

**ISPARTA İLİNDE RADON YOĞUNLUĞUNUN
ÖLÇÜLMESİ VE HARİTALANDIRILMASI**

Hakan AKYILDIRIM

**Yüksek Lisans Tezi
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA-2005**

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ISPARTA İLİNDE RADON YOĞUNLUĞUNUN
ÖLÇÜLMESİ VE HARİTALANDIRILMASI**

Hakan AKYILDIRIM

**Yüksek Lisans Tezi
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA-2005**

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu çalışma jürimiz tarafından FİZİK ANABİLİM DALI' da YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

ONAY

Bu tez/...../2005 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../2005

Prof. Dr. Çiğdem SAVAŞKAN
Enstitü Müdürü V.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK BİLGİSİ	5
2.1 Radyoaktivite Nedir?	5
2.2 Radyoaktivitenin Keşfi ve Kısa Tarihçe	7
2.3 Doğal Radyoaktivite	9
2.4 Radyoaktif Bozunmayla İlgili Temel Kavramlar	10
2.4.1 Bozunma (Parçalanma) Sabiti ve Hızı (Aktiflik)	10
2.4.2 Radyoaktif Bir Numunenin Yarı ve Ortalama Ömrü	14
2.4.3 Radyoaktif Seriler ve Radyoaktif Denge	15
2.5 Radyoaktif Bozunma Çeşitleri	18
2.5.1 Alfa (α) Bozunması ve Özellikleri	18
2.5.2 Beta (β) Bozunması ve Özellikleri	21
2.5.3 Gamma (γ) Bozunması ve Özellikleri	23
2.6 Yapay Radyoaktivite	24
2.7 Radyasyonun Ölçüm Yöntemleri	26
2.7.1 Gazlı Radyasyon Detektörleri	27
2.7.2 Sintilasyon Radyasyon Detektörleri	32
2.7.3 Yarıiletken Radyasyon Detektörleri	37
2.8 Radyasyon Birimleri	39
2.9 Radon ve Özellikleri	42
2.9.1 Radon' un Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	42
2.9.2 Radon'un Meydana Gelişi ve Bozunması	47
2.9.3 Radon ve Ürünlerinin Ortama Dağılımı	50
2.9.4 Radon'un Bulunduğu Yerler	52

2.9.5	Toprakta ve Kayaçlarda Radon.....	52
2.9.6	Binalarda ve Yapı Malzemelerinde Radon	52
2.9.7	Havada Radon	55
2.9.8	Sularda Radon	56
2.10	Radon ve Sağlık	57
2.11	Radon ve Deprem.....	58
3.	MATERYAL VE METOD	60
3.1	AlphaGUARD Radon Detektörü	60
3.2	AlphaGUARD Detektörünün Yapısı ve Çalışma İlkesi.....	63
3.2.1	Detektörün Dış Yapısı.....	63
3.2.2	Detektörün İç Yapısı	67
3.3	AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Teknik Özellikleri	71
3.4	AlphaGUARD Detektörünün Kalibrasyon Tekniği.....	73
4.	BULGULAR.....	76
4.1	AlphaGUARD Detektörünün Kalibrasyon Değerleri	76
4.2	AlphaGUARD Detektörü İle Yapılan Ölçümler.....	81
4.2.1	Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi'nde Alınan Ölçümler	84
4.2.2	Isparta İli merkezinde Alınan Ölçümler.....	85
4.2.3	Isparta İli Yedişehitler Mahallesi'nde Alınan Ölçümler	86
4.2.4	Isparta İli Muzaffer Türkeş Mahallesi'nde Alınan Ölçümler	87
4.2.5	Isparta İli Işıkkent Batıkent Mahallesi'nde Alınan Ölçümler	88
4.2.6	Isparta İli Yalvaç İlçesi M. Y. Okulu'nda Alınan Ölçümler.....	89
4.2.7	Isparta İli Davraz Mahallesi'nde Alınan Ölçümler.....	90
4.2.8	Isparta İli Halıken Mahallesi'nde Alınan Ölçümler.....	91
4.2.9	Isparta İli Piri Mehmet Mahallesi'nde Alınan Ölçümler	92
4.2.10	Isparta İli Gökçay Mevkii'nde Alınan Ölçümler	93
5.	SONUÇ	94
	KAYNAKLAR	98
	ÖZGEÇMİŞ	I

ÖZET**ISPARTA İLİNDE RADON YOĞUNLUĞUNUN
ÖLÇÜLMESİ VE HARİTALANDIRILMASI**

Radon, kayalardaki ve topraktaki Uranyum-238' in bozunma zincirinin bir halkası olan renksiz, kokusuz ve duyu organlarıyla algılanamayan radyoaktif bir gazdır. Günlük hayatta sürekli maruz kaldığımız radyasyonun yaklaşık %50'sinin Rn izotoplarından, özellikle de Rn222' den kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bu konudaki çalışmalar 1956 yılında İsviçre'de başlamış ve özellikle 1980 sonrasında yapılan araştırmalarla Radon gazının çevresel radyasyon üzerindeki katkısı ve ortama yayılma mekanizması anlaşılmıştır. Kayalardaki U238'in bozunması sonucu üretilen Radon gazı difüzyon yoluyla toprağa, oradan da atmosfere veya ortama yayılmaktadır. Gazın birikmesiyle, Rn yoğunluğu kapalı mekânlarda veya iyi havalandırılmayan yerlerde kritik değerlere ulaşabilmektedir. TAEK bu kritik değerleri evlerde 400 Bq/m³, sanayi ve işyerlerinde 1000 Bq/m³ olarak belirlemiştir. Yüksek dozlarda maruz kalındığında özellikle akciğer kanseri riskini artırdığı için, Radon yoğunluğu fazla olan yerleşme birimlerinde tehlike yaratmaktadır. Bu çalışmada Isparta İli sınırları içinde belirlenen noktalarda AlphaGUARD Radon detektörü kullanılarak Rn yoğunlukları ölçülerek sonuçları irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radon, radyasyon, Rn yoğunluğu, AlphaGUARD.

ABSTRACT**MEASURING AND MAPPING OF RADON
CONCENTRATION IN ISPARTA**

Radon, which is in the decay chain of Uranium-238 available in rocks and soil, is a colorless, odourless and a radioactive gas that can not be observed by human sense. It had been observed that nearly %50 of the radiation we are exposed in daily life is coming from Rn isotopes, especially from Rn222. Investigations about the subject had started in Switzerland in 1956 and by the researches had been made after 1980s the affects of Radon on environmental radiation and its diffusion mechanism had been understood. The Radon gas produced by the decay of U238 in rocks diffuses into soil and then into atmosphere or environment. When accumulates in closed localities or in unventilated places Rn concentrations may reach to critical values. TAEK had defined this critical values as 400 Bq/m³ in houses and 1000 Bq/m³ in industrial places. In case of exposure of high concentration, it especially increases lung cancer risk, that is why Radon creates danger in localities of high concentration. In this thesis, the Rn concentrations in Isparta had been measured and examined by using AlphaGUARD Radon detector.

Key Words: Radon, radiation, Rn concentration, AlphaGUARD.

KISALTMALAR DİZİNİ

Rn	: Radon
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
Sv	: Sievert
Bq	: Becquerel
U	: Uranyum
Ra	: Radyum
EC	: Electron Capture
eV	: Elektron Volt
Ci	: Curie
PM	: Photo Multiplier
ICRU	: International Commity of Radiation Units
MKS	: Meter, Kilogram, Second
REM	: Roentgen Equivalent Man
rH	: Relative Humidity
rad	: Radiation Absorbed Dose
Gy	: Gray
UNSCEAR	:United Nations Scientific Committee On The Effects Of Atomic Radiation
ICRP	: International Commission on Radiological Protection
NRPB	: National Radiological Protection Board
DSP	: Digital Signal Processing
ADC	: Analog-Digital Converter
DC	: Direct Current
CPM	: Count Per Minute
NIST	: National Institute of Standarts and Technology
Fcc	: Face Centered Cubic
SRM	: Standart Reference Materials
SI	: System International

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Safya
Şekil 1.1	Çevremizdeki radyasyonun etmenlerine göre yüzde dağılımı 2
Şekil 2.1	Kararlı çekirdekler için N-Z grafiği. 6
Şekil 2.2	Uranyum bozunma zincirindeki izotoplar ve bazı fiziksel özellikleri. .. 11
Şekil 2.3	Uranyum bozunma zincirinin şematik gösterimi 12
Şekil 2.4	Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi 13
Şekil 2.5	Bir α parçacığının ve çekirdeğin potansiyel enerjileri. 20
Şekil 2.6	Bir sis odasından geçen α taneciklerinin bıraktığı izler. 21
Şekil 2.7	Yapay radyoaktif çekirdek sayısının zamana bağlı değişimi. 26
Şekil 2.8	Silindirik orantılı sayaç geometrisi ve ölçme süreci. 30
Şekil 2.9	Atma yüksekliğinin gerilime göre grafiği. 31
Şekil 2.10	Bir sintilasyon detektörünün çalışma ilkesi. 33
Şekil 2.11	Foto çoğaltıcı tüpün çalışma şeması. 37
Şekil 2.12	n ve p tipi yarıiletkenler. 40
Şekil 2.13	Rn elementinin periyodik tablodaki yeri. 43
Şekil 2.14	Z=86 olan Rn'nin atomik elektron dizilimi. 44
Şekil 2.15	U238 serisinin Rn222' ye kadar olan bozunum şeması. 48
Şekil 2.16	Doğada en çok bulunan iki Rn izotopunun bozunma zincirleri. 50
Şekil 2.17	Rn' nin difüzyonunun şematik gösterimi. 51
Şekil 2.18	Radon'un binalara giriş noktaları 54
Şekil 3.1	AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü. 61
Şekil 3.2	AlphaGUARD ile yapı malzemelerindeki Radon ölçümü. 62
Şekil 3.3	AlphaGUARD ile toprakta Radon ölçümü için kullanılan sistem. 63
Şekil 3.4	AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları 64
Şekil 3.5	AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları 64
Şekil 3.6	AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları 65
Şekil 3.7	AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları 66
Şekil 3.8	AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları 66
Şekil 3.9	AlphaGUARD detektörünün iyonizasyon çemberinin şematik çizimi .. 69
Şekil 3.10	AlphaGUARD' ın sinyal işleme biriminin blok diyagramı. 70
Şekil 3.11	Kalibrasyon işlemleri için kullanılan yayılma tüpü. 74

Şekil 4.1	Konteynırın temizlenmesi için yapılan bağlantıya ait şema.	77
Şekil 4.2	AlphaGUARD kalibrasyon bağlantı şeması.	78
Şekil 4.3	Kalibrasyonun tamamında alınmış olan veri seti.	79
Şekil 4.4	Rn222 yoğunluğu ve ölçüm hatası örnek grafiği.	81
Şekil 4.5	Sıcaklık ölçümü örnek grafiği.	82
Şekil 4.6	Basınç ölçümü örnek grafiği.	82
Şekil 4.7	Bağıl nem ölçümü örnek grafiği.	83
Şekil 4.8	Süleyman Demirel Üniversitesi' inde alınan ölçümler.	84
Şekil 4.9	Isparta İli merkezinde alınan ölçümler.	85
Şekil 4.10	Isparta İli Yedişehitler Mahallesi'nde alınan ölçümler.	86
Şekil 4.11	Isparta İli Muzaffer Türkeş Mahallesi'nde alınan ölçümler.	87
Şekil 4.12	Isparta İli Işıkkent Batıkent Mahallesi'nde alınan ölçümler.	88
Şekil 4.13	Isparta İli Yalvaç İlçesi Meslek Yüksek Okulu'nda alınan ölçümler.	89
Şekil 4.14	Isparta İli Davraz Mahallesi'nde alınan ölçümler.	90
Şekil 4.15	Isparta İli Halıkent Mahallesi'nde alınan ölçümler.	91
Şekil 4.16	Isparta İli Pri Mehmet Mahallesi'nde alınan ölçümler.	92
Şekil 4.17	Isparta İli Gökçay Mevkii'nde alınan ölçümler.	93
Şekil 5.1	Belirlenen noktalarda alınan veriler sonucunda ortalama Radon yoğunlukları.	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Doğada bilinen dört doğal radyoaktif seri..... 10
Çizelge 2.2	Bazı izotoplardan salınan α ' ların menzil, enerji ve yarı ömürleri..... 20
Çizelge 2.3	Sintilasyon detektörlerinin bazı özellikleri. 36
Çizelge 2.4	SI birim sistemindeki radyoaktivite birimleri 41
Çizelge 2.5	Radon' un 33 farklı izotopunun fiziksel özellikleri. 47
Çizelge 2.6	En çok bulunan Rn izotopunun (Rn222) ürünlerinin özellikleri..... 49
Çizelge 2.7	Bazı yapı malzemelerinin ortalama Rn yoğunlukları (Bq/m ³)..... 55
Çizelge 2.8	Bazı ülkelerde kabul edilen Rn sınır değerleri (Bq/m ³). 58
Çizelge 3.1	AlphaGUARD monitörünün bazı teknik ve fiziksel özellikleri..... 72
Çizelge 3.2	NIST SRM ' ye ait bazı önemli fiziksel özellikler..... 74
Çizelge 5.1	Radon ölçümlerinin yapıldığı yerleşimler ve ortalama yoğunluklar.. 97

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tamamlanmasında gerekli teçhizat ve laboratuvar imkanlarını hazırlayan ve zamanını ayıran danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU' ya; yine ölçümler için kullanılan AlphaGUARD cihazı sağlayan ve yardımlarını esirgemeyen hocam Prof. Dr. Nevzat ÖZGÜR'e; değerli arkadaşım Öğr. Gör. Veli ÇAPALI' ya ve desteklerini daima hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Hakan AKYILDIRIM

1. GİRİŞ

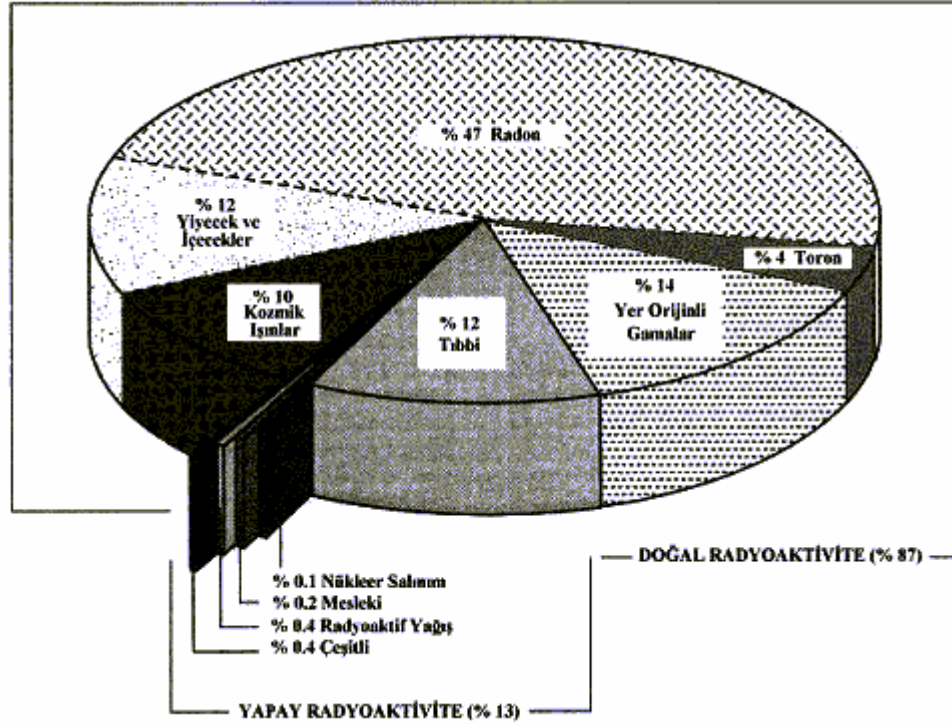
Sağlık sorunlarının oluşumunda temel iki neden vardır: bünyesel ve çevresel etmenler. Çevresel etmenler ve bunlara neden olan ögeler halk sağlığı açısından giderek daha önemli olmaktadır ve bu etmenlerin toplum sağlığı üzerindeki etkileri kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Bu tez çalışmasında, önemi ülkemizde yeni yeni kavranan çevresel etmenlerden birisi olan ve doğal radyasyonun büyük kısmını oluşturan Radon kirliliği incelenmiştir.

Radyasyon sürekli iç içe olduğumuz, yaşadığımız çevrenin bir parçasıdır. Radyasyonun temel kaynakları kozmik ve kozmojen radyasyon, kayalar ve toprakta bulunan doğal radyo nüklidlerden kaynaklanan radyasyon, havadaki ve yiyeceklerdeki doğal radyoaktif maddeler ve kozmik ışımalardır. Doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılan radyasyon, yaptığı etki bakımında da iyonlaştırıcı iyonlaştırmayan 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. Bu çalışmalarda alınan doza en büyük katkının atmosferik ortamdaki doğal radyo nüklidlerden geldiği tespit edilmiştir

Çevremizde sürekli var olan doğal radyasyonun neredeyse %50'si Radon gazı ve onun kısa ömürlü ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Radon gazından dolayı maruz kalınan yaklaşık yıllık doz 1,3 mSv' dir. 1980' li yılların ortalarından itibaren Radonun her yerde bulunduğu bilgisinin yayılması, radyasyon konusuna yeni bir bakış açısı getirmiştir ve bu tarihten itibaren de özellikle kapalı ortamlarda Radon yoğunluğunun ölçülmesine yönelik araştırmalar hız kazanmıştır.

Radon gözle görülmeyen ve duyuvar vasıtasıyla algılanamayan renksiz, tatsız, kokusuz bir gazdır. İnsan yaşamında maruz kalınan doğal radyasyonun neredeyse yarısını oluşturan Radon, 1899 senesinde Ernest Rutherford ve 1900 senesinde Friedrich Ernest Dorn tarafından, bozunma ürünü olarak yaydığı alfa parçacığı

sayesinde keşfedilmiştir. Radon, Uranyumun ($^{238}_{92}\text{U}$) radyoaktif bozunma zinciri içerisinde ve kendisinden önce gelen Radium ($^{226}_{88}\text{Ra}$) 'un bir alfa vererek bozunmasından ortaya çıkarmaktadır. Radonun birçok izotopu vardır ve bunlardan sadece ikisi çevredeki radyasyon miktarına önemli etki yapmaktadır. Bunlardan en uzun ömürlü olan $^{222}_{88}\text{Rn}$ 3,82 günlük; $^{220}_{88}\text{Rn}$ 51,5 ise saniyelik yarı ömürlere sahiptir.



Şekil 1.1 Çevremizdeki radyasyonun etmenlerine göre yüzde dağılımı.

Havada bulunan Radon gazının kaynağı karasaldır. Toprakta, kaya ve kayalarda bulunan Uranyumun bozunması sonucunda difüzyon yolu ile kolaylıkla havaya karışabilmektedir. Bu yüzden Radon gazı yoğunluklarının belirlenmesine yönelik ölçümler açık havada, binalarda, toprakta, suda ve yapı malzemelerinde yapılmalıdır ve ortamın jeofiziksel ve jeokimyasal özellikleri dikkate alınmalıdır.

Yapılan araştırmalar açık havada radyasyon yoğunluğunun oldukça düşük seviyelerde seyretmekte olduğunu göstermektedir. Ancak aynı durum kapalı ortamlar

için doğru olmayabilir. Radon çeşitli yollar ile bina içlerine girebileceğinden ve insanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekânlarda geçirdiklerinden Radon'a maruz kalmaları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Binaların yapıldığı arazide bulunan doğal Uranyumun miktarı ve Uranyum'dan oluşan Radon'un bina tabanında bulunan aralıklardan içeri sızması, binanın yapı malzemesinden kaynaklanan Radon'un oda havasına karışması radyasyon miktarını artıran önemli etkenlerdir.

Binalardaki Radon kaynağının büyük bir kısmı, binanın temelindeki toprak ve kayalardır. Radon gazı, toprak boyunca yükselerek binanın altında hapsolmakta ve basınç oluşturmaktadır. Bina altındaki bu yüksek basınç nedeniyle gazlar zemindeki çatlaklar, yapı bağlantı noktaları, duvar çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası boşluklarından bina içlerine sızmaktadır. Ayrıca yapı malzemeleri, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gaz ve içme sularında bulunan Radon da bina içi yoğunluğunu artırmaktadır. Bina içi Radon yoğunluğunu değiştiren diğer etmenler ise topraktaki ve yapı malzemelerindeki Radyum miktarı, toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı, difüzyon potansiyeli, toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve yalıtım niteliği, binadaki havalandırma kapasitesi, iklim koşulları, iç-dış hava sıcaklık ve basınç farkıdır.

Toprak ve yerküre asıllı pek çok yapı malzemesi atmosferdekenden yaklaşık $10^3 - 10^4$ daha fazla Radon gazı konsantrasyonuna sahiptir. Binalarda Radon miktarını etkileyen diğer önemli bir unsur da binanın yapıldığı malzemenin özelliğidir. Yapı malzemesi olarak kullanılan toprak, taş ve çimento elde edildikleri bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak az veya çok Uranyum içerebilir ve meydana gelen Radon sürekli olarak bina içine sızabilir. Özellikle pomza ve benzeri yapı malzemelerinin diğerlerine göre daha çok Radon içerdiği bilinmektedir.

Soğuk havalarda binaların ısıtılması sonucu bina içindeki basınç dış ortamdaki basınca göre daha az olacağından bina içindeki Radon oranı yükselir. Aynı durum rüzgârlı havalar için de geçerli olduğundan Radon oranı bina içerisinde artmaktadır.

Yaz aylarında ise iyi havalandırılmış binalar dış ortama ile yaklaşık eşit basınca sahip olacağından ortamdaki Radon seviyesi azalmaktadır.

Uluslararası Radyasyon Korunması Komitesi, Radona maruz kalma konusunu inceleyerek "Evde ve İşyerinde Radon222' ye Karşı Korunma" konusunda 65 No' lu bir rapor hazırlamıştır. Bu raporda Radona maruz kalma sınırları belirlenerek, bazı sınır değerler tavsiye edilmiş ve senelik doz için bir eylem seviyesi tespit edilmiştir. Eylem seviyesi 3–10 mSv arasında kabul edilmiştir. Bu dozlara karşılık gelen Radon yoğunluğu evlerde 200–600 Bq / m³, işyerlerinde ise 500–1500 Bq / m³ arasındadır. Avrupa ülkelerinde bu değer yılda 400 Bq/m³, Kanada' da ise 800 Bq/m³ olarak kabul edilmiştir Ülkemizde TAEK (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu) Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinde solunum yoluyla izin verilen Radon yoğunluğu sınırlarının, yıllık ortalama olarak evlerde 400 Bq/m³, iş yerlerinde ise 1000 Bq/m³ değerlerini aşamayacağını bildirmiştir.

2. KAYNAK BİLGİSİ

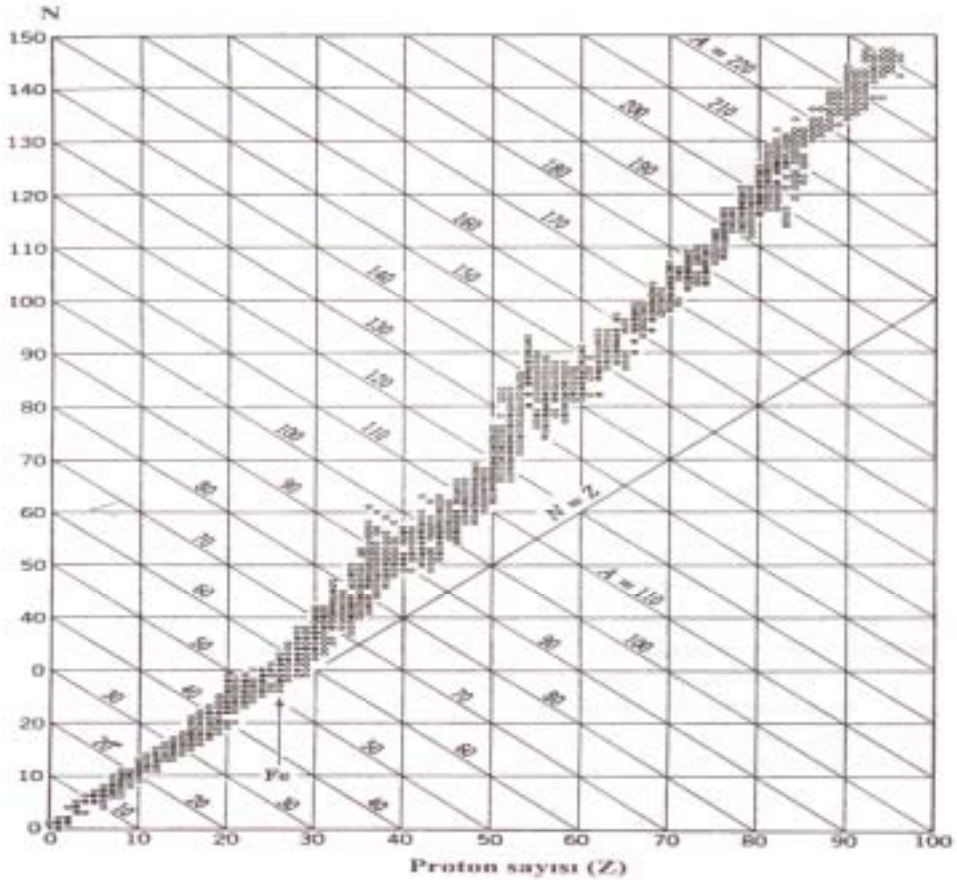
Tezin bu bölümünde, tezin hazırlandığı konu olarak seçilen Radon gazının bir radyoaktif element olması nedeniyle fiziksel açıdan radyoaktivite olgusuna değinilmiştir. Tarihçe, çekirdek kararlılığı ve kararsızlığı, radyoaktif bozunma türleri ve bunların ölçülmesinde kullanılan detektörler, yapay ve doğal radyoaktivite gibi konular verilmiş ve konuya ilişkin bazı matematiksel çıkarımlar da yapılmıştır.

2.1 Radyoaktivite Nedir?

Radyoaktivite ilk kez 1896 yılında H. Becquerel tarafından keşfedilmiş ve 1911 yılında E. Rutherford'ın çekirdekli atom teorisi ile bu alandaki çalışmalar ivme kazanmıştır. Radyoaktivite kararsız olan bir elementin, çeşitli parçacıklar salarak veya ışınım yaparak kararlı ve başlangıçtakinden fiziksel ve kimyasal olarak farklı bir elemente dönüştüğü bir süreç olarak tanımlanabilir. Her atomun çekirdeği şüphesiz kararsız değildir; yani radyoaktivite çekirdek için ayırt edici fiziksel bir özelliktir. Kararsız olan çekirdekler alfa (α), beta (β) ve gamma (γ) gibi yüksek enerjili parçacıklar salarak kararlı hale gelirler. α parçacıkları iki nötron ve iki protonlu Helyum (${}^4_2\text{He}$) çekirdekleridir. β parçacıkları yüksek enerjili elektronlardır. Bazı radyoaktif süreçlerde elektronların karşıt parçacıkları olan ve pozitron (β^+) adı verilen ürünler ortaya çıkmaktadır. γ ise bildiğimiz manada fotonlardır ve oldukça yüksek enerjilidirler. Bu üç radyasyon türü hakkında daha ayrıntılı bilgi ileriki bölümlerde verilecektir.

Radyoaktivitenin atom çekirdeğinin “kararlılığı” ve “kararsızlığıyla” ilişkili olduğu açıktır. O zaman kararlılık ve kararsızlığı Çekirdek Fiziği açısından incelemek gerekmektedir. Bir atomun çekirdeğinin Çekirdek Fiziği açısından temel yapı taşları nükleon adı verilen, doğadaki temel yük birimi olan +e yüküne sahip proton (p) ve yüksüz nötronlardır (n). Çekirdek içerisinde nükleonlar çeşitli etkileşmeler neticesinde bir arada bulunurlar: Kütle çekim etkileşmesi – ki çekirdek boyutlarındaki etkisi ihmal edilebilir mertebededir-, protonları bir arada tutan güçlü

etkileşme, yine sadece protonlar arasında olan elektromanyetik etkileşme ve radyoaktiviteden sorumlu olan zayıf etkileşme. Atom çekirdeğinde nötronların varlığı dengeyi artırmaktadır. Kararlılık bir genelleme değildir ancak bazı çekirdeklere özgüdür ve (nötron sayısı)/(proton sayısı) yani N/Z 'nin değerine bağlıdır. Şekil 2.1'de bilinen çekirdeklerin n ve p sayılarına göre dağılımı verilmiştir. Görüldüğü gibi kararlılık eğrisi ve civarındaki dar kararlılık bölgesi $N=Z$ olan hafif çekirdekleri temsil ederken daha ağır çekirdeklere gidildikçe $N/Z > 1$ olmaktadır. Kararlı en ağır çekirdek $^{209}_{83}\text{Bi}$ için bu oran yaklaşık 1,5'tir. $N/Z > 1,5$ olan diğer tüm çekirdekler ise kararsızdırlar. Kararlı çekirdeklerin toplam sayısı 300 kadardır ve yalnız 40 tanesi doğaldır. Bilinen 274 kararlı izotoptan 162 tanesinin proton ve nötron sayıları çifttir. N ve Z 2, 4, 8 gibi çift sayılar olduğunda bunlara “çift-çift çekirdekler” denir. Kararlı izotopların 53'ünde N çift, Z tek; 55'inde N tek, Z çift ve yalnızca 4'ünde N ve Z tektir (tek-tek çekirdekler). Birkaç istisnai hal dışında çift-çift çekirdekler tek-tek çekirdeklerden daha kararlıdır.



Şekil 2.1 Kararlı çekirdekler için N-Z grafiği.

2.2 Radyoaktivitenin Keşfi ve Kısa Tarihçe

1802 yılında İngiliz kimyacı ve meteorolog John Dalton o zamana kadar maddenin yapısıyla ilgili ortaya atılmış fikirlerden ve kendi çalışmalarından yola çıkarak ilk atom modelini geliştirdi. J. Dalton'un modeline göre madde küçük parçalardan oluşuyordu ve bu yapı taşları her element için farklı kütleye sahipti. Yani atom kütlesi maddenin fiziksel bir karakteriydi. Elementlerin birbirleriyle yaptıkları basit bağlanmaları açıklaması açısından Dalton Atom Modeli bir basamak teşkil etti, ancak atomu bölünemez kabul etmesi kuramının eksik yanındı.

Dalton Atom Modeli'nin atomun bölünemezliğine dair varsayımı 1897 yılına kadar kabul gördü. Bu dönemde atomların kütleleri ve yarıçapları yaklaşık olarak biliniyordu 1897'de İngiliz deneysel fizikçi Joseph John Thomson eksi (-) yüklü elektronu keşfetmesi bu varsayımı çürütmüş oldu. Thomson yüksek vakumlu katot ışını tüpünde elektriksel boşalmanın doğası üzerine çalışmalar sonucunda, ışınların elektrik ve manyetik alanlar tarafından sapıtılması gözlemlendi ve bu sonuç "atomdan daha küçük parçacıkların" varlığının kanıtı olarak yorumlandı. Daha sonra J.J. Thomson elektronun e/m oranını hesapladı ve bunun oldukça yüksek bir oran olduğunu buldu. Elektron gibi eksi yüklü bir parçacığın varlığı yüksüz oldukları önceden de bilinen atom içerisinde zıt yüklü başka çeşit parçacıkların da olması gerekliliği düşüncesini doğurdu. J.J. Thomson bu çalışmaları ile atom içerisinde negatif yüklü ve atomdan çok daha küçük parçacıkların bulunduğunu göstermiştir ve 1904 yılında kendi adı ile anılan atom modelini önermiştir. Bazen bu modelden bahsedilirken üzümlü kek modeli de denilmektedir. Modele göre; madde, küre şeklindeki atomlardan teşekkül eder. Atomda negatif yüklü elektronlar vardır ve elektronların kütlesi atomun külesinden çok küçüktür. Elektriksel bakımdan yüksüzlüğü sağlamak için atomun geri kalan kısmı artı yüklü olmalıdır. Artı yük kütlenin çok büyük bir kısmını oluşturduğuna göre atom, artı yüklü kütlenin homojen olarak dağıldığı bir küredir. Elektronlar bu küre içinde elektriksel yüksüzleşmeyi sağlayacak şekilde serpilmişlerdir.

1896 senesi Mart ayında, o sıralar hem Uranyum tuzlarının fosfor esanslığı üzerinde ve hem de yeni keşfedilen röntgen ışınları üzerinde çalışan ve bazı kimyasallar yardımıyla bunların yayılmalarını sağlamaya uğraşan Fransız fizikçi Henri Becquerel, laboratuvarındaki çekmecesini açtığında büyük bir sürprizle karşılaştı. Kapkaranlık bir ortamda olmasına rağmen bazı fotoğraf camları bulanıklaşmıştı. Bunu açıklamak ilk aklına gelen, güneş ışığının etkisiyle kristallerin ışını yaydığı ve fotoğraf camını sislendirdiğiydi. İlk deneyleri onun doğru yolda olduğunu desteklese de hava bozunca olayın seyri birdenbire değişti. Becquerel, kristallerin güneş ışığından etkilenmesini engellemek için kimyasallar kullanarak camları tekrar çekmeceye koydu. Camları dışarı çıkardığında, Uranyumlu kristallerden oluşan camlarda artık sisin bulunmayışına oldukça şaşırıldı. Ancak bu durum, bugün bir atom çekirdeğinin tanecikler veya elektromanyetik ışınlar yayarak kendiliğinden parçalanması olarak bilinen radyoaktivitenin keşfedilmesiydi.

