

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAHZENLERDE RADON VE TORON**  
**KONSANTRASYONLARI: UZAYSAL VE ZAMANSAL**  
**DEĞİŞİMİ**

**ABDULKADİR YILDIZ**

**KOCAELİ 2014**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

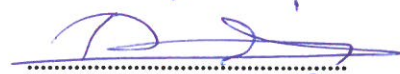

**MAHZENLERDE RADON VE TORON**  
**KONSANTRASYONLARI: UZAYSAL VE ZAMANSAL**  
**DEĞİŞİMİ**

**ABDÜLKADİR YILDIZ**

**Prof.Dr. Nalan ÖZKAN GÜRAY**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

**Prof.Dr. Arif DEMİR**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

**Yrd.Doç.Dr. Nilgün DEMİR**  
Jüri Üyesi, Uludağ Üniv.



**Tezin Savunulduğu Tarih: 17.07.2014**

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

İnsanların yaşadıkları çevre içinde maruz kaldıkları radyasyonun temel kaynağı doğal radyasyon olduğundan, doğal kaynaklardan alınan dozların yaşam üzerindeki etkisi ve oluşturacağı zararlar toplum sağlığı açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle doğal radyoaktivitenin özellikle insanların zaman geçirdiği bölgelerde belirlenmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak çevresel radyasyon ölçümleri yapıp, ülkelerin radyasyondan etkilenme düzeylerini ortaya koyma ve radyasyon haritalarını oluşturma çalışmaları önem kazanmaktadır. Doğal radyasyon kaynaklarından en önemlisi olan radon, sigaradan sonra akciğer kanserine neden olan ikinci etmendir. Bu yüzden bölgelerin radon konsantrasyon seviyelerinin belirlenmesi dünyanın birçok ülkesinde yapıldığı gibi ülkemizde de yapılmalıdır.

Öncelikle her konuda yardım ve desteğini hissettiğim danışman hocam Prof. Dr. Nalan ÖZKAN GÜRAY'a , Doç. Dr. Recep Taygun GÜRAY'a ve Dr. Istvan CSÍGE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez yazımında yardımını esirgemeyen ve bana her konuda yardımcı olan sevgili Beyza DURKAYA YÜRÜKER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatım boyunca beni destekleyen, bugünlere getiren sevgili aileme ve her zaman yanımda olduğunu hissettiren, çalışmalarım süresince birçok fedakarlık göstererek beni destekleyen sevgili arkadaşım Ezgi TAŞKIRANA'a en derin minnetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma ERASMUS (LLP) programı ile desteklenmiştir.

Haziran - 2014

Abdulkadir YILDIZ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR .....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ .....	1
1. RADON VE ÖZELLİKLERİ .....	2
1.1. Doğal Ortamda Radon.....	5
1.2. Radon Gazının Binaya Giriş Yolları .....	7
1.3. Radonun Sağlık Üzerine Etkileri.....	8
2. DENEYSEL ÖLÇÜM.....	10
2.1. CR-39 Kazıma İz Dedektörü.....	15
2.2. Dedektör Verimi.....	17
2.3. Radamon Kazıma İz Tipi Radon Dedektörü .....	21
2.4. Toprakta Radon ve Toron.....	23
2.5. AlphaGUARD İyonizasyon Odası Radon Monitörü.....	27
2.6. Deney Yapılan Yer Tanımı .....	28
2.7. Modelleme.....	29
3. SONUÇ VE TARTIŞMA .....	37
KAYNAKLAR .....	40
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	42
ÖZGEÇMİŞ .....	43

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Elementlerin periyodik tablosunda Radon.....	2
Şekil 1.2.	$^{238}\text{U}$ bozunum zinciri.....	3
Şekil 1.3.	$^{232}\text{Th}$ bozunum zinciri.....	4
Şekil 1.4.	Bina içi radon girişleri.....	7
Şekil 2.1.	CR-39 iz kazıma dedektörü yüzeyinde oluşan alfa parçacık izleri.....	10
Şekil 2.2.	Radamon tipi kazıma iz dedektör sistemi.....	11
Şekil 2.3.	Ölçüm alanına yerleştirilmiş Radamon tipi iz kazıma dedektörleri.....	12
Şekil 2.4.	CR-39 dedektörlerinin kimyasal kazıma işlemi için hazırlanışı.....	12
Şekil 2.5.	Kimyasal kazıma işlemi düzeneği.....	13
Şekil 2.6.	İz yoğunluk değerleri sayımı için kullanılan optik mikroskop.....	13
Şekil 2.7.	CR-39 İz Kazıma Dedektörü.....	15
Şekil 2.8.	Alfa parçacıkları dedektör içindeki yolları boyunca yörüngesine yakın olan molekülleri iyonize ederek deformasyona neden olur.....	16
Şekil 2.9.	Verim hesabı için kullanılan deney düzeneği fotoğrafı ve şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.10.	Parçacık akısını bulabilmek için simetri eksenine ile dedektör yüzeyi arasındaki geometri.....	18
Şekil 2.11.	Parçacık akısının uzaklığa bağlı olarak değişimi.....	20
Şekil 2.12.	Dedektör veriminin (görelî parçacık akısı ( $\Phi/\eta$ )) kolimatör çapının farklı olduğu durumlarda (0,5 cm, 1,0 cm ve 1,5 cm), kaynak ve dedektör arasındaki uzaklığa bağlı değişimi.....	21
Şekil 2.13.	Radamon radon dedektörü.....	22
Şekil 2.14.	Radamon kazıma iz tipi dedektörünün iç yapısı (1-dozimetre haznesi, 2-taban, 3-kapak, 4-kuadratik yay şekli açıklık, 5-duyarlı hacim, 6-kağıt filtre, 7-polietilen filtre, 8-taban ile dozimetre haznesini ayırıcı kısım, 9-CR-39 kazıma iz dedektörü, 10-çift taraflı yapıştırıcı bant, 11-pirinçten yapılan küresel kubbe, 12-termoluminesans dedektör çipleri, 13-sabitlenme bandı).....	22
Şekil 2.15.	Radamon kazıma iz dedektörü iç yapısı.....	23
Şekil 2.16.	Topraktaki radon konsantrasyonunun derinliğin fonksiyonu olarak değişimi.....	25
Şekil 2.17.	Toprak gazında radon ve toron ölçüm düzeneği.....	25
Şekil 2.18.	Toprak derinliğinin bir fonksiyonu olarak radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ve toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyonu.....	26
Şekil 2.19.	The AlphaGUARD radon monitör.....	27

Şekil 2.20. Sátorajújhely, Macaristan.....	28
Şekil 2.21. Mahzenin kuşbakışı görünümü ve dedektörlerin konumu.....	29
Şekil 2.22. Mahzenin kuşbakışı görünümü ve dedektörlerin konumu.....	29
Şekil 2.23. Mahzenlerde $^{222}\text{Rn}$ aktivite konsantrasyon oluşum modeli.....	30
Şekil 2.24. Radon aktivite konsantrasyonunun zamana bağlı olarak değişiminin teorik öngörüsü ( $j_D = 10 \text{ mBq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , $A = 200 \text{ m}^2$ , $V = 50 \text{ m}^3$ ve $\Delta t = 1$ saat).....	32
Şekil 2.25. Kış aylarında hava sirkülasyonu.....	33
Şekil 2.26. Yaz aylarında hava sirkülasyonu.....	33
Şekil 2.27. AlphaGUARD ölçüm cihazı kullanılarak 28.09.2009 - 11.11.2009 tarihleri arasında yapılan deneyde elde edilen sonuçlar.....	34
Şekil 2.28. AlphaGUARD ile $^{222}\text{Rn}$ aktivite konsantrasyonunun zamana bağlı değişimi 10.11.2009 (09:00) – 11.11.2009 (20:00).....	35
Şekil 2.29. $^{222}\text{Rn}$ aktivite konsantrasyonunun, sabit parametreler kullanılarak hesaplanan havalandırma hızına bağlı değişimi ( $j_D = 10 \text{ mBq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , $A = 200 \text{ m}^2$ , $V = 50 \text{ m}^3$ ve $C_0 = 10 \text{ Bq.m}^{-3} \cong 0 \text{ Bq.m}^{-3}$ ).....	36
Şekil 3.1. Mahzendeki Rn-222 ve Rn-220 Aktivite Konsantrasyonları (düşey eksen: $^{222}\text{Rn}$ ve $^{220}\text{Rn}$ Aktivite Konsantrasyonları [ $\text{Bq.m}^{-3}$ ], yatay eksen: dedektör numaraları).....	39

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Deneyde elde edilen veriler .....	20
Tablo 2.2. Kaynak ile dedektör arasındaki uzaklıklar değiştirilerek hesaplanan alfa parçacık akısı ( $\Phi$ ) ve standart hatası ( $\Delta\Phi$ ) .....	20
Tablo 2.3. Toprak gazının radon ve toron konsantrasyonu.....	26
Tablo 3.1. Radon aktivite konsantrasyonu .....	37
Tablo 3.2. Toron aktivite konsantrasyonu.....	38

## SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

A	: Aktivite, (Bq)
A	: Alan, (m <sup>2</sup> )
a	: Kolimatör uzunluğu, (cm)
C	: Konsantrasyon, (Bq/m <sup>3</sup> )
C <sub>Ra</sub>	: Radyum konsantrasyonu, (Bq/kg <sup>1</sup> )
C <sub>Rn</sub>	: Radon konsantrasyonu, (Bq/m <sup>3</sup> )
D	: Difüzyon sabiti, (m <sup>2</sup> /s <sup>1</sup> )
E	: Emanasyon sabiti
G	: Radon üretim hızı, (Bq/m <sup>3</sup> /s <sup>1</sup> )
j <sub>D</sub>	: Yayılma akısı, (Bq/m <sup>2</sup> /s)
K <sub>Rn</sub>	: Radon kalibrasyon faktörü, (Bq/m <sup>3</sup> .(cm <sup>2</sup> /30 gün <sup>1</sup> ))
K <sub>Tn</sub>	: Toron kalibrasyon faktörü, (Bq/m <sup>3</sup> .(cm <sup>2</sup> /30 gün <sup>1</sup> ))
N	: İz sayısı
R <sub>c</sub>	: Kolimatör yarıçapı, (cm)
r	: Kolimatör kenarı ile simetri eksenini arasındaki mesafe, (cm)
t <sub>e</sub>	: Işınlanma zamanı, (s)
V	: Mahzen hacmi, (m <sup>3</sup> )
V <sub>T</sub>	: İz kazıma hızı, (m/s)
V <sub>B</sub>	: Yüzey kazıma hızı, (m/s)
v	: Havalandırma hızı
β	: Kalibrasyon faktörü
Φ	: Birim zamanda hedefe çarpan parçacık akısı, (parçacık/m <sup>2</sup> .s)
η	: Yüzey aktivite yoğunluğu, (Bq/m <sup>2</sup> )
q	: Birim zamanda mahzene giren hava hacmi, (m <sup>3</sup> )
π	: pi sayısı
ρ	: İz yoğunluğu
λ	: Bozunma sabiti, (1/s)

### Kısaltmalar

ATOMKI	: Institute of Nuclear Research of The Hungarian Academy of Sciences (Macar Bilimler Akademisi Nükleer Araştırma Enstitüsü)
CR-39	: Columbia Resin 1939 (Kolumbiya Reçine 1939)
HPGe	: High-Purity Germanium (Yüksek Saflıkta Germanyum)
ICRP	: International Commission on Radiological Protection (Uluslararası Radyoloji Koruma Komisyonu)

NTD	: Nuclear Track Detector (Nükleer İz Dedektörü)
PADC	: Polyallyl Di-glycol Carbonate
STUK	: The Radiation and Nuclear Safety Authority (Radyasyon ve Nükleer Güvenlik Kurumu)
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)
UNSCEAR	: United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation (Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyon Etkileri Bilimsel Komitesi)

## MAHZENLERDE RADON VE TORON KONSANTRASYONLARI: UZAYSAL VE ZAMANSAL DEĞİŞİMİ

### ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı şarap mahzeninde radamon tipi kazıma iz dedektörü (Macar Bilimler Akademisi Radon Grubu tarafından geliştirilen) kullanılarak (Sátoraljaújhely, Macaristan) radon ve toron konsantrasyonunun belirlenmesidir. Radamon 35 mm çapında ve 18 mm yüksekliğinde, içerisinde 1-2 cm<sup>2</sup> alanında CR-39 (allylic-diglycol-carbonate) tipi polimer iz dedektörü bulunan plastik bir tüptür. Radamon havadaki katı parçacıklarda radonun parçalanma ürünlerini filtre eden kağıttan yapılmış bir süzgeç folyo içerir. Toron'u (<sup>220</sup>Rn) filtre etmek için ise polietilenden yapılmış süzgeç folyo eklenebilir. Yapılanç alışmada ikiz dedektör kullanıldı. Toron değerlerinin belirlenebilmesi için polietilen filtreye sahip olmayan dedektör kullanıldı. Dedektörler mahzenin duvar ve zemininin kesiştiği noktalara yerleştirildi. Radon (<sup>222</sup>Rn) için aktivite konsantrasyonu 2025 ± 105 ile 3140 ± 150 Bq.m<sup>-3</sup> arasında, toron (<sup>220</sup>Rn) için aktivite konsantrasyonu ise < 70 ± 70 ile 1185 ± 160 Bq.m<sup>-3</sup> değerleri arasında bulundu. Sonuçlar radon seviyesinin izin verilen limit (1000 Bq.m<sup>-3</sup>) değerini aştığını göstermiştir.

Ayrıca daha önceki yıllarda yapılan çalışmalar analiz edilerek, sadece radon seviyesini değil, aynı zamanda sıcaklık, hava basıncı ve görelı nemi ölçen iyonizasyon odalı AlphaGUARD tipi radon monitörü kullanılarak ölçülen deneysel verilerin teori ile uyumluluğu gösterildi.

**Anahtar Kelimeler:** AlphaGUARD Radon Monitörü, CR-39 Nükleer İz Dedektörü, Radon, Şarap Mahzeni, Toron.

## **RADON AND THORON CONCENTRATIONS IN CELLARS: SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS**

### **ABSTRACT**

The main aim of this study is the determination of the radon and thoron concentrations in a wine cellar (in Sátorajújhely, Hungary). A radamon type radon detector is used with corrosion-trace-detector (developed by the Radon Group of MTA Nuclear Research Institute). This is a plastic tube with a diameter of 35 mm and a height of 18 mm; it contains a CR-39 (allylic-diglycol-carbonate) type polymer trace detector with an area of 1-2 cm<sup>2</sup>. Radamon contains a filtering foil made of paper, which filters the disintegration products of radon on the solid particles of air. It optionally contains a filtering foil made of polyethylene in order to filter thoron (<sup>220</sup>Rn). Twin detectors were utilized, one of which did not have a polyethylene foil in it; consequently, the thoron value was able to be determined. The detectors were set on the ground of the cellar at the intersection of the wall and the ground. The activity concentration was found in the range from 2025 ± 105 to 3140 ± 150 Bq. m<sup>-3</sup> for <sup>222</sup>Rn, from < 70 ± 70 to 1185 ± 160 Bq.m<sup>-3</sup> for <sup>220</sup>Rn. The results show that the <sup>222</sup>Rn concentration exceeded the permitted health limit of 1000 Bq.m<sup>-3</sup>.

