bulunabilir. Önemli bir yaklaşım çekirdeklerle tek tek ilgilenmek değil zamana göre daima sabit kalan bir nicelik olan bir kavramı, bir radyoaktif çekirdeğin birim zamanda bozunma olasılığını incelemektir. Bu olasılık radyoaktif bozunma sabiti olarak adlandırılmakta ve genellikle λ ile gösterilmektedir. Radyoaktivitenin bozunma yasasına göre, radyoaktif çekirdeğin yaşı ne olursa olsun bozunma olasılığı λ sabittir.

Radyoaktif bir çekirdekte birim zaman aralığında meydana gelen bozunma sayısı çekirdeğin bozunma hızı veya aktivitesi olarak tanımlanır.

Eğer bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye yeni çekirdekler ilave edilmiyorsa dt süresi içinde bozunan dN çekirdek sayısı, N ile orantılıdır.

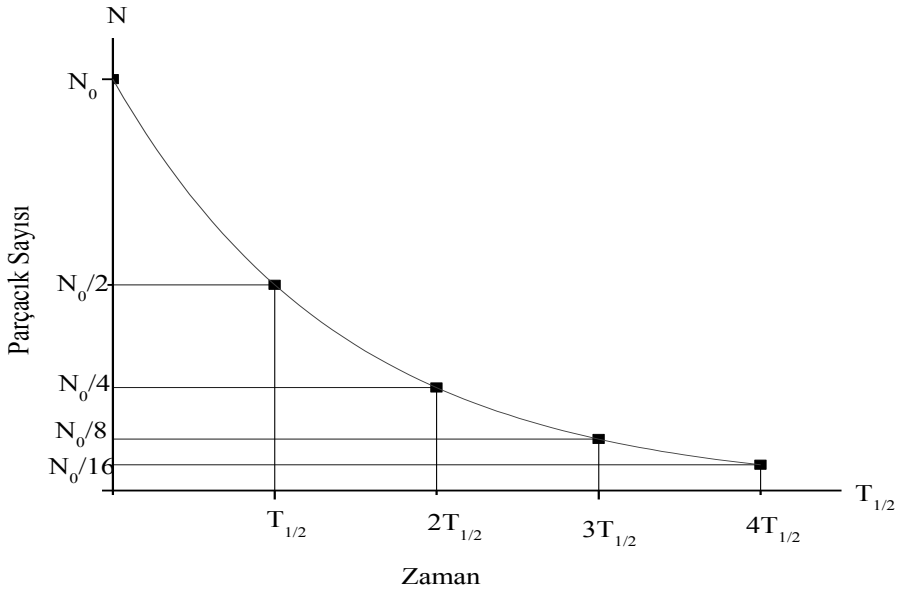
$$\lambda = - \frac{(dN / dt)}{N} \tag{21}$$

Denklem (21)'in sağ tarafı bir çekirdeğin birim zamanda bozunma olasılığıdır, yani bu olasılık, çekirdeğin yaşı ne olursa olsun sabit olup radyoaktif bozunmanın istatistiksel teorisinin temel varsayımıdır. Denklem (21)'in integrali alınırsa,

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \qquad \int \frac{dN(t)}{N(t)} = -\int \lambda dt \tag{22}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{23}$$

üstel radyoaktif bozunma kanunu elde edilir. Burada, N_0, t =0'da henüz bozunmamış, N(t) ise t süresi içinde bozunmadan kalan çekirdeklerin sayısıdır (Krane, 2001). Şekil 8'de radyoaktif bir numunenin miktarının zamanla değişimi gösterilmektedir.



Şekil 8. Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi

1.5.1. Radyoaktif Numunenin Yarı Ömrü ve Ortalama Ömrü

Radyoaktif bozunma yasasını ifade eden denklem (23) herhangi bir t anında bozunmadan kalabilen çekirdek sayısını vermektedir. Radyoaktif izotopların yarı ömürleri çok değişiktir. Bilinen en kısa yarı ömürlü çekirdek 10-21 sn ile He, en uzun yarı ömürlü çekirdek ise 1017 yıl ile ^{204}Pb' dür.

Radyoaktivitenin istatistiksel karakteri nedeni ile radyoaktif bir çekirdeğin ömrü, sıfır ile sonsuz arasında herhangi bir değer olabilir. Buna göre bir çekirdeğin ne kadar var olacağı bilinmez, ancak ortalama ömründen söz edilebilir.

Teorik açıdan bakıldığında numunedeki tüm çekirdeklerin bozunması için sonsuz zaman geçmesi gerekir. Yani ancak $t\rightarrow\infty$ için $N(t)=0$ olur. Bu durumda radyoaktif numunenin ayırt edici bir özelliği olan yarı ömür kavramı ortaya çıkar. Yarı ömür, radyoaktif bir çekirdeğin başlangıçtaki sayısının yarıya inmesi için geçen zaman olarak tanımlanmaktadır. $t_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömrü bulmak için denklem (23)'de $N=N_0/2$ olarak alınırsa;

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} \quad \longrightarrow \quad e^{-\lambda t} = \frac{1}{2}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \tag{24}$$

elde edilir. τ ortalama ömür de bir çekirdeğin bozununcaya kadar geçirdiği ortalama süre olarak tanımlanır. t süresi içinde bozunmadan kalan çekirdeklerin sayısı N(t) 'dir ve t ile t + dt aralığında bozunanların sayısı $|dN/dt|$ dt 'dir. Bu durumda ortalama ömür,

$$\tau = \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt} \tag{25}$$

dır. Paydadaki terim toplam bozunma sayısıdır. İntegral alınırsa,

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \tag{26}$$

bulunur. Ortalama ömür basit olarak bozunma sabitinin tersidir. Denklem (23) ile ancak t süre sonra bozunmamış belirli bir türdeki çekirdeklerin sayısı kestirilebilir. Bir numunedeki bozunmamış çekirdeklerin sayısını ölçmek yerine t_1 ve t_2 arasındaki bozunumların sayısını ölçmek (yayınlanan radyasyonları gözleyerek) daha kolaydır. Eğer t ve t + Δt arasındaki çekirdeklerin sayısındaki değişiklik ΔN ile gösterilirse,

$$|\Delta N| = N(t) - N(t + \Delta t) = N_0 e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t}) \tag{27}$$

dir. Sayımın yapıldığı Δt aralığı λ^{-1} 'den çok daha küçük ise (yani $\Delta t << t_{1/2}$) ikinci üstel ifadenin açılımındaki yüksek mertebeli terimleri ihmal edebiliriz ve

$$|\Delta N| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Delta t \tag{28}$$

sonsuz küçük limitinde,

$$\left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \tag{29}$$

elde ederiz. Aktiflik A, numunede birim zamanda bozunma sayısı, yani bozunma hızı olarak tanımlanır.

$$A(t) \equiv \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} \qquad (30)$$

$t = 0$ 'daki başlangıç aktifliği $A_0 = \lambda N_0$ 'dır (Krane, 2001).

Radyoaktif bir numunenin aktifliği numunede birim zamandaki bozunma sayısıdır ve birimi bozunma/sn'dir. Aktiflik sadece saniyedeki parçalanma sayısını vermekte, yayınlanan radyasyonun türü ve enerjileri ile ilgili hiçbir bilgi vermemektedir.

Denklem (30) aktifliğin zamanla üstel olarak azaldığını göstermektedir. Böylece, Δt kısa zaman aralıkları içindeki bozunmaları ard arda sayarak aktifliği zamanın fonksiyonu olarak ölçebiliriz. Bu verileri yarı logaritmik olarak çizersek (yani t'ye göre ln A) eğimi, $-\lambda$ olan düz bir doğru elde ederiz. Bu şekilden yararlanarak bir radyoaktif bozunmanın yarı ömrünü tespit edebiliriz.

Bu ölçme yöntemi, çok kısa ve çok uzun yarı ömürler için yararlı değildir. Yarı-ömür, numunenin bozunması fark edilebilecek kadar kısa olmalıdır. İnsan ömründen büyük yarı-ömürler için aktiflikte kayda değer herhangi bir azalma gözlenmez. Böyle durumlar için dN/dt'nin ölçülmesi (bu bozunmanın aktifliğidir) ve atom sayısının tespit edilmesiyle (kimyasal yapısı kesin olarak bilinen numunenin tartılmasıyla) denklem (23) doğrudan doğruya kullanılabilir.

1.5.2. Peşpeşe Bozunma Kanunu

Hem doğal olarak bulunan radyoaktif çekirdeklerde hem de yapay olarak üretilen radyoaktif çekirdeklerde bozunma peşpeşe parçalanmalar şeklinde meydana gelebilir. Ana radyoaktif çekirdek başka bir ürüne bozunur ve eğer bu ürün de radyoaktif ise o da başka çekirdeğe bozunur. Birçok durumlarda bu peşpeşe bozunma, ana çekirdeğin ürüne ve ürünün de kararlı bir radyoaktif çekirdeğe bozunmasıyla sınırlıdır. Verilen herhangi bir zamanda bozunma ürününün sayısı şu şekilde hesaplanabilir.

Herhangi bir t anında, λ_1 katsayısı ile ürüne bozunacak olan ana çekirdeğin sayısı N_1 olsun. Ürün çekirdeğin sayısını N_2 ile gösterelim. Bunlarda λ_2 bozunma katsayısı ile bir çekirdeğe bozunacaklardır. Bu kararlı çekirdeklerin sayısı ise N_3 olsun. Bunlara ek olarak t

= 0 iken $N_1 = N_{10}$, $N_2 = N_{20}$ ve $N_3 = N_{30}$ olduğunu varsayalım. Aktifliğin saniyedeki bozunma sayısı şeklindeki tarifinden şu eşitlikleri yazabiliriz.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \tag{31}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \tag{32}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \tag{33}$$

Denklem (31), N_1'in bozunma hızını verir. Denklem (34), N_2 tipindeki çekirdeklerin $\lambda_1 N_1$ hızıyla üretildikleri ve $\lambda_2 N_2$ hızıyla ortadan kaybolduklarını göstermektedir. (33) bağıntısıyla N_3 çekirdeklerinin üretim hızı elde edilir. (31) denkleminin t = 0 'da $N_1 = N_{10}$ şartıyla integrali alınırsa,

$$N_1 = N_{10}\, e^{-\lambda_1 t} \tag{34}$$

elde edilir. Bu değer (32) bağıntısında yerine konursa,

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{10}\, e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \tag{35}$$

veya

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10}\, e^{-\lambda_1 t} \tag{36}$$

elde edilir. Bu bağıntının her iki tarafı $e^{\lambda_2 t}$ ile çarpılırsa,

$$\frac{d}{dt}\left(N_2\, e^{\lambda_2 t} \right) = \lambda_1 N_{10}\, e^{(\lambda_2 - \lambda_1) t} \tag{37}$$

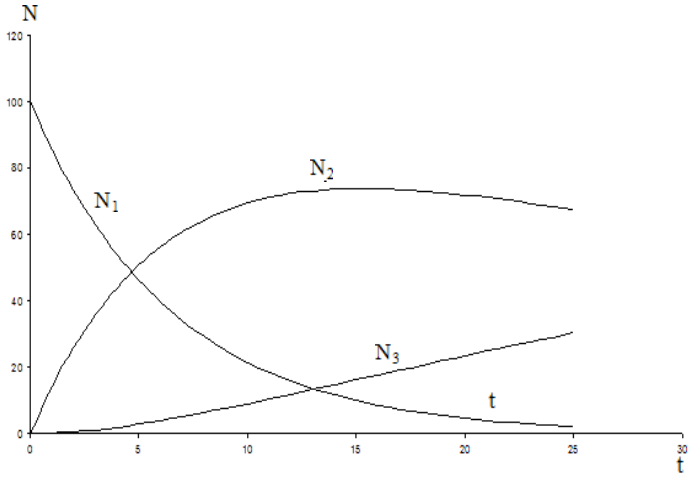
bulunur. Gerekli işlemler yapılırsa,

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t}) \quad (38)$$

bulunur. Benzer şekilde **(**33) bağıntısı da çözülürse,

$$N_3 = N_{10} (1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t}) \quad (39)$$

elde edilir. **(**34), (38), (39) eşitlikleri yardımıyla herhangi bir t anında mevcut olan çekirdeklerin sayısı bulunabilir. t=0 iken $N_{10} = 100$ ve $N_{20} = N_{30} = 0$ şartları altında oluşan bir bozunmada oluşan N_1, N_2 ve N_3'ün t'ye göre değişimi Şekil 9'da verilmektedir (Arya, 1999).



Şekil 9. Peşpeşe bozunma grafiği

1.5.2.1. Geçici Denge

Bir ana çekirdeğin λ_1 bozunma sabitiyle birinci ürüne bozunduğunu ve bunun da λ_2 bozunma sabitiyle bozunduğunu düşünelim. Denklem (40),

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

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,

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \quad (40)$$

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

1.5.2.2. Sürekli Denge

Eşitlik (40)'de $\lambda_1 << \lambda_2$ durumunu ele alalım. $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$ ve $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$ yazabiliriz. Böylece bu ifade,

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (41)$$

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

$$\lambda_1 N_{10} = \lambda_2 N_2 \quad (42)$$

elde edilir. λ_1 çok küçük olduğundan $\lambda_1 N_1 \approx 0$ olacaktır. Buradan ana çekirdeğin çok büyük yarı ömre sahip olduğu anlaşılır.

1.6. Radyasyon Birimleri

İyonlaştırıcı radyasyonların tüm etkileri radyasyonun geçtiği ortamda meydana getirdiği iyonlaşmaya bağlıdır. İyonlaştırıcı radyasyon miktarının ölçülebilmesi için her şeyden önce radyasyonun soğurulmalarını ölçebilecek birimlerin bulunması gerekir.

Uluslararası Radyasyon Birimleri Komisyonu'nun (ICRU) 1925 yılından beri yaptığı çalışmalar neticesinde soğurulan doz için Rad, ışınlama için Röntgen, aktivite için Curie, doz eşdeğeri için ise Rem'i özel radyasyon birimleri olarak tanımlamıştır. MKS sistemini

esas alan Uluslar albrası Birimler Sistemi'nin (International System of Unit – SI) kabul edilmesi ile ICRU 1971 yılında SI birimlerini tanımlamıştır. Tablo 2'de radyasyon terimleri ve özel birimleri ile SI birimleri arasındaki ilişki görülmektedir.

1.6.1. Aktivite Birimi

Radyasyon etkinliğini (aktivitesini) belirten birimdir. Radyoaktif maddenin saniye başına gerçekleştirdiği bozunma sayısına aktivite denir.

Yapay radyoizotopların elde edilemediği senelerde çok uzun yarı ömürlü bir radyoaktif madde olan radyum standart alınıp radyoaktif madde miktarı birimi olarak Curie tanımlanmıştır. Bu tanım önce 1 gram radyumun parçalanma hızı, daha sonra 1 gram radyumla dengede olan radon miktarı ve 1930'larda da 1 gr radyumla dengede olan radon gazı miktarlarında bir saniyedeki bozunma sayısı olarak değiştirilmiştir. Ancak o zamana kadar radyumun atom ağırlığının ve bozunma sabitinin çok hassas tayinleri yapılamamış olduğundan daha sonra bu tarifin radyumdan bağımsız yapılması fikri oluşmuştur. Bu nedenle Uluslararası Standartlar ve Radyoaktivite Birimleri komisyonu tanımı genişleterek bütün radyonüklitler için Curie'yi bir saniyede $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma gösteren radyoaktif madde miktarının aktivitesi olarak tanımlamıştır.

SI birim sisteminde aktivite birimi Becquerel (Bq) olup, 1 Bq, saniyede bir parçalanma gösteren bir maddenin aktivitesi olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla Ci ve Bq arasında dönüşüm

$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

$1 \text{ Bq} = 2,703 \times 10^{-11}$ Ci şeklindedir.

1.6.2. Işınlama birimi

Işınlama X ve gama ışınlarının havayı iyonlaştırma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Röntgen(R), Normal hava şartlarında havanın 1 kg'ında $2,58 \times 10^{-4}$ C' luk elektrik yükü değerinde pozitif ve negatif iyonlar oluşturan X ve gama ışını miktarıdır.

SI birimlerinde ışınlama birimi olarak Röntgen eşdeğeri karşılığının Coulomb / kg normal hava şartlarında (O ^{0}C ve 760 Hg basıncı) havanın 1 kg'ında 1 Coulomb'luk elektrik yükü değerinde + ve – iyonlar oluşturan X ve γ radyasyon miktarıdır.

1 C / kg = 3,876 x 10^{3} R

1 R = 2,58 x 10^{-4} C / kg şeklinde ifade edilir

1.6.3. Soğrulmuş Doz Birimi

Soğrulmuş doz birim kütle başına depolanan enerjinin ölçüsüdür. Soğurulan doz her ortam ve her türdeki iyonlayıcı radyasyonlar için tanımlanmıştır. Radyoaktif bir madde tarafından salınan radyasyon etkileştiği maddelere enerjisini bırakmaktadır. 1 kilogramlık maddeye 1 joule'luk enerji bırakan radyasyona 1 Gray adı verilmiştir.

1.6.4. Eşdeğer Doz Birimi

Vücutta toplanan enerjinin ifadesidir. Düşük doz düzeylerinde radyasyonun tipine ve enerjisine göre biyolojik hasarlarını da içeren bir kavramdır.

Işınım sonucu fırlatılan enerji paketleri ve parçacıklar canlı hücrelere çarptığında, enerjisini bu hücrelere bırakmaktadır. Fakat farklı ışınım parçacıkları aynı miktarda enerji bıraksalar dahi, canlı hücrelere olan biyolojik etkileri farklı olmaktadır. Ağır parçacıklar hücrelere daha fazla zarar verirken, hafif parçacıklar daha az zarar vermektedir. Dolayısıyla doz eşdeğerini göstermek için kullanılan Sievert (Sv) ışınım türünü de hesaba katarak ışınımın biyolojik etkisini belirtmektedir. Sievert (Sv) doğada günlük hayatta karşılaştığımız radyasyon seviyeleri karşısında çok büyük kalmaktadır. Doğada günlük hayatta maruz kaldığımız radyasyon miktarı Sievert'in binde biri mertebelerinde bulunmaktadır. Bu nedenle miliSievert (mSv) kullanımı daha yaygındır.

1.7. Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (AEDE)

Bu değer, insanın farklı radyasyon kaynaklarından yayılan ışınlara gerek dışarıdan maruz kaldığı gerekse yediği gıdalar ve soluduğu havada bulunan değişik radyonüklitlerden yayınlanan ışınlara içeriden maruz kalmak suretiyle bir yıl içerisinde alacağı radyasyon dozu olarak tanımlanır ve birimi Sievert'tir.

Her radyonüklitin yayınladığı radyasyon tipi ve enerjisi kullanılarak, her radyonüklit için birim aktivite başına yayınladığı radyasyonun doz dönüşüm faktörleri belirlenir ve birim hacim veya ağırlık başına tespit edilen aktivite konsantrasyonu ile doz dönüşüm faktörleri çarpılarak yıllık etkin doz eşdeğeri bulunur.

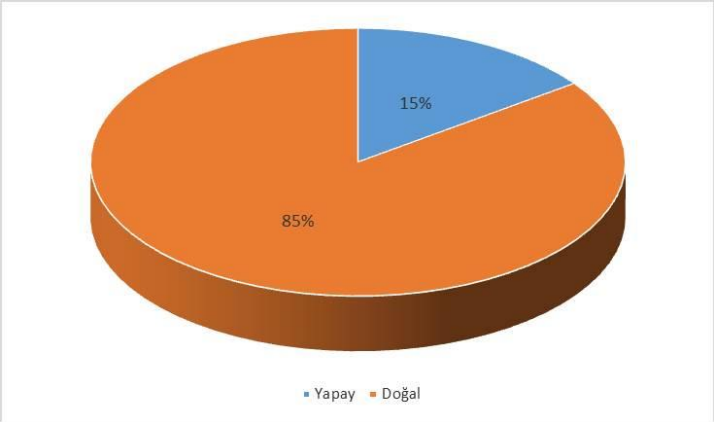
Tablo 2. Radyasyon terimleri ve özel birimleri ile SI birimleri arasındaki ilişki (URL-3, 2012)

TERİM	ESKİ BİRİMİ	YENİ BİRİMİ	DÖNÜŞÜM
AKTİVİTE	Curie(Ci)=$3,7x10^{10}$; parçalanma/ 1saniye	Becquerel (Bq); parçalanma/ 1 saniye	1 Ci=$3,7x10^{10}$ Bq 1Ci=37 GBq
IŞINLAMA DOZU	Röntgen(R);normal hava şartlarında (0^0C ve 760 mm Hg basıncı) havanın 1 kg 'ında $2,58x10^{-4}$ C'luk elektrik yükü değerinde (+) ve (-) iyonlar oluşturan X veya gama radyasyonu miktarıdır.	Coulomb/kilogram(C/kg); Normal hava şarlarında havanın 1 kg'ında 1 Coulomb'luk elektrik yükü değerinde (+) ve (-) iyonlar oluşturan X veya gama radyasyonu miktarıdır.	1 C/kg=3876 R 1 R=$2,58x10^{-4}$
SOĞRULMUŞ DOZ	Radiation absorb doz (rad); Işınlanan maddenin 1kg'ında 10^{-2} Joule'luk enerji soğurması meydana getiren bir radyasyon miktarıdır.	Gray(Gy); Işınlanan maddenin 1kg'ında 1 Joule'luk enerji soğurması meydana getiren bir radyasyon miktarıdır.	1 Gy=100 rad 1 rad=0,01 Gy
DOZ EŞDEĞERİ	Röntgen equivalent man; 1 Rötngenlik X veya gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi oluşturan herhangi bir radyasyon miktarıdır. rem=(rad)x(W_R)*	Sievert (Sv);1Gy'lik X veya gama ışını ile aynı biyolojik etkiyi meydana getiren herhangi bir radyasyon miktarıdır. Sv=(Gy)x(W_R)*	1Sv=100rem 1rem=0,01Sv
*WR."Radyasyon ağırlık faktörü" olarak adlandırılır. Farklı radyasyonların biyolojik etkilerindeki farklılıkları hesaba katmak ve aynı zamanda radyasyon korunma hesaplarını birleştirmek için kullanılan bir faktördür.			

1.8. Radyasyon Kaynakları

Çevredeki doğal ortam, insanın maruz kaldığı en büyük radyasyon kaynaklarını içermektedir. Yeryüzündeki tüm canlılar ve cansızlar havada, suda, toprakta, hatta kendi

vücutları içerisindeki doğal radyasyon kaynakları ve bunlara ek olarak insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon kaynaklarının her gün ışınımına maruz kalmaktadırlar. Şekil 10 'da dünya genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından alınan dozların oranlarını göstermektedir.



Şekil 10. Dünya genelinde doğal ve yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (URL-7, 2012)

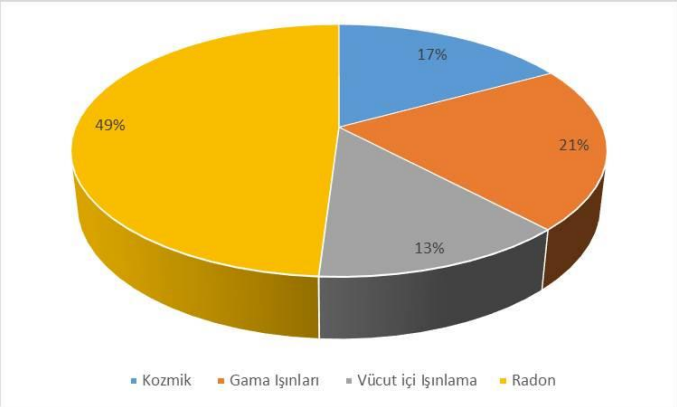
1.8.1. Doğal Radyoaktivite ve Doğal Radyasyon Kaynakları

Doğal radyoaktiflik çevremizde, toprakta, havada, suda ve bitkilerde yaygın miktarda bulunmaktadır. İnsanlar ve diğer canlılar, milyonlarca yıldan beri evrenden gelen kozmik ışınlar ve yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan radyasyonla ışınlanmaktadır.

Doğal radyoaktiviteden, atomun çekirdek yapısının açıklanması, dünya yaşının tahmini ve okyanusların dibinde bulunan sediment oluşum oranlarının ölçülmesi gibi çeşitli alanlarda faydalanılır. Çevresel örneklerde doğal radyoaktivite seviyelerini belirleme çalışmaları, nükleer enerjinin insanoğlunun hizmetine girmesi ve nükleer santrallerde üretilen radyoaktif maddelerin çevreye verdikleri zararların araştırılmaya başlanması ile hız kazanmıştır. Bu tür çalışmalar, hem doğal radyoaktivite seviyelerinin belirlenmesi hem de nükleer santrallerin kurulduğu bölgelere yakın oturan insanların çevresel doğal radyasyonun yanı sıra nükleer santrallerden kaynaklanan radyasyonada hangi oranlarda maruz kaldıklarının tespiti açısından önemlidir.

Vücudumuza solunum ve sindirim yollarıyla, hava, su, tüm bitkisel ve hayvansal besinlerde az da olsa bulunan radyoaktif maddeler alınmakta, bunlarda zamanla çeşitli organlarda birikmektedir. Buna ek olarak kozmik ışınlardan ve yerkürede bulunan doğal radyoaktif maddelerden etkilendiğimiz de düşünüldüğünde, insan vücudu hem iç hem de dış radyasyon ışınlanmasına doğal olarak maruz kalmaktadır.

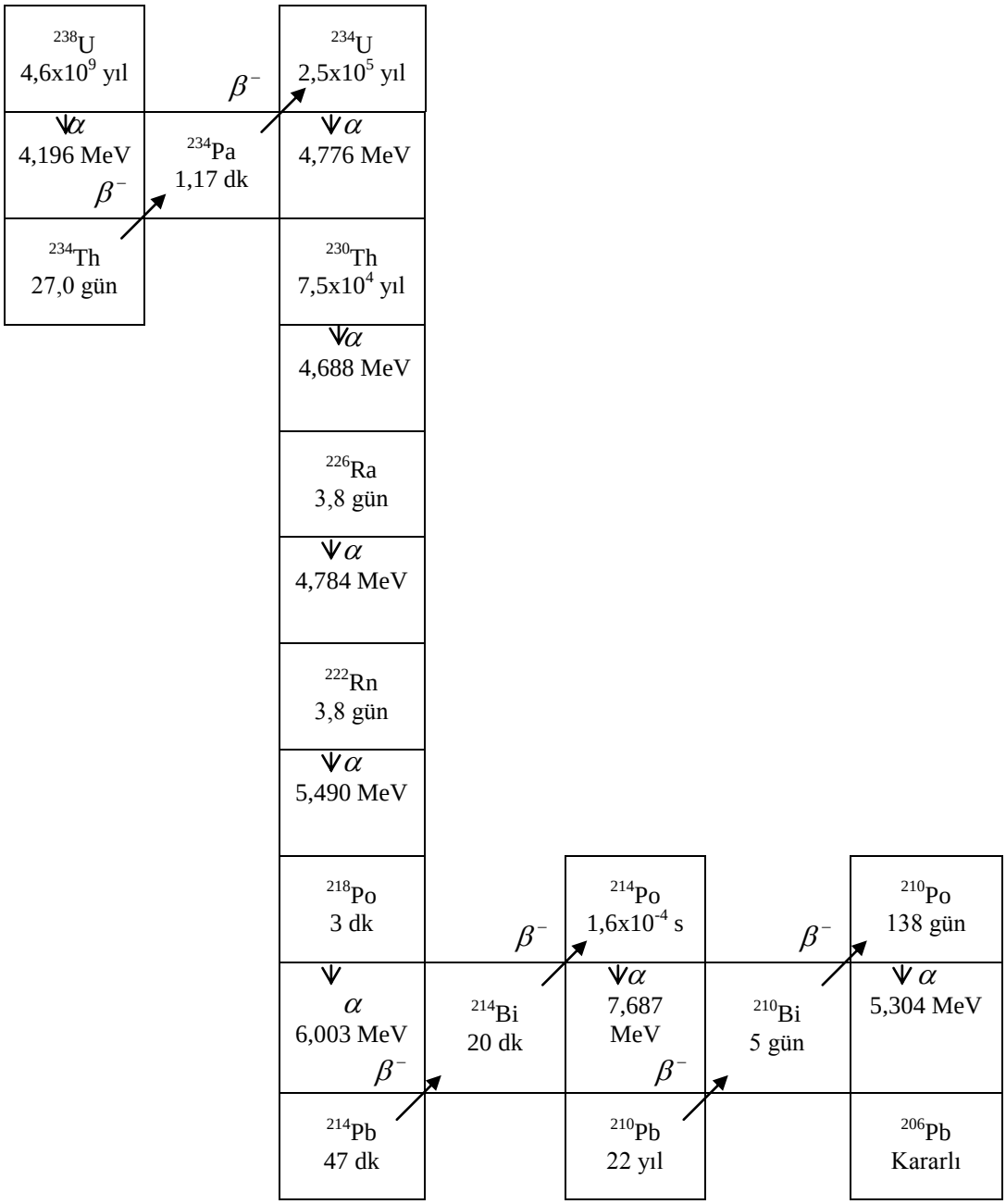
Şekil 11'de doğal radyasyon düzeyini belirleyen etkenler görülmektedir. ^{238}U elementinin bozunma ürünü olan radon (^{222}Rn) gazı olup %49 luk bir oranla en büyük etkiye sahiptir. Kozmik ışınlar %17 ve gama ışınları ise %21 lik oranla önemli yer tutmaktadır (URL-7, 2012).



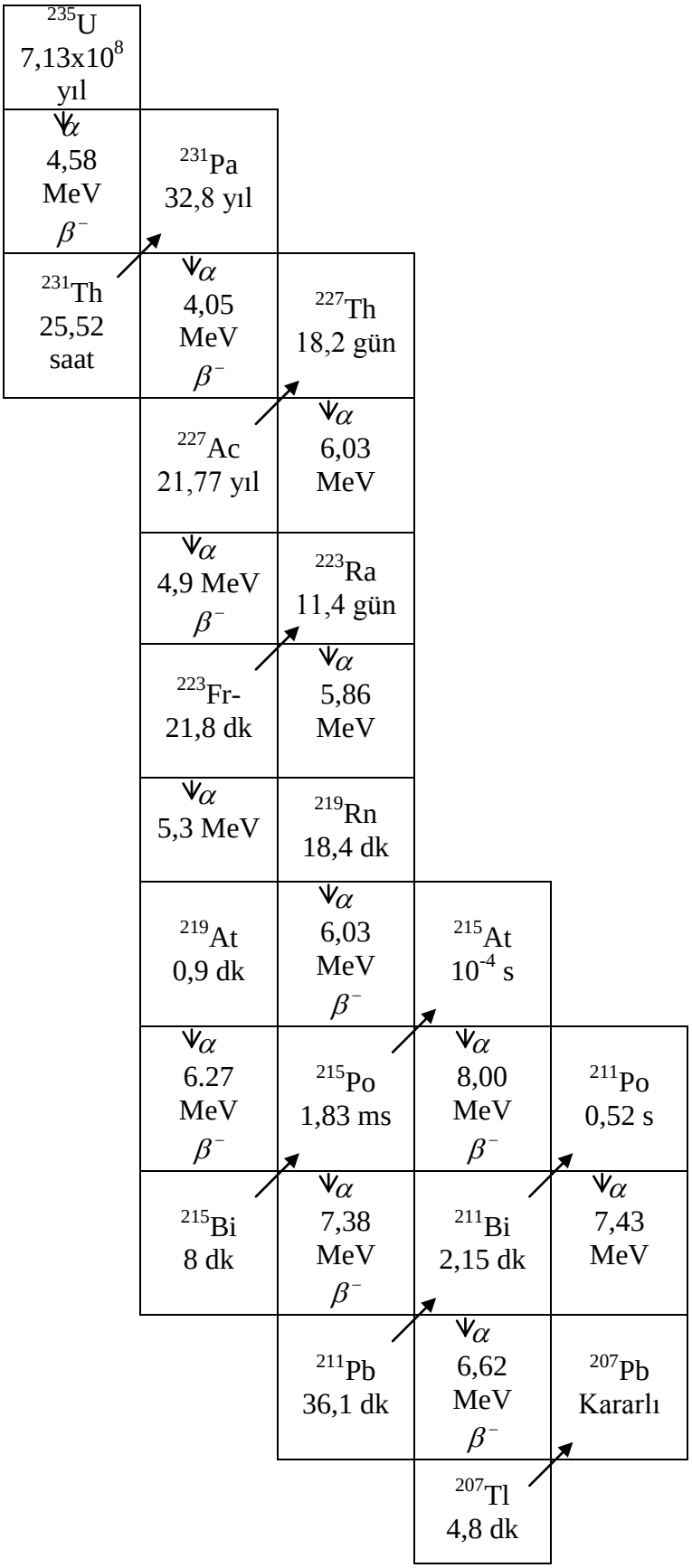
Şekil 11. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (URL-7, 2012)

Uzun ömürlü doğal radyoaktif elementlerin çoğu çok ağır elementlerden oluşmuşlardır ve hiç kararlı izotopları yoktur. Bu radyoaktif çekirdekler α, β ve gama ışınları yayınlayarak sonuçta kararlı bir çekirdeğe ulaşırlar. Bozunma süreci çekirdeği, zincirin en uzun ömürlü üyesine götürme eğilimindedir ve eğer bu çekirdeğin ömrü en azından dünya'nın yaşı mertebesindeyse bu aktiftik bugün de gözlenebilmektedir. Genellikle ağır çekirdekleri olan doğal radyoizotoplar şu radyoaktif serilere üyedir: Toryum, Uranyum Aktinyum ve Neptünyum 'dur. Tarihsel sıralama söz konusu olduğunda en son keşfedilen seri Neptünyum serisidir. Bu serinin diğer serilere nazaran yarılanma ömrü (2.10^6 yıl) daha kısa olup üyeleri tabiatta doğal olarak bulunamazlar ve nükleer reaksiyonlar neticesinde yapay olarak üretilebilirler (Krane, 2001). n bir tamsayı olmak üzere bu doğal radyoaktif seriler sırayla 4n, 4n+2, 4n+3 ve 4n+1 ile temsil edilirler. Bozunma zinciri sonucunda yukarıdaki kararsız çekirdeklerden Uranyum, Toryum ve

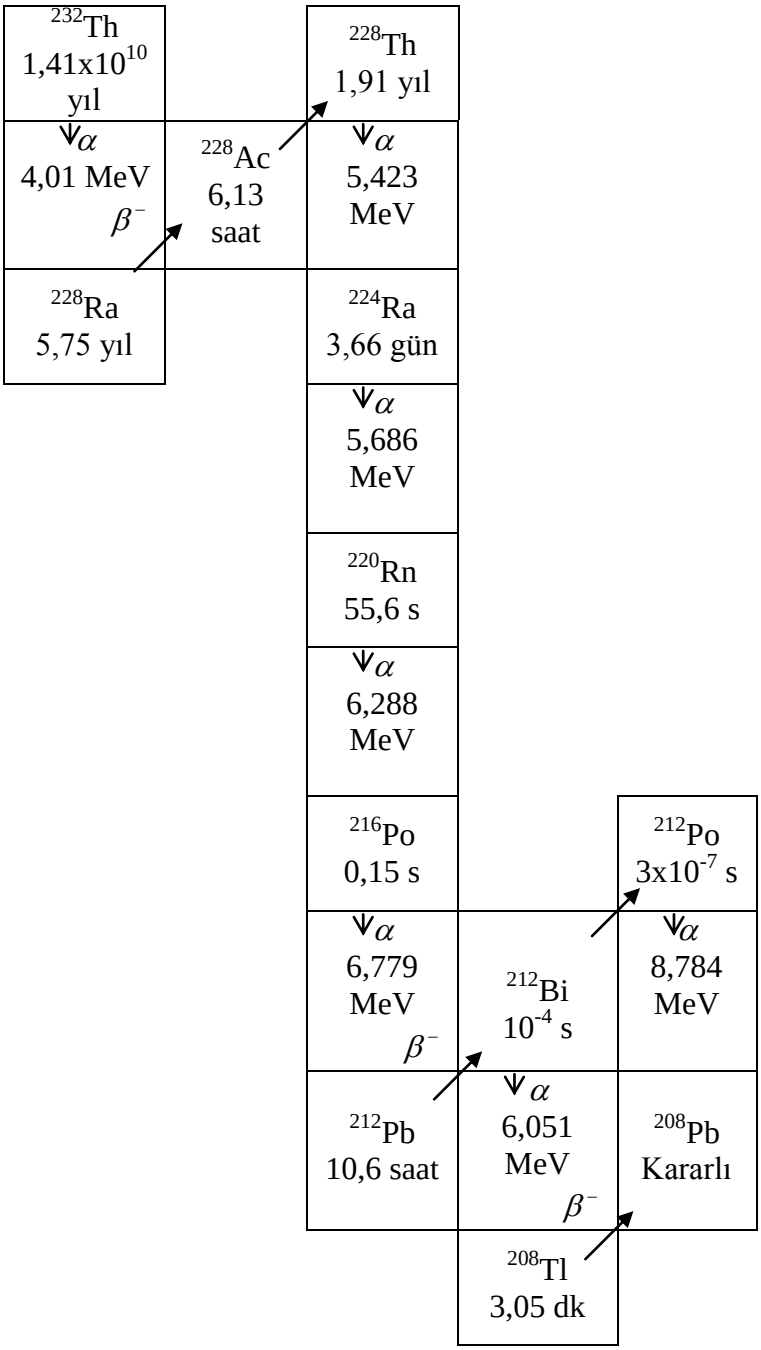
Aktinyum sırasıyla Kurşunun kararlı olan $^{206}_{82}Pb$, $^{208}_{82}Pb$, ve $^{207}_{82}Pb$ çekirdeklerine ulaşırken Neptünyum kararlı en ağır çekirdek olan $^{209}_{83}Bi$ bizmuta dönüşür. Şekil 12-13-14-15'de sırasıyla Uranyum (^{238}U), Aktinyum (^{235}U), Toryum (^{232}Th) ve Neptinyum (^{237}Np) serisine ait yarı ömürler, bozunma çeşitleri ve maksimum bozunma enerjileri ile Tablo 3'de de dört seriye ait bazı temel özellikler verilmektedir.



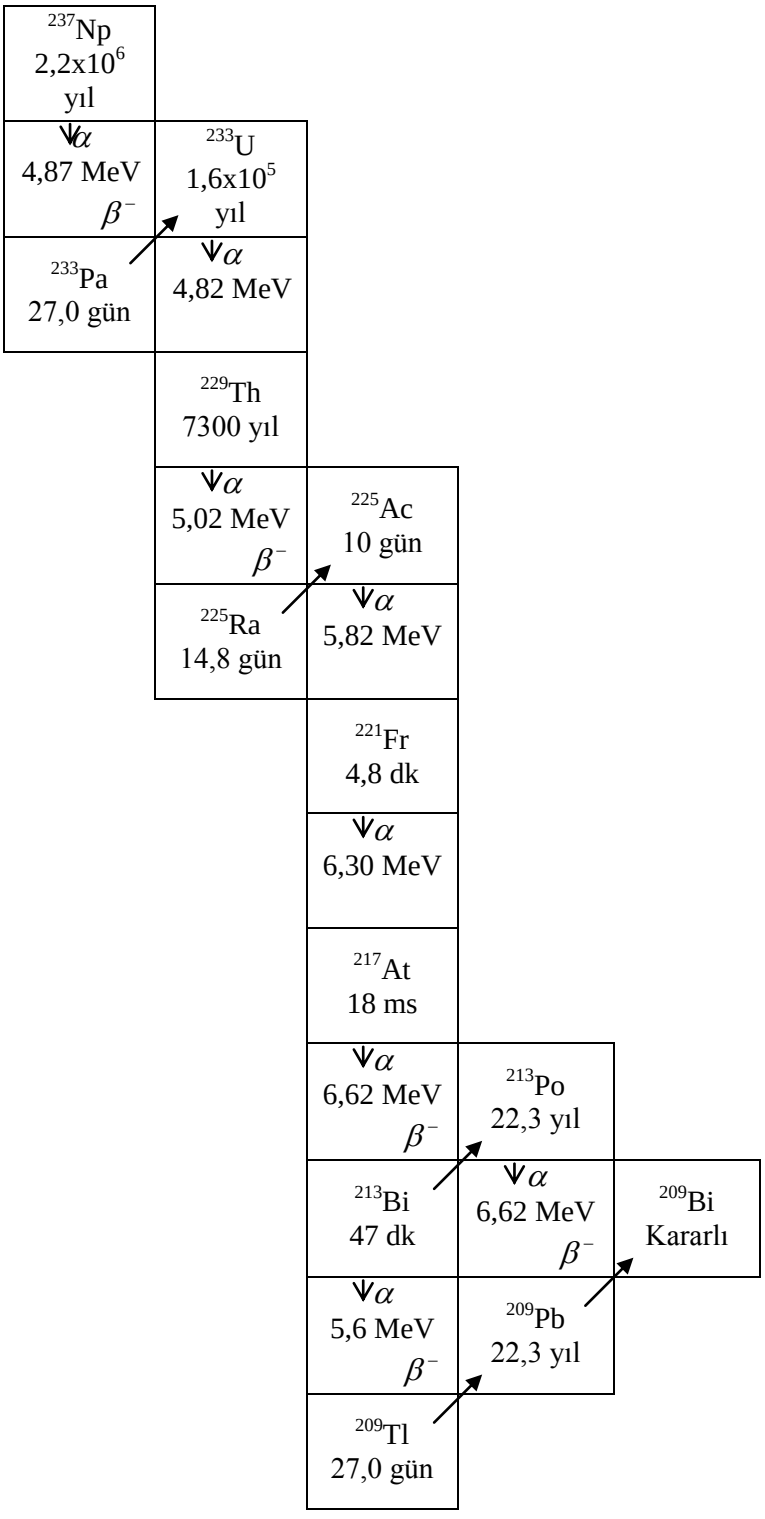
Şekil 12. Uranyum 4n+2 serisi



Şekil 13. U^{235} (Aktinyum)'in bozunum serisi



Şekil 14. Doğal radyoaktif ^{232}Th serisi



Şekil 15. Neptinyum radyoaktif bozunma serisi

Tablo 3. Doğada bilinen dört radyoaktif seri

Seri Adı	Türü	Son Çekirdek	Ana Çekirdek	Yarı Ömür(yıl)
Toryum	4n	$^{208}_{82}Pb$	$^{232}_{90}Th$	$1,41x10^{10}$
Neptünyum	4n+1	$^{209}_{83}Bi$	$^{237}_{93}Np$	$2,14x10^{6}$
Uranyum	4n+2	$^{206}_{82}Pb$	$^{238}_{92}U$	$4,47x10^{9}$
Aktinyum	4n+3	$^{207}_{82}Pb$	$^{235}_{92}U$	$7,04x10^{8}$

Tablo 4'de dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan ortalama radyasyon doz değerleri verilmektedir. Doğal radyasyon yolu ile alınan ortalama yıllık etkin doz 2,4 mSv civarındadır. Bununla birlikte, bazı ülkelerde bu miktar 10 mSv'in üzerindedir.

Tablo 4. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından maruz kalınan ortalama radyasyon doz değerleri (URL-7, 2012)

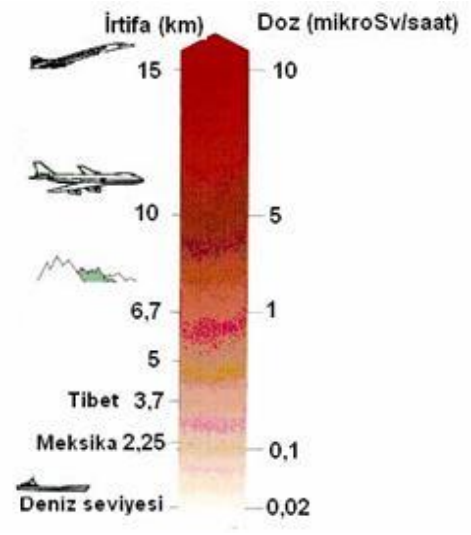
Işınlanma Kaynağı	Yıllık Etkin Doz Değeri (mSv)	
Ortalama	Değişim Aralığı	
KOZMİK RADYASYON		
•Foton bileşeni	0,28	
•Nötron bileşeni	0,10	
KOZMOJENİK RADYOİZOTOPLAR	0,01	0,3 – 1,0 (a)
Toplam	0,39	
YERYÜZÜ KAYNAKLI DIŞ IŞINLANMA		
•Bina dışı	0,07	
• Bina içi	0,41	
Toplam	0,48	0,3 – 0,6 (b)
SOLUNUM YOLU İLE IŞINLANMA		
• Uranyum ve Toryum serileri	0,006	
• Radon (Rn -222)	1,15	
• Toron (Rn -220)	0,10	
Toplam	1,26	0,2 – 10 (c)
BESLENME YOLU İLE IŞINLANMA		
• K-40	0,17	
• Uranyum ve Toryum serileri	0,12	
Toplam	0,29	0,2 – 0,8 (d)
GENEL TOPLAM	2,4	1 – 10
(a) Deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı (b) Toprak ve yapı malzemelerinin karışımlarına bağlı (c) Radon gazı konsantrasyonuna bağlı (d) Yiyecek ve içme sularındaki radyoizotopların konsantrasyonlarına bağlı		

1.8.1.1. Kozmik Radyasyonlar

Dünyamız uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklarla sürekli olarak bombardıman edilmektedir. Yüksek enerjili parçacıkların büyük bir çoğunluğu atmosfere ulaşan protonlardır. Güneşin aktif durumuna (güneş patlamalarına), yerin manyetik alanına ve yerküreden yüksekliğe (irtifa) bağlı olarak kozmik ışınların yoğunluğu değişir. Protonlar elektrik yüklü parçacıklar olduklarından atmosfere ulaştıklarında dünyanın manyetik alanının etkisine girerler. Bu nedenle kozmik ışın yoğunluğu ekvatordan kutuplara gidildikçe artar. Böylece, İnsanların aldığı radyasyon enlem arttıkça artar. Bu ışınların büyük bir kısmı dünya atmosferinden geçmeye çalışırken tutulurlar. Yani atmosferimiz kısmi olarak radyasyonu zırhlar. Bu nedenle, deniz seviyesine yaklaştıkça kozmik ışınların yoğunluğu dolayısıyla doz miktarı da azalır. UNSCEAR tarafından yapılan hesaplamalara göre, kozmik ışınlardan kaynaklanan yer seviyesindeki yıllık etkin doz enlem ve yükseklikle değişse de 0,4 mSv civarındadır (URL-7, 2012).

İnsanların büyük çoğunluğu rakımı düşük bölgelerde yaşadıkları için kozmik radyasyon nedeni ile maruz kaldıkları dozlarda fazla farklılıklar gözlenmez. Bununla birlikte dünyada önemli sayılabilecek yoğunlukta nüfus barındıran yerleşim bölgelerinde yaşayan insanların aldıkları yıllık dozlar deniz seviyesinde yaşayan insanlara oranla birkaç kat daha fazla olabilir (Örneğin And Dağlarındaki Quito ve La Paz, Himalayalardaki Lhasa). Şekil 16’ da kozmik ışınlardan alınan radyasyonun dozunun yüksekliğe göre değişimi görülmektedir.

Uçuş yüksekliğindeki kozmik ışın yoğunluğu yer seviyesine oranla daha fazla olduğundan, uçakla yapılan seyahatlerde yer seviyelerine göre daha fazla kozmik ışına maruz kalınır. Uçuşlarda alınan radyasyon dozu uçuş sürerine, uçuş rotasına ve irtifaya bağlı olarak değişmekle birlikte, yıllık dozun üzerine 0,01 mSv 'lik ek doz alınmasına sebep olur ancak, dünya ortalaması olan 0,4 mSv değerini etkilemez.



Şekil 16. Kozmik ışınlardan alınan dozun yüksekliğe göre değişimi (URL-7, 2012)

Yüksek enerjili kozmik ışınlara ait nötronlar ve protonlar atmosferin alt tabakalarına kadar uzanarak bu bölgelerde de atmosferde bulunan elementlerle etkileşerek çeşitli radyoizotoplar (trityum, karbon-14, berilyum-7, sodyum-22) oluşturabilmektedir. Tablo 5'de bazı kozmik radyonüklitler verilmektedir. Atmosferik şartlara bağlı olarak yeryüzüne inen bu radyoizotoplar, gerek solunum gerekse de besinler yolu ile iç ışınlanmaya neden olurlar. Bu radyoizotoplardan kaynaklanan yıllık tahmini ortalama etkin doz değerleri trityum için 0,01 µ Sv, berilyum-7 için 0,03 µSv, karbon-14 için 12 µSv ve sodyum-22 için 0,15 µSv ' dir.

Gerçekte kozmik radyasyon birincil (primer) ve ikincil (sekonder) olmak üzere iki kısma ayrılmıştır.

Dış uzaydan dünya atmosferine giren yüksek enerjili radyasyon birincil (primer) kozmik ışınlar olarak bilinir. Bunlar, atmosferde atom çekirdekleri ile etkileşmeye girdiğinde ikincil (sekonder) kozmik ışınlar olarak adlandırılan ikincil parçacıklar ve elektromanyetik radyasyon üretilir.

Tablo 5. Kozmik radyoizotoplar (URL-1, 2012)

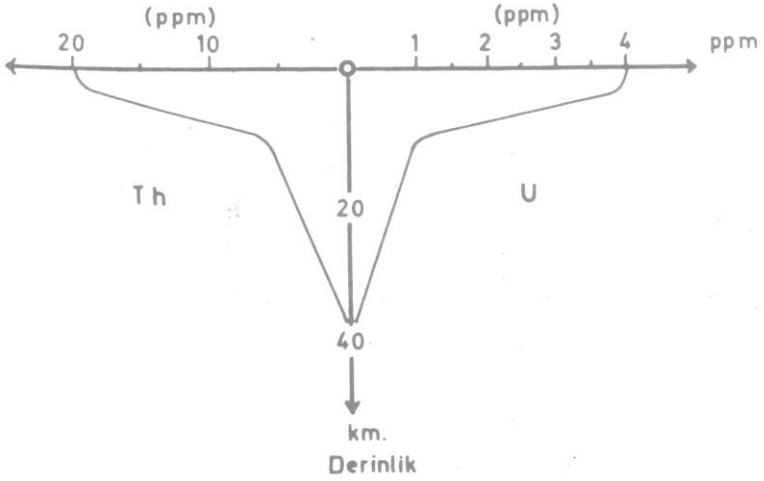
Radyoizotoplar	Sembol	Yarı ömür	Kaynak	Doğal aktivite
Karbon–14	^{14}C	5730 yıl	Kozmik ışın etkileşimleri $^{14}N(n,p)\ ^{14}C$	6pCi/g (0,22 Bq/g) organik maddelerde
Trityum–3	^{3}T	12,3 yıl	Kozmik ışınların N ve O ile etkileşimi; kozmik ışın saçılmaları, $^{6}Li(n, \alpha)\ ^{3}H$	0,032 pCi/kg ($1,2*10^{-3}$ Bq/kg)
Berilyum–7	^{7}Be	53,28 gün	Kozmik ışınların N ve O ile etkileşimi	0,27 pCi/kg (0,01 Bq/kg)

1.8.1.2. Karasal Radyasyonlar

Doğal olarak oluşan ^{238}U ve ^{232}Th serilerindeki radyonüklitler ile ^{40}K çevremizde değişik seviyelerde bulunmaktadırlar ve bu radyoaktif elementler karasal radyasyonun büyük bir kısmını oluşturmaktadırlar.

Doğal radyonüklitlerin ana kaynağı toprak ve toprağı oluşturan jeolojik kaya yapıları olup daha çok granit, fosfat, volkanik ve tuz kayalarında yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar. Bu kayalar zamanla ufalanarak toprağa karışırlar ve topraktaki doğal radyoaktivitenin artmasına sebep olurlar. Dünyanın yapısı incelendiğinde belli kalınlıktaki toprak tabakasının hemen altında kaya yataklarına rastlanır. Özellikle gama radyasyonlarının önemli bir kısmı 0-25 cm derinliğindeki toprak tabakasından kaynaklanmaktadır (Karahan, 1997).

Şekil 17 U, Th ve K gibi uyumsuz elementlerin üst kabuğa taşınmalarını göstermektedir. Günümüze dek ulaştığımız jeokimyasal ve jeofiziksel bilgi düzeyi U, Th ve K gibi uyumsuz elementlerin üst kabuğa taşınmalarına, dolayısı ile alt kabuğun bu elementlerce tüketilmiş olmalarına neden olmaktadır (Çağatay, 1994).



Şekil 17. Toryum ve Uranyumun üst kabuk içinde dağılımı (Çağatay, 1994).

^{238}U birçok elementin uzun radyoizotop bozunma serisinin başlangıç kaynağı olup, kararlı ^{206}Pb haline gelinceye kadar bozunur. Oluşan ilk ürünler arasında yer alan ve radyoaktif gaz olan radon radyoizotopu (^{222}Rn) atmosfere dağılır ve bozunmaya devam eder. Toryum da benzer şekilde yeryüzüne dağılmıştır ve ^{232}Th, başka bir radyoaktif serinin başlangıç kaynağıdır. Bazı bölgelerde geniş alanlara yayılmış olan granit kayalar önemli miktarda toryum içermektedir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki bu tip kayaların bulunduğu alanlarda ölçülen gama radyasyonları oldukça yüksektir. Tablo 6'da bazı toprakların (UNSCEAR, 2000) içerdiği radyoaktivite düzeyleri verilmektedir. Yerkabuğunun ağırlık olarak %2,4' ünü oluşturan ^{40}K'ın aktivite konsantrasyonu genelde (Tablo 6), ^{238}U ve ^{232}Th' den büyüktür.