Becquerel'in radyoaktiviteyi buluşu atomun proton ve elektronlardan oluşturduğunu doğrulamıştır. Ayrıca 1909' da iki bilim adamı H. Geiger ve E. Marsden alfa taneciklerinin ince metal levhalardan saçılmalarını araştırırken, alfa parçacıklarından birçoğunun sadece küçük sapmalara metal levhayı delip geçtiğini, ancak 10.000' de birinin neredeyse gerisin geriye saçıldıklarını deneysel olarak gözlemlenmiştir. Bu gözlemler Thomson atom öngörüsüne pek uymuyordu çünkü kütle bakımından bir elektronun 7300 katı olan alfa parçacıklarının kendisine nazaran çok küçük olan elektronlar nedeniyle 180 derecelik açılarla saçılmaları mümkün değildi. Thomson modeline göre alfa tanecikleri sadece küçük açılarla saçılmalıydı.

Bu gelişmeler ışığında olaya en uygun açıklama 1911 yılında Rutherford'dan verilmiştir. Rutherford benzeri bir deneyi ince altın yapraklarını alfa tanecikleriyle bombardıman ederek gerçekleştirmiş ve meşhur deneyi sonucunda Geiger ve Marsden ile aynı sonuca ulaşmıştır. Rutherford, atomun artı yükünün ve kütesinin neredeyse tamamının çekirdek adı verilen küçük bir hacimde toplandığını ve çekirdek çevresindeki kısmın boş olduğu tezini ileri sürmüştür. Böylece alfa taneciklerinin küçük ve büyük açılı saçılmalarının açıklaması yapılabilmektedir. Böylece atomun yapısı konusunda yeni bir anlayış doğmuştur.

2.3 Doğal Radyoaktivite

Bilimsel bulgulara göre Dünya ve Güneş Sistemi'nin diğer gezegenleri yaklaşık dört buçuk milyar yıl önce Demir (Fe), Karbon (C), Oksijen (O), Silikon (Si) bakımından zengin maddeler, diğer ortam ve ağır elementler olmadan oluşmuşlardır. Bu elementler ise yaklaşık on beş milyar yıl önce gerçekleştiği düşünülen Büyük Patlama (Big Bang) sonucunda oluşan hidrojen ve helyumdan sırayla yaratılmışlardır. Büyük Patlama'dan Güneş Sistemi'nin oluşmasına kadar geçen on milyar yıl boyunca Hidrojen (^1_1H) ve Helyum (^4_2He) yıldızlar ve süper novalardaki ağır elementleri oluşturmuşlardır. Bizler uzun zaman önce ölmüş olan bu yıldızların kalıntılarımız. Ama o zamandan bu yana kararlı çekirdeklere bozunmaktadırlar. Bir kaç radyoaktif elementin yarı-ömrü dünyanın yaşına kıyasla çok uzundur ve bugün hâlâ bunların radyoaktiviteleri gözlenebilmektedir. Bunun gibi dışardan herhangi bir etki olmadan bozunan elementlere doğal radyoaktif elementler; bu olaya da doğal radyoaktivite denir. Yani bozunuma uğrayan radyoizotop doğada mevcuttur veya doğada bulunan diğer radyoizotopların bozunması sonucu ortaya çıkar. Doğal radyoaktiflik çevresel radyasyonun esas kısmını oluşturmaktadır ve muhtemelen dünyaya benzer gezegenlerin iç sıcaklığından sorumludur.

Her ne kadar diğer türlerin de uzun ömürlü doğal radyoaktif elementleri varsa da günümüzde gözlenenlerin çoğu çok ağır elementlerden oluşmuşlardır ve hiç kararlı izotopları yoktur. Bu radyoaktif çekirdekler α ve β yayınlamaya Z ve A sayılarını azaltarak sonuçta kararlı bir çekirdeğe ulaşırlar. Alfa bozunması A'yı dört birim azaltırken, beta bozunması ise A sayısını değiştirmez. Bozunma süreci çekirdeğin zincirin en uzun ömürlü üyesine götürme eğilimindedir ve eğer bu çekirdeğin ömrü en azından Dünya'nın yaşı mertebesindeyse bu aktiflik bugün de gözlenebilir. Genellikle ağır çekirdekleri olan doğal radyoizotoplar şu radyoaktif serilere üyedir: Toryum ($^{232}_{90}\text{Th}$), Neptünyum ($^{237}_{93}\text{Np}$), Uranyum ($^{238}_{92}\text{U}$) ve Aktinyum ($^{235}_{92}\text{U}$). Tarihsel sıralama söz konusu olduğunda en son keşfedilen seri Neptünyum serisidir. n bir tamsayı olmak üzere bu doğal radyoaktif seriler sırayla $4n$, $4n+1$, $4n+2$ ve $4n+3$ ile temsil edilirler. Bozunma zinciri sonucunda yukarıdaki kararsız çekirdeklerden

Toryum, Uranyum ve Aktinyum sırasıyla kurşunun kararlı olan $^{208}_{82}\text{Pb}$, $^{206}_{82}\text{Pb}$ ve $^{207}_{82}\text{Pb}$ çekirdeklerine ulaşırken Neptünyum kararlı en ağır çekirdek olan $^{209}_{83}\text{Bi}$ Bizmuta dönüşür. Neptünyum serisinin en uzun ömürlü üyesinin yarı ömrü diğerlerinininkine nazaran Dünya'nın oluşumundan bu yana geçen süreye göre çok kısa olduğundan bu seri doğal maddelerde gözlenmez. Aşağıdaki tabloda dört seriye ait bazı temel özellikler verilmektedir. Ayrıca Şekil 2.2'de ve Şekil 2.3'de bu serilerden en tanınanı ve ürünler arasında $^{222}_{86}\text{Rn}$ 'nin da bulunduğu Uranyum serisi gösterilmektedir.

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

Çizelge 2.1 Doğada bilinen dört doğal radyoaktif seri.

2.4 Radyoaktif Bozunmayla İlgili Temel Kavramlar

2.4.1 Bozunma (Parçalanma) Sabiti ve Hızı (Aktiflik)

Fiziksel açıdan, bir radyoaktif numune içindeki herhangi bir atomun ne zaman bozunacağını bilmek imkânsızdır. Radyoaktif bozunma zamana göre gelişigüzel ve rasgele gerçekleşir ve ancak istatistik ve de olasılık kuramları çerçevesinde bazı özellikleri bulunabilir. Önemli bir yaklaşım tek tek çekirdeklerle 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 adlandırılır ve genellikle λ ile gösterilir. Radyoaktivitenin sönüm yasasına göre, radyoaktif çekirdeğin yaşı ne olursa olsun bozunma olasılığı λ sabittir.

Radyoaktif elemanın tarihsel adı	Çekirdek	Yayınladığı Işınım	Yarı-Ömür (T)	Bozunum Değişmezi $\lambda(s^{-1})$
Uranyum (U1)	${}_{92}\text{U}^{238}$	alfa	4.5×10^9 yıl	4.88×10^{-18}
Uranyum (UX ₁)	${}_{90}\text{Th}^{234}$	beta	24.1 gün	3.33×10^{-7}
Uranyum (UX ₂)	${}_{81}\text{Pa}^{234}$	beta	1.18 dakika	9.77×10^{-5}
Uranyum (UZ)	${}_{81}\text{Pa}^{234}$	beta	6.7 saat	2.88×10^{-5}
Uranyum (UII)	${}_{92}\text{U}^{234}$	alfa	2.5×10^5 yıl	8.8×10^{-14}
İonyum (I ₁)	${}_{90}\text{Th}^{230}$	alfa	8×10^4 yıl	2.75×10^{-13}
Radyum (Ra)	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	alfa	1620 yıl	1.36×10^{-11}
Radyum Emanasyonu (Em)	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	alfa	3.82 gün	2.1×10^{-6}
Radyum A (RaA)	${}_{84}\text{Po}^{218}$	alfa, beta	3.05 dakika	3.78×10^{-3}
Radyum B (RaB)	${}_{82}\text{Pb}^{214}$	beta	26.8 dakika	4.31×10^{-4}
Astatin (At)	${}_{85}\text{At}^{218}$	alfa	2 saniye	0.4
Radyum C (RaC)	${}_{83}\text{Bi}^{214}$	alfa, beta	19.7 dakika	5.86×10^{-4}
Radyum C' (RaC')	${}_{84}\text{Po}^{214}$	alfa	1.64×10^{-4} s	4.23×10^3
Radyum C'' (RaC'')	${}_{81}\text{Tl}^{210}$	beta	1.32 dakika	8.75×10^{-4}
Radyum D (RaD)	${}_{82}\text{Pb}^{210}$	beta	19.4 yıl	6.13×10^{-6}
Radyum E (RaE)	${}_{83}\text{Bi}^{210}$	beta	5 gün	1.6×10^{-4}
Radyum F (RaF)	${}_{84}\text{Po}^{210}$	alfa	138.3 gün	5.8×10^{-4}
Talyum (Tl)	${}_{81}\text{Tl}^{206}$	beta	4.2 dakika	2.75×10^{-3}
Radyum G (RaG)	${}_{82}\text{Pb}^{206}$	kararlı	∞	0

Şekil 2.2 Uranyum bozunma zincirindeki izotoplar ve bazı fiziksel özellikleri.

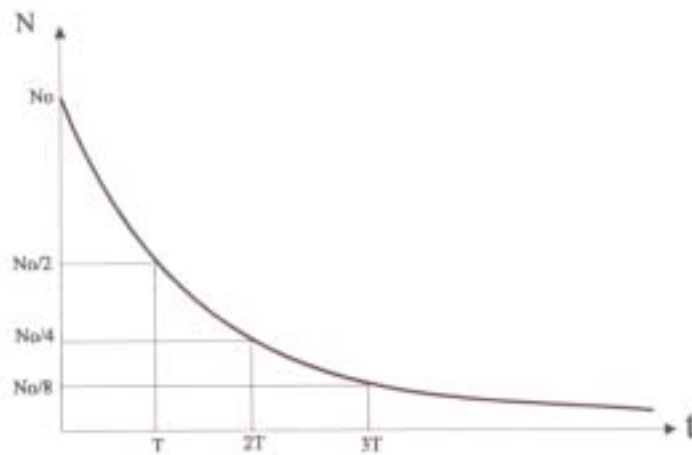
Radyoaktif bir çekirdekte birim zaman aralığında meydana gelen bozunma sayısı çekirdeğin bozunma hızı veya aktivitesi olarak tanımlanır. Eğer herhangi bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye dışarıdan çekirdek ilave edilmiyorsa sonsuz küçük dt zaman aralığı içinde bozunan çekirdek sayısı N ile orantılı olacaktır.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$$

Denklemdaki eksi işareti çekirdek sayısının zamanla azaldığını haber verir. Yukarıdaki diferansiyel denklem çözülerek üstel radyoaktif bozunma yasası elde edilir.

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda dt \longrightarrow \int \frac{dN(t)}{N(t)} = -\int \lambda dt \longrightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Denklemden t zamanı, N(t) t zamanı sonunda arta kalan çekirdek sayısını, N_0 başlangıçtaki (t = 0 iken) çekirdek sayısını ve λ radyoaktif numunenin bozunma sabitini gösterir ve birimi s^{-1} 'dir. Aşağıdaki grafik üstel bozunma denkleminin ait değişimi vermektedir.



Şekil 2.4 Radyoaktif bir numune miktarının zamanla değişimi

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

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

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

$$I = I_0 e^{-\lambda t}$$

Burada $I (= N\lambda)$ t anındaki ve $I_0 (= N_0\lambda)$ da $t = 0$ anındaki bozunma hızlarıdır.

2.4.2 Radyoaktif Bir Numunenin Yarı ve Ortalama Ömrü

Radyoaktif bozunma yasasını ifade eden denklem herhangi bir t anında bozunmadan kalabilen çekirdek sayısını verir. Kuramsal olarak bakıldığında numunedeki tüm çekirdeklerin bozunması için sonsuz zaman geçmesi gerekir. Yani ancak $t \rightarrow \infty$ için $N(t) = 0$ olur. Bununla ilgilenmek yerine radyoaktif maddenin ayırt edici bir özelliği olan yarı ömür kavramı kullanılır. Yarı ömür radyoaktif bir elementin başlangıçtaki çekirdek sayısının yarıya inmesi için geçen zamandır. $T_{1/2}$ ile gösterilen yarı ömrü bulmak için $N = N_0/2$ alırsak

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

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Yarı ömür çekirdeğin kimyasal ve fiziksel etkilerle değişmeyen bir özelliğidir. Buradan bozunma kanununu $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ yazarak yeniden tanımlayabiliriz.

$$N = N_0 e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} t}$$

Bilinen radyoaktif izotopların yarı ömürleri oldukça geniş bir aralıktadır. En kısa yarı ömürlü çekirdek 10^{-21} s ile He, en uzun yarı ömürlü çekirdek ise 10^{17} yıl ile ^{204}Pb ' dir.

Eğer radyoaktif bozunmaya bir olasılık fenomeni olarak bakılırsa bozunma olasılık yoğunluğu fonksiyonu tanımlanabilir.

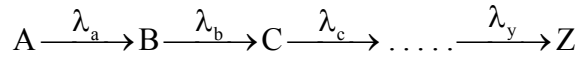
$$P(t)dt = \lambda e^{-\lambda t} dt$$

Çekirdeğin bir t ile t+dt zaman aralığındaki bozunma olasılığını veren yukarıdaki ifadeden radyoaktif bir çekirdeğin bozunması için geçen ortalama zaman hesaplanabilir.

$$T_{\text{ort}} = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt \longrightarrow T_{\text{ort}} = \frac{1}{\lambda}$$

2.4.3 Radyoaktif Seriler ve Radyoaktif Denge

Diğer genel bir durum, bir radyoaktif bozunmanın yine kendisi gibi radyoaktif olan diğer bir çekirdek tarafından meydana getirilmesidir. Böylece A, B, C, ..., şeklinde radyoaktif bozunmalar elde edilir ve bu olay bir radyoaktif seri olarak adlandırılır. Örnek olarak, Uranyum-238 veya Toryum-232 böyle serilerdir. Bu tür bir seri aşağıdaki gibi gösterilir.



Asıl çekirdeğe (A) ana çekirdek, onun oluşturduğu bir sonraki çekirdeğe kız çekirdek (B) ve kızın bozunmasıyla oluşan çekirdeğe (C) torun çekirdek denir. Serinin en sonundaki çekirdek olan Z ise karardır ve bozunmaz.

Bir radyoaktif seride ana çekirdek kız ve torun çekirdeklerinkinden daha uzun bir yarı ömre sahiptir. Bu yüzden ana çekirdek sayısı uzun bir zaman değişmiyor kabul edilebilir. Yani ana çekirdekler, kızlarını değişmeyen bir hızla oluştururlar. Kız çekirdek sayısının artması da birim zamandaki parçalanmayı, yani aktiviteyi yükseltir. Birim zamanda oluşan kız çekirdek sayısı aynı süre içerisinde bozulan ana çekirdek sayısına ulaştığında radyoaktif dengeye ulaşıldığı söylenir.

Denge durumunun matematik açıdan incelemesini yapmak için $t = 0$ anında sadece ana çekirdek bulunduğunu ve torun çekirdeğin kararlı olduğunu varsayalım. Yani $N_A(t = 0) = N_0$, $N_B(t = 0) = N_C(t = 0) = 0$ olsun.

$$dN_A = -\lambda_A N_A dt$$

$$dN_B = (\lambda_A N_A - \lambda_B N_B) dt$$

İlk denklem ana çekirdeğin zamanla azalan sayısını; ikinci denklem de kız çekirdeğin zamanla değişimini verir. Kız çekirdeklerin sayısı ana çekirdeklerin sayısı ile artarken kendi bozunmasıyla azalır. İlk eşitliğin çözümü sonucunda

$$N_A = N_0 e^{-\lambda_A t}$$

denklemini bulunur. İkinci diferansiyel denklemin çözümü içinse $N_B = c_1 e^{-\lambda_A t} + c_2 e^{-\lambda_B t}$ çözümü kullanılırsa B kız çekirdeğinin zamana göre değişimi ve aktivitesi sırasıyla

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

$$I_B = \lambda_B N_B = \frac{\lambda_B \lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

olarak bulunur. Burada λ_A ve λ_B birbirine göre üç şekilde kıyaslanabilir: $\lambda_A \ll \lambda_B$ ise ana çekirdek çok uzun yarı ömürlüdür ve sabit bir hızla bozunur. Böylece $e^{-\lambda_A t} \cong 1$ kabul edilir ve

$$N_B = \frac{N_0 \lambda_A}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t})$$

yazılabilir. Bu eşitlik kalıcı dengeye bir örnektir ve burada zaman arttıkça B türü çekirdekler oluştukları hızla bozunurlar:

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B$$

$\lambda_A < \lambda_B$ ise

$$\frac{\lambda_B N_B}{\lambda_B N_B} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} (1 - e^{-(\lambda_A - \lambda_B)t})$$

olur. Zamanla üstel terim küçülür ve I_B/I_A , $\lambda_B/(\lambda_B - \lambda_A)$ sabit sınır değerine yaklaşır. Aktiflikler değişkendir ama B çekirdekleri A türü çekirdeklerin bozunma sabiti ile bozunur. Bu duruma geçici denge denir. $\lambda_B < \lambda_A$ durumunda A çekirdekleri hızla bozunur ve B çekirdeklerinin aktifliği bir maksimuma ulaştıktan sonra kendi bozunma sabitleriyle bozunmaya başlarlar. A türü çekirdekler sayıca ihmal edilebilir. Yeteri kadar uzun bir zamanda A' ya ait üstel terim sıfır olur ve B bozunma denklemi

$$N_B = \frac{\lambda_A N_0}{\lambda_A - \lambda_B} e^{-\lambda_B t}$$

olur. Yani ikinci tür çekirdekler yaklaşık üstel olarak bozunurlar.

Yukarıdaki ifadeler ancak üçüncü tür çekirdekler kararlı ise geçerlidir. Eğer torun ve sonrasındaki çekirdekler de radyoaktifse başlangıçta A türü çekirdeklerin ilk sayısının N_0 ve diğer tüm çekirdeklerin olmadığı durum için genel bir çözüm

Bateman Denklemleri ile verilir. Serinin n' inci üyesinin aktifliği diğer tüm üyelerin bozunma sabitleri cinsinden verilir.

$$I_n = N_0 \sum_{i=1}^n c_i e^{-\lambda_i t} = N_0 (c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + c_n e^{-\lambda_n t})$$

Buradaki c_i katsayıları aşağıdaki gibidir.

$$c_i = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_m)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{(\lambda_1 - \lambda_m)(\lambda_2 - \lambda_m) \dots (\lambda_n - \lambda_m)}$$

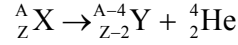
2.5 Radyoaktif Bozunma Çeşitleri

Bazı çekirdeklerin kararlı bir yapıya sahip olamayacak şekilde bir nötron ve proton düzenlenişine sahip olduklarını ve bu yüzden bu tip çekirdeklerin kararsız ya da radyoaktif halden kararlı hale ulaşabilmek için bazı parçacıklar yayımladığını belirtmiştik. Bunlardan en önemli üç tanesi alfa (α) beta (β) ve gamma (γ) radyasyonlarıdır. Alfa ve beta bozunumlarında kararsız çekirdek kütle numarasına göre en kararlı izobara yaklaşır. Gamma bozunmasında ise uyarılmış bir çekirdek durumundan taban durumuna geçilir. Bunlardan ilk ikisi geçen yüzyılın sonlarında ilk kez J. Becquerel, Pierre ve Marie Currie ve diğerleri tarafından gözlemlendiklerinde α ve β parçacıkları olarak isimlendirilmiştir. γ radyasyonunun mahiyeti ise ancak daha sonraları açığa çıkarılmıştır. Ayrıca bu üç radyasyon türü madde ile etkileşip iyonlaşmaya neden olduğu için iyonlaştırıcı radyasyon da denir.

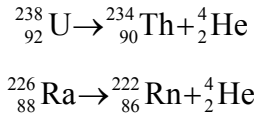
2.5.1 Alfa (α) Bozunması ve Özellikleri

Alfa bozunması, kararsız bir atom çekirdeğinin iki proton ve iki nötrondan oluşan α parçacığının salınmasıyla oluşan bozunumdur. Alfa'nın bir Helyum çekirdeği olduğu

Rutherford ve arkadaşları tarafından 1911'de bulunmuştur. Bozunma sonucunda oluşan ürün çekirdek ana çekirdekten iki birim daha küçük bir atom numarasına ve dört birim daha küçük bir kütle numarasına sahiptir. A çekirdeğin kütle numarasını, Z de atom numarasını göstermek üzere, eğer ana çekirdeği ve yavru çekirdeği sırasıyla X ve Y ile temsil edersek α bozunumu sürecini şu şekilde yazabiliriz:



Çoğu α yayıcılar ağır çekirdeklerdir ki bunlar periyodik cetvelin sonundaki elementlere karşılık gelirler. Örnek olarak ${}^{238}_{92}\text{U}$ ve ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ çekirdeklerinin



bozunmaları verilebilir. Kuramsal açıdan α bozunumunun $A > 150$ olan çekirdekler için geçerli olması gerekirken α yayıcı çekirdeklerin çoğu için $A > 200$ 'dür. Birkaç istisna dışında, daha hafif çekirdeklerin α bozunumu yarı ömürlerinin bu bozunum sürecini mümkün kılmayacak kadar uzun olduğu düşünülmektedir. Bir α parçacığı, hepsi $s_{1/2}$ kabuğundaki iki proton ve iki nötrondan oluşan, sıfır toplam spine ve pariteye (değer eşitliğine) sahip iki kat sihirli bir parçacıktır. Alfa parçacığı sıra dışı bir kararlılığa sahiptir ve bundan dolayı birçok durumda tıpkı proton ve nötron gibi tek bir parçacık gibi davranır. Eğer

$$Q = (M_X - M_Y - M_\alpha)c^2 = 931,48(M_X - M_Y - M_\alpha)$$

laboratuvar çerçevesinde durgun olarak kabul edilen X ana çekirdeğinin bozunmasıyla yayılan enerji ise, parçalanmadan sonra α parçacığının ve yavru çekirdek Y' nin enerjileri şöyle verilir:

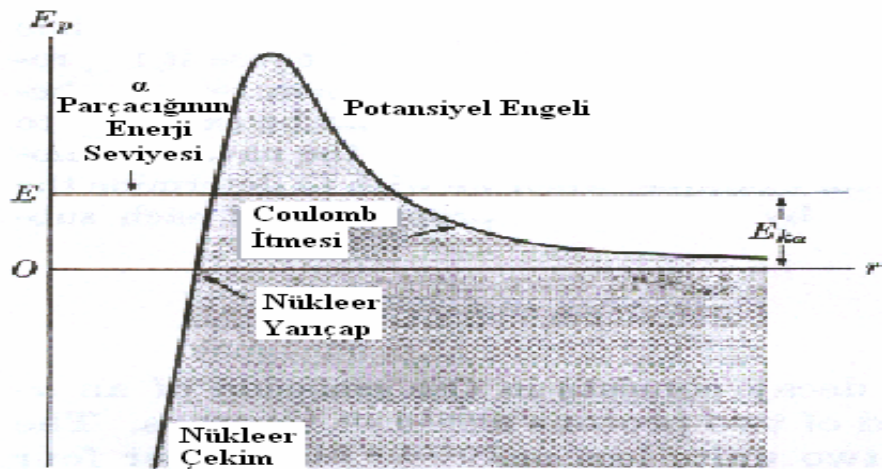
$$E_\alpha = \frac{M_Y}{M_Y + M_\alpha}Q \quad \text{ve} \quad E_Y = \frac{M_\alpha}{M_Y + M_\alpha}Q$$

Bununla birlikte, fiziksel açıdan bakıldığında, çekirdek içerisinde α parçacıkları bulunduğu düşünülmemelidir. Bunun yerine nükleonların hareketinde, kendilerini, kısa bir an için dinamik bir birim olarak davranmaya iten, α parçacığına benzer yapılar oluşturacak guruplaşmalara sokan bir uyum olduğu farz edilmektedir. Böyle bir yapı da çekirdek yüzeyine yakın olduğunda ise bu nükleon guruplarının α parçacığı olarak kaçabilmesi için kesin bir olasılık vardır.

Bir α parçacığının çekirdeğin geri kalan kısmıyla etkileşme potansiyel enerjisi Şekil 2.5’ de gösterilmiştir. Alfa parçacığının enerjisi yaklaşık 4 – 9 MeV arasındadır ve çekirdek yüzeyindeki yaklaşık 40 MeV’lik Coulomb engelinden daha azdır ve α parçacığı sadece potansiyel engelini aşarak kaçabilir. Çizelge 2.2 bazı izotoplar için alfa bozunmasının havadaki menzil, enerji ve yarı ömür özelliklerini vermektedir.

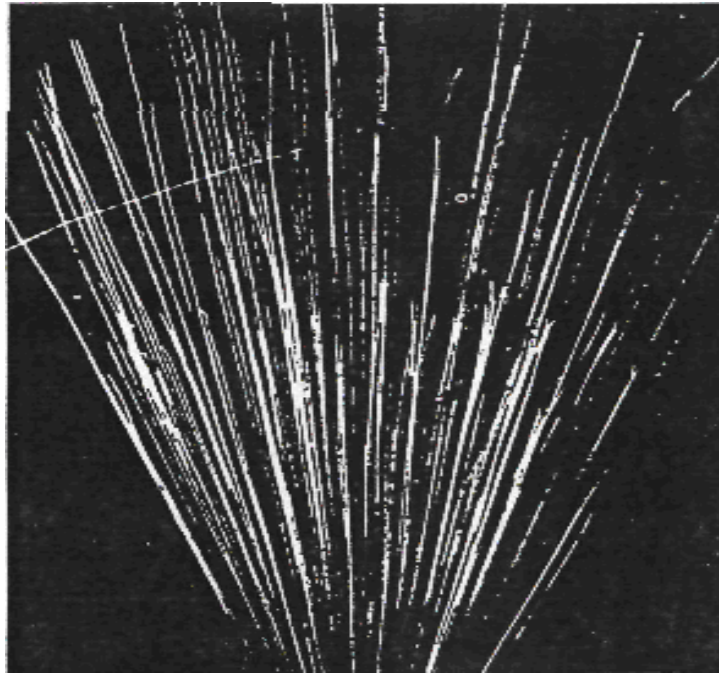
İzotop	Menzil (cm)	E (MeV)	T _{1/2}
RaF ($^{210}_{84}\text{Po}$)	3,842	5,298	140 gün
RaA ($^{218}_{84}\text{Po}$)	4,657	5,998	3,05 dak
RaEm ($^{222}_{86}\text{Rn}$)	4,051	5,486	3,82 gün
ThEm ($^{220}_{86}\text{Em}$)	5,004	6,282	54,5 s
ThC ($^{212}_{84}\text{Po}$)	8,570	8,776	3×10^{-7} s

Çizelge 2.2 Bazı izotoplardan salınan α ’ ların menzil, enerji ve yarı ömürleri.



Şekil 2.5 Bir α parçacığının ve çekirdeğin potansiyel enerjileri.

α parçacıkları yüklü olduklarından içinden geçtikleri madde atomlarını iyonize ederler. Bu özellik α parçacıklarını, ya iyonizasyon miktarını ölçen (iyonizasyon odaları gibi) ya da iyonizasyonu görünür hale getiren (sis odaları gibi) cihazlar kullanarak gözleme yöntemlerini mümkün kılar. Şekil 2.6 radyoaktif bir örnek tarafından yayımlanan α parçacıklarına ait izleri gösteren bir sis odası fotoğrafı verilmiştir. İki farklı menzile karakterine sahip demetler seçilebilmektedir. İyonizasyonun sonucunda α parçacıkları yeteri kadar yavaşlayarak iki elektron yakalayıp yüksüz Helyum atomları oluncaya dek enerji kaybederler. α parçacıklarının He çekirdekleri olduğunu ilk kez 1919 yılında Rutherford, bir numuneden yayılan parçacıkları içi boşaltılmış bir tüp içinde toplayarak göstermiştir. Tüpte meydana getirdiği elektrik boşalması sonucunda Helyum spektrumunu gözlemiştir.

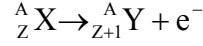


Şekil 2.6 Bir sis odasından geçen α taneciklerinin bıraktığı izler.

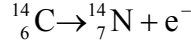
2.5.2 Beta (β) Bozunması ve Özellikleri

Radyoaktif çekirdekler tarafından salınan diğer bir parçacık türü de aslında yüksek enerjili elektronlar olan β parçacıkları ya da β radyasyonudur. Bildiğimiz manada

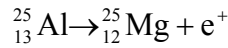
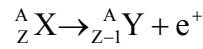
elektronlarla (e^-) yük, spin, durgun kütle yönünden aynı özelliklere sahiptirler. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki ana çekirdekle aynı kütle numarasına sahip olmasına rağmen yavru çekirdek bir birim büyük atom numarasına sahiptir. Demek ki β^- bozunmasında bir nötron bir protonla yer değiştirmektedir ve ana çekirdek ile yavru çekirdek izobardır. Bozunma aşağıdaki denklemle temsil edilir



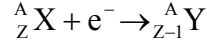
Bu tür radyoaktiviteye örnek olarak ${}^{14}_6C$ izotopu verilebilir. Bu izotop aşağıdaki eşitliğe göre beta salar.



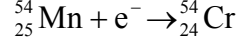
Yukarıdaki sürece ek olarak iki β bozunması şekli daha vardır. İlki pozitif β bozunumu veya pozitron bozunumudur. Pozitronlar elektronlarla aynı kütle ve spine sahip ancak negatif yerine pozitif elektrik yüklü olan parçacıklardır. İlk kez 1927 yılında P. A. M. Dirac tarafından kuramsal olarak öngörülmüş ve 1932 yılında da ilk kez C. Anderson tarafından kozmik ışınlarda gözlenmiştir. β^+ bozunmasında yavru çekirdeğin atom numarası (yükün korunumu kanunu gereğince) ana çekirdekten bir birim küçük; kütle numarası ise (nükleon korunumuna uyacak şekilde) ana çekirdekle aynıdır. Öyle gözüküyor ki β^+ bozunması sonunda bir proton bir nötronla yer değiştirmektedir. Süreç ve ilgili bir örnek aşağıda verilmektedir.



Beta bozunmasının ikinci türü ise elektron yakalaması olarak adlandırılan süreçtir. Bazen çekirdek pozitron salmak yerine en içteki kabuklardan elektron yakalar. Bunlar s yörüngesindeki elektronlardır. s elektronları çekirdeğe oldukça yakın yörüngesimlere sahiptirler ve bir proton tarafından yakalanma olasılıkları göreceli olarak daha büyüktür. Elektron yakalaması (EC – Electron Capture) denilen bu süreç yavru çekirdekteki bir protonun bir nötronla yer değiştirmesiyle sonuçlanır.



Örnek olarak Mn izotopunun Cr' ye dönüşmesi verilebilir.



Elektron yakalamasını, K kabuğundaki boşluğa dıştaki elektronlardan birisinin yerleşmesi sonucunda yavru çekirdekten yayımlanan X ışını takip eder.

Bu üç bozunmanın hepsinde de nötrino adı verilen diğer bir parçacık yayımlanmaktadır. Parçacık yükün korunumu kanununa uyum açısından yüksüz ve toplam kütle esasen gözlenen parçacıklara ait olduğu için çok küçük bir kütleye sahip olmalıdır. Bu iki nedenden dolayı bu yeni parçacık Enrico Fermi tarafından önerilen ve küçük nötron anlamına gelen nötrino olarak adlandırılmıştır. Nötrinolar ν sembolüyle temsil edilmişlerdir.

2.5.3 Gamma (γ) Bozunması ve Özellikleri

Çekirdek tepkimelerinin birçoğunda olduğu gibi hemen hemen tüm alfa ve beta bozunmaları sonucunda ürün çekirdek ya da çekirdekler uyarılmış durumdadırlar. Taban duruma geçiş kısa bir süre sonra bir veya daha fazla foton salınmasıyla mümkün olur ki bu geçiş de gamma ışınımı oluşturur. Gamma (γ) ışınları, tüm ışık türleri gibi elektromanyetik radyasyon sınıfına girer ve enerjileri tipik olarak 0,1 MeV – 10 MeV arasındadır ki bu da 10^4 fm – 100 fm dalga boyu aralığına denk gelir.

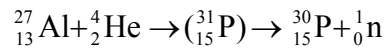
Radyoaktif gamma yayımlanması, optik veya X-ışını geçişleri gibi atomik radyasyon yayımlanmasına benzer. Uyarılmış bir durum daha düşük bir uyarılmış duruma veya taban duruma iki durum arasındaki fark kadar bir enerjiye sahip bir γ ışını (fotonu) yayımlayarak geçer. Yani dışarı salınan çekirdeğin geri tepme enerjisi kadar bir enerji farkıyla. Gamma yayımlanması uyarılmış bağlı durumları olan ($A > 5$) tüm çekirdeklere gözlenir ve genellikle α ve β bozunmalarını izler. Bunun nedeni, bu bozunumlarda ana çekirdeğin ürün çekirdeğin uyarılmış durumunda kalmasıdır.

γ yayınlanmasının yarı-ömrü çok kısadır, genellikle bir nano saniyeden (10^{-9} s) daha küçüktür. Ancak saat, hatta gün mertebesinde yarı-ömürlü gamma yayınlanmaları da vardır. Bu geçişlere izomerik geçişler ve uzun ömürlü uyarılmış durumlara izomerik durumlar veya izomerler (metastable) denir. Bir durumun izomerik bir durum olup olmadığını belirtmenin kesin bir kıstası yoktur. γ yayınlanması ile yarışan bir olay iç dönüşümdür. Bu olayda bir çekirdek enerjisini doğrudan doğruya bir atom elektronuna aktararak bozunur ve laboratuarda bir serbest elektron gözlenir. Bu beta bozunumundan çok farklıdır: Z ve N sayıları değişmez, aynı kalır ve atom uyarılmış durumdadır.