The AlphaGUARD type radon monitor with ionization chamber was also used not only to determine the radon level, but to gauge temperature, air pressure and relative humidity.

**Keywords:** AlphaGUARD Radon Monitor, CR-39 Nuclear Track Detector, Radon, Wine Cellar, Thoron.

## GİRİŞ

Günlük yaşamımızda radyasyonla iç içeyiz. Radyasyon gezegenimizin doğumundan beri çevremizde doğal olarak bulunur. Kararsız atom çekirdekleri bozunur ve iyonlaştırıcı radyasyon olarak bilinen iyonlaştırıcı parçacıklar salmaya başlar. Sonuç olarak yaşam, iyonlaştırıcı radyasyonun önemli ölçüde bulunduğu bir ortamda devam eder. Radyasyon dış uzaydan (kozmetik), yeryüzünden ve kendi bedenimizden bile yayılır. Soluduğumuz havada, yediğimiz yemekte, içtiğimiz suda ve evlerimizi inşa etmek için kullandığımız yapı malzemelerinin içerisinde radyasyon mevcuttur. En önemli doğal radyasyonun kaynağı soluduğumuz havada bulunan, yerkabuğundan çıkan radon gazıdır. Canlıların maruz kaldığı doğal radyasyonun neredeyse yarısının doğal olarak oluşan radon gazının kısa ömürlü bozunum ürünlerinin solunmasından kaynaklandığı iyi bilinmektedir. Popülasyonun yüksek konsantrasyonda radon ve bozunum ürünlerine maruz kalması, çeşitli kanser türleri ve özellikle akciğer kanseri olma olasılığı ile ilgili önemli bir sağlık riskidir.

UNSCEAR doğal radyasyon ile halkın maruz kaldığı ortalama yıllık etkin eşdeğer dozun 2,4 mSv olduğunu söylemiştir. Bu değer 1,15 mSv.y<sup>-1</sup> 'i radon ve bozunum ürünlerinin solunmasından, geri kalanı ise kozmik ışınlar, yeryüzü kaynaklı gama ışınları ve vücut içindeki radyonüklidlerden (radon harici) oluşur (UNSCEAR, 2000). Radonun akciğer kanseri gelişimindeki rolü kanıtlanmış ve bu nedenle araştırılmasına önem verilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Radon aktivite konsantrasyonu, havalandırması olmayan kapalı alanlarda (örnek olarak şarap mahzenlerinde) birikir.

Bu tezde çevresel radon (<sup>222</sup>Rn) ve toron (<sup>220</sup>Rn) ölçümleri çalışma alanı hakkında yapılan bilimsel bir çalışmanın sonuçlarının bir kısmı gösterilmiş olacak. Çalışmanın amacı Macaristan'daki şarap mahzenlerinde radon ve toron konsantrasyonu dağılımlarının değişik özelliklerinin araştırılmasıdır.

## 1. RADON VE ÖZELLİKLERİ

Radon, 86 atom numarası ile periyodik cetvelin soy gazlar sınıfında yer alan renksiz, kokusuz, tatsız, gözle görülemeyen radyoaktif bir gazdır (Şekil 1.1). Standart basınç ve sıcaklık koşullarında yoğunluğu  $9,73 \text{ kg.m}^{-3}$  ile monoatomik bir gaz [1] olan radon, deniz seviyesindeki atmosfer yoğunluğu  $1.217 \text{ kg.m}^{-3}$  değerinden yaklaşık 8 kat daha yoğundur [2]. Erime noktası  $-71 \text{ }^\circ\text{C}$ , kaynama noktası ise  $-62 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Radon, kaya, toprak ve sudaki doğal uranyumun ve toryumun bozunması sonucunda oluşur.

Periodic Table of the Elements

**Rn** 86 (222)

Density 9.73 g/L

Boiling point  $-62 \text{ }^\circ\text{C}$

Melting point  $-71 \text{ }^\circ\text{C}$

F.E. Dorn, 1900

(Xe)  $4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$

**Radon**

\* Lanthanide Series

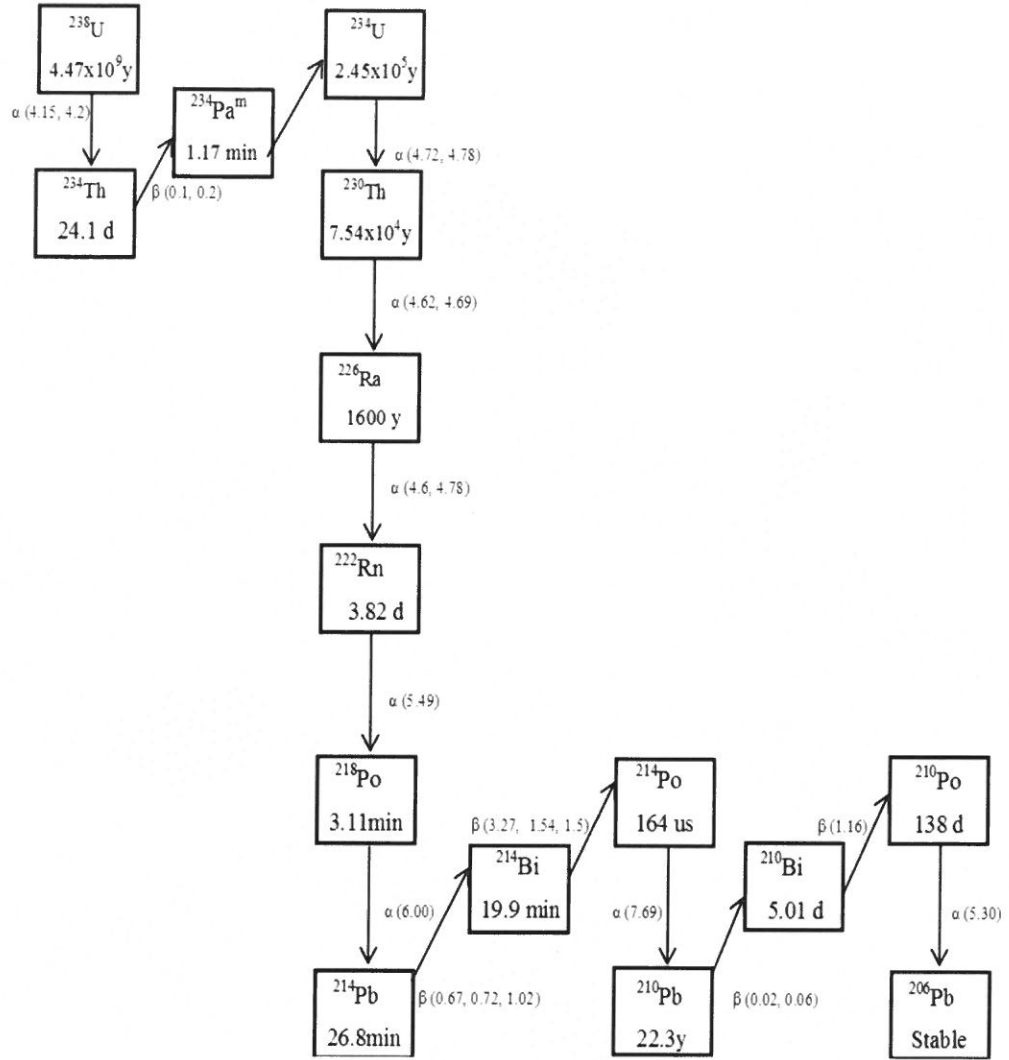
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

\* Actinide Series

Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Şekil 1.1. Elementlerin periyodik tablosunda Radon

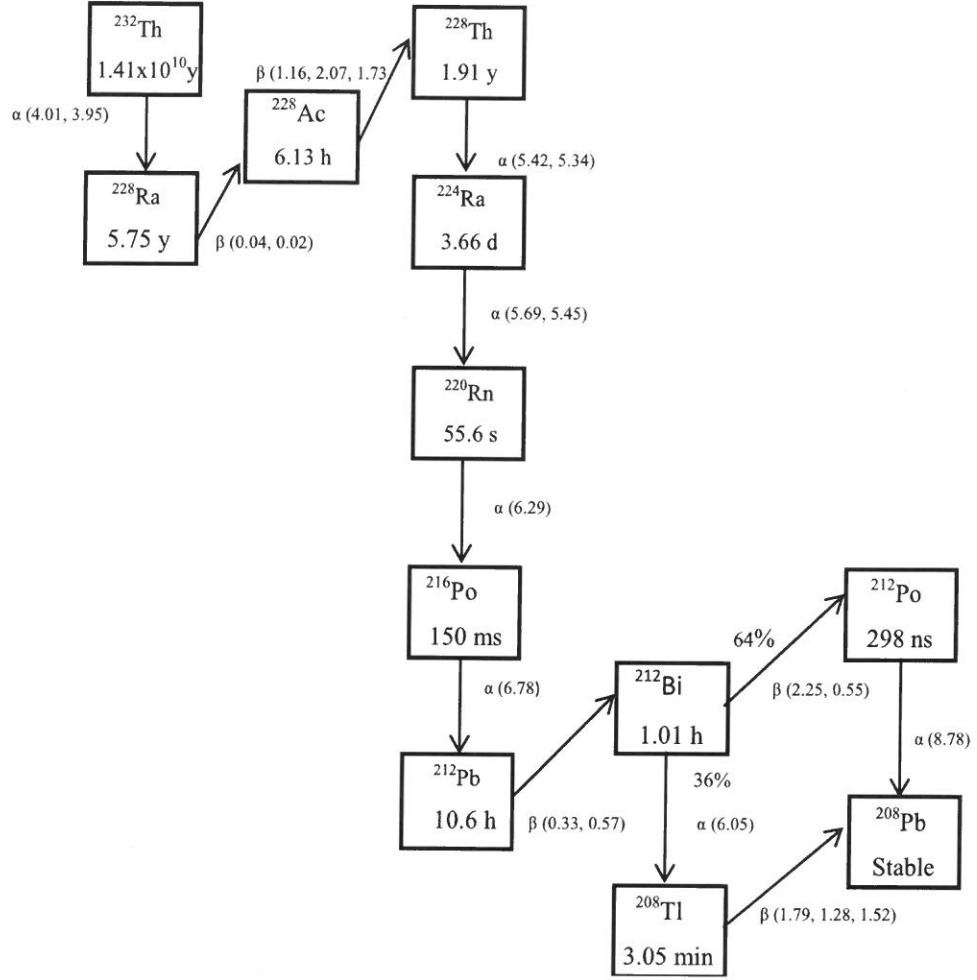
Deniz seviyesindeki atmosferde radyoaktivitenin büyük bir kısmı;  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  ve bozunum ürünlerinden gelen katkılardandır.  $^{222}\text{Rn}$ , 3,8 gün yarı ömre sahip olması nedeniyle radon izotopları arasında en önemlisi ve  $^{226}\text{Ra}$ 'nın bozunum ürünü olup uranyum-238 serisine aittir.



Şekil 1.2.  $^{238}\text{U}$  bozunum zinciri

Toryum ve uranyum yeryüzü olduğundan beri var olan en yaygın radyoaktif elementlerdir. Doğal olarak meydana gelen izotopları çok uzun süreli yarı ömre sahiptir.

Toron  $^{220}\text{Rn}$ , 55,6 saniye yarı ömrüyle en önemli ikinci radon izotopudur. Toryum-232 bozunum zincirinde yer almaktadır.



Şekil 1.3.  $^{232}\text{Th}$  bozunum zinciri

Toron 1899 yılında İngiliz bilim adamı R. B. Owens ve Yeni Zellandalı bilim adamı Ernest Rutherford tarafından keşfedilmiştir. Yerkabuğu yüzeyine yakın atmosferik iyonların ana kaynağı toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) ve onun ürünleridir.

Radonun maden ocaklarında çalışanlar için akciğer kanseri olma riskini arttırdığı bilinmektedir. Yer altı madenleri, konutlar ve şarap mahzenleri gibi özel işyerleri, atmosferinde radon ve radon ürünlerini yüksek konsantrasyonda içerebilir. 1996 yılında çıkan nükleer enerji ile ilgili yasa ile Macaristan'da radon konsantrasyonu sınır değeri  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$  olarak belirlenmiştir. 0,4 denge faktörü ve  $2000 \text{ saat.yıl}^{-1}$  çalışma saati durumunda bu değer  $6,3 \text{ mSv/yıl}$  radyasyona maruz kalınması anlamına gelmektedir. Mağaralar, madenler ve yeraltı çalışma alanlarında daha önceleri yapılan çalışmalar bu değeri doğrulamıştır. Macaristan şarap bölgelerindeki şarap mahzenlerinde yapılan önceki analizlerde  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyonu, mağaralardaki karakteristik değerinden küçük olan birkaç yüz  $\text{Bq.m}^{-3}$  olarak bulunmuştur [4-6].

## 1.1. Doğal Ortamda Radon

Radon ortamda doğal olarak nadiren meydana gelen radyoaktif bir bileşiktir. Radon bileşiklerinin çoğunun çevrede bulunma nedeni insan aktiviteleridir. Yerkabuğunun oluşumundan bu yana var olan uranyum ve toryum bozunum zincirlerinin üyeleri olan radyum izotoplarının radyoaktif bozunumundan oluşan radonun çeşitli izotopları ( $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  ve  $^{222}\text{Rn}$ ) hava, su ve toprak ortamlarında değişik miktarlarda kendini gösterir. Radonun temel özelliği, bozunum zincirinin diğer üyelerinden daha fazla radyolojik önem taşıyan bir soy gaz olmasıdır. Örneğin, bir radon atomu radyum içeren materyalde oluşur oluşmaz görece olarak serbestçe hareket eder. Gözenekte, radonun makroskobik taşınımı, moleküler difüzyonla ya da gözenek boşluğunda akışkan akımı ile mümkün olabilir [7].

Toprak altındaki radon taşınımı Denklem (1.1) deki taşınım denklemi ile belirlenebilir;

$$\frac{dC}{dt} = D\Delta C - \nabla(vC) - \lambda C + G. \quad (1.1)$$

Burada C gözenek boşluğundaki radon konsantrasyonu, D radon difüzyon sabiti, v taşıma maddesinin hızı,  $\lambda$  radonun bozunum sabiti ve G ise kaynak terimidir.