Tablo 6. Bazı kayaç türlerindeki ve topraklardaki ortalama radyoaktivite konsantrasyonları (UNSCEAR, 2000)

Kayaç Türü	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Granit	35	70	1200
Bazalt	12	15	230
Kireçtaşı	25	8	70
Toprak	35	30	400

1.8.1.3. Radon

Renksiz, kokusuz, tatsız, 86 atom numarası ile periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alan radon kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşur. Erime noktası -71 ^{o}C, kaynama noktası ise -61,7 ^{o}C'dir (URL-12, 2007)

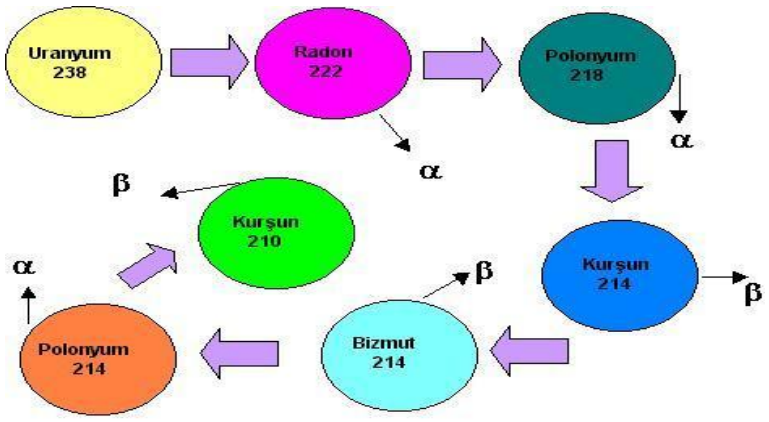
Radon; kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun radyoaktif bozunması sonucunda oluşur. Radonun ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (toron), ^{219}Rn (aktinon) olmak üzere üç izotopu bilinmektedir. Bunlar sırasıyla ^{238}U, ^{232}Th ve ^{235}U'in radyoaktif parçalanması sonucunda oluşmaktadır.

$^{238}U \longrightarrow \ldots\ldots \longrightarrow {}^{226}Ra \longrightarrow {}^{222}Rn\ (Radon) \longrightarrow \ldots\ldots$

$^{235}U \longrightarrow \ldots\ldots \longrightarrow {}^{223}Ra \longrightarrow {}^{219}Rn\ (Aktinon) \longrightarrow \ldots\ldots$

$^{232}Th \longrightarrow \ldots\ldots \longrightarrow {}^{224}Ra \longrightarrow {}^{220}Rn\ (Toron) \longrightarrow \ldots\ldots$

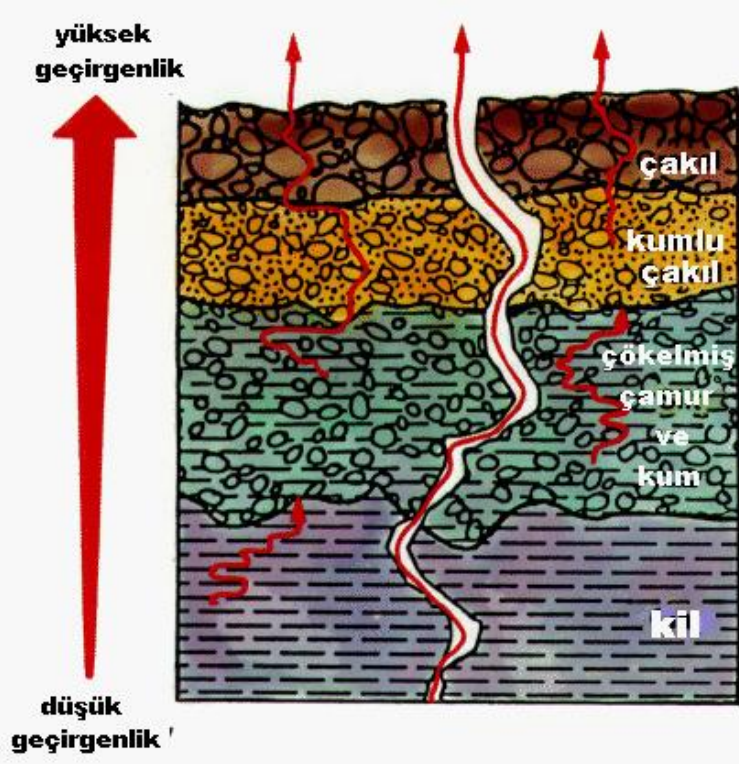
Radonun yarılanma ömrü 3,82 gün, toronun yarılanma ömrü 55,6 saniye ve aktinonun yarı ömrü 3,96 saniyedir. Aktinonun yarı ömrünün çok kısa ve doğal uranyumdaki ^{235}U/^{238}U oranının 0,00725 gibi çok düşük seviyelerde olması sebebiyle havada oluşturacağı konsantrasyon seviyesi düşük olacaktır (Yeşilbağ, 2008). Şekil 18'de radonun bozunma şeması görülmektedir.



Şekil 18. Radonun bozunma şeması (URL-13, 2008)

Radon doğal olarak oluşan radyoaktif bir gazdır. Coğrafik bölgenin jeolojik yapısıyla yakından ilişkili olarak çevreye yayılım göstermektedir. Radon gazı, Şekil 19'da görüldüğü

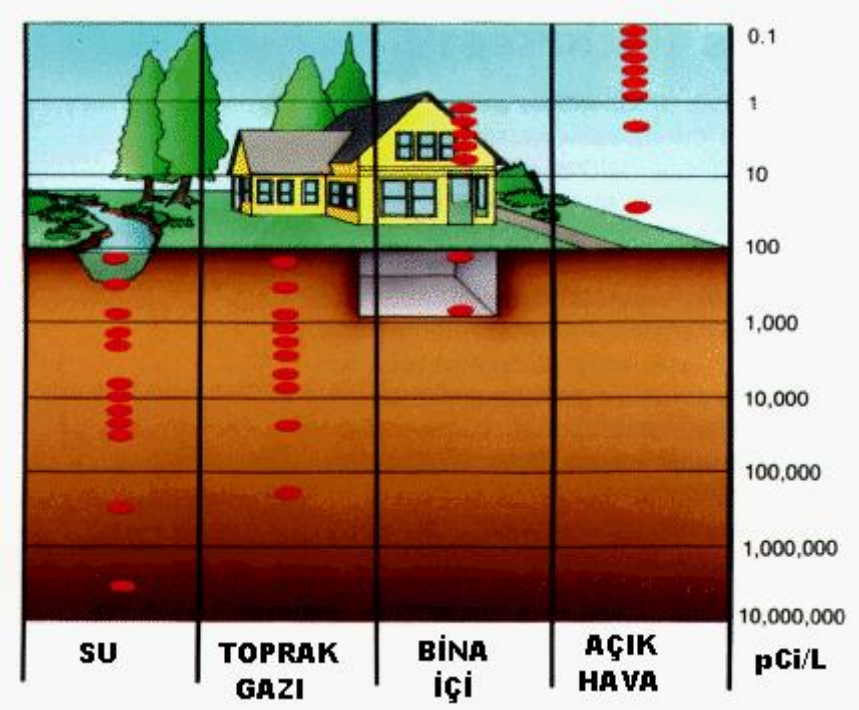
gibi kayalar ve topraklar arasından atmosfere yayılmakta ve böylece atmosfer içinde yaklaşık 0,1 pCi / litrelik bir ortalama radon konsantrasyonu bulunmaktadır. Yer kabuğundaki kayaçlarda bulunan Radon ya doğrudan gaz olarak ya da yeraltı suyundan çözünerek yeryüzüne ulaşır (Özmen, 1995).



Şekil 19. Radonun toprak gazı ile hareketi (URL-9, 2010)

Radyoaktivite yeraltında iki şekilde gözlenir. Bunlar geçici ve kalıcı radyoaktivitedir. Sıcak sularda gözlenen radyoaktivite genellikle geçici radyoaktivitedir. Geçici radyoaktivite suların radyoaktif kütlelerden geçerken kazandığı radyoaktivitedir. Sürekli radyoaktivitede ise radyoaktif elementlerin ışıması sonucu oluşan radyoaktivitedir. Suyun radyoaktifliği, suda çözünmüş halde bir veya birkaç radyoaktif elementin bulunmasından ileri gelmektedir. Radon gazının nispeten uzak mesafelere göçü ancak sulu ortamlarda mümkün olmaktadır. Yerkabuğu içindeki radyoaktif elemanların difuzyona uğraması sonucu kayaçlarda ve bunlar içindeki sularda radyoaktivite oluşmaktadır. Suların içindeki radon derin kökenli değildir. Çünkü bu gazın suda erimesi sıcaklık yükselince birdenbire azalmaktadır. Geldiği yerlerin 100 ^{0}C den az sıcaklıkta olması gerekir. Bu yüzden soğuk ve

ılık sular daha çok radyoaktiftir. Şekil 20'de görüldüğü gibi radon difüzyon sonucunda kayaç çatlaklarında taşınma ile günde 100 m kadar göç etmektedir (Özmen, 1995)



Şekil 20. Çesitli alanlarda radon konsantrasyonu (URL-9, 2010)

Topraktan havaya sızan radon önemli bir kapalı ortam kirletici faktörü olarak belirmektedir. Normal atmosferde hava olaylarına bağlı olarak düşük konsantrasyonlara ulaşır. Ancak kapalı ortamlarda veya radyoaktif su kaynaklarından oluşan kapalı havuz sistemlerinde yüksek konsantrasyona ulaşabilir. Binalarda birikebilmekte ve kimi zaman yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmektedir (Kulalı, 2009).

Genelde insanlar zamanlarının hemen hemen %90'ını kapalı mekanlarda geçirdikleri için radona maruz kalmaları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Binalardaki radon kaynağının büyük bir kısmı, binanın temelindeki toprak ve kayalardır. Radonun büyük kısmı, binalara, altındaki toprak ya da kayalardan girer. Radon ve diğer gazlar, toprak boyunca yükselir, binanın altında hapsolur. Hapsolan bu gazlar, basınç oluşturur. Evlerdeki hava basıncı genelde topraktaki basınçtan daha düşüktür. Binanın altındaki bu yüksek basınç nedeniyle gazlar yerden ve duvarlardan, daha çok çatlak ve boşluklardan, bina içlerine sızarlar (URL-7, 2012).

1.8.1.3.1. Termal Sularda Radyoaktivite ve Radon

Yeraltı suları, içerisinden geçtikleri kayalardan radyoaktif maddeleri çözündürerek radyoaktif özellik kazanmaktadırlar. Yeraltı sularında en çok rastlanan radyoaktif elementler ^{40}K, ^{87}Rb, ^{235}Th, ^{235}U ve ^{238}U'dir. Ayrıca, ^{238}U'in bozunumu sonucunda ortaya çıkan ^{222}Rn (radon), ^{226}Ra ile beraber kozmik ısınların etkisiyle radyoaktif özellik kazanan ^{14}N, ^{16}O ve ^{40}Ar da yer altı sularında bulunabilmektedir (Camgöz,2010). Radon özellikle yeraltı suyu olmak üzere, suda da çözünebilir. Tipik olarak, musluktan akan su içindeki radonun 10000'de biri havaya yayılır. Sudaki radon miktarı arttıkça, bina içindeki radon düzeyi de artacaktır (URL-7, 2012).

Doğal radyoaktivite olan alfa radyoaktivitesi, suların uranyum ve toryum elementini içeren ortamlarla teması sonucu yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Uranyum, toryum, radyum ve radonun zengin olarak bulunduğu kayaç grupları ise metamorfik kayaçlar, granit türü kayaçlar, organik madde içeren tortullar, kumtaşları ve karbonatlı tortul kayaçlardır. Ayrıca, bu tür kayaçlardaki fay zonlarının ayrışmanın yoğun olarak gözlendiği ve suların depolanmasına elverişli yerler olmasından dolayı bu bölgelerde depolanan suların bünyesine radyoaktif elementlerin geçmesi kolaylaşmaktadır (Varol, 2011).

Radyoaktif elementlere, magmatik oluşumlarda, kil ve şeyl gibi tortul kütlelerde de rastlanmaktadır. Kum-çakıl, kumtaşı, çatlaklı kireçtaşı gibi akifer özelliğindeki tortul kayaçlarda ise çok az miktarda da olsa radyoaktif madde bulunabilmektedir. Sulardaki radyoaktif maddelerin miktarı, büyük oranda ana kaya tipine bağlıdır. Granit tipi kayalardaki doğal radyoaktif maddelerin radyoaktivitesi diğer kaya çesitlerine kıyasla daha yüksektir (Kumru, 2002)

Mağmatik kayaçlarda bulunan radyoaktif elementlerin en önemlileri uranyum ve toryum'dur. Mağmatik kayaçlardaki uranyum ve toryum bulunabilirliği, mağmanın kökenindeki uranyum ve toryum konsantrasyonlarının değişimi ve mağmatik kristalizasyon ile yakından ilişkilidir. Mağmatik kayaçlardaki uranyum ve toryum içeriği asit kayaçlardan bazik kayaçlara doğru gidildikçe azalmaktadır.

Granit ve granit ailesinden kayaçlar asit karakterleri nedeniyle uranyum taşıyıcısı durumundadırlar ve bazen 10-14 ppm.' e kadar uranyum içerebilmektedirler. Ayrıca bu tür granitler primer kökenli damar tipi uranyum yatakları yönünden de zengin olabilmektedirler. Uranyum ve toryumun bazik mağmadan kristalize olamamaları, bunların silisli mağmalarda zenginleşmelerine sebep olur. Bu sebeple, silisçe zengin olan kayaçlar,

oldukça çok miktarda uranyum ve toryum içerirler. Granitik kayaçlar ve silisli tüfler yüksek uranyum içerikleri dolayısıyla yeraltı suyuna geniş ölçüde uranyum sağlarlar (Varol, 2011).

Uranyum yataklarının keşfi için yapılan çalışmalar için radon ölçümleri genellikle memba ve kuyu sularında gerçekleştirilir. Çünkü bu suların kaynağı yer altı sularıdır. Eğer bu yeraltı suları uranyum yataklarından geçiyorsa bu yatağı yıkayan sularda uranyum ve radyum elementleri çözünür ve suların içinde çözelti olarak kalır. Radon ise bu sulara ve içindeki taneciklere soğrulur. Böylece yeraltı sularının çıkış noktalarında yani memba ve kuyu sularının bileşiminde uranyum, radyum ve radon bulmak kaçınılmaz olacaktır. Yeraltı sularının uranyum yataklarından geçmesi yeraltı sularındaki radon konsantrasyonunun yüzeysel sulardan daha yüksek olmasının nedenidir. Sulardan gelen radon bina içlerine sular kullanıldığı zaman girer. Sudaki radon seviyesi, bina içi radon seviyesini önemli derecede etkileyebilecek kadar yüksektir. Bina içinde kullanılan ve özellikle kaplıca ortamlarındaki çeşmelerden suyun püskürtülmesi veya çalkalanması büyük miktarda radonun salınmasına neden olur (Özdemir, 2006).

1.8.1.3.2. Radon Gazının Sağlık Etkileri

Radonun reaktivitesi zayıftır. Bu nedenle teneffüs edildiğinde dokulara kimyasal olarak bağlanmaz. Ayrıca, dokulardaki çözünürlüğü çok düşüktür. Ancak, radon bozunma ürünleri, toz ve diğer parçacıklara tutunarak radyoaktif aerosoller oluştururlar. Bu nedenle, taşınarak solunum yoluyla alınabilirler. Bozunma ürünleri kararlı hale gelinceye kadar bozunma devam eder; bozunma sürecinin her aşamasında radyasyon salımı olur. Solunum borusunda olan bozunma sonucunda, bronşal epiteldeki radyasyon dozu artar. Bozunma ürünlerinin bazılarının alfa yayıcı olmaları nedeniyle alfa radyoaktivitesinin biyolojik etkileri önem kazanmaktadır (URL-10, 2012).

Radon gazının teneffüs edilmesi, solunum yetmezliği, baş ağrısı, öksürük gibi akut etkilere neden olmaz. Radyoaktif bozunmaya uğrayan radon gazı, teneffüs edildiğinde akciğerler tarafından tutulabilecek parçacıklara dönüşür. Bu parçacıkların bozunması devam ettiğinde ortaya çıkan enerji, akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla, zaman içerisinde kansere sebep olur. Ancak bu, yüksek dozda radona maruz kalmış herkes akciğer kanserine yakalanacak anlamına gelmez (URL-10, 2012).

Radon yeraltından ya gaz ya da suda erimiş olarak yeryüzüne çıkmaktadır. 3,8 günlük yarılanma süreli radon (^{222}Rn) bozunarak kısa yarılanma süreli (radyoaktif bozunmayla yarıya inene kadar geçen süre) Polonyum 218, Kurşun 214, Bizmut 214 ve Polonyum 214 gibi ağır metalleri üretir. Radyoaktif bir asal gaz olan radon, hücrelerdeki maddelerle kimyasal olarak etkileşmemesine karşılık, 2 proton ve 2 nötrondan oluşan alfa ışınları yoluyla ve ürettiği ağır metallerle vücudu etkilemektedir. Bu nedenle radondan türeyen ağır metallerin vücuttaki etkileri, radonunkinden daha çok olmaktadır.

1.8.1.3.3. Radon Konsantrasyon Limitleri

Kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonunun kontrolu amacıyla gerek ülkeler gerekse uluslararası kuruluşlar tarafından limit değerler belirlenmiştir. Söz konusu limit değerlerin aşılması halinde, radon konsantrasyonunu düşürücü tedbirlerin alınması tavsiye edilmektedir. Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları (IAEA-BSS) çerçevesinde, radon için tavsiye edilen düzeyler 200-600 Bq /m^3 olarak belirlenmiştir. Türkiye'de müsaade edilebilir radon konsantrasyonu ise 400 Bq /m^3 'tür. Uluslararası Radyasyondan Korunması Komitesi, Radona maruz kalma konusunu inceleyerek "Evde ve İşyerinde Radon-222 ' ye Karşı Korunma" konusunda 65 nolu bir rapor hazırlamıştır ve bu rapora göre Radona maruz kalma sınırları belirlenerek, bazı sınır değerler tavsiye edilmiştir. Bu değerler senelik doz için 3-10 mSv arasında kabul edilmiştir. Bu dozlara karşılık gelen Radon yoğunluğu evlerde 200-600 Bq/m^3, iş yerlerinde ise 500-1500 Bq/m^3 arasındadır (ICRP-65,1993). İçme sular için maksimum izin verilen sınır değer 11 Bq/L dir (EPA).

1.8.1.4. Radon Risklerinin Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler

Yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve doz değerlendirmeleri yapılarak, değerlendirme sonuçları tavsiye edilen radyoaktivite düzeylerinin üzerinde olan malzemeler bina yapımında kullanılmamalıdır.

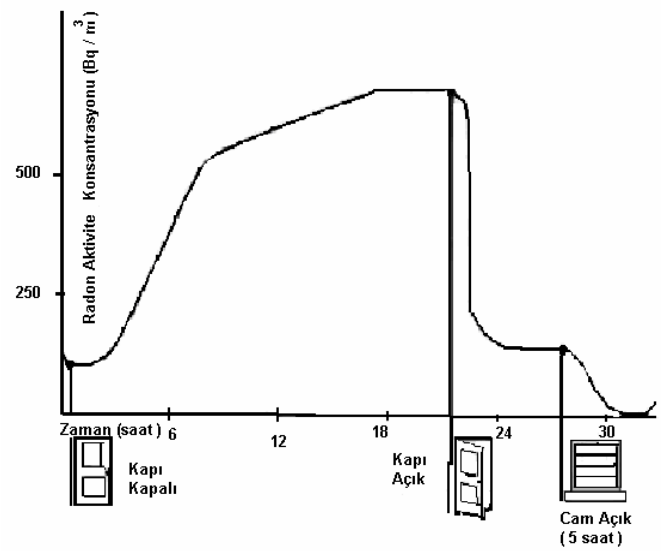
Binaların, özellikle bodrum katlarının toprakla izolasyonu iyi yapılmalıdır. Bodrum katların ve zemin katların tabanına şap, beton vb. dökülmelidir. Toprak ile temas eden yüzeyler sızıntıya imkan vermeyecek şekilde izole edilmelidir.

Radon düzeyi yüksek olabileceğinden, 20 yıldan eski olan binalarda çatlakların kapatılması, izolasyon ile bakımı sürekli yapılmalıdır.

Yerden ve duvarlardan bina içine sızan radon gazı bina dışına çıkamazsa bina içindeki konsantrasyon artacaktır. Bu nedenle kapalı ortamların havalandırılmasına özen gösterilmelidir. Şekil 21' de ortamdaki radonun havalandırma ile etkili bir biçimde azaldığı görülmektedir.

Evlerde, kapı ve pencerelerde izolasyon yapıldıysa havalandırma süresi arttırılmalıdır.

Radonun kanser riskini arttırdığından, kapalı ortamlarda sigara içilmemelidir.

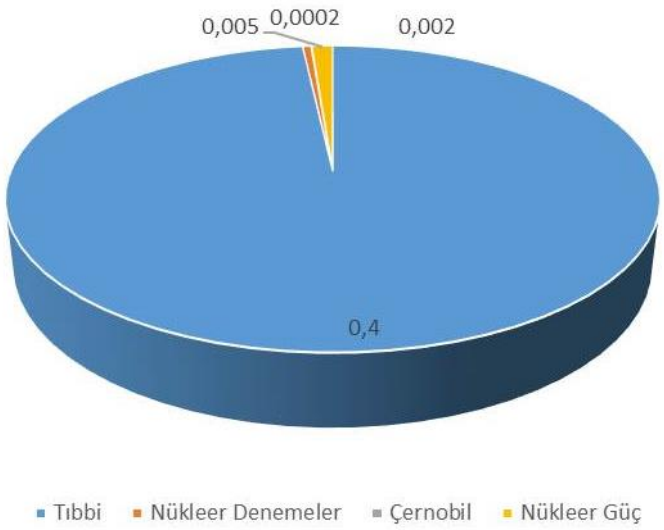


Şekil 21. Radon ve havalandırma ilişkisi (URL-7, 2012)

1.8.2. Yapay Radyasyon Kaynakları

Doğal radyasyonların yanı sıra, hızla ilerleyen teknolojinin getirdiği insan yapımı (yapay) radyasyon kaynaklarından radyasyona maruz kalınmaktadır. Yapay radyasyon kaynakları da aynen doğal radyasyon kaynakları gibi belli miktarlarda radyasyon dozuna maruz kalınmasına sebep olmaktadırlar. Ancak bu doz miktarı, talebe bağlı olarak artsa da doğal kaynaklardan alınan doza göre çok daha düşüktür. Doğal radyasyon kaynaklarının aksine tamamen kontrol altında olmaları da maruz kalınacak doz miktarını açısından önemli bir durumdur (TAEK, 2002).

Bazı yapay radyasyon kaynakları Şekil 22'de verilmektedir. Bunlar; tıpta tedavi için uygulanan iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, nükleer bomba denemelerinden kaynaklanan radyoaktif serpintiler, bilim ve teknoloji uygulamalarında kullanılan iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, Nükleer Reaktörlerin işletilmesi sırasında ortaya çıkan radyoaktif maddeler gibi. Tablo 7'de bazı yapay radyasyon kaynaklarının elde edilme ve kullanım alanları verilmektedir (URL-1, 2012).



Şekil 22. Dünya genelinde yapay radyasyon kaynaklarından maruz kalınan radyasyon dozlarının oransal değerleri (URL-7, 2012)

Tablo 7. Bazı yapay radyonüklitler (URL-1, 2012)

Nükleid	Sembol	Yarı Ömür	Kaynak
Trityum	^{3}H	12,3 yıl	Fizyon reaktörlerinde ve nükleer silah denemelerinde üretilir, nükleer silahların üretiminde kullanılır
İyot–131	$^{13}1I$	8,04 gün	Fizyon reaktörlerinde ve nükleer silah denemelerinde üretilir; tıp da tiroit tedavisinde kullanılır
İyot–129	^{129}I	$1,57x10^{7}$ yıl	Fizyon reaktörlerinde ve nükleer silah denemelerinde üretilir
Sezyum–137	^{137}Cs	30,17 yıl	Fizyon reaktörlerinde ve nükleer silah denemelerinde üretilir
Strosyum–90	^{90}Sr	28,78 yıl	Fizyon reaktörlerinde ve nükleer silah denemelerinde üretilir
Teknesyum–99	^{99}Tc	5,5 saat	^{99}Mo' nun bozunma ürünü, tıbbi tanılarda kullanılır.
Plütonyum–239	^{239}Pu	$2,41x10^{4}$ yıl	^{238}U 'in nötronla bombardımanı sonucu oluşur

1.8.2.1. Tıbbi Uygulamalar

Tıbbi alandaki radyasyon uygulamaları, radyasyonla görüntü elde edebilme ve radyasyonun hücre veya tümörleri yok edebilme yeteneğine sahip olması temeline dayanır. Bu iki özelliğinden dolayı radyasyon hastalıkların teşhis ve tedavisinde önemli rol oynar.

Radyasyonun tıbbi alanda yaygın kullanılmakta olan ve gün geçtikçe geliştirilen en eski çeşidi X ışınlarıdır. Genellikle hastalıkların teşhisi amacıyla kullanılan X ışınları, hastadan geçirilerek hastalıklı bölgenin görüntüsü röntgen filmi olarak da adlandırılan radyografi filmi şeklinde elde edilir.

Vücuttaki organ veya dokuların işlevleriyle ilgili çalışmalar yapmak üzere bazı radyoaktif maddeler kullanılır. Bu tür çalışmalarda radyoaktif madde, vücuda, radyoaktif maddenin incelenecek dokuda toplanmasını ve geçici bir süre buraya yerleşmesini sağlayacak bir kimyasal madde ile birleştirilerek verilir. Radyoaktif maddenin vücuttaki dağılımı veya akışı, vücuda verilen radyoaktif maddeden salınan gama ışınlarını algılayacak özelliklere sahip cihazlarla elde edilir.

Radyoterapi, kanser hastalıklarının %50'sinin tedavisinde etkin olarak kullanılır. Yaygın olarak yüksek enerjili elektron hızlandırıcılar ve Co-60 radyoaktif kaynaklı cihazlar kullanılır. Tedavinin amacına ulaşması tedavi edilecek bölgeye tedavi için gerekli doz verilirken sağlam doku ve organların dozunun minimum düzeyde tutulmasıyla mümkün olur (URL-7, 2012).

1.8.2.2. Endüstriyel Uygulamalar

X ve gama ışınlardan yararlanılarak röntgen filmleri çekilen endüstriyel ürünlerin (borular, buhar kazanları, her türlü makine aksamları, vs.) her hangi bir hata içerip içermediği tespit edilebilmektedir. Bu çalışmalar genel olarak radyografi olarak adlandırılırlar. Radyografi dışında radyasyondan yararlanılarak yine bir çok sanayi ürününün (demir, çelik, lastik, kağıt, plastik, çimento, şeker, vs.) üretim aşamasındaki seviye, kalınlık, nem ve yoğunluk ölçümleri yapılmaktadır. Işınlama tesislerinde gıda ışınlaması, tek kullanımlık atılabilir tıbbi malzemelerin sterilizasyonu yapılmaktadır (URL-7, 2012).

Akarsularda debi ölçümü, barajlarda su kaçaklarının tespiti, yeraltı sularının hareketlerinin takibi, radyasyondan yararlanılarak mutasyona uğratılan tohumlar daha verimli ve dayanıklı hale getirilmektedirler.

1.8.2.3. Nükleer Serpinti

Atmosferde gerçekleştirilen nükleer bomba denemeleri sonucu meydana gelen radyoaktif serpintiler, radyoaktif çevre kirliliğine neden olan en büyük yapay radyasyon kaynağıdır. Ancak 1960'lı yılların başlarında bu yolla maruz kalınan radyasyon dozu günümüzde nispeten azalmıştır. Bununla birlikte, yer üstü ve hatta yer altında yapılan bu tür denemeler bölgesel kirliliğe neden olmaktadır (URL-7, 2012).

1.8.2.4. Nükleer Güç Santralleri

Ağır radyoaktif (Uranyum gibi) atomların bir nötronun çarpması ile daha küçük atomlara bölünmesi (fisyon) veya hafif radyoaktif atomların birleşerek daha ağır atomları oluşturması (füzyon) sonucu çok büyük bir miktarda enerji açığa çıkar. Bu enerjiye nükleer enerji denir. Nükleer reaktörlerde fisyon reaksiyonu ile edilen enerji elektriğe çevrilir. Güneşteki reaksiyonlar ise füzyon reaksiyonudur. Bu reaksiyonun yarattığı sıcaklık fisyon reaksiyonundakinden çok daha fazladır (birkaç milyon derece santigrad). Bu yüzden bu sıcaklığı kontrol edebilecek bir füsyon reaktörü henüz kurulamamıştır (URL-7, 2012).

1.8.2.5. Tüketici Ürünleri

Televizyonlar, duman detektörleri, fosforlu saatler, paratonerler ve lüks lambası fitilleri gibi bazı tüketici ürünleri az miktarlarda da olsa radyoaktif madde içerirler. Kömür ve fosfat kayaları uranyum, radyum, potasyum-40 ve toryum içerirler. Fosfatın gübre ve kömürün yakıt olarak kullanılması esnasında çevreye az da olsa belli bir radyasyon dozu verilir (URL-7, 2012).

1.9. Dedektörler

1.9.1. Dedektör Verimi

Verim bir gamanın detektör tarafından sayılma olasılığıdır ve her bir gama için farklıdır. Gamanın geniş doğrultusuna, açısına ve detektöre girdiği yere bağlıdır. Bununla birlikte verimi ortalama bir sayılma olasılığı gibi kabul edebiliriz. Deneysel fiziksel verim bir aletin yanıtı ile ölçülen fiziksel niceliğin değeri arasındaki orandır (Krane, 2011).

1.9.2. Ayırma Gücü (Rezülasyon)

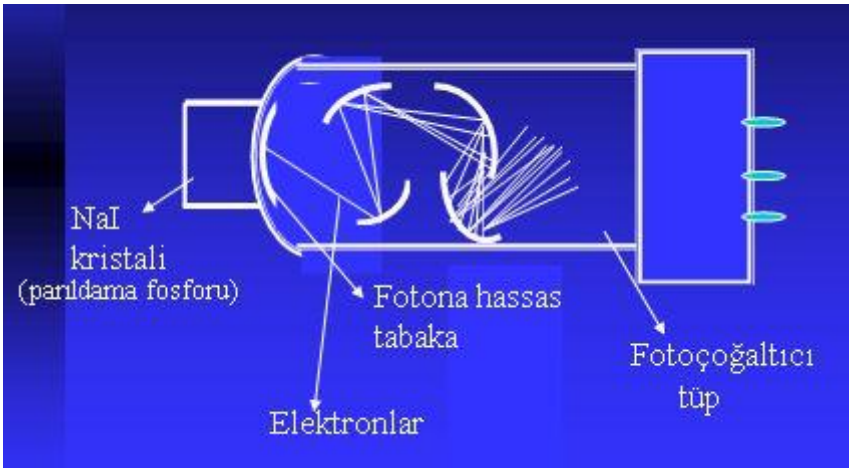
"Ayırma gücü" detektör tarafından ayırt edilebilen birbirine yakın enerji değerine sahip iki fotonun ΔE enerji farkının fotonun E enerjisine oranı (ΔE/E) olarak tanımlanır. Detektörün saydığı aynı enerjili fotonların spektrometrede gözlenen enerjileri aynı değerli değildir. Spektrometreyi oluşturan basamakların her birinden gelen istatistiksel sapmalar nedeniyle fotonların enerji dağılımı yaklaşık bir Gauss eğrisi gibidir. Gauss eğrisinin genişliği spektrometrenin ayırma gücünün ölçüsüdür. Deneysel olarak ayırma gücü Gauss eğrisinin yarı yüksekliğinin tam genişliğinin (FWHM) tepe noktasındaki enerjiye oranı (ΔE / E) olarak verilir (Krane, 2011).

1.9.3. Sodyum İyodür Dedektörü (NaI)

İnorganik sintilatörlerden en yaygın olarak kullanılanı, NaI'dir. Geçirgenliği sağlamak için tek kristale gerek vardır. Kristal üzerindeki yansımalar ve soğurulmalar çok kristalli sintilatörü kullanışsız hale getirir. Kristaldeki atomların birlikte etkileşmeleri enerji bant serilerinde kesikli enerji seviyelerine neden olurlar. En yüksek iki bant değerlik bandı ve iletim bandıdır.

NaI gibi yalıtkan bir materyalde değerlik bandı genellikle dolu, iletim bandı ise boştur. Gelen radyasyon bir elektronu, enerji aralığını atlayarak iletim bandına uyarabilir, elektron enerjisini foton yayınlayarak kaybeder ve değerlik bandına geri döner.

Foton yayınlanma olasılığını arttırmak ve ışığın kendisinin soğurulmasını azaltmak için kristale aktivatör denen küçük miktarda safsızlıklar ilave edilir. En çok kullanılan aktivatörlerden biri talyumdur ve böyle bir dedektör NaI(Tl) şeklinde gösterilir. Aktivatör, enerji aralığında durumlar meydana getirir ve bu aktivatör durumları arasında ışık yayınımı oluşur. NaI' de 303 nm dalga boylu ışık yayınlanırken NaI(Tl)' de 410 nm' lik ışık yayınlanır. NaI(Tl)' da bu enerjide soğurulma olmaz, çünkü aktivatör taban durumları işgal edilmez ve dalga boyundaki morötesi bölgesinden görünür bölgeye değişim, pek çok fotoçoğaltıcı tüpün maksimum duyarlılığı ile uyuşur (Krane, 1988).



Şekil 23. Sintilasyon dedektörünün bölümleri (URL-3, 2012).

Sintilasyon detektörü (Şekil 23) şöyle çalışır;

- Gelen radyasyon detektöre girer ve atomları uyarılmış düzeylere çıkaran çok sayıda etkileşme yapar.
- Uyarılmış durumlar hızla görünür bölgede ışık yayınlar.
- Işık foto duyarlı yüzeye çarparak foton başına en çok bir fotoelektron salınmasına neden olur.
- Bu ikincil elektronlar fotoçoğaltıcı tüpte çoğaltılır, hızlandırılır ve çıkış pulsları şekline dönüştürülür. Meydana gelen pulsun büyüklüğü radyasyonun enerjisi ile orantılıdır.
- Bu detektörler sayım ve aynı zamanda enerji ayırımı için kullanılır (URL-8, 2007)

1.9.4. HPGe Detektörler

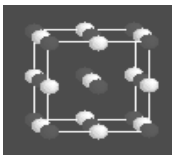
Bu detektörler radyasyonun bu maddelerle oluşturduğu iyonizasyon ilkesi ile çalışırlar. Genellikle radyasyonun enerjisini ölçmek için kullanılırlar. Yarı iletken detektörler bir p-n eklemi olarak düşünülebilirler. Ters besleme altında detektörde elektron ve delik (hole) arınmış bir hassas bölge oluşur. Detektör veriminin yüksek olması için derin hassas bölgeye, derin hassas bölge elde etmek için de oldukça saf madde gerekir. Hyper-pure Germanium (Çok saf germanyum) detektörleri buna güzel bir örnektir. Bu türde safsızlık az, direnç yüksek dolayısıyla çözmegücü çok yüksektir. Diğer bir avantajı da saf germanyum detektörlerinin besleme gerilimi uygulanmadığı zaman oda sıcaklığında tutulabilir olmasıdır. Dezavantajları ise çalışırken sıvı azot sıcaklığında tutma gereği ve düşük verim göstermesidir. Bu tiplerde ortalama verim %7 en iyilerinde %18 dir. HPGe detektörler $3keV \leq E \leq 1MeV$ lik enerji aralığında mükemmel enerji ayırım karakteristiklerine sahiptir (URL-8, 2007).

1.9.5. NaI(TI) ve Ge Dedektörlerinde Verim ve Çözünürlük

Şekil 24'deki iki spektrumda, Ge ve NaI (Tl) detektörlerinin verimi (esas olarak fotopik alanı) ve çözme gücü (fotopikin genişliği) arasında ki farklılıklar görülmektedir. NaI(Tl) detektörleri Ge detektörlerinden daha yüksek verime sahip olup daha ucuzdur (Ge'nin maliyetinin 1/10 veya daha azı) ve çalışma şartları daha basittir. NaI için soğutma gerekli değildir. Günümüzde, nükleer spektroskopi daha karmaşık bozunmalar ile çalışmak durumunda olduğundan, çözme gücü kritik bir öneme sahip olmaktadır. Böyle bozunmalar daha dikkatli çalışmalar gerektirdiğinden, tüm gamma ışını enerjileri ve şiddetleri tespit edilebilmelidir. Ge detektörleri ile yapılan ilk çalışmalarda iyi bir çözme gücü elde etmek istendiğinde verim azalmaktaydı. Bu detektörler NaI(Tl) detektörlerinin sadece yüzde birkaçı kadar verime sahiptirler. Ge'nin saflaştırılmasında kullanılan gelişmiş teknikler günümüzde verimi NaI(Tl) un veriminden daha az olan büyük hacimli Ge detektörlerini yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ge,NaI(Tl)'dan daha düşük atom sayısına sahip olduğundan fotonlar için daima daha az etkileşme olasılığına ve böylece daha az verime sahip olacaktır. Şekil 24'de bu iki tip detektör ile elde edilen spektrumların verim ve çözünürlüklerinin karşılaştırılması görülmektedir.

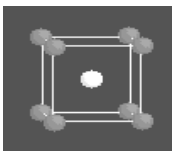
Yüksek verim

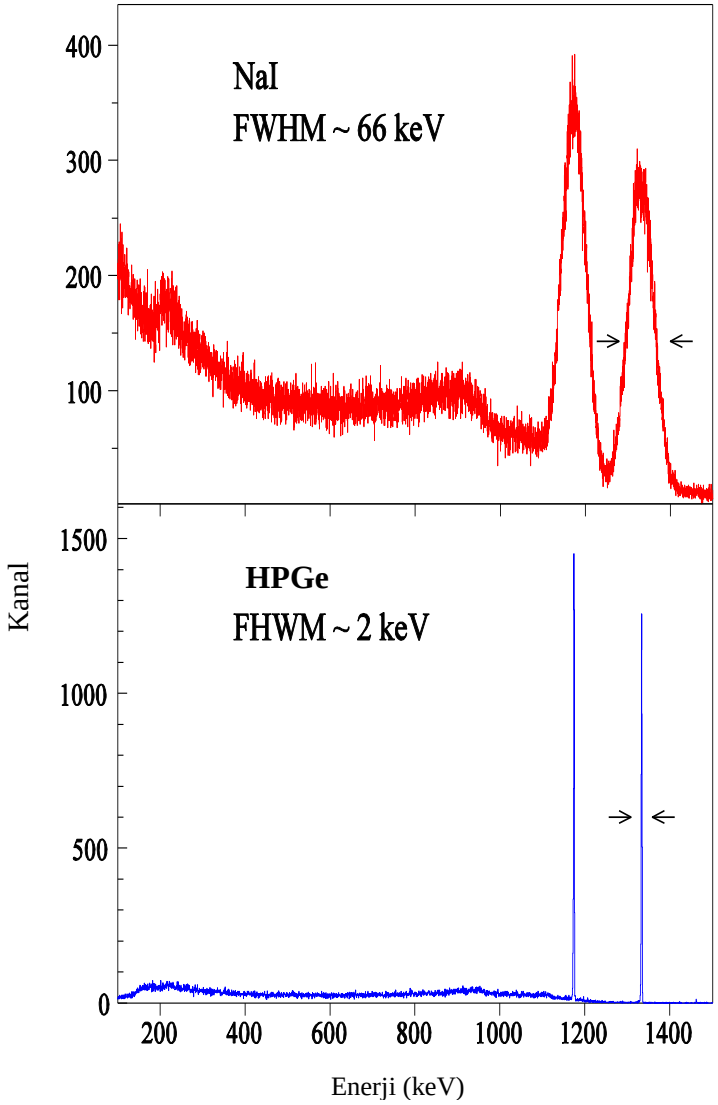
Zayıf Enerji Çözünürlüğü



Düşük Verim

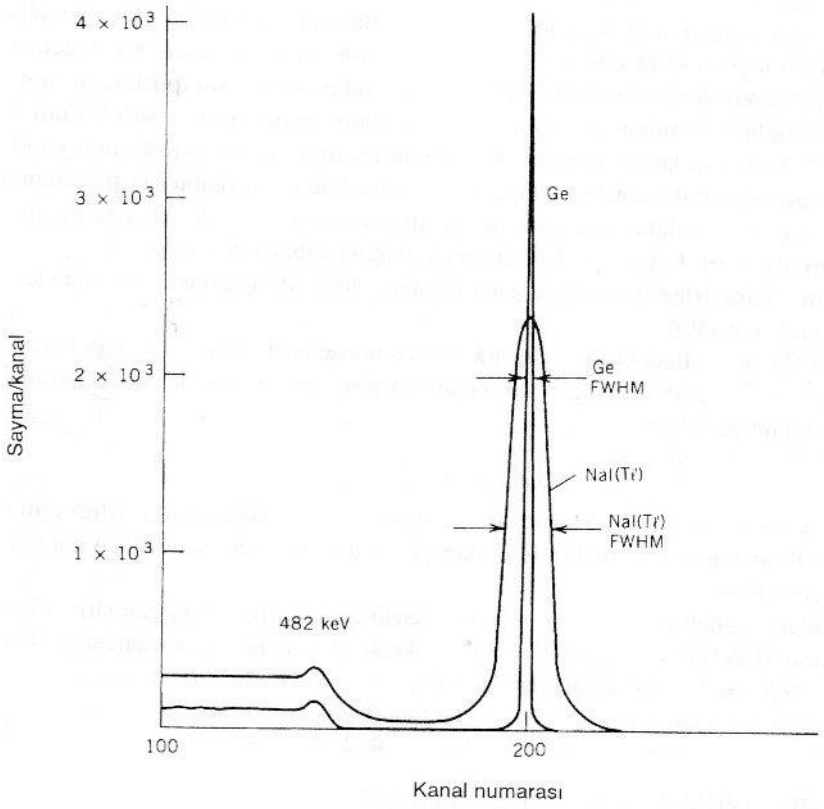
Yüksek Enerji Çözünürlüğü





Şekil 24. NaI (Tl) ve Ge (Li) ile alınan spektrumlarının karşılaştırılması

Şekil 25'de ise ^{137}Cs'nin NaI(Tl) ve Ge (Li) ile alınan spektrumlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Fotopik enerjisi 662 kev'dir. NaI(Tl)'un çözmegücü (FWHM) yaklaşık 40 keV iken Ge için yaklaşık 1 keV'dir. Ge için Şiddet (pik alanı) NaI(Tl)'nınkinin yaklaşık %11'i kadardır (Krane, 2001).



Şekil 25. ^{137}Cs'nin NaI (Tl) ve Ge (Li) ile alınan spektrumlarının karşılaştırılması (Krane, 2001).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışmanın kapsamı, Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan kaplıcalarda hava, su ve çevrelerindeki topraklarda doğal radyoaktivite ölçümü yapmak ve daha sonra bu sonuçları kullanarak bu konsantrasyonlara karşılık gelen doz eşdeğerlerini hesaplamaktır. Bu çalışmada su sıcaklığı 36-80 ^{o}C arasında değişen, suları çeşitli rahatsızlıklar için etkili olduğu bilinen Ayder, Ilıcaköy, Havza ve Ladik kaplıcalarında havada, sularda ve kaplıca çevresindeki topraklarda öncelikle radon konsantrasyonları ölçülmüştür. Kaplıca ortamında havada radon konsantrasyonu aktif AlphaGUARD PQ 2000PRO cihazı ve pasif CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak iki yöntem ile yapılmış ve bu değerler karşılaştırılmıştır. HPGe dedektörü ile kaplıca çevresinden alınan toprak örneklerinin ve kaplıca sularından alınan su örneklerinin gama spektrometrik analizleri sonucunda, örneklerde bulunan radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Kaplıca içinde ve dışında gama doz ölçümleri yerden 1m yükseklikte NaI dedektörü (Inspector 1000) kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca sularda toplam alfa, toplam beta aktivitesi ölçülüp kimyasal analizleri yapılmış bu analizler sonucunda kaplıca suları sınıflandırılmıştır.

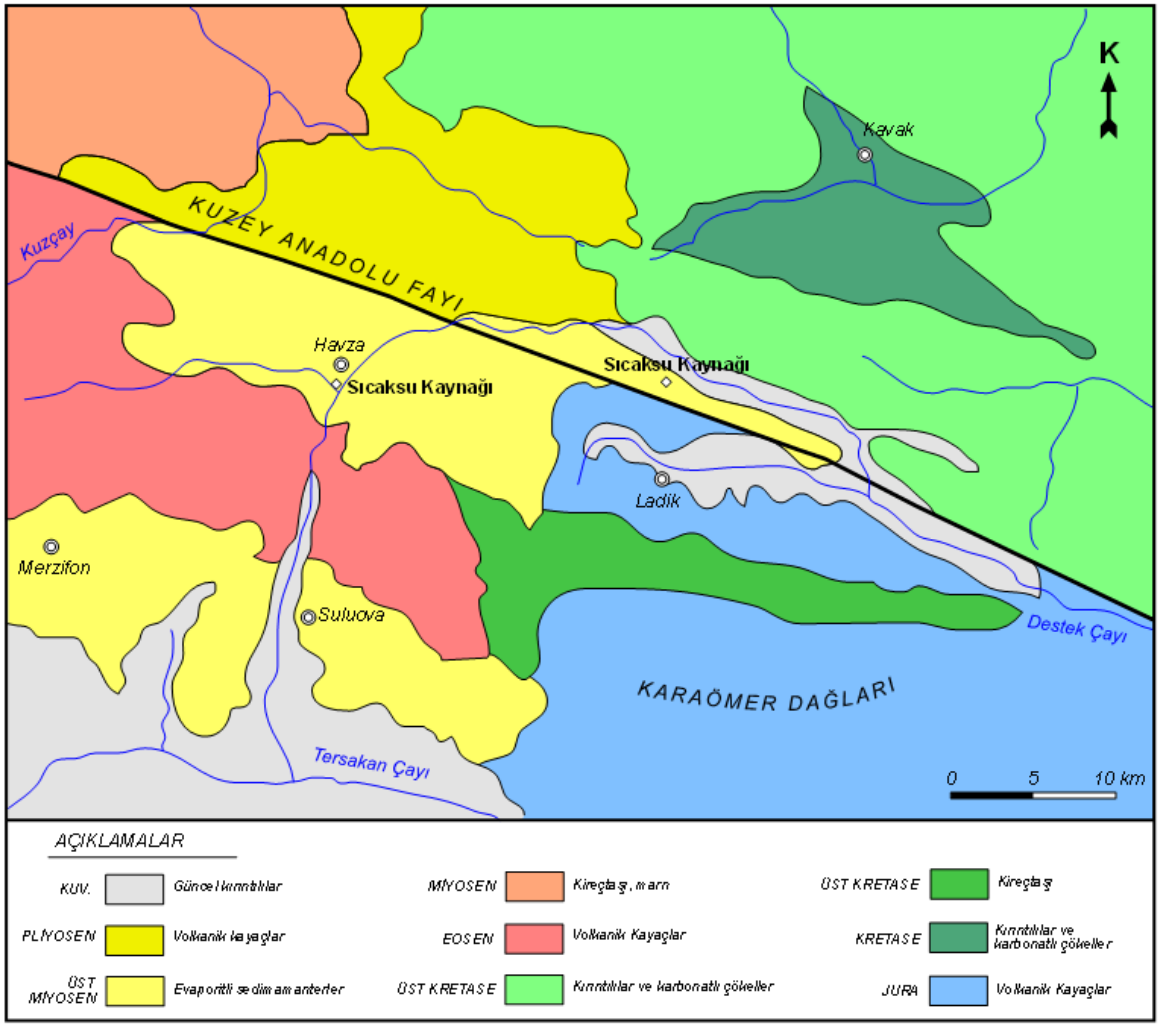
2.1. Ladik-Havza Kaplıcalarının Bulunduğu Bölgenin Jeolojik Yapısı

Stratigrafik olarak Kuzey Türkiye'de iki farklı kayaç grubu bulunmaktadır. Birinci grup çoğunlukla metamorfik olan Liyas ve daha yaşlı "temel kayaçları", ikinci grup ise bunları açısal uyumsuzlukla örten ve metamorfik olmayan Liyas ve daha genç yaşlı "örtü kayaçları"ndan oluşmaktadır (Tüysüz, 1993). Çalışma alanını da içine alan bölgede Paleozoyik ile Kuvaterner zaman aralığında oluşmuş Liyas öncesi metamorfik kayaçlar ile Liyas sonrası döneme ait örtü kayaçları bulunmaktadır. Bunlar Liyas öncesinde oluşmuş metamorfik birimler ile Liyas sonrasında oluşmuş Erken Kretase, Geç Kretase, Eosen ve Neojen yaşlı birimlerdir.

Her iki havzanın Orta-Doğu Karadeniz kuşağında yer alması nedeniyle havzalarda yüzeyleme veren jeolojik birimler tüm Doğu Pontid'lerin ortak özelliklerini yansıtmaktadır. Amasya-Samsun yöresinde ayrıntılı jeolojik çalışma yapan Alp (1972), Liyas sonrası dönemi Mesozoyik ve Senozoyik dönem olmak üzere iki bölümde

incelemiştir. Amasya ve çevresindeki Liyas sonrası kayaçlar için Alp (1972)' ye benzer sınıflamalar yaparak, kayaçları Liyas-Erken Kretase birimleri, Üst Kretase Birimleri Paleosen-Eosen ve Neojen birimleri olmak üzere dört bölümde incelemiştir.

Sıcak su kaynaklarının yakın çevresinde ise en yaşlı birim volkanik kayaçlardan oluşan Liyas yaşlı birimlerdir. Bu birimlerin üzerine Üst Kretase yaşlı karbonat ve kırıntılı çökellerden oluşan birimler gelmektedir. Bölgede Eosen, volkanik birimlerce karakterize iken Miyosen kireçtaşı, marn ve tüflerle karakteristiktir. Pliyosen bazalt ve andezitleri çalışma alanı ve çevresinde yüzeylenen genç volkanitler olup bunların üzerinde güncel alüvyal çökeller gelmektedir (Şekil 26). Şekil 27 ve 28 de Samsun İli kaplıcaları görülmektedir.



Şekil 26. Havza ve Ladik (Samsun) sıcak su kaynakları ve çevresine ait genelleştirilmiş jeoloji haritası (Alp, 1972)



Şekil 27. Ladik kaplıcası havuzu



Şekil 28. Havza kaplıcası havuzu

2.2. Ilıcaköy-Ayder (Rize) Kaplıcalarının Bulunduğu Bölgenin Jeolojik Yapısı

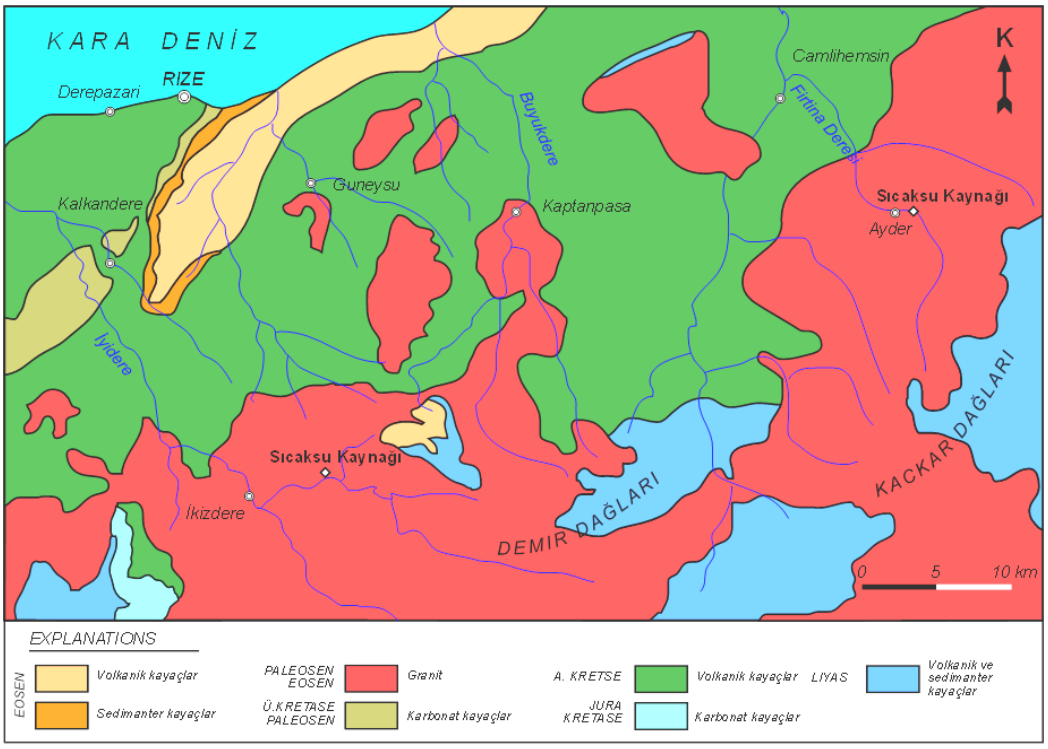
Bölgede, genellikle Liyas'tan Eosen'e kadar belli zaman aralıklarında gelişimini sürdüren magmatik faaliyetlerin ürünleri olan magmatik kayaçlar ve magmatik faaliyetlerin durduğu dönemlerde çökelen tortul istifler yaygındır. Bölgede, Doğu Pontidler Kuzey ve Güney Zon olmak üzere farklı litostratigrafik özellikler taşıyan iki ayrı zona ayrılmıştır (Ketin, 1966).