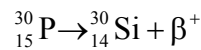
2.6 Yapay Radyoaktivite

Bu bölüme kadar kendiliğinden yani doğal olarak bozunan çekirdekler ve ortaya çıkan radyasyon türleri incelenmiştir. Bunların dışında bir de ancak dışarıdan bazı etkilerle radyoaktif olan çekirdekler de mevcuttur. Bu çeşit çekirdekler yapay radyoaktif çekirdekler denir. 1934 yılında I. Curie ve çalışma arkadaşı F. Joliot bazı hafif elementlerin alfa bombardımanı sonucunda nötron çıkarmalarını incelerken yapay radyoaktiflik olgusunu keşfetmişlerdir.

Alüminyumun alfa tanecikleriyle bombalanmasında



Ara tepkimesi sonucu oluşan ${}_{15}^{30}\text{P}$ çekirdeğinin radyoaktif olduğunu ve



bozunma bağıntısına göre, $T = 2.5$ dakika yarı ömre sahip olup parçalanarak β^+ (pozitron) yayımladığını gözlemlemişlerdir. Fosforun bu radyoaktif izotopuna radyo fosfor adı verilmiş ve böylece hem ilk kez yapma olarak bir radyoaktif madde, hem

de ilk kez pozitron yayınlayan bir izotop elde edilmiştir. Daha sonra bir yandan hızlandırılmış çeşitli yüklü parçacıklarla ve nötronlarla yapılan çekirdek ara tepkimelerinde, öte yandan fisyon olaylarında birçok yeni radyoizotoplar bulunmuştur. Bugün binden fazla radyoizotop bilinmektedir.

Kararlı bir çekirdeğin başka parçacıklarla (alfa, nötron, gamma ...) bombardıman edilmesi sırasında oluşan radyoaktif atom sayısının zamanla nasıl değiştiğini gösteren yasayı bulmak için, t anında var olan radyoaktif ürün atomların sayısını N ile gösterelim. Eğer, bombardıman edici parçacıklarla radyoaktif atomların sabit oluşma hızını k, oluşan radyoizotopun parçalanma sabitini λ ile gösterirsek, radyoaktif atom sayısının artma hızı

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

şeklinde yazılabilir. Buradan

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

$$-\frac{1}{\lambda} \ln(k - \lambda N) = t + C$$

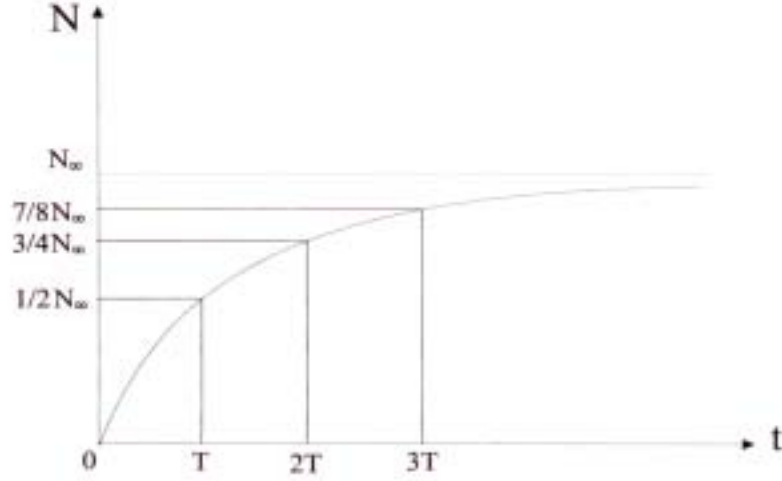
elde edilir. Başlangıç şartı t = 0 iken N = 0 alınırsa

$$C = -\frac{\ln k}{\lambda}$$

olarak bulunur. Böylece çekirdek artma hızı aşağıdaki denklemlerle belirlenir.

$$N = \frac{k}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

Yapay radyoaktif çekirdek sayısı da zamanın üstel bir fonksiyonudur ve zamana göre bu değişimin grafiği Şekil 2.7' de gösterilmektedir. Grafikte $N_{\infty} = \frac{k}{\lambda}$ 'dır.



Şekil 2.7 Yapay radyoaktif çekirdek sayısının zamana bağlı değişimi.

Eğer λt yeteri kadar küçükse seriye açılım sonucu üstel terim $e^{-\lambda t} \cong 1 - \lambda t$ olur ve $N \cong kt$ bağıntısı kullanılabilir. Oluşan yapay radyoaktif maddenin yarı ömrünün 4 – 5 katı beklersek doyma değerine ulaşılır.

2.7 Radyasyonun Ölçüm Yöntemleri

Nükleer radyasyonları tespit etmek için kullanılan tüm detektörlerin temel çalışma ilkeleri benzer özelliklere sahiptir: Radyasyon (ışınım) detektöre girer, detektör materyalinin atomlarıyla etkileşip enerjisinin bir kısmını veya tamamını kaybeder ve atom yörüngelerinden nispeten düşük enerjili elektronların salınmasına neden olur. Bu elektronlar toplanır ve analiz edilmek üzere, elektronik devre tarafından ya akım ya da gerilim şekline dönüştürülür. Detektör materyalinin seçimi ölçülecek radyasyon tipine ve hakkında mevcut bilgiye bağlıdır. Radyoaktif bozunmalar sonucunda salınan alfa parçacıkları veya düşük enerjili (MeV) nükleer reaksiyonlardan yayınlanan yüklü parçacıklar için çok ince pencereci detektörler gereklidir. Çünkü bu parçacıkların katılardaki maksimum menzili $100 \mu\text{m}'$ den

küçüktür. β bozunumlarında yayınlanan elektronlar için bu kalınlığın 0,1 mm - 1 mm aralığında olması gerekirken, γ ışınımı için bu aralık daha fazladır ve hatta 5 cm kalınlıktaki detektörler yüksek enerjili fotonları (enerjisi MeV seviyesinde veya daha fazla) ölçmek için yeterli olmayabilir. Radyasyonun enerjisini ölçmek için çıkış atma genliğinin radyasyon enerjisi ile orantılı olduğu detektörler seçilmelidir. Bu da sökülecek elektronların sayısının fazla olacağı bir detektör materyali seçmekle mümkün olur. İstatistiksel sapmalar hatalar oluştursa da bu, enerjinin doğru ölçülmesini çok fazla etkilemez. Radyasyonun yayınlandığı anı tespit edebilmek elektronların hızla atma haline geçebileceği materyali seçmekle mümkündür; elektron sayısının fazlalığı daha az önemlidir. Birçok değişik parçacığın yayınlandığı bir radyoaktif tepkime durumunda yayınlanan parçacıkların tipini belirlemek için parçacığın kütle ve yükü için farklı sinyaller veren bir materyalin seçilmesi gerekir. Radyasyonun spin veya kutuplanmasını ölçmek için farklı spin veya kutuplanma durumlarını ayırıp çözebilen detektörlere gereksinim duyulur. Alışılmışın dışında yüksek sayma hızı gerektiren durumlarda arka arkaya gelen her radyasyonu hızlı bir şekilde tespit edebilecek detektör seçilmelidir; düşük sayma hızları için her olayın saptanması ve tabansayım etkisinin azaltılması ile ilgilenmemiz gerekir. Son olarak, belirlenecek olan radyasyonun yörüngesinin tekrar oluşturulması ile ilgileniyorsak radyasyonun detektöre girdiği yere duyarlı olan bir detektöre sahip olmamız gerekir.

Görüldüğü gibi detektörün seçimi ölçülmek istenen radyasyonun türü ve özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Her biri farklı fiziksel özellikte olduğu için tüm bu radyasyonları aynı anda ölçebilen bir detektör mevcut değildir; ancak biri veya birkaçını aynı anda gözleyebilen detektörler bulunmaktadır. Bu bölümde önemli olduğu düşünülen üç tip detektörden ve çalışma ilkelerinden bahsedilmektedir: Gazlı sayaçlar (iyonizasyon odası – tez aşamasında kullanılan tip), sintilasyon detektörleri ve yarıiletken detektörler.

2.7.1 Gazlı Radyasyon Detektörleri

Radyasyon detektörlerinin pek çoğu, detektöre gelen radyasyonun oluşturduğu iyonları (veya elektronları) ayırmak ve saymak için bir elektrik alan kullanır. Bu tip

detektörlerin en basiti iyonlaşma odası detektörlerdir. İyonlaşma odaları, plakalarının arasına gaz (ekseriyetle hava) doldurulmuş paralel düzlem kondansatörlerdir. Plâkalar arasındaki elektrik alan iyonların elektronlarla tekrar birleşmesini engeller. Elektron bulutu daha yüksek potansiyelde tutulan plâkaya (artı yüklü plakaya) doğru sürüklenirken, artı yüklü iyonlar da daha düşük potansiyeldeki (eksi yüklü) diğer plâkaya doğru sürüklenirler. Havada bir iyon üretmek için gerekli ortalama enerji yaklaşık olarak 34 eV'dir. Böylece 1 MeV'lik radyasyon en çok 3×10^4 civarında iyon ve elektron üretir. Orta büyüklükte bir iyonlaşma odası (örneğin plakalarının arası 1 cm olan 10 x 10 cm ebatlı) için sığa $8,9 \times 10^{-12}$ Farad ve oluşan gerilim atmaları yaklaşık olarak

$$\frac{(3 \times 10^4 \text{ iyon})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C / iyon})}{8,9 \times 10^{-12} \text{ F}} \cong 0,5 \text{ mV}$$

mertebesindedir. Bu nispeten küçük bir sinyaldir. Analizden önce, standart elektronik düzeneklerle 10 çarpanı kadar yükseltilmelidir.

Sinyalin genliği, oluşan iyonların sayısı ve dolayısıyla radyasyonun iyonlaşma odasında bıraktığı enerji ile orantılıdır ve plâkalar arasındaki gerilimden bağımsızdır. Uygulanan gerilim, elektrotlar arasında sürüklenen iyon ve elektron bulutunun hızlarını belirler. Tipik bir gerilim değeri kabaca 100 V'dir. İyonlar yaklaşık 1 m/s hızlarla hareket ederler ve 1 cm'lik odayı 0,01 saniyede geçerler. Elektronlar daha hareketlidirler ve yaklaşık 1000 kat daha hızlı hareket ederler. Nükleer sayma standartlarına göre bu süre son derece uzun bir zamandır. Aktifliği 1 μCi olan zayıf bir radyoaktif kaynak her 30 μs ' de ortalama 1 bozunma verir ve bu nedenle iyon odaları her pulsu saymada kullanılamazlar. Radyasyon monitörü olarak geniş bir kullanım alanı bulur ve pek çok ticarî radyasyon monitörleri gerçekte iyon odalarıdır. Radyasyon şiddeti, sayacın cevap süresi esnasında pek çok radyasyonun etkileşmesini gösteren akım olarak kaydedilir. Çıkış akımı hem kaynağın aktifliği ile hem de radyasyonların enerjisi ile orantılıdır. Daha yüksek enerjili radyasyonlar daha çok iyonlaşmaya ve dolayısıyla daha büyük bir tepkiye neden olur.

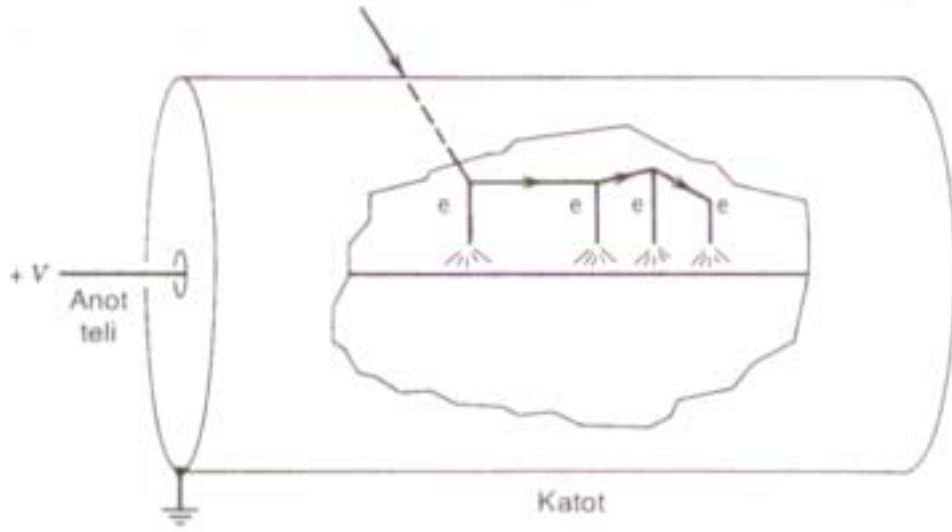
Bir gazlı detektörü her atmayı gözlemek için kullanmak istenildiğinde atmalar önemli derecede yükseltilmelidir. Bunu yapmanın yollarından birisi gerilimi genellikle 1000 volta kadar artırmaktır. Daha büyük elektrik alan, iyonlaştırma işlemi sonucunda ortaya çıkan elektronları daha çok hızlandırır ve gaz atomlarıyla daha çok esnek çarpışmalar (kinetik enerjinin korunduğu) yaparak sürüklenen elektronlar bu kez esnek olmayan çarpışmalar (kinetik enerjinin korunmadığı) yapmak için yeterli enerjiyi kazanabilirler ve hatta yeni iyonlanmış atomlar üretebilirler. Bu ikincil iyonlaştırmayla üretilen hızlı yükselmeye Townsend Çığı denir. Her birincil iyon için çok sayıda ($10^3 - 10^5$) ikincil olay olmasına rağmen, sayaç daima, ikincil olayların sayısı ilk olayların sayısı ile orantılı olacak şekilde değişir. Bu yüzden bu sayaçlara orantılı sayaç denir.

Bir orantılı sayacın geometrisi genellikle Şekil 2.8' de gösterildiği gibi silindriktir. Bu geometride r yarıçapındaki elektrik alan

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)}$$

ifadesiyle verilir. Burada b. katodun iç yarıçapı ve a anot telinin dış yarıçapıdır. Çıgların anot telinin yakınındaki yüksek alan bölgesinde oluşacakları açıktır. Ancak bu bölge sayaç hacminin çok küçük bir kısmıdır. İlk iyonların çoğu bu merkezî bölgeden uzakta meydana gelir, elektronlar çıg oluşturma işlemine başlayınca kadar yavaşça sürüklenirler. Yüksek alan bölgesinde meydana gelen bir birincil olay, biraz daha küçük bir çoğalma çarpanına sahip olacaktır, çünkü çok fazla sayıda çarpışma yapma şansına sahip değildir.

Orantılı sayacın çıkış sinyalleri esas olarak çok hızlı oluşan çıg işleminden kaynaklandığı için bu süre birincil iyonların oluştuğu noktadan çıgın oluştuğu anot telinin civarına kadar birincil elektronların sürüklenme zamanı ile belirlenir. Bu zaman μs mertebesinde ve sayaç $10^6/\text{s}$ mertebesinde sayma hızındaki bir atma modunda çalıştırılabilir.

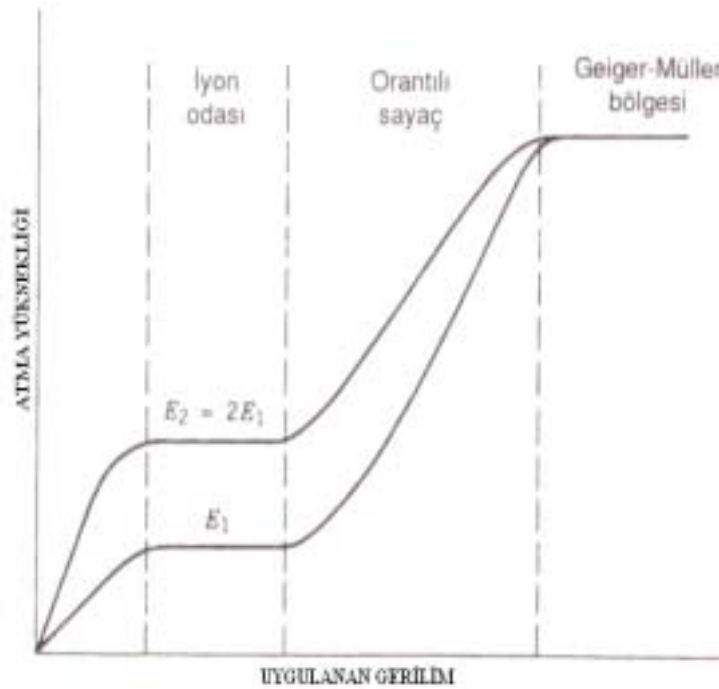


Şekil 2.8 Silindirik orantılı sayaç geometrisi ve ölçme süreci.

Elektrik alanın daha büyük değerlere çıkması halinde ise ikincil çığlar oluşur. Bunları ilk çığdaki uyarılmış atomlar tarafından yayınlanan fotonlar başlatır. Bu fotonlar birincil çığ olduğu bölgeye göre biraz daha uzakta hareket ederler ve hemen hemen tüpün tamamı işleme katılmış olur. Yükseltme çarpanı 10^{10} kadardır. Bütün tüp her olay için işleme katıldığından asıl radyasyon enerjisi hakkında tam bilgi mevcut değildir, gelen tüm radyasyonlar özdeş çıkış atmaları üretirler. Bu çalışma bölgesine Geiger-Müller bölgesi denir ve sayaçlar bu ilkeye dayandıkları için Geiger sayacı olarak adlandırılırlar. Geiger sayaçları taşınabilir radyasyon monitörleridir. Bir Geiger sayacının çıkış sinyalleri pek çok çığ işlemi sonucu birikmiş elektronları içerir. Bu sinyal 1 volt civarındadır ve genellikle daha fazla yükselme gerekli değildir. Elektronların birikme süresi 10^{-6} s kadardır. Bu süre içinde artı iyonlar çığ bölgesinden çok uzağa gidemezler. Böylece anot teli civarı artı yüklü iyon bulutuyla çevrilir. Bu bulut elektrik alan şiddetini düşürür ve sonunda çığ işlemi durur.

Artı iyonların katoda sürüklenmeleri ile çevrim tamamlanır ($10^{-4} - 10^{-3}$ s) fakat bu süredeki hareketleri esnasında iyonlar hızlanırlar ve katottan elektron sökebilecek kadar yeterli enerji kazanabilirler ve işlem tekrar başlamış olur. Geiger tüpündeki çoğalan çığ işleminin doğasından dolayı çıkış atmasını yaratan tek bir elektrondur.

Sürekli artıştan korunmak için tüpe ikinci bir tür gaz eklenir. Bu söndürücü gazdır. Söndürücü gaz genellikle etanol gibi karmaşık bir organik moleküldür. İlk konulan gaz ise argon gibi basit bir gazdır. Tipik bir karışım %90 argon - %10 etanoldur. Çoğunluğunu argon gazının içerdiği yükler + yüklü katoda doğru sürüklenmeye başlar. Söndürücü gaz atomlarıyla yaptıkları çarpışmalar sonucunda bir elektronun transfer edilmesiyle, argon yüksüz hale geçer ve iyonlaşan etanol katoda doğru sürüklenmeye başlar ve katoda ulaştığında yüksüz hale gelir. Daha önce katottan bir elektron koparmak için harcanan enerji şimdi molekülün ayrışması için soğurulabilir. Bu işlem basit argon atomları için mümkün değildir, Söndürücü gaz böylece yavaş yavaş kullanılıp bitirilir. Yani bir Geiger tüpü periyodik olarak değiştirilmelidir. Bazı Geiger tüplerinde söndürücü gaz olarak halojenler kullanılır. Bu ayrılmış moleküllerin tekrar bir araya gelmesi için tüpü yenileme gereksinimini ortadan kaldırır.



Şekil 2.9 Atma yüksekliğinin gerilime göre grafiği.

Gazlı sayaçların çalışma bölgeleri Şekil 2.9' da özetlenmiştir. Uygulanan düşük gerilimlerde birincil elektron ve iyonlar tekrar birleşebilirler. V artırıldıkça iyon

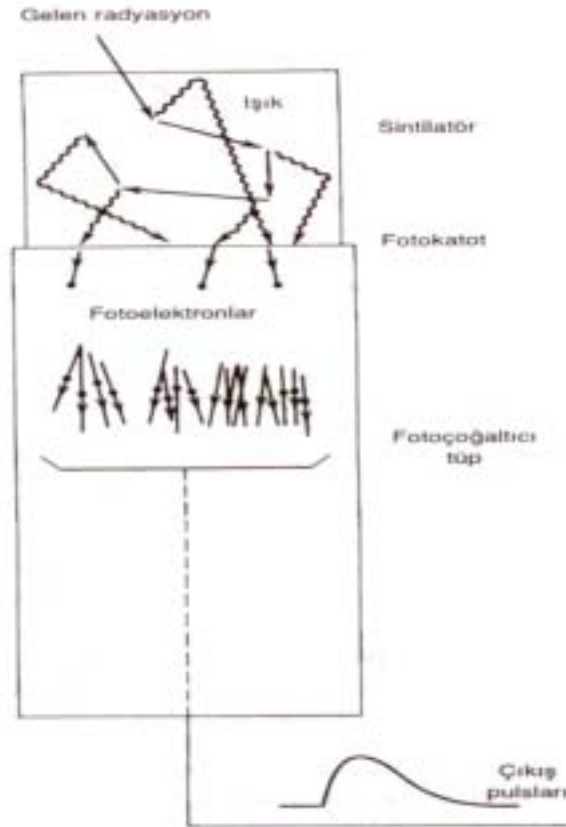
odası bölgesine ulaşılır. Buradaki çıkış atmaları radyasyon tarafından üretilen birincil iyonlaşma ve radyasyon enerjisi ile orantılıdır fakat V 'den bağımsızdır. Orantılı bölgede analizi daha kolay hale getirmek için atma genliği V ile artar, fakat çıkış atmaları yine iyonlaşma ile oluşan radyasyon enerjisi ile orantılıdır. Son olarak Geiger platosuna ulaşılır. Burada tüm radyasyonlar aynı çıkış atmalarını verirler, başlangıçtaki iyonlaşmanın miktarına veya ışınım enerjisine bağlı değildir. Geiger-Müller bölgesinde tüm radyasyonlar eşit puls yüksekliğine sahiptir. Diğer bölgelerde ise yükseklik birincil iyonlaşma enerjisine bağlıdır.

2.7.2 Sintilasyon Radyasyon Detektörleri

Gazlı sayaçların pek çok radyoaktif radyasyonun ölçümü için elverişsiz tarafı düşük verimli olmalarıdır: 1 MeV'lik γ ışınlarının havadaki menzili 100 metre kadardır. Büyük yoğunluğa sahip katı detektörler uygun boyutlarda olduğu zaman uygun soğurma olasılıkları verirler. Ancak iyi çalışan bir katı detektör yapmak için birbiriyle çelişen iki kritik şartın sağlanması gerekir: 1) Elektron ve iyonların yeterli miktarda birikip elektronik sinyallerin oluşabilmesi için yüksek elektrik alana dayanabilecek detektör maddesine ihtiyaç vardır. Radyasyon yokken az veya hiç akım geçmemelidir. Böylece tabansayım gürültüleri küçük olacaktır. 2) Elektronlar gönderilen radyasyon ile atomdan kolayca ve çok sayıda koparılabilmelidir. Elektronlar ve ilk iyonlaşan atomlar detektör maddesi boyunca kolayca hareket edebilmelidirler. Aslında iyonların kendileri katı içinde hareket etmezler: Bunun yerine elektronik boşluklar veya deşikler bir atomdan diğerine geçen ardışık elektronlar tarafından doldurulurlar. Böylece deşik hareket ediyormuş gibi görünür. Birinci şart yalıtkan bir detektör maddesi seçimini gerektirirken, ikinci şart bir iletken kullanımını önermektedir. Bu iki şartın bir yarıiletken ile sağlanacağı açıktır. Uygun bir radyasyon detektörü yapmak için seteri kadar büyük boyutlarda yarıiletken materyal 1960'lı yılların sonlarına kadar elde edilmemiştir. Nükleer spektroskopideki ihtiyaçlara cevap verebilecek yüksek verimlilikte ve uygun çözme gücüne sahip cihazlar olan sintilasyon sayaçları 1950'lerde geliştirilmiştir.

Sintilasyon sayaçları malzeme seçimindeki ikilemi şu şekilde çözer: İyonlaşma sonucu oluşan elektronlar elektronik atmlarla oluşan elektronlarla aynı değildir. İyonlaşma elektronuyla diğer elektronlar arasında bir aracı vardır: Işık yani fotonlar. İşlemin tamamı Şekil 2.10 incelenerek anlaşılabilir.

- Gelen radyasyon detektöre girer ve atomları uyarılmış düzeye çıkaran çok fazla sayıda etkileşme yapar.
- Uyarılmış durumlar hızla görünür bölgede (veya görünür bölge civarında) ışık yayınlarlar böyle materyallere flüoresans denir.
- Işık, foto duyarlı yüzeye çarparak foton başına en çok bir foto elektron salınmasına neden olur.
- Bu ikincil elektronlar foto çoğaltıcı tüpte çoğaltılır, hızlandırılır ve çıkış atmlarına dönüştürülür.



Şekil 2.10 Bir sintilasyon detektörünün çalışma ilkesi.

Sintilatör ve foto çoğaltıcı (PM – Photo Multiplier) tüplerin kullanılacak uygulamalara bağlı olarak pek çok değişik tipleri mevcuttur. Materyal seçiminde göz önünde bulundurulacak özellikler ışık çıkışı (ışık olarak görünecek gelen enerji kesri), verim (radyasyonun soğurulma olasılığı), zamanlama ve enerji çözme gücüdür. Materyalle ilgili olarak çalışmayı kolaylaştıracak diğer kıstaslar şunlardır: Kolay elde edilebilen bir sintilatör, NaI kristali, nem çekicidir; su buharına maruz kaldığında saydam kristal halden donuk toz hale geçer. NaI kapalı olarak saklanmalıdır. Diğer taraftan pek çok plastik sintilatöre bir kesici ile kesilerek arzu edilen şekli vermek mümkündür.

Bir sintilatörün çalışmasını anlamak için, enerjinin soğularak, elektronların uyarılmış durumlara çıkmasıyla ilgili mekanizmayı göz önüne almamız gerekir. Temel olarak organik madde içeren ve inorganik madde içeren iki tip sintilasyon detektörü vardır: Organik sintilatörlerde (katı veya sıvı olabilir) moleküller arası etkileşimler nispeten zayıftır. Bir molekül iki yolla enerji soğurabilir: Elektronlar daha yüksek uyarılmış duruma geçirilebilirler ve moleküldeki atomlar titreşebilirler. Tipik bir titreşim enerji aralığı 0,1 eV iken elektronik uyarılma enerjileri için birkaç eV civarındadır. Uyarılmış elektronlar genellikle materyale zayıf bağlıdır. Benzenin halka yapısı gibi aromatik hidrokarbonlarda karbonun dört değerlik elektronunun 3'ü hibritleşmiş yörüngelerdedirler ve bunlar σ yörüngeleridir. Bunlar her karbon arasına güçlü şekilde yerleşmiştir. İki komşu karbon ve tek bir hidrojen π yörüngesi denilen yörüngede bulunan 4. elektronun yerleşimi böyle değildir ve σ elektronları kadar kuvvetli olarak bağlanma işlemine katılmazlar. Bu π elektronları sintilasyon işlemine en çok cevap verenlerdir. İçeri giren radyasyon birçok molekülle, her etkileşimde birkaç eV kaybederek molekülü uyarır ve hızla (≈ 1 ps) uyarılmış durumların en düşük titreşim durumlarına bozunurlar ve sonra elektronik taban durumun bir titreşim durumuna bozunurlar (10 ns'de). Bunlar da hızla titreşim taban durumuna geçerler. Normal şartlarda, oda sıcaklığında, sintilatör moleküllerinin hepsi elektronik taban durumun en düşük titreşim durumundadır. Oda sıcaklığındaki ısı enerji 0,025 eV'dir ve Boltzmann dağılımına göre $e^{-E/kT}$ elektronik taban durumun üstün de herhangi bir titreşim durumu bulmak olası değildir. Böylece, birçok

yayınlanmış foton geçişlerinden sadece birisi soğurulma olasılığına sahiptir. Bu sintilatörün önemli bir özelliğini ifade eder.

İnorganik sintilatörlerden en yaygın olarak kullanılanı bir alkali halojenürün tek kristalidir (NaI). Geçirgenliği sağlamak için tek kristale gerek vardır. Kristal yüzeyindeki 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 (4 eV civarında) atlatarak iletim bandına uyarabilir. Elektron enerjisini foton salarak kaybeder ve değerlik bandına geri döner.

Foton yayınlanma ihtimalini artırmak ve ışığın kendisinin soğurulma oranını azaltmak için kristale aktivatör denen küçük miktarda safsızlıklar eklenir. Safsızlık oluşturmak için en çok kullanılan element Talyumdur. Aktivatör, enerji aralığında durumlar meydana getirir ve bu durumlar arasında foton yayınımlı oluşur. NaI'de 303 nm dalga boylu ışık salınırken NaI(Tl)'den 410 nm'lik ışık yayınlanır. NaI(Tl)'de bu enerjide soğurulma olamaz, çünkü aktivatör taban durumları işgal edemez ve dalga boyundaki morötesi bölgeden görünür bölgeye değişim, pek çok foto çoğaltıcı tüpün maksimum duyarlılığı ile uyuşur.

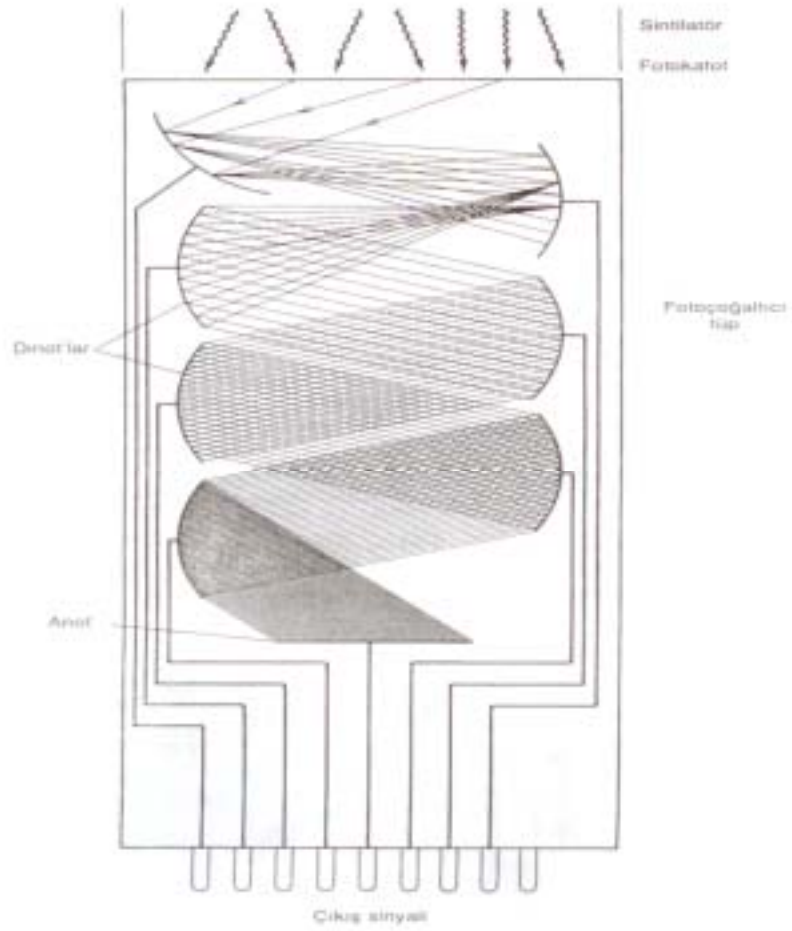
Çizelge 2.3'de en çok kullanılan sintilasyon detektörlerinden bazılarının özellikleri verilmektedir. Sintilatör seçimi yapılacak deneyin tipine bağlıdır. Örneğin, γ ışınları söz konusuysa NaI(Tl) iyi bir seçimdir: I' nın Z sayısının ($Z = 53$) büyük olması foton soğurulması ihtimalini artırır. Ancak zaman çözme gücü yönünden NaI(Tl) avantajlı bir seçim değildir ve nispeten daha düşük verimli plastik sintilatörler daha iyi bir seçim olabilir.

Adı	Tip	Yoğunluk (g/cm ³)	Kırılma İndisi	Maksimum		Zaman Sabit (ns)
				Yayınlanma Dalga boyu (nm)	Bağlı Çıkış	
Antrasen	Katı organik	1,25	1,62	447	0,43	30
Pilot B	Plastik (katı organik)	1,03	1,58	408	0,30	1,8
NE 213	Sıvı organik	0,87	1,508	425	0,34	3,7
Nal (Tl)	İnorganik kristal	3,67	1,85	410	1,00	230
CsF	İnorganik kristal	4,11	1,48	390	0,05	5

Çizelge 2.3 Sintilasyon detektörlerinin bazı özellikleri.

Bir PM tüpüne ait basit bir şema Şekil 2.11'de verilmiştir. Foto katotta az sayıda yayınlanan elektronlar dinot denen bir dizi elektrotla çoğaltılır ve odaklanır. Dinotlar bir yüksek gerilim kaynağı tarafından üretilen bir gerilim zinciri ve bir dizi gerilim bölücüyle birleştirilmiştir. Komşu dinotlar arasındaki tipik gerilim farkı yaklaşık 100 voltur ve böylece elektronlar dinotlara 100 eV'lik enerji ile çarparlar. Dinotlar ikincil elektron yayınlanmasının yüksek olasılıklı olduğu bir malzemeden yapılıdır. Bir elektronun salınmasına 2 – 3 eV yeterlidir. Böylece elektron sayısında 30–50 çarpanı kadar bir kazanç sağlanabilir. Ancak elektronlar madde içinde rasgele doğrultularda salındıklarından yüzeyde az sayıda elektron yayınlanacak ve her dinottaki artış 5 çarpanı kadar olacaktır. Mesela 10 dinotlu bir tüp ile sağlanacak kazanç 5^{10} (10^7 civarında)'dur.