Denklem (1.1) de ilk terim difüzyon, ikinci terim adveksiyon, üçüncü terim bozunum ve dördüncü terim radon kaynağını tanımlar. Taşınım denkleminin çözümü için ilk olarak hız alanı bilinmelidir. Daha sonra kaynak terimi, başlangıç ve sınır koşulları da hesaba katılarak C belirlenir. Bu durumda yeraltı boş uzayının yapısı, şekli ve biçimi önemli rol oynar. Yukarıdaki denklem sadece nümerik olarak çözülür [8].

Radon insanların erişim sahibi olduğu hava ya da suya ulaşır. Havada radon bileşikleri toz ve diğer parçacıklara tutunur. Aynı zamanda radon topraktan aşağı doğru hareket edip yeraltı sularına girebilir. Yinede radonun büyük çoğunluğu toprak içinde kalır. Radonun toprak boyunca bu taşınımı ilk olarak alfaların geri tepmesi ve toprak boyunca hava ve suyun mekanik akışı sayesinde olur.

Toprak ve gözeneklerin iç kısmı boyunca taşınım aynı zamanda difüzyon ve konveksiyon tarafından gerçekleşir. Radon için difüzyon sabiti hava ve su için

prosestir. Bu nedenle radon hareketi bu mekanizmada önemli derecede etkili değildir.

Radon nihai etkisini toprağın gözenegindeki hava içinde gösterir. İnhalasyon (soluma) olarak adlandırılan bu süreç;

- toprak gözenekliliği,
- toprak gözenegindeki radon gazı konsantrasyonu,
- yağış ve atmosferik basıncı içeren meteorolojik faktörler ile değişiklik gösterir.

Hava ortamına giren radonun dağılımı ilk olarak, rüzgârın yönü ve düşey sıcaklık değişimlerini içeren atmosferik kararlılık tarafından belirlenir. Radyum içeren kaya ve toprakla çevrili yeraltı suları da radon ortaya çıkışına neden olur.

Yeraltı sularında radon taşınmasında öncelikli olarak;

- difüzyon modelleri,
- suyun mekanik akışının yönü rol oynar.

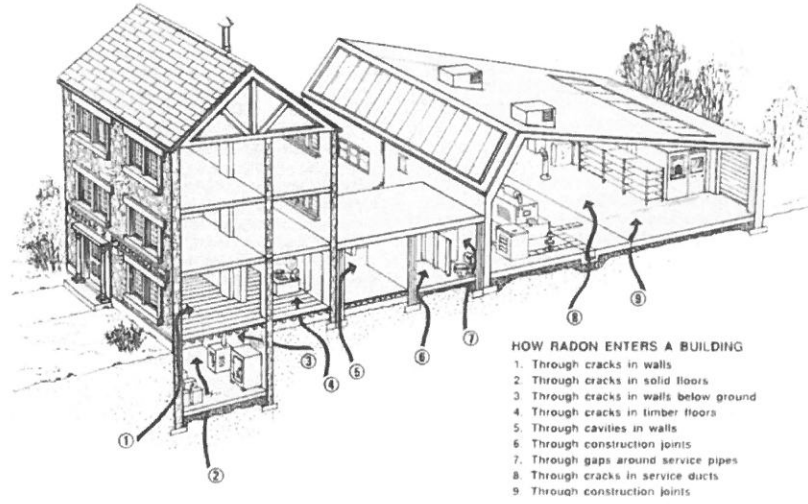
Radonun su içindeki çözünürlüğü görece olarak düşüktür ve kısa radyoaktif yarı ömrü nedeniyle büyük miktarı yer altı sularında salınma şansına sahip olmadan önce bozulur. Radon içeren yer altı suları doğal ya da insan yapımı kuvvetler vasıtasıyla yüzeye ulaştığında, radon kaçınılmaz olarak atmosfer içine girer.

Kırsal evler ve derin su katmanlarında (akiferler) radon çok yüksek seviyelerde bulunabilir. Bu seviyeler;

- kayadaki uranyum içeriğine,
- akiferlerin kayalara göre dağılımına,
- yeraltı sularının akış modeline göre değişiklik gösterir [9].

## 1.2. Radon Gazının Binaya Giriş Yolları

İnsanlar genelde zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekânlarda geçirdikleri için radon maruziyeti önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Radon gazı bina zeminindeki çatlaklar, yapı bağlantı noktaları, duvar çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası boşluklardan girmekte, ayrıca yapı malzemeleri, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gaz ve içme sularında bulunan radon da bina içi konsantrasyonu artırmaktadır. Binalardaki radon kaynağının büyük bir kısmı, binanın temelindeki toprak ve kayalardır. Radon gazı, toprak boyunca yükselerek, binanın altında hapsolmakta ve basınç oluşturmaktadır. Binanın altındaki bu yüksek basınç nedeniyle gazlar yerden ve duvarlardan, özellikle çatlak ve boşluklardan, bina içlerine sızarlar.



Şekil 1.4. Bina içi radon girişleri

Genelde bu akış, difüzyonla radon transferinden daha önemlidir. Basınç farkının yokluğunda difüzyon ile radon transferi, toprak yüzeyine nazaran tabanın yüksek yoğunluğu sonucunda azalır.

Topraktan binaya radon transferi birkaç parametreye bağlıdır;

- toprağın yapısı: kimyasal, jeolojik, toprağın nemi ve radon geçirgenliği,
- topraktaki radon konsantrasyonu,
- içeri ile dışarı, toprak ile binayı çevreleyen atmosfer ve toprak ile binanın alt katları arasındaki basınç farkı,

- binanın zemin ile temas eden yüzeyinin alanı,
- binanın dış kaplamasının hava geçirmezliği (binanın temeli ve zemininde).

Bina içerisinde radon transferi ayrıca aşağıdaki faktörlere de bağlıdır;

- binadaki havalandırma sistemi,
- binadaki hava sirkülasyonu,
- meteorolojik ve mevsimsel parametreler, başlıca içeri ve dışarı arasındaki sıcaklık farkı,
- odaların zemin seviyesi ve boyutu.

Yapı malzemeleri çeşitli uranyum ve toryum içeriğine sahiptir. Radon, bu materyallerden, bunları çevreleyen havaya doğru yayılabilir. Yayılan miktar, materyalin gözenek ve radon üretim hızına bağlıdır.

Yeraltı sularında radon konsantrasyonu önemli ölçüde değişir ve görelî olarak sudaki radonun düşük çözünürlüğüne karşın yüksek olabilir. Bu kayadaki uranyum konsantrasyonu, yeraltı suyunun sirkülasyonu ve çevreleyen kaya ile ilgili akiferin dağılımına bağlıdır [10].

### **1.3. Radonun Sağlık Üzerine Etkileri**

Radon topraktan moleküler difüzyon veya konveksiyon (ısınan gazın yükselmesi) ile sızarak yerden havaya doğru hareket edip atmosfere ulaşmaktadır. Bununla birlikte radonun bir kısmı yüzey altında kalıp, suda çözünerek yeraltı sularına karışır. Radon bir seri bozunma ile yine radyoaktif olan kısa ömürlü bozunma ürünleri üretir. Bu radyoaktif maddeler polonyum, bizmut ve kurşun elementlerinin radyoizotoplarıdır. Bu ürünlerin radondan farkı, gaz halinde olmamalarıdır. Bu izotoplar havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak radyoaktif aerosoller oluşturmakta ve solunum yoluyla akciğere alınmaktadır. 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 ve bu parçacıkların bozunması devam ettiğinde ortaya çıkan enerji, akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla zaman içerisinde kansere sebep olur.

Radon ve bozunma ürünleri her yıl binlerce önlenebilir ölümlerle bağlantılı olduğu için önemli bir sağlık tehdididir [3]. Radon sigaradan sonra akciğer kanserine neden olan ikinci etmendir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) dünya genelinde akciğer kanseri hastalığının % 15'ine radonun sebep olduğunu belirtmiştir.

Solunan radon ve ürünleri ciğerlerden kana, vücut dokularına geçer bunun sonucunda akciğer kanseri, böbrek kanseri ve prostat kanseri gibi birçok yumuşak doku kanser türü belirebilir. [11, 12].

İnsanlar zamanlarının çoğunu kapalı alanlarda, özellikle ev veya işyerlerinde harcarlar. Halk sağlığı perspektifinden baktığımızda, radona maruz kalma riski temel olarak bina içi kaynaklı olduğundan radon politikası, düzenlemesi kolay olan işyerleri ve kamusal alanlardan çok öncelikli olarak konutlara yönelik olmalıdır. Radon azaltmanın uzun süreli hedeflerine ulaşmak için önleme politikası önerilir. Radon maruziyetini önlemek özellikle yeni binalarda gerçekten önemlidir. Yeni ve restore edilen binalarda önleyici tedbirlerin uygulanması maliyet etkisi zamanla artan iyi bir kısmi çözüm sağlar [13].

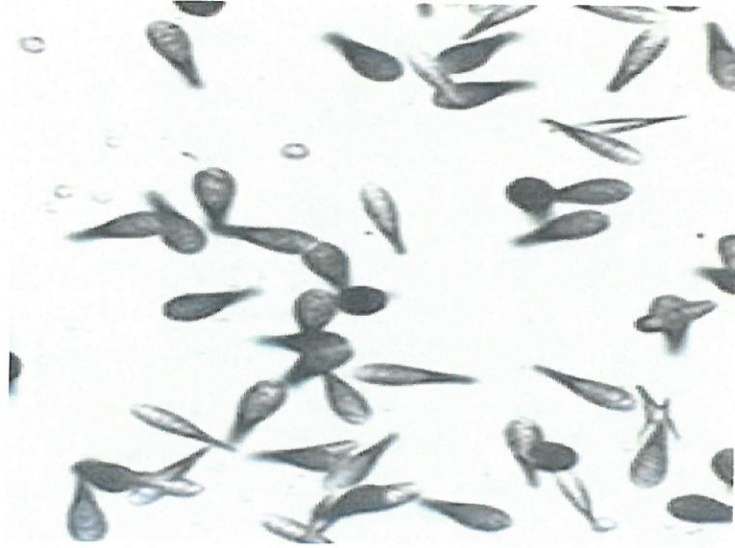
Önleme, aynı zamanda bina yapılarında en iyi sonucu almak için uygulamadan önce radon oranını azaltma ve enerji tasarruf stratejisini birleştirerek sürekli bir plan yapmak anlamına gelir. Mevcut yapılarda iyileştirme, özellikle yüksek radon konsantrasyonlu binalarda genellikle uygun maliyetlidir. Bu gibi durumlarda birincil radon kaynağı girişi olabilir ve radon seviyeleri 10 kata kadar azaltılabilir. Akciğer kanseri riski  $200 \text{ Bqm}^{-3}$  altındaki uzun süreli ortalama radon konsantrasyonu seviyelerinde bile meydana gelir [14]. Radona maruz kalma sonucunda oluşan riski azaltmak elde edilebilir bir hedeftir. Ancak tümüyle bir eliminasyon uygulanabilir değildir.

Radon maruziyeti insanlar için tek başına bir risk kaynağı değildir. Radon politikası ülkelerde tanımlanan diğer sağlık riskleri de göz önünde bulundurularak uygun bir şekilde belirlenmelidir. Ayrıca tutarsızlıkları önlemek ve daha iyi sonuç elde etmek için radon politikası ve dumansız hava sahası gibi diğer kamu sağlık politikaları arasında bir kombinasyon sağlanmalıdır.

## 2. DENEYSEL ÖLÇÜM

İnsanoğlunun maruz kaldığı radyasyon oranının yaklaşık olarak yarısı, radon gazının ( $^{222}\text{Rn}$ ) kısa ömürlü ürünlerinin iç mekanlarda hava ile taşınmasıyla gerçekleşir. Çevresel seviyelerde radon ölçümlerinin kalitesini değerlendirmek için, sertifikalı ya da standart  $^{226}\text{Ra}$  kaynağı ile radona cevabı belirlenen bir cihazla, bilinen radon konsantrasyonlu kalibrasyon odasından oluşan bir sistem gereklidir.

Nükleer iz dedektörleri (NTD's) radon gazı ve onun ürünleri tarafından yayılan alfa parçacıklarının, dedektörlerin uygun kimyasal kazıma işlemine bağlı olarak optik mikroskop altında görülebilen izlerini kaydeder (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. CR-39 iz kazıma dedektörü yüzeyinde oluşan alfa parçacık izleri

En fazla kullanılan dedektör ticari adı CR-39 (bakınız bölüm 2.1) olarak bilinen nükleer iz dedektörüdür. Radon ve ürünlerinin konsantrasyon ölçümleri için bu dedektörlerin kalibrasyonları, ışımada dedektörleri konsantrasyonları bilinen bir ışımaya maruz bırakarak gerçekleştirilir.

Bu çalışma için Radamon tipi (Macar Bilimler Akademisi Nükleer Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen) kazıma iz dedektörü kullanıldı. Bu sistem, 35 mm

çapında ve 18 mm boyunda plastik bir silindir içinde 1-2 cm<sup>2</sup> alanında CR-39 ( allyl-diglycol-carbonate) tipi kazıma iz dedektöründen oluşur (Şekil 2.2.).

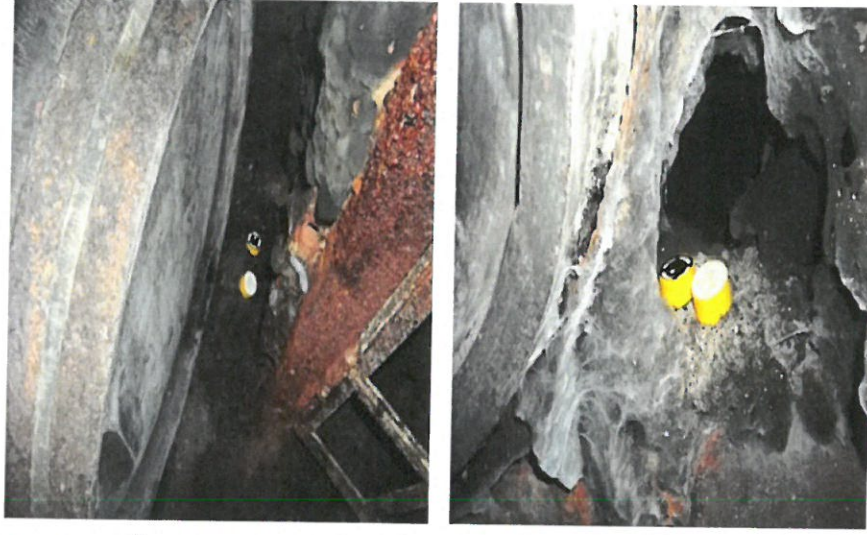


Şekil 2.2. Radamon tipi kazıma iz dedektör sistemi

CR-39 yoğunluğu 1.31 g.cm<sup>-3</sup> ve element bileşimi C<sub>12</sub>H<sub>18</sub>O<sub>7</sub> olan saydam, berrak ve katı bir plastiktir. Radamon havada katı parçacıklar olarak beliren radon (<sup>222</sup>Rn) bozunum ürünlerini filtre eden kağıttan yapılmış bir süzgeç folyo içerir. Sadece radon (<sup>222</sup>Rn) ölçümü yapabilmek için toron'u (<sup>220</sup>Rn) filtre edecek polietilenden yapılan bir süzgeç folyo daha eklenir.