Genel olarak olarak Paleozoyik, metamorfik kayaçlarla temsil edilmektedir ve bunlar temel kayaçları oluşturmaktadır. Liyas yaşlı volkano-tortul seri tarafından açısal uyumsuzlukla üstlenen temel kayaçların yaşı, bölgesel metamorfizmanın yaşı ve stratigrafik konumu göz önünde bulundurularak Paleozoyik olarak kabul edilmiştir. Birim, Gümüşhane civarında Paleozoyik yaşlı granitler tarafından kesilmiştir (Yılmaz, 1972). Çalışma alanı ve çevresinde Mesozoyik, Liyas, Geç Jura-Erken Kretase ve Geç Kretase yaşlı birimler yüzeylenme vermektedir. Liyas'ın volkanik, Üst Jura-Alt Kretase'nin platform karbonatlarıyla temsil edildiği bölgede Üst Kretase dönemi farklı ortam koşullarında gelişmiş birimler ile karakteristiktir. Bölgede, volkanik birimler arasında yer alan platform karbonatlarının kalınlığı 100-200 metre arasında değişmektedir ve bu seri her iki zonda da yüzeylenmektedir. Birim Kuzey Zon'da daha masif yapılı killi, çörtlü ve kumlu kireçtaşları ile temsil edilirken, Güney Zon'da ise orta-kalın tabakalı çökellerle karakteristiktir. Üst Kretase dönemi boyunca Doğu Pontid'lerin Kuzey zonu'nda gelişen volkanizma sonucu kalın bir volkanik istif gelişmiştir. Bunları uyumlu olarak üzerleyen seri ise tortul kayaçlardan oluşmaktadır (Güven, 1993). Bu birim genel olarak killi, kumlukireçtaşı, marn, şeyl ve kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Kalınlığı 200-250 metre arasında olan birimin yaşı, fosil bulgularından yararlanılarak, Maastrihtiyen-Erken Paleosen olarak kabul edilmiştir. Çalışma alanında sadece Kuzey Zon'da yüzeylenen resifal kireçtaşları (Güven, 1993) 150-200 metre kalınlığındadır ve Maastrihtiyen-Erken Paleosen yaşlı birimler ile yanal geçişlidir ve Eosen yaşlı volkano-tortul seri tarafından açısal uyumsuzlukla örtülmektedir.

Doğu Karadeniz Bölümü'nün doğu kesimlerinde yer alan Kaçkar Dağları, Doğu Pontid Kuzey Zonu içerisindeki granitoyidlerin en fazla yüzeylendiği bölgedir. Bu bölgede, genelikle Eosen yaşlı birimlerin içine sokulan intrüzif kayaçlar, Güven (1993) tarafından Kaçkar Granitoyidleri olarak tanımlanmıştır. Üst Kretase boyunca gelişimini sürdüren ve büyük ölçüde Paleosen sonunda yerleşimini tamamlayan granitoyidler ile Eosen yaşlı birimler arasında bir aşınma düzlemi bulunmaktadır. Eosen döneminde yenilenen granitoyid intrüzyonları ise Eosen yaşlı kayaçlarda kontakt etkiler yapmıştır.

Çalışma alanı ve çevresinde Senozoyik, genellikle kırıntılı çökellerle başlar ve üst bölümlere doğru volkano-tortul seviyeye geçiş gösterir (Güven, 1993). Geç Kretase yaşlı birimler üzerine taban konglomerası ve açısal uyumsuzlukla gelen birimler, kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn ara katkılı andezit, bazalt ve bunların proklastitlerinin oluşturduğu volkano-tortul bir seridir. Yaklaşık 700 metre kalınlığındaki birim, kumlu ve killi

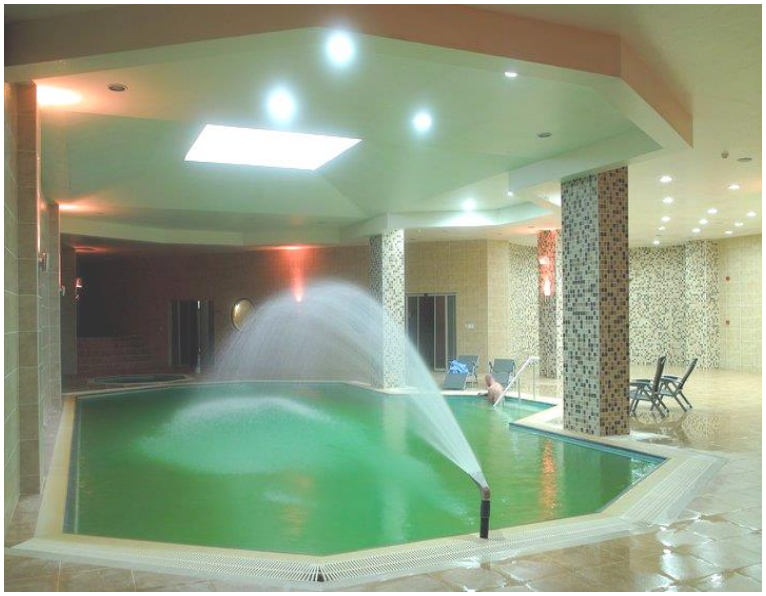
seviyelerde taşınmış Miyosen yaşlı fosil parçaları içeren ve Pliyosen yaşlı olarak kabul edilen bir birim tarafından açısal uyumsuzlukla üstlenmektedir (Güven, 1993) (Şekil 29). Şekil 30 ve 31'de Rize ili kaplıcaları görülmektedir.



Şekil 29. Ilıcaköy (İkizdere-Rize) ve Ayder (Rize) sıcak su kaynakları ve çevresine ait genelleştirilmiş jeoloji haritası (Güven, 1993)



Şekil 30. Ayder kaplıcası havuzu



Şekil 31. Ilıcaköy kaplıcası havuzu

2.3. Toprak ve Su Örneklerinin Gama Spektrometrik Analizleri

2.3.1. Arazi Çalışmaları

Rize ili Ayder ve Ilıcaköy Kaplıcası ile Samsun ili Havza ve Ladik ilçelerinde bulunan kaplıca çevrelerinden toprak örnekleri alınmıştır. Ladikte bulunan Kuzey Anadolu Fay Hattından toprak örnekleri alınmıştır. Toprak numunelerinin toplanması yüzeyden 15-20 cm derinliğe inilerek yapılmıştır. Numuneler alınırken rastlanan bitki ve kök artıkları, çürümüş ağaç, yaprak ve dalları gibi biyolojik kalıntılar örnekten ayrılmıştır. Yalnız toprak almaya dikkat edilerek çakıl ve taşlar da numune dışına bırakılmıştır. Numuneler önceden etiketlenmiş temiz, ağızları kapanabilen naylon torbalara konulup laboratuvara getirilmiştir.

Herbir kaplıcadan 10'ar litre su alınarak daha önceden steril hale getirilmiş, etiketlenmiş plastik şişelere doldurulduruları laboratuvara getirilmiştir.

2.3.2. Örneklerin Analize Hazırlanması

Toplanan numuneler öncelikle sınıflandırılmış ve oda sıcaklığında kurutulmuşlardır. Daha sonra, numunelerin öğütme ve eleme işlemleri yapılmıştır. Toprak örnekleri homojen olması için 80 Mesh'lik elekten geçirilerek deney geometrisine uygun biçimde hazırlanan,

çapı 6 cm ve yüksekliği 5 cm olan plastik kutuların içine konulmuş ve kutuların ağızları sıkıca kapatılarak 1 ay süreyle bekletilmiştir. Böylece, ^{238}U ve ^{232}Th ürünleri arasındaki radyoaktif dengenin oluşması sağlanmış ve numuneler sayıma hazır hale getirilmiştir.

Su numuneleri 10 litrelik temiz cam beherlere aktarılarak, 50–60 $^{\circ}C$'lik bir ısıtıcı üzerine buharlaşmaya bırakıldı. Şekil 32' de su numunelerinin gama spektroskopik analize hazırlamak amacı ile buharlaştırılması görülmektedir. 1-2 hafta süreyle su miktarları 100 mL kalana kadar buharlaştırmaya devam edildi. Buharlaşma esnasında beher cidarlarına yapışan maddeleri önlemek için beher içersine birkaç damla HCl katıldı. Sonra kalan miktarlar boş sayımları alınmış marinelli kaplarına konularak, iç dengeye gelmeleri için yaklaşık bir ay süreyle bekletildi. Daha sonra sırayla gama spektrometresi cihazında 80.000 s süreyle sayıldılar.

Gamma spektroskopik ölçümler 1332,5 keV'de 1,9 keV rezülüsyona ve %15' lik relatif verime sahip olan Canberra, GC 1519 model yüksek saflıkta coaxial Ge dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Bekleme süresi dolan örneklerin çok kanallı gama dedektörü ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ölçümlerin tamamlanmasının ardından örneklerden elde edilen spektrumların bilgisayar ortamında analizlerinin yapılıp aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır.



Şekil 32. Su numunelerinin gama spektroskopik analize hazırlamak amacı ile buharlaştırılması

2.3.3. Deneysel Sistem

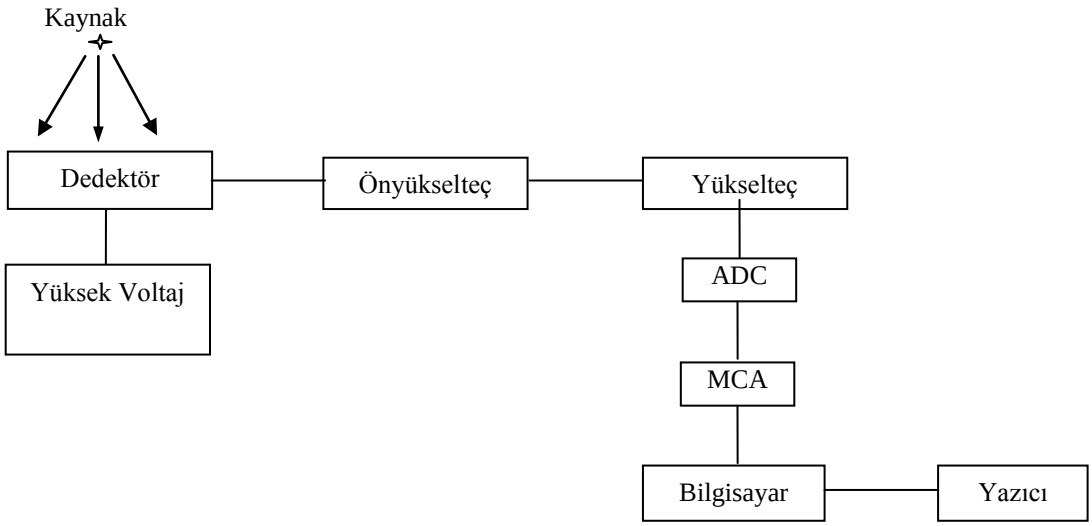
Çalışmada toprak ve su numunelerinin radyoaktivite analizleri için, K.T.Ü. Fen Fakültesi Fizik Bölümü Laboratuarında bulunan çok kanallı gama spektroskopisi

kullanılmıştır. Gamma spektroskopik ölçümler 1332,5 keV'de 1,9 keV rezülüsyona ve %15' lik relatif verime sahip olan Canberra, GC 1519 model yüksek saflıkta coaxial Ge dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Şekil 33'de dedektörün genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 33. Dedektörün genel görünüşü

Dedektör, önyükselteç, spektroskopi yükselteci, analog sayımları elektronik sinyallere dönüştüren ADC sistemi, çok kanallı analizörden (MCA) oluşmaktadır. Şekil 34'de sistemin blok şeması verilmektedir.



Şekil 34. Gama spektrometre sisteminin blok şeması

Bu sistemde bulunan üniteler aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

a) Dedektör

Gama ışınlarının ölçülmesinde kullanılan dedektörlerde, gelen foton kristalle etkileşerek enerjisini kaybeder. Bu etkileşmeler sonucunda, kristalde elektron-boşluk çiftleri meydana gelir ve dedektöre uygulanan yüksek voltajın oluşturduğu elektrik alanı ile diotlara sürüklenir. Gelen radyasyonun enerjisi ile orantılı olarak biriken bu yük, analizörde ölçülebilen bir voltaj pulsu meydana getirir.

b) Yüksek Voltaj Ünitesi

Dedektörün yük birikimi için gerekli elektrik alanı oluşturmak üzere, (-) veya (+) 5000 V 'a kadar gerilim sağlayan ünitedir.

c) Önyükselteç

Önyükselteç, dedektörden gelen pulsları depolanan enerji ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştürür. Elektronik katlar için pulsları şekillendirir ve büyütür. Dedektör ile elektronik devre arasında empedans uyumu sağlar. Önyükselticinin ilk devresi dedektöre çok yakın yerleştirilmiş bir alan etki transistörü (FET)'dür. Hemen hemen bütün dedektörler çok düşük genlikte pulslar ürettiklerinden ve uzun kablo durumunda sinyal kapasitif yükleme gürültüsü arasında kaybolabileceğinden düşük gürültülü gerçek sinyalleri elde edebilmek için önyükselteçler dedektöre çok kısa kablolarla bağlanmışlardır ve ön yükselticinin girişi dedektörle aynı tarzda soğutulur, yani sıvı azot sıcaklığında muhafaza edilir.

d) Yükselteç

Önyükselteçten gelen pulsların, puls yüksekliği analizi yapılabilecek kadar yükseltilmesini ve en iyi enerji ayrılmasını sağlayacak şekillendirmeyi sağlar. Modern sistemler için maksimum çıkış pulsunun genliği 2 V'tan 10 V'a kadar değişir. Çoğu yükselticiler hem unipolar çıkış (yani, sinyalin pik kısmı tamamen pozitif veya tamamen negatiftir) hem de bipolar çıkış (yani, sinyal hem pozitif hem de negatif bileşene sahiptir) ile donatılmıştır. En iyi sinyal- gürültü oranını elde etmek için, yükselticinin unipolar çıkışı seçilir. Kullanıcının bilerek seçmesi gereken başka bir yükseltici denetimi puls genişliğini belirleyen ''Shaping time'' sabitidir. Bir spektrumdaki pikler için en iyi rezülasyon genellikle sistem daha uzun bir zaman üzerinden gürültünün ortalamasını alabileceği için daha uzun zaman sabitiyle elde edilebilir. Bununla birlikte, daha uzun zaman sabitleri daha fazla rastgele toplanmaya neden olur. Bundan dolayı, eğer sistem 2.000 s'lik sayma hızlarında çalıştırılabilecekse daha kısa zaman sabitleri kullanılabilir.

e) Analog Dijital Çevirici (ADC)

Spektroskopi yükseltecinden gelen sinyalleri genlikleri ile orantılı olarak sayısal sisteme dönüştürür. Burada ölü zaman (dead time) çok önemlidir. Ölü zaman, birim zaman başına kazanç veya dönüşümün artmasıyla orantılı olarak artar. Yani ADC'nin meşgul olduğu zamandır. ADC genellikle puls yüksekliği analizinde kullanılır.

f) Çok Kanallı Analizör (MCA)

Çok kanallı analizörler, genellikle puls yüksekliği yapan cihazlardır, MCA'da en önemli devre veya bileşen, örneksel/sayısal dönüştürücüdür (analog to digital converter (ADC)). Burada, gelen her puls, sayısal hale çevrilir ve genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her kanal belli bir enerjiye karşılık gelir ve sayım süresince gelen pulsların birikmesiyle pikler oluşur.

2.3.3.1. Deneysel Yöntem

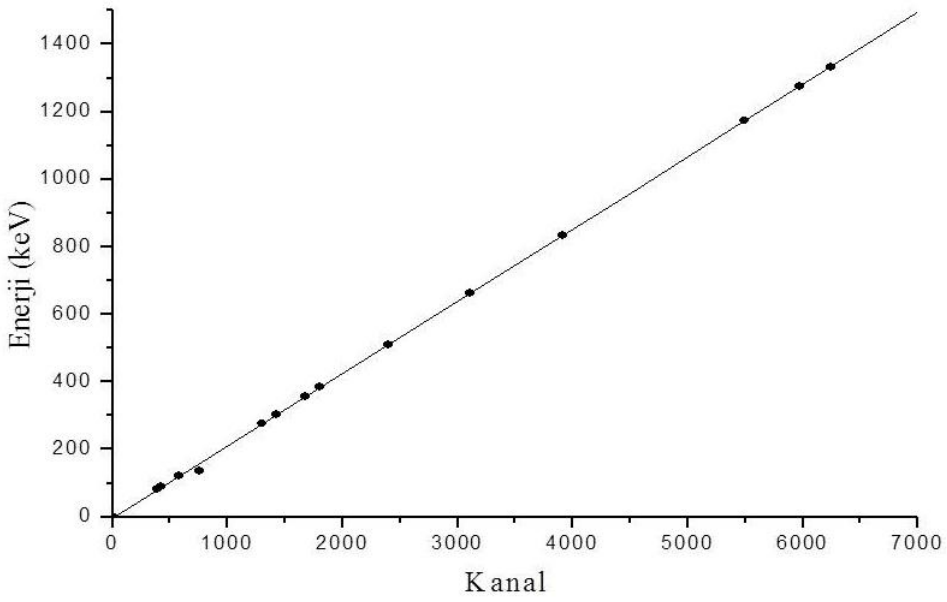
2.3.3.1.1. Enerji Kalibrasyonu

Bilgisayar hafızasında toplanan spektrumların analiz edilebilmeleri için, hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Böylece numunede bulunan radyoaktif çekirdek türleri bulunabilir. Enerji kalibrasyonunun yapılabilmesi için önceden enerjileri bilinen çekirdeklerden oluşmuş standart bir kaynağa (kaynaklara) ihtiyaç vardır. Enerji ve verim 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. Tablo 8'de kalibrasyon için kullanılan standart kaynağa ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 8. Standart Kaynağın Özellikleri

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	356	3830	62
^{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

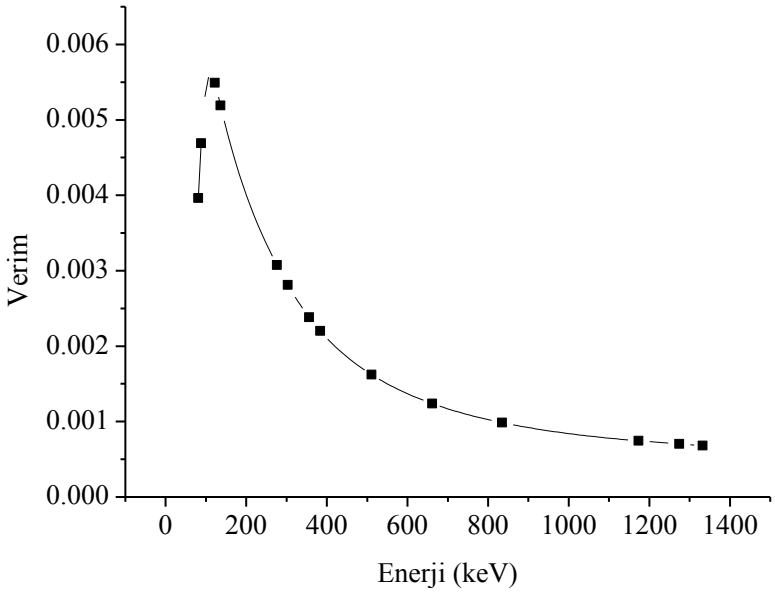
Enerji kalibrasyonu için dedektöre belli bir mesafede konulan standart kaynağın spektrumu elde edilerek enerjilerin hangi kanallara geldiği tespit edildi. Enerjinin kanallara göre değişim grafiği Şekil 35'de gösterilmektedir.



Şekil 35. Enerji kalibrasyon eğrisi

2.3.3.1.2. 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. Dedektörün saydığı gama sayımlarının gerçek değerini bulabilmek için dedektöre ait verim düzeltmesinin yapılması gerekir. Verim tayini için genelde standart kaynaklar kullanılır. 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. Ölçümlerde kullanılacak enerji-verim eğrisi Şekil 36'da gösterilmektedir.



Şekil 36. Verim - Enerji Eğrisi

2.3.4. Spektrum Analizi

Alınan spektrumlardaki ^{238}U bozunma ürünü olan ^{226}Ra (186,21 keV), ^{214}Pb (351,9 keV), ^{214}Bi (609,3 keV), ^{232}Th serisinin bozunma ürünü olan ^{208}Tl (583,2 keV) ve ^{228}Ac (911,2 keV), ^{40}K (1460,8 keV) ve ^{137}Cs (661,6 keV) pikleri dikkate alınmış ve her bir pik için ilgili alan (ROI) bölgeleri seçilmiştir. Yine her bir pik için piklerin alanları, en büyük alan ve en küçük hatayı verecek şekilde işaretlenmiştir. Yapılan enerji kalibrasyonundan

yararlanılarak, çıkan bu piklerin hangi enerji değerlerine karşılık geldiği belirlenmiş olup bu enerjilere karşılık gelen radyoizotoplar tespit edilmiştir.

2.3.4.1. Aktivite Hesabı

Ölçümler sonucu elde edilen radyonüklitlerin aktivitelerini hesaplamak için dedektör verimini de hesaba katarak,

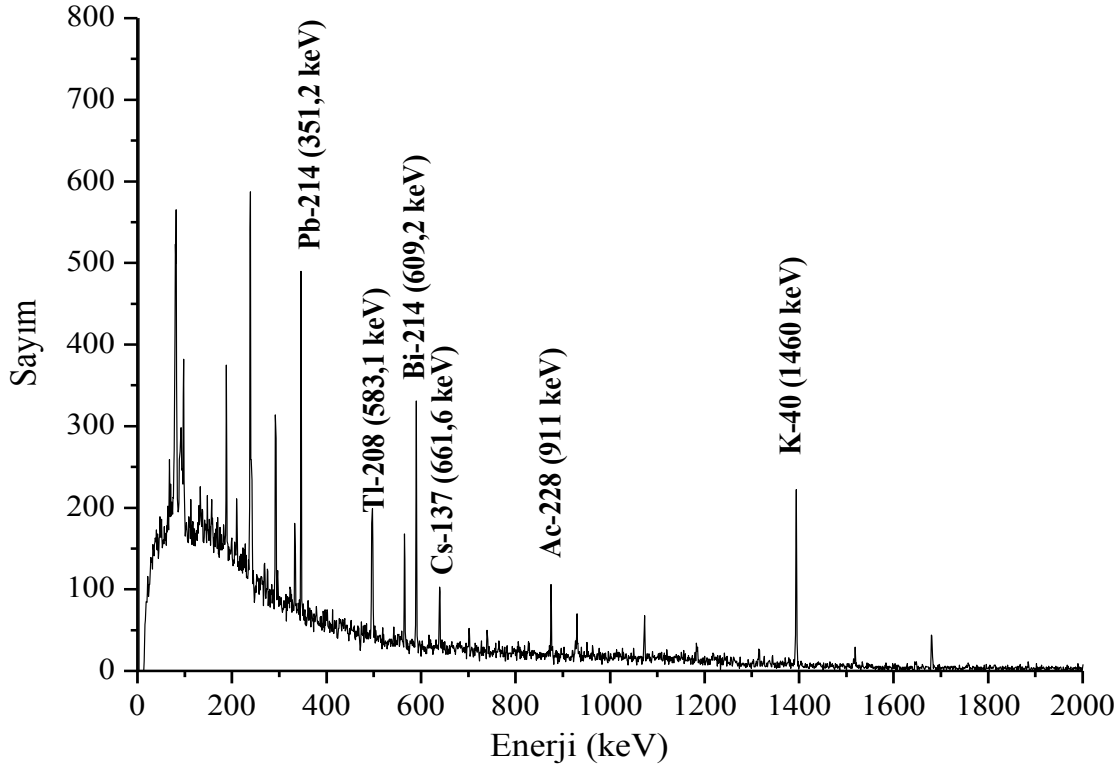
$$\text{Aktivite} = \frac{\text{Net Alan}}{\text{Sayım Süresi x Numune Miktarı x Bolluk x Verim}} \qquad (42)$$

ifadesinden yararlanılmıştır. Piklerin altındaki net alanlar, toplam alandan background çıkarılarak elde edilmiştir.

Tablo 9'da aktivite hesaplamalarında kullanılan radyonüklitlerin bozunma olasılıkları verilmektedir. Şekil 37'de örnek olması açısından, toprak numunesinin aktivitesi hesaplanırken alınan pikler gösterilmektedir.

Tablo 9. Aktivitesi Hesaplanan Elementler ve Bozunma Olasılıkları

Element	Bozunma Olasılığı (%)
^{226}Ra (186,2 keV)	3,29
^{214}Pb (351,9 keV)	35,8
^{208}Tl (583,2 keV)	85,1
^{214}Bi (609,3 keV)	45,0
^{137}Cs (661,6 keV)	85,2
^{228}Ac (911,1 keV)	27,8
^{40}K (1460,8 keV)	10,7



Şekil 37. Örnek spektrum

2.4. Pasif Radon Ölçümleri

Çalışmanın yürütüldüğü bölgelerde kaplıca ortamında pasif ^{222}Rn (radon) konsantrasyon ölçümleri ticari adı CR-39 ve yapısı ‘‘allil diglikol karbonat’’ olan nükleer iz dedektörleri kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede kaplıcalarda radon konsantrasyonunun mevsimlere bağlı olarak değişimi incelenip ve kaplıcalara gelen ziyaretçiler ve çalışan personel için yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanmıştır.

2.4.1. Radon Dozimetrelerinin Kaplıcalara Dağıtımı

Çalışma kapsamı içinde bulunan Ilıcaköy, Ayder, Havza, Ladik Kaplıcalarına CR- 39 dedektörleri 3’er aylık periyotlarla yerleştirilmiştir. Süresi dolan dedektörler toplanmış ve analizleri Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi’nde (ÇANEM) yapılmıştır.

2.4.2. Radon Dozimetrelerinin Analizi

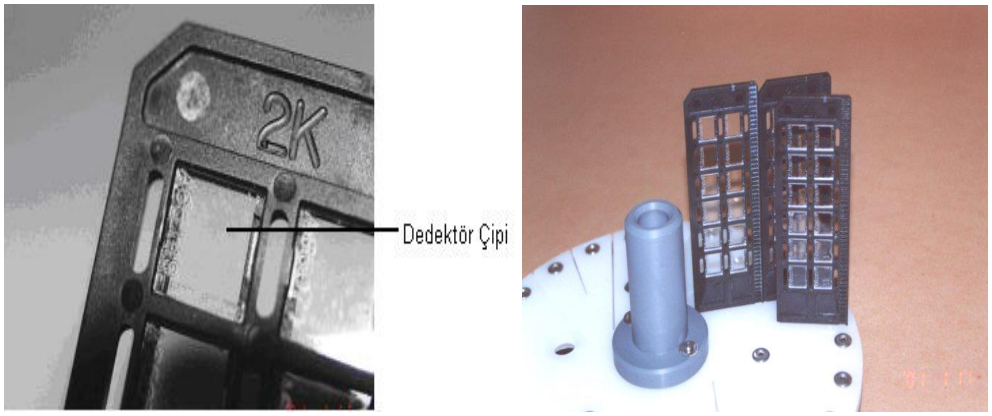
Bu çalışmada kullanılan radon dozimetreleri Radosys şirketi tarafından üretilmektedir ve CR-39 radon dozimetresi Şekil 38'de gösterilmektedir. Dozimetre, 35x55 mm silindirik şekilde olup dedektör çipi plastik kutunun iç alt tarafında, yüzey alanı 10x10 mm ve kalınlığı 1 mm'dir. Dozimetrenin yüzeyi polypropylene madde ile kaplanmıştır. Polypropylene madde alfa parçacıklarına duyarlı olup, ^{220}Rn (Toron) ve toz parçacıklarının girmesini engellemektedir. Sadece radon gazı dozimetre içerisine difüzyon yoluyla girmektedir. Radonun bozunması sonucu oluşan alfa parçacıkları dedektör çipin üzerine izler bırakmaktadır.



Şekil 38. CR–39 Radon dozimetresi

Kaplıcada kaldıkları süre boyunca radon gazına maruz kalan dozimetrelerin analizleri ÇNAEM (Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi)'de Radosys otomatik iz sayım sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu sistem, bilgisayara bağlı gelişmiş bir optik mikroskop, banyo ünitesi ve radon dedektörlerinden oluşmaktadır.

Dedektör çipleri plastik kutuların içinden dikkatlice çıkarılıp her biri Şekil 39'daki gibi slaytlara yerleştirilmiştir. Her bir slayt 12 tane dedektör çipi almaktadır. Daha sonra banyo (ecthing) işlemi yapılmıştır.

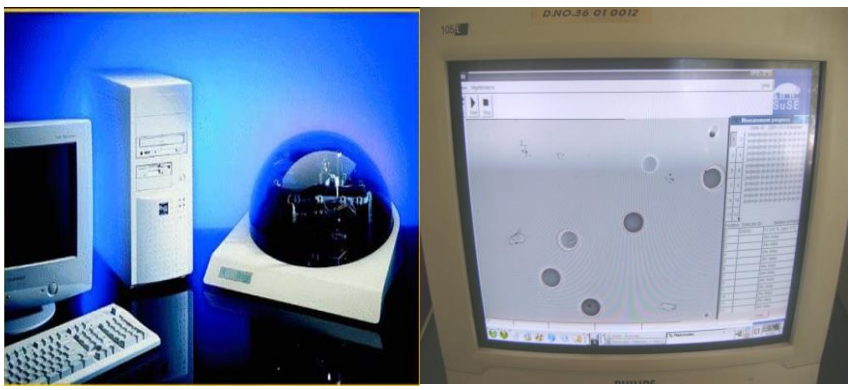


Şekil 39. Dedektör çipi ve kazıma diski

Radon gazına maruz kalan CR–39 dozimetreleri üzerinde oluşan alfa izlerinin görünür hale getirilmesi için kimyasal iz kazıma yöntemi kullanılmıştır. Kazıma diskine 36 tane slayt takılabilmekte ve bu, aynı anda 432 tane dedektör çipinin ecthing yapılmasını sağlamaktadır.

2.4.2.1. Deneysel Sistem ve Ölçüm İşlemleri

Bilgisayarda yazılım olarak Linux işletim sistemi kullanılmaktadır. Her bir slayt sayım ünitesine yerleştirerek okutma işlemi yapılmıştır. CR-39 dozimetresinde, cm^2 başına düşen alfa izlerinin yoğunluğu, (200x) optik mikroskop kullanılarak saymıştır. Şekil 40'da ölçüm sistemi ve alfa izlerinin dedektör çipi üzerine bıraktığı izler görülmektedir. Daha sonra her bir dozimetrenin bırakıldığı yerlere yapılış ve toplanış tarihleri bilgisayara girilerek kayıtlı olan sistem sayesinde aktiviteler Bq/m^3 cinsinden bulunmuştur.



Şekil 40. Radosys ölçüm sistemi ve alfa izlerinin görüntüsü

2.5. Aktif Radon Ölçümleri

AlphaGUARD aktif radon ölçüm cihazı ile aylık ölçümler 2009 yılının Ağustos ayından itibaren kaplıca ortamında havada yapılmıştır. Bu ölçümler her kaplıca için resepsiyon, soyunma odası, kaplıca ana havuzu olmak üzere üç bölümde yapılmıştır. Aylık aktif olarak yapılan bu ölçümlerde cihaz 60 dakika difüzyon modunda çalıştırılmıştır.

2.5.1. Deneysel Sistem

Yerinde ölçümler yapılmasında kullanılan AlphaGUARD PQ 2000PRO cihazında bulunan iyon odası (alfa spektroskobi pulse sayımı) vasıtası ile ortamın o anki radon değeri ile birlikte hava sıcaklığı, hava basıncı ve havanın nemi gibi diğer parametreler de ölçülmektedir. Taşınabilir nitelikte olan cihazla 2-2.000.000 Bq/m^3 aralığındaki radon yoğunlukları ölçülmektedir. Cihaz bilgisayara bağlanarak veri depolanmakta ve değerlendirilmektedir. AlphaGUARD Radon detektörü gelişmiş bir atma (puls) iyonlaşma çemberi veya alfa (α) spektroskopisi yöntemi kullanmaktadır. Yüksek Radon ölçüm hassasiyetine sahiptir ve yoğunluk gradiyentleri ile küçük yoğunluk dalgalanmalarını algılayabilecek derecede hassas elektronik yapıya sahiptir. Uzun süreli ölçümler yapabilmektedir ve ölçümler esnasında doğrudan bir güç kaynağına bağlanabildiği gibi yüksek kapasiteli pilleri sayesinde seçilen ölçüm moduna göre 6 aya kadar ölçüm yapabilmektedir. Bunların yanı sıra AlphaGUARD olumsuz sayılabilecek koşullarında, örneğin yüksek nem, yüksek sıcaklık, yüksek titreşim gibi, bakım gerektirmeden ölçüm yapabilmektedir. Şekil 41' de AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü görülmektedir.

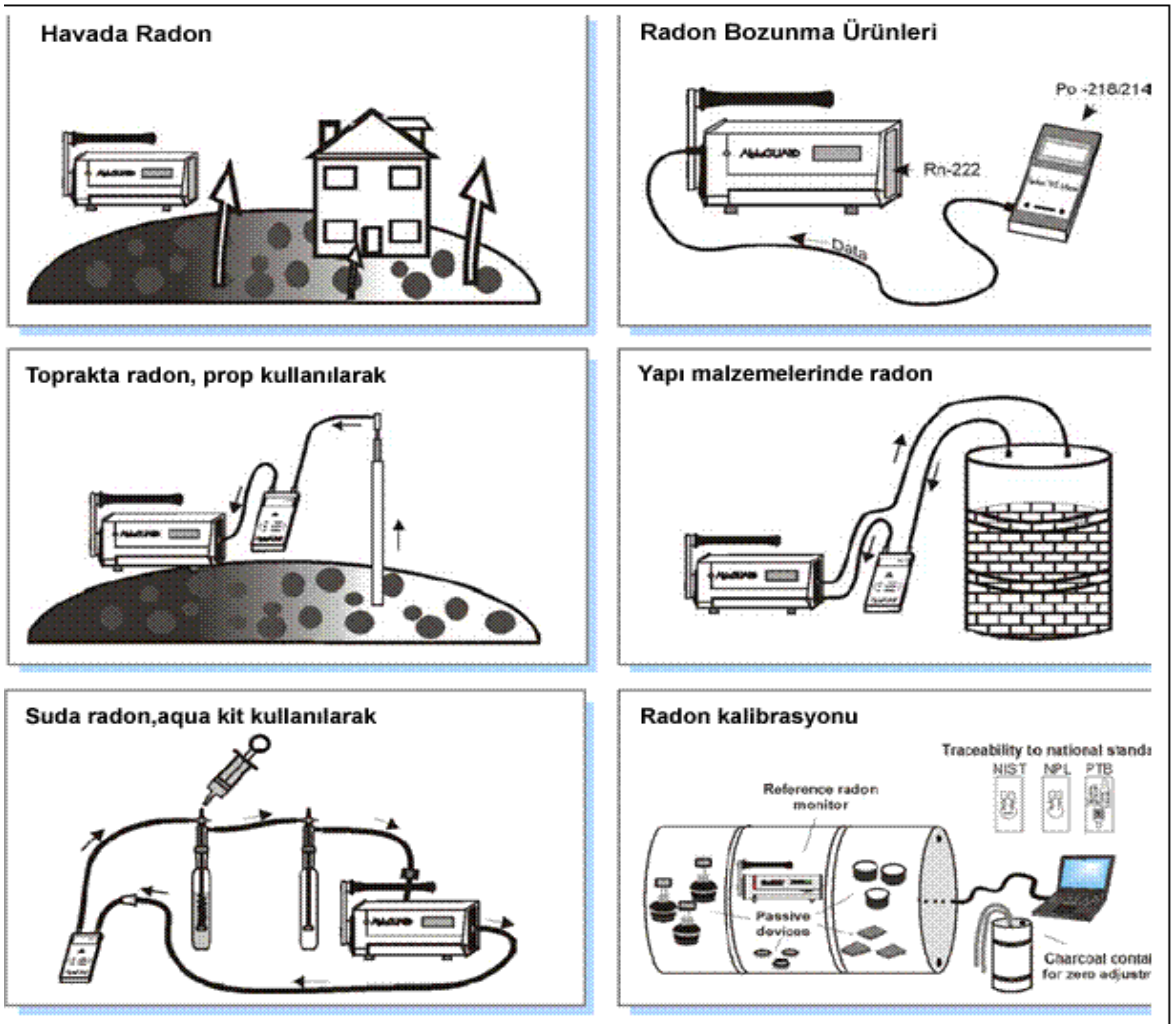


Şekil 41. AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü

AlphaGUARD Radon detektörü ölçüm ünitesine tümleşik olan bir pompa yardımı ile havayı detektörün iyonizasyon odasına alır. Emme sonucunda iyonizasyon odasına giren ^{222}Rn ve ^{220}Rn izotopları bozunarak oda içerisinde iyonizasyona sebep olarak bir elektrik sinyalleri meydana getirirler. Bu sürekli emme esnasında Radon yan ürünleri bir plaka şeklindeki filtre tarafından tutulur ve filtre plakası üzerinde biriken Radon yavru ürünlerinin alfa aktivitesi ise filtre plakasının diğer yüzüne yerleştirilmiş hassas bir sayısal işlemcili modülü olan, alfa duyarlı TN-WL.02 mikroçip modülü vasıtasıyla ölçülür. Yapılan tüm ölçümlerden elde edilen elektrik sinyalleri, AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Counter-Module sayıcı birimine TTL 33 sinyali olarak gönderilir ve detektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından okunabilir veriler haline dönüştürülür (Tablo 10).

Tablo 10. AlphaGUARD monitörünün bazı teknik ve fiziksel özellikleri (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu).

Toplam ağırlık	4,5 kg
Rn detektör tipi	İyonizasyon odası
Dedektör gerilimi	DC 750 V
İşletim modu	Akım modu ve 3D α spektroskopisi
Toplam detektör hacmi	0,62 litre
Etkin detektör hacmi	0,56 litre
Detektör dolum mekanizması	Hızlı pasif difüzyon veya aktif adaptörle otomatik dolma
Detektör sinyal isleme birimi	3 ayrı ADC kanallı hızlı sinyal işleme
Spektral sinyal üretme birimi	DSP(Digital Signal Processing), on-line çapraz korelasyon algoritması
Detektör hassaslığı	1 CPM/20 Bq/m^3
Rn222 ölçüm sınırları Alt sınır Üst sınır	 2 Bq/m^3 $2x10^6$ Bq/m^3
LCD ekran çözünürlüğü	1 Bq/m^3
Sistem doğrusallık hatası	< %3
Rn222 kalibrasyon hatası	± %3
Ölçüm sıklıkları Difüzyon modu Akış modu	10 veya 60 dak 10 veya 60 dak 1 veya 10 dak
Veri depolama kapasitesi	1 dak döngüyle 3 gün 10 dak döngüyle 1 ay 60 dak döngüyle 6 ay
Dâhili batarya kapasitesi	10 gün
İklim parametreler Sıcaklık	-10^oC - $+50^oC$
Atmosfer basıncı Nem	700 mbar . 1100 mbar 0 %rH . 95 %rH

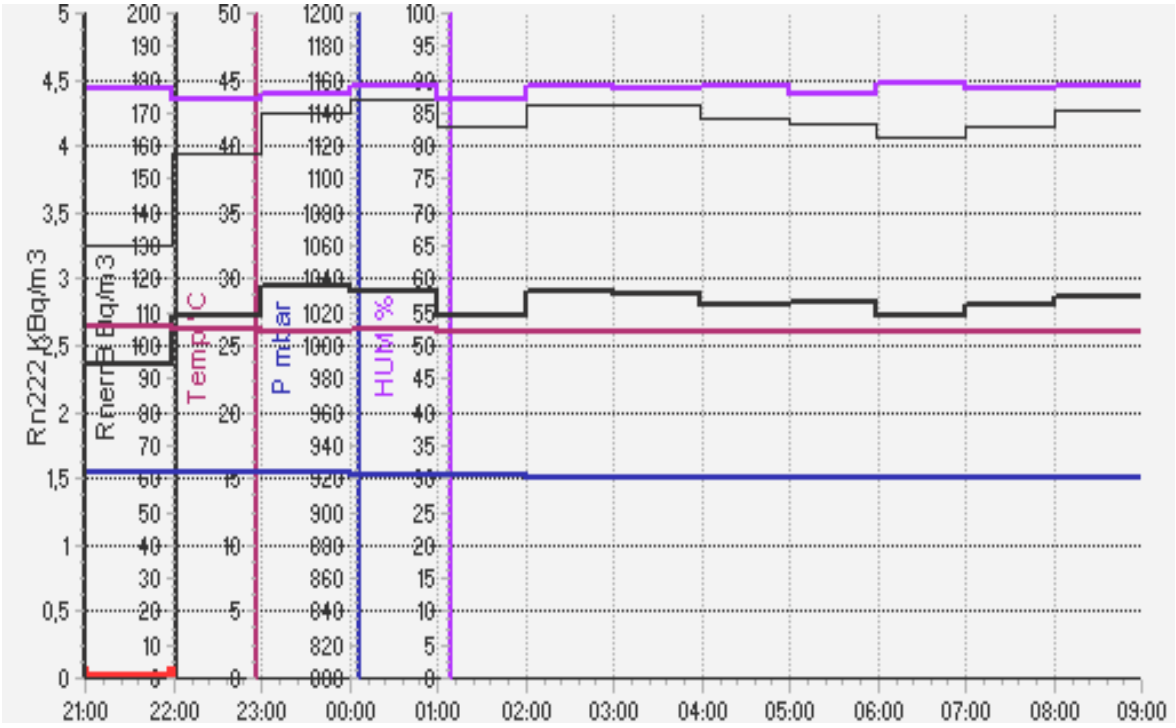


Şekil 42. AlphaGUARD PQ 2000PRO ölçüm cihazı ile çeşitli yerlerde yapılan ölçümler

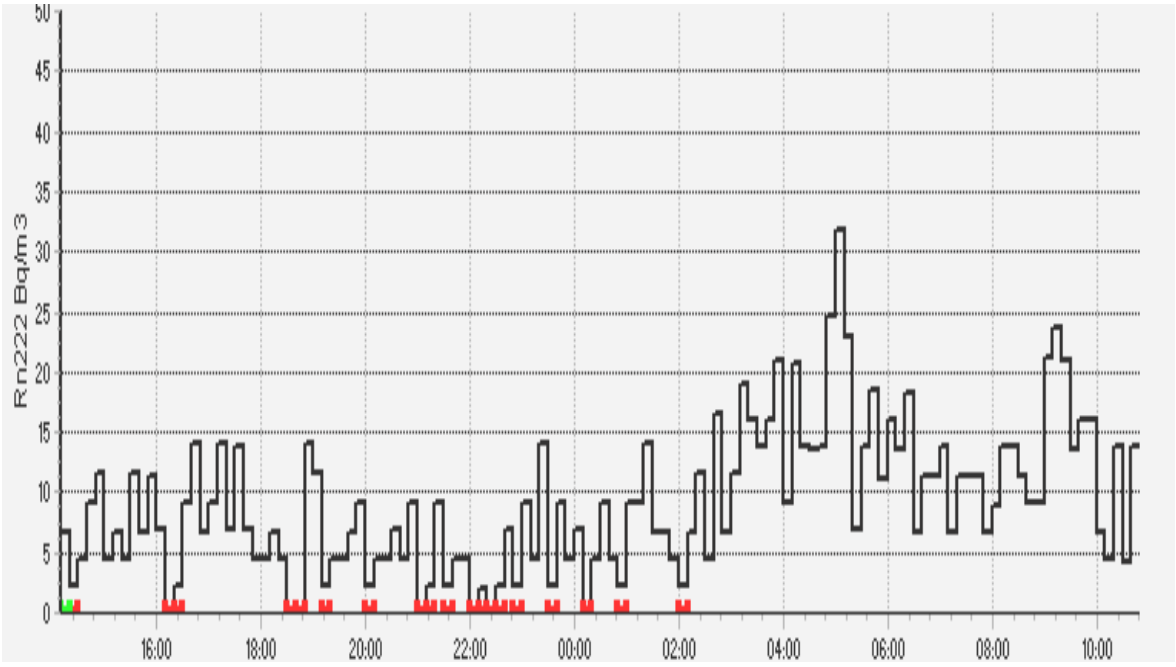
Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, arşivlenmesi ve sanal ortamda sunulması için ise AlphaGUARD için geliştirilmiş çeşitli yazılım paketleri kullanılır. Bunlar AlphaVIEW, AlphaEXPERT ve en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımlarıdır.

Bu çalışma süresince kullanmış olduğumuz DataEXPERT ise Windows ve Linux gibi işletim sistemleri altında çalıştırılabilmektedir ve RS232 bağlantısına ek olarak internet üzerinden de detektör haberleşme sağlanabilmektedir.

Şekil 43.a.-b'de ölçüm yapılan kaplıcalardan alınan grafik örnekleri görülmektedir. Cihaz ortamdaki radon gazı seviyesinin yanında nem, sıcaklık, basınç gibi parametreleri de ölçmektedir.



a. Nisan ayı Ilıcaköy ana havuz da AlphaGUARD ile alınan grafik örneği
(60 dk. Difüzyon modunda)

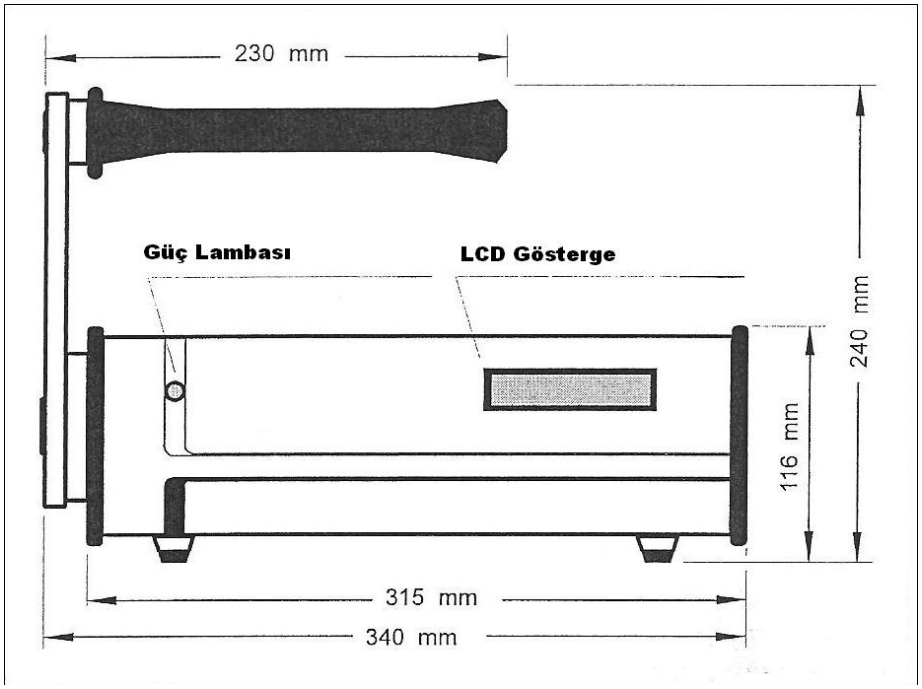


b.Havza Havuz da AlphaGUARD ile alınan grafik örneği (10 dk. Difüzyon modunda)

Şekil 43. Nisan ayında Ilıcaköy (I1)-Havza (H1) ortamlarında alınan grafik örnekleri

2.5.1.1. AlphaGUARD Detektörünün Yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün ölçüm yapmasını sağlayan, ölçüm ve elektronik aksam bileşenleri dayanıklı bir alüminyum dış gövde içine yerleştirilmiştir. AlphaGUARD cihazın önden görünüşü ile ebatları Şekil 44' de gösterilmektedir.



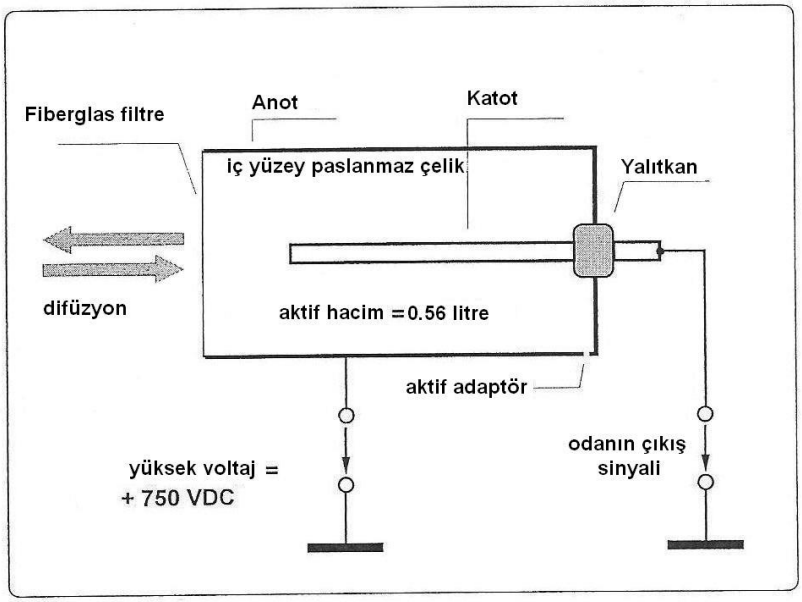
Şekil 44. AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

Cihazın arka kısmındaki vida yuvası plastik bir kapakla kapatılmıştır. AlphaGUARD PQ 2000PRO'da bu kapağın arkasında bulunan yuva cihazın iyonizasyon odasıyla buraya bağlanan etkin hava pompası arasındaki bağlantıyı sağlar. Yani buradan detektör içerisine hava girişi sağlanmaktadır. Bu da AlphaPUMP ile yapılır. Alt kısımda alüminyum gövdenin yerle temasını kesen plastik ayaklar ve havalandırma kanalları bulunmaktadır. İç kısımda bulunan bir fan sayesinde, özellikle uzun süreli kullanımlarda cihazın soğutulmasını sağlamak için sıcak hava buralardan dışarıya atılmaktadır.

AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun tasıma kolunun bağlı olduğu sol kısımda elektrik bağlantı girişleri bulunmaktadır. Burada harici sensör girişi için bir adet MINI-DIS. 85 soketi, iki adet 4 mm'lik soket, PC ile bağlantıyı sağlamak için bir adet RS232 girişi ve 12V DC adaptör girişi bulunmaktadır. Cihazın sağ tarafında koruyucu ızgara ile kapatılmış

Radon gazı giriş paneli ve AlphaGUARD menü kontrolünü sağlayan tuş takımı bulunmaktadır.

Cihazın alüminyum korumasının altında ölçüm yapılmasını sağlayan detektör (iyonizasyon odası) (Şekil 45) ve detektörden gelen sinyalleri işleyip sayısal veri haline getiren sinyal işleme birimi DSP (Digital Signal Processing-Sayısal Sinyal İşleme) bulunmaktadır. Düzenli işletimde Radon içeren hava iyonizasyon çemberi içerisine geniş yüzeyli bir cam fiber filtreden geçerek girmektedir. Burada sadece ^{222}Rn'nin geçmesine izin verilirken yan ürünlerin iyonizasyon odasına girmesi engel olmaktadır. Aynı zamanda filtre, iyonizasyon odasının iç kısmını toz zerreciklerinin birikmesiyle oluşacak kirlenme ve paslanmadan korur. Buna destek olarak cihaz içine dışarıdan miktarı kontrol edilebilen temiz hava girişi sağlayacak bir pompa (AlphaPUMP) da kullanılmaktadır.



Şekil 45. AlphaGUARD iyonizasyon odasının şematik gösterimi (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

AlphaGUARD'ın silindirik iyonizasyon odası 0,56 litrelik aktif hacme sahiptir. Metalik iç kısmın gerilimi alet açıkken +750 volttur. Merkezde yatay eksen boyunca uzanan potansiyeli 0 V olan elektrot yer almaktadır. Merkez elektrotu yüksek hassasiyetteki ön amplifikatörün sinyal girişi ile bağlantılıdır. Ön amplifikatörün işlenen ölçüm sinyalleri daha fazla dijital işlem için elektronik bir şebekeye iletilir. AlphaGUARD PQ 2000PRO cihazının içyapısının ikinci temel bileşeni elektronik birimdir. Bu elektronik

birim detektör tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülen Radon verilerini alıp işlemekle sorumlu birimdir.

Cihazın iyonizasyon odası içinde Radon ve Toron bulunduğu zaman detektör her ikisine de aynı algılama hassasiyetini göstermektedir. Detektör odasının dolması sürecinde Radon yoğunluğunda herhangi bir değişiklik olmamasına karşın Toron'un neredeyse tamamı bozunacaktır çünkü 10 dakikalık bir gecikmeye sahiptir. Pratikte AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Toron' a karşı hassaslığı Radon'a karşı hassaslığının %1'i ile %10'u arasındadır.