Enerji spektrometreleri için iki önemli özellik doğrusallık ve kararlılıktır. Doğrusallık son çıkış atma genliğinin, sintilasyon olaylarının sayısı ile dolayısıyla radyasyon tarafından detektörde depo edilen enerji ile doğru orantılı olması demektir. Her dinottaki artış, gerilim farkına bağlı olduğundan yüksek gerilimdeki bir değişme çıkış atmasında değişimlere neden olacaktır. Bundan dolayı yüksek gerilim kaynağının kararlı olması gerekir.



Şekil 2.11 Foto çoğaltıcı tüpün çalışma şeması.

Çok çeşitli foto çoğaltıcı tüp kullanılmaktadır. Tüp seçimi, fiziksel boyut, gelen farklı dalga boylu radyasyonlara foto katodun cevabı, foto katodun duyarlılığı, kazanç, gürültü seviyesi ve zamanlama karakteristikleri gibi parametreler göz önüne alınarak yapılır.

2.7.3 Yarıiletken Radyasyon Detektörleri

Katı yarıiletken materyaller Germanyum (Ge) ve Silikon (Si) radyasyon detektörleri için sintilatörlere alternatif oluşturur. Ge ve Si içinde 4 değerlikli atomların komşu atomlarla dört kovalent bağ oluşturdukları kök kristaller şeklindedirler. Yani tüm değerlik elektronları kovalent bağa katılırlar ve bant yapısı bir dolu bant ve bir boş

iletim bandı gösterir. Bir yalıtkan ve bir yarıiletken arasındaki fark enerji aralığının büyüklüğüdür. Bir yalıtıkanda bu aralık 5 eV iken bir yarıiletkende 1 eV civarındadır. Yaklaşık 10^9 'da 1 elektron oda sıcaklığında, değerlik bandında deşik denilen bir boşluk bırakarak iletim bandına doğru termal olarak uyarılır. Boşluk komşu elektronlardan biriyle dolar (yeni bir deşik oluşur). Böylece deşikler kristal içinde hareket ediyorlarmış gibi görünürler.

Yarıiletkenlerde elektrik iletimini kontrol etmek için az miktarda katkı maddesi ilave edilir. Bu işlemde 3 veya 5 değerlikli atomlar örgü içine girerler. 5 değerlikli atom durumunda (P, As, Sb) elektronlardan dördü komşu Si veya Ge ile kovalent bağ yaparlar. Beşinci elektron ise örgü içinde rahatça hareket edebilir ve kesikli verici durumlarının bir kümesini oluşturur. Bu durumlar iletim bandının hemen altındadır. Böyle bir maddede eksi yük taşıyıcılarının (elektronlar) fazlalığından dolayı materyale n-tipi yarıiletken denir. 3 değerlikli kullanıldığında kristalde dört komşu atomla kovalent bağ oluşur ve deşik fazlalığı ortaya çıkar. Bunlar değerlik bandının hemen üstünde alıcı durumlarını oluştururlar ve böyle maddelere de esas yük taşıyıcılarının artı yüklü deşikler olduğu p-tipi yarıiletken denir. n-tipi ve p-tipi tanımları elektrik akımını oluşturan esas yük taşıyıcılarının işaretlerini temsil ederler yoksa materyalin kendisi elektriksel olarak yüksüzdür.

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

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

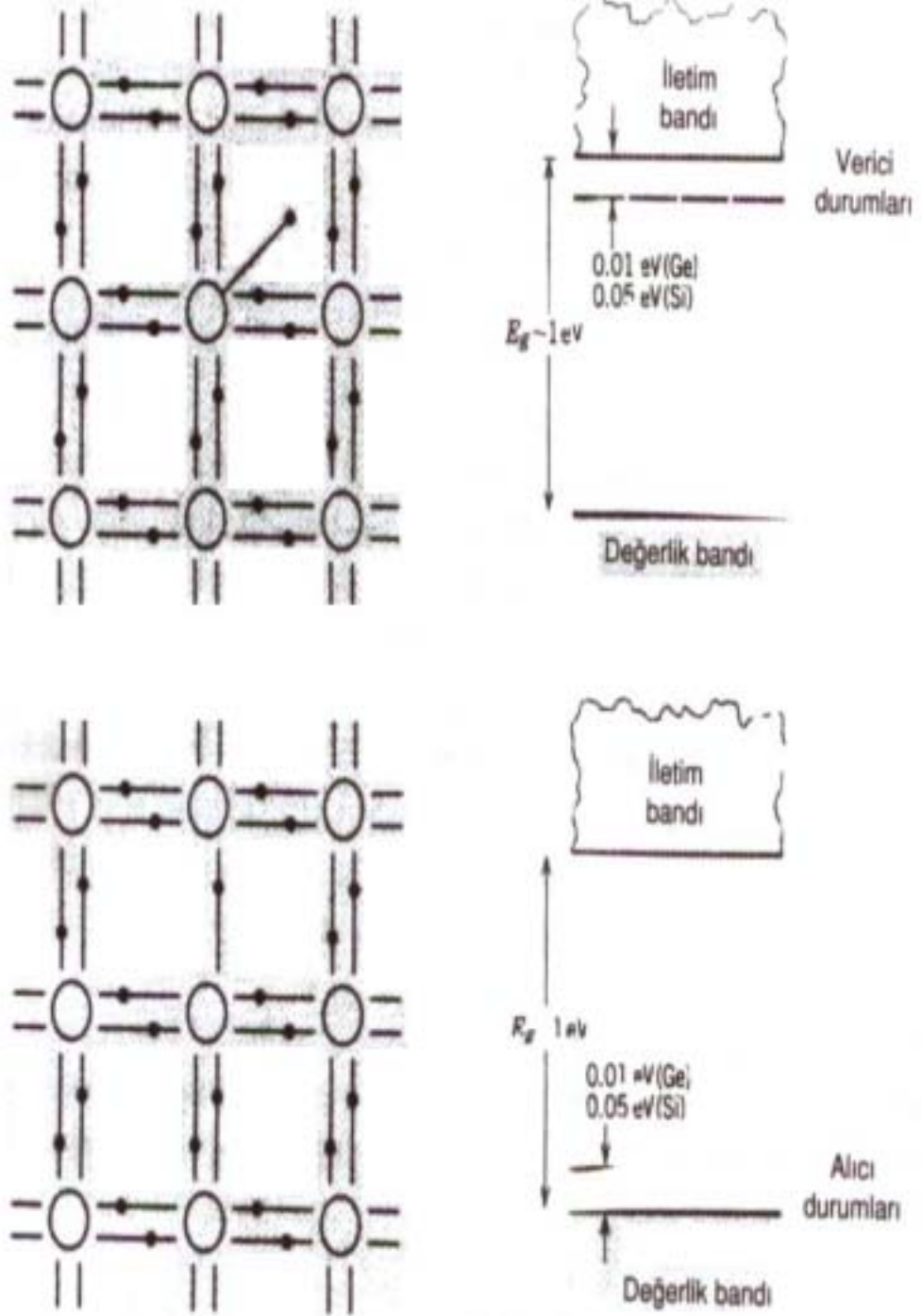
Büyük hacimli detektörlerden yükleri toplamak için gerekli zaman 10–100 ns aralığında olabilir. Detektör geometrisine (düzlem veya koaksiyal)ve radyasyonun elektronlara göre giriş noktasına bağlı olarak değişimler ortaya çıkabilir

Şekil 2-12’de yarıiletken detektör yapımında kullanılan n ve p tipi materyaller gösterilmiştir. Ge ve Si kristalleri ile 5 değerlikli bir atom yer değiştirdiği zaman kovalent bağı paylaşmayan bir elektron iletim bandına uyarlanır. Bu n-tipi bir yarı iletken olur (Üst). 3 değerlikli bir atom kullanıldığı zamansa değerlik bandından bir elektron kolayca alınabileceği için deşik oluşur. Buda p-tipi bir yarıiletkendir(alt).

2.8 Radyasyon Birimleri

İyonlaştırıcı radyasyonun madde üzerindeki etkisi, radyasyonun maddede ne kadar iyonizasyon meydana getirdiğine bağlıdır. Etki ise radyasyon tipine ve enerjisiyle alakalıdır. Radyasyon etkilerini ve aktiviteyi belirlemek amacıyla çeşitli birimler kullanılmaktadır. ICRU (International Commity of Radiation Units – Uluslararası Radyasyon Birimleri Komitesi) önce aktivite için Curie (Ci), soğrulan doz için Rad, eşdeğer doz birimi için rem ve ışınlama (poz) için de Roentgen birimlerini kabul etmiştir. 1971 senesinde ICRU MKS birim sisteminin kabulüyle SI birimlerini tanımlamıştır.

Bir radyoaktif madde miktarı saniyede $3,7 \times 10^{10}$ bozunma meydana getiriyorsa aktivitesi eski birimlere göre 1 Curie (Ci) olarak tanımlanır. Büyüklüğü nedeniyle genellikle alt birimleri olan μCi ($=10^{-6}$ Ci) ve pCi ($=10^{-9}$ Ci) kullanılır. Yeni birim Becquerel (Bq) olup saniyede 1 bozunma meydana getiren madde miktarı olarak tanımlanır.



Şekil 2.12 n ve p tipi yarıiletkenler.

Soğrulan doz için eski birim rad (Radiation Absorbed Dose), herhangi bir maddenin gramı başına 100 erg' lik enerji emilmesine eşittir. SI birim sistemine göre soğrulan doz birimi Gray (Gy) olup tanımı 1 kilogramlık herhangi bir maddeye 1 joule enerji verebilen radyasyon dozudur.

Eşdeğer doz birimi, iyonize edici radyasyonların biyolojik madde üzerindeki etkisini belirtmek amacıyla kullanılır. Biyolojik etki radyasyonun geçişte bıraktığı enerjile doğru orantılıdır. Eski eşdeğer doz birimi rem' dir (Roentgen Equivalent Man). Yeni birim ise Sievert (Sv)' dir. Boyutu Joule/kg' dir.

Işınlama (poz) birimine SI sisteminde yeni bir isim verilmemiştir. 1 Roentgen (R) Normal şartlarda, yani 760 mmHg ve 0°C' de havanın 1 kilogramında $2,58 \times 10^{-4}$ Coulomb değerinde artı ve eksi yüklü iyonlar meydana getiren X ışını ve γ miktarı olarak tanımlanır. Bu birim soğurucunun değil radyasyon demetinin niteliği hakkında bilgi verir. Çizelge 2.4'de radyoaktivite birimleri ve aralarındaki ilişki verilmiştir.

Nicelik	Ölçülen	SI Birimi ve Sembolü	Eski Birim	Dönüşüm Çarpanı
Aktiflik	Bozunma hızı	Bq	Ci	$2,7 \times 10^{-11}$
Soğrulan doz	Enerji soğrulması	Gy	Rad	100
Eşdeğer doz	Biyolojik etkinlik	Sv	Rem	100
Işınlama	Havadaki iyonlaşma	Roentgen	R	3876

Çizelge 2.4 SI birim sistemindeki radyoaktivite birimleri

2.9 Radon ve Özellikleri

Doğadaki radyoaktif maddelerden doğal olanları ağır çekirdeklerin bir dizi bozunumdan sonra radyoaktif olmayan kurşun izotoplarına dönüşür. Daha önce değinildiği gibi dört doğal radyoaktif seri vardır. Bunlar Toryum ($^{232}_{90}\text{Th}$), Neptünyum ($^{237}_{93}\text{Np}$), Uranyum ($^{238}_{92}\text{U}$) ve Aktinyum ($^{235}_{92}\text{U}$)' dir. Neptünyum haricindekiler Uranyum izotoplarıdır. Bunlardan en sık rastlanani $^{238}_{92}\text{U}$ ' dir. Uranyum bozunma serileri doğadaki radyasyonun çoğunluğunun nedenidir.

Bu bozunma ürünlerinden birisi olan Radon doğal radyasyonun büyük kısmını oluşturmaktadır. Radon elementinin 1900 yılında Alman Kimyacı Friedrich Ernst Dorn tarafından ilk kez bulunduğu kabul edilmektedir. Ancak esasen ilk kez 1898 yılında ünlü Fizikçi Ernst Rutherford tarafından keşfedilmiştir. Friedrich Ernst Dorn bugünkü adıyla Radona Niton (Latince "parıldayan" manasındaki nitens kelimesinden gelir.) adını vermiştir. 1923 yılına kadar bu adla anılan elemente Radyum' dan sonra keşfedildiği için Radon denilmiştir. En son keşfedilen asal gaz Radon'dur.

2.9.1 Radon' un Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Radon Rn sembolü ile gösterilmektedir. Elementlerin Periyodik Tablosunda Asal Gazlar grubu denilen 8A grubunda ve 6. periyotta bulunmaktadır (Şekil-2.13). Asal gazlar periyodik tabloda sıfır ya da 8A grubunda Rn ile birlikte yer alan Helyum (He), Neon (Ne), Argon (Ar), Kripton (Kr) ve Xenon (Xe) elementlerinden oluşmaktadır. Tamamı doğal şartlarda gaz halde bulunmaktadır ve önemli bir özelliği radyoaktif olmasıdır. Atmosferden sıvı havanın damıtılması yoluyla elde edilirler. Helyum ilk, Radon ise son keşfedilen asal gazdır (noble gas veya inert gas).

Radon olağan şartlar altında, yani normal sıcaklık ve atmosfer basıncında renksiz, gözle görülemeyen, tatsız ve kokusuz bir gazdır. Atom numarası yani proton sayısı

(ya da yüksüz haldeki elektron sayısı) 86'dır. Atomik ağırlığı 222 gr/mol olduğu için çekirdeğindeki nötron sayısı 136'dır.

Grup	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Periyod																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds								
*Lantanid	* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb				
•Actinid	• 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No				

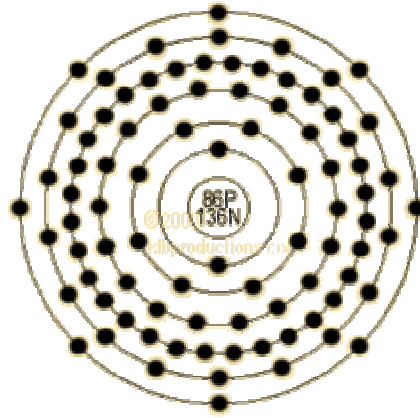
Şekil 2.13 Rn elementinin periyodik tablodaki yeri.

$^{222}_{86}\text{Rn}$ 'nin erime sıcaklığıyla kaynama sıcaklığı arasında oldukça az bir fark vardır. Erime sıcaklığı 202° Kelvin derece ve kaynama sıcaklığı 211° K' dir. Buharlaştırma ısısı ve entalpisi $16,4$ kJ/mol' dür. Radon-222 donma sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar soğutulursa, sıcaklık düşüşüyle orantılı bir şekilde sarılığı artan parlak bir fosfor esans görünümünü alır. Havanın sıvı olduğu sıcaklıklarda ise portakal rengi – kırmızı renk şeklinde görünür. Yoğunluğu 273° K ve 1 atmosfer basınçta $9,73$ gr/L ve molar hacmi de $50,5$ cm³/mol' dür. Radon gazı elektrik iletkenliği hiç olmayan ve ısı iletkenliği de $0,0000364$ W/cmK gibi çok düşük bir değere sahip olan bir asal gazdır. Ayrıca öz ısısı $0,091$ J/grK' dir.

Rn' nin atomik yarıçapı $1,34 \times 10^{-10}$ m ve atomik kesitinin alanı $0,72 \times 10^{-24}$ cm², dir. Havadan 9 kat yoğundur ve tek atomlu şekilde bulunur. Bu yüzden kâğıt, deri,

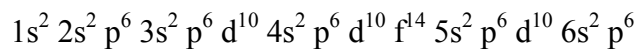
plastik, boya ve bina malzemeleri gibi materyallere kolayca nüfuz eder. Elektron ilgisinin az olması ve iyonlaşma enerjisinin yüksek olması Rn' nin diğer elementlerle kolayca bağ yapmasını engeller. Ancak bu Radon'un tam olarak inert bir gaz olduğunu göstermez. Elektron ilgisi yüksek olan bazı atomlarla etkileşip kararlı bileşikler yapabilir. Rn suda ve organik çözücülerde iyi çözünür.

Rn asal bir gaz olduğu için atomik yörüngeleri küresel simetriktir. Tüm elektron kabukları doludur. Rn' nin elektronik dizilimi, kabuk modeli ve enerji seviyelerindeki elektron sayıları gösterilmektedir.



Şekil 2.14 Z=86 olan Rn' nin atomik elektron dizilimi.

Şekil 2.14'den ^{222}Rn ' nin elektron dizilimi Hund Kuralı ve Pauli İlkesi kullanılarak



şeklinde yazılabilir. Değerlik (valans) bandı, p yörüngemsi alabileceği 6 elektronla tam doldurulduğu için elektron koparmak çok zordur. Yani iyonlaşma entalpisi çok yüksektir : 1037 kJ/mol. Rn-Rn türü bağlanmalar ancak Van der Waals kuvvetleri yoluyla meydana gelebilir ve oluşan Rn bileşiğinin kristal yapısı yüzey merkezli kübik (fcc) yapıdır.

Radon elementi çok çeşitli yarı ömürlere sahip 33 tane izotopu vardır (Tablo 3.1). En uzun ömürlü üç izotopu ^{222}Rn , ^{220}Rn ve ^{219}Rn ' dir. ^{222}Rn , Radon' un doğada en çok rastlanan ve 3,8 gün ile en uzun yarı ömürlü izotopudur. En ağır doğal radyoaktif

element olan ^{238}U ' in bozunma zinciri içerisinde. Diğer iki izotop sırasıyla 55,1 saniye ve 3,96 saniye yarı ömürlüdürler ve yine sırasıyla ^{232}Th ve ^{235}U serisinden ortaya çıkarlar.

İzotop	Atomik Kütle	Nötron Sayısı	Spin	Yarı Ömür	Bozunma Modu	Ürün	Dallanma Oranı %	Bozunma Enerjisi (MeV)
Rn196	196,002	110	0+	3 ms				
Rn197	197,002	111	3/2-	65 ms				
Rn198	197,999	112	0+	64 ms	α	Po194		7,345
				64 ms	ϵ	At198		5,600
Rn199	198,998	113	3/2-	0,62 s	α	Po195	97	7,140
				0,62 s	ϵ	At199	3	7,200
Rn200	199,996	114	0+	0,96 s	α	Po196	~98	7,043
				0,96 s	ϵ	At200	~2	5,000
Rn201	200,996	115	3/2-	7 s	α	Po197	~80	6,860
				7 s	ϵ	At201	~20	6,600
Temel hal 0,280MeV			13/2+	3,8 s	α	Po197	~90	7,140
				3,8 s	ϵ	At201	~10	0,280
				3,8 s	IT	Rn201	~0	0,280
Rn202	201,993	116	0+	10 s	α	Po198	86	6,774
				10 s	ϵ	At202	14	4,440
Rn203	202,993	117	5/2-	45 s	α	Po199	66	6,630
				45 s	ϵ	At203	34	6,000
Temel hal 0,361MeV			13/2+	28 s	α	Po199	~80	6,991
				28 s	ϵ	At203	~20	6,361
				28 s	IT	Rn203	<0,10	0,361
Rn204	203,991	118	0+	1,24	α	Po200	73	6,546

				m				
				1,24 m	β	At204	27	3,820
Rn205	204,992	119	5/2-	2,8 m	β	At205	77	5,240
				2,8 m	α	Po201	23	6,390
Rn206	205,99	120	0+	5,67 m	α	Po202	62	6,384
				5,67 m	β	At206	38	3,310
Rn207	206,9907	121	5/2-	9,25 m	β	At207	79	4,610
				9,25 m	α	Po203	21	6,251
Rn208	207,9896	122	0+	24,35 m	α	Po204	62	6,260
				24,35 m	β	At208	38	2,850
Rn209	208,9904	123	5/2-	28,5 m	β	At209	83	3,930
				28,5 m	α	Po205	17	6,155
Rn210	209,9897	124	0+	2,4 h	α	Po206	96	6,159
				2,4 h	β	At210	4	2,374
Rn211	210,9906	125	1/2-	14,6 h	β	At211	72,6	2,892
				14,6 h	α	Po207	27,4	5,965
Rn212	211,9907	126	0+	23,9 m	α	Po208		6,385
Rn213	212,9939	127	9/2+	25 ms	α	Po209		8,243
Rn214	213,9953	128	0+	0,27	α	Po210		9,208

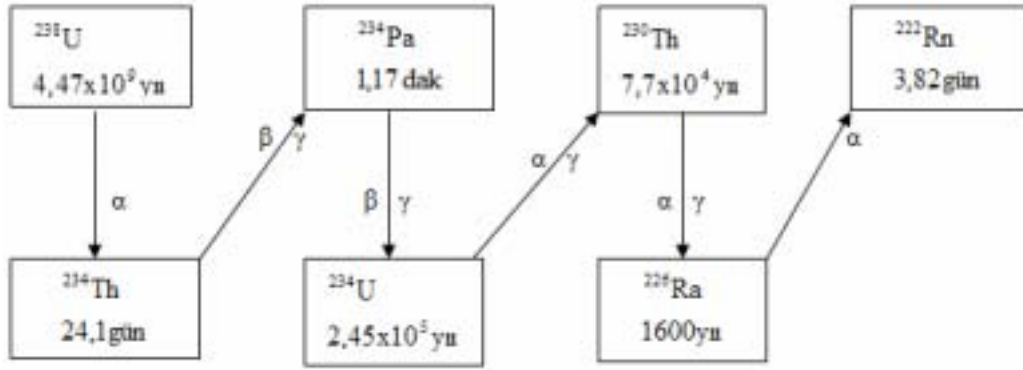
				us					
Temel hal 1,442MeV			6+	0,69 ns	IT	Rn214	<100	1,443	
				0,69 ns	α	Po210	>0	10,651	
Temel hal 1,625MeV			8+	6,5 ns	IT	Rn214	~90	1,625	
				6,5 ns	α	Po210	~10	10,833	
Rn215	214,9987	129	9/2+	2,3 us	α	Po211		8,839	
Rn216	216,0003	130	0+	45 us	α	Po212		8,200	
Rn217	217,0039	131	9/2+	0,54 ms	α	Po213		7,889	
Rn218	218,0056	132	0+	35 ms	α	Po214		7,263	
Rn219	219,0095	133	5/2+	3,96 s	α	Po215		6,945	
Rn220	220,0114	134	0+	55,6 s	α	Po216		6,405	
Rn221	221,015	135	7/2+	25 m	β^-	Fr221	78	1,220	
				25 m	α	Po217	22	6,146	
Rn222	222,0176	136	0+	3,83 d	α	Po218		5,590	
Rn223	223,0218	137	7/2+	23,2 m	β^-	Fr223			
Rn224	224,024	138	0+	107 m	β^-	Fr224		0,800	
Rn225	225,0284	139	7/2-	4,5 m	β^-	Fr225			

Çizelge 2.5 Radon' un 33 farklı izotopunun fiziksel özellikleri.

2.9.2 Radon'un Meydana Gelişi ve Bozunması

Radonun doğada en çok bulunan üç izotopu olduğunu belirtmiştik: Bunlardan ^{222}Rn 3,82 günlük yarı ömürle diğer ikisine nazaran çok daha uzun yaşar. ^{220}Rn ve

^{219}Rn çabucak yok olacağından doğadaki Radon radyasyonunun hemen hemen tamamı ilk izotopun sonucudur. Bu yüzden Radon denilince akla 222 atom numaralı izotop gelmektedir. ^{222}Rn , Uranyumun yine doğada en çok bulunan izotopu olan ^{238}U ' in bir ürünüdür. $^{238}\text{U} - ^{222}\text{Rn}$ arasındaki bozunma zinciri öncelikle Uranyumun bir alfa yayınlarak ^{234}Th ' e bozunmasıyla başlar. ^{234}Th β ve γ salarak ^{234}Pa ' e (Protaktinyum234) dönüşür. Protaktinyum yine β ve γ ile ^{234}U oluşturur. U-234 γ ve α bozunmasıyla ^{230}Th ' a; ^{230}Th ise γ ve α ile ^{226}Ra ' ya bozunur. Son olarak Radyum226 yine bir γ ve α salarak ^{222}Rn verir. Bu radyoaktif zinciri tasvir eden bir şekil aşağıda verilmiştir.



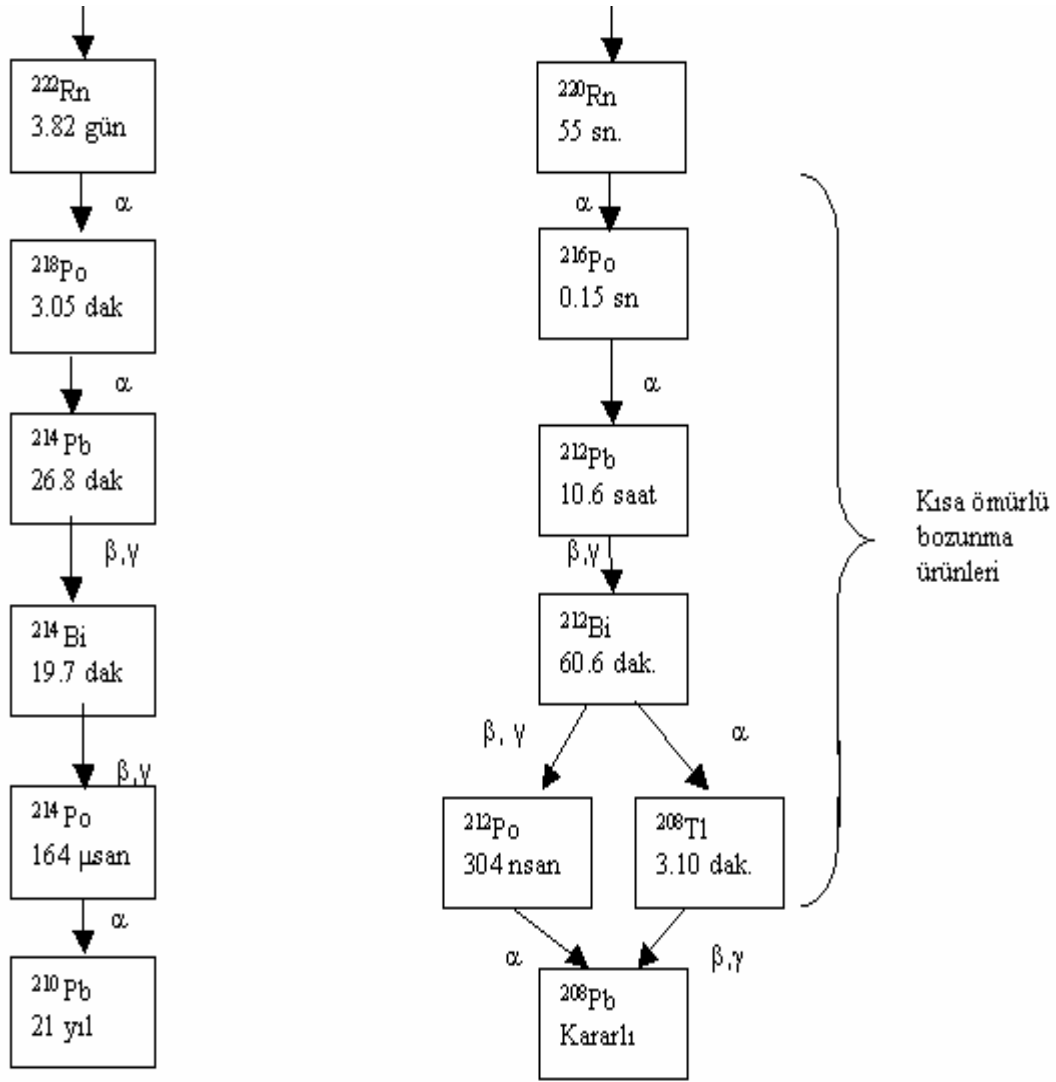
Şekil 2.15 U238 serisinin Rn222' ye kadar olan bozunum şeması.

Serinin bu kısmında ^{238}U beş radyoaktif çekirdekle ^{222}Rn ' ye ulaşır. ^{222}Rn ' den hemen önce gelen ^{226}Ra , 1600 yıllık yarı ömürle 3,82 günlük yarı ömre sahip olan ^{222}Rn için sabit hızlı bir üreteç görevi yapmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere Radonun en uzun ömürlü iki izotopu ^{222}Rn ve ^{220}Rn ' dir. ^{222}Rn , ^{238}U bozunma zincirinden gelirken, ^{220}Rn yine bir Uranyum izotopu olan ^{232}Th ' den türer. Bu iki önemli Radon izotopu da radyoaktiftir ve bir seri bozunmaya uğrarlar. Aslında bu seri Uranyum serisi adı verilen doğal radyoaktif serinin devamını meydana getirir. Doğada en çok bulunan izotop ^{222}Rn arka arkaya iki kez alfa bozunumuyla önce ^{218}Po ve ^{214}Pb ' ye dönüşür. Sonra iki kez beta ve gamma bozunmalarıyla sırasıyla ^{214}Bi ve ^{214}Po oluşturur. Zincirin en sonunda bir alfa bozunumuyla ^{210}Pb meydana gelir. Bu zincirde en kararlı iki çekirdek ^{210}Pb ve ^{220}Rn dir. ^{210}Pb ' nin yarı ömrü

21 yıldır. Arada kalan dört izotop ise oldukça kısa yarı ömürlere sahip olduklarından aktiviteye katkıları çok azdır. Diğer Radon izotopu ^{220}Rn bozunma zincirinde ilk iki element ^{216}Po ve ^{212}Pb , alfa salınmasıyla oluşur. Sonra beta ve gamma salınarak ^{212}Bi türer. Buradan sonra bu izotopun iki türlü bozunmaya uğrama ihtimali vardır. Ya alfa ve beta vererek ^{212}Po 'ya bozunur (%64); ya da alfa vererek ^{218}Tl ' ye bozunur (%36). Her iki durumda da son ürün kararlı bir element olan ^{208}Pb ' dir. Rn izotoplarının bozunma zinciri ve izotopların yarı ömürleri Şekil 2.16'da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 2.6 ürünlerin bazı karakteristik özelliklerini vermektedir.

İzotop	Yarı Ömür	Bozunma Sabiti (sn^{-1})	Temel Radyasyon Enerjileri (MeV)		
			α	β	γ
^{222}Rn	3,825 gün	$2,1 \cdot 10^{-6}$	5,49	-	-
^{218}Po (RaA)	3,05 dk.	$3,79 \cdot 10^{-3}$	6,00	-	-
^{214}Pb (RaB)	26,8 dk.	$4,31 \cdot 10^{-4}$	-	0,67 0,73 1,02	2,95 0,352
^{214}Bi (RaC)	19,7 dk.	$5,86 \cdot 10^{-4}$	-	1,00 1,51 3,27	0,609 1,12 1,764
^{214}Po (RaC')	$1,5 \cdot 10^{-4}$ sn	$4,62 \cdot 10^{-3}$	7,69	-	-
^{210}Pb	22,3 yıl	-	-	0,015 0,061 1,161	0,047

Çizelge 2.6 En çok bulunan Rn izotopunun (Rn222) ürünlerinin özellikleri.



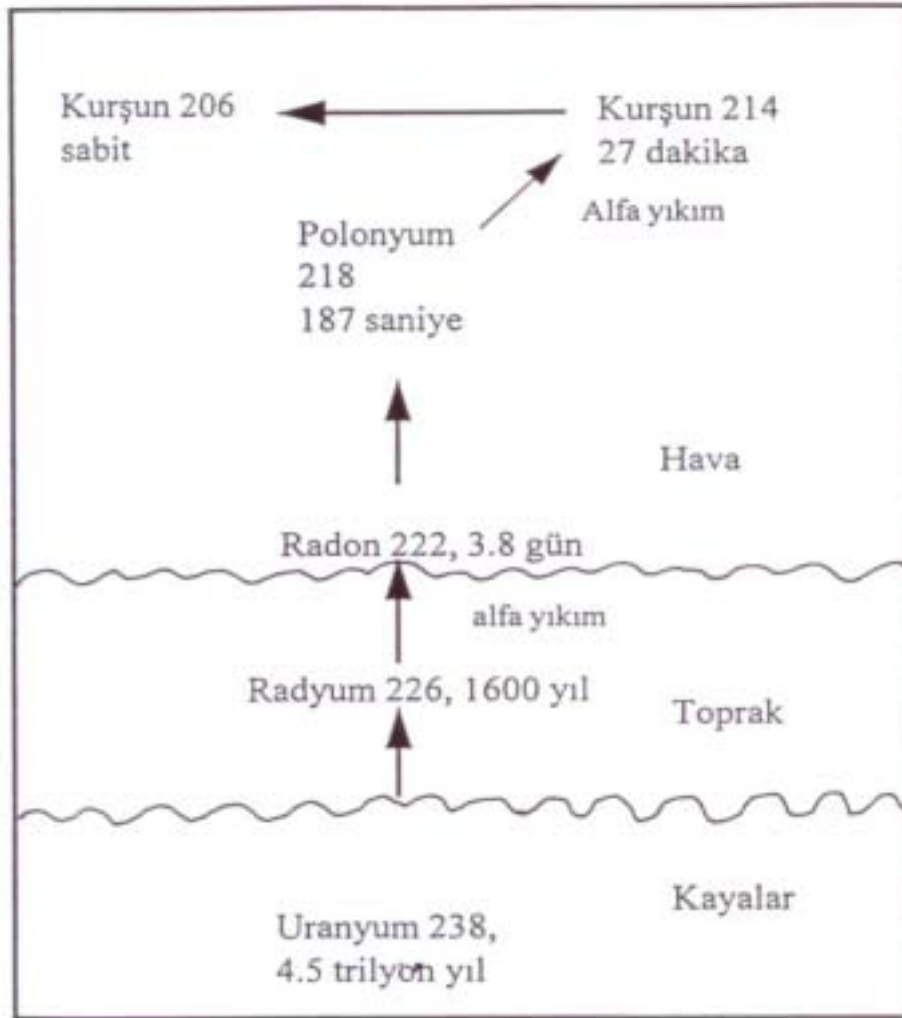
Şekil 2.16 Doğada en çok bulunan iki Rn izotopunun bozunma zincirleri.