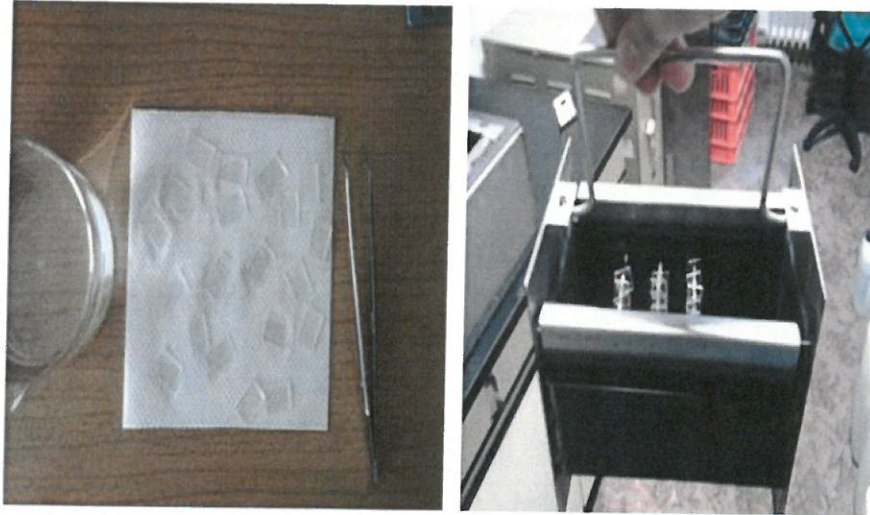
Radon ölçümü için kullanılan diğer bir aygıt iyonizasyon odası radon monitörü olan AlphaGUARD, sadece radon konsantrasyonunu değil, aynı zamanda sıcaklık, basınç ve nem gibi nicelikleri de ölçer.

Ölçümler için 30 adet Radamon tipi iz kazıma dedektörü (Şekil 2.3) kullanıldı. Şekildeki siyah renkli dedektör radon ölçmek için kağıt ve polietilenden yapılan iki adet süzgeç folyo içermekte iken beyaz renkli dedektör toron'u ölçmek için sadece kağıttan yapılan süzgeç folyo içermektedir.



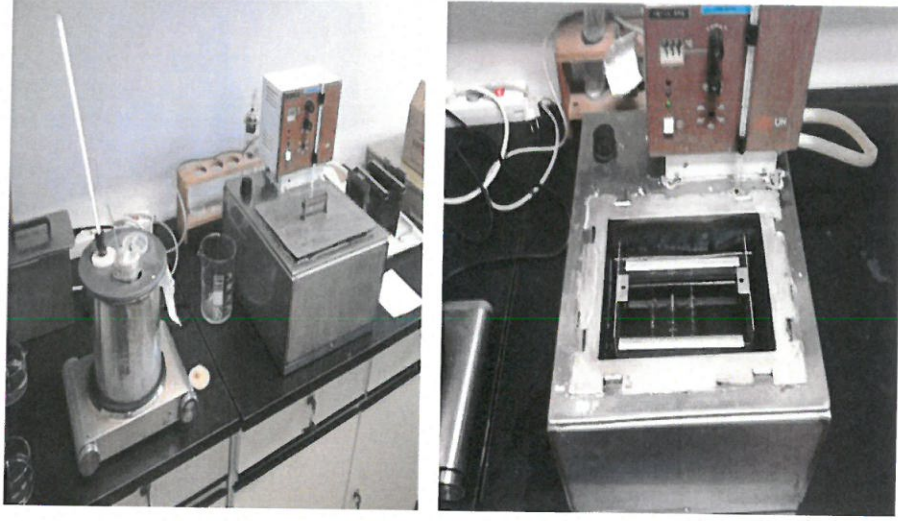
Şekil 2.3. Ölçüm alanına yerleştirilmiş Radamon tipi iz kazıma dedektörleri

Dedektörler şarap mahzeninin duvarlarına ve zeminine 30.03.2013 tarihinde yerleştirilerek 28.05.2013 tarihine kadar bekletilerek ölçümler gerçekleştirildi. Yaklaşık 2 aylık ışınlamanın ardından dedektörler toplandı ve kimyasal kazıma işlemi için hazırlandı. Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ve toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) konsantrasyonunu ölçmek için konulan CR-39 dedektörleri Radamon kutularından çıkarılıp kimyasal kazıma prosesi için dedektör tutucularına yerleştirildi (Şekil 2.4).



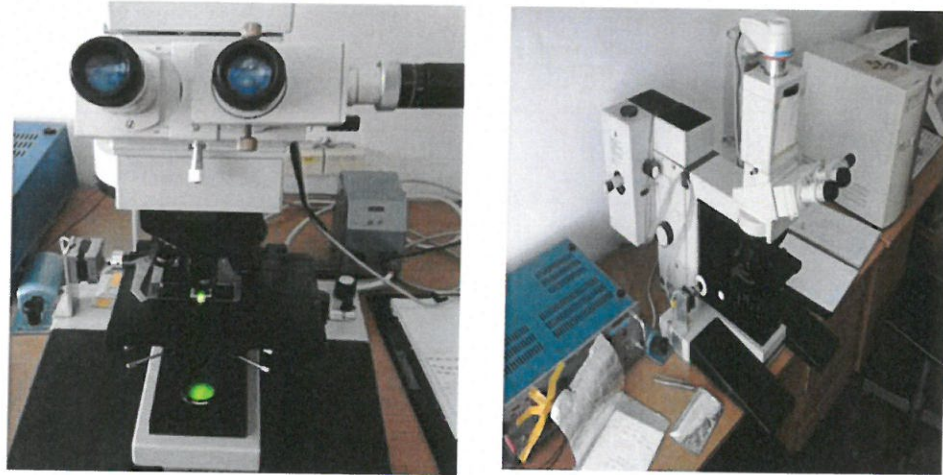
Şekil 2.4. CR-39 dedektörlerinin kimyasal kazıma işlemi için hazırlanışı

İlk olarak, tüm dedektörler 100 °C de kaynayan suya konuldu ve 45 dakika bekletildi. Daha sonra CR-39 örneklerinin tümü 70 °C de % 20'lik NaOH (6,25 M) çözelti banyosuna 5 saat boyunca kazıma işlemi için bırakıldı (Şekil 2.5)



Şekil 2.5. Kimyasal kazıma işlemi düzeneği

Kazıma işleminden sonra, iz yoğunluk değerlerini belirlemek için optik mikroskop kullanarak alfa izleri sayıldı (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. İz yoğunluk değerleri sayımı için kullanılan optik mikroskop

İz yoğunluk ( $\rho$ ) ve iz yoğunluk standart hata ( $\Delta\rho$ ) değerleri;

$$\rho = \frac{N}{A}, \quad (2.1)$$

$$\Delta\rho = \rho \sqrt{\frac{\Delta N^2}{N^2} + \frac{\Delta A^2}{A^2}}, \quad (2.2)$$

formülleri kullanılarak hesaplandı. Burada N [-] iz sayısı ve A [cm<sup>2</sup>] dedektör yüzeyinde mikroskopa taranan alandır.

Arkafon (background) iz yoğunluk değeri ( $\rho_b$ ), net iz yoğunluk değeri ( $\rho_n = \rho - \rho_b$ ) kullanılarak net iz yoğunluk değerinin standart hatası;

$$\Delta\rho_n = \sqrt{(\Delta\rho)^2 + (\Delta\rho_b)^2} \quad (2.3)$$

formülü ile elde edilir.

Radon (<sup>222</sup>Rn) ve toron (<sup>220</sup>Rn) aktivite konsantrasyonları, iz yoğunluk değerleri, ışınlanma zamanı ve kalibrasyon faktörlerinden hesaplandı.

Denklem (2.4) ve (2.5) kullanılarak radon (<sup>222</sup>Rn) aktivite konsantrasyonu ve standart hata değerleri bulunabilir. Bu denklemler;

$$C_{Rn} = \frac{\rho_n K}{t_e} \equiv \frac{\rho_{Rn} K_{Rn}}{t_e}, \quad (2.4)$$

$$\Delta C_{Rn} = \sqrt{\left(\frac{\rho_{Rn} \Delta K_{Rn}}{t_e}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\rho_{Rn} K_{Rn}}{t_e}\right)^2 + \left(\frac{\rho_{Rn} K_{Rn} \Delta t_e}{(t_e)^2}\right)^2}, \quad (2.5)$$

şeklindedir.

Burada  $C_{Rn}$  [Bq.m<sup>-3</sup>] radon aktivite konsantrasyonu,  $\Delta C_{Rn}$  [Bq.m<sup>-3</sup>] radon aktivite konsantrasyonu standart hatası,  $\rho_{Rn}$  [iz.cm<sup>-2</sup>] radon iz yoğunluk değeri,  $K_{Rn}$  ( $K_{Rn} = 0,9$  [Bq.m<sup>-3</sup>/(cm<sup>-2</sup>. 30 gün<sup>-1</sup>)] = 27 [Bq.m<sup>-3</sup>/(cm<sup>-2</sup>.gün<sup>-1</sup>)] radon kalibrasyon faktörü,  $\Delta K_{Rn}$  ( $\Delta K_{Rn} = 0,036$  [Bq.m<sup>-3</sup>/(cm<sup>-2</sup>.30 gün<sup>-1</sup>)] = 1,08 [Bq.m<sup>-3</sup>/(cm<sup>-2</sup>. gün<sup>-1</sup>)] radon kalibrasyon faktörü standart hatası,  $t_e$  [gün] ışınlanma zamanı ve  $\Delta t_e$  [gün] ışınlanma zamanı standart hatasıdır.

Toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyon ve standart hata değerleri;

$$C_{\text{Tn}} = \frac{(\rho_{\text{Tn}} - \rho_{\text{Rn}})K_{\text{Tn}}}{t_e}, \quad (2.6)$$

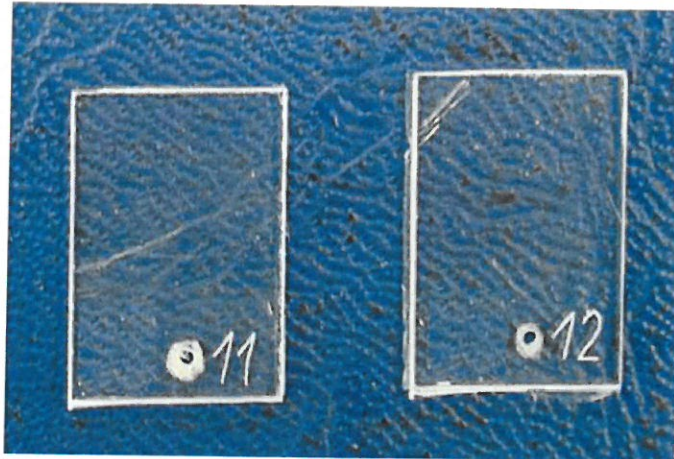
$$\Delta C_{\text{Tn}} = \sqrt{\left(\frac{(\rho_{\text{Tn}} - \rho_{\text{Rn}})\Delta K_{\text{Tn}}}{t_e}\right)^2 + \left(\frac{(\Delta\rho_{\text{Tn}} - \Delta\rho_{\text{Rn}})K_{\text{Tn}}}{t_e}\right)^2 + \left(\frac{(\rho_{\text{Tn}} - \rho_{\text{Rn}})K_{\text{Tn}}\Delta t_e}{(t_e)^2}\right)^2}, \quad (2.7)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Burada  $C_{\text{Tn}}$  [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ] toron aktivite konsantrasyonu,  $\Delta C_{\text{Tn}}$  [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ] toron aktivite konsantrasyonu standart hatası,  $\rho_{\text{Tn}}$  [ $\text{iz}\cdot\text{cm}^{-2}$ ] toron iz yoğunluğu,  $K_{\text{Tn}}$  ( $K_{\text{Tn}} = 1$  [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}/(\text{cm}^{-2}\cdot 30\text{g}^{\text{un}}^{-1})$ ] =  $30$  [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{g}^{\text{un}}^{-1})$ ]) toron kalibrasyon faktörü  $\Delta K_{\text{Tn}}$  ( $\Delta K_{\text{Tn}} = 0,1$  [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}/(\text{cm}^{-2}\cdot 30\text{g}^{\text{un}}^{-1})$ ] =  $3$  [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}/(\text{cm}^{-2}\cdot\text{g}^{\text{un}}^{-1})$ ]) toron kalibrasyon faktörü standart hatası,  $t_e$  [ $\text{g}^{\text{un}}$ ] ışınlanma zamanı ve  $\Delta t_e$  [ $\text{g}^{\text{un}}$ ] ışınlanma zamanı standart hatasıdır.

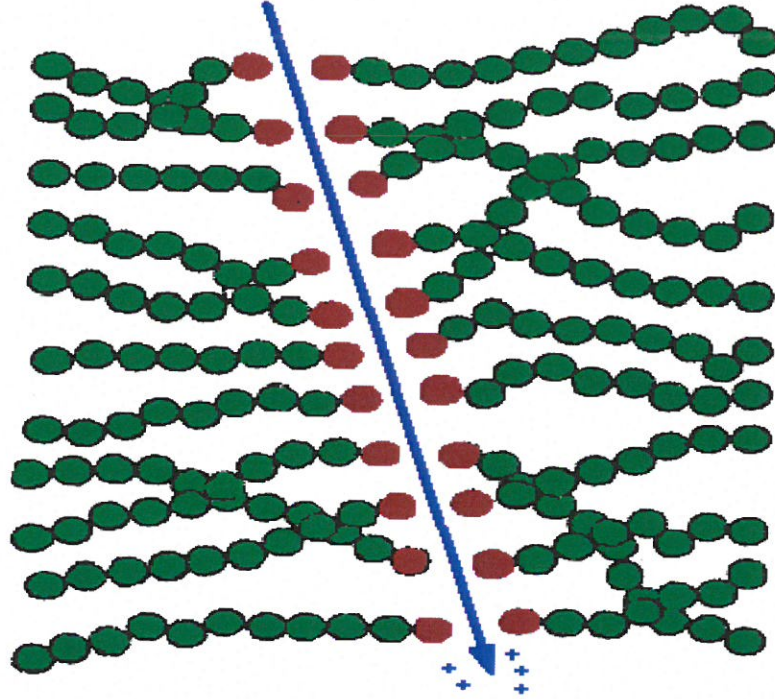
## 2.1. CR-39 Kazıma İz Dedektörü

Pittsburg Cam Şirketi tarafından 1939'da üretilen Columbia Resin-1939 (CR-39), 1978'de B. G. Cartwright tarafından kazıma iz dedektörü (Şekil 2.7) olarak tanıtıldı. CR-39'un kimyasal ismi polyallyl di-glycol carbonate (PADC) ve element bileşimi  $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$  olan, yoğunluğu  $1,31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ve element bileşimi  $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$  olan saydam, berrak ve katı bir plastiktir.