Cihazının içyapısının ikinci temel bileşeni elektronik birimdir. Bu elektronik birim detektör tarafından elektrik sinyallerine dönüştürülen Radon verilerini alıp işlemekle sorumlu birimdir. Sayısal sinyal işleme birimi DSP, birbirinden bağımsız üç sinyal işleme kanalına sahiptir. Her bir kanalın kendine ait analog-dijital çevirici devresi vardır. Böylece devreye detektörden gelen her ön yükseltici sinyali üç farklı özelliğine göre aynı anda analiz edilebilmektedir.

Bir numaralı kanal AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun spektroskopik kanalı olarak adlandırılır. Burada sadece sinyallerin atma derinliklerine göre değil, aynı zamanda atma şekillerine göre de bir sınıflandırmaktadır. Bu sinyal analizi sonucunda üç boyutlu bir görüntü elde edilir. DSP teknolojisine sahip olmayan iyonizasyon odalı detektörlerde yüksek seviyedeki Radon yoğunluklarında meydana gelen α olaylar multipletlere (üçlülere) ayrılma eğilimdedirler ve bu sinyalleri daha karmaşık hale getirmektedir. Ancak AlphaGUARD PQ 2000PRO'da da detektör sisteminde kullanılan DSP teknolojisi bu durumu daha karmaşık bir matematiksel algoritma, çapraz korelâsyon (cross-correlation) algoritması kullanarak meydana gelen gürültüyü seçerek Radon sinyalinden ayırt edebilmektedir. Elde edilen sinyal (primer sinyal) kısa zaman aralıklarında örneklenir ve orijinal sinyalin sayısal değerler halinde örnekleri çıkarılarak AlphaGUARD elektronik devresinin son kısmı olan hızlı mikro kontrolör tarafından işlenir.

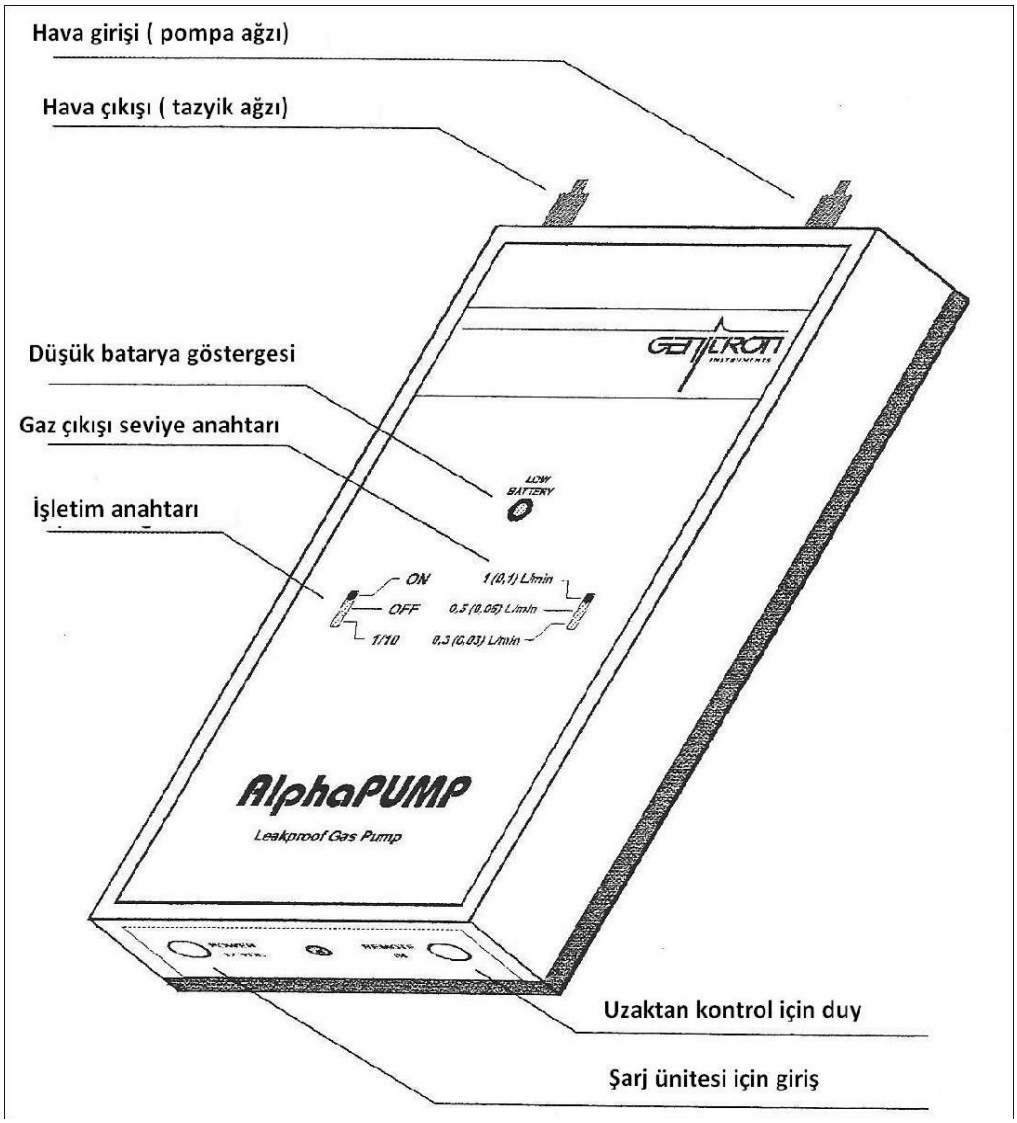
ADC1 yoluyla spektroskopik kanalda örneklendirilen veriler mikro kontrol birim tarafından her α pikinden elde edilen atma genliği (= klasik alfa spektrumu) ve atmanın şekli için de tanımlama bilgileri şekline dönüştürülür. Detektör tarafından toplanan bu: bilgiler x ekseni α piki genliğini (= alfa enerjisini), y ekseni zaman birimi başına meydana gelen α bozunumu ve z ekseni de atma şekli olmak üzere üç eksenli bir spektrum halinde sunulabilir. ADC2 yani ikinci kanal sadece yüksek Radon seviyelerinde devreye girmektedir. Kanalın girişindeki bant geçiren filtre devresi doğru boyutlandırıldığında

gürültünün genliği çemberin toplam iyonizasyon akımının kareköküyle doğru orantılı olarak değişmektedir ve bu bağıntı kullanılarak piko amper seviyesindeki iyonizasyon akımı kesin olarak ölçülebilmektedir.

ADC3'lü üçüncü kanal ise klasik bir DC integratörlü akım ölçümü gerçekleştiren devredir. Bu üç sinyal karakteristiğinin temelinde altı değişik matematiksel algoritma yatmaktadır. Tüm işlemler sonucunda optimize edilmiş yoğunluk prosedürü vasıtasıyla gerçek Radon yoğunluğu belirlenmektedir. Her bir Radon değeri yaklaşık olarak 50 milyon matematiksel işlemin sonucunda elde edilir ve bu işlemler için AlphaGUARD PQ 2000PRO nun ihtiyaç duyduğu akım ise sadece 3 mA dır (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu).

2.5.1.2. Genitron AlphaPUMP

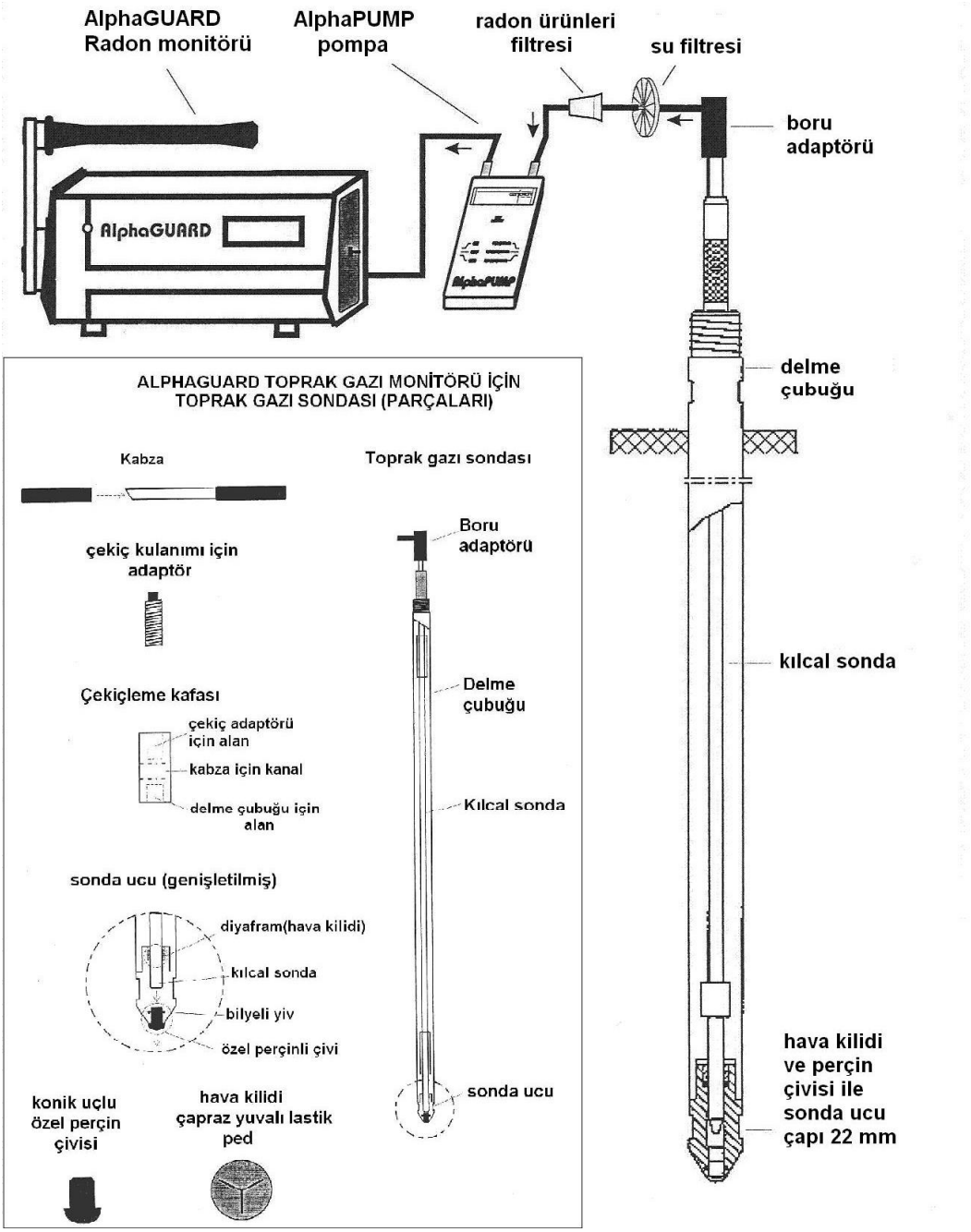
Bu pompa AlphaGUARD'a göndermek istediğimiz gaz miktarını ayarlamaktadır. Açık, kapalı ve 1/10 modlarını içeren anahtar; 1/10 modunda ise onda bir performansla yani zaman biriminin onda birini açık, onda dokuzunu kapalı olarak kullanmaktadır. İkinci anahtar pompalanacak gaz miktarını dakikada 1, 0,5 ve 0,3 litre olarak ayarlamaktadır. Şekil 46'da cihazın şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 46. AlphaPUMP şematik gösterimi (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

2.5.2. AlphaGUARD ile Toprak Gazındaki Radon Yoğunluğunun Ölçümü

Toprak gazı sondası ucu yüzeyden 1 m derinlikte olacak şekilde dik olarak yerleştirilen demir çubuk ve kılcal sondadan oluşmaktadır (Şekil 45). Kılcal sonda çubuk içine yerleştirildikten sonra uçtaki perçin çivisinin ayrılması sağlanacak kadar aşağı itilip daha sonra aynı miktar geri çekilir. Böylece demir çubuğun ucu açılır ve toprak gazının girişine olanak sağlar. Çubuğun ucundaki conta kılcal sondayı sararak gelen tüm havanın kılcal sondaya girmesine yardımcı olur. Kılcal sondanın üstündeki parça gazın cihaza aktarımı için kullanılan plastik boruyla birleştirilmesinde kolaylık sağlar. Bu plastik boru yaklaşık 10 m uzunluğunda ve 0,5 cm çapındadır.



Şekil 47. Toprak gazı radon ölçümünde kullanılan ekipmanın tanıtımı (P.R.M.A. Kullanım Kılavuzu)

Cihaza ulaşan plastik boruya ölçüm araçlarını korumak maksadıyla su filtresi monte edilir. Bunu radon ürünleri filtresi izler çünkü AlphaGUARD tek başına sadece radon ölçümü yapmaktadır. Bir sonraki parça toprak gazını AlphaGUARD'a pompalayan AlphaPump'tır. Sürekli pompalama işlemini sağlamak için AlphaPump'ın üzerindeki birinci anahtar 'ON' konumuna getirilir. Diğer anahtar 0,3(0,03) L/min konumuna getirilerek dakikada 0,3 litre gaz pompalanması sağlanır. Bağlantı kurulduktan sonra

AlphaGUARD menüden 10 dakika FLOW seçilerek 10 dakikalık periyotta ölçülen radon konsantrasyonun kaydı sağlanır. AlphaGUARD üzerindeki monitörden ölçülen radon konsantrasyonu, radon hata payı, sıcaklık, nem ve basınç değerleri okunabilir. AlphaGUARD'ın 10 dakikalık periyot için veri depolayabileceği süre 21 gündür. Bu yüzden veriler bu süreden önce bilgisayara aktarılarak saklanmalıdır. Bu süreden sonra yenileri eskileri silinerek kaydedilmektedir. Şekil 48'de Havza Kaplıcası topraklarında radon gazı ölçülürken çekilen bir fotoğraf görülmektedir.



Şekil 48. Havza Kaplıcası çevresinde toprakta radon gazı ölçümü

2.5.3. AlphaGUARD ile Suda Radon Yoğunluğunun Ölçümü



Şekil 49. AlphaGUARD ölçüm cihazı ile su ölçümü

Radon ölçümü yapılacak su numuneleri 500 ml lik ağzı kauçuk tıpalı cam şişeler havuzun içine daldırılıp şişelerin ağzı havuz içinde kapatılarak havuz dışına alınmış ve şişenin tamamı alüminyum folyo ile sarılarak laboratuar ortamına getirilmiştir. Burada cihazın filtresinin üstündeki demir kafes çıkarılarak su ölçmek için hortumları cihaza takmak için gerekli aparat monte edilmiştir. Daha sonra cihazın AquaKit kutusunda bulunan cam su ölçme kapları, AlphaPump plastik hortumlarla cihaza bağlanır. Yine aqua kit kutusunda bulunan plastik şırıngalar ile numune kabından su alınıp cam ölçme kaplarına aktarılır. Bağlantı kurulduktan sonra AlphaGUARD menüden 1 dakika FLOW seçilerek 1 dakikalık periyotta ölçülen radon konsantrasyonun kaydı sağlanır. AlphaGUARD üzerindeki monitörden ölçülen radon konsantrasyonu, radon hata payı, sıcaklık, nem ve basınç değerleri okunabilir. Şekil 49' su ölçümü gösterilmiştir.

2.6. Havadaki Radyoaktivite Ölçümleri

Çalışma bölgelerimizde toprak örneklerinin alındığı noktalarda, yerinde ölçümlerle yerden 1m yüksekteki toplam gama dozlarını belirlemek amacıyla çok kanallı analizöre sahip portatif Inspector 1000 portatif gama (3x3 NaI) dedektörü ile ölçümler alınmıştır. Elde edilen spektrumlar Genie-2000 programı yardımıyla radyonüklit konsantrasyonlarının belirlenebilmesi için bilgisayara aktarılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan Inspector 1000 portatif gama (NaI) dedektörü Canberra şirketi tarafından üretilmektedir ve cihaz Şekil 50'de gösterilmektedir.



Şekil 50. Inspector 1000 portatif dedektör

Bu cihaz, ölçüm yapılan noktadaki toplam gama dozu değerini hızlı bir biçimde ölçebilmektedir ve cihazın ekranında bu toplam doz değerleri hem sayısal hem de grafik olarak sunulmaktadır. Herhangi bir veri toplama işlemi sırasında, grafikler ve sayısal sunum gerçek zamanlı olarak güncellenmekle birlikte ölçüm yapılan ortamdaki radyasyon seviyesinin belli değerleri aşması durumunda cihaz uyarı yapmaktadır. Çok kanallı analizöre sahip bu cihaz ile yerinde ölçümler yapılarak spektrumlar alınabilmekte ve radyonüklit konsantrasyonlarının belirlenebilmesi sağlanmaktadır.

2.6.1. Deneysel Yöntem

2.6.1.1. Enerji Kalibrasyonu

Spektrum analizlerinin yapılabilmesi için her kanalın hangi enerji değerine karşılık geldiğinin bilinmesi gerekir. Bunun yapılabilmesi için de enerjileri bilinen radyonüklitlerden oluşmuş standart bir kaynağa ihtiyaç vardır. Enerji kalibrasyonu için kullandığımız standart kaynağın özellikleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Kalibrasyon kaynağı

İzotop	Enerji (keV)	Gama/s	Yarı ömür
^{137}Cs	662	2441	30,17 yıl

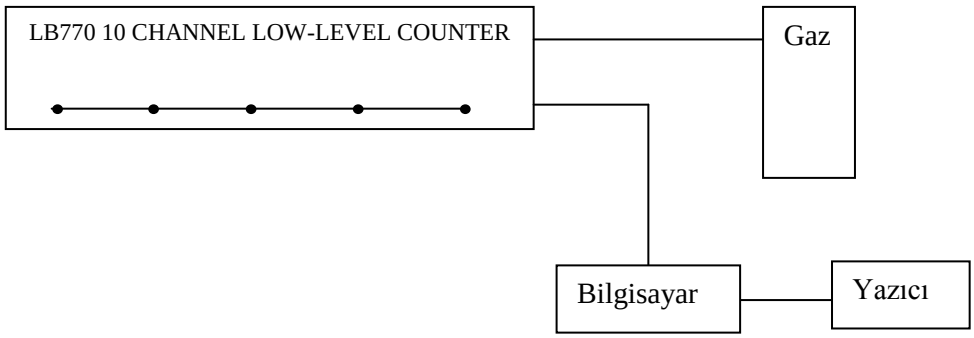
Alınan spektrumların analizleri Genie-2000 programı yardımıyla yapılmıştır. Bu spektrumlarda tüm piklerin sınırları, piklerin altında kalan alan en büyük ve hatalar en küçük olacak şekilde belirlenmiştir. Belirlenen bu piklerin merkezlerinin hangi kanala karşılık geldiği tespit edilmiş ve kalibrasyon işlemi yapıldığı için bu kanallara karşılık gelen enerji değerleri belirlenebilmiştir. Kataloglardan bu enerjilere karşılık gelen radyonüklitler tespit edilmiştir.

2.7. Toplam Alfa ve Toplam Beta Radyoaktiflik Ölçümleri

Su örnekleri alınmadan önce konacakları polietilen kaplar bikromik asitten geçirildikten sonra iyice çeşme suyuyla durulanıp çift destile sudan geçirilerek ağzı kapatılmıştır. Numune alınmadan önce 2000 mL'lik polietilen kap üç defa kendi suyuyla çalkalandıktan sonra havuzlara daldırılarak doldurulup nitrik asitle pH $\leq$2'ye getirilerek ve ağzı sıkıca kapatıldıktan sonra etiketlenerek koruma altına alınmıştır. Bunun nedeni, su örnekleri içerisindeki elementlerin partiküler hale gelerek tortu oluşturmasını ve örnek kabının çeperlerine yapışmasını önlemektir. Bu şekilde paketlenen numuneler ÇNAEM araştırma laboratuarına getirilmiştir. Burada her bir numune çeker ocakta (hot plate) 500 mL'lik beherlere konarak 60ºC'de yaklaşık 100 mL kalana kadar buharlaştırılmıştır. Kalan kısım darası alınmış 20 cm^3'lük paslanmaz çelik kaplara (planşet) azar azar taşmayacak şekilde aktarılmıştır. Su tamamen buharlaşınca planşetler bir desikatörde oda ısısına getirilip hassas terazide tartılıp tortu (rezidü) miktarı tayin edilmiştir. Sayımlarda, özellikle alfa sayımlarında tortu miktarı çok önemlidir. Tortu miktarı 400 mg'ı geçmemelidir, aksi takdirde alfa parçacıklarında self-absorpsiyon oluşmakta bu da analiz sonuçlarında hatalara neden olmaktadır. Daha sonra çelik kaplar 105°C sıcaklığındaki bir etüv fırını içine konularak iyice kurutulmuştur. Ardından bütün numuneler toplam alfa ve toplam beta aktiflikleri tayin edilmek üzere detektöre konularak 500 dakika süreyle sayılmıştır.

2.7.1. Deneysel Sistem

Numunelerin toplam alfa ve toplam beta radyoaktiflik analizleri için, ÇNAEM Sağlık Fiziği Bölümü Laboratuarında bulunan Berthold marka LB770 model 10 kanallı düşük seviyeli alfa-beta sayım cihazı kullanılmıştır. Sayım cihazının blok diyagramı Şekil 51'de görülmektedir. Bu cihaz, 10 numunenin alfa ve beta sayımlarını (radyoaktivite ölçümlerini) aynı anda yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Dedeksiyon ortamı ve elektronik devre olmak üzere başlıca iki kısımdan meydana gelir.



Şekil 51. Toplam alfa ve beta sayım cihazının blok diyagramı

Dedeksiyon ortamı olarak en çok kullanılan gazlar argon, ksenon, izobütan, helyum ve metandır. Bir tüp, bu gazlardan biri veya ikisinin karışımı ile doldurulup içine iki elektrot konulur. Gaz içinde meydana gelen iyonlar zıt işaretli elektrotlarda toplanırlar. İyonların elektrotlarda toplanmasından meydana gelen elektrik akımı laboratuar sayım cihazının elektronik devresinde dedekte edilir.

Alfa veya beta sayımında kullanılan bu gaz akışlı orantılı sayıcılar genellikle yarım küre şeklinde bir sayım odasına sahiptir. Ortalarında tungstenden yapılmış bir tel halka bulunur. Tel, anot görevi, oda duvarları da katot görevi görür. Akışkan gaz, oda içinden geçirilerek oda içinde pozitif iyonlar oluşturulur. Detektörün çalışma voltajı 1650 V olup çapı 5 cm'dır. Bu sayıcılarda kullanılan akışkan gaz %90 argon ve %10 metan karışımı içermektedir (Kopya, 2009). Şekil 52 ve 53'te toplam alfa, toplam beta sayım cihazı ve numunelerin ölçüme hazırlanma aşaması görülmektedir.



Şekil 52. Toplam alfa ve beta sayım cihazı



Şekil 53. Suların toplam alfa toplam beta ölçümüne hazırlanma aşaması

2.8. Suların Kimyasal Analizleri

Her bir kaplıcadan alınan su numunelerinin kimyasal analizleri Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi laboratuvarı ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümünde yapılmıştır.

2.8.1. Su Numunelerinin Kimyasal Analize Hazırlanması

Belirlenen yerlerden toplanarak 2'şer litrelik kaplara koyulan numunelerin her biri, içerisinde herhangi bir tortu kalmaması için adi süzgeç kağıdı ile süzülerek 10mL'lik marinelli kaplara alınmış ve sayıma hazır hale getirilmiştir.

2.8.2. Deneysel Sistem

Spectro Genesis marka ICP-OES kimyasal analiz cihazı (Şekil 54), eş zamanlı ölçümler sağlayan, otomatik bir optik yayma spektrometresidir. Bu cihazda, indüklenerek çiftlenmiş plazma uyarılmasını ve sıvıların nicelik ile yarı nicelik analizi için detektör sistemine dayalı bir yarı iletken kullanır. Sıvı örneği buharlaştırılır ve plazma içine bir aerosol olarak beslenir. Plazmanın yüksek sıcaklığı (6000K-8000K) numuneyi buharlaştırır ve numunenin içerisinde var olan moleküller, atomlarına ayrılarak uyarılırlar ve kısmen iyonize edilirler. Uyarılmış atom ve iyonlar elemente özgü bir radyasyon yayarlar. Bir iletim optiği, optik sistemin içindeki bu radyasyonu besler. Yayılan radyasyon, optik sistemde bileşenlerine kırınır. Şiddet, yarı iletken detektörler kullanılarak ölçülür. Birim sinyal ölçme sürecinden sonra, ölçülen element şiddetleri Smart Analyzer yazılımı ile değerlendirilir. Yöntemler ölçümden önce ayarlanır. Her element için belirlenen kalibrasyon fonksiyonları bu yöntemlerde saklıdır. Konsantrasyonlar bu yöntemler kullanılarak, ölçülen şiddetlerden hesaplanır.



Şekil 54. ICP-OES kimyasal analiz cihazı

3. BULGULAR

Bu çalışmada, Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Ayder, Ilıcaköy, Havza ve Ladik Kaplıcalarında, kaplıca sularında, havasında, toprağında radyolojik analiz ve her bir kaplıca suyunda kimyasal analizler yapılmıştır. Sırası ile kaplıca sularının kimyasal analizleri, pH değerleri, piper diyagramları verilip radyolojik analizlere geçilmiştir. Radyolojik analizlerde ise önce kaplıca havasında AlphaGUARD aktif radon gazı ölçme cihazı ile aylık olarak ölçülen radon gazı sonuçları daha sonra pasif olarak radon gazı ölçen CR-39 ölçüm cihazının sonuçları verilmiştir. Daha sonra mevsimlik olarak AlphaGUARD aktif radon gazı ölçme cihazı ile kaplıca havasında, suyunda, toprağında ölçülen radon gazı değerleri tablolar halinde verilip, kaplıca çevrelerindeki toprakta ve kaplıca sularında radyonüklid konsantrasyonları hesaplanmıştır. Son olarak ise kaplıca içi soğurulan gama doz ölçümleri tablolar biçiminde sunulup sonuçlar kısmında tüm bulgular tartışılmıştır.

3.1. Kaplıca Sularının Kimyasal Analizleri

ICP-OES cihazı ile kaplıca sularında yapılan kimyasal analiz sonucunda elde edilen veriler Tablo 12'de görülmektedir. Tablo 12'deki değerler göz önüne alındığında aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

Tablo 12'ye genel bir bakışla; en düşük değerler K için 762±0,5 µg/L ile Ayder, Sr için 83±1,2 µg/L ile yine Ayder, Cs için Ladik, Be için 0,02±0,0074 µg/L değeri ile Ladik, Fe için 1,92±0,16 µg/L değeri ile Havza, Mn için 0,006±0,0004 µg/L değeri ile Ayder, Ni için Havza, V için 5,848±0,6 µg/L değeri ile Ilıcaköy kaplıcasıdır.

En yüksek değerler; K için 136716±312 µg/L değeri ile Ilıcaköy, Sr için 4518±6 µg/L ile Ilıcaköy, Cs için 736±0,8 µg/L ile Ilıcaköy, Al için 17±0,36 µg/L ile Ayder Kaplıcası, Be için 3,9±0,008 µg/L değeri ile Ilıcaköy, Cd için 44±0,3 µg/L ile Ilıcaköy, Fe için 1177±1,7 µg/L değeri ile Ilıcaköy, Mn için 89±0,3 µg/L değeri ile Ilıcaköy, Ni için 0,436±0,12 µg/L değeri ile Ayder, V için12,88±0,2 µg/L Ayder Kaplıcasıdır.

Tablo 12. Kaplıca suları için kimyasal analiz sonuçları(µg/L)

Elementler (µg/L)	Ayder Kaplıcası	Havza Kaplıcası	Ilıcaköy Kaplıcası	Ladik Kaplıcası
K	762±0,5	6929±2,5	136716±312	3174±2
Sr	83±1,2	250±2,2	4518±6,1	533±4
Cs	3±0,2	3,8±0,2	736±0,8	<DL
Al	17±0,36	<DL	<DL	<DL
Be	0,024±0,012	0.045±0,01	3,911±0,008	0,02±0,0074
Cd	<DL	<DL	44±0,3	<DL
Fe	1,921±0,16	1,911±0,01	1177±1,7	40,75±1,4
Mn	0,006±0,0004	0,221±0,06	89±0,3	0,163±0,06
Ni	0,436±0,12	<DL	0,413±0,3	0,335±0,2
V	13±0,2	6±0,3	5,8±0,6	9±0,2
Ag	<DL	<DL	<DL	<DL
Co	<DL	<DL	<DL	<DL
Cr	<DL	<DL	<DL	<DL
Cu	<DL	<DL	<DL	<DL
Zn	<DL	<DL	<DL	<DL
Pb	<DL	<DL	<DL	<DL

DL: Dedeksiyon limiti

Ayrıca Ag, Co, Cr, Cu, Zn, Pb için ölçülen değerler dedeksiyon limitinin altındadır.

3.1.1. Anyon Katyon Değerleri

Kaplıca sularında yapılan kimyasal analiz sonucunda elde edilen anyon-katyon değerleri Tablo 13'de görülmektedir. Tablo 13'e genel bir bakışla; en düşük değerler F^- için 0,463±0,003 mg/L değeri ile Ladik Kaplıcası, Cl^- için 2,312±0,012 mg/L değeri ile Havza Kaplıcası, NO_3^- için 0,325±0,004 mg/L değeri ile Ayder Kaplıcası, SO_4^{-2} için23,37±0,027 mg/L değeri ile Ladik Kaplıcası, Br^- tüm kaplıcalar için dedeksiyon limitinin altındadır. NO_2^- ve PO_4^{-3} için Ayder Kaplıcası, Havza Kaplıcası, Ladik Kaplıcası için dedeksiyon limitinin altındadır. Ca^{+2} ve Mg^{+2} Ayder Kaplıcası için dedeksiyon limitinin altındadır. CO_3^{-2} Ayder Kaplıcası hariç diğer tüm kaplıcalar için dedeksiyon limitinin altındadır. HCO_3^- ise 51,53 mg/L değeri ile en düşük Ayder Kaplıcasında ölçülmüştür.

En yüksek değerler F^- için 2,995±0,014 mg/L değeri ile Havza Kaplıcası, Cl^- için 476,707±0,011 değeri ile Ilıcaköy Kaplıcası, NO_3^- için 22,636±0,004 mg/L değeri ile Ilıcaköy Kaplıcası, $SO4^{-2}$ için 85,609±0,151 mg/L değeri ile Ilıcaköy Kaplıcası, NO_2^- için 64±16 mg/L değeri ile Ilıcaköy Kaplıcası, PO_4^{-3} için 103±9 mg/L değeri ile Ilıcaköy Kaplıcasıdır. Ca^{+2} ve Mg^{+2} için en yüksek değerler sırası ile 256 mg/L ve 63,18 mg/L değeri ile Ilıcaköy Kaplıcasında ölçülmüştür. HCO_3^- için 2811 mg/L değeri ile Ilıcaköy Kaplıcası ilk sıradadır.

Tablo 13. Kaplıca suları için anyon-katyon sonuçları (mg/L)

Elementler(mg/L)	Ayder Kaplıca	Havza Kaplıca	Ilıcaköy Kaplıca	Ladik Kaplıca
F^-	0,532±0,003	2,995±0,014	1,317±0,031	0,463±0,003
Cl^-	3,592±0,013	2,312±0,012	476,707±0,011	7,538±0,006
NO_3^-	0,325±0,004	2,052±0,014	22,636± 0,04	0,567±0,016
SO_4^{-2}	37,044±0,107	34,684±0,128	85,609±0,151	23,370±0,027
Br^-	< DL	< DL	< DL	< DL
NO_2^-	< DL	< DL	64±16	< DL
PO_4^{-3}	< DL	< DL	103±9	< DL
Ca^{+2}	< DL	12	256	60
Mg^{+2}	< DL	3,16	63,18	29,16
Na^+	36,2	59,4	794	7,9
CO_3^{-2}	18,4	< DL	< DL	< DL
HCO_3^-	51,53	429,4	2811	398,2
Toplam Sertlik	-	4,3	90	27
Toplam Alkalite	73 mq/L ($CaCO_3$)	352 mq/L ($CaCO_3$)	2304 mq/L ($CaCO_3$)	326,4 mq/L ($CaCO_3$)

DL: Dedeksiyon limiti

3.1.2. Suların pH Değerleri

Bir maddenin pH değeri hidrojen iyonu [H^+] ile hidroksil iyonunun [OH^-] derişimlerinin oranına direk bağlıdır. Eğer H^+ derişimi OH^- derişiminden fazla ise madde asidik; yani pH değeri 7 den düşüktür. Eğer OH^- derişimi H^+ derişiminden fazla ise madde bazik; yani pH değeri 7 den büyüktür. Eğer OH^- ve H^+ iyonlarından eşit miktarlarda mevcut ise, madde 7 pH değerine sahip olmak üzere nötraldir. Buna göre Tablo 14 incelendiğinde Ayder, Havza, Ilıcaköy Kaplıcası sularının bazik, Ladik Kaplıcası suyunun ise asidik özelliğe sahip olduğu görülmektedir.

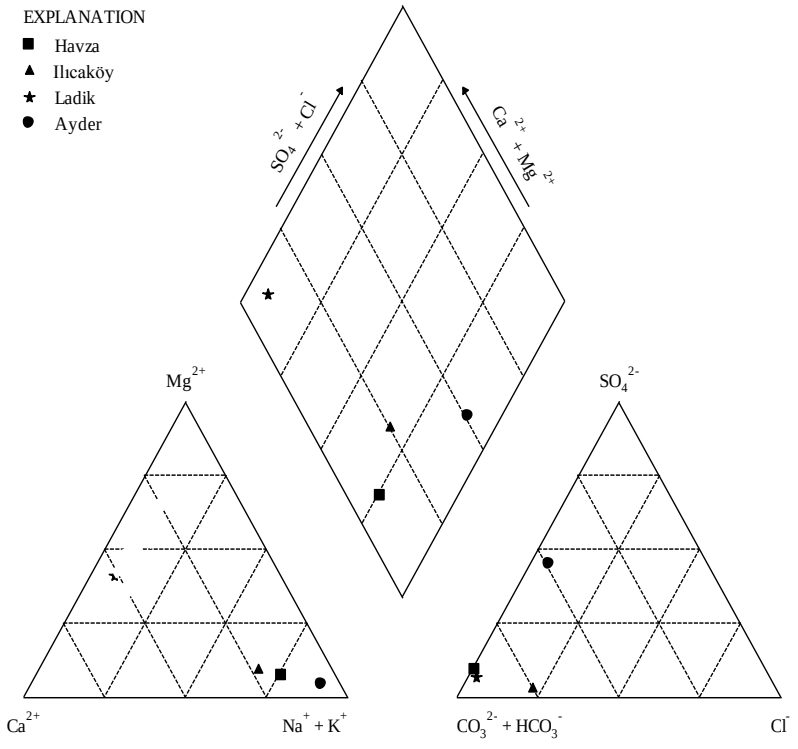
Tablo 14. Kaplıca sularının pH değerleri

Kaplıca	pH
Ayder	9,62
Ilıcaköy	7,12
Havza	7,79
Ladik	6,73

3.1.3. Piper (Üçgen) Diyagramı ile Kaplıca Sularının Sınıflandırılması

İyonların topluca tek bir diyagramda görüntüleme kolaylığı açısından hidrojeolojide oldukça sık kullanılan diyagramlardan biri piper diyagramıdır. Piper diyagramı anyon ve katyonların (% mek/l cinsinden) ayrı ayrı gösterildiği iki ayrı üçgenden ve tüm iyonların ortaklaşa gösterildiği bir dörtgenden oluşmaktadır. Üçgen diyagramlar suların fasiyes tiplerinin görülmesinde, dörtgen ise suların sınıflamasında ve karşılaştırılmasında kolaylık sağlar(Özen vd. 2005).

Şekil 55'de çalışma yapılan kaplıca sularının piper diyagramı ile sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 55. Kaplıca sularının piper diyagramı ile sınıflandırılması

Hakim anyon-katyon çifti açısından incelendiğinde; Ilıcaköy, Havza ve Ayder sıcak su kaynakları katyonları bakımından Na+K'lu anyonları bakımından ise HCO_3'lü sular sınıfına girmektedir. Ladik sıcak su kaynağı ise Ca+Mg'lu ve HCO_3+SO_4'lü sular sınıfındadır.

Piper diyagramındaki konumları incelendiğinde; Ladik sıcak su kaynağı karbonat sertliği (sekonder alkalilik) %50'den fazla yani toprak alkalilerin ve zayıf asitlerin hakim olduğu, Ilıcaköy ve Ayder sıcak su kaynaklarının hiçbir anyon-katyon çiftinin %50'yi geçmeyen sular bölgesinde bulunduğu, Havza sıcak su kaynağının ise karbonat alkaliliğin %50'den fazla sular sınıfında yer aldığı görülmektedir.

Toplam çözünmüş katı (TÇK) değerleri açısından incelendiğinde Ayder sıcak su kaynağında TÇK değerinin 130 mg/L, Ilıcaköy sıcak su kaynağında ise 4623 mg/L olduğu görülmektedir. Halbuki Piper diyagramına göre her iki su kaynağı da Na-K-HCO_3 tipinde su kaynağıdır. Fakat suların içerisinde çözünmüş olan iyonların miktarı incelendiğinde Ilıcaköy kaynağında çok yüksek değerlerde olduğu görülmektedir.

3.2. Radyolojik Analiz Sonuçları

3.2.1. Radon

Çalışma kapsamında kaplıcalarda kaplıca içinde 1 yıllık aktif radon gazı ölçümü Ağustos 2009-Temmuz 2010 süresince aylık olarak yapılmıştır. Bu ölçümlerde cihaz 60 dakika difüzyon modunda çalıştırılmıştır. Her kaplıca için resepsiyon, soyunma odası, kaplıca ana havuzu olmak üzere üç bölümde ölçümler yapılmıştır. Bu sırada CR-39 pasif dedektörleri ile mevsimsel olarak kaplıca havasındaki radon gazı ölçümleri yapılarak AlphaGUARD ve CR-39 radon sonuçları karşılaştırılmıştır.

2011 yılında aktif AlphaGUARD dedektörü ile 10 dakika difüzyon modunda kaplıca havasında mevsimlik ölçümler yapılmıştır. Aynı zamanda bu mevsimlerde eş zamanlı olarak cihazın su probu ile kaplıca suyunda radon gazı değeri ölçülmüştür. En son ölçümlerde ise kaplıca çevresindeki toprakta radon gazı cihazın toprak ölçme probu ile ölçülmüştür.

3.2.1.1. Kaplıca Hava Ortamında Kısa Dönem Aylık Ölçülen Radon Gazı Değerleri

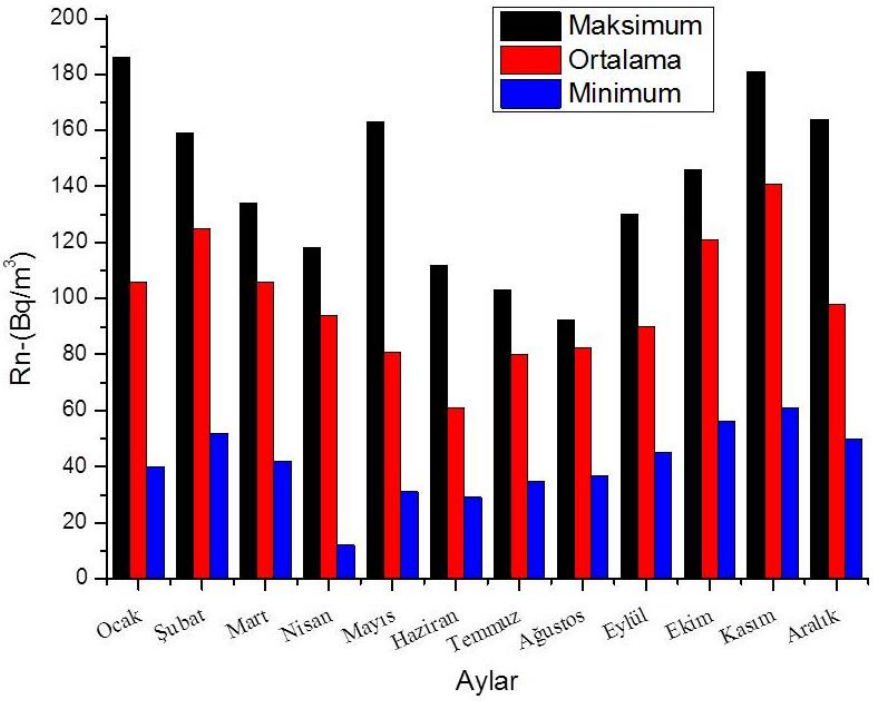
Ayder, Ilıcaköy, Havza ve Ladik kaplıcalarında kaplıca içinde bir yıl süresince aylık olarak aktif radon gazı ölçümü yapılmıştır. Aşağıda her kaplıca için sırası ile bu değerler verilecektir.

3.2.1.1.1. Ayder Kaplıcası

Ayder Kaplıcası için AlphaGUARD ile yapılan aylık ölçümler incelendiğinde (Tablo 15) A1 ortamı için en yüksek değerin kasım ayında ölçüldüğü en düşük değerin ise haziran ayında ölçüldüğü görülmüştür. Ortalama değerin ise 99±4,4 Bq/m^3 olduğu görülmektedir. Kaplıca tesisinin A2 ortamında en düşük değer ağustos ayında, en yüksek değer ise şubat ayında ölçülmüştür. Bu kısımda ortalama radon değeri 68±4 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır. A2 ortamı kaplıca giriş kapısının hemen karşısındadır. Bu kapının açık bulunması, sık sık açılıp kapanması bu kısımdaki radon değerini düşürmektedir. Kaplıca A3 ortamında ölçülen en yüksek radon konsantrasyonu (120±24 Bq/m^3) şubat ayında, en düşük değer (67±12 Bq/m^3) ise kasım ayında ölçülmüştür. Burada ortalama radon değeri (104±4,2 Bq/m^3) dür. Kaplıcanın A3 kısmında radon gazı değerinin yüksek olması kapı ve pencerelerin burada kapalı tutulmasındandır. Aynı kaplıcanın A4 ortamında ölçülen radon gazı değerleri en yüksek (122±23 Bq/m^3) şubat, en düşük (60±12 Bq/m^3) haziran ayında ölçülmüştür. Ölçüm sırasında camın kapının açık olması, havalandırma sisteminin açık olması, ortamdaki radon gazının seviyesinin düşmesine neden olmaktadır. Özellikle soğuk aylarda kapı ve pencerelerin kapalı tutulması ortamdaki radon gazı seviyesini arttırmaktadır.

Tablo 15. Ayder kaplıcası hava ortamında ortalama radon gazı konsantrasyonları

Aylar	A1	A2	A3	A4
	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)
Ocak	106±20	71±14	116±22	97±18
Şubat	125±23	124±23	132±25	122±23
Mart	102±20	68±13	119±21	86±17
Nisan	94±18	81±15	85±16	80±16
Mayıs	87±17	73±13	91±18	76±14
Haziran	61±12	70±12	117±21	97±18
Temmuz	80±14	65±12	106±20	60±12
Ağustos	83±14	40±8	92±17	79±16
Eylül	90±18	45±9	67±12	69±13
Ekim	121±24	63±13	83±16	73±14
Kasım	141±28	51±9	120±24	78±15
Aralık	98±17	63±12	115±12	87±16
Ortalama	99±4,4	68±4	104±4,2	84±3

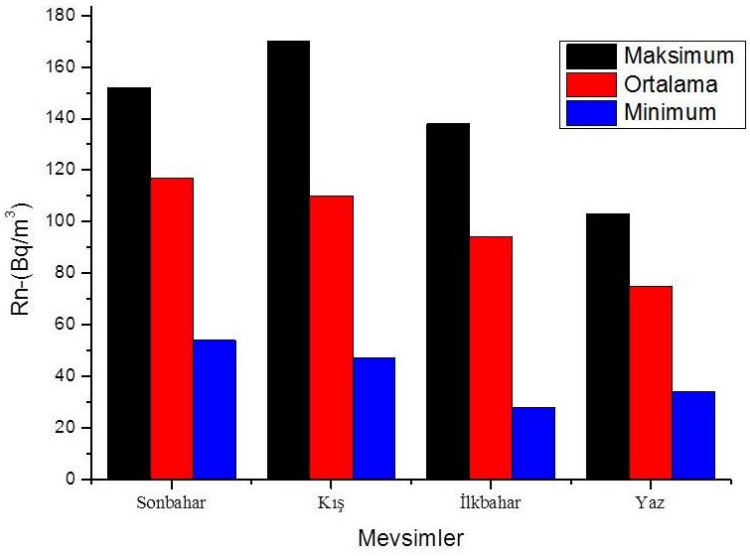


Şekil 56. Ayder Kaplıcası A1 ortamında aylık maksimum, ortalama, minimum radon gazı değerleri.

Şekil 56'da ise Ayder Kaplıcası A1 ortamında aktif AlphaGUARD ölçüm cihazı ile ölçülen aylık radon gazı seviyesinin maksimum, ortalama ve minimum değerleri

verilmiştir. Maksimum radon gazı seviyesi en fazla ocak, daha sonra aralık ayında ölçülmüştür. Minimum radon gazı seviyesi ise nisan ayında ölçülmüştür.

Aylık ölçümleri mevsimlik olarak birbiri ile kıyaslamak amacı ile her ay aynı A1 ortamında ölçülen maksimum, minimum, ortalama radon gazı değerleri mevsimlik olarak Şekil 57'de verilmiştir. Şekil 57'de görüldüğü gibi maksimum değer en fazla kış mevsiminde, en az yaz mevsiminde ölçülmüştür, fakat ortalama değerlere bakılacak olursa en yüksek değerin sonbahar (kış ile hemen hemen aynı) en düşük değerin ise yaz mevsiminde ölçüldüğü görülmektedir. Ayder yaylasının rakımı 1400 m olduğu için bu bölgede sonbahar mevsimi de kış mevsimi gibi geçmektedir. Sonbahar mevsiminde ulaşım şartlarından dolayı kış mevsiminden daha fazla ziyaretçi kaplıcaya gelmektedir. O nedenle kaplıcada bulunan camlar ve kapılar kapatılıp dışarıdan soğuk hava gelmesi önlenmekte fakat bu durumda içeride radon gazı birikmesine neden olmaktadır.



Şekil 57. Ayder Kaplıcası A1 ortamında ölçülen radon gazı seviyelerinin maksimum-minimum-ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması

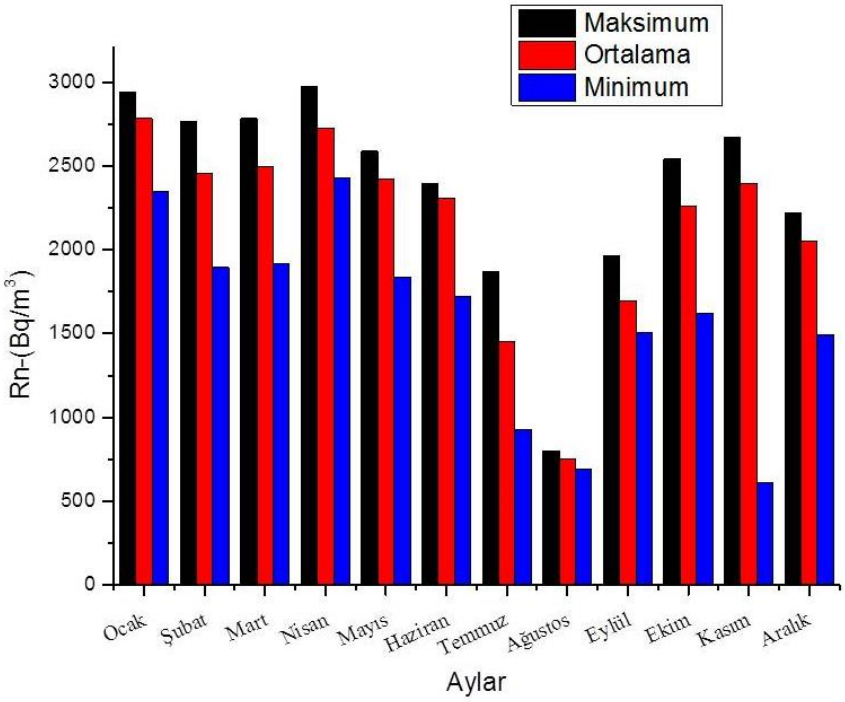
3.2.1.1.2. Ilıcaköy Kaplıcası

Ilıcaköy Kaplıcası için AlphaGUARD ile yapılan aylık ölçümler incelendiğinde (Tablo 16) I1 ortamı için en yüksek değerin mart ayında ölçüldüğü en düşük değerin ise ağustos ayında ölçüldüğü görülmüştür. Ortalama değerin ise 2118 ±121 Bq/m^3 olduğu görülmektedir. Termal tesisin I1 ve I2 ortamı giriş katının bir alt katındadır. I2 ortamında

en düşük değer (223±48 Bq/m^3) ağustos ayında, en yüksek değer ise (789±101 Bq/m^3) nisan ayında ölçülmüştür. Bu kısımda ortalama radon değeri 606±96 Bq/m^3 dür. Tesisin bahçesinde bulunan ayrı bir binada I4 ve I5 ortamları bulunmaktadır. Bu I4 ortamında ölçülen en düşük radon konsantrasyonu (201±30 Bq/m^3) haziran ayında, en yüksek radon konsantrasyonu (531±84 Bq/m^3) nisan ayında ölçülmüştür. I4 ortamında belirlenen ortalama radon gazı değeri 305±57 Bq/m^3 dür. I5 ortamında ölçülen en düşük değer (56±8 Bq/m^3) haziran ayında, en yüksek radon konsantrasyonu 282±55 Bq/m^3 olarak ocak ayında ölçülmüştür. Burada ortalama radon seviyesi 100±26 Bq/m^3 olmaktadır. Ölçüm sırasında camın, kapının açık olması, ortamın havalandırma sisteminin açık olması, ortamdaki radon gazı seviyesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu kaplıcanın her bölümünde özellikle de I1 ve I4 bölümlerinde etkili bir havalandırma sistemi bulunmaktadır. 20 dakikada bir devreye girip havuz ortamında biriken buharı çekmektedir.

Tablo 16. Ilıcaköy kaplıcası hava ortamında ortalama radon gazı konsantrasyonları

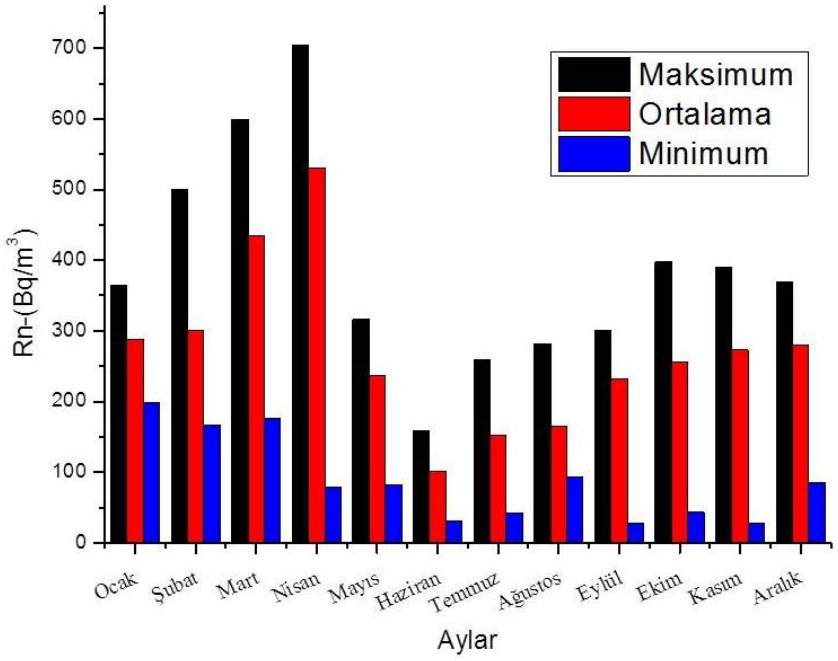
Aylar	I1	I2	I3	I4	I5
	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)
Ocak	2041±128	788±105	67±32	289±69	282±55
Şubat	2088±94	606±90	88±32	335±64	98±23
Mart	2788±74	616±90	98±42	435±74	78±13
Nisan	2732±162	789±101	90±5	531±84	61±10
Mayıs	2425±146	648±50	63±27	237±51	69±9
Haziran	2310±130	593±134	94±32	201±30	56±8
Temmuz	1870±110	450±65	92±30	298±52	58±9
Ağustos	750±59	223±48	67±27	195±51	80±29
Eylül	1696±110	664±102	397±70	231±50	97±31
Ekim	2266±138	553±54	159±54	297±56	87±33
Kasım	2397±146	722±105	159±43	273±55	108±41
Aralık	2056±128	620±91	110±42	340±58	120±45
Ortalama	2118±31	606±26,5	124±16	305±14	100±16



Şekil 58. Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında maksimum, ortalama, minimum radon gazı değerleri

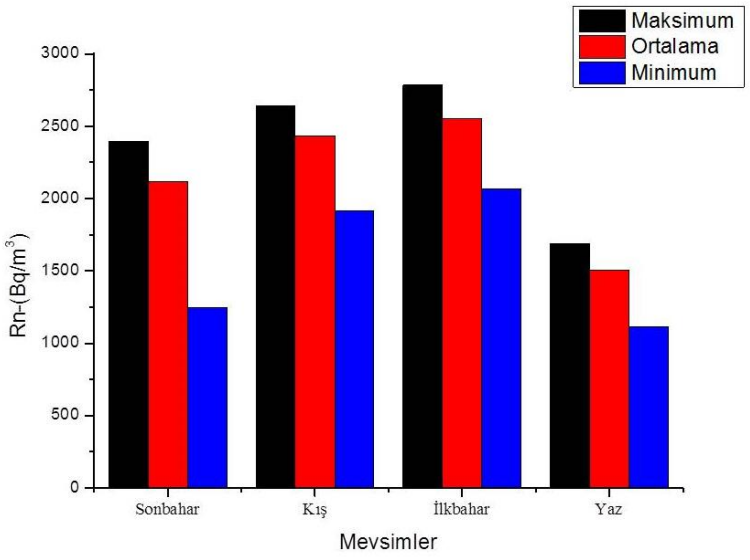
Şekil 58 incelendiğinde Ilıcaköy Kaplıcası I1 ortamında aylık maksimum minimum ve ortalama radon gazı seviyesi görülmektedir. Ocak, şubat, mart ve nisan aylarında en yüksek radon değerleri ölçülmüştür. Fakat aylara genel olarak bakıldığında değerler hep yüksektir. Bunun nedeni Ilıcaköy Kaplıcası I1 ortamının giriş katın bir alt katında ve toprağa daha yakın olmasıdır. İş yerleri için tavsiye edilen radon seviyesi zemin kat ve üstü için 400 Bq/m^3 zemin kat altı için 400-1500 Bq/m^3 tür (ICRP,1994).