2.9.3 Radon ve Ürünlerinin Ortama Dağılımı

Radon nerede bulunursa bulunsun temelde kaynağı yer kabuğudur. Çünkü Radon izotoplarının hepsi Uranyum kökenlidir ve Uranyum da yer kabuğunda kayalarda ve toprakta bulunmaktadır. Radon gazı bir ortama yığın etkisi denilen bir etki sonucu dağılır. Yığın etkisi, daha soğuk havanın daha sıcak havanın bulunduğu bir ortama akmasıdır. Yani Radon gazı havanın akışıyla yer değiştirir. Genelde kapalı mekânlar dediğimiz odalar ve binalar dış ortama nazaran daha sıcak olduklarından Rn akışı dışardan içeriye doğru olur. Bu etki kendisini daha belirgin bir şekilde kış aylarında

gösterir. Radon ürünlerinin kapalı bir bölgedeki yoğunluğu, havadaki parçacıklara ve havanın hareketine bağlıdır.

Toprak ve kayalardaki Uranyumun bozunması sonucunda açığa çıkan Radon gazı atmosfer yüzeyine yakın yerlerde iklimsel şartların da etkisiyle daha hızlı bir şekilde yayılır. Çünkü bu bölgede hava akımları topraktakine nazaran daha etkindir. Sıcaklık, basınç farklılıkları, nem gibi faktörler bu kaçıışı hızlandırmaktadır. Sıcaklıklar arasındaki farkın fazla olması hava akımlarını güçlendireceğinden Radon kaçıışı fazla olur. Dış basıncın iç basınca göre büyük olması, yine hava akımları yönünden daha etkilidir ve Radonun kapalı ortama dağılmasını hızlandırır.



Şekil 2.17 Rn' nin difüzyonunun şematik gösterimi.

2.9.4 Radon'un Bulunduğu Yerler

Radon gazının çoğunlukla bulunduğu yerler, kaynağı olan toprak ve kayaçlar, binalar ve yapı malzemeleri, su ve hava başlıkları altında incelenebilir.

2.9.5 Toprakta ve Kayaçlarda Radon

Radon gazı Radium' dan, Radium da Uranyum ve Toryum'dan oluşan elementlerdir. Uranyum ve Toryum yer kabuğunu meydana getiren kayaçlarda ve toprakta çok yaygın olarak bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar metamorfik ve volkanik kayaçların radyoaktif madde içeriğinin tortul kayaçlardan fazla olduğunu göstermiştir. Uranyum yer kabuğunda 2 ppm ile 4 ppm arasında çok denebilecek miktarda bulunur. Genellikle, Tungsten, Arsenik, Molibden ve Berilyum'la beraber bulunmaktadır. Yüksek oranda silis içeren Granit gibi volkanik kayaçlarda 6 ppm gibi daha yüksek yoğunluklarda bulunur. Silis miktarı az olan ama Demir, Magnezyum, Alüminyum içeriği çok olan kayaçlar 1 ppm' den de az Uranyum içerirler. Yer kabuğunun alkali içeriğinin fazla olduğu bölgelerde bazen Uranyum miktarı 100 ppm bile olabilmektedir.

Kayaçlarda bulunan bu Uranyumun bozunması sonucunda zincirin bir parçası olan Radium difüzyona uğrayarak daha üst katmanlardaki toprağa karışır. Uzun ömürlü olan Radium da toprak içinde sürekli bozunup Radon²²² atomlarının toprak parçacıkları ve mineralleri arasında serbest kalmasını sağlar. Topraktaki ve havaya sızan Radon gazı miktarı toprak özelliklerine ve basınca bağlıdır.

2.9.6 Binalarda ve Yapı Malzemelerinde Radon

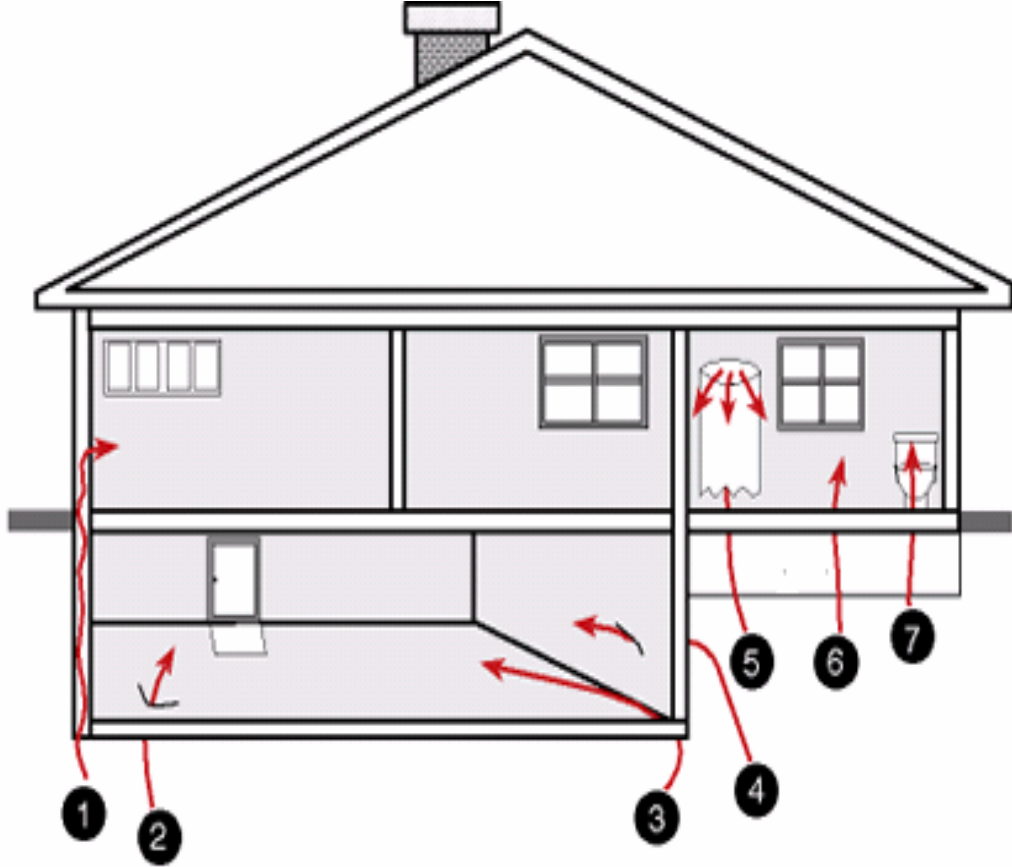
Genelde insanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekânlarda geçirdikleri için Radona maruz kalmaları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Binaların yapıldığı arazide bulunan doğal Uranyumun miktarı ve Uranyumdan oluşan Radiumun ev tabanında ki toprakta ne kadar biriktiği, Radonun bina altlarında ve

buradan da bodrumlarda birikmesi ve bina içine sızmasıyla yakından ilişkilidir. Toprağın Radyum yoğunluğu genellikle 10 – 50 Bq/m³ civarındadır. UNSCEAR 1993 yılı tahminlerine göre dünya geneli için bu ortalama olarak 40 Bq/m³' tür.

Radon gazının aralıklardan ve çatlaklardan eve sızması, evdeki yapı malzemesinden kaynaklanan Radon'un havaya karışması maruziyeti etkileyen önemli etkenlerdir. Radon gazının havadaki miktarı bölgeden bölgeye ve ülkeden ülkeye göre değişim gösterir. Binalara Radon; zemindeki çatlaklar, yapı bağlantı noktaları, duvar çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası boşluklarından girmekte, ayrıca yapı malzemeleri, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gaz ve içme sularında bulunan Radon da bina içi yoğunluğunu artırmaktadır. Binalardaki radon kaynağının büyük bir kısmı, binanın temelindeki toprak ve kayalardır. Radon gazı, toprak boyunca yükselerek, binanın altında hapsolmakta ve basınç oluşturmaktadır.

Soğuk havalarda evlerin ısıtılması sonucu evdeki basınç az ve dışarıdaki basınç fazla olduğundan içerdeki Radon oranı yükselir. Aynı durum rüzgârlı havalar için de geçerli olduğundan Radon yoğunluğu rüzgârlı havalarda iç mekânlarda artmaktadır. Yaz aylarında ise iyi havalandırılmış işyeri ve evlerde dışarı ile basınç farkı olmayacağı için ortamdaki radon seviyesi azalır. Binanın altındaki bu yüksek basınç nedeniyle gazlar yerden ve duvarlardan, özellikle çatlak ve boşluklardan, bina içlerine sızarlar.

Topraktaki ve yapı malzemelerindeki Ra-226 miktarı, toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı, difüzyon potansiyeli, toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve yalıtım niteliği, bina zemini, binadaki havalandırma kapasitesi, iklim koşulları, iç-dış hava sıcaklık ve basınç farkı binalardaki Radon yoğunluğunu etkileyen temel unsurlardır. Şekil 2.18'de Radon gazının binalara nerelerden girdiği gösterilmektedir: 1) Duvar içi kaviteleri, 2) Zemin çatlakları, 3) Birleşme noktaları, 4) Duvar çatlakları, 5) Su kaynağı, 6) Asma tavan boşluğu, 7) Boru çevresi boşluğu.



Şekil 2.18 Radon'un binalara giriş noktaları

Evlerdeki Radonun diğer bir kaynağı inşaat ve yapı malzemeleridir. Radyum yoğunlukları incelenen çimento türlerinin kimisinin diğerlerinden fazla yoğunluklarda Radyum içerdikleri belirlenmiştir. Bu malzemelerin kullanılması binalarda Radon yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Radyumun yapı malzemelerindeki ortalama yoğunluğu 100 Bq/Kg seviyesindedir. Tahta, alçıtaşı, kum ve çakıl aktiviteleri düşük olan malzemelerdir. Mesela, tuğla bir evde yılda 50–100 mRem, beton bir evde 70–100 mRem ve tahta bir evde ise 30–50 mRem radyasyon bulunur. Çizelge 2.7' de çeşitli yapı malzemelerinin Radon yoğunlukları Bq/m³ cinsinden verilmektedir.

Malzeme Cinsi	Konsantrasyon Bq/kg	Malzeme Cinsi	Konsantrasyon Bq/kg
Ağaç	1,1	Kırmızı Tuğla	78
Tabii Alçı	2,9	Uranyum Madeni Atıkları	4625
Portland Çimento	45	Alçı Taşı	26
Beton	98	Kireç Lime	33
Deniz Kumu	7	Kireç Taşı	3
Nehir Kumu	44	Kalsiyum Silikat	2140
Kum Tuğla	82	Şapşist	496
Granit	180	-----	-----

Çizelge 2.7 Bazı yapı malzemelerinin ortalama Rn yoğunlukları (Bq/m³).

Binalarda Radon222 yoğunluğunu belirleyen unsurları şöyle sıralayabiliriz:

- Topraktaki ve yapı malzemelerindeki Radyum226 miktarı
- Toprak ve yapı malzemelerinde yayılma (difüzyon) potansiyeli
- Toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve yalıtım niteliği ve bina zemininin yapısı
- Binadaki havalandırma kapasitesi
- İklim koşulları ve toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı
- İç-dış hava sıcaklık ve basınç farkı

2.9.7 Havada Radon

Açık havadaki Radon gazının başlıca kaynağı yer kabuğunda bulunan Radyum izotopudur. Radyumun bozunmasıyla açığa çıkan Radon topraktaki gözeneklerden atmosfere difüzyon yoluyla karışır ve atmosferik Radon yoğunluğunu artırır. Bu hareketi etkileyen temel etkenler şunlardır:

- Materyallerden kaynaklanan Radon yayılımı

- Toprak ve hava arasındaki basınç farkı
- Toprağın suya doyma seviyesi
- Kayaç ve toprağın gözenekli yapısı
- Radyumun yoğunluğu

Atmosfer basıncının düşük olması durumunda, toprak içerisindeki havada da basıncın düşüktür ve derinden yüzeye yönelen gelen Radon miktarı artar. Yağmurlu ya da yağışlı havalarda yüzeydeki toprak nem oranı artar ve toprak gözenekleri kapanır. Altan yüzeye yönelmiş Radon toprağın üst gözeneklerinde tutulur ve Radonun aşağıdan yukarıya difüzyon yoluyla geçişi zorlaşır. Sonuçta toprak yüzeyindeki Radon yoğunluğunda azalma olur. Sıcaklığın yükselmesi toprağın kurumasını sağlayacağından gözenekler artar ve böylece Radonun topraktan kaçışı kolaylaşır. Radon yoğunluğunun mevsimsel bazı incelemeleri yapıldığında günün öğle saatlerinde minimum, gece yarısı ise maksimum seviyelere ulaştığı görülmüştür.

2.9.8 Sularda Radon

Bir bölgede bulunan göller, akarsular, göletler, kuyular ve membalar o bölgenin jeokimyasal ve jeofiziksel yapısı ve radyoaktiflik içeren madenleri hakkında bilgi verir. Yeraltı Uranyum yataklarının keşfinde yapılan çalışmalar genellikle kuyu ve kaynak sularında Radon yoğunluğu ölçerek gerçekleştirilir. Bunun sebebi bu suların kaynağının, yeraltı, akarsular sistemi olması ve bu akarsu sisteminin de kollarının Uranyum yataklarından geçme ihtimalinin yüksek olmasıdır. Eğer Uranyum yatağından geçen bir kol varsa yatağı yıkayan sulara Uranyum ve Radyum çözünür ve tabii ki Radon gazı çıkışı gözlenir. Bu yüzden kaynak sularının çıkış noktalarında Radon gazı yoğunluğu artar.

Radon miktarının termal sular söz konusu olduğunda ise daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun en önemli sebepleri termal suların sıcak olmaları, geçtikleri yerlerde daha fazla minerali, dolayısıyla Uranyum tuzunu çözebilmeleri ve yerin daha derin noktalarından yeryüzüne çıkıyor olmalarıdır. Evlerde kullanılan musluk

suları da tüm arındırma işlemlerine rağmen belirli bir miktar Radon içermektedir. Bu miktar ev suyunun alındığı kaynağa ve ne kadar arıtıldığına bağlıdır.

2.10 Radon ve Sağlık

Radon topraktan moleküler difüzyon veya konveksiyonla sızarak yerden havaya doğru hareket etmekte ve atmosfere ulaşmaktadır. Ancak bir kısmı yüzey altında kalıp, suda çözünerek yeraltı sularına karışmaktadır. Havadaki radonun dağılımı meteorolojik şartlara bağlı olmakla birlikte radon yoğunluğu yükseklikle azalmaktadır. Radon bir seri bozunma ile yine radyoaktif olan kısa ömürlü bozunma ürünleri üretir. Bu radyoaktif maddeler Po, Bi ve Pb elementlerinin radyoizotoplarıdır. Bu ürünlerin radondan farkı gaz halinde olmamalarıdır. Bu izotoplar havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak radyoaktif aerosoller oluşturmakta ve solunum yoluyla akciğerlere alınmaktadırlar. Radon ve bozunma ürünlerinin solunması önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır.

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. Solunum sisteminde ortaya çıkan bozunma sonucunda, bronşsal epiteldeki radyasyon dozu artmakta, bozunma ürünleri kararlı hale gelinceye kadar bozunma devam etmekte ve bu sürecin her aşamasında radyasyona maruz kalınmaktadır. Bu ise, akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla, zaman içerisinde kansere sebep olabilmektedir. Solunum sistemindeki radyasyon dozu; solunmuş havadaki radon ve bozunma ürünleri yoğunluğuna, toz içerisindeki parçacıkların büyüklüğüne ve fizyolojik parametrelere bağlıdır.

Epidemiyolojik çalışmalar, yüksek seviyede radon ve bozunma ürünleri, dolayısıyla radyasyona maruz kalmış bireylerde akciğer kanseri oranlarının yüksek olduğunu göstermiştir. İngiltere Milli Radyasyondan Korunma Komitesi (NRPB), İngiltere'deki yıllık toplam 41,000 akciğer kanserinden en az 2,500'ünü, ABD Halk

Sağlığı Servisi ise yıllık akciğer kanseri vakalarının, sigara içmeyenlerden 5,000, sigara içenlerden ise 15,000'ini, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) ise toplam akciğer kanserlerinin %10'unu radona bağlamaktadırlar. Ancak bu durum yüksek dozda radona maruz kalmış herkesin akciğer kanserine yakalanacağı anlamını taşımaz. Sigara, kanser riskini artırır. Hem sigara içip hem de yüksek dozda radona maruz kalmış kişilerde kansere yakalanma riski oldukça yükseltmektedir..

Radonun sağlık açısından tehlikeli oluşu ve sürekli olarak maruz kalınması nedeniyle değerlerinin denetim altında bulunması gerekmektedir. Bu sınır değerler ise her bölge ve ülke için farklıdır. Çizelge 2.8' de çeşitli ülkeler ve uluslar arası kuruluşlar tarafından benimsenen kapalı ortamlar için müsaade edilebilir Radon konsantrasyonları Bq/m³ cinsinden verilmektedir.

A.B.D.	150	Hindistan	150	Norveç	200
Almanya	250	İngiltere	200	Rusya	200
Avustralya	200	İrlanda	200	Türkiye	400
Çin	200	İsveç	200	AB*	400
Danimarka	400	Kanada	800	ICRP**	400
Fransa	400	Lüksemburg	250	WHO***	100

Çizelge 2.8 Bazı ülkelerde kabul edilen Rn sınır değerleri (Bq/m³).

2.11 Radon ve Deprem

Depremlerin önceden saptanması konusunda yapılan çalışmalarda, depremlerin istatistiksel analizleri ve jeofiziksel öncüler olarak bilinen iki temel öncü yöntem ortaya konmuştur. Yeraltından sızan Radon yoğunluğundaki değişimler jeofiziksel öncüler arasında yer almaktadır. Rusya, Japonya ve Çin'de yapılan çalışmalar Radon gazıyla sismik faaliyetler arasında doğrudan bir ilişki olduğunu saptamıştır. Radon sızıntısının, aktif faylar üzerinde daha fazla olduğu; atmosferik koşullara ve sismik faaliyetlere bağlı değişiklikler gösterdiği de bilinenler arasındadır. Yer kabuğundaki

gerilmeler nedeniyle oluşacak genleşmeler, kayalardan yeraltı su sistemine Radon geçişinin artmasına; bu yüzden de, sismik faaliyet başlamadan önce, çevredeki kuyu ve kaynak sularındaki Radon yoğunluğunda bir artış gözlenmesine neden olmaktadır.

Deprem araştırmalarına yönelik çalışmaların özellikle çevredeki kuyu ve kaynak sularında yapılmasıyla çok daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Çin’de ve 1966 Taşkent depreminde yapılan yeraltı sularındaki Radon değişim gözlemleri, Japonya’nın yeraltı sularında sürekli izleme sistemi geliştirmesine öncülük etmiştir; Tokyo Üniversitesi ve Japon Jeoloji Araştırma Birimi, depremi önceden saptamayı hedefleyen bir izleme ağı kurmuştur.

3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, ilk olarak Radon yoğunluk ölçümlerinde kullanılan AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörün yapısı, çalışma ilkesi, teknik özellikleri, kullanılan aparatlar ve yazılım tanıtılmıştır. Daha sonra detektörün kullanıldığı alanlar, kalibrasyonun tekniği ve deneysel çalışma yöntemi verilmiştir.

3.1 AlphaGUARD Radon Detektörü

Radon ölçümlerinde kullanılan AlphaGUARD PQ 2000PRO temel olarak Radon (Radon222), Radon220 (Thoron) ve Radon yan ürünlerine ait radyasyon yoğunlukları ile Gamma (γ) doz oranını ölçmekte kullanılan taşınabilir bir radyasyon detektörüdür. AlphaGUARD havada, suda, toprakta ve yapı malzemelerinde radyasyon ölçümleri yapabilmektedir. Ölçüm sonuçlarını Bq (Bequerel) yani Bq/m^3 cinsinden veren AlphaGUARD detektörü, eş zamanlı olarak sıcaklık, atmosfer basıncı ve nem oranı gibi üç farklı iklimsel parametreyi de ölçebilmektedir. Bu parametrelerin birimleri sırasıyla $^{\circ}C$, mbar ve %rH'dir.

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, mesela yüksek nem, yüksek sıcaklık, yüksek titreşim gibi, bakım gerektirmeden ölçüm yapabilmektedir. Şekil 3.1' de AlphaGUARD detektörü görülmektedir.



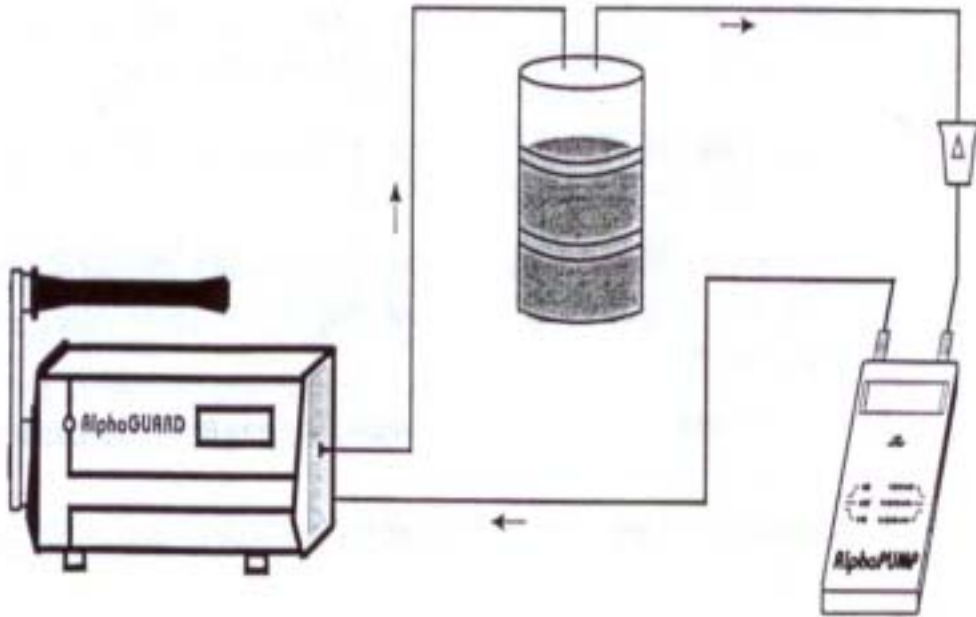
Şekil 3.1 AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörü.

AlphaGUARD Radon detektörü ölçüm ünitesine tümleşik olan bir emme pompası yardımı ile havayı detektör iyonlaşma odasına çeker. Emme sonucunda iyonlaşma odasına giren Radon222 ve Radon220 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 sinyali olarak gönderilir ve detektörün kalibrasyon bilgileri de kullanılarak yazılım tarafından okunabilir veriler haline dönüştürülür.

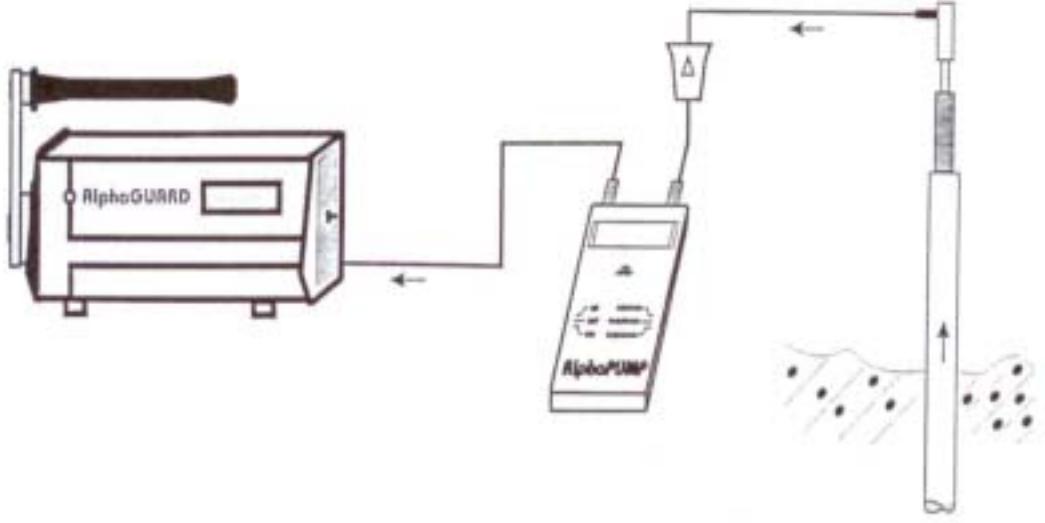
Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, arşivlenmesi ve sanal ortamda sunulması için ise AlphaGUARD için geliştirilmiş çeşitli yazılım paketleri kullanılmıştır. Bunlar AlphaVIEW, AlphaEXPERT ve en son geliştirilmiş olan DataEXPERT yazılımlarıdır. İlk iki yazılım türü sadece DOS ortamında çalışmaktadır ve AlphaGUARD detektörü ile bir RS232 port ile haberleşmektedirler.

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.

AlphaGUARD'ın atmosferde veya havada yapacağı ölçümler için ayrıca bir aparat kullanmak gerekmemektedir. Ancak suda, toprakta ve yapı malzemelerinde Radon ve yan ürünlerin yoğunluklarının tayin edilebilmesi için bazı aparatlar kullanılması gerekmektedir. Suda yapılacak ölçümler için AquaKit, toprakta yapılacak ölçümler için Soil Gas Probe (Toprak Gaz Sondası) kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Ayrıca AlphaGUARD ile gerek sudaki, gerek topraktaki ve gerekse yapı malzemelerindeki ölçümlerin (Şekil 3.2) yanı sıra kalibrasyon işlemlerinde de kullanılması gerekli olan AlphaPUMP, cihaz iyonizasyon odasına hava pompalayan bir diğer alettir. Bahsi edilen bu bileşenlerle ilgili daha ayrıntılı bilgi daha sonraki kesimlerde verilmiştir.



Şekil 3.2 AlphaGUARD ile yapı malzemelerindeki Radon ölçümü.



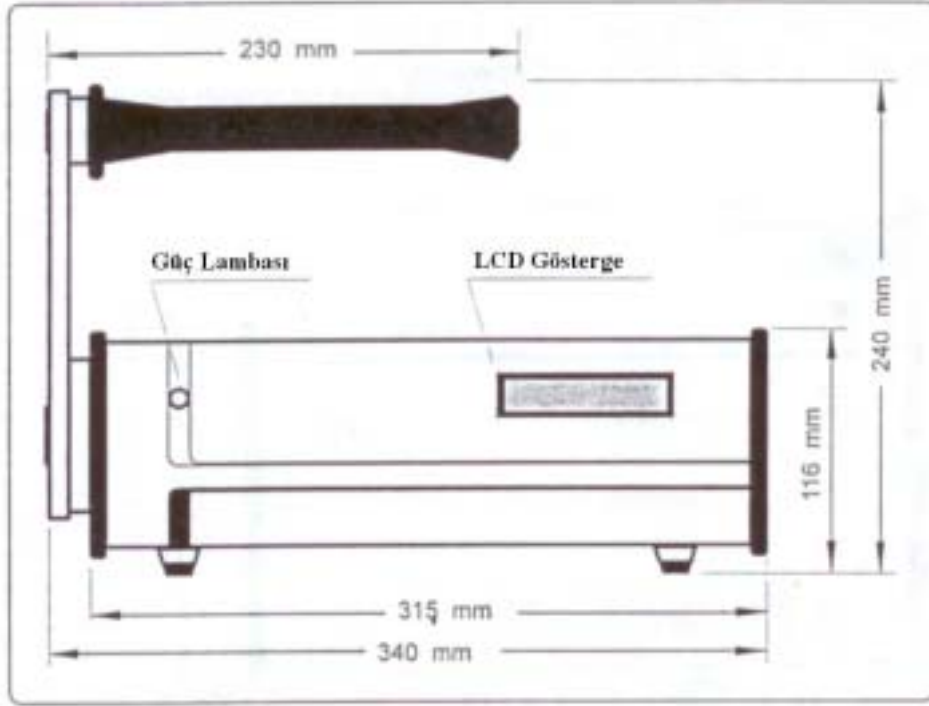
Şekil 3.3 AlphaGUARD ile toprakta Radon ölçümü için kullanılan sistem.

3.2 AlphaGUARD Detektörünün Yapısı ve Çalışma İlkesi

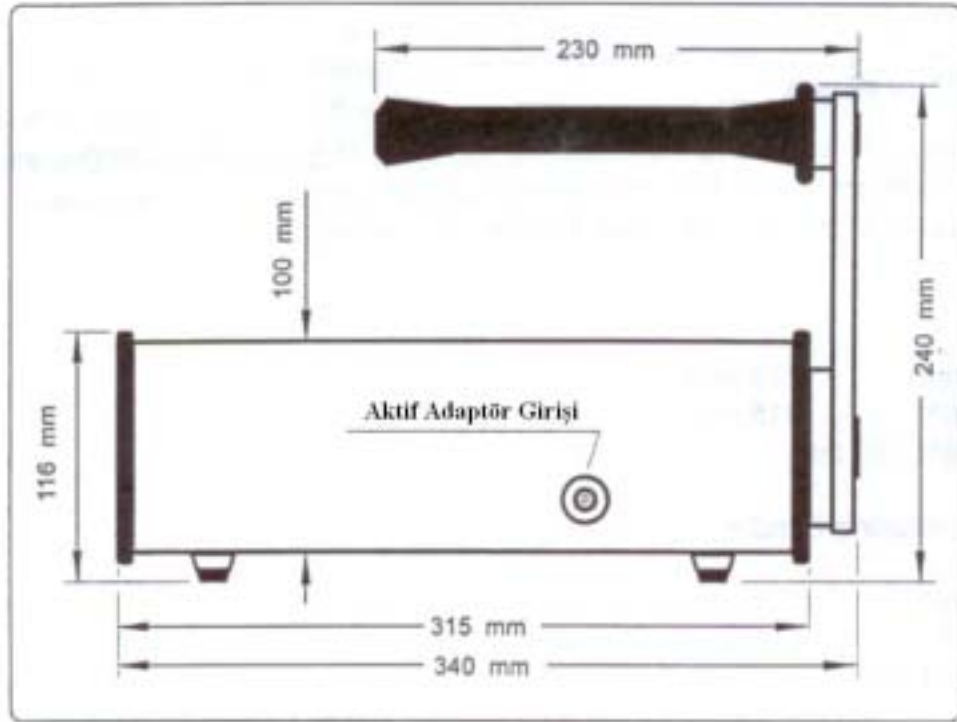
AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün yapısı iki temel kısma ayrılarak incelenebilir: 1) Detektörün dış yapısı, ebatları ve dışarıdan görülen bazı özellikleri. 2) Detektörün iç yapısı ki iç yapısını oluşturan iki ana bileşen olan ölçüm ve veri işleme birimleri.

3.2.1 Detektörün Dış Yapısı

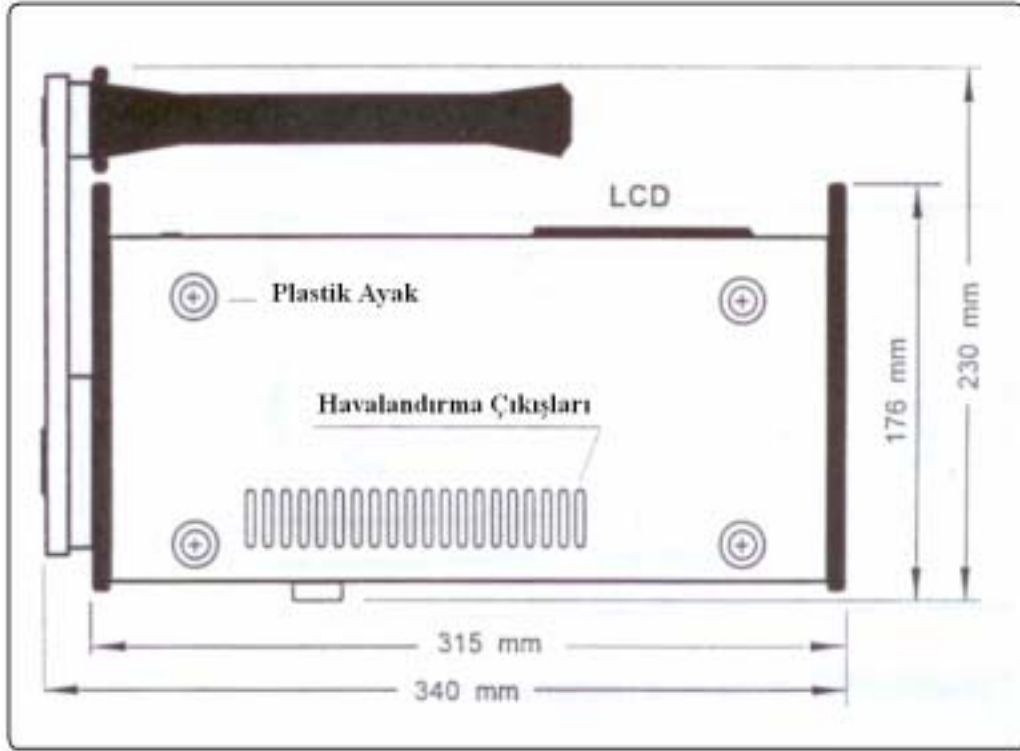
AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün ölçüm yapmasını sağlayan ölçüm ve elektronik aksam bileşenleri dayanıklı bir alüminyum dış gövde içine yerleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde AlphaGUARD cihazın farklı görünüşleri ile bazı ebatları verilmiştir.