Şekil 2.7. CR-39 İz Kazıma Dedektörü

Birçok kazıma iz dedektör materyali arasında CR-39, geniş enerji aralığıyla alfa parçacıkları ve protonları kaydedebilme yeteneği olan en hassas materyaldir. Alfa parçacıklarının CR-39 boyunca geçişi, iz yörüngesine yakın olan moleküllerin neredeyse tamamının iyonize olmasına (Şekil 2.8) neden olur.



Şekil 2.8. Alfa parçacıkları dedektör içindeki yolları boyunca yörüngesine yakın olan molekülleri iyonize ederek deformasyona neden olur

Hasara uğrayan bölge gizli iz olarak adlandırılır [15]. Bu gizli iz, asit veya temel bir çözücü kullanarak materyal yüzeyünde kimyasal kazıma yapılarak ortaya çıkarılabilir [16].

CR-39'un diğer bir avantajıda kazımadan sonraki yüzeyin netliği ve düşük arkafonu (background) olmasıdır. Özellikle, CR-39 sağlam ve pahalı olmayan bir materyal olduğu için tercih edilir. Yüklü parçacıklar ve nötronlarla etkileşir fakat gama ve beta radyasyonu gibi elektromanyetik radyasyona karşı duyarsızdır. Bu nedenle dedektörler herhangi bir hasar olmadan kaynağa yakın yerleştirilebilir. Fotoğrafik filmler gibi CR-39 dedektörleri de entegre dedektörlere bir örnektir.

Kimyasal kazımada, parçacık yörüngesi doğrultusundaki iz kazıma hızı ( $V_T$ ), zarar görmeyen yüzeyin kazınma hızından ( $V_B$ ) daha büyüktür. Kazıma işlemi ile her bir

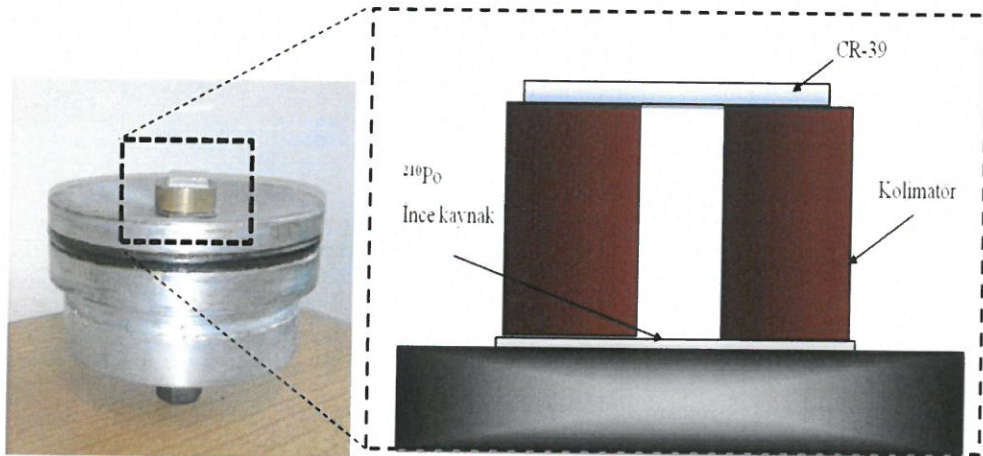
izin konumunda bir çukur oluşur [17]. İz dedektörü olarak CR-39 kullanımında en uygun kazıma koşulu, 6 saat boyunca 70 °C'de 6,25 M NaOH çözeltisidir [18].

## 2.2. Dedektör Verimi

Parçacık akısını belirleme: İnce tabaka taşıyıcı yüzeyinde aktif materyal içeriyorsa ve bu tabaka çok ince ise kaynak, ince kaynak olarak adlandırılır. Burada sistemden çıkan radyasyonun soğurulması önemsizdir. Aşağıda detaylanan çalışmanın amacı, yüzey aktivite yoğunluğunun belirlenmesidir.

Yüzey aktivite yoğunluğu ( $\eta$ ) [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ] birim zamanda [s] birim alanda [ $\text{m}^2$ ] kaynağın yüzeyinde bozulan atomların sayısıdır. Yüzey aktivite yoğunluğunun konumdan bağımsız olduğu (sabit) durumu inceleyelim:

Çok kaynaklı durumda bu ifade doğru değildir fakat bu analiz için iyi bir temel modeldir. Kaynak aktivitesinin (A) çalışma süresi boyunca sabit olduğunu varsayalım. Şekil 2.9'da uygulanan modelin taslağı gösterilmiştir. Bu kurulum ince bir kaynağın yüzey aktivite yoğunluğunun belirlenmesine olanak sağlar. Kaynağın aktif alanı bir kolimatör (yön verici) ile kaplıdır. Silindirik kolimatörün yarıçapı  $R_c$ , uzunluğu  $a$  ile verilmiştir. Düzeneğin üstüne CR-39 iz kazıma dedektörü yerleştirilmiştir.

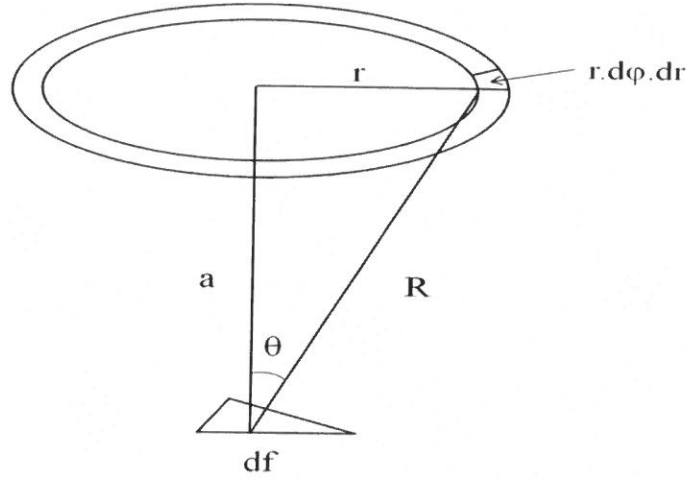


Şekil 2.9. Verim hesabı için kullanılan deney düzeneği fotoğrafı ve şematik gösterimi

Dedektörün hassas yüzeyi, kaynağın aktif kısmının karşısındadır. Analiz için kullanılan parametrelerden  $\eta$  kaynağın yüzey aktivite yoğunluğunu göstermektedir.

Dedektörün yüzeyine gelen alfa parçacıklarının akısı  $\Phi [m^{-2}.s^{-1}]$  sabit değildir. Akı, kolimatörün kenarı ile simetri eksenini arasındaki mesafeye ( $r$ ) bağlıdır,  $\Phi = \Phi(r)$ .

İlk adımda, simetri eksenini ve dedektör yüzeyini arasındaki kesişim noktasındaki parçacık akısını belirleyeceğiz. Dedektörün yüzey düzleminde  $df$  kadar bir yüzey elemanı seçelim. Diğer bir yüzey elemanı da kaynak yüzeyinde ve  $r$  mesafesinde olsun. Yüzey elemanının alanı  $r d\phi dr$  olur.



Şekil 2.10. Parçacık akısını bulabilmek için simetri eksenini ile dedektör yüzeyini arasındaki geometri

Kaynağın yüzeyinden çıkan radyasyon izotropik (her yönde) olarak yayılır. Kaynağın  $r d\phi dr$  yüzeyinde,  $df$  yüzey elemanının izdüşümü  $df \cdot \cos\theta$ 'dir. Şekil

2.10'dan  $\tan\theta = \frac{r}{a}$  elde edilebilir.

$df$  yüzey alanının katı açısı;

$$d\Omega = \frac{df \cos\theta}{4\pi R^2} = \frac{df \cos\theta \sin^2\theta}{4\pi r^2} \quad (2.8)$$

ile elde edilir. Denklemdaki  $R^2$  ifadesi  $\frac{r^2}{\sin^2\theta}$ 'ye eşittir.

Yarıçapı  $r$  olan banttann  $df$  yüzey elemanına gelen parçacık akısı;

$$d\Phi = \eta 2\pi r dr d\Omega = \frac{\eta}{2} \left( \frac{\sin^2\theta \cos\theta}{r} \right) dr df \quad (2.9)$$

formülü ile hesaplanır.

$\pi(R_c)^2$  yüzeyinden gelen parçacık akısı;

$$\Phi = \int_0^{R_c} \frac{d\Phi}{df} dr = \frac{\eta}{2} \int_0^{R_c} \frac{\sin^2\theta \cos\theta}{r} dr = \frac{\eta}{2} \left( 1 - \frac{a}{\sqrt{R_c^2 + a^2}} \right) \quad (2.10)$$

ile elde edilir. Denklem (2.10) da;

$$\eta = \frac{\rho}{\beta t_e} \quad \text{ve} \quad \beta = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{a}{\sqrt{R_c^2 + a^2}} \right)$$

ifadeleri yerine yazıldığında parçacık akısı;

$$\Phi = \beta \eta \quad (2.11)$$

ile hesaplanır.

Burada  $\rho$  [iz.mm<sup>-2</sup>] parçacık iz yoğunluk değeri,  $\beta$  [-] kalibrasyon faktörü ve  $t_e$  [s] ışınlama süresidir.

Dedektör verimi;

$$\frac{\Phi}{\eta} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{a}{\sqrt{R_c^2 + a^2}} \right) \quad (2.12)$$

şeklinde yazılır.

CR-39 iz dedektörü, <sup>210</sup>Po kaynağından çıkan alfa parçacıkları ile kolimatör yardımıyla ışıma maruz bırakıldı. Açık havada gerçekleştirilen ışımanın deneysel sonuçları Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

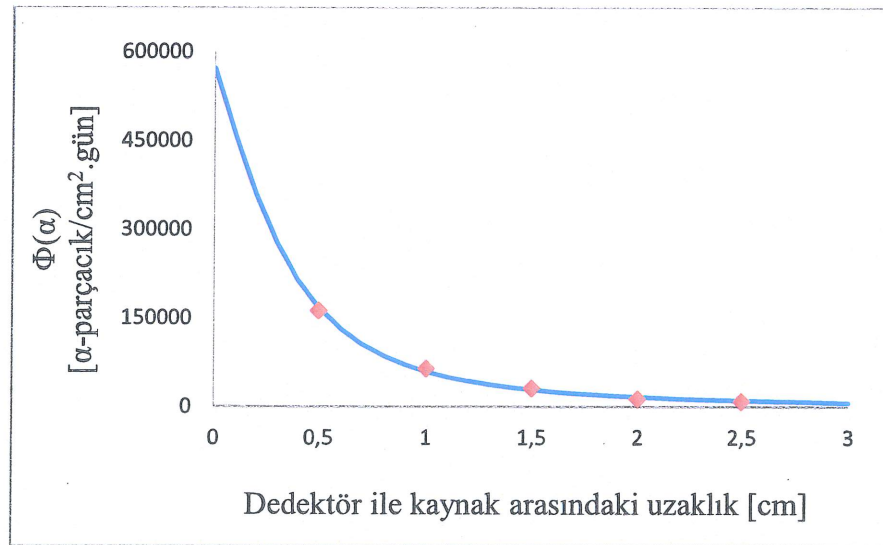
Tablo 2.1. Deneyde elde edilen veriler

Dedektör no	Işımlama zamanı $t_e$ [s]	Kaynak-dedektör uzaklığı $a$ [cm]	Kalibrasyon faktörü $\beta$ [-]	İz Yoğunluğu $\rho$ [iz.cm <sup>-2</sup> ]	Yüze aktifite yoğunluğu $\eta$ [Bq.cm <sup>-2</sup> ]
1	86400	0,5	0,146	163844±7335	12,6±0,6
2	86400	1	0,053	66094±2902	15,3±0,7
3	86400	1,5	0,026	32594±1578	15,1±0,7
4	86400	2	0,015	14777±933	11,4±0,7
5	86400	2,5	0,009	10275±587	11,9±0,7

Tablo 2.2. Kaynak ile dedektör arasındaki uzaklıklar değiştirilerek hesaplanan alfa parçacık akısı ( $\Phi$ ) ve standart hatası ( $\Delta\Phi$ )

$a$ [cm]	$\Phi(a)$ [parçacık/cm <sup>2</sup> .gün]	$\Delta\Phi(a)$ [parçacık/cm <sup>2</sup> .gün]
0,5	167778,6	0,1
1	60475,48	0,03
1,5	29395,85	0,02
2	17103,33	0,13
2,5	11124,011	0,006

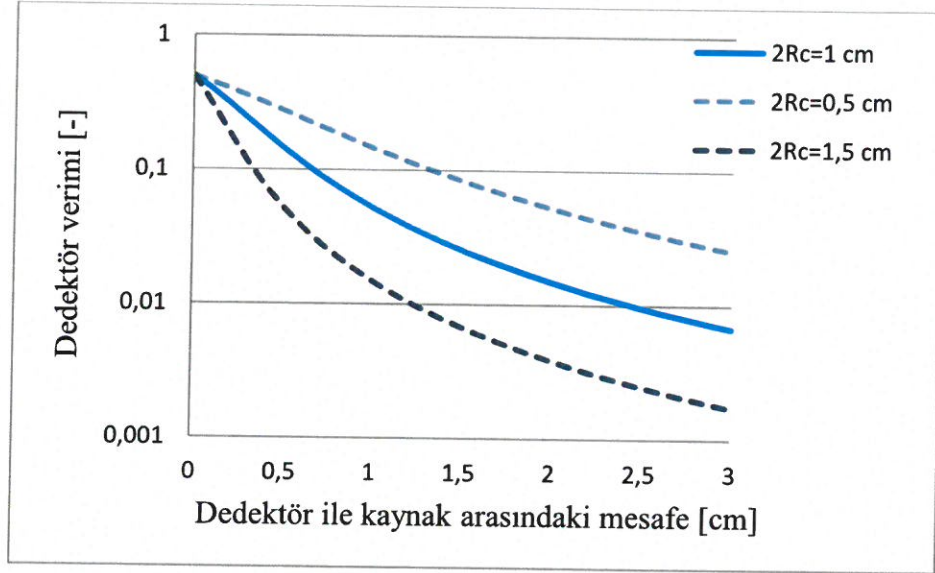
Parçacık akısının uzaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Parçacık akısının uzaklığa bağlı olarak değişimi