Şekil 59 incelendiğinde Ilıcaköy Kaplıcası I4 ortamında aylık maksimum minimum ve ortalama radon gazı seviyesi görülmektedir. Ocak, şubat, mart ve nisan aylarında en yüksek radon değerleri ölçülmüştür. En düşük radon gazı konsantrasyonu ise haziran ve temmuz aylarında ölçülmüştür.



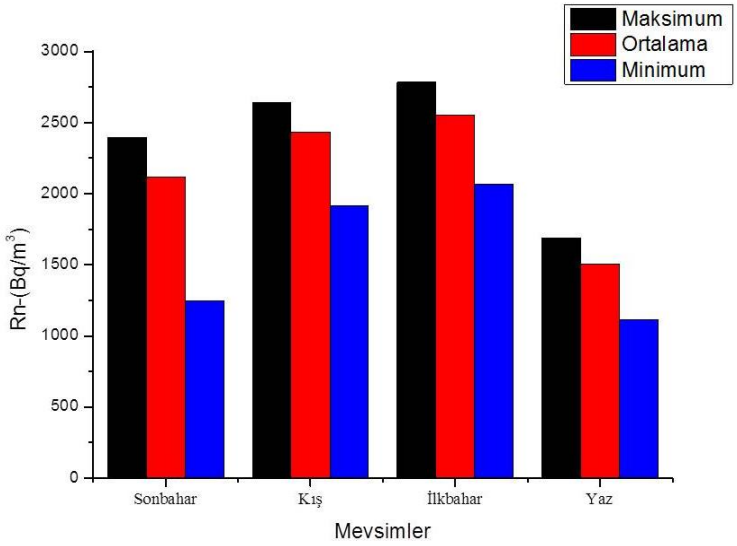
Şekil 59. Ilıcaköy Kaplıca I4 hava ortamında maksimum, ortalama, minimum, Radon gazı değerleri

Şekil 60'da deneysel çalışmalardan elde edilen veriler mevsimlik olarak incelenirse, Ilıcaköy I1 ortamında en yüksek radon gazı seviyesinin ilkbahar ve kış mevsiminde, en düşük radon gazı seviyesinin yaz mevsiminde ölçüldüğü görülmektedir.



Şekil 60. Ilıcaköy Kaplıca I1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyelerinin maksimum-minimum-ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması

Şekil 61'de deneysel çalışmalardan elde edilen veriler mevsimlik olarak incelenirse Ilıcaköy I4 ortamında en yüksek radon gazı seviyesinin ilkbahar mevsiminde, en düşük radon gazı seviyesinin yaz mevsiminde ölçüldüğü görülmektedir. Yazın ortamın havalandırılması oldukça fazla miktarda yapılmaktadır. Kapı ve pencereler açık tutulması ortamdaki radon seviyesini düşürmektedir.



Şekil 61. Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında ölçülen Radon gazı seviyelerinin maksimum, minimum, ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması

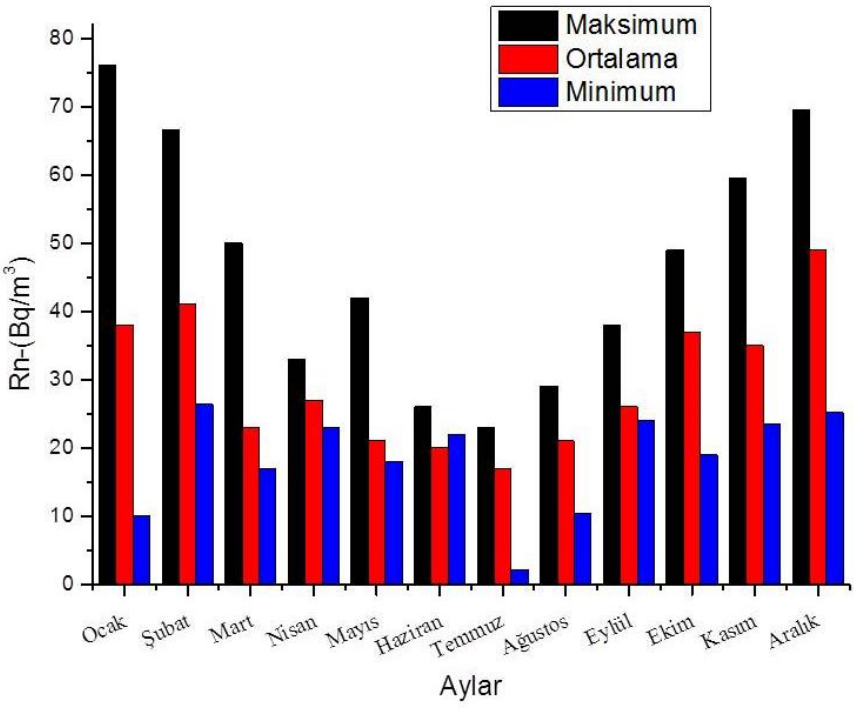
3.2.1.1.3. Havza Kaplıcası

Havza Kaplıcası için AlphaGUARD ile yapılan aylık ölçümler incelendiğinde (Tablo 17) H1 için en yüksek değerin aralık (49±10 Bq/m^3) ayında ölçüldüğü en düşük değerin (17±4 Bq/m^3) ise temmuz ayında ölçüldüğü görülmüştür. Ortalama değerin ise 30±7 Bq/m^3 olduğu görülmektedir. Kaplıca tesisinin H2 bölümünde en düşük değer (14±4 Bq/m^3) ağustos ayında, en yüksek değer (63±13 Bq/m^3) ise mart ayında ölçülmüştür. Bu kısımda ortalama radon değeri 42±3 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır. H2 ortamı kaplıca giriş kapısının hemen yanındadır ve sürekli açık bulunan bir pencere mevcuttur. Bu pencerenin kapalı olduğu zamanlarda radon gazı konsantrasyonunun yükseldiği gözlemlenmiştir. Kaplıca H3 ortamında ölçülen en yüksek radon konsantrasyonu (67±14 Bq/m^3) şubat ayında, en düşük

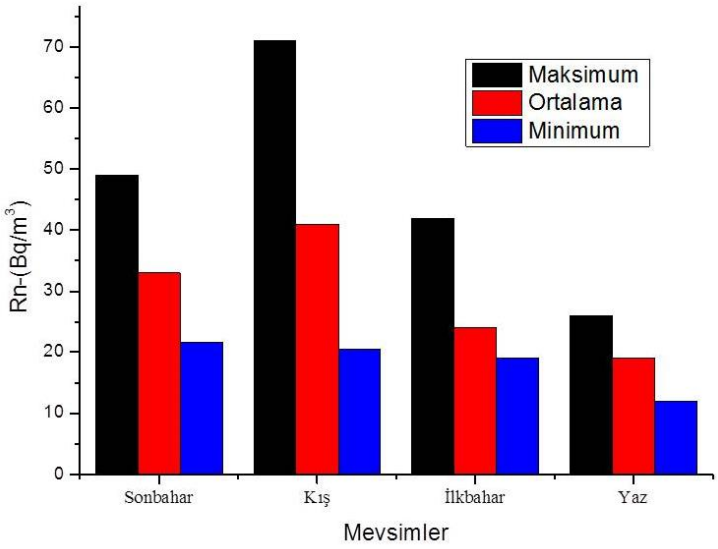
değer (14±5 Bq/m^3) ise haziran ayında ölçülmüştür. Bu kısımda ortalama radon değeri 32±7 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 17. Havza kaplıcası havada ortalama radon gazı konsantrasyonları

Aylar	H1	H2	H3
	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)
Ocak	38±8	48±10	58±12
Şubat	41±9	57±12	67±14
Mart	23±5	54±11	21±5
Nisan	27±6	40±8	17±4
Mayıs	21±5	42±8	19±5
Haziran	20±4	34±7	14±5
Temmuz	17±4	18±5	19±5
Ağustos	21±5	14±4	17±4
Eylül	26±6	28± 6	29±6
Ekim	37±8	47±10	31±7
Kasım	35±7	63±13	41±8
Aralık	49±10	53±12	50±10
Ortalama	30±2	42±3	32±3



Şekil 62. Havza H1 ortamında maksimum, ortalama, minimum Radon gazı değerleri



Şekil 63. Havza Kaplıcası H1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyelerinin maksimum, minimum, ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması

Şekil 62 ve Şekil 63 incelenerek Havza Kaplıcası H1 ortamında ölçülen ortalama radon gazı seviyeleri değerlendirilirse ortalama ve maksimum değerlerin en yükseği kış mevsiminde, daha sonra sonbahar, ilkbahar ve en düşükte yaz mevsiminde ölçüldüğü görülmektedir. Havza Kaplıcasında maksimum değerin 75 Bq/m^3 değerinden az olduğu görülmektedir.

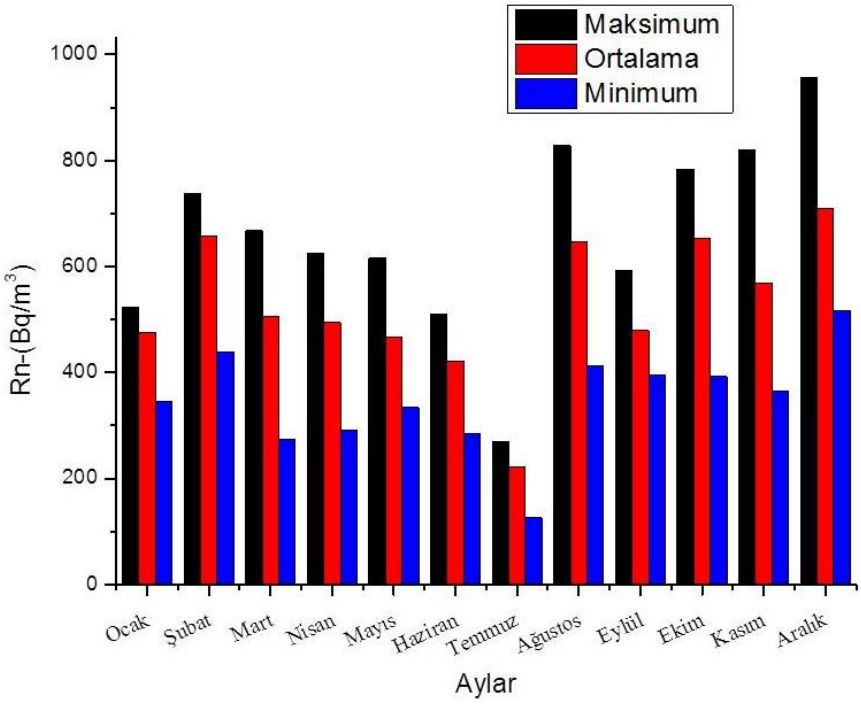
3.2.1.1.4. Ladik Kaplıcası

Ladik Kaplıcası için AlphaGUARD ile yapılan aylık ölçümler incelendiğinde (Tablo 18) L1 ortamı için en yüksek değerin aralık (710±58 Bq/m^3) ayında ölçüldüğü en düşük değerin (221±25 Bq/m^3) ise temmuz ayında ölçüldüğü görülmüştür. Ortalama değerin ise 525±70 Bq/m^3 olduğu görülmektedir. Kaplıca tesisinin L2 bölümünde en düşük değer (64±25 Bq/m^3) temmuz ayında, en yüksek değer (472±43 Bq/m^3) ise mart ayında ölçülmüştür. Bu kısımda ortalama radon değeri 313±15 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır. L2 ortamı kaplıca giriş kapısının hemen karşısındadır. Gelen misafirlerin bekleme salonu ile aynı yerdedir. Bu bölümde pek çok pencere mevcuttur. Bu pencerenin kapalı olduğu zamanlarda radon gazı konsantrasyonunun yükseldiği gözlemlenmiştir. Kaplıca L3 ortamında ölçülen en yüksek radon konsantrasyonu (146±37 Bq/m^3) ocak ayında, en düşük

değer (40±17 Bq/m^3) ise haziran ayında ölçülmüştür. Bu kısımda ortalama radon değeri 89±8 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır.

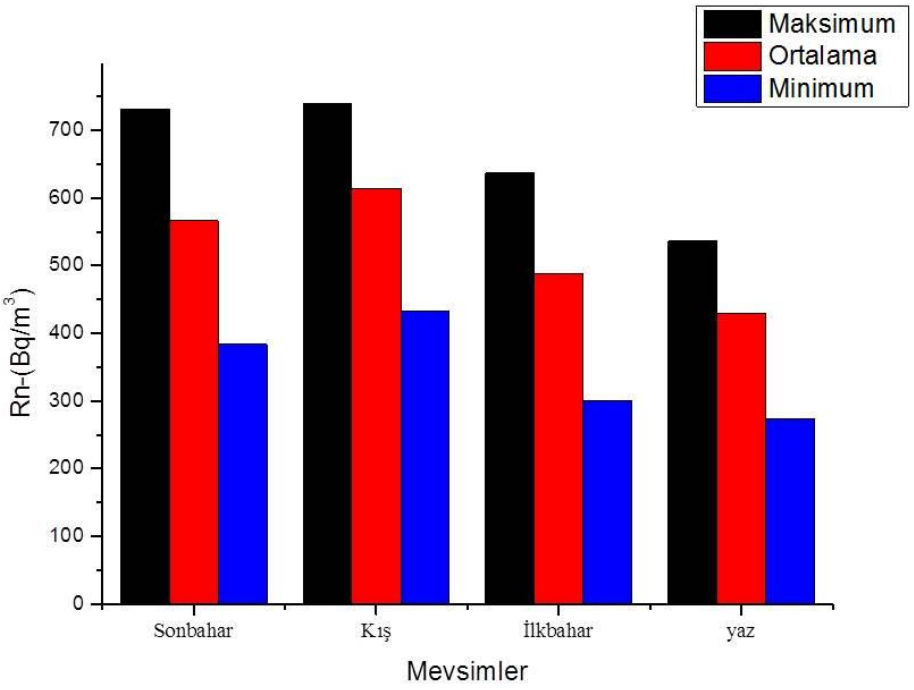
Tablo 18. Ladik Kaplıcası hava ortalama radon gazı konsantrasyonları

Aylar	L1	L2	L3
	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)	(Bq/m^3)
Ocak	475±74	452±45	146±37
Şubat	658±103	465±47	124±30
Mart	505±101	472±43	71±17
Nisan	495±80	391±70	60±15
Mayıs	466±42	221±60	46±21
Haziran	433±82	422±39	40±17
Temmuz	221±25	64±25	88±28
Ağustos	646±76	74±25	64±37
Eylül	478±80	185±42	76 ±23
Ekim	653 ± 53	290±50	96±20
Kasım	569±52	329±62	121±23
Aralık	710±58	387±67	139±32
Ortalama	525±23	313±15	89±8



Şekil 64. Ladik L1 hava ortamında maksimum, ortalama, minimum radon gazı değerleri

Şekil 64 ve Şekil 65 incelenerek Ladik Kaplıcası L1 ortamında ölçülen ortalama radon gazı seviyeleri değerlendirilirse ortalama ve maksimum değerlerin en yükseği kış mevsiminde (aralık ayı), daha sonra sonbahar, ilkbahar ve en düşükte yaz mevsiminde (temmuz ayı) ölçüldüğü görülmektedir. Ladik Kaplıcasında maksimum değerinin 900 Bq/m^3 olduğu görülmektedir.



Şekil 65. Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında ölçülen Radon gazı seviyelerinin maksimum-minimum-ortalama değerlerinin mevsimlik olarak karşılaştırılması

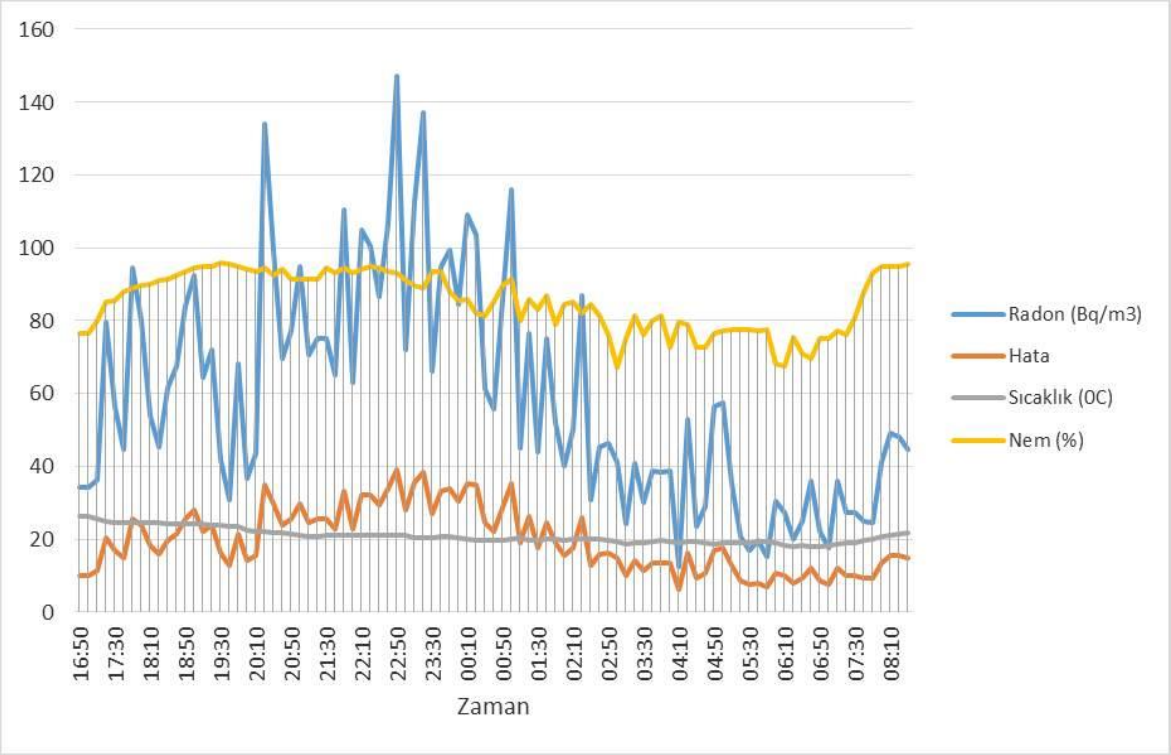
3.2.1.2. Kaplıcalar Havasında Mevsimlik Olarak Ölçülen Radon Gazı Değerleri

2011 yılında sonbahar, yaz, ilkbahar ve kış olmak üzere AlphaGUARD ile kaplıca havasında mevsimlik ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerde cihaz 10 dakika difüzyon modunda çalıştırılmıştır. 2009-2010 yılında aylık alınan ölçümlerde cihaz 60 dakika difüzyon modunda çalıştırılmıştır. Aynı zamanda bu üç aylık periyotlarda eş zamanlı olarak cihazın su probu ile kaplıca suyunda radon gazı değeri ölçülmüştür. Aşağıda kaplıca ortamında havada ölçülen radon gazı seviyeleri grafikler ile verilmektedir.

3.2.1.2.1. Ayder Kaplıcası

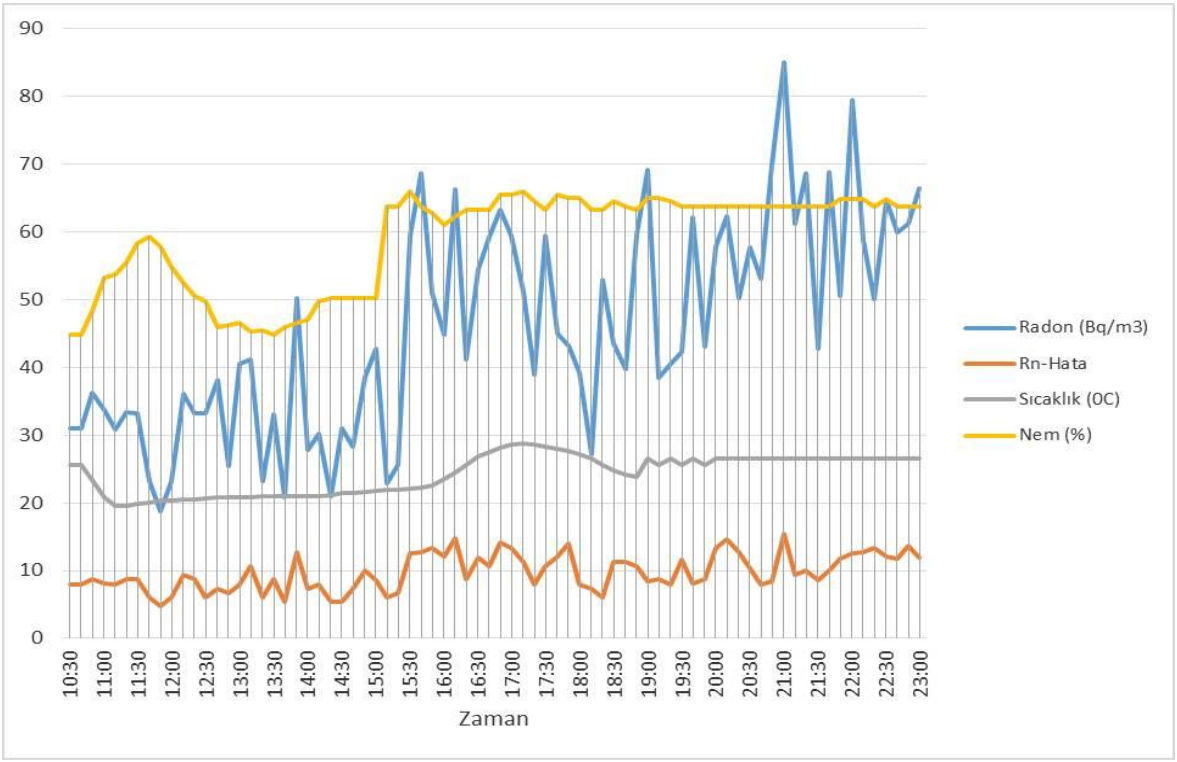
Şekil 66'da Ayder Kaplıcası A1 ortamında sonbahar mevsiminde AlphaGUARD cihazı ile alınan ölçümün grafiği görülmektedir. Cihaz ölçüm yaparken tutulan gözlem sonuçlarına göre grafiğin en yüksek olduğu değerlerde camlar kapalı, radon değerinin düşük olduğu yerlerde cam ve kapılar açıktır. Ortalama radon gazı değeri 59±19 Bq/m^3 dür. Ortalama sıcaklık 20,87 ^0C ve ortalama nem %85 dir. Nemin en düşük değeri %69,5

ile sabah saat 06.40, en yüksek değeri %96 ile saat 19.30 civarında ölçülmüştür. Havuz boş iken ortamdaki nem düşmekte, havuz dolu iken nem artmaktadır.

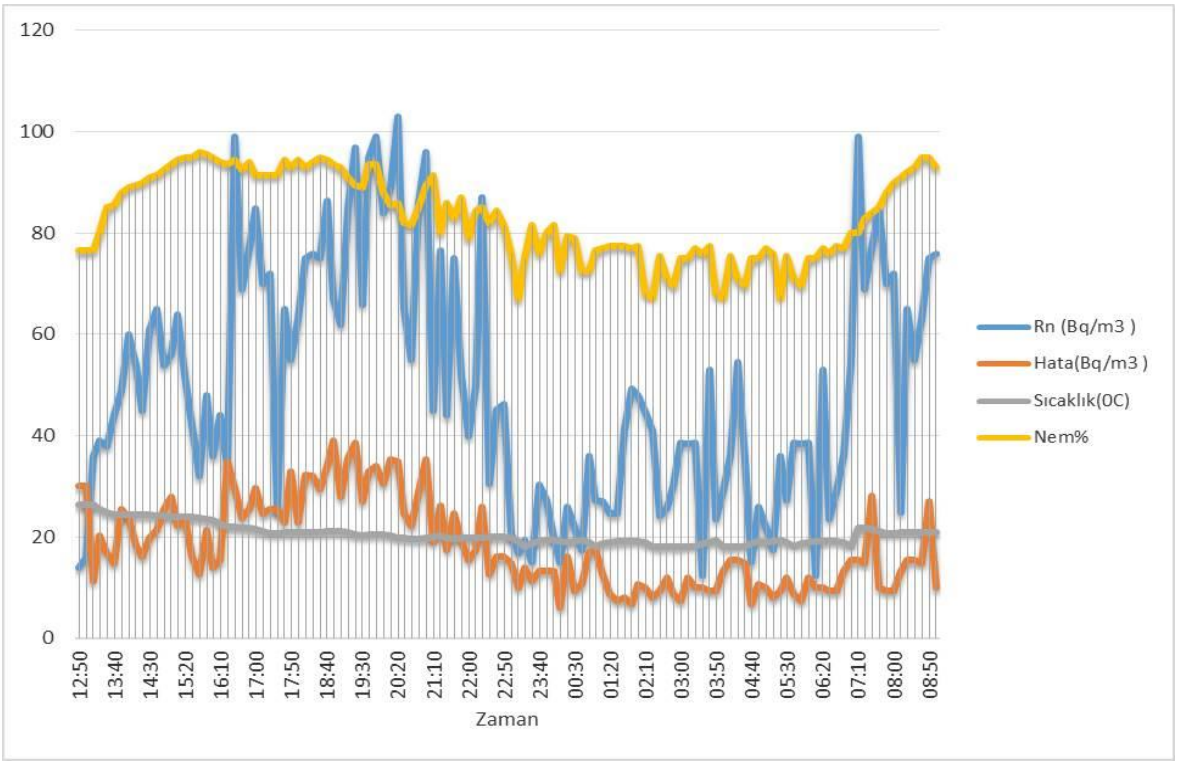


Şekil 66. Sonbahar mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri

Şekil 67'de ilkbahar mevsimi Ayder kaplıcası A1 ortamında yapılan ölçümün grafiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde saat 15.30 a kadar kapılar ve camlar açıktır. Kapılar ve camlar kapandığında grafikteki radon gazı seviyesi ve nem oranı artmıştır. Ortalama radon gazı 47±10 Bq/m^3, ortalama sıcaklık 24 ^{0}C ve ortalama nem %60 dır. Sıcaklığın en düşük olduğu zamanda (19,5^{0}C) ortamdaki radon gazı değeri 30 Bq/m^3, nem ise %53 tür. Sıcaklığın en yüksek olduğu zamanda (28,8^{0}C) ortamdaki radon gazı değeri 59 Bq/m^3, nem ise %66 tür.

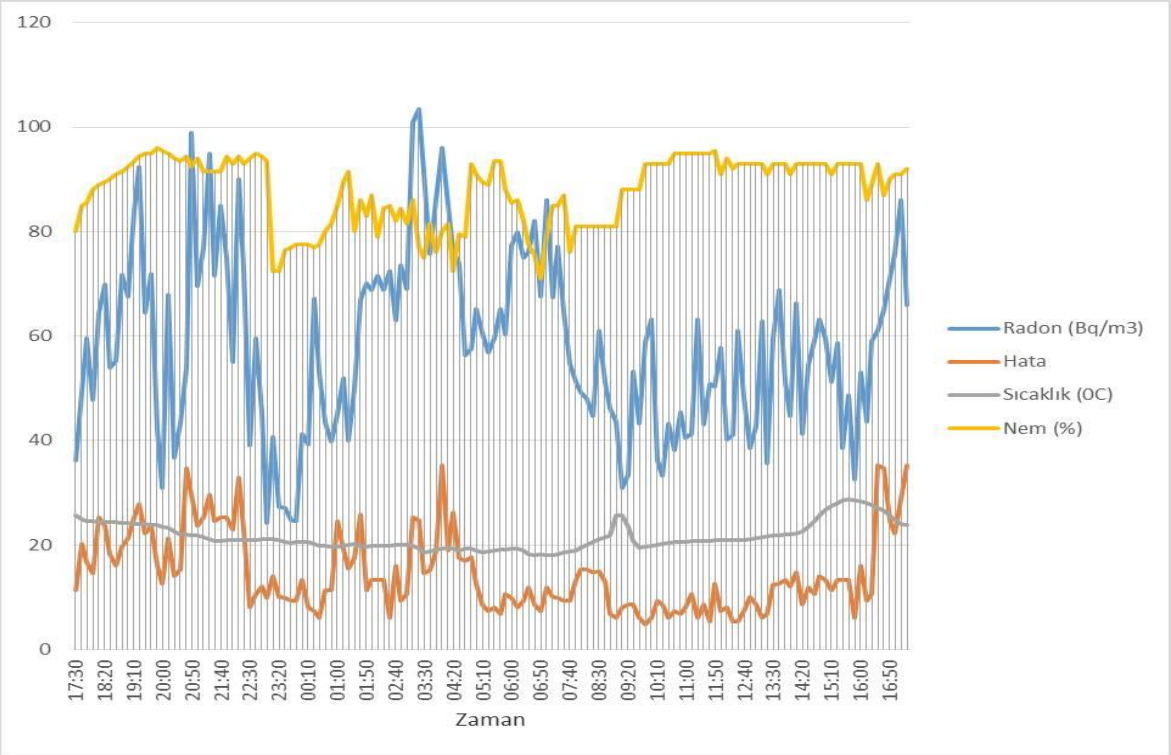


Şekil 67. İlkbahar mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri



Şekil 68. Kış mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri

2011 kış mevsimi Ayder A1 ortamında ölçülen aktif ölçümlerin grafiği Şekil 68'de görülmektedir. Saat 23.00'de havuz suyu boşaltılmış ve havuz temizlenip sabaha karşı yine doldurulmuştur. Grafikten anlaşıldığı gibi gece saatlerinde radon gazı seviyesi düşmüş, sabah saatlerine doğru yeniden artış göstermiştir. Ortalama radon gazı 50±18 Bq/m^3, ortalama sıcaklık 20,5 ^{0}C ve ortalama nem %83 dür. Sıcaklığın en düşük olduğu zamanda (18,1^{0}C) ortamdaki radon gazı değeri 12,5±8 Bq/m^3, nem ise %67,5 tür. Sıcaklığın en yüksek olduğu zamanda (21,8^{0}C) ortamdaki radon gazı değeri 72 ±9 Bq/m^3, nem ise %90 tür. Sıcaklık ve nem artınca ortamdaki radon gazı seviyesinde artma olmuştur.



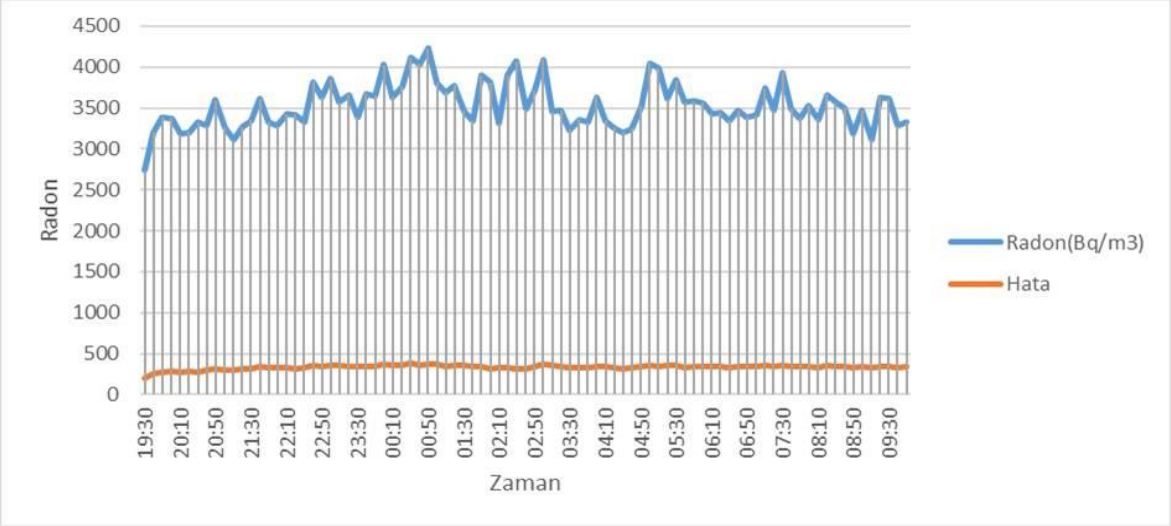
Şekil 69. Yaz mevsimi Ayder Kaplıcası A1 ortamında havada radon, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri

Şekil 69'da Ayder Kaplıcasında 2011 yaz mevsiminde yapılan ölçümün grafiği görülmektedir. Havuzun en kalabalık olduğu mevsim yaz mevsimidir. Grafikte radon gazı seviyesinin en düşük değeri 24±9 Bq/m^3 en yüksek değeri 103±24 Bq/m^3 tür. Ortalama ise 58±14,5 Bq/m^3 olmaktadır. Ortalama sıcaklık 21,6^{0}C ve ortalama nem %87,8 dir.

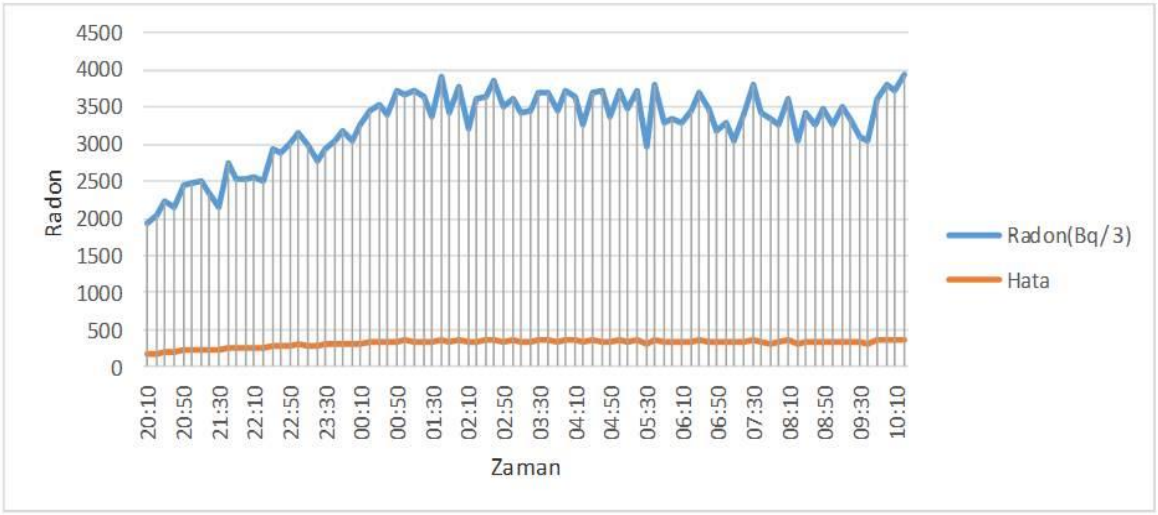
3.2.1.2.2. Ilıcaköy Kaplıcası

Aşağıda grafiklerde mevsimlik olarak yapılmış ölçüm sonuçları verilmektedir. Şekil 70-71-72'de Ilıcaköy kaplıcasında ölçülen mevsimlik ölçüm sonuçları incelendiğinde 1,5 yıl önce yapılmış sonuçlardan farklı değerler çıktığı görülmektedir. Daha önce aylık yapılan ölçümlerde ana havuz hava ortamında ortalama radon konsantrasyonu 2118±121 Bq/m^3 tür. Daha sonra üç aylık yapılan ölçümlerin ortalaması bu değerden 1000 Bq/ m^3 daha fazladır.

Şekil 70'de 2011 yılının kış mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I1 ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. 14 saati aşan ölçümde radon gazı seviyesinin 1048±110 Bq/ m^3 ve 4228±374 Bq/ m^3 arasında değiştiği ve ortalamasının 3480±334 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir.

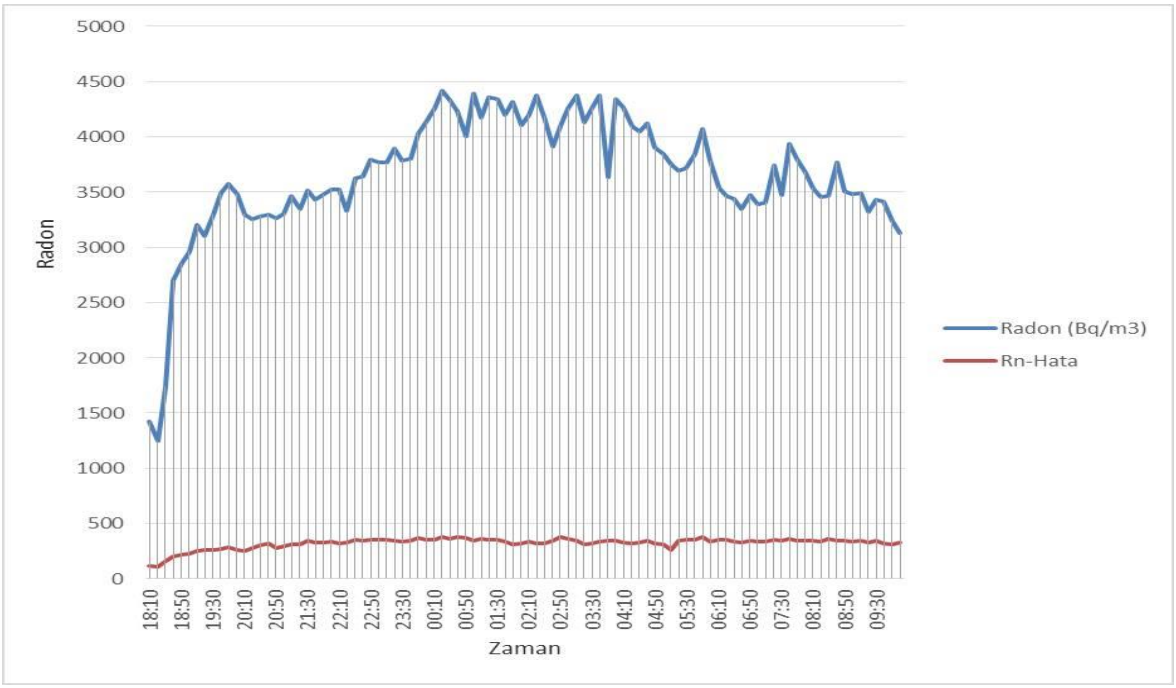


Şekil 70. Kış mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon, Rn hata değerleri



Şekil 71. İlkbahar mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon, Rn hata değerleri

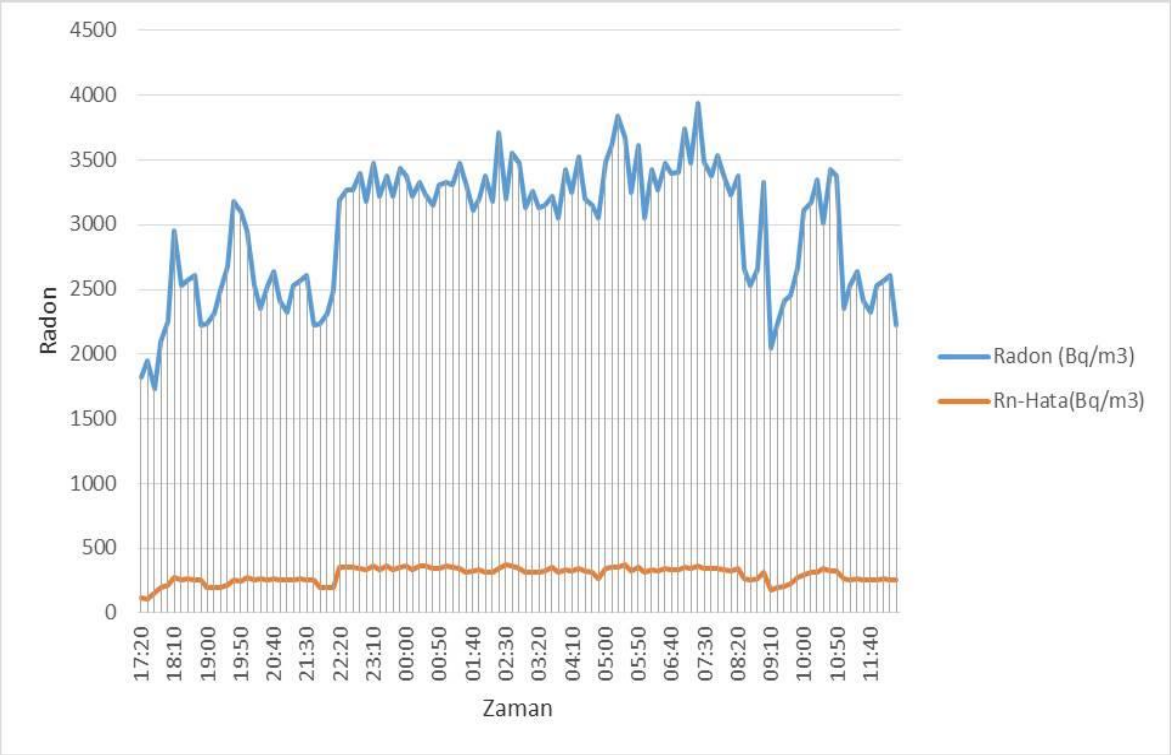
Şekil 71'de 2011 ilkbahar mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. 15 saati aşan ölçümde radon gazı seviyesinin 588±120 Bq/ m^3 ile 3940±365 Bq/ m^3 arasında değiştiği ve ortalamasının 3249±316 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 72. Sonbahar mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon gazı değerleri

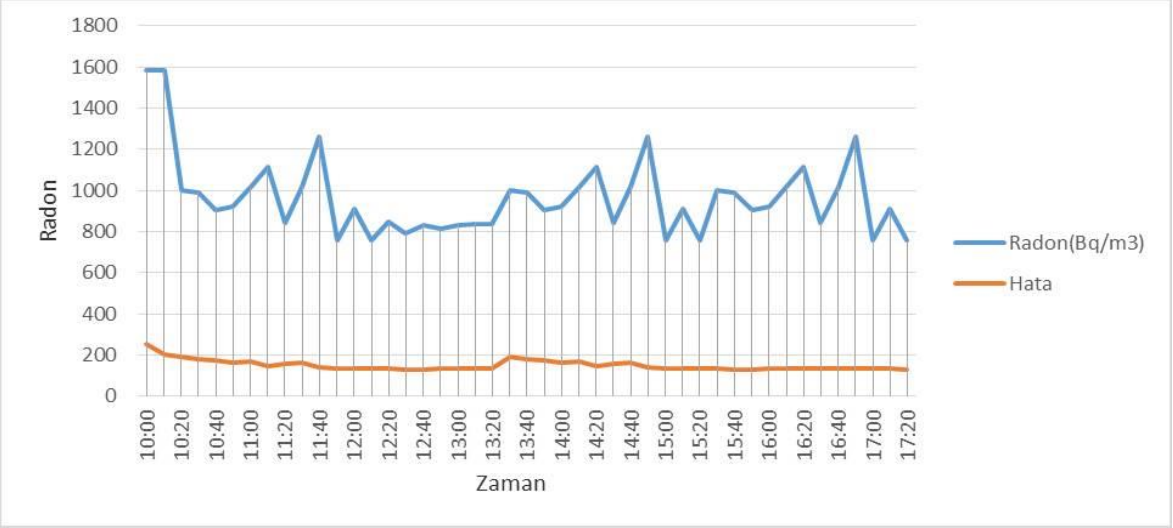
Şekil 72'de 2011 yılında sonbahar mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. 15 saati aşan ölçümde radon gazı seviyesinin 1248±110 Bq/ m^3 ile 4392±344 Bq/ m^3 arasında değiştiği ve ortalamasının 3656±312 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir.

Şekil 73 incelendiğinde 2011 yılı yaz mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. 18 saati aşan ölçümde radon gazı seviyesinin 1820±115 Bq/ m^3 ile 3744±356 Bq/ m^3 arasında değiştiği ve ortalamasının 2978±295 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın en düşük değeri 24,6 ^{0}C en yüksek değerinin 27,6 ^{0}C olduğu, nem oranının ise %84,5 ile %94 arasında değiştiği belirlenmiştir.

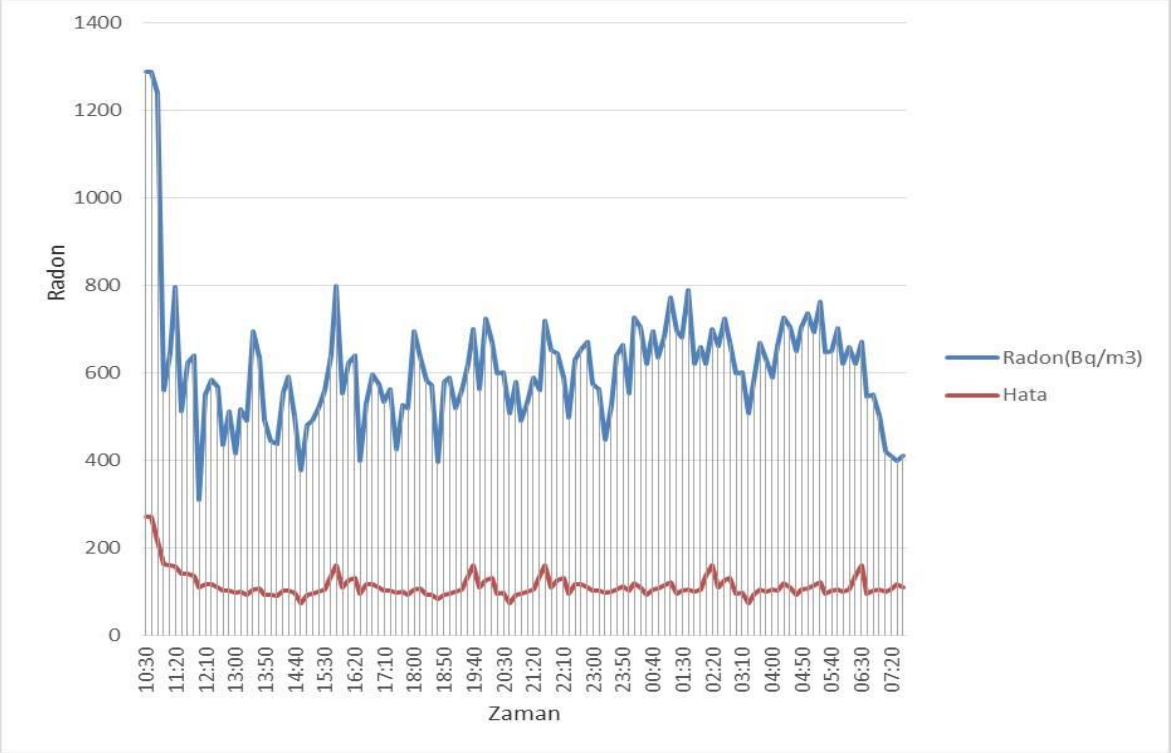


Şekil 73. Yaz mevsimi Ilıcaköy Kaplıcası I1 hava ortamında radon gazı değerleri

Şekil 74'de 2011 yılı kış mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. 14 saati aşan ölçümde radon gazı seviyesinin ortalamasının 967±150 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 74. Kış mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında radon gazı değerleri



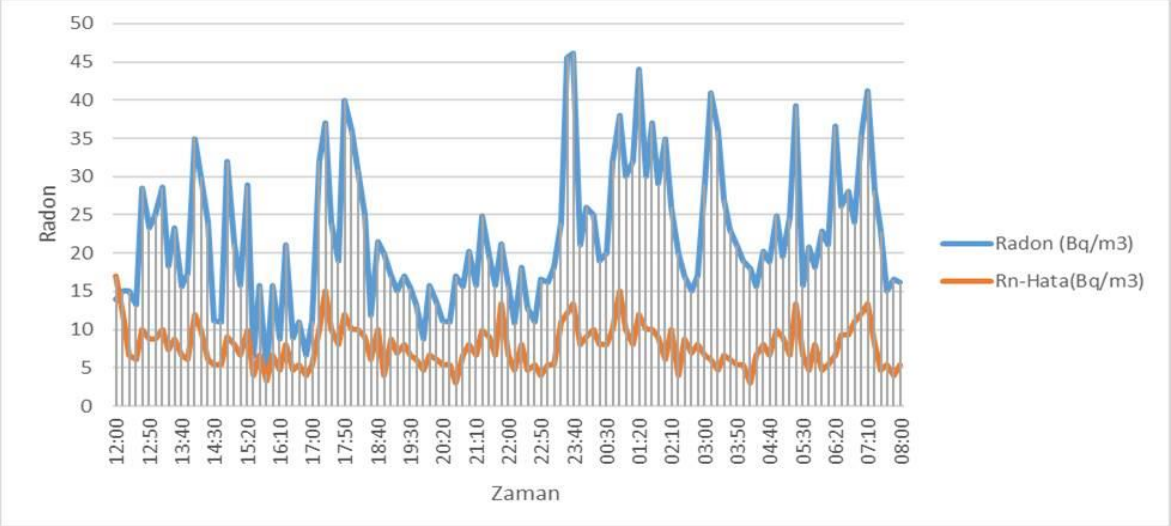
Şekil 75. İlkbahar mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında radon gazı değerleri

Şekil 75 incelendiğinde 2011 ilkbahar mevsiminde Ilıcaköy Kaplıcası I4 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. Ölçümde radon gazı seviyesi ortalamasının 608 ± 112 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın en düşük değeri 25,5 ^{0}C

en yüksek değerinin 28,5 ^{0}C olduğu, nem oranının ise %93 ile %99 arasında değiştiği belirlenmiştir.

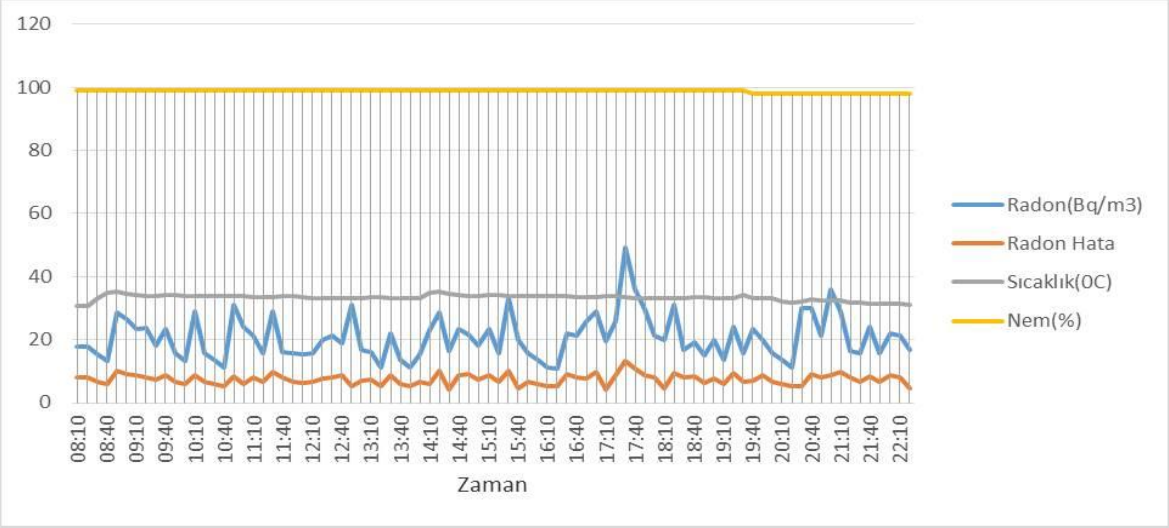
3.2.1.2.3. Havza Kaplıcası

Şekil 76'da kış mevsiminde Havza Kaplıcasında AlphaGUARD ile alınan ölçümün grafiği görülmektedir. Ölçümün maksimum değeri 46±13 Bq/m^3, minimum değeri ise 11±5 Bq/m^3 tür. Grafikte radon gazı seviyesinin arttığı yerlerde havuzun kapıları kapalıdır. Kapılar açıldığında radon gazı seviyesi düşmektedir.