Şekil 3.4 AlphaGUARD cihazının önden görünüşü ve ebatları



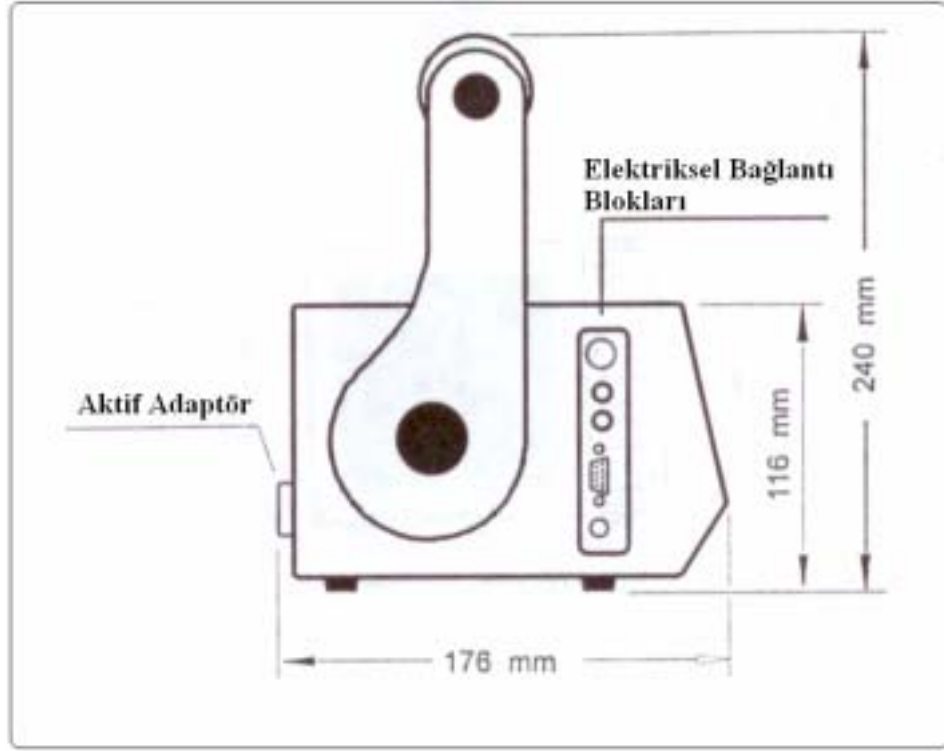
Şekil 3.5 AlphaGUARD cihazının arkadan görünüşü ve ebatları



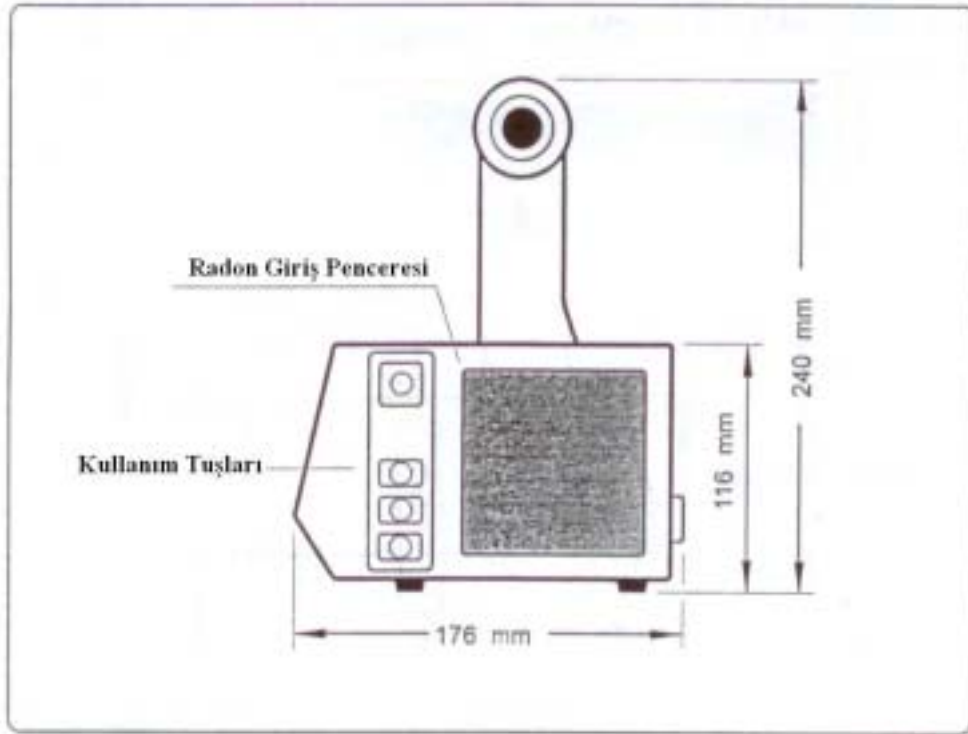
Şekil 3.6 AlphaGUARD cihazının alttan görünüşü ve ebatları

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 (Şekil 3.5). 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 taşıma kolunun bağlı olduğu sol kısımda elektrik bağlantı girişleri bulunmaktadır. Burada harici sensor girişi için bir adet MINI-DIS-85 soketi, 2 adet 4mm'lik soket, PC ile bağlantıyı sağlamak için 1 adet RS232 girişi ve 12V DC adaptör girişi bulunmaktadır (Şekil 3.7). Cihazın sağ tarafında korumayla kapatılmış Radon gazı giriş paneli ve AlphaGUARD menü kontrolünü sağlayan tuş takımı bulunmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.7 AlphaGUARD cihazının sol yandan görünüşü ve ebatları



Şekil 3.8 AlphaGUARD cihazının sağ yandan görünüşü ve ebatları

Radon giriş penceresinin filtre yüzeyi ile koruyucu grid arasında teknik açıdan gerekli ve tüm yönlerde açık olan bir hava aralığı bulunmaktadır. Bu demektir ki koruyucu gridi herhangi bir şeyle kaplamak Radon gazı girişi penceresini gaz sızdırmaz hale getirmez, yani iyonizasyon odasına yine Radon gazı girişi sağlanır.

3.2.2 Detektörün İç Yapısı

AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon detektörünün asıl önemli kısmı iç yapısıdır. Cihazın alüminyum korumasının altında ölçüm yapılmasını sağlayan detektör (atma iyonizasyon çemberi) ve detektörden gelen sinyalleri işleyip sayısal veri haline getiren sinyal işleme birimi DSP (Digital Signal Processing-Sayısal Sinyal İşleme) bulunmaktadır.

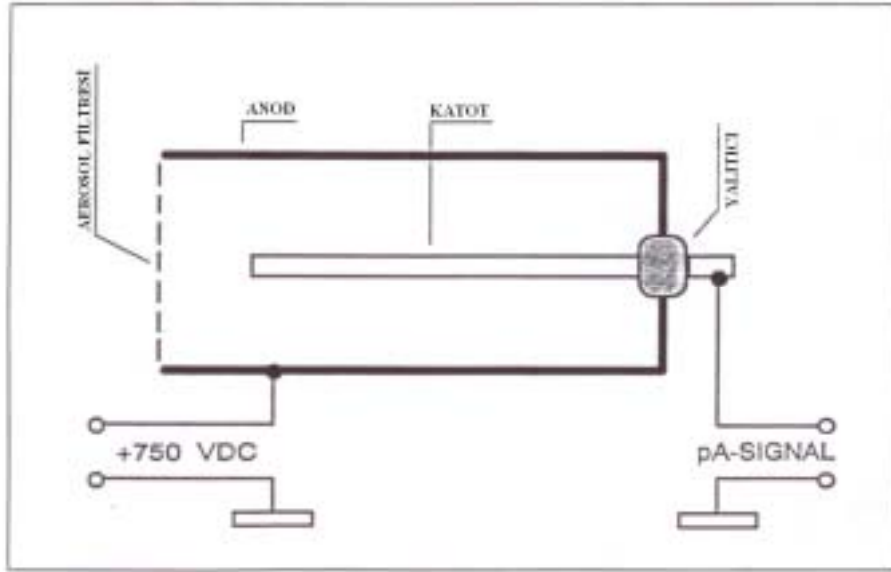
Radon222, Radon220 (Toron) ve bunların yan ürünlerinin sürekli ölçülmesini amaçlayan birçok cihaz ve bunların kullandıkları çeşitli tiplerde detektörler mevcuttur. Seçilecek detektörler ölçümün amacına, hassasiyet sınırlarına, ölçümün yapılacağı yerlere ve buralardaki radyasyon yoğunluğuna ve tabii ki maliyete göre belirlenmektedir. Örneğin radyasyon yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde ölü zamanı daha küçük bir detektör seçilmesi gerekmektedir. Bir radyasyon detektörü için “ölü zaman” detektörün algılayabileceği iki en yakın bozunma arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanabilir. Tersine daha az yoğunlukta radyasyon bulunan bir noktada bu kadar hassas bir detektöre, dolayısıyla daha karmaşık bir sisteme ihtiyaç duyulmayacaktır. Aşağıda AlphaGUARD benzeri yedi çeşit detektör sıralanmıştır.

1. Silikon yüzeyli bariyer diyotu (Analog işletim modu)
2. Alfa duyarlı mikroçip
3. PMT detektörlü (Lucas Hücresi) ZnS(Ag) sintilasyon çemberi
4. İyonizasyon çemberi – Elektrometre DC entegral modlu
5. İyonizasyon çemberi – Tek kanal analiz edici toplam sayma modu
6. İyonizasyon çemberi – Multi kanal analizörlü 2D (iki boyutlu) alfa spektrumu
7. İyonizasyon çemberi – 3D (üç boyutlu) doğrusal sinyal işlemcisi (DSP)

Yukarıdaki detektör sistemleri kendi aralarında bazı fiziksel ilkeler bakımından karşılaştırıldığında DSP özelliğine sahip iyonizasyon çemberinin daha üstün niteliklere sahip olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırmadan anlaşıldığı üzere mevcut detektörler içerisinde en avantajlı olanı 3D DSP teknolojisine sahip iyonizasyon çemberidir. AlphaGUARD detektörü, tasarım optimizasyonu yapılmış silindirik atma iyonizasyon çemberine sahiptir.

Düzenli işletimde Radon içeren hava iyonizasyon çemberi içerisine geniş yüzeyli bir cam fiber filtreden geçerek girmektedir. Burada sadece Radon222'nin geçmesine izin verilirken yan ürünlerin iyonizasyon odasına girmesi engellenmektedir. Aynı zamanda filtre, çemberin iç kısmının toz zerreciklerinin birikmesiyle oluşacak kirlenme ve paslanmadan etkilenmemesini sağlamaktadır. Buna destek olarak cihaz içine dışarıdan miktarı kontrol edilebilen temiz hava girişi sağlayacak bir pompa (AlphaPUMP) da kullanılmaktadır.

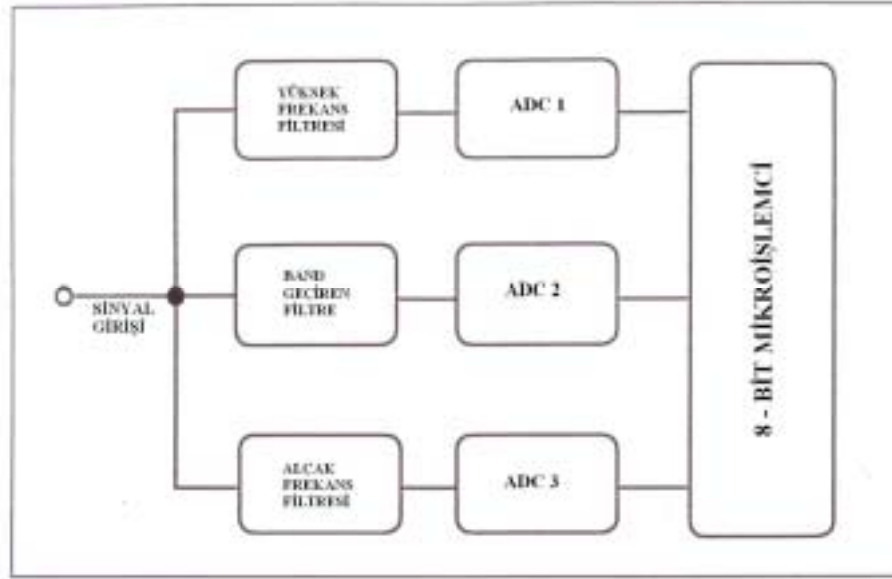
AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun silindirik atma iyonizasyon çemberi 0,56 Litrelik bir etkin hacme sahiptir. Cihaza güç verilmesiyle beraber iyonizasyon çemberinin metal iç yüzeyleri 750 Voltluk bir iç gerilimle yüklenerek detektörün anodu (+ kutup) haline gelir. Buna karşılık detektörün yatay eksenine denebilecek eksen boyunca yatay olarak uzanan paslanmaz çelikten yapılmış çubuk ise 0 Volt seviyesindedir ve katot vazifesini görür. Anot ve katot arasındaki yalıtım elektrot çubuğun iyonizasyon çemberi içerisine girdiği noktadaki bir plastik parçayla sağlanır. Anot ve katot arasındaki 750 Voltluk gerilim farkı sayesinde detektör etkin hacmi içerisindeki iyonizasyon sonucu ortaya çıkan iyonlardan katyonlar (- yüklü iyonlar) anoda, anyonlar (+ yüklü iyonlar) ise katoda hareket ederler. Böylece yüklerin hareketi sonucu devrede bir akım meydana gelir. Bu akım da AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun elektronik birimi tarafından işlenerek anlamlı veriler haline getirilir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.9) AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun atma iyonizasyon odasının şematik bir çizimi görülmektedir.



Şekil 3.9 AlphaGUARD detektörünün iyonizasyon çemberinin şematik çizimi

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 Torun'un neredeyse tamamı bozunacaktır çünkü 10 dakikalık bir gecikmeye sahiptir. Pratikte AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Torun'a karşı hassaslığı Radon'a karşı hassaslığının %1'i ile %10'u arasındadır.

Cihazının iç yapısının 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. DSP birimine ait blok diyagram Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 AlphaGUARD' ın sinyal işleme biriminin blok diyagramı.

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 olayları multiplletlere (üçlülere) ayrılma eğilimindedirler 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 korelasyon (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 eksenini α piki genliğini (= alfa enerjisini), y eksenini zaman

birimi başına meydana gelen α bozunumu ve z eksenini de atma şekli olmak üzere üç eksenli bir spektrum halinde sunulabilir. ADC2 yani ikinci kanal sadece yüksek Radon seviyelerinde devreye girmektedir. Kanalin 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.

3.3 AlphaGUARD PQ 2000PRO'nun Teknik Özellikleri

AlphaGUARD PQ 2000PRO, daha önce de belirtildiği gibi Rn222 kaynaklı alfa radyasyonunu ölçmekte kullanılır. Bu radyasyon maddeyi iyonize edici özelliğe sahip olduğundan detektör buna uygun bir iyonizasyon odalı cihazdır. Detektör toplam hacmi 0,62 litredir ancak bununun 0,56 litrelik kısmı etkin detektör olarak kullanılmaktadır. Bu detektör silindirik olup besleme gerilimi (anot ve katot arası gerilim farkı) DC 750 voltur. Ayrıca cihazın dâhili bataryası sayesinde 10 gün sürekli veri alabilmektedir.

Detektör hassasiyeti oldukça düşüktür. Hata payı 20 Bq/m^3 'te 1 CPM ya da 100 Bq/m^3 'te 4,5 CPM olarak verilmektedir. Rn222 yoğunluğu ölçüm aralığı ise oldukça geniştir. Alınan veriler $2 \text{ Bq/m}^3 - 2 \times 10^6 \text{ Bq/m}^3$ aralığındadır. Bu geniş menzile rağmen sistemin kendisinden gelen %3 gibi doğrusallık hata payı bulunmaktadır.

Cihaz amaca ve zaman seçimine bağlı olarak ölçümleri iki şekilde yapabilmektedir. Difüzyon modu ve akış modu. Uzun süreli ve devamlı ölçümlerde (cihaz menzili 6

Toplam ağırlık	4,5 kg
Rn detektör tipi	İyonizasyon odası
Detektör 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 işleme 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	2 Bq/m ³
Üst sınır	2x10 ⁶ Bq/m ³
LCD ekran çözünürlüğü	1 Bq/m ³
Sistem doğrusallık hatası	< %3
Rn222 kalibrasyon hatası	± % 3
Ölçüm sıklıkları	
Difüzyon modu	10 veya 60 dak
Akış modu	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°C - +50°C
Atmosfer basıncı	700 mbar – 1100 mbar
Nem	0 %rH – 95 %rH

Çizelge 3.1 AlphaGUARD monitörünün bazı teknik ve fiziksel özellikleri.

aydır) difüzyon modu kullanılır. Bu modda cihaz detektörü 10 dakikalık veya 1 saatlik döngülerle veri kaydeder. Radon akış modunda ise veri alma aralıkları 1 dakika veya 10 dakika olarak ayarlanabilir. Bu mod daha çok kısa süreli ölçümlerde çok sayıda veri noktası elde etmek için seçilir.

AlphaGUARD PQ 2000PRO Rn222 yanında yine bir Radon izotopu olan Toron (Rn220) yoğunluklarını da aynı birimle ölçmektedir. Ayrıca üç farklı iklimsel parametre, sıcaklık, nemlilik ve basınç da aynı anda ölçülebilmektedir. Çizelge 3.1 AlphaGUARD PQ 2000PRO Radon monitörüne dair daha ayrıntılı teknik veriler içermektedir.

3.4 AlphaGUARD Detektörünün Kalibrasyon Tekniği

Kalibrasyon, cihazların değerinin doğru olduğuna inanılan bir referans maddesi veya bir düzeneğine göre ayarlanması işlemidir. Yapılan kalibrasyon sonucunda kalibrasyon faktörü veya standart sapma denilen bir değer elde edilir ve bu değer verilerin ayarlanmasında kullanılır. Bütün ölçüm yapan cihazlar daha doğru ölçüm sonuçları elde etmeleri için değeri büyük bir doğrulukla bilinen bir referansa göre ayarlanmak veya kalibre edilmek zorundadır. Bu bölümünde Radon detektörünün kalibrasyonunun yapılabilmesi için gerekli olan materyaller ve standartlar verilmiştir. Bulgular bölümünde ise kalibrasyonun yapıldığı adım adım verilmiş ve kalibrasyon sabiti hesaplanmıştır.

AlphaGUARD'ın kalibrasyon işlemi için kullanılan materyaller şunlardır:

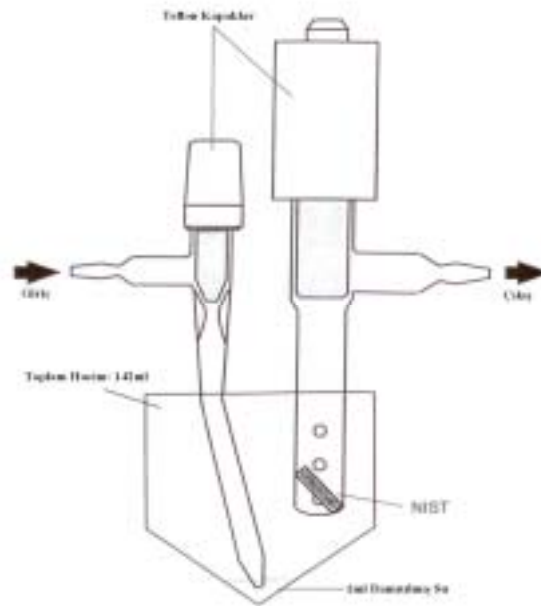
- NIST standart referans materyali.
- Yayılma ampulü (veya gaz salıcı ampul).
- Kalibrasyon konteyneri.
- AlphaPUMP pompası.

NIST standart referans materyali yaklaşık 0,31 g ağırlığında, poli etilen bir kapsül içinde çözelti halde bulunan radyoaktif Radyum226 izotopu içeren bir numunedir. Ra226 seçilmesinin temel sebepleri şunlardır: 1) Rn222' nin Ra226' dan sonraki ilk ürün olması, 2) Ra226 izotopunun Rn222 ile karşılaştırıldığında kararlı olmasıdır. Kalibrasyon sürecinde kullandığımız NIST standardına ait bazı fiziksel özellikler aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Kaynak	NIST SRM 4968–107
Radyonüklid	Ra226/Rn222
Ra226 Aktivitesi	335,1 Bq
Ra226 Aktivitesinin Görelî Belirsizliği	%1,4
Rn222 Yayılım Çarpanı	0,884 (21°C)
Rn222 Aktivitesinin Görelî Belirsizliği	%5,2

Çizelge 3.2 NIST SRM ' ye ait bazı önemli fiziksel özellikler.

Yayılma tüpü olarak tanımlayabileceğimiz aparat aşağıdaki Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Kalibrasyon işlemleri için kullanılan yayılma tüpü.

NIST standardı, yayılma tüpünün gözenekli kolu içerisinde bulunur. Konteynır  zerindeki hava giriş vanaları arasına AlphaPUMP bağlanarak konteynır içerisinde hava sirkülasyonu sağlanır. Sirküle eden hava NIST standardının içinde bulunduğu yayılma tüpünden geçerken damıtılmış suda  z nen Radon atomlarını da beraberinde sürükler. Böylece ortaya çıkan hesaplanabilir yoğunluktaki Radon gazı kalibrasyon konteyneri içinde birikmeye başlar ve bu gaz kalibrasyonun yapılması için kullanılır.

Kalibrasyon konteynırını 50 Litre hacminde, paslanmaz çelikten yapılmış silindir Şeklinde bir kaptır. Konteynır kapağı kapalı iken gaz sızdırmazdır ve çelikten yapıldığı için dış radyasyonun içeriye girmesini de engeller Kalibrasyon işlemleri yanı sıra Radon yayılma ölümleri için de kullanılır. Bu durumda içeriye hava giriş ve çıkışı kapak üzerindeki vanalarla sağlanabilmektedir.

AlphaPUMP' ın temel işlevi ise sistem için gerekli hava sirkülasyonunu sağlamaktır. Kalibrasyon işlemlerinin yanı sıra havada, suda, toprakta ve yapı malzemelerinde ölüm yapılmadı esnasında AlphaGUARD' a hava giriş ve çıkışını sağlamakta kullanılır. 12 V DC ile çalışan bu pompa 0,03 litre/dk ile 1 litre/dk arasında hava akısı sağlayabilmektedir..

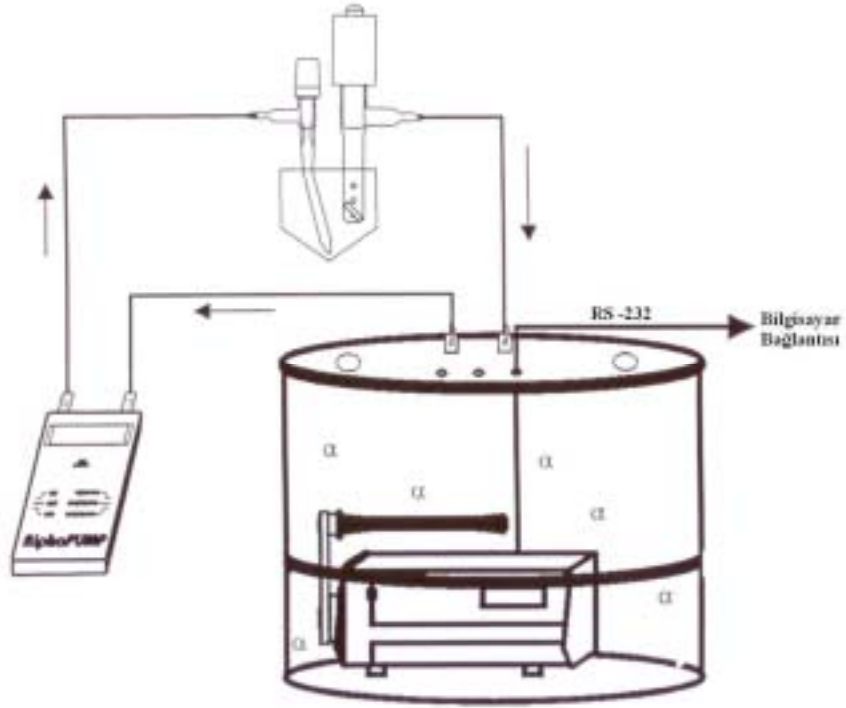
4. BULGULAR

Bu bölümünde, ilk önce Radon yoğunluk ölçümlerinde kullanılan AlphaGUARD detektörünün kalibrasyonun yapılışı ve kalibrasyon sabitlerinin hesaplanması verilmiştir. Bölüm 5.2’de, bu çalışma süresince Isparta ili sınırları dahilinde yapılmış olan Radon gazı yoğunluğu ölçümlerine ait veriler grafikler halinde verilmiştir. Her bir ölçüm noktası için elde edilmiş olan veri seti beş farklı parametreden oluşmaktadır. Bunlar Rn222 yoğunluk ölçümü, ölçüm hatası, sıcaklık, atmosfer basıncı ve bağıl nemdir. Rn222 yoğunluğu ve ölçüm hatası değerleri aynı grafikte, iklimsel parametreler ise ayrı ayrı pencerelerde olmak üzere grafiksel olarak verilmiştir.

4.1 AlphaGUARD Detektörünün Kalibrasyon Değerleri

AlphaGUARD PQ 2000PRO detektörünün kalibrasyonu üretici firma tarafından öngörülen prosedüre uygun biçimde aşağıda verilen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.

- AlphaGUARD detektörü içerisindeki bilgiler sıfırlandıktan sonra açık durumda konteynır içerisine konulmuştur. Konteynırın giriş-çıkış vanaları arasın AlphaPUMP bağlanmıştır ve gerekli elektrik ve haberleşme bağlantıları Şekil 4.1’de gösterildiği gibi tamamlanmıştır. Bağlantılar yapıldıktan sonra konteynır vanaları açılmış ve AlphaPUMP çalıştırılmak suretiyle 24 saat süresince konteynır iç havasının temizlenmesi sağlanmıştır. Bu süre boyunca yapılan ölçümler arka alan Radon yoğunluğunun tespit edilmesi için kullanılmıştır.
- Konteynır iç havasının temizlenmesinden sonra AlphaPUMP ve tüm vanalar kapatılarak AlphaGUARD takip eden 3 gün boyunca arka alan radyasyonu ölçmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.2 AlphaGUARD kalibrasyon bağlantı şeması.

$$A_{S(SRM)} = A_{SRM} \cdot f$$

Burada $A_{S(SRM)}$ NIST SRM tarafından oluşturulan etkinlik, A_{SRM} NIST SRM' nin verilen etkinliği ve f de Rn222 yayılım çarpanıdır. Böylece

$$A_{SRM} = 335,1 \text{ Bq} \quad \text{ve} \quad f = 0,884$$

$$A_{S(SRM)} = (335,1) \cdot (0,884) = 296,2284 \text{ Bq}$$

olarak bulunmuştur. Buradan ölçülen net etkinlik

$$A_{RnCal} = (C_{Rnm} - C_{Rn0}) \cdot (V_{kon} - nV_{AG})$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemlerde A_{RnCal} ölçülen net Rn etkinliğini (Bq), C_{Rnm} ölçülen toplam Rn yoğunluğunu (Bq/m^3), C_{Rn0} ölçülen arka alan yoğunluğunu (Bq/m^3), V_{kon} konteynır hacmini (m^3), n detektör sayısını ve V_{AG} de detektör toplam hacmini (m^3) temsil etmektedir. Bu parametrelerden ilk üç tanesi kalibrasyon sürecinde alınan verilerin işlenmesi sonucu elde edilen verilerdir. Bunun için Şekil 4.3’de gösterilen veri grafiği kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Kalibrasyonun tamamında alınmış olan veri seti.

Bu şekilde kırmızı çizginin grafiği kestiği nokta NIST standart maddesinin sisteme eklendiği noktadır. Burada Rn yoğunluğunun ani artışı görülmektedir. Kırmızı çizginin solunda kalan kısım arka alan radyasyonun hakim olduğu kısımken sağ taraf konteynır içerisinde Rn gazı dolu olduğu bölümü göstermektedir.

C_{Rn0} arka alan yoğunluğu kalibrasyon veri setinin arka alan radyasyon kısmından bulunmuştur. Bunun için sadece bu kısım üzerinden DataEXPERT yazılımı kullanılmış ve ortalama arka alana radyasyon için

$$C_{Rn0} = 17.700 \text{ Bq/m}^3$$

değeri hesaplanmıştır. Aynı işlem tüm veri seti üzerinden tekrarlanıp tüm zaman üzerinden toplam Rn yoğunluğu

$$C_{Rnm} = 32.866 \text{ Bq/m}^3$$

olarak elde edilmiştir. Böylece $A_{RnCal} = (C_{Rnm} - C_{Rn0}) \cdot (V_{kon} - nV_{AG})$ denkleminde gerekli değerler yerlerine yazılarak ölçümün net Rn etkinliği bulunmuştur.

$$V_{kon} = 50,4 \text{ L} = 0,0504 \text{ m}^3, \quad n = 1, \quad V_{AG} = 0,00255 \text{ m}^3$$

$$A_{RnCal} = (32.886 - 17.700) \cdot (0,0504 - 1 \cdot 0,00255) = 726,6501 \text{ Bq}$$

Δ ile gösterilen standart sapma

$$\Delta = \frac{A_{RnCal} - A_s}{A_s} \times 100$$

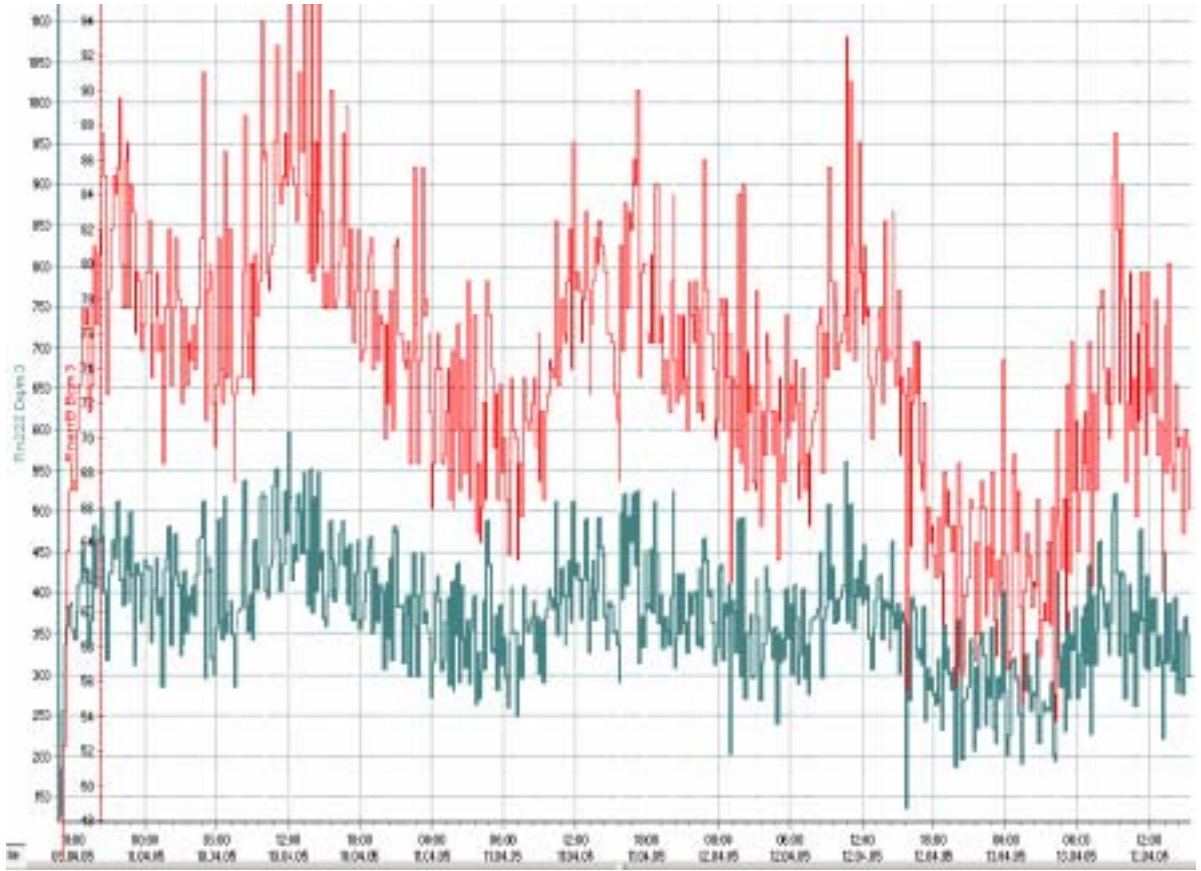
denklemden hesaplanmıştır. Bu denklemdaki A_s değeri konteynır içerisinde NIST salındıktan sonraki ikinci bölgedeki verilere fit edilen eğrinin, NIST salınması anındaki noktayı kestiği yerdeki Rn değeridir ve değeri $A_s = 647,50 \text{ Bq}$ olarak belirlenmiştir. Tüm bu hesaplanan değerlerin yerlerine yazılmasıyla AlphaGUARD için standart sapma değeri

$$\Delta = \frac{726,6501 - 647,50}{647,50} \times 100 = \%12$$

olarak hesaplanmıştır.