Yukarıdaki grafikten anlaşıldığı gibi akı, dedektör ile kaynak arasındaki uzaklığın bir fonksiyonu olarak hızlı bir şekilde azalmaktadır. Standart hata değerleri çok küçük

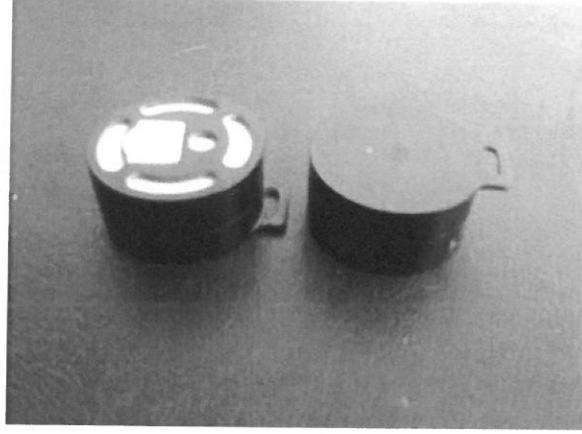
Yukarıdaki grafikten anlaşıldığı gibi akı, dedektör ile kaynak arasındaki uzaklığın bir fonksiyonu olarak hızlı bir şekilde azalmaktadır. Standart hata değerleri çok küçük olduğundan grafikte görülmemektedir. Dedektör veriminin (görelî parçacık akısı ( $\Phi/\eta$ )) uzaklığa bağılı olarak değişimi Denklem (2.12) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Kolimatör çapının 1,0 cm ( $2R_c = 1,0$  cm) olduğu durum deneysel olarak ölçüldü. Eğer farklı çapta kolimatör kullanıldığında elde edilen eğriler Şekil 2.12’de kesikli çizgiler ile gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Dedektör veriminin (görelî parçacık akısı ( $\Phi/\eta$ )) kolimatör çapının farklı olduğu durumlarda (0,5 cm, 1,0 cm ve 1,5 cm), kaynak ve dedektör arasındaki uzaklığa bağılı değişimi

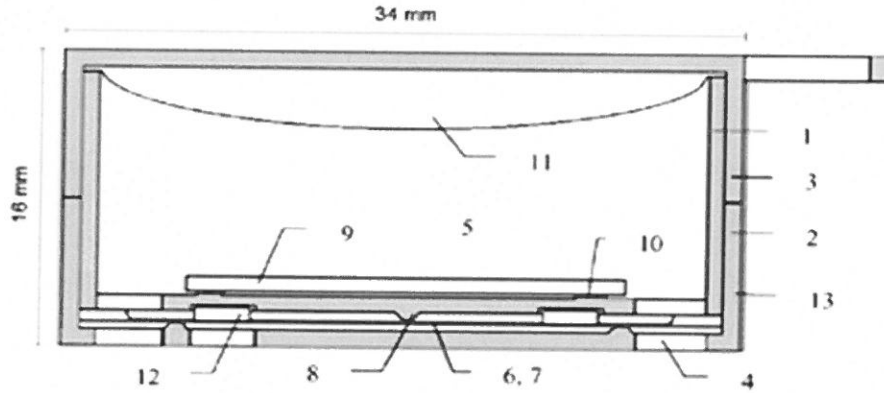
### 2.3. Radamon Kazıma İz Tipi Radon Dedektörü

Radamon radon dedektörü (Şekil 2.13), 1989-1990 yıllarında Macar Optik Çalışma Şirketinin Mekanik ve Optik departmanı işbirliği ile Macar Bilimler Akademisi Nükleer Araştırma Enstitüsü Radon Grubu tarafından geliştirilmiştir (Csige, 1997).



Şekil 2.13. Radamon radon dedektörü

Radamon difüzyon tipi, pasif ve entegre kazıma iz dedektörüdür. Temelde Radamon dedektörü Şekil 2.14'de (1), (2) ve (3) rakamları ile gösterilen üç büyük plastik parçadan oluşur.



Şekil 2.14. Radamon kazıma iz tipi dedektörünün iç yapısı (1-dozi metre haznesi, 2-taban, 3-kapak, 4-kuadratik yay şekli açıklık, 5-duyarlı hacim, 6-kağıt filtre, 7-polietilen filtre, 8-taban ile dozi metre haznesini ayırıcı kısım, 9-CR-39 kazıma iz dedektörü, 10-çift taraflı yapıştırıcı bant, 11-pirinçten yapılan küresel kubbe, 12-termolüminesans dedektör çipleri, 13-sabitleme bandı)

Silindirik şeklindeki dozi metre haznesi (1), taban (2) ile kapak (3) arasına gömülmüştür. Dedektörün duyarlı hacmine (5) radonun girebilmesi için taban ve dozi metre haznesinde dört adet 5 mm genişliğinde çeyrek daire şeklinde açıklık vardır (4). Dozi metre haznesi ve taban, 40 µm kalınlığında polietilen folyo (7) ve filtre kağıdı (6) veya sadece filtre kağıdı (6) ile birbirinden ayrılır.

Polietilen folyo ve kağıt filtre kullanıldığı zaman sadece  $^{222}\text{Rn}$  yüksek olasılıkla dedektörün hassas hacmine girebilir. Bu durumda iç ve dış radon konsantrasyon

oranı kararlı hal durumunda  $^{222}\text{Rn}$  için 0,98 ve  $^{220}\text{Rn}$  için 0,02'dir. Diğer taraftan sadece filtre kağıdı kullanıldığında  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$ 'un her ikisinde hassas hacme yüksek olasılıkla giriş yapabilirler. İç ve dıştaki  $^{222}\text{Rn}$  konsantrasyon oranı kararlı hal durumunda yaklaşık 0,9'dur. Filtreler aynı zamanda aerosol ve dışarıdan gelen radon ürünlerini hassas hacimden uzak tutar. Filtre kağıdı nemli ortamlarda su yoğunlaşması problemini azaltmakta da iyidir.

Radamonda hidrofobik (MN 616wa, Macherey-Nagel GmbH&Co, Düren, Germany) kağıt kullanılmıştır. Ortamdaki su yoğunlaşması bu filtrenin gözeneklerine kolayca dolmaz, bunun yerine su filtre yüzeyinde damlacıklar oluşturma eğilimindedir, böylece filtre radon için geçirgenliğini korumuş olur.

Radamon'un içinde TASTRAK (Bristol, UK) tipi CR-39 kazıma iz dedektörleri kullanılmıştır. Dikdörtgen şeklindeki iz dedektörü (9) dozimetre haznesinin en alt kısmına 4 adet çift taraflı yapışkan bant (10) kullanılarak yerleştirilir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Radamon kazıma iz dedektörü iç yapısı

Küresel kubbe (11), 0,3 mm pirinçten yapılan, dozimetre haznesinin üst kısmında dedektöre bakacak şekildedir. Bu kubbe, sayım için kullanılacak olan kazıma iz yoğunluklarının, dedektör yüzey alanının tamamına homojen olarak dağılmasını sağlar [7].

#### 2.4. Toprakta Radon ve Toron

Radonun toprak içindeki taşınımı;

$$\frac{dC}{dt} = D\Delta C - v(\nabla C) - \lambda C + G \quad (2.13)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada D difüzyon sabitini, G topraktaki gözeneklerde radon üretilme hızını ( $G = \lambda E \rho_s C_{Ra}$ ), v hava hızını [ $m.s^{-1}$ ], E emanasyon sabitini,  $C_{Ra}$  [ $Bq.kg^{-1}$ ] topraktaki radyum-226 konsantrasyonunu,  $\rho_s$  toprak yoğunluğunu [ $kg.m^{-3}$ ],  $\lambda$  [ $s^{-1}$ ] radon bozunum sabitini gösterir. Difüzyon, düşük geçirgenlikteki (genellikle  $<10^{-7} cm^2$ ) topraklarda baskın rol oynayan radon taşıma işlemidir [19].

Basınç değişiminin olmadığı varsayılan kararlı durum için ( $\frac{dC}{dt} = 0$  ve  $v = 0$ ) bir boyutta difüzyon denklemi;

$$D \frac{d^2C}{dz^2} - \lambda C + G = 0 \quad (2.14)$$

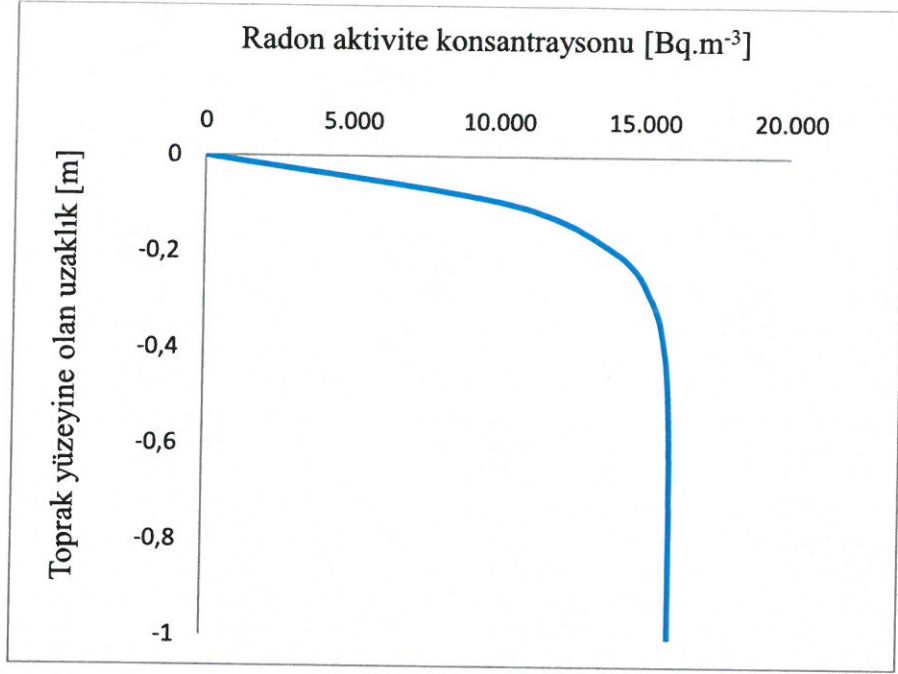
ile ifade edilir.

Denklem (2.14)'ün sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilen nümerik çözümü;

$$D \left( \frac{C_{i-1} - 2C_i + C_{i+1}}{(\Delta z)^2} \right) - \lambda C_i + G = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.15)$$

şeklinde olacaktır.

Belirli sınır koşullarında (z-ekseni yukarı doğru seçildiğinde yüzeyde  $C(z=0) = C_0 \cong 0$  ve alt sınırdaki no-flow sınır koşulu) bir boyutta difüzyon denkleminin nümerik çözümü ile topraktaki radon konsantrasyonunun derinliğe bağlı olarak değişimi Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Topraktaki radon konsantrasyonunun derinliğin fonksiyonu olarak değişimi

Toprak gazının radon ve toron konsantrasyonu derinliğe bağlı olarak ATOMKI'nin (Debrecen, Macaristan) arka bahçesinde kazıma iz dedektörü kullanılarak ölçüldü. Dedektörler toprak yüzeyi ile 35 cm derinlik arasına on beş farklı konuma yerleştirildi (Şekil 2.17). Ölçüm verileri aşağıdaki Tablo 2.2'de gösterilmiştir

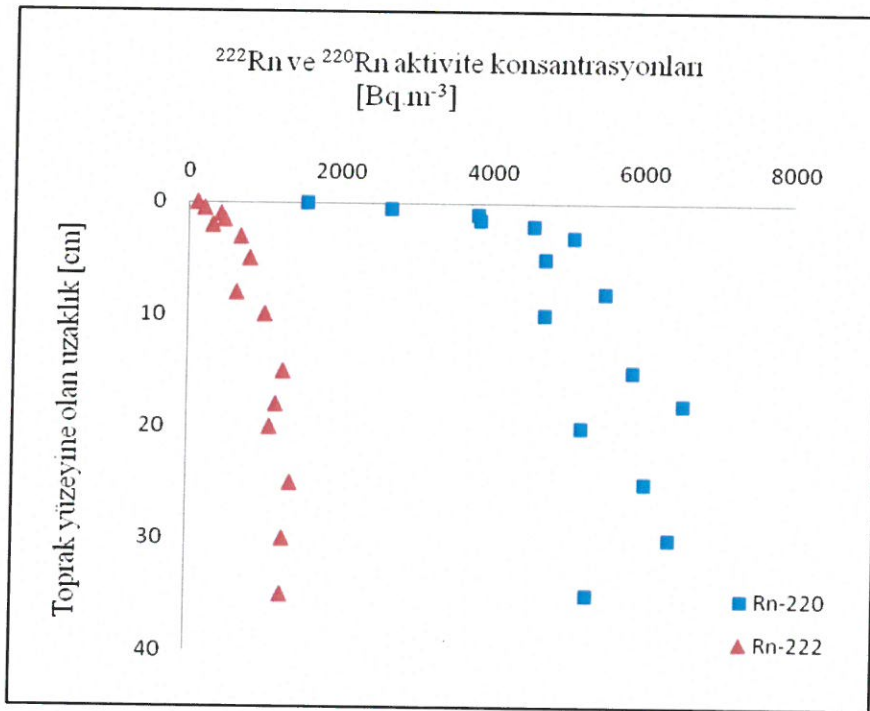


Şekil 2.17. Toprak gazında radon ve toron ölçüm düzeneği

Tablo 2.3. Toprak gazının radon ve toron konsantrasyonu

z [cm]	Rn-222 aktivite konsantrasyonu [Bq.m <sup>-3</sup> ]		Rn-220 aktivite konsantrasyonu [Bq.m <sup>-3</sup> ]	
	Değer	Hata	Değer	Hata
0	115	25	1570	190
-0,5	205	45	2670	305
-1	425	135	3820	425
-1,5	470	155	3845	430
-2	315	85	4540	500
-3	690	315	5075	555
-5	815	425	4695	520
-8	645	280	5495	600
-10	1015	640	4700	520
-15	1260	965	5870	640
-18	1175	850	6550	710
-20	1090	730	5205	570
-25	1375	1140	6045	670
-30	1280	995	6365	690
-35	1260	965	5300	585

Toprakta radon aktivite konsantrasyonu deneysel sonuçları Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Toprak derinliğinin bir fonksiyonu olarak radon (<sup>222</sup>Rn) ve toron (<sup>220</sup>Rn) aktivite konsantrasyonu

## 2.5. AlphaGUARD İyonizasyon Odası Radon Monitörü

Radon aktivite ölçümleri için uygulanan iki farklı teknik vardır. Bunlardan ilki entegre pasif radon ölçümü ikincisi ise sürekli ve aktif radon ölçümüdür. Entegre pasif radon ölçümü herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymazken, sürekli aktif radon ölçümü için elektrik gücüne ihtiyaç vardır. Radon seviyelerini ölçebilen algılayıcılar, alfa iz dedektörleri, aktif karbon emme araçları ve AlphaGUARD (Şekil 2.19) monitörüdür.