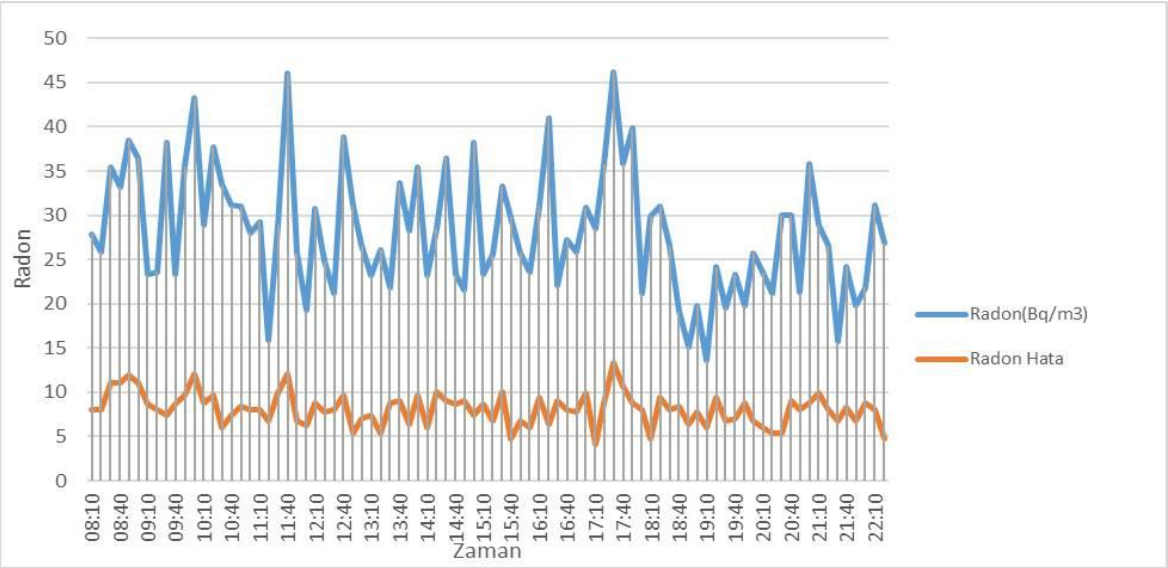
Şekil 76. Kış mevsiminde Havza Kaplıcası H1 radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri

Şekil 77'de görülen grafik ilkbahar mevsiminde Havza Kaplıca H1 hava ortamında radon gazı seviyelerinden elde edilmiştir. Grafikte radon, radon hata sıcaklık ve nem oranları da verilmektedir Nemin %98-%99 olduğu görülmektedir. Kaplıca suyundan kaynaklanan buhar birikimi bu neme neden olmaktadır. Sıcaklık ise 30,8 ^{0}C ile 35,3 ^{0}C arasında değişmektedir. Nem ve sıcaklık oranı en yüksek olduğu halde radon seviyesi en düşük olan kaplıca Havza Kaplıcasıdır.



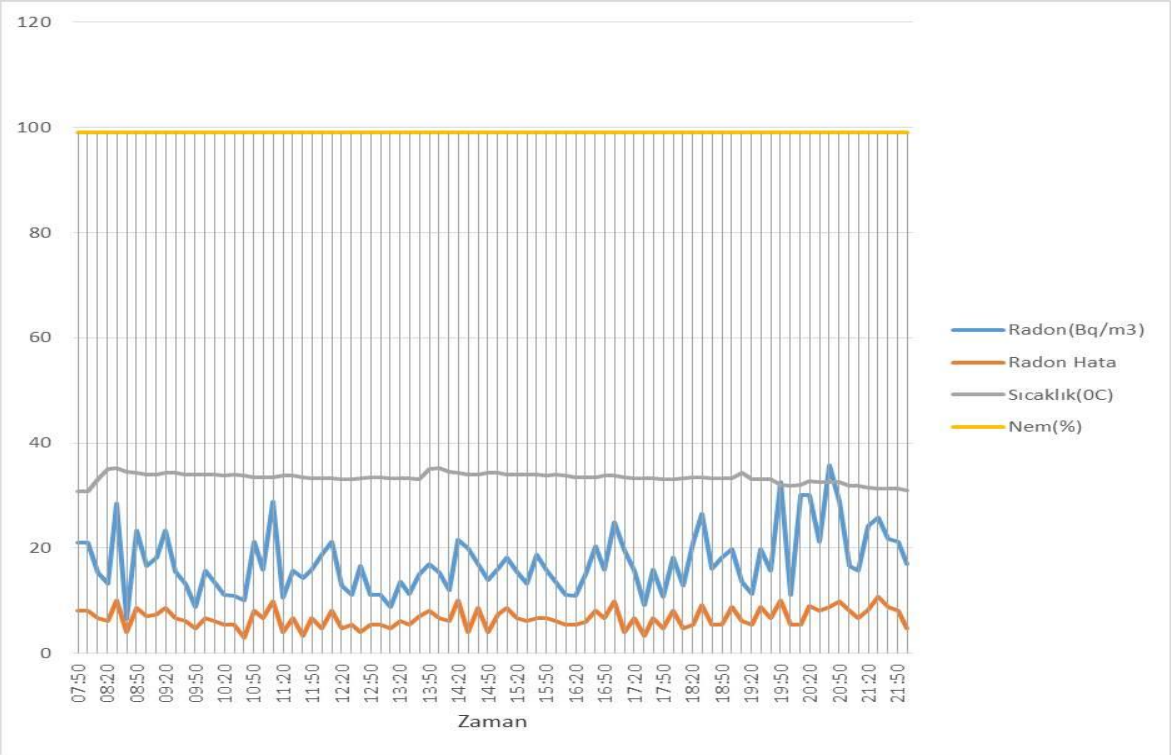
Şekil 77. İlkbahar mevsiminde Havza Kaplıcası H1 hava ortamında radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri

Şekil 78 Havza H1 hava ortamında sonbahar mevsiminde ölçülmüştür. Sonbahar mevsiminde havaların sıcak olması nedeni ile kapılar ve camlar daha sık açılmaktadır. Bu da radon gazı seviyesini düşürmektedir. Ortalama radon gazı seviyesi 28±8 Bq/m^3 olmaktadır. Bu ölçüm sırasında nemin sürekli %99, sıcaklığın ise ortalama 33,5 ^oC olduğu görülmüştür.



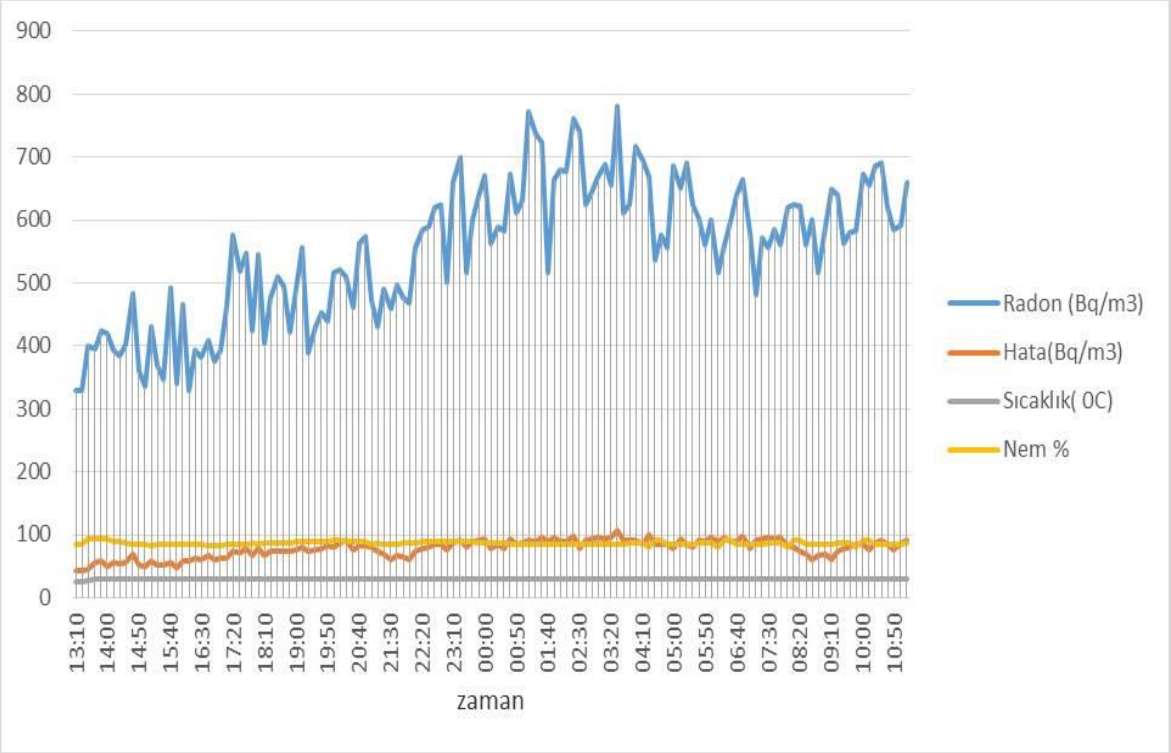
Şekil 78. Sonbahar mevsiminde Havza Kaplıcası H1 hava ortamında radon gazı değerleri

Şekil 79 Havza H1 hava ortamında yaz mevsiminde ölçülmüştür. Yaz mevsiminde havaların sıcak olması nedeni ile kapılar ve camlar daha sık açılmaktadır. Bu da radon gazı seviyesini düşürmektedir. Ortalama radon gazı seviyesi 18±6 Bq/m^3 olmaktadır. Bu ölçüm sırasında nemin sürekli %99, sıcaklığın ise ortalama 34 ^oC olduğu görülmüştür.



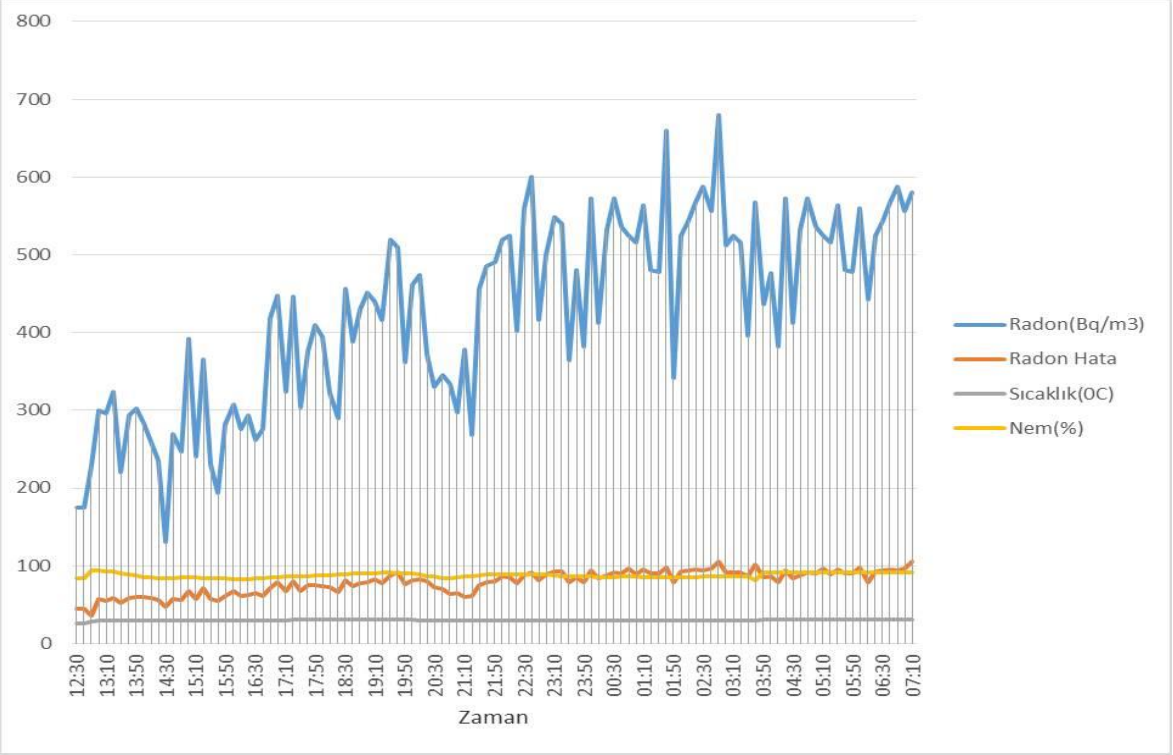
Şekil 79. Yaz Mevsiminde Havza Kaplıcası H1 hava ortamında ölçülen radon, Rn hata, sıcaklık, nem konsantrasyonları

3.2.1.2.4. Ladik Kaplıcası



Şekil 80. İlkbahar mevsimi Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri

Şekil 80'de 2011 yılı ilkbahar mevsimi Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. 20 saati aşan ölçümde radon gazı seviyesinin ortalamasının 551±78 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir. Saat 13.00 ve 21.30 arası havuza giren çıkan kişi sayısı fazla olduğu için kapı çok sık açılmakta ve dolayısı ile ortamdaki radon gazı seviyesi düşmektedir. Gece saatlerinde radon gazı seviyesinde bir miktar artış olduğu görülmektedir. Ölçüm sırasında en düşük sıcaklık 27^0C en yüksek sıcaklık 31^0C olarak ölçülmüş, ortalama sıcaklık ise 30^0C olarak hesaplanmıştır. Nem oranı ise %84,5 ile %94 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 81. Yaz mevsimi Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında radon gazı, Rn hata, sıcaklık, nem değerleri

Şekil 81'de yaz mevsimi Ladik Kaplıcası L1 hava ortamında ölçülen radon gazı seviyeleri görülmektedir. 19 saati aşan ölçümde radon gazı seviyesinin ortalamasının 425±62 Bq/ m^3 olduğu belirlenmiştir. Saat 12.30 ve 21.50 arası havuza giren çıkan kişi sayısı fazla olduğu için kapı çok sık açılmakta ve dolayısı ile ortamdaki radon gazı seviyesi düşmektedir. Gece saatlerinde radon gazı seviyesinde bir miktar artış olduğu görülmektedir.

3.2.1.3. Kaplıca Hava Ortamında Pasif Radon Gazı Konsantrasyonları

Kaplıca ortamında CR-39 ile pasif olarak ölçülen değerler aşağıda tablo olarak verilmektedir. Tablo 19'da kaplıcalara dağıtılan radon dedektörlerinin mevsimsel ortalama radon konsantrasyon değerleri verilmektedir.

Ayder Kaplıcasında dört mevsim CR-39 ile radon gazı ölçümü yapılan bölümlerin radon gazı ortalama değeri yaz mevsiminde 76±2 Bq/m^3, sonbahar mevsiminde 128±2 Bq/m^3, kış mevsiminde 190±3 Bq/m^3, İlkbahar mevsiminde 108±3 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür.

Ilıcaköy Kaplıcasında dört mevsim CR-39 ile radon gazı ölçümü yapılan bölümlerin radon gazı ortalama değeri yaz mevsiminde 460±10 Bq/m^3, sonbahar mevsiminde 577±10 Bq/m^3, kış mevsiminde 706±11Bq/m^3, İlkbahar mevsiminde 584±10 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. I1 ortamında ise 2091±46 Bq/m^3 değeri kış mevsiminde ölçülmüş ve CR-39 dedektörü ile ölçülen en yüksek değerdir.

Havza Kaplıcasında dört mevsim CR-39 ile radon gazı ölçümü yapılan bölümün ortalama radon gazı değeri yaz mevsiminde 34±1,34 Bq/m^3, sonbahar mevsiminde 49±1,64 Bq/m^3, kış mevsiminde 88±3 Bq/m^3, İlkbahar mevsiminde 56±2 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür.

Ladik Kaplıcasında dört mevsim CR-39 ile radon gazı ölçümü yapılan bölümlerin radon gazı ortalama değeri yaz mevsiminde 285±17 Bq/m^3, sonbahar mevsiminde 328±19 Bq/m^3, kış mevsiminde 362±20 Bq/m^3, İlkbahar mevsiminde 319±17 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. L1 bölümünde havada ölçülen radon gazı değeri 400 Bq/m^3 değerinden fazladır.

Tablo 19. Ayder, Ilıcaköy, Havza, Ladik Kaplıcaları için CR-39 dedektörü ile alınan sonuçlar

Kaplıcalar		Yaz (Bq/m^3)	Sonbahar (Bq/m^3)	Kış (Bq/m^3)	İlkbahar (Bq/m^3)
Ayder	Minimum	40±6	77±8	117±12	70±6
	Maksimum	105±9	156±14	217±18	165±13
	Ortalama	76±2	128±2	190±3	108±3
	S. Sapma	25	29	31	33
Ilıcaköy	Minimum	69±9	132±13	157±12	156±12
	Maksimum	1519±40	1877±43	2091±46	1962±45
	Ortalama	460± 10	577± 10	706± 11	584±10
	S. Sapma	464	513	569	534
Havza	Minimum	27±3	31±4	58±7	39±4
	Maksimum	44±5	67±8	150±12	77±9
	Ortalama	34±1	49±2	88±3	56±2
	S. Sapma	7	15	42	18
Ladik	Minimum	103 ±10	112±10	145±13	113±11
	Maksimum	617 ±50	643±53	701±60	609±51
	Ortalama	285± 17	328± 19	362± 20	319± 17
	S. Sapma	200	225	237	209

3.2.1.4. Kaplıca Sularında Radon Gazı Değerleri

2011 yılında mevsimsel olmak üzere AlphaGUARD ile kaplıca havasında üç aylık periyotlar ile ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerde cihaz 10 dakikalık difüzyon modunda çalıştırılmıştır. Aynı zamanda bu mevsimlik periyotlarda eş zamanlı olarak cihazın su probu ile kaplıca suyunda radon gazı değeri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Tablo 20' de görülmektedir.

Tablo 20. Kaplıca sularında ölçülen radon gazı değerleri(Bq/L)

Mevsimler	Ayder Yüzme Havuzu	Ayder Çeşme Suyu	Ilıcaköy Havuz-1	Ilıcaköy Havuz-2	Havza Yüzme Havuzu	Ladik Yüzme Havuzu
Sonbahar	163±24	139±22	528±20	296±27	71±8	199±15
Kış	162±21	128±18	579±32	382±30	86±9	182±13
İlkbahar	269 ±34	197±30	658±25	393±35	75±9	297±18
Yaz	188±30	154±23	542±23	334 ±34	95±11	256±17
Ortalama	202±5	155±4	577±5	351±4	82±1	234±2

Tablo 20'ye göre, Ayder Kaplıcası için suda ölçülen radon gazı seviyesi ortalama 155±4 Bq/L dir. İçme suyu için verilen sınır değer 11 Bq/L (EPA) dir. Ayder Kaplıcasında kaplıca suyu içme suyu olarak kaplıca personeli ve yerel halk tarafından kullanılmaktadır.

Ilıcaköy kaplıcası havuz suyunda ölçülen radon gazı seviyesi ise ortalama 577±5 Bq/L dir. Havuz-2 ortamında ise radon gazı seviyesi 351±4 Bq/L dir.

Havza havuz ortamında ölçülen ortalama radon gazı seviyesi 82±1 Bq/L dir. Bu kaplıca suyu içme suyu olarak kullanılmamaktadır.

Ladik havuz ortamında ölçülen ortalama radon gazı seviyesi 234±15 Bq/L dir. İçme sular için maksimum izin verilen sınır değer 11 Bq/L (EPA) dir. Ladik kaplıca suyu kaplıca içerisinde çeşmelere verilmektedir. Bu kaplıca suyu özellikle kaplıca personeli tarafından içme suyu olarak kullanılmaktadır.

3.2.1.5. Kaplıca Çevresindeki Topraklarda Radon Gazı Değerleri

2012 yılının Temmuz ayında AlphaGUARD PQ 2000PRO aktif radon gazı ölçme cihazının toprak ölçme probu ile kaplıca çevresindeki topraklarda radon gazı ölçümü yapılmıştır. Tablo 21' de kaplıca çevresindeki topraklarda radon gazı seviyeleri verilmiştir. Ilıcaköy kaplıcasında suyun çıktığı kaynağa yakın topraklarda radon gazı ölçüldüğünde bu değerin 955000±5000 Bq/m^3 değeri ile ölçüm yapılan kaplıcalar içerisinde en yüksek radon gazı içeren kaplıca olduğu görülmektedir. En düşük toprak radon gazı seviyesi ise 8640±700 Bq/m^3 değeri ile Havza kaplıcasında ölçülmüştür. Ilıcaköy-2 nin arka tarafında ölçülen toprak ölçümü suyun çıktığı kaynaktan 1,5 km uzaklıkta ölçülmüştür. Açıkça görüldüğü gibi kaplıca suyunun çıktığı kaynağa yaklaştıkça radon gazı seviyesi toprakta artış göstermektedir.

Tablo 21. Mevsimlik ölçümlerde kaplıca toprağında radon gazı değerleri

Kaplıcalar	Toprakta Radon Bq/m^3
Ayder	38000± 200
Ilıcaköy (su kaynağının karşısı)	955000±5000
Ilıcaköy-2	97000±800
Havza	8640±700
Ladik	50000±2640

3.2.2. Kaplıca Çevresi Topraklarında Radyonüklid Konsantrasyonu ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

Çalışma kapsamında bulunan dört kaplıcanın çevresinden ve Kuzey Anadolu fay hattının Ladik Kaplıcasına yakın olması nedeniyle fay hattı boyunca alınan toprak örneklerinin yapılan gama spektrometrik analizleri sonucunda, toprak örneklerinde bulunan radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları belirlenmiştir. Topraktaki radyonüklitlerin aktiviteleri biliniyorsa, yerden bir metre yükseklikte soğurulan doz hızı belirlenebilmektedir. Bu çalışma için toprak örneklerinin analizinden elde edilen radyonüklit aktivitelerinden yararlanılarak, toprak örneklerindeki gama dozu (D) değerleri (42) numaralı eşitlikten (UNSCEAR, 2000) yararlanılarak hesaplanmış ve her bir toprak örneği için hesaplanan gama dozu değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

$$D\ (nGy/s) = (0{,}462 \times {}^{238}U) + (0{,}604 \times {}^{232}Th) + (0{,}0417 \times {}^{40}K) \quad (43)$$

Bulunan gama dozları kullanılarak ise yıllık etkin doz eşdeğeri (AEDE) yani insanın bir yılda maruz kaldığı, farklı radyasyon kaynaklarından yayınlanan radyasyonlardan alacağı doz miktarı bulunabilmektedir. Eşitlik (44) kullanılarak yıllık etkin doz eşdeğeri hesaplanmaktadır (UNSCEAR, 2000).

$$\text{AEDE}\ (\mu Sv/y) = \text{Soğurulan Gama Dozu x Çevresel Gama Dozu Dönüşüm Faktörü x Meşguliyet Faktörü x Zaman} \quad (44)$$

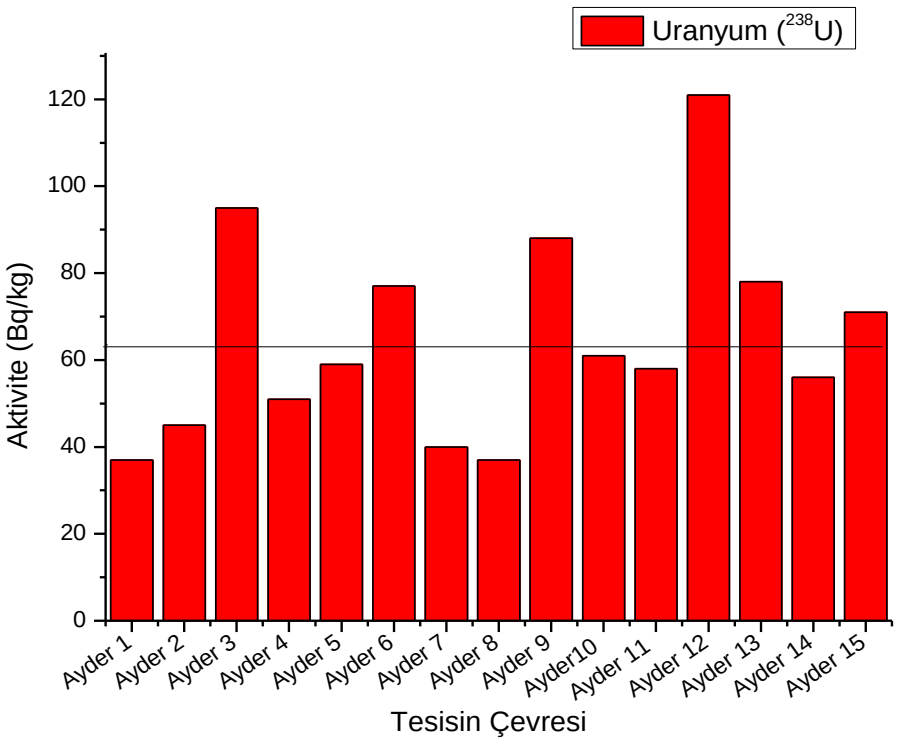
Bu eşitlikte Çevresel Gama Dozu Dönüşüm Faktörü 0,7 Sv/Gy olarak belirlenmiştir ve bu değer hem kapalı ortam içinde hem de kapalı ortam dışında yapılan ölçümlerde değişmemektedir. Yine bu eşitlikte bilinmesi gereken diğer bir faktör, Meşguliyet Faktörü yani insanların bu ışınlara maruz kaldıkları süredir. Bu çalışmada yapılan hesaplarda, insanların zamanlarının %20'sini açık alanlarda ve %80'ini kapalı alanlarda geçirdikleri göz önüne alınmıştır (Meşguliyet faktörü kapalı ortam için 0,8 ve kapalı ortam dışı için ise 0,2 olarak alınır). Zaman ise, bir yıldaki saat sayısıdır (8760 s/y).

3.2.2.1. Ayder ve Ilıcaköy Kaplıcası Toprak Örneklerinin Radyoaktivite Seviyeleri ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

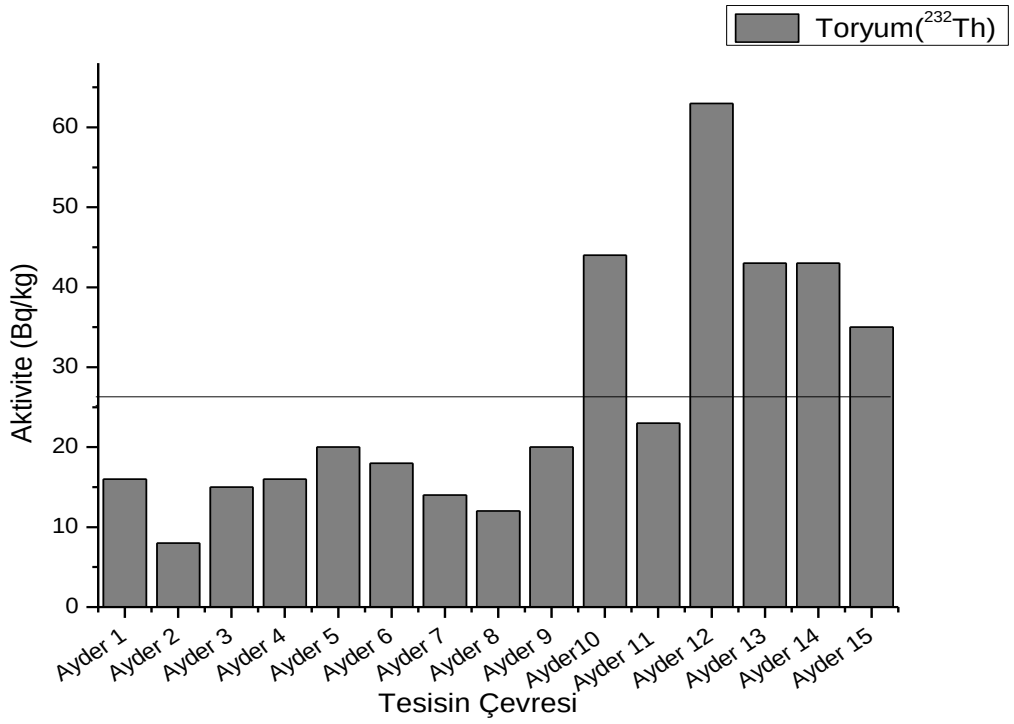
Gama spektroskopik analizi için Ayder kaplıcası çevresinden alınan toprak numunelerindeki ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K doğal radyoaktif elementleri ile ^{137}Cs yapay radyoaktif elementinin aktiviteleri hesaplanmış ve Tablo 22'de verilmiştir. 15 adet toprak numunesinin ortalama ^{238}U aktivitesi 65 Bq/kg olarak hesaplanmıştır**.** En düşük aktivite değeri 37±4 Bq/kg, en yüksek aktivite değeri ise 121±8 Bq/kg dır. Ortalama ^{232}Th aktivitesi 26±2 Bq/kg olup minimum değeri 8±2 Bq/kg, maksimum değeri ise 63±7 Bq/kg dır. Ortalama ^{40}K aktivitesi 699±8 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Alınan toprak numunelerinden tümünde ^{137}Cs yapay radyoaktif elementine rastlanmış ve ortalama değeri 21±1,4 Bq/kg olarak bulunmuştur. Şekil 82-83-84 ve 85'de toprak numunelerinin ^{238}U, ^{232}Th, ^{137}Cs ve ^{40}K aktiviteleri grafikler halinde verilmiştir. Ayder kaplıcasında ise topraktaki ^{238}U ve ^{40}K seviyesi dünya ortalamasının üzerinde, ^{232}Th ise altındadır.

Tablo 22. Ayder Kaplıcası topraklarında radyonüklit konsantrasyonları

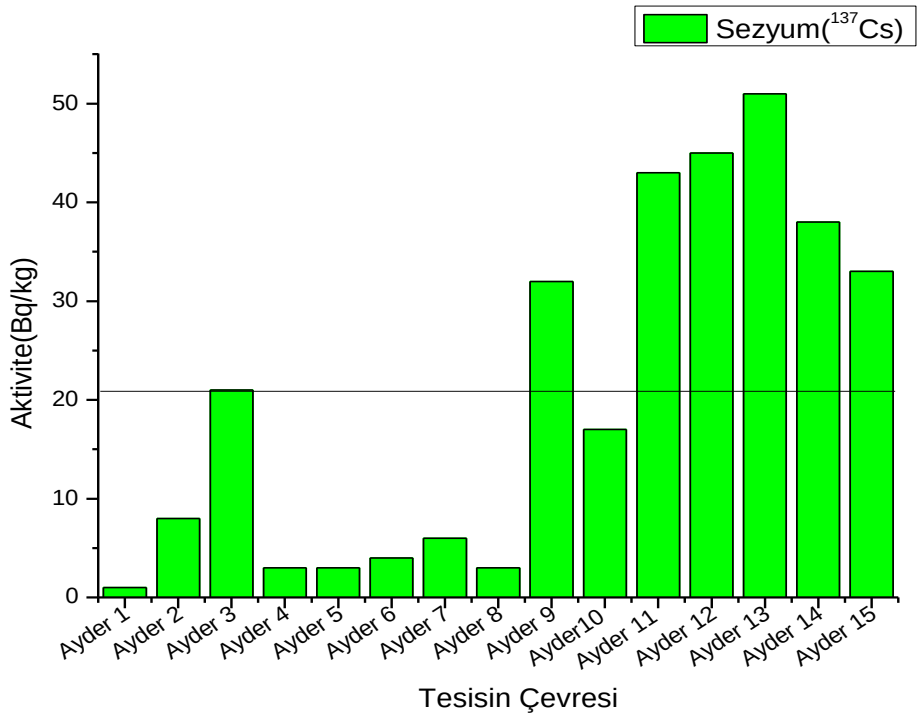
Numune adı	^{238}U	^{232}Th	^{137}Cs	^{40}K	D	AEDE
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(nGy/s)	(μSv/y)
Ayder 1	37±6	16±4	1±1	545±39	41	50
Ayder 2	45±6	8±2	8±2	648±51	53	65
Ayder 3	95±8	15±7	21±3	701±56	42	51
Ayder 4	51±7	16±5	3±2	727±51	63,5	78
Ayder 5	59±6	20±7	3±2	550±44	62	76
Ayder 6	77±7	18±6	4±3	616±	72	88
Ayder 7	40±5	14±5	6±3,5	584±42	51	62
Ayder 8	37±4	12±4	3±1,4	547±36	47	57
Ayder 9	88±8	20±6,5	32±4	968±62	93	114
Ayder10	61±7	44±6,5	17±7	818±58	89	109
Ayder 11	58±9	23±7	43±4	787±62	74	91
Ayder 12	121±8	63±7	45±3	877±55	131	160
Ayder 13	78±7	43±7	51±4	745±55	93	114
Ayder 14	56±7	43±6	38±3	701±50	81	93
Ayder 15	71±7	35±7	33±3	662±50	81	93
Ortalama	65±1	26±2	21±1	699±8	75	92



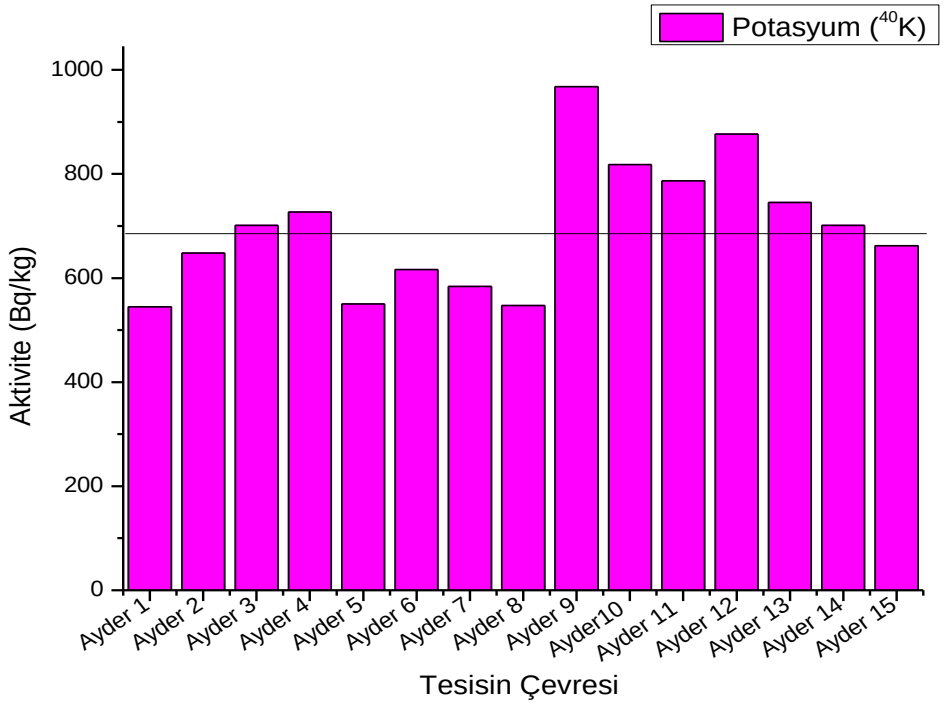
Şekil 82. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{238}U konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 83. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 84. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması

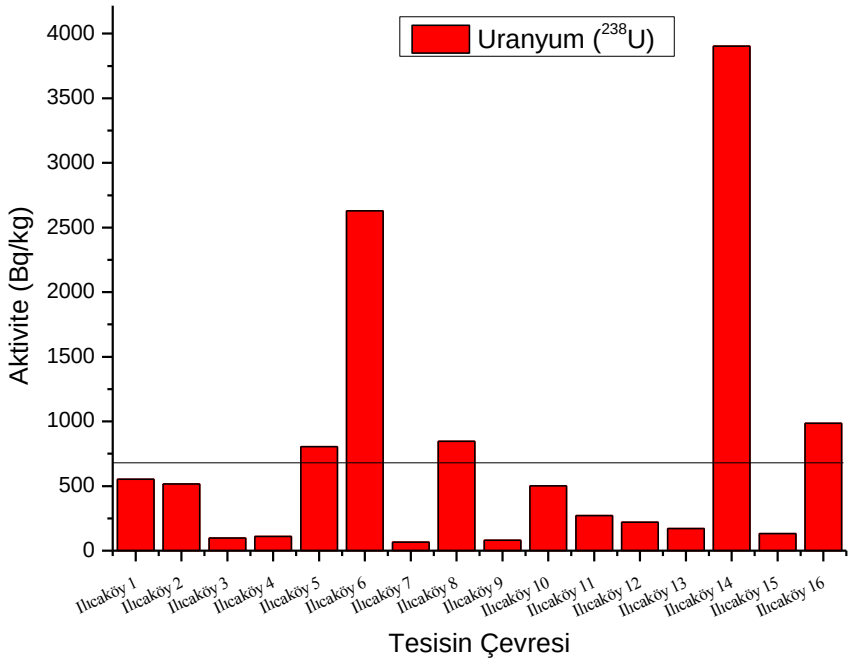


Şekil 85. Ayder Kaplıcası topraklarında ^{40} K konsantrasyonlarının karşılaştırılması

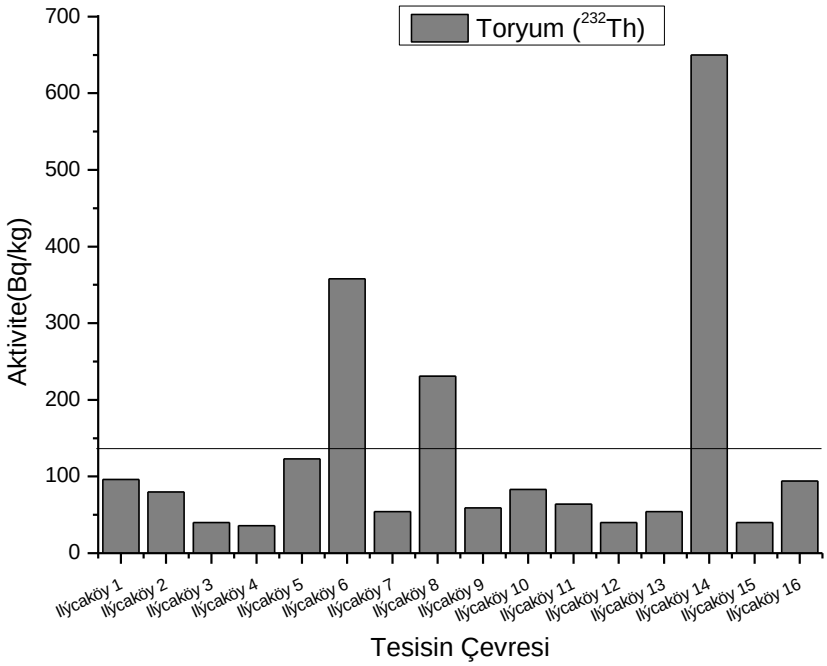
Gama spektroskopik analizi için Rize ili Ilıcaköy Kaplıcası çevresinden alınan toprak numunelerindeki ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K doğal radyoaktif elementleri ile ^{137}Cs yapay radyoaktif elementinin aktiviteleri Tablo 23'de verilmiştir. Toprak numunelerinin ortalama ^{238}U aktivitesi 743 Bq/kg olarak hesaplanmış ve en düşük aktivite değeri 67±4 Bq/kg, en yüksek aktivite değeri ise 3904±23 Bq/kg olarak suyun çıktığı kaynaktan alınan numunelerde bulunmuştur. Ortalama ^{232}Th aktivitesi 131±11 Bq/kg olup minimum değeri 40±9 Bq/kg, maksimum değeri ise 650±50 Bq/kg dır. Ortalama ^{40}K aktivitesi 776±14 Bq/kg olup minimum değeri 294±35 Bq/kg, maksimum değeri ise 1004±56 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Alınan toprak numunelerinde ^{137}Cs yapay radyoaktif elementine rastlanmış ve ortalama değeri 11±1 Bq/kg olup minimum değeri 1±1 Bq/kg maksimum değeri ise 40±4 Bq/kg olarak bulunmuştur. Şekil 86-87-88-89'da, Ilıcaköy Kaplıcası için ^{238}U, ^{232}Th, ^{137}Cs ve ^{40}K aktiviteleri grafikler halinde verilmiştir. Ilıcaköy Kaplıcasının yakın çevresindeki topraklarda ^{238}U, ^{137}Cs ve ^{40}K dünya ortalamasının üzerindedir.

Tablo 23. Ilıcaköy kaplıcasıtopraklarında radyonüklit konsantrasyonları

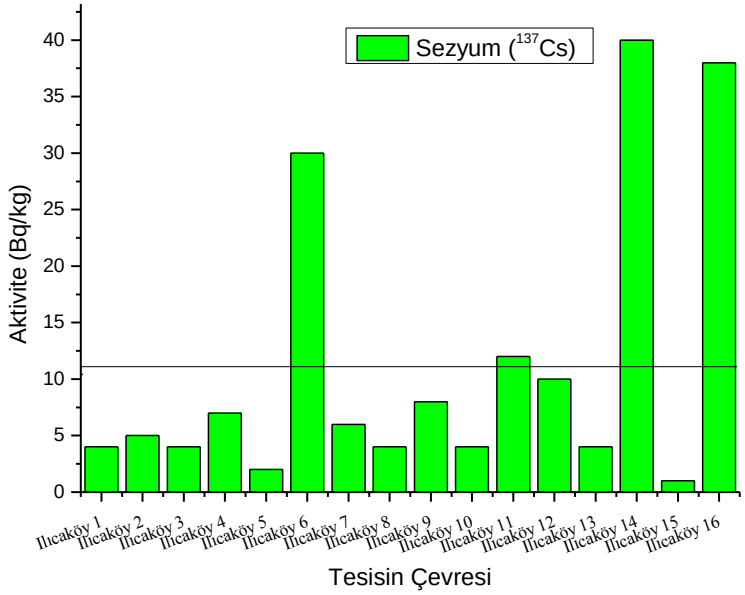
Numune adı	^{238}U	^{232}Th	^{137}Cs	^{40}K	D	AEDE
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(nGy/s)	(μSv/y)
Ilıcaköy 1	552±8	96±5	4±1	759±34	343	421
Ilıcaköy 2	515±11	80±5	5±2	709±44	318	390
Ilıcaköy 3	97±7	40±6	4±2	1004±56	111	136
Ilıcaköy 4	109±5	36±4	7±1	915±37	111	136
Ilıcaköy 5	805±10	123±6	2±1	758±37	478	586
Ilıcaköy 6	2630±23	358±11	30±3	294±35	1443	1770
Ilıcaköy 7	67±4	54±4	6±1	993±36	105	129
Ilıcaköy 8	845±39	231±12	4±1	703±64	558	684
Ilıcaköy 9	81±5	59±4	8±1	879±53	110	135
Ilıcaköy 10	502±8	83±5	4±1	732±30	312	383
Ilıcaköy 11	272±6	64±4	12±2	831±38	198	242
Ilıcaköy 12	220±7	40±6	10±2	920±44	164	201
Ilıcaköy 13	172±6	54±4	4±1	811±38	146	179
Ilıcaköy 14	3904±23	650±50	40±4	355±39	2212	2713
Ilıcaköy 15	132±6	40±9	1±1	930±44	124	152
Ilıcaköy 16	986±22	94±14	38±4	831±87	547	671
Ortalama	743±10	131±11	11±1	776±14	455	558



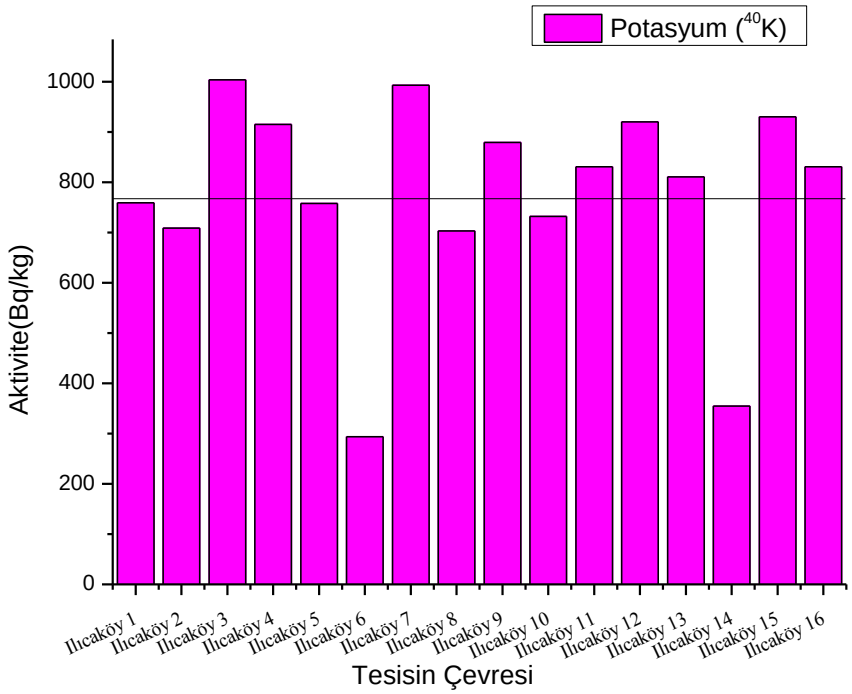
Şekil 86. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ^{238}U konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 87. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması



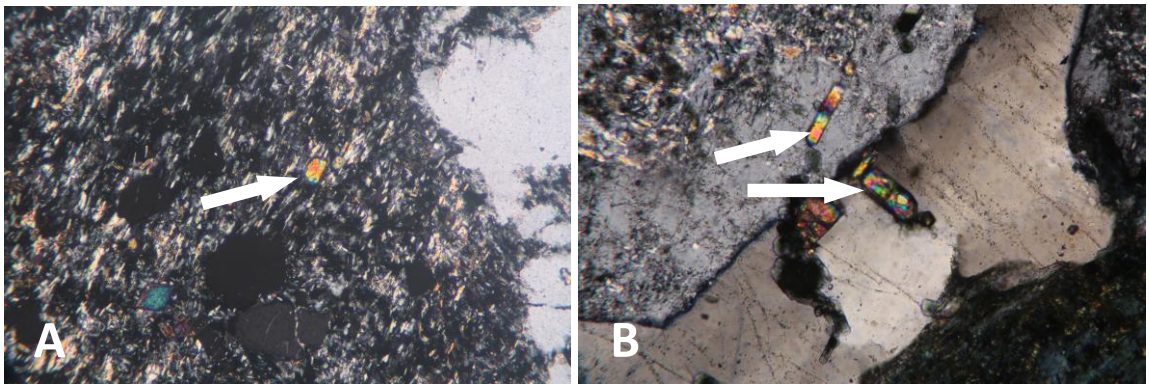
Şekil 88. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 89. Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması

3.2.2.1.1. Ilıcaköy Kayaç Örneklerinde İnce Kesit Araştırmaları

Ilıcaköy Kaplıcasında su kaynağının çevresindeki toprakta AlphaGUARD dedektörü ve HPGe dedektörü ile yapılan gama spektroskopik radyonüklid analizinde ^{238}U aktivitesinin dünya ortalamalarının çok üzerinde olması bu kaplıca çevresindeki kayaçların da jeolojik yapısının araştırılmasına neden olmuştur. Bu nedenle yapılan mikroskobik incekesit çalışmalarında kesitlerde bol miktarda zirkona ($ZrSiO_4$) rastlanmıştır. Zirkon bünyesinde radyoaktif uranyum bulunduran bir mineraldir. Şekil 90 incelenen kayaç örneklerinde gözlenen zirkonu göstermektedir.



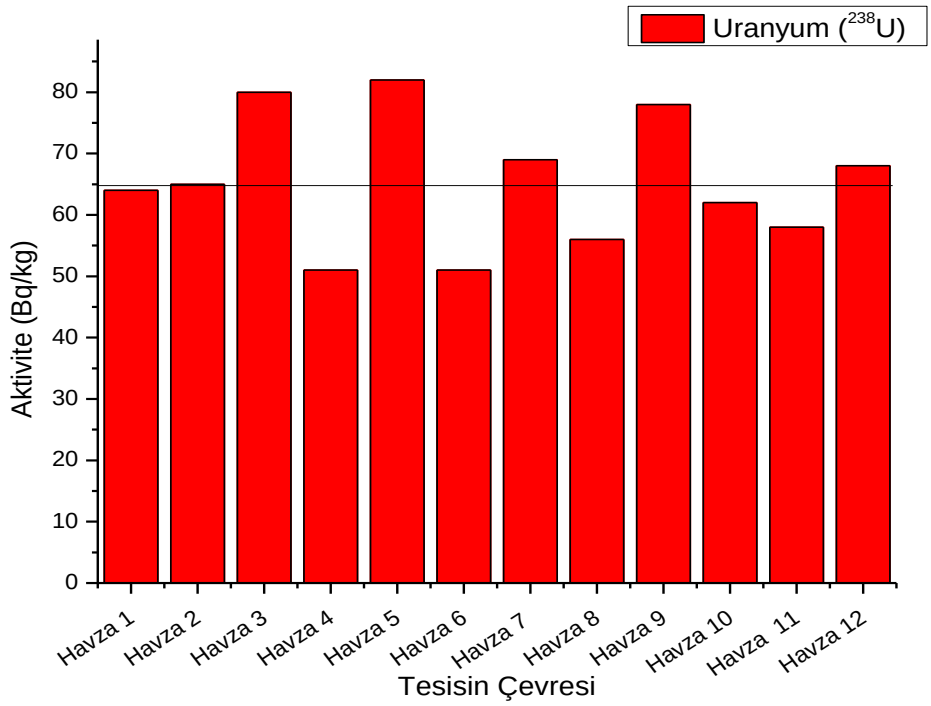
Şekil 90. Ilıcaköy Kaplıcası Kayaç örneklerinde tespit edilen zirkon.

3.2.2.2. Havza ve Ladik Kaplıcası Toprak Örneklerinin Radyoaktivite Seviyeleri ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

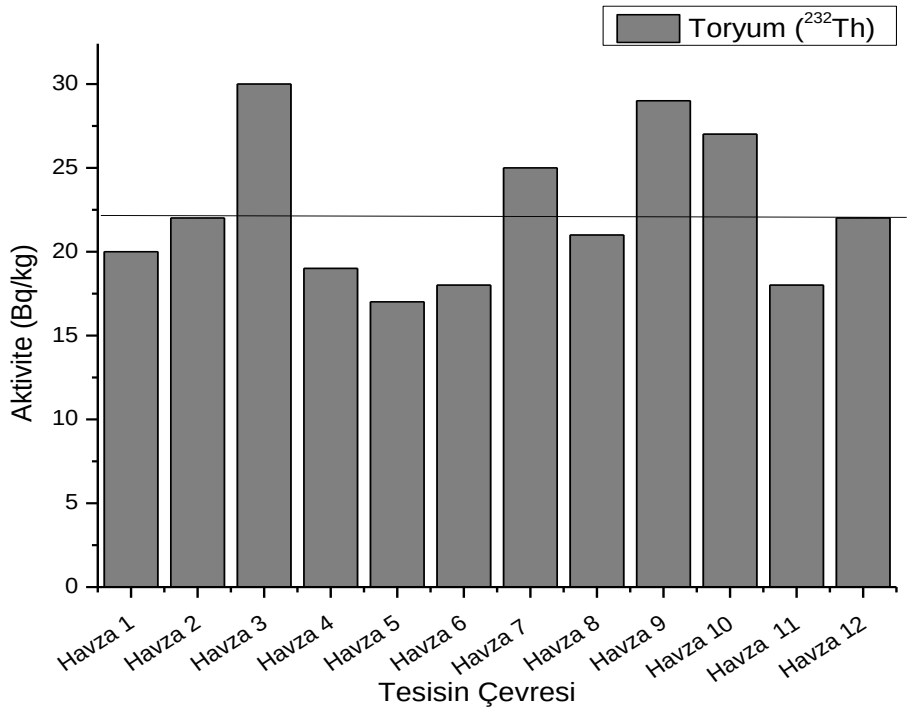
Gama spektroskopik analizi için Samsun ili Havza Kaplıcası çevresinden alınan toprak numunelerindeki ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K doğal radyoaktif elementleri ile ^{137}Cs yapay radyoaktif elementinin aktiviteleri Tablo 24'de verilmektedir. Toprak numunelerinin ortalama ^{238}U aktivitesi 65±2 Bq/kg olarak hesaplanmış ve en düşük aktivite değeri 51±6 Bq/kg, en yüksek aktivite değeri ise 80±9 Bq/kg olarak bulunmuştur. Ortalama ^{232}Th aktivitesi 22±1,2 Bq/kg olup minimum değeri 17±4 Bq/kg, maksimum değeri ise 30±6 Bq/kg dır. Ortalama ^{40}K aktivitesi 669±3 Bq/kg olup minimum değeri 598±29 Bq/kg, maksimum değeri ise 764±40 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Alınan toprak numunelerinde ^{137}Cs yapay radyoaktif elementine rastlanmış ve ortalama değeri 5±0,5 Bq/kg olup minimum değeri 2±1 Bq/kg maksimum değeri ise10±2 Bq/kg olarak bulunmuştur. Şekil 91-92-93 ve 94'de, Havza Kaplıcası için ^{238}U, ^{232}Th, ^{137}Cs ve ^{40}K aktiviteleri grafikler halinde verilmiştir. Havza Kaplıcası topraklarında ^{238}U ve ^{40}K seviyesi dünya ortalamasından fazladır.