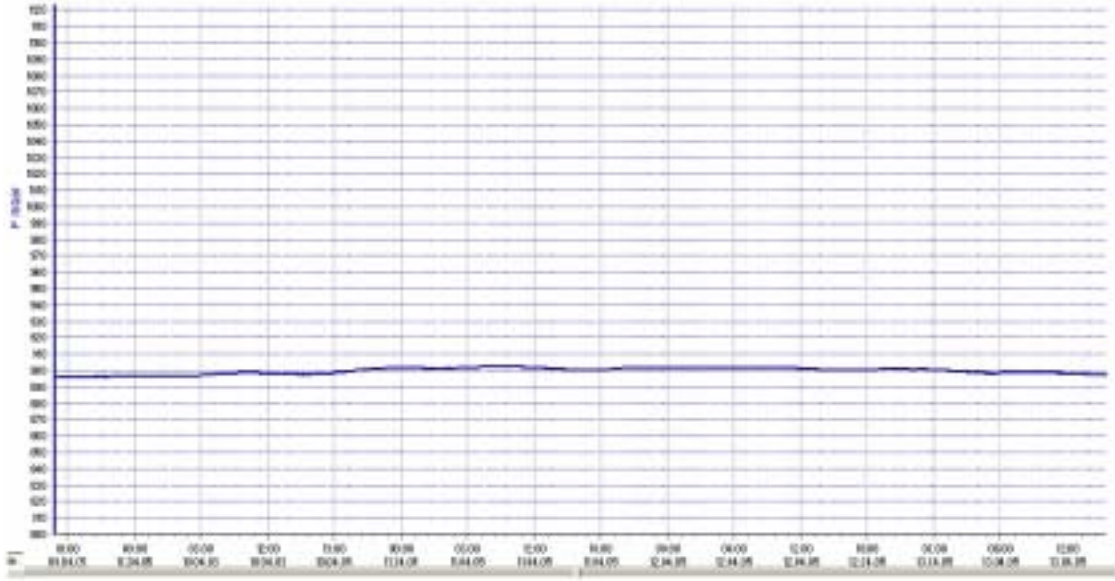
4.2 AlphaGUARD Detektörü İle Yapılan Ölçümler

Şekil 4.4'de ölçümler sonunda AlphaEXPERT yazılımında elde edilen örnek bir grafik verilmiştir. Grafikte x eksenini zaman y eksenini ise Rn222 yoğunluk ölçümü ve ölçüm hatasının göstermektedir. Rn222 yoğunluğu ve hata ölçümü iki ayrı skalada Bq/m^3 , zaman ise tek skalada saat cinsinden gösterilmektedir.



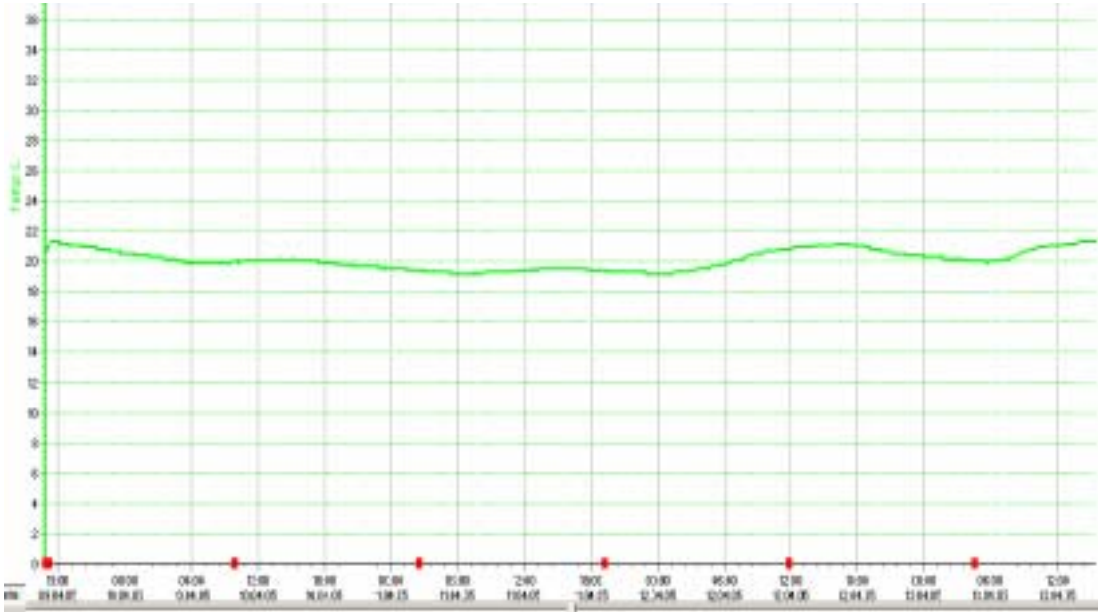
Şekil 4.4 Rn222 yoğunluğu ve ölçüm hatası örnek grafiği.

Şekil 4.5' de ölçümler sırasında elde edilen sıcaklık verilerinin zamana karşı grafiği görülmektedir. X eksenini saat cinsinden zaman y eksenini ise derece cinsinden sıcaklıktır.



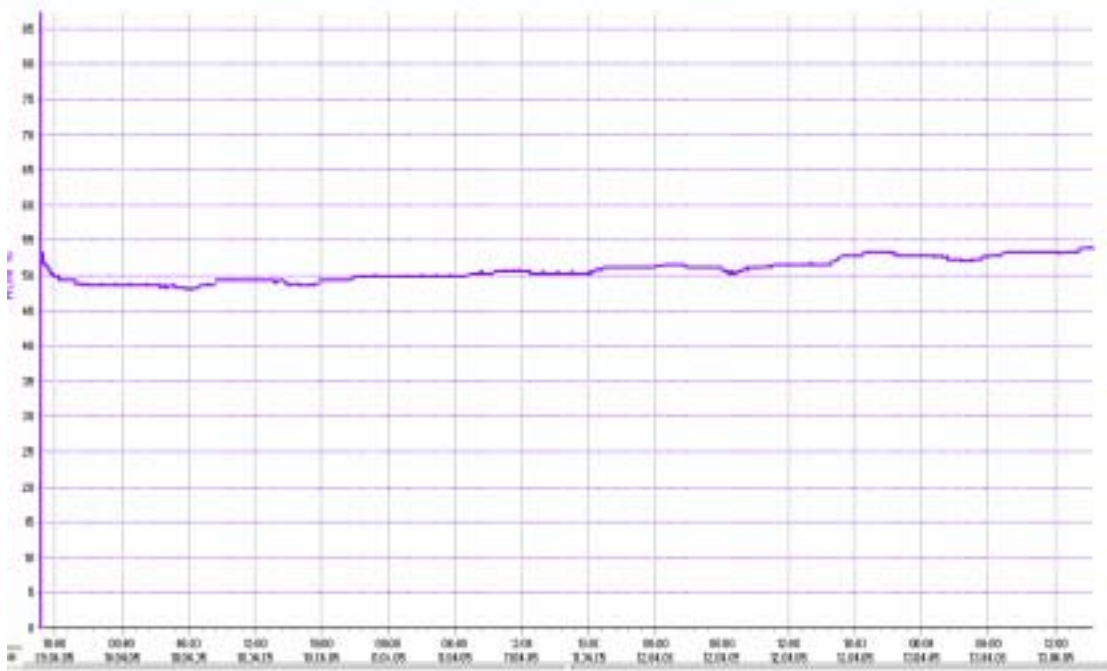
Şekil 4.5 Sıcaklık ölçümü örnek grafiği

Şekil 5.6'de ölçümler sırasında elde edilen atmosferik basınç verilerinin zamana karşı grafiği görülmektedir. X eksenini saat cinsinden zaman ve y eksenini ise mbar olarak verilmiştir.



Şekil 4.6 Basınç ölçümü örnek grafiği.

Şekil 5.7'de ölçümler sırasında elde edilen bağıl nem verilerinin zamana karşı grafiği görülmektedir. x eksenini saat cinsinden zaman ve y eksenini ise %rH olarak verilmiştir.

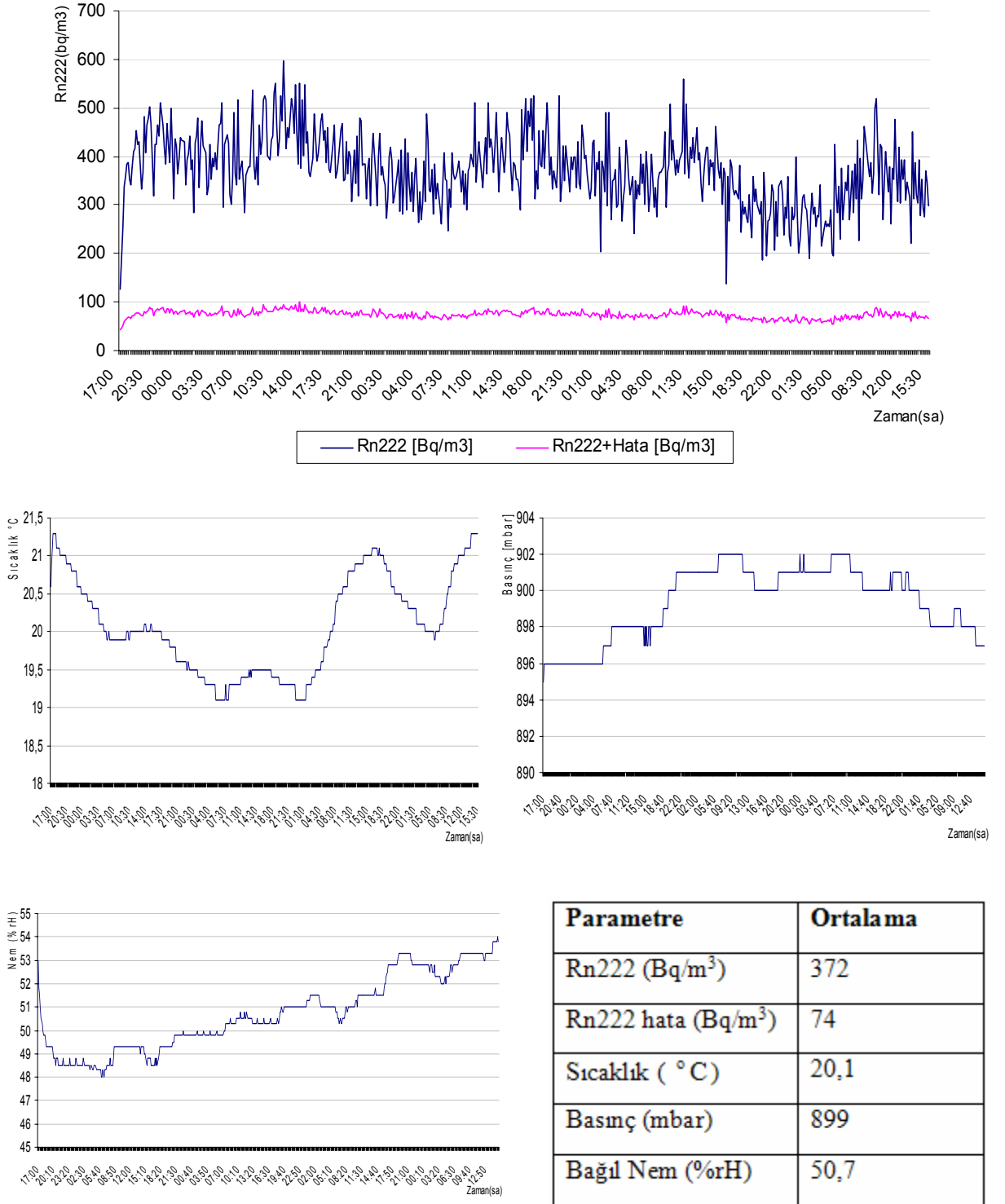


Şekil 4.7 Bağlı nem ölçümü örnek grafiği.

Tez çalışmasında ölçümlerin yapılacağı yerler tayin edilirken kapalı mekânlar tercih edilmiştir. Üniversite merkez yerleşkelerinde laboratuvarlar ve fakültelerin bodrum katları; diğer yerlerde alınan ölçümlerde de oturma odaları ve yine bodrum katları ölçüm noktaları olarak belirlenmiştir. Buralarda ortamın havalandırılma durumu göz önünde tutulmuştur. Böylece herhangi bir şekilde havalandırılmayan veya uzun süre havalandırılmayan ortamlar ile havalandırması yapılanlar arasındaki farkın aynı veri seti üzerinde görülmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışma esnasında ölçümler gün aşırı olacak şekilde, hatta bazen birkaç gün boyunca alınmıştır. Böylece gece-gündüz arasındaki yoğunluk farkının gözlenmesi sağlanmıştır. Verilerin alındığı 10 yerleşim birimi sırasıyla Süleyman Demirel Üniversitesi (Doğu ve Batı Yerleşkeleri), Isparta İli şehir merkezi, Yedişehitler Mahallesi, Muzaffer Türkeş Mahallesi, Işıkkent-Batıkent Mahallesi, Yalvaç Meslek Yüksek Okulu, Davraz Mahallesi, Halıkent Mahallesi, Piri Mehmet Mahallesi, Gökçay'dır.

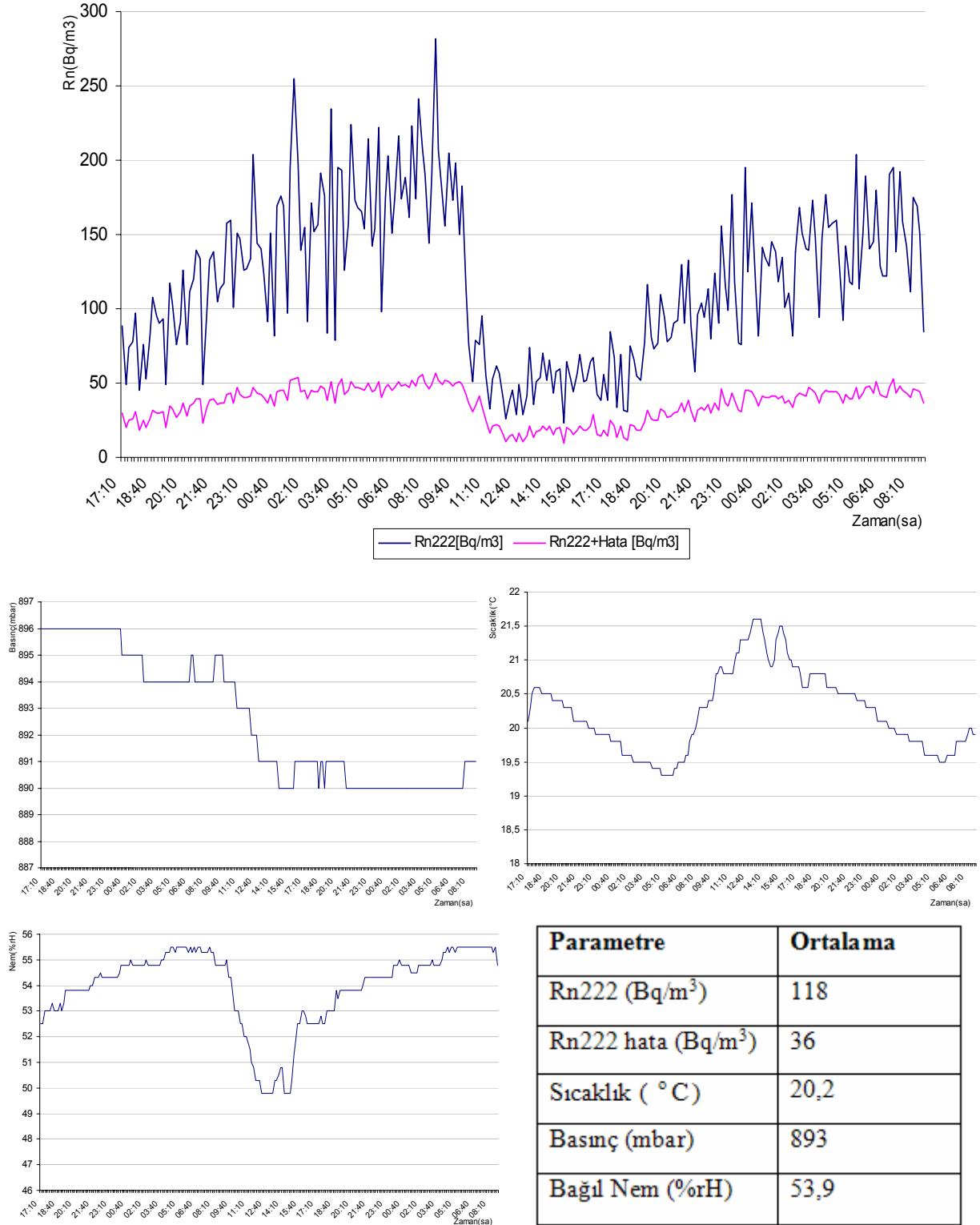
Takip eden bölümlerde yukarıda bahsedilen 10 farklı noktada alınan verilerin grafiklerinin yanı sıra tablo halinde ortalama değerler verilmiştir.

4.2.1 Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi'nde Alınan Ölçümler



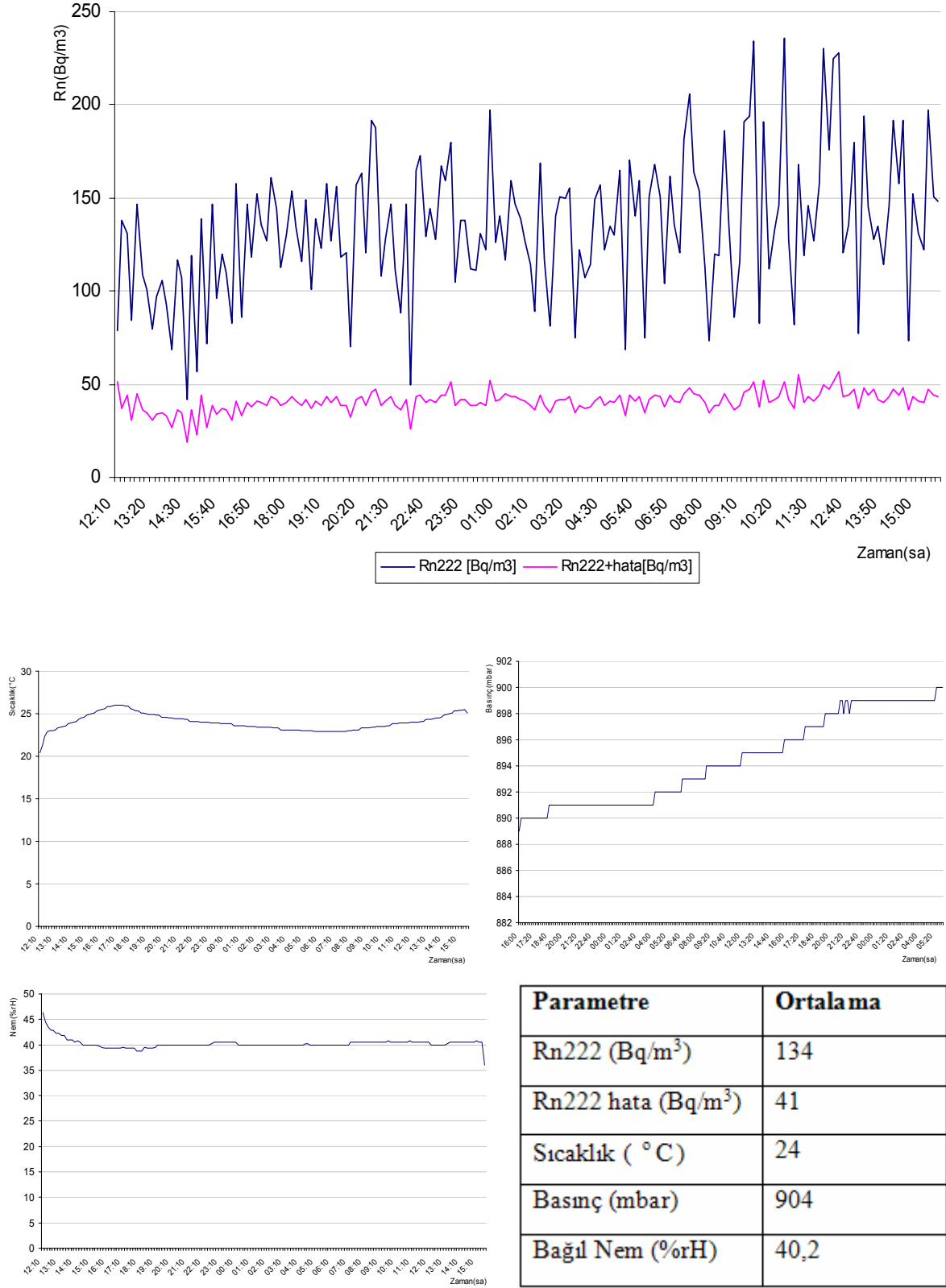
Şekil 4.8 Süleyman Demirel Üniversitesi'nde alınan ölçümler.

4.2.2 Isparta İli merkezinde Alınan Ölçümler



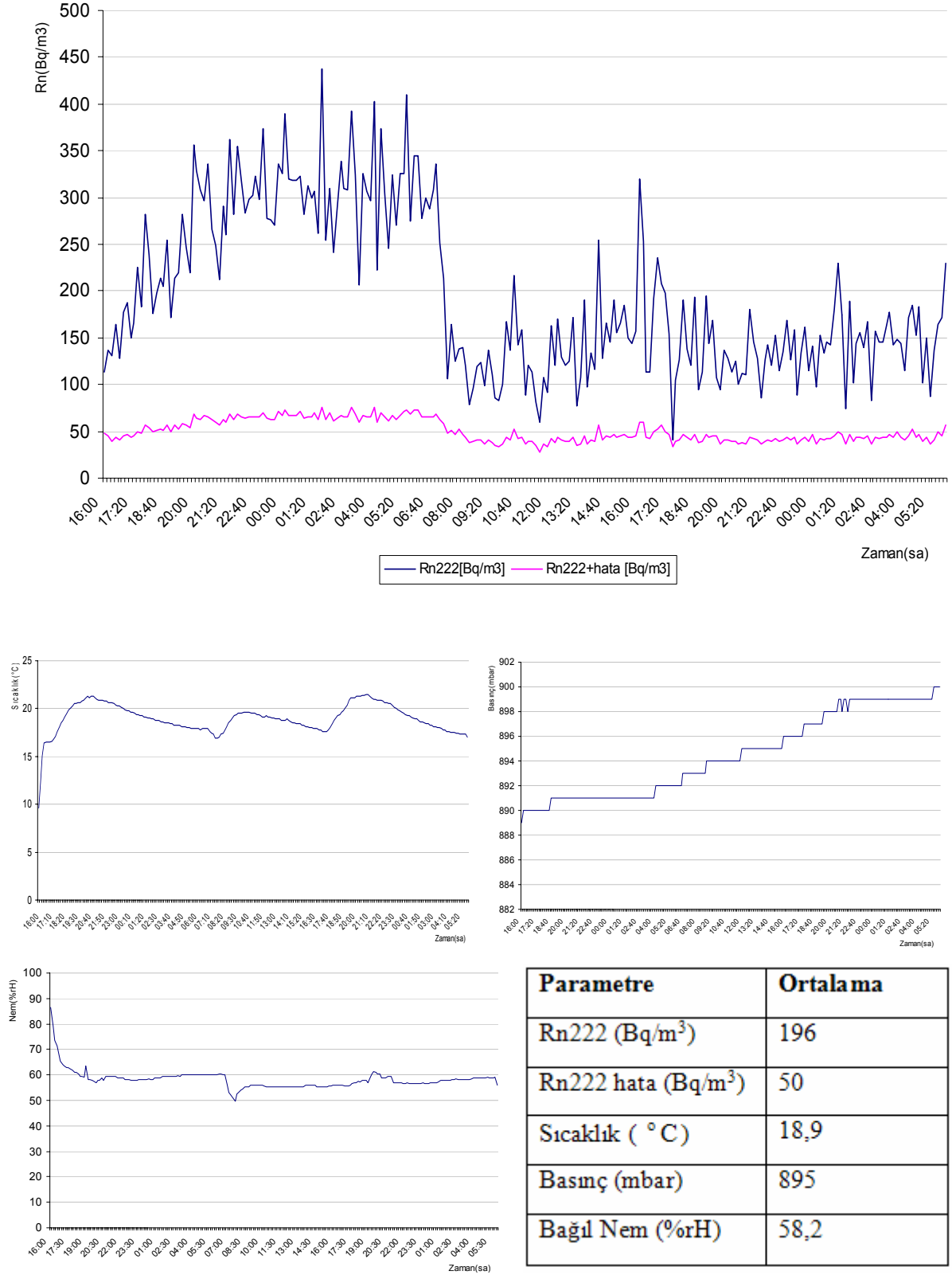
Şekil 4.9 Isparta İli merkezinde alınan ölçümler.

4.2.3 Isparta İli Yedişehirler Mahallesi'nde Alınan Ölçümler



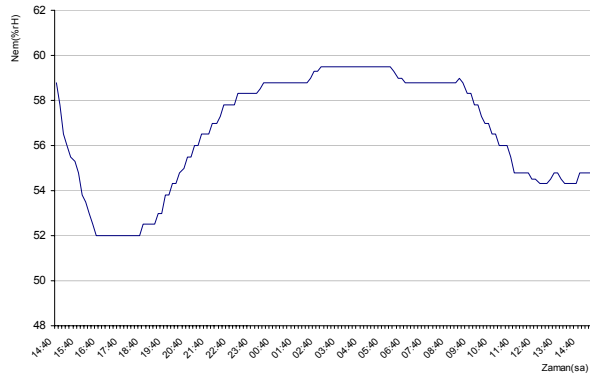
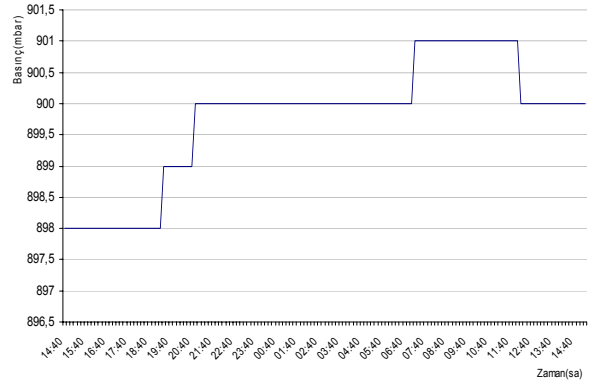
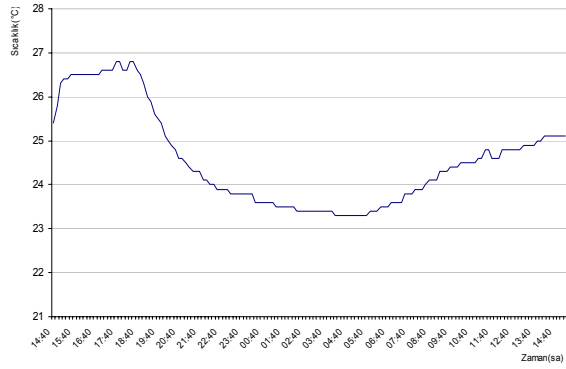
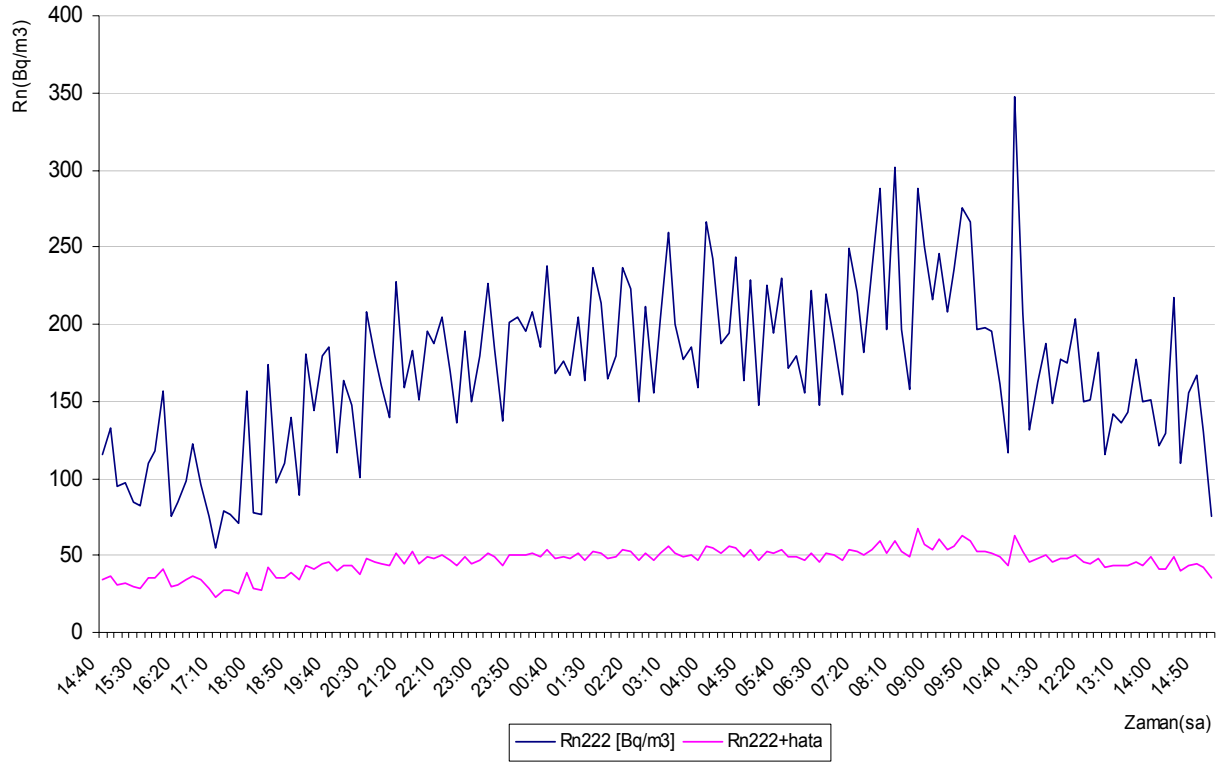
Şekil 4.10 Isparta İli Yedişehirler Mahallesi'nde alınan ölçümler.

4.2.4 Isparta İli Muzaffer Türkeş Mahallesi'nde Alınan Ölçümler



Şekil 4.11 Isparta İli Muzaffer Türkeş Mahallesi'nde alınan ölçümler.

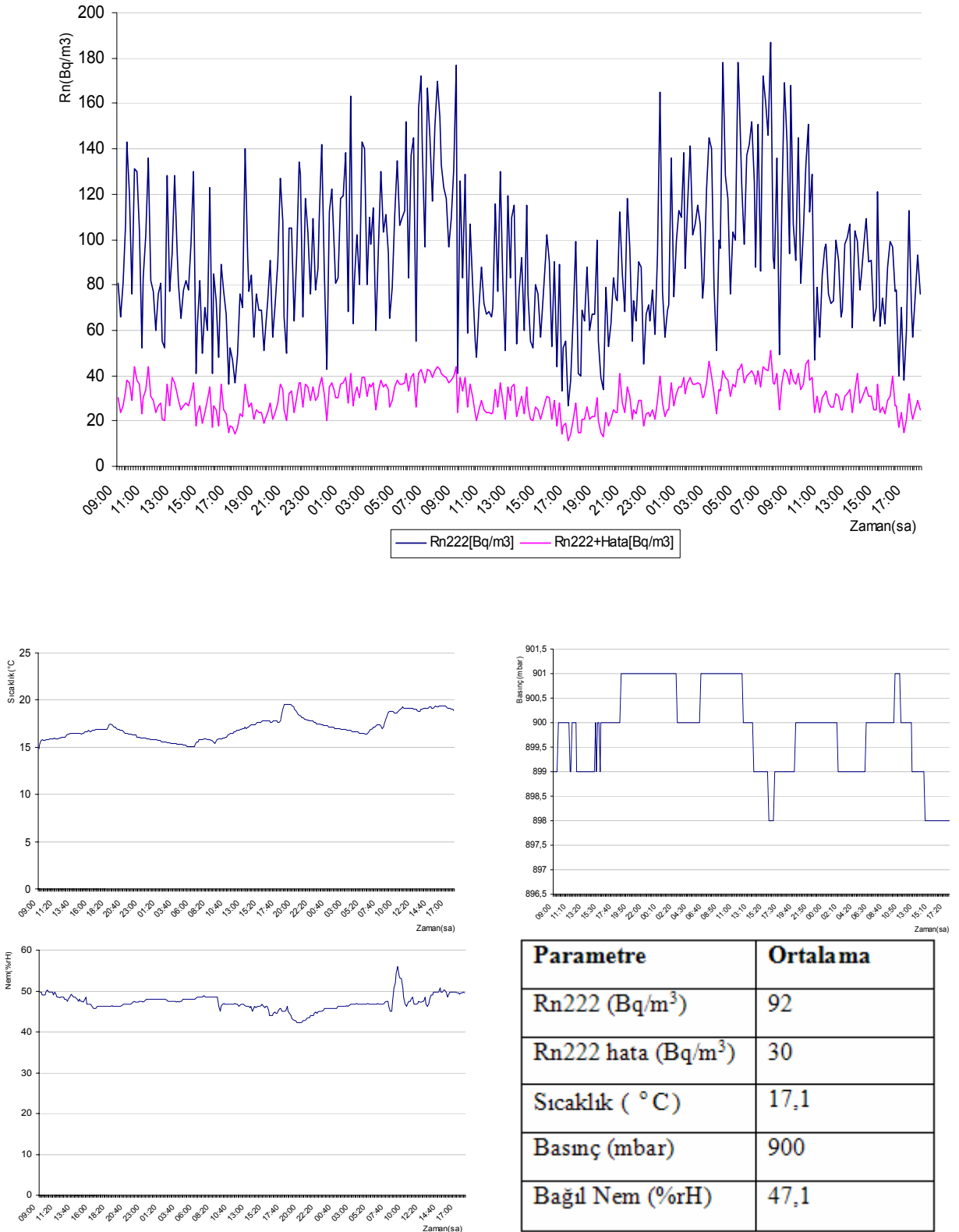
4.2.5 Isparta İli Işıkkent Batıkent Mahallesi'nde Alınan Ölçümler



Parametre	Ortalama
Rn222 (Bq/m ³)	172
Rn222 hata (Bq/m ³)	46
Sıcaklık (° C)	24,6
Basınç (mbar)	900
Bağıl Nem (%rH)	56,6

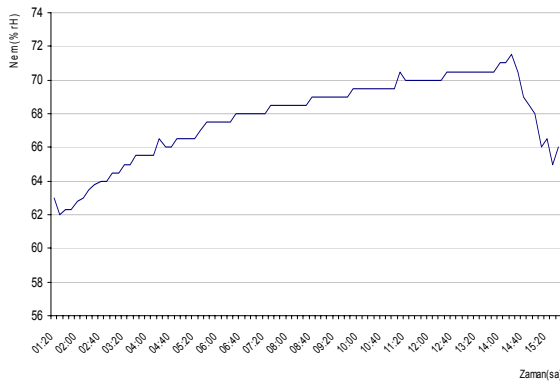
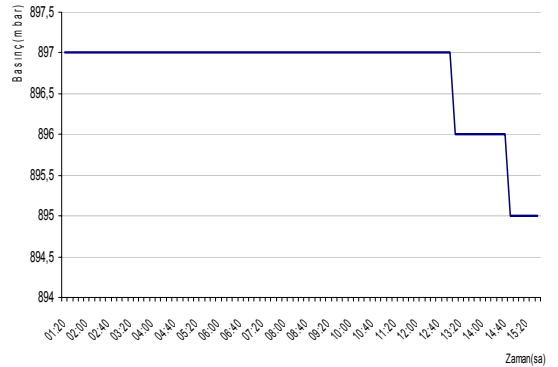
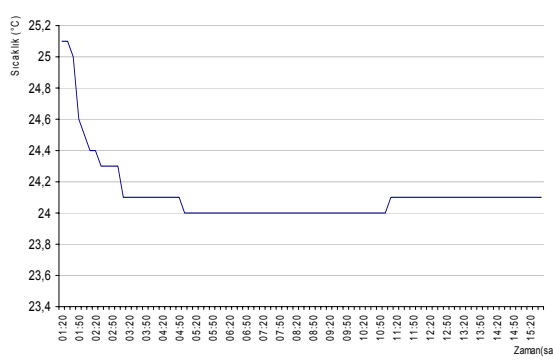
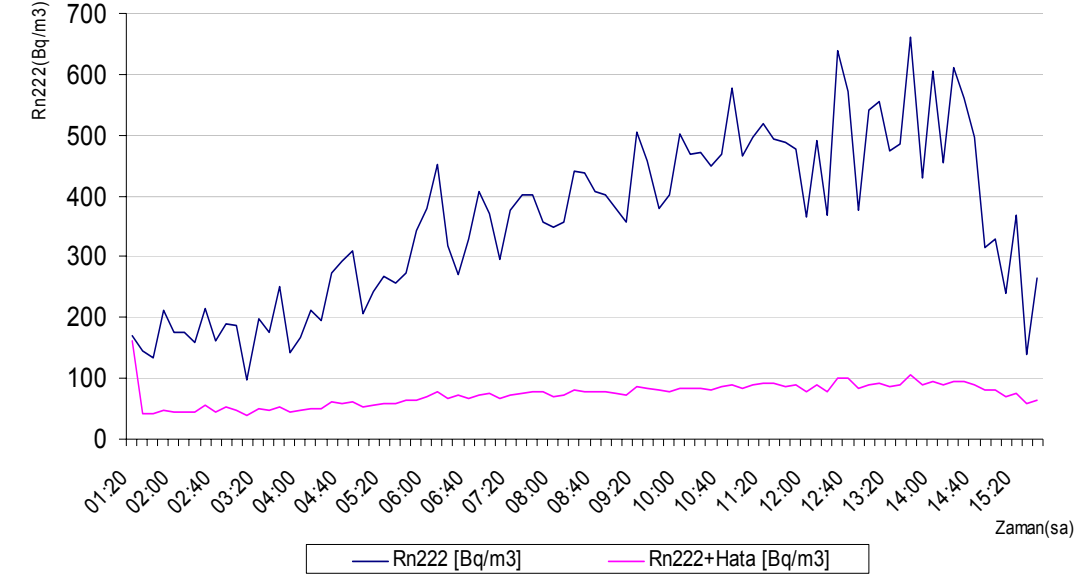
Şekil 4.12 Isparta İli Işıkkent Batıkent Mahallesi'nde alınan ölçümler.