Şekil 2.19. The AlphaGUARD radon monitör

Alfa iz dedektörleri, elektrik gücüne ihtiyaç duymayan entegre pasif radon ölçüm araçlarıdır. Dedektör içine montelenmiş ince bir plastik veya film içerirler. Radon filtre açıklığı boyunca dedektöre aktarılır. Dedektör içindeki radon bozunurken, yayımlanan alfa parçacıkları filme çarparak üzerinde iz oluşturur. İzler radon konsantrasyonunu belirlemek için sayılır. Bu dedektörler yüksek konsantrasyonlardaki radon ölçümlerinde fazla etkili değildir [20].

Aktif karbon cihazları güce gerek duymayan pasif algılayıcılardır. Karbon, ekran açıklığı üzerinden kutuya giren radonu soğurur. Belirlenen ışınlama süresinden sonra kutu kapanır ve HPGe gama ışın dedektörü kullanılarak karbon analiz edilir. Aktif karbon cihazları kısa süreli ölçümlerde (1-7 gün arasında) tercih edilir. Karbon doygun hale gelebileceği için yüksek nemli ortamlarda kullanılmaya uygun değildir [21].

AlphaGUARD radon monitörü sürekli aktif radon ölçüm cihazıdır. Bu cihaz iyonizasyon odasına sahiptir ve radonu dedekte edebilmek için alfa spektroskopisini kullanır. Radonun iki yaygın izotopu  $^{222}\text{Rn}$  ve  $^{220}\text{Rn}$  alfa bozunumlarından kendi

enerjileri aralıkları tespit edilir [20]. Alfa dedeksiyonundan üretilen sinyal sayısal çıktıya dönüştürülür. Bu çıktı veri toplayıcıları veya bilgisayar tarafından okunur. AlphaGUARD için ideal uygulamalar; toprakta radon gazı, kapalı ve açık maden ortamları ve sularda biriken radon ölçümlerini içerir. AlphaGUARD uzun süreli radon konsantrasyonunun izlenmesi için dizayn edilmiştir.

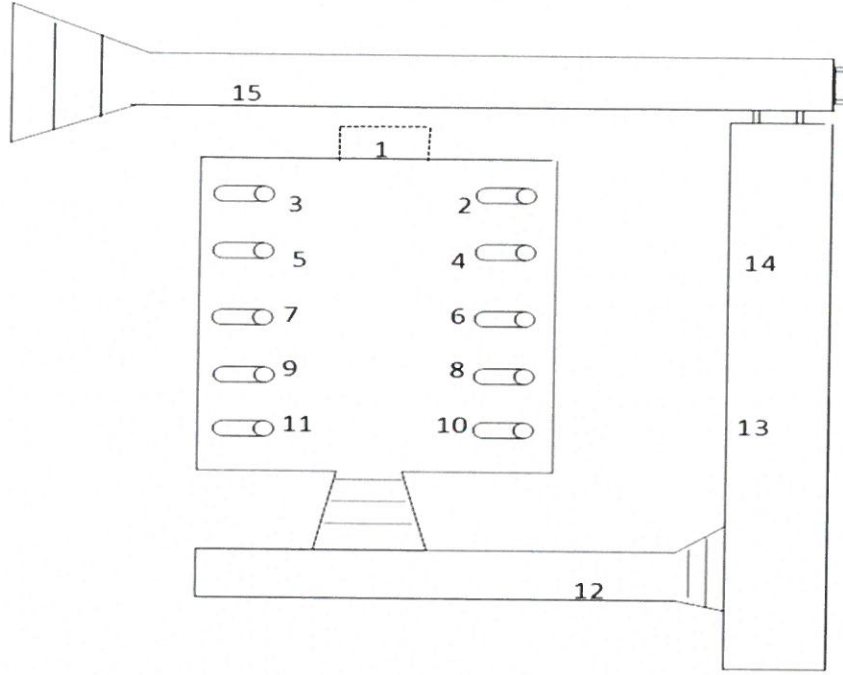
## 2.6. Deney Yapılan Yer Tanımı

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) and toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyonları Macaristan'ın Slovakya sınırı yakınındaki Sátorajújhely (Şekil 2.20) şehrinde bir şarap mahzeninde ölçüldü. Sátorajújhely topografik yeri Macaristan'ın tepelik bölgesinin eteklerinde olması itibarı ile oldukça farklı bir konumdadır. Jeolojik bakış açısından, bu bölgenin toprak özelliği yoğun volkanik kayadır.

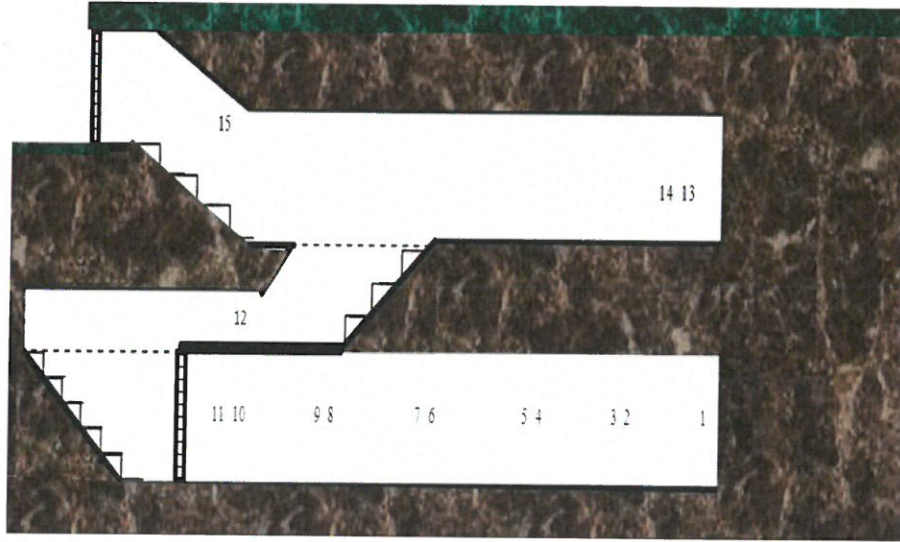


Şekil 2.20. Sátorajújhely, Macaristan

Deneyin gerçekleştiği şarap mahzenine konulan dedektörlerin konumu, kuşbakışı ve profil görünümü Şekil 2.21 ve Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



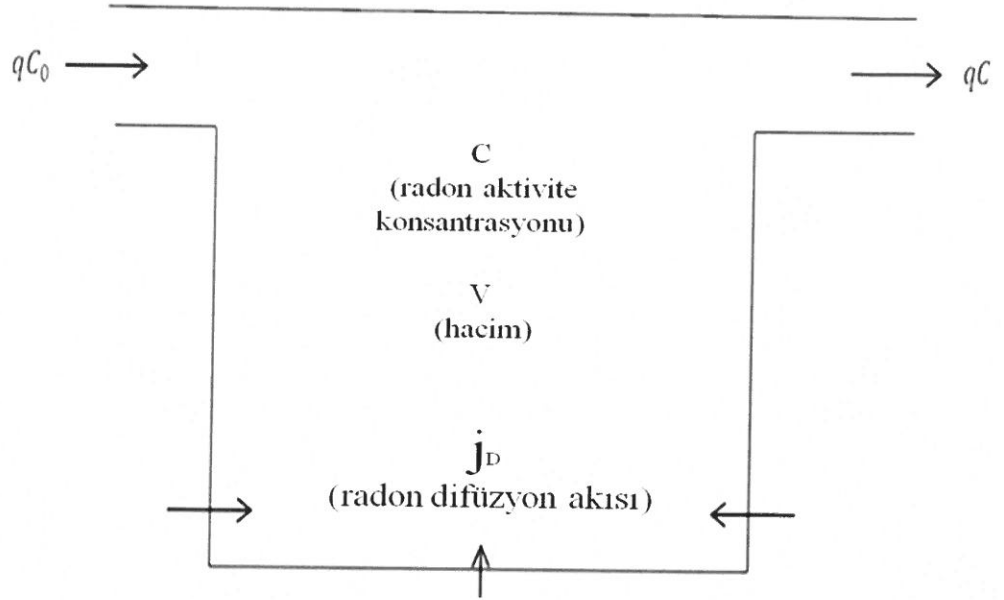
Şekil 2.21. Mahzenin kuşbakışı görünümü ve dedektörlerin konumu



Şekil 2.22. Mahzenin kuşbakışı görünümü ve dedektörlerin konumu

## 2.7. Modelleme

Mahzenlerin havasındaki radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyon oluşumunu anlamak için (Şekil 2.23) model hesaplamalar yapıldı.



Şekil 2.23. Mahzenlerde  $^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyon oluşum modeli

Bu modelde havalandırma hızı ( $v = \frac{q}{V}$ , burada  $q$  birim zamanda mahzene giren havanın hacmi,  $V$  mahzenin hacmi), mahzen havasındaki radon konsantrasyonu için önemli bir veridir. Çünkü dışarıdaki havanın radon aktivite konsantrasyonu ( $C_0$ ), mahzen içindeki radon aktivite konsantrasyonu ( $C$ ) ile karşılaştırıldığında çok düşük, neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir. Dolayısıyla havalandırma ne kadar iyi olursa, mahzendeki havanın içerdiği radon o kadar düşük olur.

Mahzendeki duvarların tüm alanı  $A$ , duvarlarda ve tabanda radonun yayılma akısı  $j_D$  (bu miktar birim zamanda birim yüzeyden yayılan radon atomlarının aktivitesidir).

Radon yayılma akısı  $j_D$ , radon akış yoğunluğu ( $\Phi_{\text{Rn}}$ ) ile radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) bozunum sabitinin ( $\lambda = 2,09838 \times 10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$ ) çarpımı;

$$j_D = \lambda \Phi_{\text{Rn}} \quad (2.16)$$

ile hesaplanır.

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyonunun zamanla değişimi için;

$$\frac{dC}{dt} = j_D \frac{A}{V} + q \frac{C_0}{V} - q \frac{C}{V} - \lambda C \quad (2.17)$$

denklemini kullanılır.

Dış atmosfer havasındaki radon aktivite konsantrasyonu ( $C_0$ ) çok düşük bir değer olduğundan ihmal edilebilir. Böylece Denklem (2.17) ifadesini tekrar yazacak olursak;

$$\frac{dC}{dt} = j_D \frac{A}{V} - \left( \frac{q}{V} + \lambda \right) C \quad (2.18)$$

ifadesi elde edilir.

Denklem (2.18) diferansiyel denkleminin başlangıç koşulu ( $C(t=0) = 0$ ) olmak üzere analitik çözümü;

$$C(t) = \frac{j_D \frac{A}{V}}{\frac{q}{V} + \lambda} - \frac{j_D \frac{A}{V}}{\frac{q}{V} + \lambda} e^{-\left(\frac{q}{V} + \lambda\right)t} \quad (2.19)$$

şeklinde olacaktır.

Eğer  $t \rightarrow \infty$  ise aktivite konsantrasyonu;

$$C_\infty = \frac{j_D \frac{A}{V}}{\frac{q}{V} + \lambda} \quad (2.20)$$

ifadesi ile hesaplanır.

Sonuç olarak,  $^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonunun zamana bağlı değişimi;

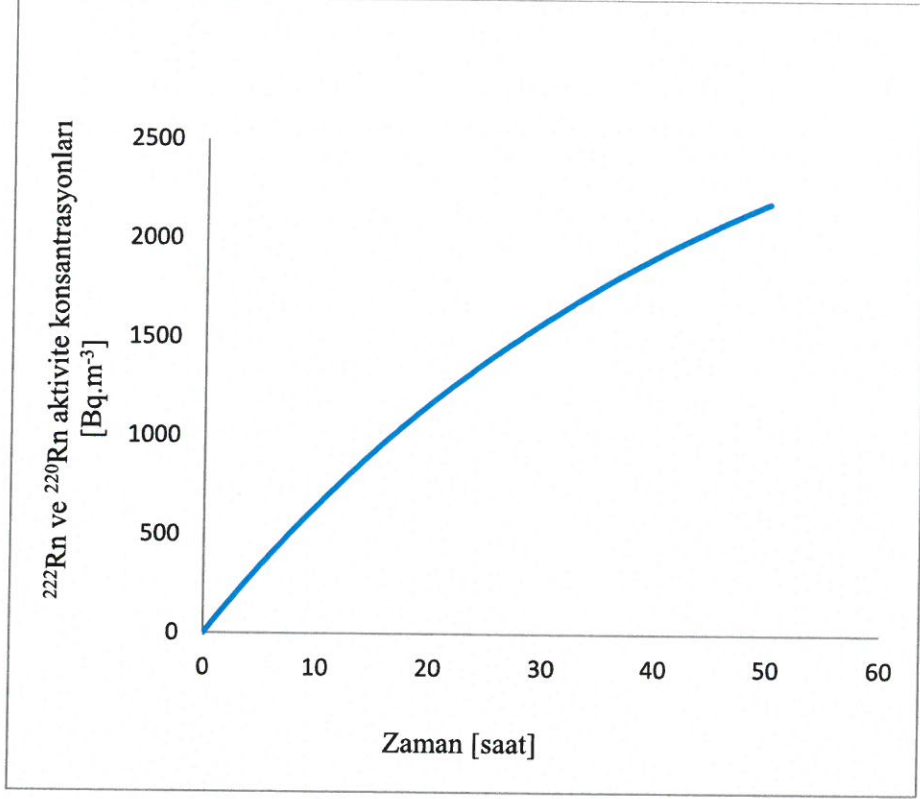
$$C(t) = C_\infty (1 - e^{-\gamma t}) + C_0, \quad (2.21)$$

$$C(t) = (C_{\max} - C_{\min})(1 - e^{-\gamma t}) + C_{\min}, \quad (2.22)$$

formüllerinden yararlanılarak hesaplanır. Burada  $\gamma = \frac{q}{V} + \lambda$  dir.

Denklem (2.21) ve Denklem (2.22) radon aktivite konsantrasyonunun zamana bağılı olarak değişimini verir.