Tablo 24. Havza Kaplıcası topraklarındaki radyonüklit konsantrasyonları

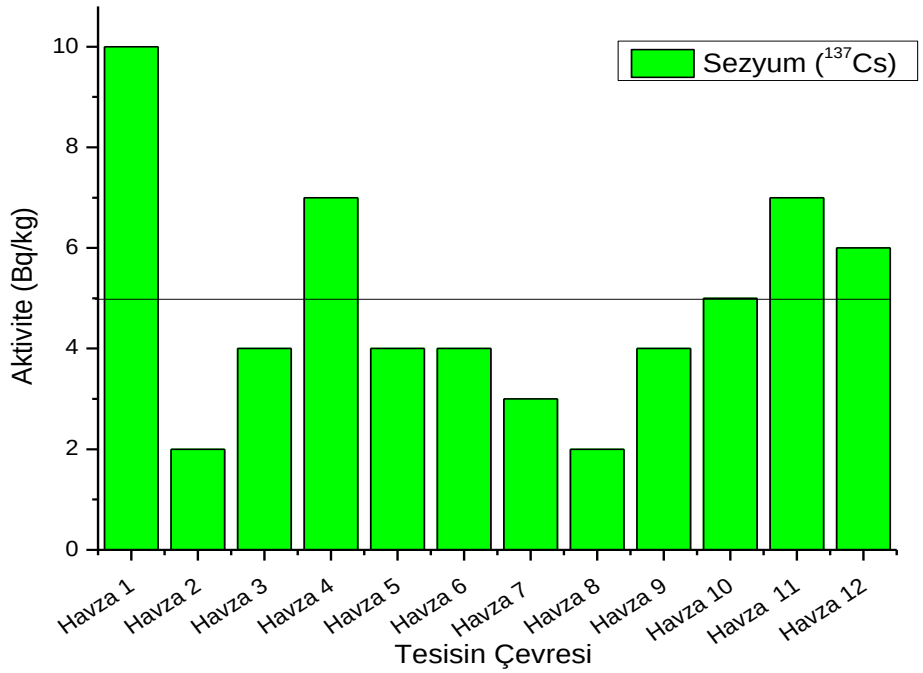
Numune adı	^{238}U	^{232}Th	^{137}Cs	^{40}K	D	AEDE
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(nGy/s)	(μSv/y)
Havza 1	64±4	20±5	10±2	648±34	69	85
Havza 2	65±5	22±6	2±1	696±35	72	88
Havza 3	80±9	30±6	4±1	764±40	87	107
Havza 4	51±6	19±4	7±2	648±34	61,5	75
Havza 5	82±9	17±4	4±1	670±35	76	93
Havza 6	51±6	18±4	4±1	672±35	62,5	77
Havza 7	69±6	25±7	3±1	700±36	76	93
Havza 8	56±5	21±6	2±1	615±32	65	79
Havza 9	78±8	29±7	4±1	598±29	78	96
Havza 10	62±5	27±6	5±2	679±34	73	90
Havza 11	58±5	18±4	7±2	618±31	64	78
Havza 12	68±9	22±7	6±2	725±36	74	91
Ortalama	65±2	22±1,2	5±0,5	669±3	72	88



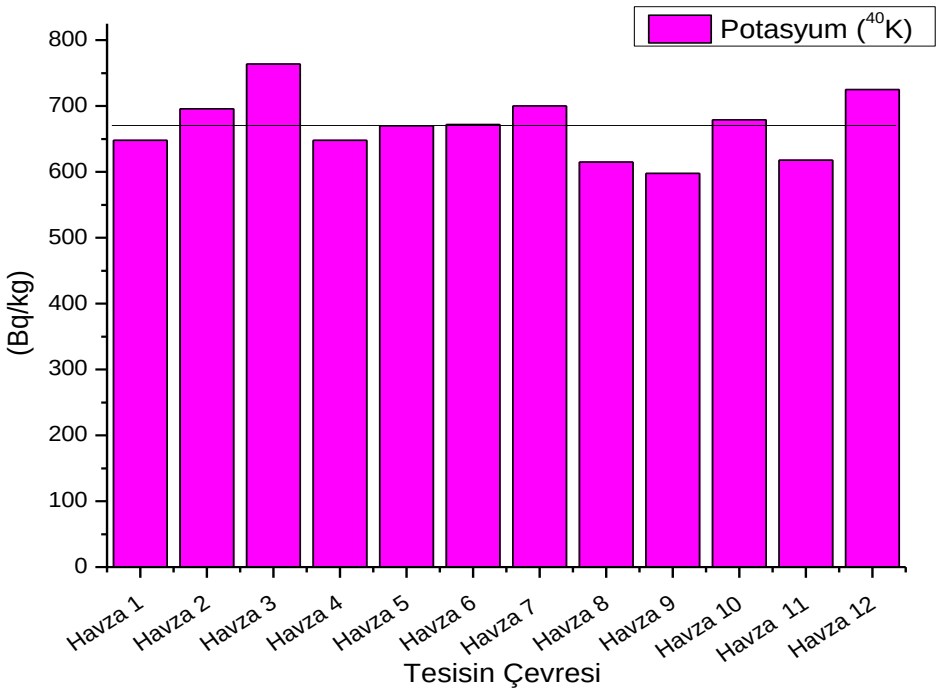
Şekil 91. Havza Kaplıcası topraklarında ^{238}U konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 92. Havza Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 93. Havza Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması

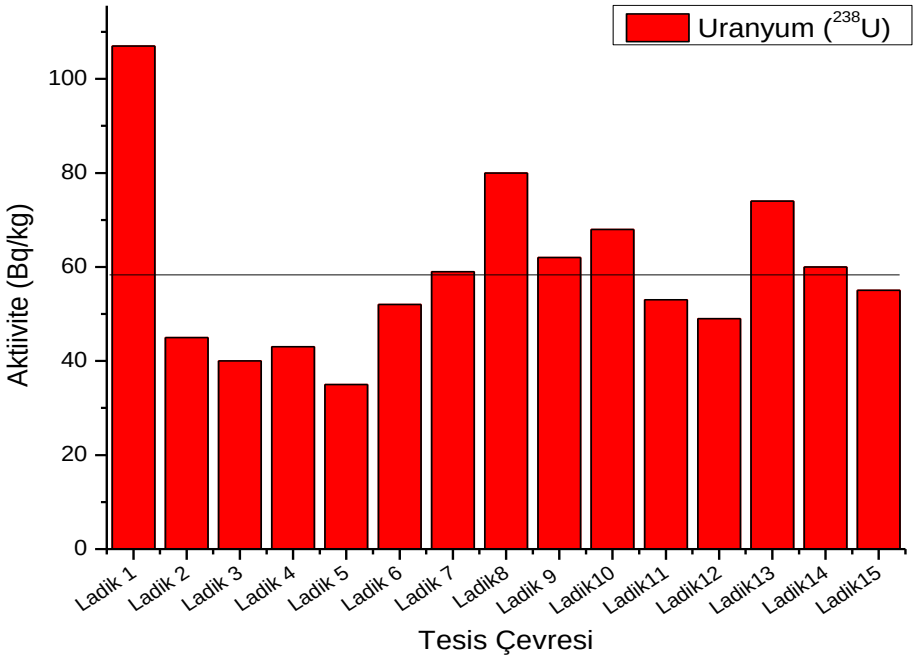


Şekil 94. Havza Kaplıcası topraklarında ^{40}K konsantrasyonlarının karşılaştırılması

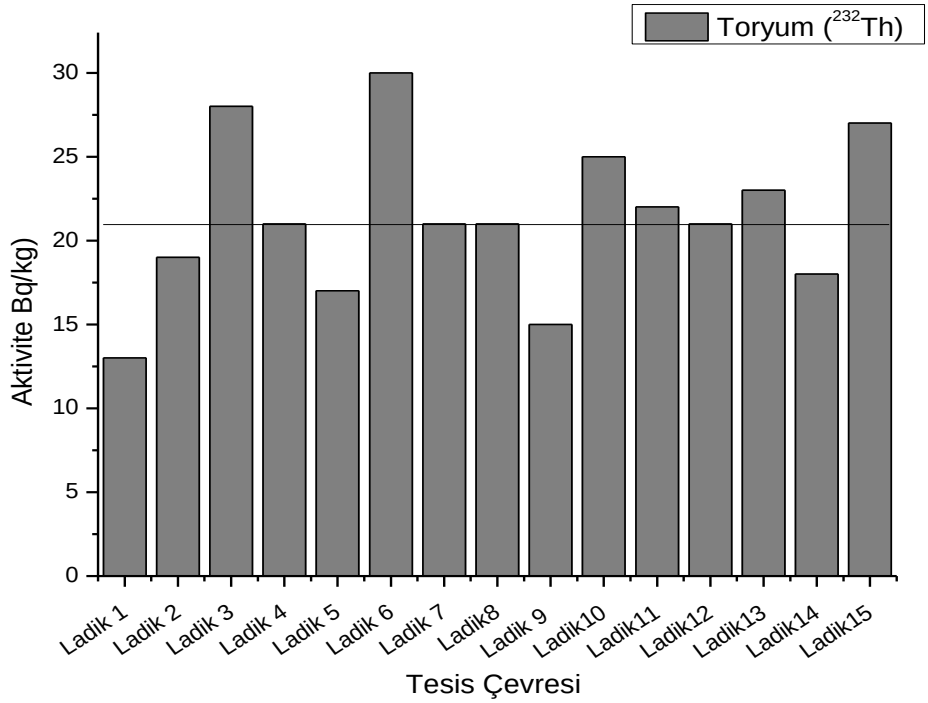
Gama spektroskopik analizi için Samsun ili Ladik Kaplıcası çevresinden alınan toprak numunelerindeki ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K doğal radyoaktif elementleri ile ^{137}Cs yapay radyoaktif elementinin aktiviteleri Tablo 25'de verilmiştir. Burada Ladik kaplıcası Şekil 26' daki jeolojik haritadan da görüldüğü gibi Kuzey Anadolu Fay hattına çok yakındır. Bu yüzden fay hattı boyunca 12 toprak numunesi alınarak^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K ve yapay ^{137}Cs radyonüklit aktiviteleri tespit edilmiştir. Toprak numunelerinin ortalama ^{238}U aktivitesi 57±1,3 Bq/kg olarak hesaplanmış ve en düşük aktivite değeri 35±4 Bq/kg, en yüksek aktivite değeri ise 107±6 Bq/kg olarak bulunmuştur. Ortalama ^{232}Th aktivitesi 21±1,5 Bq/kg olup minimum değeri 13±5 Bq/kg, maksimum değeri ise 30±5 Bq/kg dır. Ortalama ^{40}K aktivitesi 663±5,6 Bq/kg olup minimum değeri 582±33 Bq/kg, maksimum değeri ise752±41 Bq/kg olarak hesaplanmıştır. Alınan toprak numunelerinde ^{137}Cs yapay radyoaktif elementine rastlanmış ve ortalama değeri 6±0,5 Bq/kg olup minimum değeri 2±1 Bq/kg maksimum değeri ise 13±2 Bq/kg olarak bulunmuştur. Şekil 95-96-97 ve 98'de, Ladik Kaplıcası için ^{238}U, ^{232}Th, ^{137}Cs ve ^{40}K aktiviteleri grafikler halinde verilmiştir. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{238}U ve ^{40}K aktiviteleri dünya ortalamasının üzerindedir.

Tablo 25. Ladik kaplıcası topraklarındaki radyonüklit konsantrasyonları

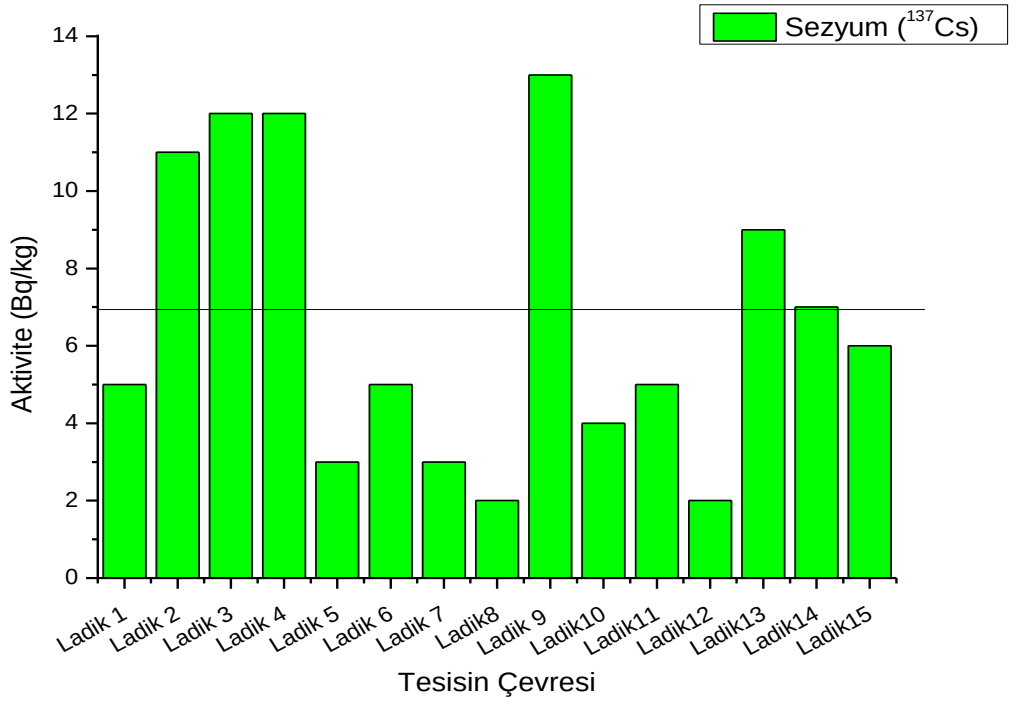
Numune adı	^{238}U	^{232}Th	^{137}Cs	^{40}K	D	AEDE
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(nGy/s)	(μSv/y)
Ladik 1	107±6	13±**5**	5±1	582±33	82	101
Ladik 2	45±5	19±4	11±2	649±37	59	72
Ladik 3	40±4	28±5	12±2	758±48	67	82
Ladik 4	43±5	21±5	12±2	720±41	62	76
Ladik 5	35±4	17±4	3±1	705±35	56	69
Ladik 6	52±5	30±5	5±2	771±44	74	91
Ladik 7	59±5	21±6	3±1	752±41	71	87
Ladik8	80±5	21±5	2±2	658±37	77	94
Ladik 9	62±5	15±6	13±2	606±35	63	77
Ladik10	68±5	25±6	4±1	702±40	75	92
Ladik11	53±5	22±6	5±1	652±38	65	80
Ladik12	49±5	21±6	2±1	712±36	66	81
Ladik13	74±5	23±6	9±2	643±34	74	91
Ladik14	60±5	18±4	7±2	625±35	65	80
Ladik15	55±4	27±5	6±1	715±36	71	87
Fay Hattı 1	42±10	24±5	8±2	618±40	59	72
Fay Hattı 2	36±4	23±3	4±2	638±31	58	71
Fay Hattı 3	85±5	20±4	8±2	586±30	75	92
Fay Hattı 4	88±5	17±4	11±1,5	637±31	85	104
Fay Hattı 5	66±5	17±7	4±2	587±33	65	80
Fay Hattı 6	54±5	17±9	5±1	656±33	62	76
Fay Hattı 7	70±6	26±5	6,5±2	636±30	76	93
Fay Hattı 8	39±2	18±4	4±1	655±33	56	67
Fay Hattı 9	38±4	16±4,5	6±2	691±20	57	70
Fay Hattı 10	55±6	22±10	5±2	656±44	65	80
Fay Hattı 11	38±6	23±6	8±2	683±35	60	74
Fay Hattı 12	36±6	15±4	6±2	605±30	51	62
Ortalama	57±1	21±2	6±1	663±6	66,5	81,5



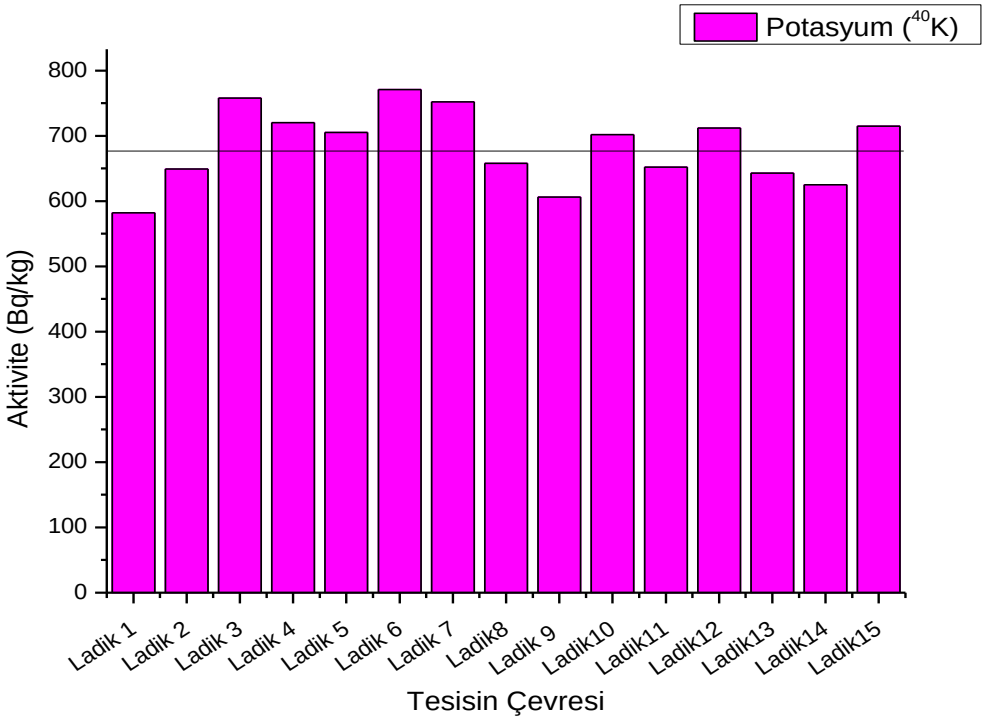
Şekil 95. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{238}U konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 96. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{232}Th konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 97. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{137}Cs konsantrasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 98. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{40}K konsantrasyonlarının karşılaştırılması

3.2.3. Kaplıca Sularında Radyonüklid Konsantrasyonları

Kaplıca sularından alınan örneklerin yapılan gama spektrometrik analizleri sonucunda, bulunan radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları belirlenmiş olup sonuçlar Tablo 26'da verilmiştir.

Tablo 26. Kaplıca Sularındaki Radyonüklit Konsantrasyonları

Numune adı	^{238}U	^{232}Th	^{137}Cs	^{40}K
	(mBq/ L)	(mBq/ L)	(mBq/L)	(mBq/ L)
A1	325±43	100±30	20±12	4346±322
I1	11000±123	1170±69	190±20	8400±324
I4	3857±81	477±48	58±14	4277±321
H1	179±32	100±38	15±11	4030±309
L1	3215±36	1700±30	50±16	4266±32

Tablo 27'de görüldüğü gibi suyunda ^{238}U, ^{40}K, ^{137}Cs konsantrasyonu en düşük olan kaplıca Havza Kaplıcası, ^{232}Th değeri en düşük olan kaplıca Havza ve Ayder Kaplıcalarıdır. En yüksek ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K, ^{137}Cs konsantrasyonuna sahip olan kaplıca ise Ilıcaköy Kaplıcasıdır.

3.2.4. Kaplıca Sularında Toplam Alfa ve Toplam Beta Radyoaktiflik Ölçümleri

Berthold marka LB770 model 10 kanallı düşük seviyeli alfa-beta sayım cihazı ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler Tablo 27'de verilmiştir.

Tablo 27. Kaplıca sularındaki toplam alfa ve toplam beta konsantrasyonları

Kaplıca	Toplam Alfa Bq/L	Toplam Beta Bq/L
A1 (Ocak)	0,055 ±0,009	0,135±0,011
H1(Ocak)	0,104±0,013	0,473±0,028
L1(Ocak)	0,230±0,032	0,317±0,020
I1(Ocak)	93±0,355	47±0,696
I1(Mayıs)	45±1	24±1
I1(Kasım)	63±7	37±3
I1 (Ort.)	67±4	36±1

WHO (Dünya Sağlık Örgütü) tarafından içme suları için belirlenmiş limit değerler toplam alfa ve beta aktiflikleri için sırasıyla 500 mBq/L ve 1000 mBq/L'dir. Ilıcaköy Kaplıcasında ölçülen değerler bu limit değerlerin çok üzerindedir. Fakat bu kaplıca suyu içme suyu olarak kullanılmamaktadır. Ayrıca Ilıcaköy kaplıcasında toplam alfa ve toplam beta değerlerinin yüksek çıkması nedeni ile bu kaplıcada üç ölçüm yapılmıştır. Tablo 27' de görüldüğü gibi bu sonuçların üçü de sınır değerlerden yüksek fakat birbirinden farklı değerlerdedir. Bunun nedeni soğutma amaçlı içine katılan çeşme suyunun oranının değişmesidir. Ayder ve Ladik Kaplıcalarında ise kaplıca suyu içme suyu olarak kaplıca personeli ve yerel halk tarafından kullanılmaktadır. Bu kaplıca toplam alfa ve beta aktiflikleri limit değerlerden oldukça aşağıdadır. Havza Kaplıcasında ise değerler limit değerlerin oldukça altındadır.

3.2.5. Kaplıca Ortamında Ölçülen Gama Dozları

NaI (Inspector 1000) portatif gama dedektörü ile ölçülen gama dozu değerleri aşağıda Tablo 28-29-30 ve 31'de verilmiştir.

Tablo 28 incelendiğinde Ayder Kaplıcası A1, A2 ve A3 ortamı için gama dozu değerleri görülmektedir. A1 ortamı için gama dozu değeri 0,0065 mrem/h, A2 ortamı için 0,0066 mrem/h, soyunma odası için 0,0077 mrem/h değerleri ölçülmüştür. En yüksek değerin soyunma odasında ölçüldüğü görülmektedir.

Tablo 28. Ayder Kaplıcası gama dozu değerleri

Aylar	A1 (mrem/h)	A2 (mrem/h)	A3 (mrem/h)
Ağustos	0,0061	0,007	0,008
Eylül	0,0059	0,0065	0,0072
Ekim	0,0068	0,0069	0,008
Kasım	0,0069	0,0064	0,0075
Aralık	0,0071	0,0056	0,0076
Ocak	0,0068	0,0072	0,0069
Mart	0,0082	0,0075	0,0075
Nisan	0,0063	0,0066	0,0085
Mayıs	0,0066	0,0071	0,0067
Haziran	0,0055	0,0061	0,0082
Temmuz	0,0055	0,0061	0,0082
Ortalama	0,0065	0,0066	0,0077

Tablo 29 incelendiğinde Ilıcaköy Kaplıcası I1, I2, I3, I4, I5 bölümleri için gama dozu değerleri görülmektedir. I1 ortamı için gama dozu değeri 0,018 mrem/h, I2 ortamı için 0,01 mrem/h, I3 ortamı için 0,0095 mrem/h, I4 ortamı için 0,017 mrem/h ve I5 ortamı için 0,011 mrem/h değerleri ölçülmüştür. En yüksek değerin I1 ortamında ölçüldüğü görülmektedir.

Tablo 29. Ilıcaköy Kaplıcası gama dozu değerleri

Aylar	I1 (mrem/h)	I2 (mrem/h)	I3 (mrem/h)	I4 (mrem/h)	I5 (mrem/h)
Ağustos	0,02	0,007	0,0059	0,013	0,008
Eylül	0,023	0,0085	0,0075	0,015	0,011
Ekim	0,013	0,011	0,009	0,018	0,011
Kasım	0,016	0,0099	0,0097	0,02	0,009
Aralık	0,015	0,0091	0,0093	0,021	0,013
Ocak	0,017	0,011	0,01	0,016	0,01
Mart	0,021	0,0087	0,0094	0,014	0,012
Nisan	0,023	0,012	0,011	0,018	0,0095
Mayıs	0,016	0,015	0,0099	0,015	0,015
Haziran	0,013	0,0096	0,014	0,02	0,014
Temmuz	0,021	0,013	0,0088	0,023	0,0089
Ortalama	0,018	0,01	0,0095	0,017	0,011

Tablo 30 incelendiğinde Havza Kaplıcası H1, H2 ve H3 ortamları için gama dozu değerleri görülmektedir. H1 ortamı için gama dozu değeri 0,0064 mrem/h, H2 ortamı için 0,0056 mrem/h, H3 ortamı için 0,0049 mrem/h değerleri ölçülmüştür. En yüksek değerin H1 kısmında ölçüldüğü görülmektedir.

Tablo 30. Havza Kaplıcası gama dozu değerleri

Aylar	H1 (mrem/h)	H2 (mrem/h)	H3 (mrem/h)
Ağustos	0,0045	0,0045	0,0057
Eylül	0,0053	0,0036	0,0051
Ekim	0,0049	0,0034	0,0042
Kasım	0,0059	0,0041	0,0062
Aralık	0,0062	0,0051	0,006
Ocak	0,0064	0,0065	0,0058
Mart	0,0065	0,0034	0,006
Nisan	0,0055	0,0065	0,0062
Mayıs	0,0058	0,0055	0,0065
Haziran	0,0064	0,0049	0,0051
Temmuz	0,0061	0,0056	0,0049
Ortalama	0,006	0,0048	0,0056

Tablo 31 incelendiğinde Ladik Kaplıcası L1, L2 ve L3 ortamları için gama dozu değerleri görülmektedir. L1 ortamı için gama dozu değeri 0,0064 mrem/h, L2 ortamı için 0,0056 mrem/h, L3 ortamı için 0,0049 mrem/h değerleri ölçülmüştür. En yüksek değerin L1 kısmında ölçüldüğü görülmektedir.

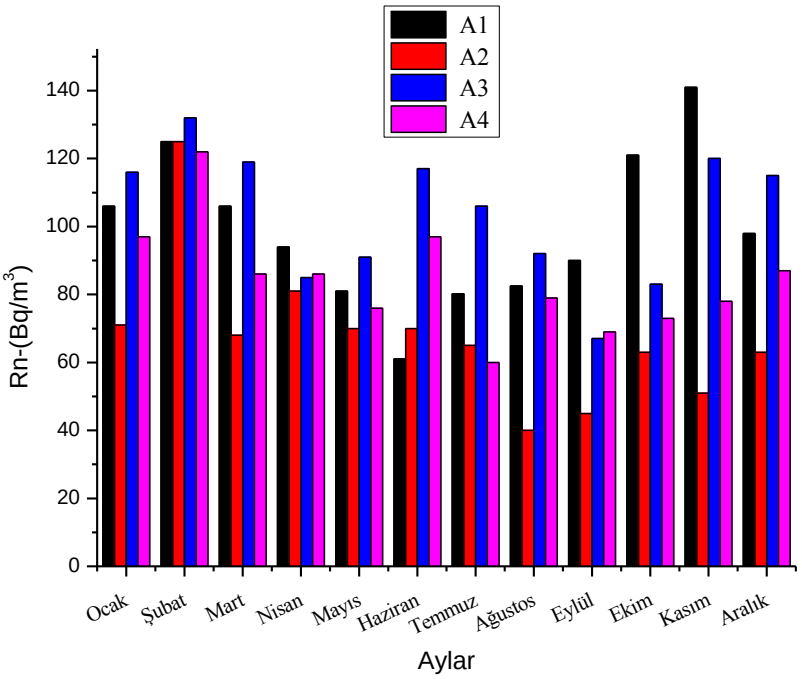
Tablo 31. Ladik Kaplıcası gama dozu değerleri

Aylar	L1 (mrem/h)	L2 (mrem/h)	L3 (mrem/h)
Ağustos	0,002	0,006	0,005
Eylül	0,0028	0,005	0,006
Ekim	0,0036	0,0075	0,0045
Kasım	0,004	0,0058	0,0055
Aralık	0,0032	0,0055	0,004
Ocak	0,0045	0,0048	0,0058
Mart	0,0041	0,0033	0,0025
Nisan	0,0032	0,0043	0,006
Mayıs	0,0037	0,006	0,0062
Haziran	0,0025	0,0073	0,0039
Temmuz	0,0035	0,0068	0,0054
Ortalama	0,0034	0,006	0,005

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

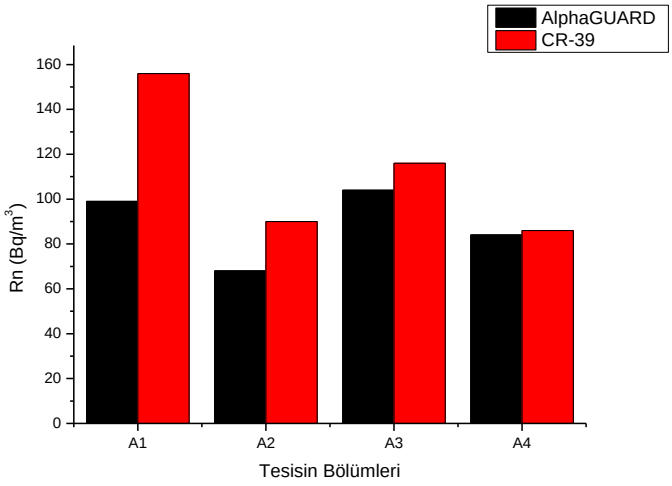
Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Rize ve Samsun illerindeki Ayder, Ilıcaköy, Havza, Ladik Kaplıcalarında kaplıca havasında aylık ve mevsimlik olarak sistematik radon gazı değişimi AlphaGUARD radon dedektörü ile kaplıca sularında ve kaplıca çevresindeki topraklarda radon gazı seviyesi belirlenmiştir. Kaplıca personelinin ve hastaların hem havadaki radondan hem de içme suyu olarak kullanılan su içindeki radondan dolayı maruz kaldıkları yıllık ortalama etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca kaplıca havasındaki radon ölçümleri bir yıl boyunca pasif algılayıcılar olan CR-39 dedektörleri kullanılarak ölçülmüş, sonuçlar kullanılarak ölçülen sonuçlardan yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar AlphaGUARD PQ 2000PRO aktif dedektör ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kaplıcalar çevresindeki toprakta ve kaplıca sularında doğal ve yapay radyonüklitlerin aktiviteleri belirlenmiş ve insanların topraktaki doğal radyonüklitlerden dolayı maruz kaldıkları yıllık ortalama etkin doz değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca kaplıca içi ve dışı soğurulan gama doz ölçümleri portatif çevresel ölçüm cihazı NaI dedektörü kullanılarak ölçülmüştür. Tüm elde edilen bu değerler hem ülkemizde hem de dünyada yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılarak, uluslararası kuruluşlar tarafından izin verilebilir seviyelerde olup olmadıkları tartışılmıştır. Kaplıca sularının kimyasal analizleri yapılmış ve toplam alfa toplam, beta değerleri belirlenip yine yapılmış diğer çalışmalar ve uluslar arası standartlar ile karşılaştırılmıştır.

Ayder kaplıcası için havada 1 yıllık aktif AlphaGUARD cihazı ile yapılan ölçümler incelendiğinde A1, A2, A3 ve A4 ortamları için ortalama radon gazı seviyeleri sırası ile 99±4,4 Bq/m^3, 68±4 Bq/m^3, 104±4,2 Bq/m^3 84±3 Bq/m^3 ölçülmüştür. Kaplıcada en yüksek radon gazı değeri sonbahar ve kış mevsiminde, en düşük radon gazı seviyesi yaz mevsiminde ölçülmüştür. Şekil 99 incelediğinde kaplıcanın ölçüm yapılan tüm bölümlerinde ortalama radon gazı seviyesinin 400 Bq/m^3 değerinden az olduğu görülmektedir. Dolayısı ile bu kaplıca için ölçülen radon gazı seviyesinin limit değerlerin altında olduğu görülmektedir.



Şekil 99. Ayder Kaplıcası A1, A2, A3, A4 ortamlarında aylık olarak ölçülen ortalama radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması

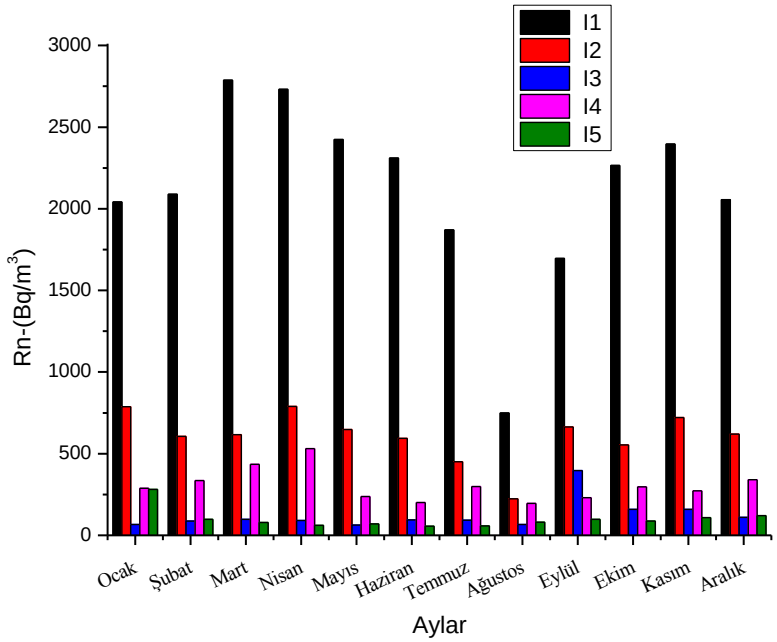
Ayder Kaplıcasında aktif ölçüm yapan AlphaGUARD radon dedektörü ölçüm sonuçları ile pasif ölçüm yapan CR-39 radon dedektörü ölçüm sonuçları Şekil 100'de karşılaştırılmıştır. Buna göre bu kaplıcada pasif dedektör ile alınan sonuçlar aktif ölçüm sonuçlarına göre daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 100. Ayder Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

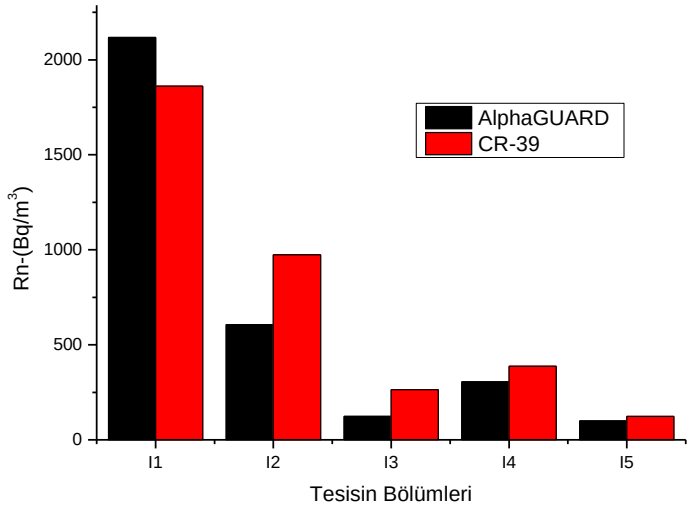
Ilıcaköy kaplıcası için 1 yıllık aktif AlphaGUARD cihazı ile yapılan ölçümler incelendiğinde I1, I2, I3, I4, I5 için ortalama radon gazı seviyeleri sırası ile 2118±31 Bq/m^3, 606±26,5 Bq/m^3, 124±16 Bq/m^3, 305±14 Bq/m^3, 100±16 Bq/m^3 ölçülmüştür. Kaplıcada en yüksek radon gazı değeri kış mevsiminde, en düşük radon gazı seviyesi yaz mevsiminde ölçülmüştür.

Ilıcaköy Kaplıcası için AlphaGUARD ile tesisin çeşitli bölümlerinde ölçülen ortalama radon gazı değerlerinin karşılaştırılması Şekil 101'de verilmiştir. En yüksek ortalama radon gazı değerinin I1 ortamında, en düşük ortalama radon gazı değerinin I5 ortamında ölçüldüğü görülmektedir. Aynı tesisin iki ayrı havuzunda çok farklı radon gazı değerlerinin çıktığı görülmektedir. Bu kaplıcada suyun çıkış sıcaklığı 80 ^{0}C dir. Havuzlara soğutma amaçlı çeşme suyu karıştırıldığı tesis çalışanları tarafından söylenmektedir. Havuzlara katılan çeşme suyunun oranları farklı olabilmektedir. Ayrıca Ilıcaköy Kaplıcası I1 ortamı zemin katın bir alt katındadır. I4 ortamı ise farklı bir binanın zemin katındadır. I1 ortamında radon gazı seviyesinin daha fazla olması bu havuzun zemin kat seviyesinin altında olmasından kaynaklandığını düşündürmektedir.



Şekil 101. Ilıcaköy Kaplıcası I1, I2, I3, I4 ve I5 ortamlarında ölçülen radon gazı seviyelerinin ortalama değerlerinin karşılaştırılması.

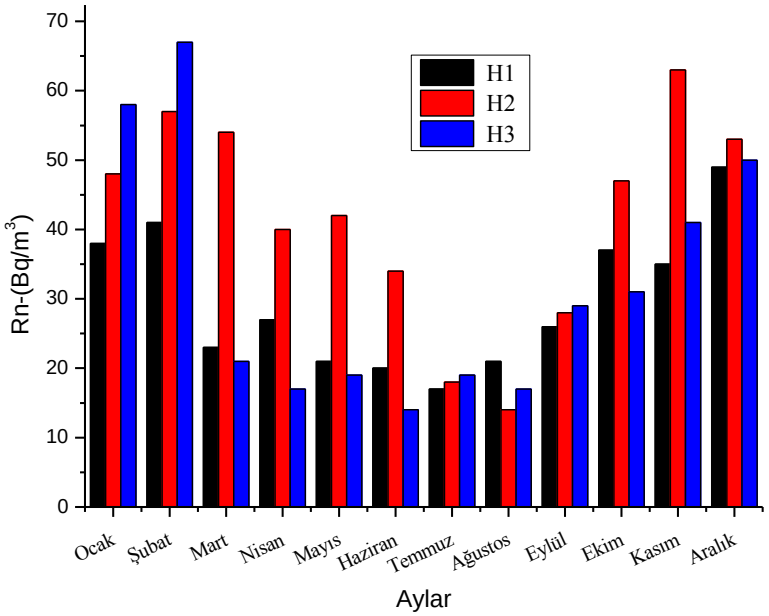
Ilıcaköy Kaplıcasında aktif ölçüm yapan AlphaGUARD radon dedektörü ölçüm sonuçları ile pasif ölçüm yapan CR-39 radon dedektörü ölçüm sonuçları Şekil 102'de karşılaştırılmıştır. Buna göre bu kaplıcada pasif dedektör ile alınan sonuçlar sadece I1 ortamı hariç aktif ölçüm sonuçlarına göre daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 102. Ilıcaköy Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Ilıcaköy kaplıcası I1 ve I2 ortamları zemin katının bir alt katındadır. Burada sürekli çalışan personel bulunmaktadır. İş yerleri için tavsiye edilen radon seviyesi zemin kat ve üstü için 400 Bq/m^3 zemin kat altı için 400-1500 Bq/m^3 tür (ICRP, 2007). Yapılan aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarına göre Ilıcaköy kaplıcası I1 ortamında belirlenen radon seviyesi sınır değerin biraz üzerindedir.

Havza kaplıcası için 1 yıllık aktif AlphaGUARD radon cihazı ile yapılan ölçümler incelendiğinde H1, H2, H3 ortamları için ortalama radon gazı seviyeleri sırası ile 30±2 Bq/m^3, 42±3 Bq/m^3, 104±4,2 Bq/m^3, 32±3 Bq/m^3 ölçülmüştür. Kaplıcada en yüksek radon gazı değeri kış mevsiminde, en düşük radon gazı seviyesi yaz mevsiminde ölçülmüştür. Şekil 103 incelendiğinde bu kaplıcanın ölçüm yapılan tüm bölümlerinde ortalama radon konsantrasyonunun 75 Bq/m^3 değerinin altında olduğu görülmektedir.

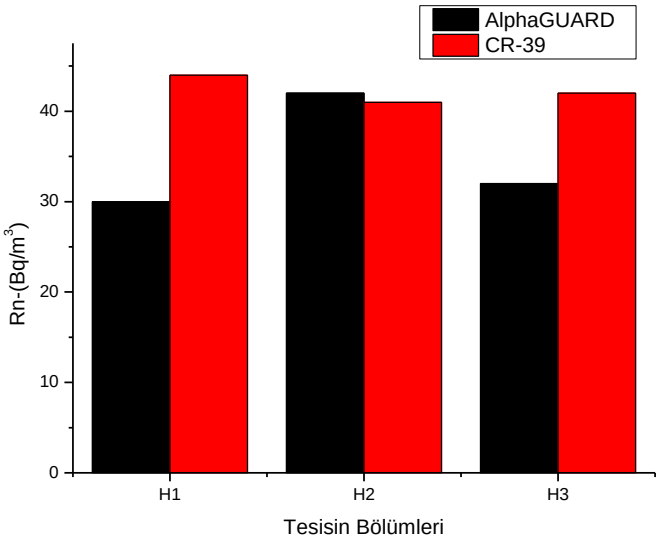


Şekil 103. Havza Kaplıcası H1, H2, H3 kısmında aylık olarak ölçülen ortalama radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması

Kaplıcanın ölçüm yapılan tüm bölümlerinde ortalama radon gazı seviyesinin 400 Bq/m^3 değerinden az olduğu yani bu kaplıca için radon gazı seviyesi limit değerlerin altında olduğu görülmektedir. Hatta incelenen dört kaplıca içinde en düşük radon gazı seviyesi bu kaplıcada ölçülmüştür.

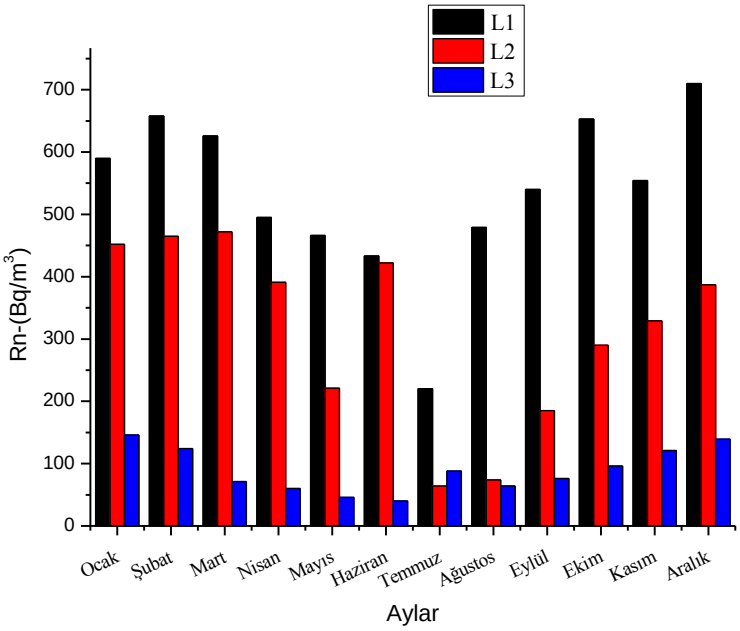
Havza Kaplıcasında aktif ölçüm yapan AlphaGUARD radon dedektörü ölçüm sonuçları ile pasif ölçüm yapan CR-39 radon dedektörü ölçüm sonuçları Şekil 104'de karşılaştırılmıştır.

Havza Kaplıcası için ölçüm yapılan değerler aktif ve pasif ölçüm sonuçları için hemen hemen birbiri ile örtüşmektedir. Ayrıca bu kaplıcanın her bölümü için ölçülen değerler 400 Bq/m^3 değerinden oldukça düşüktür.



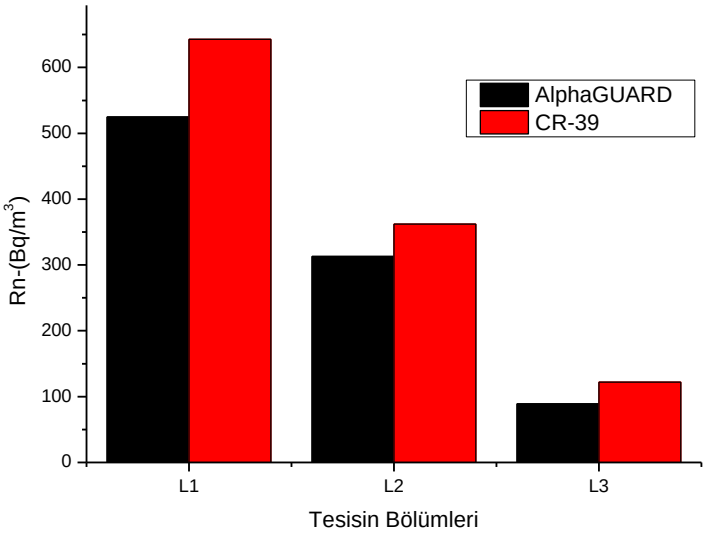
Şekil 104. Havza Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Ladik kaplıcası için 1 yıllık aktif AlphaGUARD cihazı ile yapılan ölçümler incelendiğinde L1, L2, L3 için ortalama radon gazı seviyeleri sırası ile 525±23 Bq/m^3, 313±15 Bq/m^3, 89±8 Bq/m^3 ölçülmüştür. Şekil 105 incelendiğinde Kaplıcada en yüksek radon gazı değeri aralık, en düşük radon gazı değeri temmuz ayında ölçülmüştür. Bu kaplıca yaz mevsiminde oldukça kalabalık olmaktadır. Giren çıkan kişilerin fazla olması nedeni ile sürekli kapı açılmaktadır. Bu durumda ortamda radon gazı seviyesi düşmektedir.



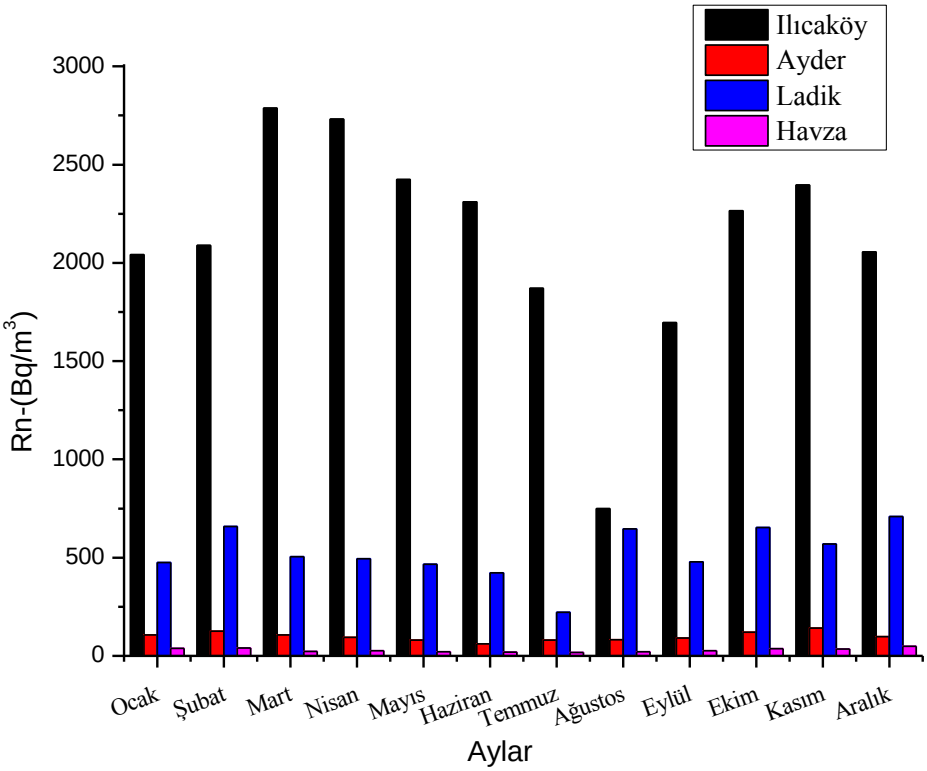
Şekil 105. Ladik Kaplıcası L1, L2, L3 kısmında aylık olarak ölçülen ortalama radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması

Ladik Kaplıcasında aktif ölçüm yapan AlphaGUARD radon dedektörü ölçüm sonuçları ile pasif ölçüm yapan CR-39 radon dedektörü ölçüm sonuçları Şekil 106'da karşılaştırılmıştır. Ladik havuz kısmında ve diğer kısımlarda pasif ölçüm sonuçlarının aktif ölçüm sonuçlarından daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 106. Ladik Kaplıcası için aynı dönemde ölçülen aktif ve pasif radon gazı ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 107'de dört kaplıcanın A1, I1, H1, L1 ortamlarında bir yıllık her ay olarak aktif ölçüm cihazı olan AlphaGUARD radon dedektörü ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması verilmektedir. Radon gazı seviyesi büyükten küçüğe doğru Ilıcaköy, Ladik, Ayder, Havza Kaplıcası olarak sıralanır.

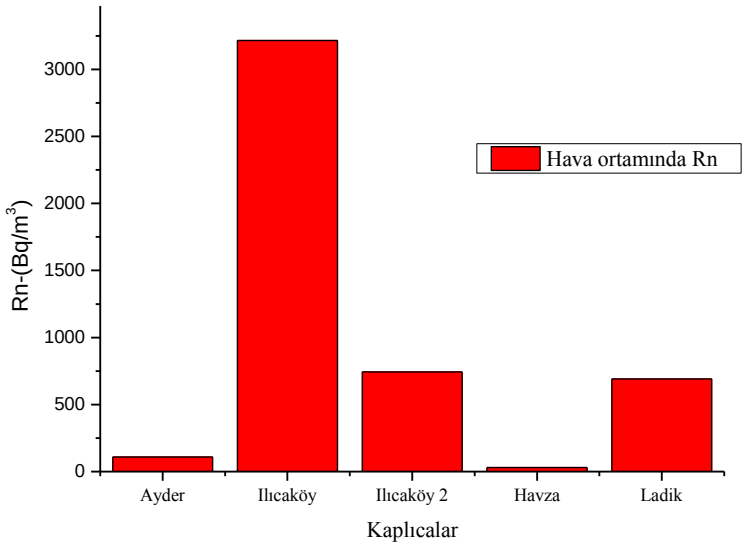


Şekil 107. Çalışma kapsamındaki 4 kaplıcanın A1, I1, H1, L1 ortamlarında ölçülen radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması

Ayder ve Havza Kaplıcası için hava ortamında ölçülen radon gazı seviyesi sınır değerlerin altındadır. Ladik Kaplıcası için L1 ortamı için ICRP'nin belirlediği sınırın biraz üzerinde (400 Bq/m^3), tesisin ölçüm yapılan diğer bölmelerinde sınır değerler arasındadır.

AlphaGUARD cihazı ile aylık olarak yapılan ölçümler bittikten sonra, kaplıca havasında, suyunda eş zamanlı olarak mevsimlik radon gazı ölçümleri yapılmış ve son olarakta kaplıca çevresindeki topraklarda radon gazı seviyesi ölçülmüştür. Mevsimlik ölçümlerde kaplıcaların havasında radon gazı seviyesi Şekil 108'de karşılaştırılmıştır. Şekil 108'den görüldüğü gibi en düşük radon gazı seviyesi yine Havza Kaplıcasında en yüksek radon gazı seviyesi daha önce (aylık) olduğu gibi Ilıcaköy Kaplıcasında ölçülmüştür. Ilıcaköy kaplıcası için I1 ortamında aylık değerlerin ortalaması 2118±31 Bq/m^3 iken mevsimlik değerlerin I1 ortamında ortalaması 3216±55 Bq/m^3 değerine çıkmıştır. Yaklaşık

1000 Bq/m^3 lük fark ortamdaki radon gazının arttığını göstermektedir. Bu yaklaşık iki yıllık sürede havuzlara soğutma amaçlı katılan çeşme suyunun oranı azaltılmış ve havuz ortamının havalandırılması iyi yapılmamıştır.



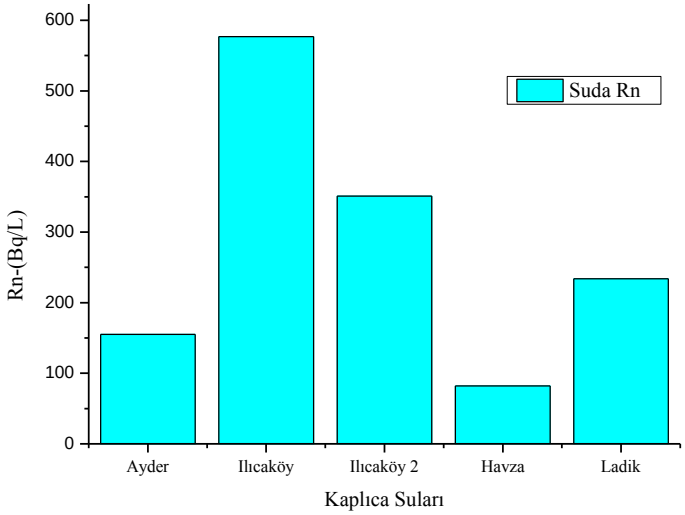
Şekil 108. Kaplıcaların hava ortamında mevsimlik olarak ölçülen radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması

Kaplıca sularındaki radon seviyeleri Şekil 109'da karşılaştırılmaktadır. Ayder Kaplıcası için suda ölçülen radon gazı seviyesi ortalama 155±23 Bq/L dir. İçme suyu için verilen sınır değer 11 Bq/L (EPA) dir.

Ilıcaköy kaplıcası suyunda ölçülen radon gazı seviyesi ise ortalama 577±5 Bq/L dir. Havuz-2 ortamında ise radon gazı seviyesi 351±3,2 Bq/L dir. Ilıcaköy kaplıcasında suyun çıkış sıcaklığı 80 ^{0}C dir. Havuzlara soğutma amaçlı olarak çeşme suyu karıştırılmakta olduğu kaplıca personeli tarafından belirtilmiştir. Ayrıca havuz zeminin bir alt katında, havuz-2 ise zemin kattadır. Sulardaki radon farkının kat farkından ve karıştırılan suyun oranından dolayı farklılık gösterdiği düşünülmektedir.