4.2.6 Isparta İli Yalvaç İlçesi M. Y. Okulu'nda Alınan Ölçümler



Şekil 4.13 Isparta İli Yalvaç İlçesi Meslek Yüksek Okulu'nda alınan ölçümler.

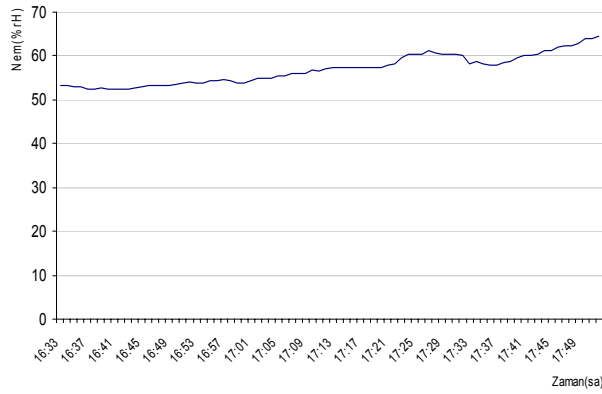
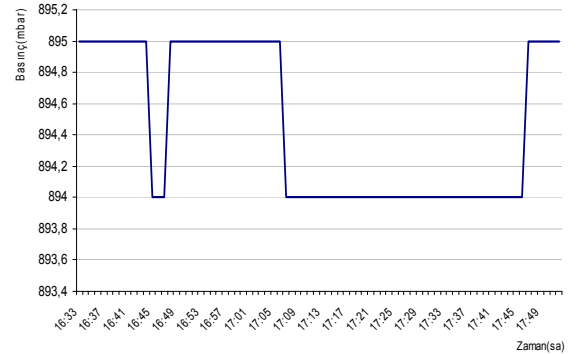
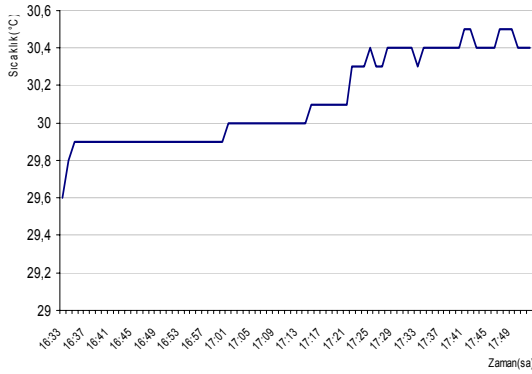
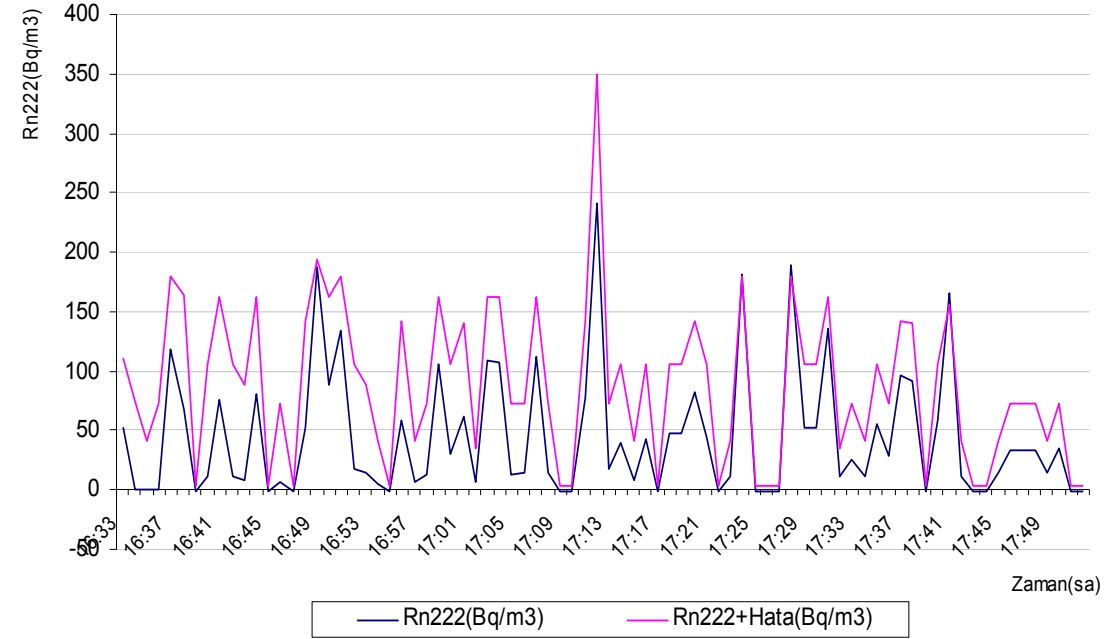
4.2.7 Isparta İli Davraz Mahallesi' nde Alınan Ölçümler



Parametre	Ortalama
Rn222 (Bq/m ³)	359
Rn222 hata (Bq/m ³)	73
Sıcaklık (°C)	24,1
Basınç (mbar)	897
Bağıl Nem (%rH)	67,8

Şekil 4.14 Isparta İli Davraz Mahallesi' nde alınan ölçümler.

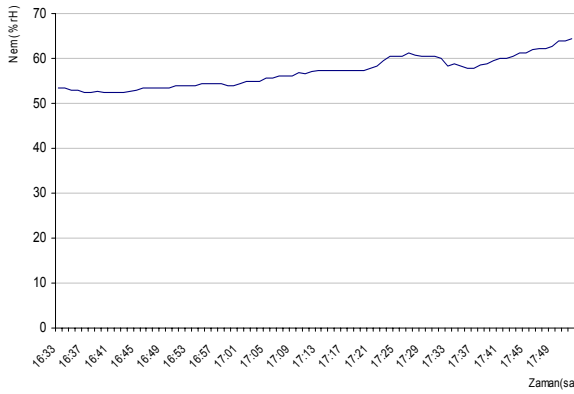
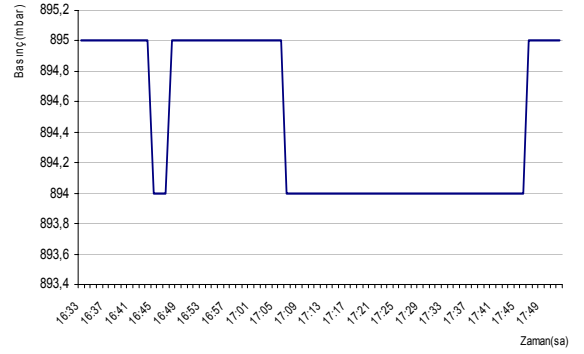
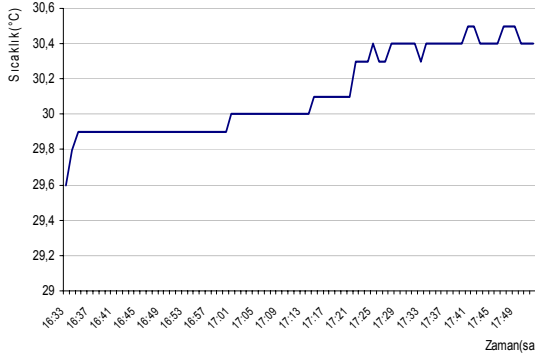
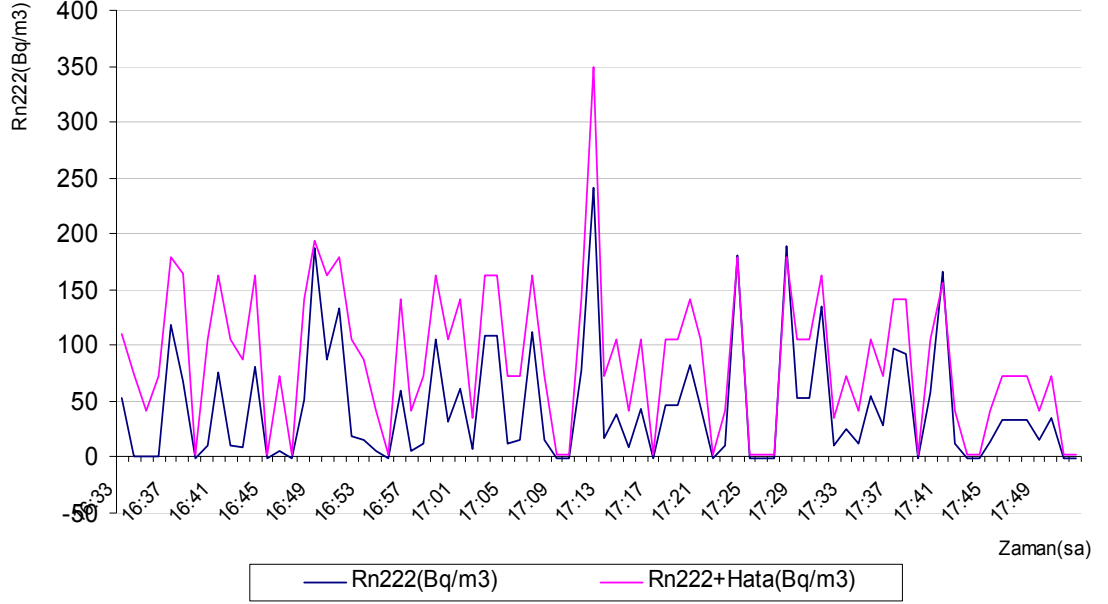
4.2.8 Isparta İli Halıken Mahallesi' nde Alınan Ölçümler



Parametre	Ortalama
Rn222 (Bq/m ³)	44
Rn222 hata (Bq/m ³)	88
Sıcaklık (C)	30,1
Basınç (mbar)	894
Bağıl Nem (%rH)	56,9

Şekil 4.15 Isparta İli Halıken Mahallesi' nde alınan ölçümler.

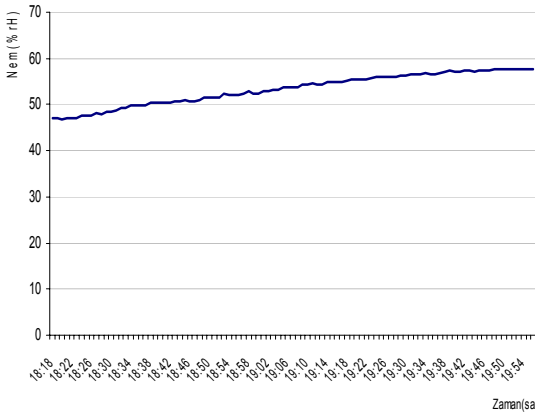
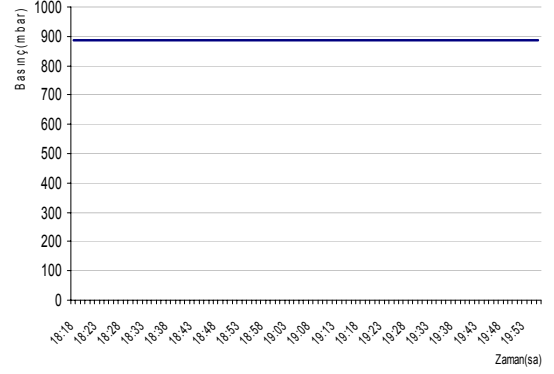
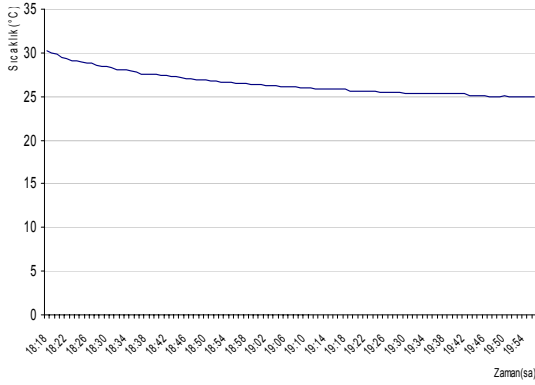
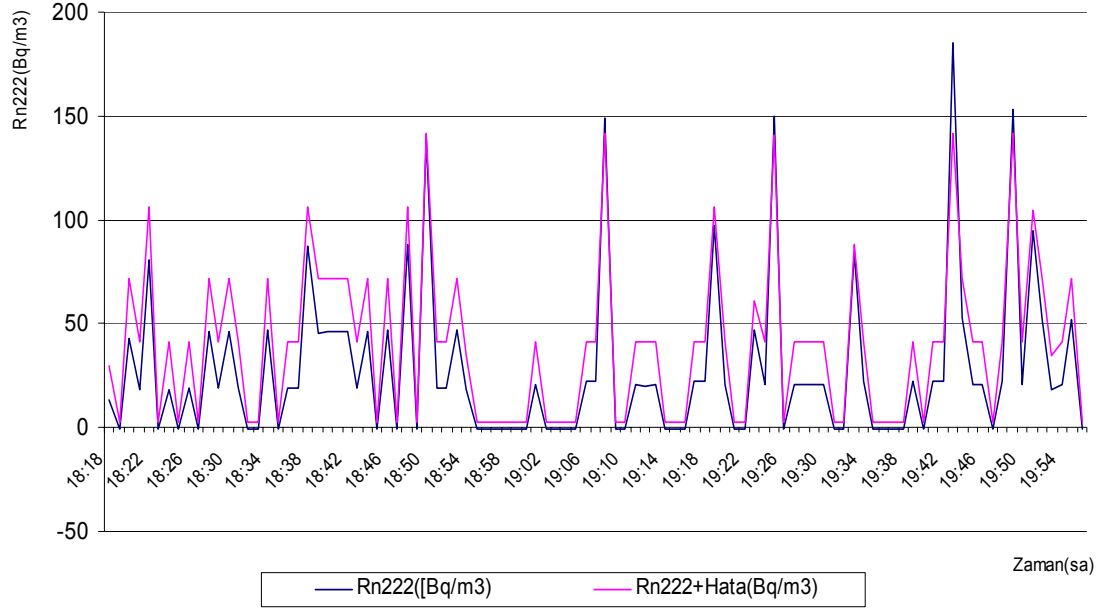
4.2.9 Isparta İli Piri Mehmet Mahallesi' nde Alınan Ölçümler



Parametre	Ortalama
Rn222 (Bq/m ³)	190
Rn222 hata (Bq/m ³)	168
Sıcaklık (°C)	28,1
Basınç (mbar)	894
Bağıl Nem (%rH)	57

Şekil 4.16 Isparta İli Piri Mehmet Mahallesi' nde alınan ölçümler.

4.2.10 Isparta İli Gökçay Mevkii'nde Alınan Ölçümler



Parametre	Ortalama
Rn222 (Bq/m ³)	27
Rn222 hata (Bq/m ³)	40
Sıcaklık (°C)	26,5
Basınç (mbar)	886
Bağıl Nem (%rH)	53,3

Şekil 4.17 Isparta İli Gökçay Mevkii'nde alınan ölçümler.

5. SONUÇ

Binalarda radon yoğunluk ölçümü ilk kez 1956 yılında İsviçre’de yapılmıştır. Bazı evlerde yüksek yoğunlukta Radon bulunmasına rağmen önemsenmeyen bu durum 20 yıl sonra Radon yoğunluğundan kaynaklı kanser vakalarının artmasından sonra önem kazanmaya başlamıştır. Türkiye’de henüz çok geniş ölçekli bir çalışma yapılmamıştır ve özellikle Isparta İli için böyle bir çalışma yapılmış olması da bu çalışmayı önemli hale getirmektedir. Ayrıca Radon yoğunluğu ölçümleri için kullanılan AlphaGUARD Radon monitörünün diğer detektörlere göre daha hassas ölçüm yapabilmesi ve eşzamanlı olarak iklim verilerini de ölçebilmesi bu çalışmayı daha da önemli kılmaktadır. Parametrelerin ortalama değer hesapları AlphaGUARD için geliştirilmiş DataEXPERT yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Bir önceki bölümde verilen ölçüm sonuçlarına göre Rn222 yoğunluklarına ait ortalama değerler, Süleyman Demirel Üniversitesi yerleşkelerinde 372 Bq/m³, Isparta İl merkezinde 118 Bq/m³, Yedişehitler Mahallesi’nde 134 Bq/m³, Muzaffer Türkeş Mahallesi’nde 196 Bq/m³, yeni gelişmekte olan Işıkkent ve Batıkent’de 172 Bq/m³ ve Yalvaç İlçesi’nde 92 Bq/m³, Davraz Mahallesi’nde 359 Bq/m³, Halıkent Mahallesi’nde 44 Bq/m³, Piri Mehmet Mahallesi’nde 190 Bq/m³ ve Gökçay Mesireliği’nde 27 Bq/m³ olarak ölçülmüştür. Verilerin sıralandığı bir çizelge, Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Tez süresince yapılan ölçümlerde gözlenen en önemli nokta Radon yoğunluklarının uzun süre kapalı kalmış veya havalandırılmayan mekânlar ile havalandırması iyi olan mekânlar karşılaştırıldığında ortaya çıkmaktadır. Kapalı veya iyi havalandırılmayan yerleşim noktalarında sürekli olarak gaz birikeceği için daha fazla radyoaktif bozunma olacaktır. Bodrum katlarında ölçüm alınmasında amaç bu etkiyi gözleyebilmektir. Çünkü buralar zeminden gelen Radon gazıyla ilk temasın sağlandığı yerlerdir. Yeter derecede havalandırılabilen mekânlarda hava döngüsü sonucu iç Radon yoğunluğu azalacaktır. Bu da detektörün daha küçük yoğunluklar kaydetmesi demektir. Bu duruma karşılaştırmalı bir örnek olarak Süleyman Demirel Üniversitesi’nde elde edilen Radon yoğunluğu ile Gökçay Mesireliği’nde elde edilen yoğunluk verilebilir. Üniversitede ölçümlerin yapıldığı bodrumlar ve laboratuvarlar genelde havalandırılmayan kapalı

mekânlardır. Gökçay'da ise hem havanın sıcak olması hem de ortama giriş çıkışların çok olması nedeniyle hava sirkülasyonu sağlanmaktadır (Şekil 4.8 ve Şekil 4.17).

Süleyman Demirel Üniversitesi verilerinden elde edilebilecek diğer bir yorum ikinci önemli bir noktaya işaret etmektedir. Laboratuvarlarda Radon gazı yoğunluğu, genelde ortam kapalı olduğu ve havalandırılmadığı için yüksek çıkmıştır. Bunun yanı sıra özellikle ölçüm yaptığımız jeoloji laboratuvarı çok sayıda kayaç ve mineral taşı içermektedir. Bu da ortama Radon girişini doğrudan artırıcı bir etki yapmaktadır.

Grafiklerde görülen önemli bir özellik de bazı noktalarda Rn222 yoğunluğunun sürekli bir artıştan sonra ani azalmalar göstermesidir. Sürekli artışın nedeni ölçüm yapılan oda veya bodrumun bu zaman içerisinde havalandırılmamasıdır. Böylece içerde biriken Radon gazı miktarı artmaktadır bu da daha fazla sayıda bozunma anlamına gelmektedir. Azalmanın sebebi ise ortamın havalandırılmasıdır. Böylece Radon gazı miktarı azalmaktadır. Bu etki Isparta merkez ölçümlerinde (Şekil 4.9) ve Muzaffer Türkeş Mahallesi'nde alınan ölçümlerde (Şekil 4.11) görülmektedir.

Davraz Mahallesi'nde görece olarak daha eski yapıların bodrumlarında alınan ölçümler ile daha yeni binalardan oluşan Işıkkent – Batıkent Mahalleleri'nden alınan verilerin karşılaştırılmasıyla başka bir sonuç daha ortaya çıkmaktadır. Bodrumların ve dolayısıyla binaların yerden iyi yalıtılmadığı veya yalıtımın zamanla hasara uğradığı durumlarda bina içine Radon girişi artmaktadır (Şekil 2.18). Ölçümlerin alındığı Davraz Mahallesi'nde daha ziyade göreceli olarak daha eski yapılar tercih edilmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasıyla elde edilen Radon ortalama değerlerinin yorumlanması sonucunda, yerleşim birimlerinde ve laboratuvarlar gibi çalışma alanlarında zararlı olabilecek seviyede Radon radyasyonuna maruz kalınmaması için sırasıyla şu önerilerin dile getirilmesi gereği doğmuştur:

- Barınak olarak kullanılan ortamların sürekli olarak kapalı tutulmaması, mümkün olduğu kadar havalandırılması Radon birikmesini engellemektedir. İnsan

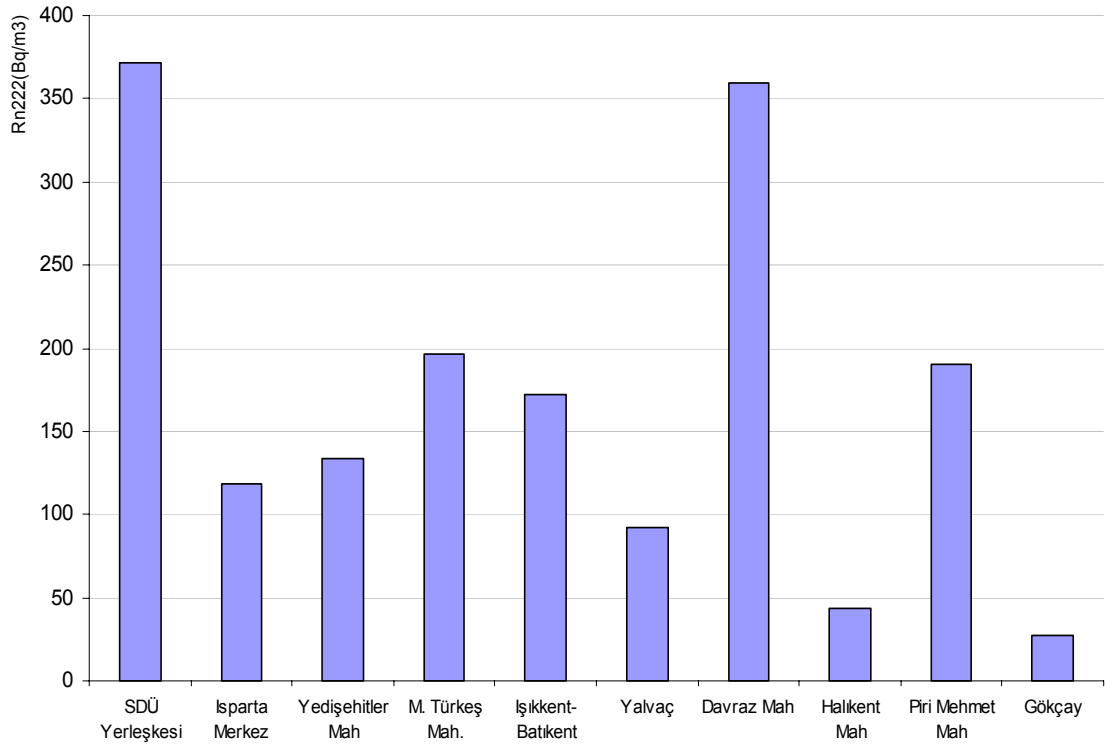
hayatının önemli bir kısmının evlerde geçtiği düşünülürse sağlık açısından bu önlemin alınmasında fayda vardır.

- Laboratuvarlar gibi çalışma ortamlarında hem havalandırma hem de özel olarak yerbilimlerinin çalışıldığı laboratuvarlarda bulunan kayaç, mineral veya toprak numuneleri radyasyon miktarını artırmaktadır. Bu yüzden laboratuvarların iyi havalandırılması ve bu gibi numunelerin özel odalarda saklanması uygun olacaktır.
- Gece boyunca kapalı olarak bırakıldığından hava dolaşımının engellendiği mekânlarda Radon gazı birikmesinden dolayı radyasyon miktarı artacağından en kısa sürede havalandırma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- Binaların toprakla ilk temasının sağlandığı noktalar olan bodrum ve kilerlerin iyi yalıtılmış olması gerekmektedir. Zira buraların yalıtımlarının iyi yapılmamış olması veya eskimiş olması bina içlerine doğru Radon akısını artıracaktır.
- Birçok ülkede yapılan araştırmalar yapı malzemelerinin kökeninin ileriki senelerde bina içi Radon yoğunluğunu etkilediğini göstermiştir. Bu yüzden pomza gibi malzemelerin yapı malzemesi olarak daha az kullanılması veya kullanılmaması önem taşımaktadır.

Aşağıda verilen Çizelge 5.1 yapılan ölçümler sonucunda 10 farklı yerleşim biriminde elde edilmiş ortalama Radon gazı yoğunluklarını sunarken yine Şekil 5.1 de bu ortalama yoğunluk değerlerinin yerleşim birimine (mahalle ve ilçe) göre çubuk grafiğini Bq/m³ cinsinden göstermektedir.

Yerleşim Birimi	Ortalama Radon Yoğunluğu (Bq/m ³)
Süleyman Demirel Üniversitesi	372
Isparta İl Merkezi	118
Yedişehitler Mahallesi	134
Muzaffer Türkeş Mahallesi	196
Işıkkent - Batıkent	172
Yalvaç İlçesi	92
Davraz Mahallesi	359
Halıkent Mahallesi	44
Piri Mehmet Mahallesi	190
Gökçay Mesireliği	27

Çizelge 5.1 Radon ölçümlerinin yapıldığı yerleşimler ve ortalama yoğunluklar.



Şekil 5.1 Belirlenen noktalarda alınan veriler sonucunda ortalama Radon yoğunlukları.

KAYNAKLAR

- Akhtar, K., 1989. A Study of Radon Levels In Buildings. MSC Thesis
- Al-Sharif, A. Abdelrahman, Y. S., 2000, Factors Affecting Radon Concentration In Houses, Turk J. Phy, 2001, 25, 153-158.
- Arıcı, K., 1996. Adıyaman İlinde Radon Gazı Konsantrasyonları Ölçümü, K.S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, KAHRAMANMARAŞ.
- Arya, P.A., 1983. Çekirdek Fiziğinin Esasları. 370s, Erzurum.
- Aybers, N., 1980. Nükleer Enerjiye Giriş. Yalkın Ofset Matbaası No: 15, 216s, İstanbul.
- Barkan, S., 1965. Radyoizotopların Ölçülmesi. İstanbul Üniversitesi Yayınları Matbaa Teknisyenleri Basımevi No: 1136, 108s, İstanbul.
- Chia-yu, L., Gelman, A., Price, P. N., Krantz, D, H., 1993, Analysis of Local Decisions Using Hierarchical Modelling, Applied To Home Radon Measurement and Remediation, Statistical Science, 1999, 14, 3, 305-337.
- Committee on Nuclear Physics Board on Physics and Astronomy Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications National Research Council, 1999. The Core Of Matter, The Fuel Of Stars. National Academy Press, Washington DC.
- Fişne, A., 2002. Yeraltı Madenlerinde Radon Gazı Konsantrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi ve İşçi Sağlığı Üzerine Etkilerinin Araştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 86s, İSTANBUL.
- Gedikoğlu, A., 1981. Atom ve Çekirdek Fiziğine Giriş. Ekonomist Yayınevi. İnönü Üniversitesi Temel Bilimler Fakültesi Yayınları No: 1, 329s, Ankara.
- Gedikoğlu, A., 1988. Çekirdek Fiziğine Giriş. Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi No: 130, 219s, Trabzon.
- Gundersen, L.C.S., Wanty, R.B., 1993. Field Studies of Radon in Rocks, Soils and Water. C. K. Smoley, 334s, Florida.
- Karaoğlu, B., 1998. Kuantum Mekaniğine Giriş. Güven Yayınları, 245s, İstanbul.
- Kaplan, I., 1964. Nuclear Physics. Addison-Wesley Publishing Company Inc. No: 62-9402, 770s, Massachusetts, Palo Alto, London.

- Krane, S. K., 2001. Nükleer Fizik. 1. Cilt. Palme Yayıncılık No: 173, 404s, Ankara.
- Özbal, Ö., 1999. İzmir-Balçova' da Termal Su Kullanılan Binalarda Radon konsantrasyonu ve Sudaki Radonla Korelasyonu. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 69s, İZMİR.
- Özkorucuklu S., 2002. Radyoaktivite ve Korunma Kılavuzu. Süleyman Demirel Üniversitesi Yayınları, 16s, Isparta.
- Selçuk, A.B., 1996. Elazığ Yöresindeki Evlerde Radon Gazı Ölçümü. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, ELAZIĞ.
- UNSCEAR, 1982. Ionizing Radiation Sources and Biological Effects, United Nations, New York
- Vaizoğlu, S. A., 1997. Ankara' da Evlerde Kış Dönemi Radon Konsantrasyonunun Belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri, Bilim Uzmanlığı Tezi, 95s, ANKARA.
- Yarbaşı, N., 2005. Görünmeyen Tehlike Radon Gazı, Atatürk Üniversitesi Deprem Araştırma Merkezi.
- Yeniçay, F., 1971. Çekirdek Fiziği. İstanbul Üniversitesi Yayınları Fen Fakültesi Basımevi No: 1657, 352s, İstanbul.
- Yılmaz, M., 1998. Çekirdek Fiziği. Balıkesir Üniversitesi Yayınları Balıkesir Üniversitesi Basımevi No 005, 201s, Balıkesir.
- Becquerel, Henri (1852-1908), from Eric Weisstein's World of Scientific Biography,-2005
<http://scienceworld.wolfram.com/biography/BecquerelHenri.html>
- General Chemistry Online: Companion Notes: Atoms&Ions: Dalton's Atomic Theory, - 2005
<http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/atoms/dalton.shtml>
- The ORCBS – Radiation Safety – Resources and Links – Historical Figures, - 2005
http://www.orcbs.msu.edu/radiation/resources_links/historical_figures/becquerel.htm
- Chemical Elements.com – Radon (Rn), - 2005
<http://www.chemicalelements.com/elements/rn.html>
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu - 2005
<http://www.taek.gov.tr/>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan AKYILDIRIM
Doğum Yeri : Ereğli- KONYA
Doğum Yılı : 02.12.1978
Medeni Hali : Bekâr

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise , :1994 - 1997 Mahmut Esat Kadester Anadolu Lisesi
Lisans :1998-2003 Süleyman DEMİREL Üniversitesi Fen-Ed. Fak.Fizik
Y. Dil : İngilizce

İş Deneyimi

2004 – Halen : Araştırma Görevlisi, Süleyman DEMİREL Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.