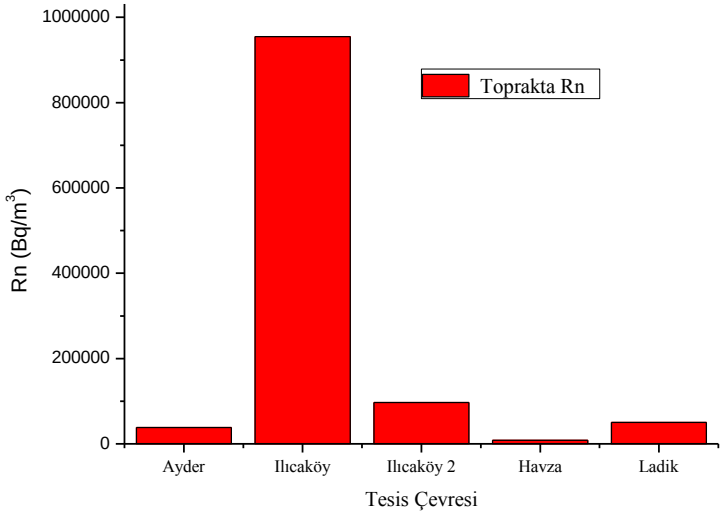
Havza Kaplıcası suyunda ölçülen radon gazı seviyesi ortalama 82±1 Bq/L dir. Bu kaplıca suyu içme suyu olarak kullanılmamaktadır.

Ladik Kaplıcası suyunda ölçülen radon gazı seviyesi ortalama 234±2 Bq/L dir. İçme suyu için verilen sınır değer 11 Bq/L (EPA) dir. Ladik kaplıcasında kaplıca suyu içme suyu olarak kaplıca personeli ve yerel halk tarafından kullanılmaktadır. Kaplıcaların geleneksel iyileştirmede kullanıldığını düşünen hastaların ve personelin fazla radyasyon dozu almalarını önlemek için kaplıca sularını içme suyu olarak kullanmamaları tavsiye edilir.



Şekil 109. Kaplıcadan alınan su örneklerinde ortalama radon konsantrasyonu değerlerinin karşılaştırılması

Kaplıca çevresi topraklarında radon seviyeleri Şekil 110'da karşılaştırılmaktadır. Toprağında en yüksek radon gazı seviyesi olan kaplıca Ilıcaköy Kaplıcası, en az radon gazı seviyesi ölçülen ise Havza Kaplıcasıdır. Ilıcaköy Kaplıcasında değerin diğer kaplıcalardan çok yüksek olduğu görülmektedir. Burada beş ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Bu değer suyun çıktığı kaynağa yakın yerde ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde kaynaktan uzaklaştıkça topraktaki radon gazı değerinin düştüğü görülmüştür. Ilıcaköy-2 ölçümü kaynaktan 1,5 km uzaklıkta ölçülmüştür.



Şekil 110. Kaplıca çevresinde toprakta ölçülen radon gazı seviyelerinin karşılaştırılması

Tablo 32'de mevsimlik olarak kaplıca ortamındaki havada, kaplıca suyunda ve kaplıca toprağında eş zamanlı ölçülen radon gazı değerleri görülmektedir. Tabloya bakıldığında havada radon oranı en yüksek olan kaplıcanın (Ilıcaköy) suyunda ve toprağında da radon gazı değeri en yüksektir. Aynı şekilde havada radon oranı en düşük olan kaplıcanın (Havza) suyunda ve toprağında da radon gazı değeri en düşüktür.

Tablo 32. Mevsimlik ölçümlerde kaplıca toprağında havasında ve suyunda ölçülen radon gazı değerleri

Kaplıca	Havada Bq/m^3	Suda Bq/L	Toprakta Bq/m^3
Ayder	108±17	155±23	38000± 200
Ilıcaköy	3216±55	577±25	955000±5000
Ilıcaköy 2	743±27	351±32	97000±800
Havza	30±6	82±9	8640± 700
Ladik	691±76	234±15	50000±2640

Tablo 33'de ülkemiz ve diğer ülkelerdeki kaplıca sularında, havasında ve çevresindeki topraklarda radon gazı konsantrasyonları karşılaştırılmıştır. Ülkemizde kaplıcalar ile ilgili ayrıntılı ve sistematik çalışmalara literatürde rastlanmamıştır. Ülkemizde yapılan çalışmalar içerisinde kaplıca hava ortamında en yüksek radon

konsantrasyonuna sahip kaplıca Ilıcaköy Kaplıcasıdır. Daha sonra Ladik Kaplıcası ikinci sırayı almaktadır. Kaplıca sularında ve kaplıca çevresindeki topraklarda ölçülen en yüksek radon gazı değeri yine Ilıcaköy Kaplıcasında ölçülmüştür.

Ülkemizde kaplıca sularında ölçülen radon gazı değerleri ile Ayder, Havza, Ladik ve Ilıcaköy Kaplıca sularında ölçülen değerler karşılaştırıldığında sırası ile Ilıcaköy, Ladik, Ayder, Havza Kaplıcaları en yüksek değerlerde ve içme suyu için izin verilen değerlerin üzerindedir.

Ülkemizde kaplıca çevresi topraklarında radon gazı ölçümü sadece Armutlu mevkiinde yapılmıştır. Ölçülen değer Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ölçülen radon gazı değerinden düşük, Ayder, Havza ve Ladik için ölçülen değerlerden yüksektir.

Diğer ülkelerde ve özellikle Avrupa ülkelerinde yapılan çalışmalarda kaplıcalarda radyoaktivite ölçümleri ile ilgili pek çok çalışmaya rastlamak mümkündür. Tablo 36' da diğer ülkeler için yapılmış olan çalışmaların sonuçları ile Ilıcaköy Kaplıcası sonuçları kıyaslandığında, hava ortamında ölçülen radon gazı aktivite konsantrasyonlarının, Kuzey Venezuella, İspanya, Sırbistan (Niška Banja) bölgesi hariç, diğer tüm çalışmalardan daha yüksek değerde olduğu belirlenmiştir. Havza Kaplıcası hava ortamında ölçülen radon gazı aktivite konsantrasyonu sonuçlarının kaplıcalar arasında en düşük değere sahip olduğu görülmektedir.

Diğer ülkelerin kaplıca sularında ölçülen radon gazı değerleri ile Ayder, Havza, Ladik ve Ilıcaköy Kaplıca sularında ölçülen değerler karşılaştırıldığında en yüksek değerler sırası ile İspanya, Yunanistan, Iran, Sırbistan, Türkiye (Ilıcaköy Kaplıcası) dir. Kaplıca sularında ölçülen radon gazı değerleri en düşük olan kaplıcalar ise Yunanistan (Loutra Edipsou), Slovenya'dır.

Tablo 33' deki diğer ülkelerin kaplıca çevresindeki topraklarda radon gazı ölçümü için yapılmış olan çalışmaların sonuçları ile Ayder, Havza, Ladik ve Ilıcaköy sonuçları kıyaslanacak olursa Sırbistan (Niška Banja) için ölçülen en yüksek değer (2000 kBq/m^3) Ilıcaköy ana havuz çevresi için ölçülen değerden yüksektir, diğer tüm bölgeler için ölçülen değerler ise Ilıcaköy Kaplıcası topraklarında ölçülen radon gazı değerinden düşüktür.

Tablo 33. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca sularında, havasında ve çevresindeki topraklarda radon gazı konsantrasyonları

Bölgeler	Hava Ortamında Radon (Bq/m^3)	Toprakta Radon kBq/m^3	Suda Radon Bq/L	Doz mSv/y Personel	Referanslar
İzmir- Dikili	31-280	0,8-2,85	< 11	2,62	Yarar vd. 2006
Kestanbol (Çanakkale)	65±8	-	-	1,91	Çelebi vd. 1997
Armutlu Yalova	-	116-148	-	-	Seyis vd. 2010
Cumalı (İzmir)	-	-	0,1-16,6	-	Camgöz vd. 2010
Karakoç (İzmir)	-	-	0,3-10,2	-	Camgöz vd. 2010
Doğanbey1(İzmir)	-	-	0,3-56,3	-	Camgöz vd. 2010
Doğanbey2(İzmir)	-	-	0,3-7,7	-	Camgöz vd. 2010
Ayder	**108±17**	**38± 0,2**	**155±23**	**0,9**	**Şimdiki Çalışma**
Ilıcaköy	**3216±55**	**955±5**	**577±25**	**13,4-20,3**	**Şimdiki Çalışma**
Havza	**30±6**	**9± 1**	**82±9**	**0,2**	**Şimdiki Çalışma**
Ladik	**691±76**	**50±3**	**234±15**	**3,3**	**Şimdiki Çalışma**
İspanya Cantabria	5000	-	824	-	Soto vd. 1995
Tunus	33-589	-	-	0,2-1,7	Labidi vd., 2006
Lesvos Adası(Yunanistan)	-	-	13,8 -236,6	4,55-0,76	Vogiannis,vd. 2004
Eftalou	250±12-782±39	-	236,6	4,55	Vogiannis,vd. 2004
Polichnitos	156±12-328±16	-	159,2	2,09	Vogiannis,vd. 2004
Thermis	98,7±4,5	-	23,8	0,76	Vogiannis,vd. 2004
Lisvori	-	-	15,3	-	Vogiannis,vd. 2004
Gera	-	-	13,8	-	Vogiannis,vd. 2004
Brezilya (Termas ve Araxa)	258±20 - 1634±111	-	-	1,7-7,5	Campos vd. 2010
Çin (Guangdong)	30±13-2144±696	-	53,4 – 292,5	-	Gang Song vd., 2005
Hindistan	429±12,72		28,88± 0,85	-	Kant vd. 2005
Yunanistan (Loutra Edipsou)	30-1100	1±0,6-690±22	0,04-1,27	0,26-30	Geranios vd. 2004
Yunanistan (Ikarıa Adası)	-	-	888	-	Ttrabidou vd. 1996
Sırbistan (Niška Banja)	140-2810	-	24,5-648	3- 18	Nikolov vd.,2012
Brezilya	258±20-1634±111	-		7,5 -0,06	Campos vd.
İspanya 82 kaplıca	-	-	4- 1868	-	Ródenas vd., 2007
Kuzey Venezuella	400-54000	122	1-556	0,12-4,2	Horvath vd. 2000
Slovenya	24±2-168±8	-	-	-	Zunic vd.2006
Macaristan	100-2000	-	80-140	-	Kávási,2004
Sırbistan (Niška Banja)	775 -5780	63,7±2,2->2000	0,5±1,6-570±20	16,2- 6,8	Zunic vd.2006
Mahallat (Iran)	275-700	-	710	5,6	Beitollahi vd. 2006
Slovenya	25-279	-	1,4-3,3	-	Vaupotic vd. 2001

İç ortamda ki hava için yıllık etkin doz eşdeğeri UNSCEAR da belirtilen parmetreler dikkate alınarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (Nikolov vd., 2012).

$$AEDE\ (\ mSv/y) = C_{Rn}.F.O.(DCF) \quad (43)$$

Burada C_{Rn} iç hava ortamındaki radon konsantrasyonu, F radon ve bozunum ürünlerinden kaynaklanan denge faktörü (0,4), O iç ortamda geçirilen süre (çalışanlar için yıllık ortalama 2000 saat) ve DCF radondan kaynaklanan doz dönüşüm faktörü $7.9x10^{-6}$ mSv $h^{-1}(Bq\ m^{-3})^{-1}$ (Nikolov vd., 2012).

Hastaların (düzenli tedavi için) yılda 3 hafta günde 2 seans ve her seans 60 dakika olmak üzere havuzdan yararlandıkları kaplıcalarda tedaviden sorumlu olan yönetim tarafından belirtilmiştir. Buna göre hem pasif ölçüm yapan CR-39 dedektörü ile alınan radon sonuçları ve aktif ölçüm yapan AlphaGUARD radon dedektörü ile alınan sonuçlar kullanılarak yıllık etkin doz eşdeğeri Tablo 34 ve Tablo 35’ de hesaplanarak verilmiştir.

Tablo 34. Hastalar ve Kaplıca personeli için CR-39 pasif radon dedektörü sonuçlarına göre hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri (AEDE)

Kaplıcalar	Oda	Aktivite	Kaplıca Personeli		Hastalar	
			Zaman	AEDE	Zaman	AEDE
		Bq/m^3	sa/yıl	mSv/y	dk/gün	µSv/y
Ayder Kaplıcası	A1	156±2	2000	1	120	4,5
	A2	90±3	2000	0,6	5	0,7
	A3	116±3	2000	0,7	10	1
	A4	86±3	2000	0,5	30	3
	A5	92±4	2000	0,6	30	4
	A6	142±3	2000	0,9	20	3
	A7	109±4	2000	0,7	30	6
Havza kaplıcası	H1	44±1	2000	0,3	120	6
	H2	43±2	2000	0,3	5	0,2
	H3	40±2	2000	0,3	10	0,4
	H4	71±2	2000	0,4	10	0,8
	H5	87±4	2000	0,5	10	3
Ladik Kaplıcası	L1	642±5	2000	4,1	120	80
	L2	362±5	2000	2,3	480	0,1
	L3	122±2	2000	0,8	10	1
	L4	508±4	2000	3,2	120	50
	L5	170±1	2000	1,1	30	5
	L6	137±1	2000	0,9	5	2
Ilıcaköy Kaplıcsası	I1	1862±3	2000	12	120	250
	I2	974±1	2000	6,2	10	10
	I3	264±3	2000	1,7	5	10
	I4	646±3	2000	4,1	120	85
	I5	124±2	2000	0,8	10	1
	I6	416±3	2000	2,6	480	200
	I7	180±2	2000	1,1	20	4
	I8	399±4	2000	2,5	480	200
	I9	256±1	2000	1,6	5	0,01
	I10	719±6	2000	4,5	30	20
	I11	388±3	2000	2,5	60	30
	I12	192±2	2000	1,2	10	2
	I13	259±2	2000	1,6	480	100
	I14	554±3	2000	3,5	30	10
	I15	1326±3	2000	8,4	120	200
	I16	110±2	2000	0,7	30	0,3

Tablo 35. Hastalar ve Kaplıca personeli için AlphaGUARD aktif radon dedektörü sonuçlarına göre hesaplanan yıllık etkin doz eşdeğerleri(AEDE)

Kaplıca Adı	Oda	Aktivite	Kaplıca Personeli		Hastalar	
			Zaman	AEDE	Zaman	AEDE
		Bq/m^3	sa/yıl	mSv/y	dk/gün	μSv/y
Ayder Kaplıcası	A1	99±4,	2000	0,9	120	13
	A2	68±4	2000	1	5	0,4
	A3	104±4	2000	0,7	10	1,2
	A4	84±3	2000	0,6	30	2,8
Havza kaplıcası	H1	30±6	2000	0,2	120	4
	H2	42±9	2000	0,3	5	0,2
	H3	32±3	2000	0,2	10	0,4
Ladik Kaplıcası	L1	525 ±23	2000	3,3	120	70
	L2	313 ±15	2000	2	5	0,7
	L3	89±8	2000	0,6	10	1
Ilıcaköy Kaplıcsası	I1	2118±31	2000	13,4	120	281
	I1 (2011)	3216±43	2000	20,3	120	427
	I2	606±27	2000	3,8	5	3,3
	I3	124±16	2000	0,8	5	0,7
	I4	305±14	2000	1,9	120	40
	I5	100±16	2000	0,6	10	0,01

Tablo 34 ve 35'de görüldüğü gibi yıllık etkin doz eşdeğeri personel için 0,6 mSv ile 13,4 mSv arasında değişen değerler bulunurken hastalar için 0,2 μSv ile μ427 mSv arasında değişen değerler bulunmuştur. Bu değerler ICRP nin belirtiği sınır değerler arasındadır (personel için 20mSv, hastalar için 1mSv ICRP-65). Fakat AphaGUARD ile mevsimlik ölçümler dikkate alındığında Ilıcaköy I1 ortamı için hesaplanan yıllık etkin doz 20 mSv olmaktadır. Burada hesaplanan doz değerleri göz önüne alındığında koruyucu bir önlem olarak özellikle yüksek radyoaktiviteli kaplıcalarda ve uzun süreli uygulamalarda ölçüm ve hesapların yetkili doktor ve radyasyon fizikçileri tarafından gözden geçirilip hastalara uygulanan tedavinin yöntem ve uygulama süresine karar verilmesi gerekir.

Yüksek radon konsantrasyonu içeren sular içildiğinde radon ve onun bozunma ürünleri sindirim sistemi için ek bir radyasyon dozu oluşturur. Halkın radonlu suyu

içmekten dolayı aldığı yıllık etkin doz eşdeğeri aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Nikolov vd., 2012).

$$AEDE=K.C.KM.t \quad (45)$$

Burada AEDE radonlu suyu içmekten kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğeri ($Sv.yıl^{-1}$), K, Rn-222 için doz dönüşüm faktörü (yetişkinler için 10^{-8} $Sv.Bq^{-1}$ ve çocuklar için 2.10^{-8} $Sv.Bq^{-1}$), C sudaki ^{222}Rn konsantrasyonu ($Bq.L^{-1}$), KM günlük su tüketimi (2 L $gün^{-1}$), t ise tüketim süresi (1 yıl için 365 gün) dir. Tablo 36'da bu eşitliğe göre günde 2 L su içen bir yetişkinin ve 750 ml su içen çocuğun yıllık alacağı doz eşdeğeri hesaplanmıştır (Todorovic vd., 2012).

Ayder ve Ladik kaplıca suları yerel halk, personel ve hastalar tarafından içilmektedir. Fakat özellikle Ilıcaköy Kaplıca suyu içilmemelidir uyarılarına rağmen bilinçsiz insanlar tarafından içilebileceği düşünülmektedir.

Tablo 36. Radon içeren kaplıca sularının içilmesi ile kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğeri

Kaplıca Adı	Radon Bq/L	AEDE (mSv/y) Yetişkin	AEDE (mSv/y) Çocuk
Ayder	155±23	1,13	0,8
Ilıcaköy	577±25	4,15	3,1
Havza	82±9	0,6	0,4
Ladik	234±15	1,7	1,2

Toprak örneklerindeki doğal ve yapay radyoaktivite konsantrasyonları HPGe gama spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür. Tablo 37' de yaptığımız çalışmadaki ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}Kve ^{137}Cs sonuçları ile diğer birçok çalışma sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Topraklarda doğal radyonüklid seviyelerinin dünya ortalaması ^{238}U, ^{232}Th, ve ^{40}K için sırası ile 35 Bq/kg, 30 Bq/kg, 400 Bq/kg dır. Ayder Kaplıcası çevresindeki toprak örneklerinde ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K ve ^{137}Cs'nin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 65±0,7 Bq/kg, 26±2Bq/kg, 699±8 Bq/kg, 21±1,4 Bq/kg olarak bulunmuştur. Ayder kaplıcasında topraktaki ^{238}U seviyesi dünya ortalamasının 1,9 katı, potasyum ise dünya ortalamasının 1,7 katı kadardır.

Ilıcaköy Kaplıcası çevresindeki toprak örneklerinde ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K ve ^{137}Cs'nin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 743±10 Bq/kg, 131±11 Bq/kg, 776±14 Bq/kg,

11±1 Bq/kg olarak bulunmuştur. Ilıcaköy Kaplıcasının yakın çevresindeki topraklarda ^{238}U seviyesi dünya ortalamasının (35 Bq/m^3) 24 katı kadardır. ^{232}Th seviyesinin ortalaması dünya ortalamasının 4,5 katı ^{40}K ise 1,9 kadardır.

Havza Kaplıcası çevresindeki toprak örneklerinde ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K ve ^{137}Cs'nin ortalama aktivite konsantrasyonları sırasıyla 65±2 Bq/kg, 22±1,2 Bq/kg, 669±3 Bq/kg, 5±0,5 Bq/kg olarak bulunmuştur. Havza Kaplıcası topraklarında ^{238}U seviyesi dünya ortalamasının 1,8 katı, ^{40}K ise dünya ortalamasının 1,7 katı kadardır.

Ladik Kaplıcası çevresinden alınan toprak numunelerindeki ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K doğal radyoaktif elementleri ile ^{137}Cs yapay radyoaktif elementinin aktiviteleri sırasıyla 57±1,3 Bq/kg, 21±1,5 Bq/kg, 663±5,6 Bq/kg ve 6±0,5 Bq/kg' dır. Ladik Kaplıcası topraklarında ^{238}U seviyesi dünya ortalamasının 1,6 katı kadardır. ^{40}K ise dünya ortalamasının 1,6 katı kadardır. Ayrıca doğada doğal olarak bulunmayan ^{137}Cs izotopuda dört kaplıca çevresindeki topraklarda mevcuttur. Fakat doğudan batıya gidildikçe azalma göstermektedir.

Tablo 37. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca çevresi topraklarında radyonüklid konsantrasyonları

Bölgeler	^{238}U $^{*}(^{226}Ra)$ Bq/kg	^{232}Th Bq/kg	^{40}K Bq/kg	^{137}Cs Bq/kg	Referanslar
Sırbistan(Toprak Niska Banja)	20±5	20,3±1,4	361±16	-	Nikolov vd.2012
Sırbistan (Terapi çamuru)	83±10	104±13	1210±40	2±0,4	Nikolov vd.2012
Yunanistan(Ikarıa adası)	241±410	43±18	1130±823	-	Ttrabidou vd. 1996
Sırbistan (Niska Banja)	*259±6	-	219±4	0,5±0,2	Manic vd.2006
Iran (Mahallat)	*1300-*7300	15-41	364-873	-	Beitollahi vd. 2006
Ayder	**65±0,7**	**26±2**	**699±8**	**21±1,4**	**Şimdiki Çalışma**
Ilıcaköy	**743±10**	**131±11**	**776±14**	**11±1**	**Şimdiki Çalışma**
Havza	**65±2**	**22±1,2**	**669±3**	**5±0,5**	**Şimdiki Çalışma**
Ladik	**57±1,3**	**21±1,5**	**663±5,6**	**6±0,5**	**Şimdiki Çalışma**
İzmir- Dikili	*82±5	-	-	-	Yarar vd. 2006
Bademli	*78±1,87	-	-	-	Yarar vd. 2006
Kaynarca	*64±2.81	-	-	-	Yarar vd. 2006
Kocaoba	*81±3.72	-	-	-	Yarar vd. 2006
Nebiler	*287±10.33	-	-	-	Yarar vd. 2006
Dünya ortalaması	35	30	400	-	UNSCEAR (2000)

Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi kaplıca su örneklerinin HPGe gama spektrometresi ile yapılan radyonüklid konsantrasyonu analiz sonuçları ile diğer ülkelerin kaplıcalarında yapılan çalışmaların karşılaştırılması Tablo 38'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi diğer ülkelerde kaplıca sularında çok az sayıda radyonüklid analizi yapılmıştır.

Ladik Kaplıca suyunda ^{232}Th aktivitesi (1,7±0,03 Bq/L) diğer kaplıca sularına göre fazladır. Küzey Anadolu fay hattından gelen hidrotermal çözeltiler yoluyla toryumun kaplıca suyuna karıştığı düşünülmektedir.

Tablo 38. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca sularında radyonüklid konsantrasyonları

Bölgeler (Termal Sular)	^{238}U *(**^{226}Ra**) Bq/L	^{232}Th Bq/L	^{40}K Bq/L	^{137}Cs Bq/L	**Referanslar**
Ikarıa adası(Yunanistan)	2,6±1,7	-	22±19	-	Ttrabidou vd. 1996
Mahallat (Iran)	1.35±0,13-0,48±0,05	-	-	-	Beitollahi vd. 2006
Ayder	0,33±0,04	0,1±0,03	4,3±0,3	0,02±0,01	Şimdiki Çalışma
Ilıcaköy	11±0,1	1,2±0,07	8,4±0,3	0,190±0,020	Şimdiki Çalışma
Ilıcaköy 2	3,9±0,08	0,5±0,05	4,3±0,3	0,058±0,014	Şimdiki Çalışma
Havza	0,2±0,03	0,1±0,04	4±0,3	0,015±0,011	Şimdiki Çalışma
Ladik	3,2±0,04	1,7±0,03	4,3±0,3	0,05±0,01	Şimdiki Çalışma

Radyasyona maruz kalan bir insanda oluşabilecek zararlı biyolojik etkilerin hesaplanabilmesi açısından, ölçülebilen bir radyasyon dozunun eşdeğerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle halkın ve radyasyonla çalışanların aldığı radyasyon dozu için standartlar, belirli zamanlarda ifade edilirler. Su numunelerinden alınan yıllık etkin doz eşdeğerleri aşağıdaki bağıntıdan bulunur (Amrani, 2002).

$$AEDE=C_R.I_A.E_D \qquad (46)$$

Burada AEDE, yıllık etkin doz eşdeğeri (Sv/y) olmak üzere, C_R, yıllık tüketilen su miktarı (L/yıl), I_A, radyoçekirdeğin aktivitesi (Bq/L) ve E_D, doz katsayısı (Sv/Bq)'dır. Bazı radyoaktif çekirdekler için doz katsayıları Tablo 39'da verilmektedir.

Tablo 39. Bazı radyoçekirdeklerin doz katsayıları (WHO, 2003)

Radyoçekirdek	Doz Katsayısı(mSv/Bq)
^{238}U	$4.5x10^{-5}$
^{226}Ra	2.8×10^{-4}
^{232}Th	$2.3x10^{-4}$
^{228}Ra	$6.9x10^{-4}$
^{134}Cs	$1.9x10^{-5}$
^{137}Cs	$1.3x10^{-5}$
^{131}I	$2.2x10^{-5}$
^{214}Bi	$1.1x10^{-7}$
^{214}Pb	$1.4x10^{-7}$
^{40}K	$6.2x10^{-6}$
^{222}Rn	$6x10^{-6}$

Bu çalışmada elde edilen sonuçların yanı sıra, Denklem 45 ve Tablo 39 dikkate alınırsa, su numuneleri içinde tespit edilen bazı radyoaktif çekirdeklerin yıllık etkin eşdeğer doz değerleri hesaplanabilir. Bu hesaplamalarda sular için günlük içim miktarının yetişkinlerde 2 L olduğu kabul edilmiştir (Chau vd., 2008). Kaplıca suları için yetişkinlerde tespit edilen yıllık etkin doz eşdeğerleri Tablo 40'da gösterilmektedir. Tabloda belirtilen kaplıca sularından Ayder ve Ladik Kaplıcası suları içilmektedir. Elde edilen yıllık etkin doz eşdeğerlerinin WHO'nun belirlediği yıllık etkin doz eşdeğeri için sınır değer olan 0,1 mSv/y ile karşılaştırılırsa Ayder Kaplıcası suyunun insan sağlığı için bir tehlike arz etmediği anlaşılmaktadır. Ladik Kaplıcası için ise ^{232}Th' den kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğerinin WHO'nun belirlediği sınırın üzerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 40. Kaplıca sularındaki radyoaktif çekirdeklerin yıllık etkin doz eşdeğerleri

Radyonüklid	KAPLICALAR			
	Ayder	Ilıcaköy	Havza	Ladik
	AEDE	AEDE	AEDE	AEDE
	($\mu Sv.y^{-1}$)	($\mu Sv.y^{-1}$)	($\mu Sv.y^{-1}$)	($\mu Sv.y^{-1}$)
^{238}U	1,1	36,13	0,66	10,5
^{232}Th	16,8	201	16,8	285
^{137}Cs	0,2	1,8	0,14	0,5
^{40}K	19,5	38	18	19,5

T.C Sağlık Bakanlığının R.G 9.12.2004/25665 sayılı Kaplıca yönetmeliğinde kaplıca suları için, toplam alfa ve beta aktivitesi açısından bir sınır değer verilmemektedir.

Ayder kaplıcası için kaplıca sularında ölçülen toplam alfa ve beta aktifliklerinin ortalama değerleri sırasıyla,0,055 ±0,009 Bq/L ve 0,135±0,011 Bq/L dir. Ilıcaköy kaplıcası için kaplıca sularında ölçülen toplam alfa ve beta aktifliklerinin ortalama değerleri sırasıyla, 67± Bq/L ve 36± Bq/L dır. Havza kaplıcası için kaplıca sularında ölçülen toplam alfa ve beta aktifliklerinin ortalama değerleri sırasıyla, 0,104±0,013 Bq/L ve 0,473±0,028 Bq/L dir. Ladik kaplıcası için için kaplıca sularında ölçülen toplam alfa ve beta aktifliklerinin ortalama değerleri sırasıyla, 0,230±0,032 Bq/L ve 0,317±0,020 Bq/L olarak bulunmuştur.

Ayder, Havza ve Ladik Kaplıca sularında ölçülen toplam alfa, toplam beta normal değerler arasındadır. WHO (Dünya Sağlık Örgütü) tarafından içme suları için belirlenmiş limit değerler toplam alfa ve beta aktiflikleri için sırasıyla 0,5 Bq/L ve 1 Bq/L'dir. Ilıcaköy için ölçülen değerler sınır değerlerin oldukça üzerindedir. Yapılan üç ölçümün ortalaması toplam alfa için 67± 0,5 Bq/L ,toplam beta için 36±1,5 Bq/L dır.Toplam alfa değeri sınır değerlerin 134 katı, toplam beta değeri ise 36 katı fazladır.

Ülkemiz ve dünyada kaplıca sularında az sayıda yapılmış olan toplam alfa, toplam beta konsantrasyonunu belirleme çalışmalarına ait bulgular Tablo 41'de verilmektedir. Tabloya göre Türkiye için yapılmış olan çalışmaların sonuçları ile Ayder, Havza, Ladik ve Ilıcaköy Kaplıcası için yapılan çalışmaların sonuçları kıyaslandığında, en yüksek konsantrasyonun Ilıcaköy Kaplıcasında ölçüldüğü görülmektedir. Beypazarı Tahtalı Termal Suyu 4,217±0,491 Bq/L toplam alfa, 4,20±0,44 Bq/L toplam beta değeri ile ikinci sırada olmasına karşın Ilıcaköy Kaplıcasında ölçülen toplam alfa değeri bu değerin 16 katı, toplam beta değeri ise 9 katı kadardır. Ayder Kaplıcasında ölçülen toplam alfa değeri kaplıcalar içerisinde en küçük değere sahiptir.

Tablo 41. Türkiye'de ve Dünya'da kaplıca sularında toplam alfa va toplam beta konsantrasyonları

Bölgeler	Tolam Alfa Bq/L	Toplam Beta Bq/L	Referanslar
Süleymanlı ılıcası	0,108±0.015	0,121±0.010	Söğüt vd, 2011
Ekinözü kaplıcası	0,299±0.084	0,072±0.008	Söğüt vd, 2011
*Beypazarı Tahtalı(TermalSuyu)	3,914± 0,420	3,59± 0,33	Kırkpınar 2010
*Kurşunlu Kaplıcaları Salihli	0,153±0,111	1,16±0,16	Kırkpınar 2010
*Urganlı Kaplıcaları	0,887± 0,043	2,69± 0,16	Kırkpınar 2010
*Balçova Kaplıcaları	0,203± 0,069	0,90 ±0,11	Kırkpınar 2010
*Dereköy Turgutlu Kaplıcaları	0,500± 0,097	1,85± 0,15	Kırkpınar 2010
**Beypazarı Tahtalı(Termal Suyu)	4,217 ± 0,491	4,20± 0,44	Kırkpınar 2010
**Kurşunlu Kaplıcaları Salihli	0,458 ± 0,108	2,01± 0,16	Kırkpınar 2010
**Urganlı Kaplıcaları	0,945± 0,071	2,98± 0,19	Kırkpınar 2010
**Balçova Kaplıcaları	0,856 ± 0,121	2,01 ± 0,14	Kırkpınar 2010
**Dereköy Turgutlu Kaplıcaları	0,913± 0,152	3,41± 0,20	Kırkpınar 2010
Ayder	**0,055 ±0,009**	**0,135±0,011**	**Bu Çalışma**
Havza	**0,104±0,013**	**0,473±0,028**	**Bu Çalışma**
Ladik	**0,230±0,032**	**0,317±0,020**	**Bu Çalışma**
Ilıcaköy (Ort.)	**67±4**	**36±1**	**Bu Çalışma**
İspanya (82 kapılca)	***DL ile 17	***DL ile 60	Ródenas vd, 2007

*Haziran ayında, ** Eylül ayında ***DL(Dedeksiyon Limiti)

Kaplıca içi soğurulan gama doz ölçümleri, portatif çevresel ölçüm cihazı NaI dedektörü (INSPECTOR 1000) kullanılarak yapılmıştır. Cihaz gama doz hızını Rem (Roentgen Equivalent Man) olarak ölçmektedir. 1 Sv= 100 Rem oluğuna göre değerler Sv' e dönüştürülebilir. Bu değerler tablo 42'de görülmektedir.

Tablo 42. Ölçülen gama doz değerlerinin mSv/y olarak karşılığı

Ölçüm Yapılan Yerler	(mrem/h)	mSv/y
Ilıcaköy I1	0,018	1,57
Ilıcaköy I4	0,017	1,5
Ilıcaköy su kaynağı	0,07	6,1
Ayder A1	0,0065	0,6
Havza H1	0,006	0,52
Ladik L1	0,0097	0,85

Ayder Kaplıcası A1 ortamında ortalama gama dozu değeri 0,0065 mrem/h (0,6 mSv/y) olarak ölçülmüştür. Ilıcaköy Kaplıcası I1 bölümünde ortalama gama dozu değeri 0,018 mrem/h (1,57 mSv/y) olarak ölçülmüştür. Ilıcaköy I4 bölümünde ortalama gama dozu 0,017 mrem/h (1,5 mSv/y), suyun kaynağının çıktığı yerde ise ortalama gama dozu 0,07 mrem/h (6,1 mSv/y) olarak ölçülmüştür. Havza Kaplıcası H1 ortamında ortalama gama dozu değeri 0,006 mrem/h (0,52 mSv/y) olarak ölçülmüştür. Ladik Kaplıcası L1 bölümünde ortalama gama dozu değeri 0,0097 mrem/h (0,85 mSv/y) olarak ölçülmüştür.

Doğal radyonüklitlerin ana kaynağı toprak ve toprağı oluşturan jeolojik kaya yapıları olduğu için toprakta ölçülen radyonüklid değerlerinin yüksek olması (^{238}U) ölçülen gama dozlarının özellikle Ilıcaköy Kaplıca çevresinde yüksek ölçülmesinin sebebini açıklamaktadır.

Ayrıca gama dozu değerleri sadece havuz suyundan değil ortamın yapıldığı yapı malzemesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin mermer ile kaplı havuzlarda gama dozu değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

5. ÖNERİLER

1. Bu çalışmanın kapsamı Türkiye'deki diğer bölgelere genişletilerek tüm Türkiye kaplıcaları için radon haritası oluşturulmalıdır.
2. Sağlık nedeni ile yerel halk, kaplıca personeli ve gelen ziyaretçiler içilmesine izin verilmeyen kaplıca sularını içme suyu olarak kullanmamalıdır.
3. Toprakta ve yer altı sularında radon değişimi incelenerek Karadeniz bölgesindeki deprem araştırma çalışmalarına da katkı sağlanabilir. Yapılan birçok çalışmada deprem ve radon arasında ilişkiler gözlenmektedir. Fakat bu ilişki sürekli ve düzenli bir veri aktarım sistemi ile gözlenmelidir.
4. Ayder ve Ilıcaköy kaplıcalarının jeolojileri aynı formasyonda, faylanma ve jeolojik yaşlarının aynı olmasına karşın sularının kimyasal ve radyolojik açıdan tamamen farklılık gösterdiği görülmüştür. Ilıcaköy Kaplıcasının altında bir magma yükseliminin olma olasılığı hemen kaplıcanın üst tarafında yer alan çok genç yaşlı riolitik volkaniklerin bulunması ile önem kazanmaktadır. Ayrıntılı jeofizik çalışmaları yapılarak bu olasılığın incelenmesi gerekmektedir.
5. Özellikle radon değerlerinin çalışma bölgesinde çalışma boyunca değişkenlik göstermesi sürekli radon ölçümlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.
6. Sistematik olarak ölçülen (aylık) radon değerleri yüksek olan kaplıcalarda hastalara uygulanan iyileştirme programlarının ve buralarda çalışan personelin çalışma koşullarının gözden geçirilerek gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

Akyıldırım, H., 2005. Isparta İlinde Radon Yoğunluğunun Ölçülmesi ve Haritalandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Al-Bataina, B.A., Ismail, A.M., Kullab, M.K., Abmurad, K.M. ve Mustafa, H., 1997. Radon measurements in different types of natural waters in Jordan. Radiation Measurements 28, 1-6, 91-594.

Al-Jundi, J., 2002. Population Doses from Terrestrial Gamma Exposure in Areas Near to Old Phosphate Mine, Russaifa, Jordan, Radiation Measurements, 35, 23-28.

Alp, D., 1972. Amasya Yöresi'nin Jeolojisi, Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Monografileri (Tabii İlimler Kısmı), İstanbul, 22, 101 s.

Amrani, D., 2002. Natural Radioactivity in Algerian Botteled Mineral Waters, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 252,597-600.

Arya A P. (Edit: Şahin, Y.), 1999. "Çekirdek Fiziğinin Esasları", Aktif Yayın, Dağıtım LTD. ŞTİ., İstanbul.

Atakan, Y., 1994. Çernobil Kaynaklı Radyoaktif Serilerin Çevreye ve İnsana Etkileri, Tübitak.

Atakan, Y., 2007. Bilim ve Teknik Dergisi .Tübitak Yayınları. Mayıs.

Beck, H.L., 1982. The Natural Radiation Environment, II. USERDA Conf.-720805-P2,The Physics of Envvironmental Gamma Radiation Fields, 101-104.

BEIR VI, 1999. Health Effects of Exposure to Radon. Committee on Health Risks of Exposure to Radon. Board on Radiation Effects Research (BEIR VI). National Academy Press.

Beitollahi, M., Ghiassi-Nejad M., Esmaeli A. ve Dunker R., 2007. Radiological studies in the hot spring region of Mahallat, Central Iran. Radiation Protection Dosimetry 123-4, 505-8.

Camgöz, B., Saçı M.M., Bolca M., Özen F., Oruç Ö.E., ve Demirel N., 2010. Termal Suların Radyoaktivite ve Kimyasal İçeriklerinin İncelenmesi; İzmir, Seferihisar Bölgesi Örneği. Ekoloji 19-76, 78-87.

Campos, M.P., Pecequilo, B.R. S. ve Mazzilli B.P., 2010. Rn-222 and Pb-212 Exposures at a Brazilian Spa. Radiation Protection Dosimetry 141,2, 1-5.

Canbazoğlu, C., 2004. Elazığ Yöresinde Doğal Radyoaktivite Tayini, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Chau, N.D. ve Michalec, B., 2008. Natural Radioactivity in Bottled Natural Spring, Mineral and Therapeutic Waters in Poland, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 279-1, 121-129.

Ciolini, R. ve Mazed, D., 2010. Indoor radon concentration in geothermal areas of central Italy. Journal of Environmental Radioactivity,101-9, 712-6.

Commission of the European Communities (CEC). Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies. CEC Publication C(2001)/4580/01/928/ EURATOM (2001).

Çağatay, N., Erler A., Güleç N., Savaşçın Y., ve Tokel S., 1994. Jeokimya Temel Kavramlar ve İlkeler. 2. Baskı TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 32.

Çelebi, N. ve Alkan H., 1997. Evaluation of natural radiation in the Kestanbol Spa Region Radiation Protection Dosimety, 69,3, 227-230.

Damla, N., 2006. Doğu Karadeniz Bölgesindeki İçme Sularında Toplam Alfa, Toplam Beta ve Gama Radyoaktifliği, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Değerlier, M., Karahan, G. ve Ozger, G., 2008. Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey, Journal of Environmental Radioactivity 1-8.

Genitron Instruments Ltd. AlphaGUARD PQ20001 MC50. 1994. Multiparameter radon monitor (Frankfurt: Genitron InstrumentsLtd).

Geranios, A., Nikolopoulos, D., Louizi, A. ve Karatzi, A., 2004. Multıple Radon Survey ın spa of Loutra Edipsou(Greece).Radiation Protection Dosimetry,112,2, 251-258.

Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, MTA Yayınları, Ankara.

Horvath, A., Bohus, L.O., Urbani, F., Marx, G., Piroth, A.ve Greaves, E.D., 2000. Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. Journal of Environmental Radioactivity, 47,127-133.

IAEA 1996. International Atomic Energy Agency, "Radiation Safety" IAEA Division of Public Information, 96-00725 IAEA/PI/A47E.

ICRP, 1990. The International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. Recommendations of the International Commission on the Radiological Protection, Pergamon Press Inc., ICRP, USA.

ICRP, 1994. Protection against Radon-222 at Home and at Work, ICRP Publication No. 65, Ann. ICRP 23 (2), Pergamon Press, Oxford and New York (1993).

ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4). Pergamon Press, Oxford and New York.

Inagaki, M., Nojiri S., Takemura T., Koga T., Morishima H., Tanaka Y., Mifune M. ve Kobayashi I., 2005. Radon-222 concentrations and the environmental radiation dose rates at Misasa spa districts, Japan International Congress Series 1276, 293–294.

Kant, K., Upadhyay S.B. ve Chakarvarti S.K., 2005. Alpha activity in Indian thermal springs. Iranian Journal of Radiation Research 2-4, 197-204.

Karahan, G., 1997. İstanbul'un Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Tayini ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 118.

Ketin, I., 1951. Über die Geologie der Gegend Von Bayburt in Wordost Antatolin, Rev. Fac. Sci. Univ. İstanbul, B 16, 113-122.

Kırkpınar, A., 2010, İzmir ve Ankara İlii Çevrelerindeki Termal Su ve İçme Sularının Radyoaktivite Açısından İncelenerek, Bölgelerin Kendi içerisinde ve Bölgeler arasında Termal Su ve İçme Sularının Radyoaktivite Açısından Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Kobya, Y., Cevik, U., Damla, N., Kobya, A. I., Taskın, H. ve Kemer B.2010. Radiological Characterization of Natural SpringWaters in Eastern Black Sea Region, Turkey. Environmental Forensics, DOI: 10.1080/15275920903559230.

Kobya, Y., Damla, N., Cevik, U. ve Kobya, A. I.,2011. Radiochemical characterization of mineral waters in the Eastern Black Sea Region, Turkey. Environ Monit Assess. DOI 10.1007/s10661-011-1885-1.

Kozlowska, B., Wwalencik, A., Dorda, J. ve Zipper, W.,2010. Radon in groundwater and dose estimation for inhabitants in Spas of the Sudety Mountain area, Poland. Applied Radiation and Isotopes 68,854-857.

Krane, K. S., 1988. Introductory Nuclear Physics, Canada.

Krane, S. K. (Edit: Şarer, B.), 2001. Nükleer Fizik 1. Cilt Ders Kitabı, Birinci Baskı, Palme Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., Ankara.

Kulalı, F. 2009. Topraktaki Radon Konsantrasyonu Ölçümü ve Deprem İlişkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Kumru, M. N., Aydın, B. ve Bakac, M., 2002. Gediz Nehri'nden Ege Denizi'ne Tasınan Doğal Radyoaktivitenin (Radyum) Belirlenmesi, Ekoloji Cevre Dergisi, 10,43,22-25.

Kurnaz, A., Küçükömeroğlu B., Keser R., Okumuşoglu N.T., Korkmaz F., Karahan G. ve Çevik, U., 2007. Determination of radioactivity levels and hazards of soil and sediment samples in Fırtına Valley (Rize, Turkey). Applied Radiation and Isotopes, 65,11, 1281–1289.

Labidi, S., Essafi, F. ve Mahjoubi, H., 2006. Estimation of the radiological risk related to the presence of radon 222 in a hydrotherapy centre in Tunisia. Journal of Radiological Protection, 26,309–316.

Lima, J.L.N. ve Bonotto, D.M., 1996. Etapas analiticas para mensuraao de radonio- 222 e uso na avaliaao da radioatividade das aguas de. Aguas da Prata Geochim. Brasiliensis 10,2,283–295.

Manic, G., Petrovic, S., Vesna, M., Popovic D. ve Todorovic, D,. 2006. Radon concentrations in a spa in Serbia. Environment İnternational 32,533-537.

NCRP, 1977. Environmental Radiation Measurement. National Council on Radiation Pratection and Measurements, NCRP Report No:50, Washington.

Nikolov, J., Todorovic, N., Petrovic, P. T., Forkapic, S., Mrdja, D., Bikit, I., Krmar, M. ve Veskovic, M., 2012. Exposure to radon in the radon spa Niska Banja, Serbia Radiation Measurements 47,443-450.

Özdemir, F. B. 2006. Afyon ve Çevresindeki Kuyu Sularında Radon (RN-222) Aktivitesi Tayini, Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Özen, T. ve Tarcan G., 2005. Dikili-Kaynarca (İzmir) Jeotermal Sistemlerinin Hidrojeolojik ve Jeokimyasal Değerlendirilmesi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi. 7,2,87-100.

Özmen, B., 1995. Depremlerin Önceden Bilinmesinde Kullanılan Yöntemler, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Seminer Dersi (JEO 500).

P.R.M.A (Portatif Radon Monitörü "AlphaGUARD") Kullanım Kılavuzu.

Radolić, V., Vuković, B. ve Planinic, J., Radon in Croatian Spas Department of Physics, University of Osijek, P.O. Box 144, 31000 Osijek, Croatia.

Ramola, RC., Gusain, GS., Badoni M., Prasad Y., Prasad G. ve Ramachandran, TV., 2008. Ra-226, Th-232, K-40 contents in soil samples from Garhwal Himalaya, India, and its radiological implications. Journal of Radiological Protection 28,379-385.

Rodenas, C., Gomez, J., Soto, J. ve Maraver, F., 2008. Natural radioativity of spring water used as in Spain. Jaurnal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 277,3,625-630.

Saad, A.F., 2008. Radium Activity and Radon Exhalation Rates from Phosphate Ores Using CR-39 on-line with an Electronic radon Gas Analyzer "AlphaGUARD". Radiation Measurements,doi:10.10116/j.radmeas.2008.04.052.

Seyis, C., İnan, S. ve Streıl, T., 2010. Ground and Indoor Radon Measurements in a Geothermal Area VERSITA (Acta Geophysica, 58,5, 939-946).

Song, G., Zhang, B., Wang, X., Gong, J., Chan, D., Bernett, J., Lee, S.C. 2005. Indoor radon levels in selected hot spring hotels in Guangdong, China, Science of the Total Environment 339, 63-70.

Soto, J., Fernandez, PL., Quindos, LS. ve Gomez-Arozamena J., 1995. Radioactivity in Spanish Spas. Science of The Total Environment 162,2-3, 187-92.

Söğüt, Ö., Küçükönder E., Şahin S., ve Doğru M., 2011. Measurement of Gross Alpha-Beta, Radionuclide Activity Concentration of Water of theSuleymanli Thermae and the Ekinozu Spa and Elemental Analysis in Kahramanmaras, Turkey KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14,2.

TAEK 2002 (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu), Radyasyon ve Biz, Ankara-2002.

Todorovic, N., Forkapic, S., Bikit, I., Mrdja, D., Veskovic, M., Todorovic, S., 2011. Monitoring for exposures to Tenorm sources in Vojvodina region. Radiation Protection Dosimetry 144, 1-4, 655-658.

Todorovic, N., Nikolov, J., Forkapic, S., Bikit, I., Mrdja, D., Krmar, M. ve Veskovic, M., 2012. Public exposure to radon in drinking water in Serbia. Applied Radiation and Isotopes, 70,543-549.

Ttrabidou, G., Florou, H., Angelopolos, A., ve Sakelliou, L., 1996. Environmental Study on Radioactivity of the Spas in the Island of Ikaria. Radiation Protection Dosimetry, 63, 1, 63-67.

Tüysüz, O., 1993. Karadeniz'den Orta Anadolu'ya Bir Jeotravers: Kuzey Neo-Tetisin Tektonik Evrimi, Türkiye Petrol Jeologları Derneği, 5, 1, 1-33.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, in: Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, I, United Nations, New York, 2000, (sources).

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2009. in: Sources to Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces: UNSCEAR 2006 Report. Annex E. New York: United Nations.

UNSCEAR 2000, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Annex B Exposure from natural radiation sources .

URL-1, http://physics.isu.edu/radinf/natural.html, 19 Temmuz 2012.

URL-2, www.periodictable.com/Isotopes/086.222/index.full.html, 2 Nisan 2007.

URL-3, http://www.taek.gov.tr/ogrenci/bolum4_03.html#1, 27 Temmuz 2012.

URL-4, www. energy.cr.usgs.gov/radon/georadon/2.html 31 Temmuz 2012.

URL-5, www.nuclearnewcomer.com, Erişim Tarihi: 28 Aralık 2008.

URL-6,www.taek.gov.tr/bilgi-koşesi/radyasyon-insan-ve-cevre/65-radyasyon-ve-radyoaktivite/85-radyasyon-birimleri.html, 27 Temmuz 2012.

URL-7, www.taek.gov.tr/bilgi-koşesi/radyasyon-insan-ve-cevre/81-radyasyonla-birlikte-yasiyoruz/ 233-yapay-radyasyon-kaynaklari.html, 5 Temmuz 2012.

URL-8, http://www.cukurova.edu.tr/.../Gama%20Işınları/Gama%20Spektroskopi%20Sistemi /gama_spektrometre_sistemi.htm, 6 Mayıs 2006.

URL-9, www.usgs.gov, United States Geological Survey Internet sitesi, 9 Mart 2010.

URL-10, http://www.taek.gov.tr/bilgi-kosesi/184-radyasyon-insan-ve-cevre/radyasyonla-birlikte-yasiyoruz/501-dogal-radyasyon-kaynaklari.html, 5 Temmuz 2012.

URL-11, http://iys.inonu.edu.tr/webpanel/dosyalar/1259/file/BiyofizikDers8.pdf, 5 Temmuz 2012.

URL-12, www.periodictable.com/Isotopes/086.222/index.full.html, 2 Mayıs 2007.

URL-13, http://populermedikal.com/radon.asp, 5 Aralık 2008.

Valkovic, V., 2000. Radioactivity in the Environment. Elsevier Science B.V., Netherlands.

Varol, S., 2011. Yeraltı Sularında Toplam Alfa Ve Beta Radyoaktivitesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 1-3,101-106.

Vaupotic, J. ve Kobal I., 2001. Radon exposure in Slovenian spas. Radiation Protection Dosimetry 97,3, 265-70.

Vaupotic, J., Gregoric A., Kobal I., Zvab P., Kozak K., Mazur J., Kochowska E. ve Grzadziel D., 2010. Radon concentration in soil gas and radon exhaltion rate at the Ravne Fault in NW Slovenia Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 895-899.

Vogiannis, E., Nikolopoulos, D., Louizi, A. ve Halvadakis, CP. 2010. Radon exposure in the thermal spas of Lesvos Island--Greece. Radiation Protection Dosimetry, 111,1, 121-127.

WHO, 2003. Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd. ed., Radiological Quality of Drinking Water, World Health Organization, Genova, Switzerland.

WHO, 2006. Guidelines for drinking water quality: incorporating first addendum. Vol. 1, recommendations, (3rd ed.), chapter 9: radiological aspects. Geneva: World Health Organization.

WHO, 2009. World Health Organisation (WHO). WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO Press, Geneva.

Wichmann, HE, Heinrich J, Gerken M, Kreuzer M, Wellmann J, Keller G. ve Kreienbrock L., 2002. Domestic radon and lung cancer-current status including new evidence from Germany International Congress Series 1225, 247- 252.

Yarar, Y., Günaydı, T., Kam, E., 2005. A radon survey in some regions of Turkey, International Congress Series 1276,385-386.

Yarar, Y., Günaydı, T. ve Çelebi, N., 2006. Determination of radon concentrations of the Dikili geothermal area in western turkey, Radiation Protection Dosimetry, 118,1,78-81.

Yeşilbağ, Y. Ö., 2008. Artvin ve Ardahan İlleri Ev İçi Radon Konsantrasyonu ve Çevresindeki Topraklarda Radyoaktivitenin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Yılmaz, Y., 1972. Petrology and Structure of Gümüşhane Granite and Surrounding Rocks, NE Anatolia, PhD Thesis, University of London.

Zunic, Z. S., Kobal, I., Vaupotic, J., Kozak, K., Mazur, J., Birovljev, A., Janik, M., Celikovic, I., Ujic P., Demajo, A., Krstic G., Jacobi B., Quarto, M. ve Bochicchio, F., 2006. High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niska Banja (Balkan region), Journal of Environmental Radioactivity, 89, 249-260.

ÖZGEÇMİŞ

27.11.1979 tarihinde Karabük' te doğdu. İlköğrenimine Mardin'in Midyat ilçesinde başladı, daha sonra Balıkesir'in Havran ilçesinde ortaöğrenimini tamamlayıp 1997 yılında Balıkesir Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü'ne başladı ve 2001 yılında mezun oldu. 2002 yılında Milli Eğitim Bakanlığına öğretmen olarak atandı. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisansa başladı. 2006 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamasını takiben 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nde doktora eğitimine başladı. Araştırmacı, halen Milli Eğitim Bakanlığında Fizik öğretmeni olarak çalışmakta ve İngilizce bilmektedir.