Örneğin aşağıdaki sayısal verileri kullanarak radon aktivite konsantrasyonunun zamana bağılı olarak nasıl değiştiğini Şekil 2.24’de görebiliriz.



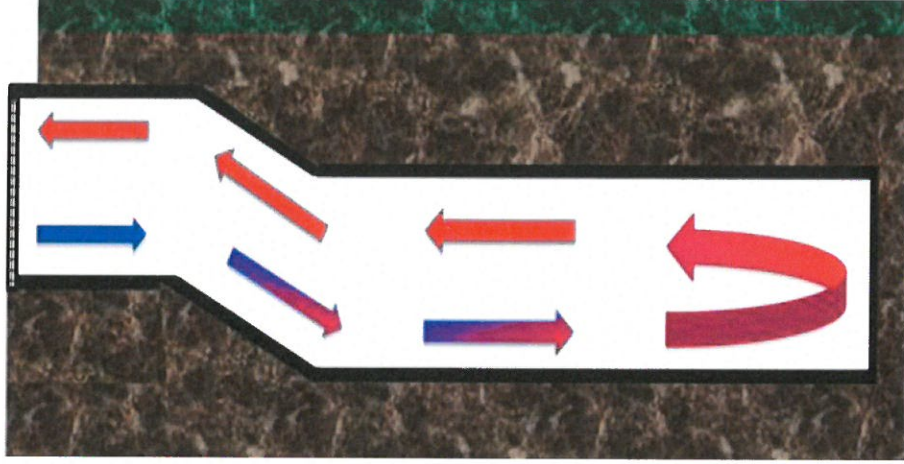
Şekil 2.24. Radon aktivite konsantrasyonunun zamana bağılı olarak değişiminin teorik öngörüsü ( $j_D = 10 \text{ mBq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ,  $A = 200 \text{ m}^2$ ,  $V = 50 \text{ m}^3$  ve  $\Delta t = 1 \text{ saat}$ )

Mahzen ortamındaki radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyonu temel olarak iki faktör tarafından belirlenir. Bunlardan biri, mahzenin zemin ve duvarından havaya karışan  $^{222}\text{Rn}$  gazı miktarı, diğeri ise mahzenin ne kadar iyi havalandırıldığıdır. Bu iki faktör zamanla hava koşullarına bağılı olarak değişiklik gösterir.

Mahzen havasında oluşan radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyonu birçok faktöre bağılıdır;

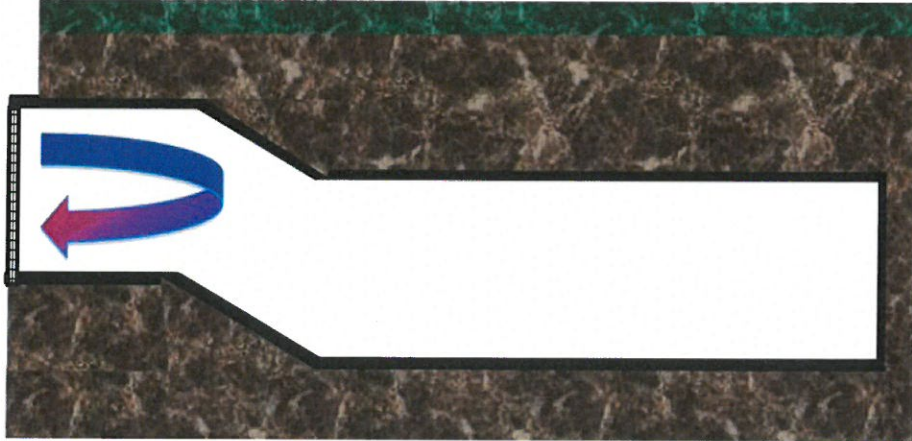
- mahzenin duvarları ve toprağının kalitesine bağılı olarak sızan radon gazı miktarı,
- çoğunlukla dış sıcaklığa bağılı olan doğal havalandırma.

Kış aylarında dış sıcaklık mahzenin iç sıcaklığından düşüktür. Dıştaki yoğun hava mahzenin giriş zemininden içeriye akar, ısı alıp yükselir ve mahzen girişinin üst kısmından dışarı çıkar. Böylece, sürekli hava sirkülasyonu sonucu (Şekil 2.25) radon gazı miktarında azalma olur.



Şekil 2.25. Kış aylarında hava sirkülasyonu

Yaz aylarında dış sıcaklık mahzen içindeki sıcaklıktan yüksektir. Böylece mahzen içindeki radon gazı oranını azaltacak olan hava sirkülasyonu sağlanamadığı için (Şekil 2.26) radon miktarında artış görünür.



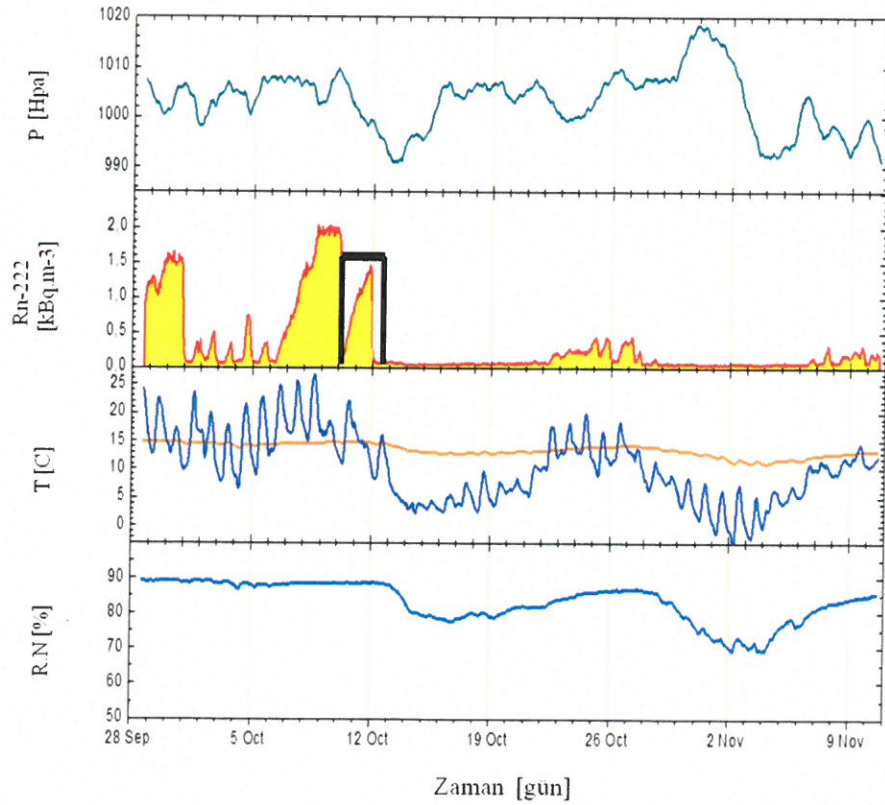
Şekil 2.26. Yaz aylarında hava sirkülasyonu

$^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonu yaz aylarında maksimum, kış aylarında ise minimum olmak üzere mevsimsel değişiklikler gösterir. Bunun nedeni mahzen içindeki ve dışındaki sıcaklık farkına bağlı olarak değişen doğal havalandırma miktarıdır.

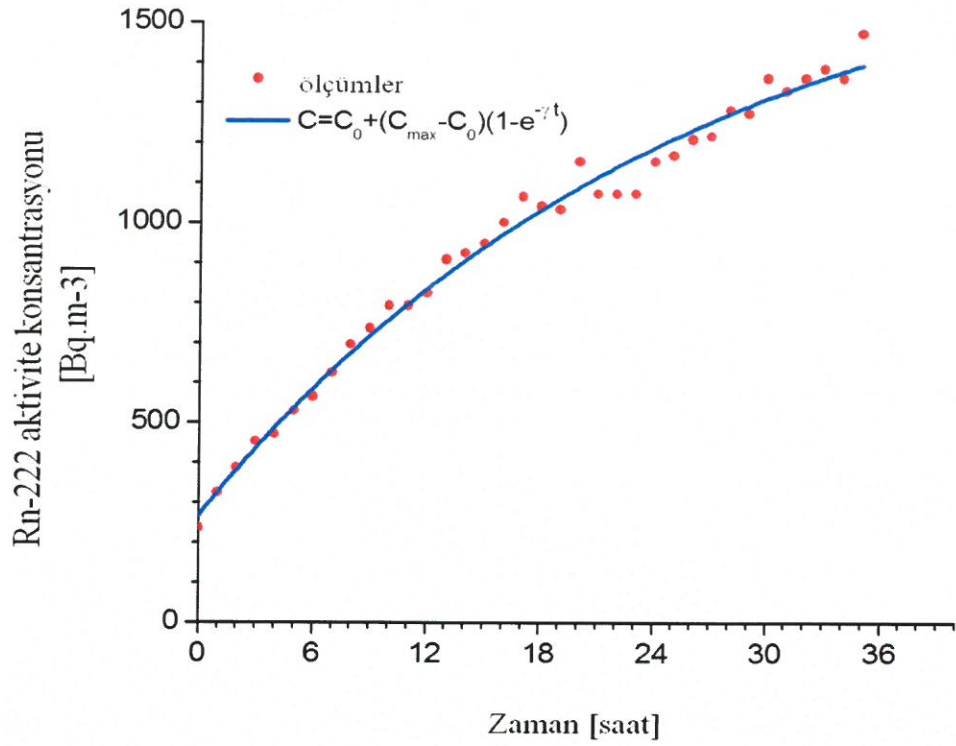
AlphaGUARD cihazı ile 2009 yılında yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler (Şekil 2.27), mevsimsel değişikliklerin radon gazı miktarına nasıl etki ettiğini göstermektedir. Grafikte 3. kısım, mahzen içindeki (kırmızı çizgi) ve dışındaki (mavi çizgi) sıcaklık değişimini, 2. kısım (sarı dolgulu kırmızı çizgi) ise  $^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonunun zamana bağlı değişimini göstermektedir.

Grafikte görüldüğü gibi 28 Eylül ve 12 Ekim arasında mahzendeki radon miktarı  $2 \text{ kBq.m}^{-3}$  den fazla bir artış göstermiştir. Bu zaman aralığında dış sıcaklık mahzenin iç sıcaklığından yüksektir. Ancak 13 Ekimde atmosfer havasındaki sıcaklık mahzen içindeki sıcaklığın altına düşerek radon seviyesinde ani bir azalmaya (birkaç  $100 \text{ Bq.m}^{-3}$  civarı) neden olmuştur.

AlphaGUARD cihazı ile  $^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonu ölçümünden, 10.11.2009 (09:00) – 11.11.2009 (20:00) tarihi arasında elde edilen değişim eğrisindeki iyileşme Şekil 2.28’de verilmiştir. İyileşme eğrisi diferansiyel denklemin çözümü fit edilerek elde edilmiştir. Düz çizgi, deneysel noktalardan geçen en iyi fiti gösterir.



Şekil 2.27. AlphaGUARD ölçüm cihazı kullanılarak 28.09.2009 - 11.11.2009 tarihleri arasında yapılan deneyde elde edilen sonuçlar



Şekil 2.28. AlphaGUARD ile  $^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonunun zamana bağlı değişimi 10.11.2009 (09:00) – 11.11.2009 (20:00)

Durağan halde yani mahzen havasındaki radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) aktivite konsantrasyonunun zamanla değişmediği durumda yukarıdaki Denklem (2.17) sifıra eşit olur ve bu yolla mahzen havasındaki konsantrasyonun bulunabileceği normal cebir denklemi;

$$j_D \frac{A}{V} + q \frac{C_0}{V} - q \frac{C}{V} - \lambda C = 0 \quad (2.23)$$

şeklinde olacaktır.

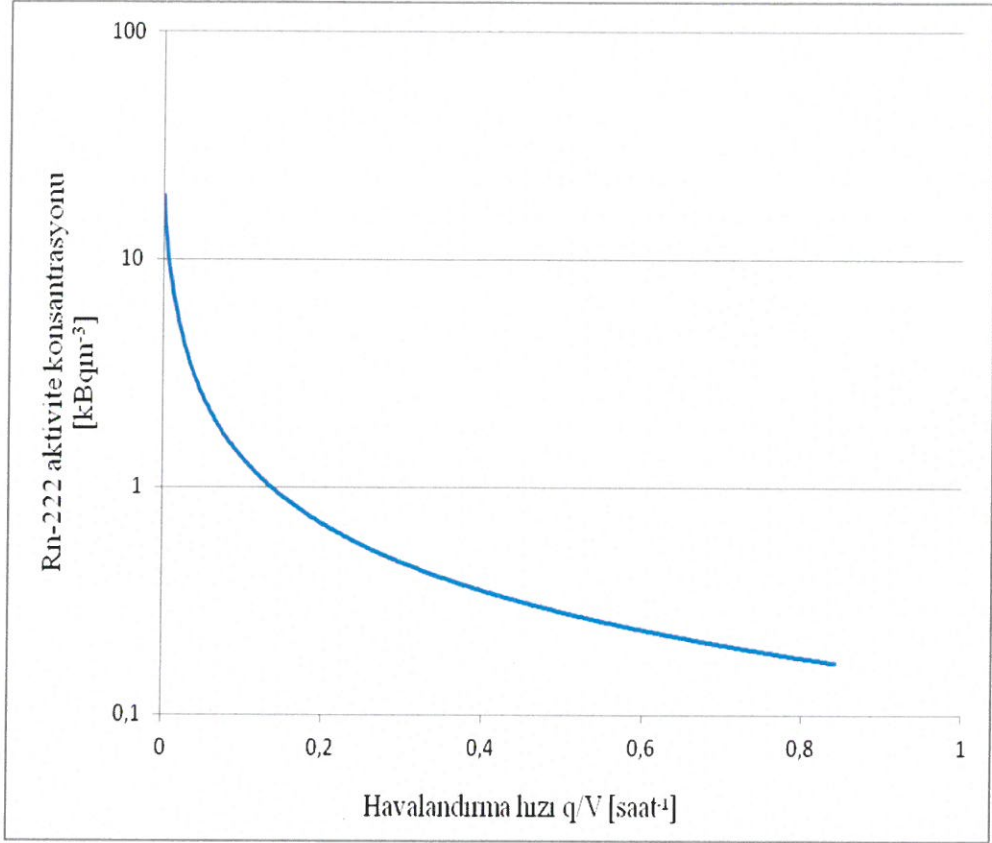
Bu durum radon kaynağı ve mahzendeki havalandırma hızının her ikisinde uzun bir zaman süresince sabit olduğu durumda meydana gelir.

Buna göre mahzendeki aktivite konsantrasyon değerini hesaplamak için yukarıdaki Denklem (2.23) yeniden gruplandırılarak;

$$C = \frac{j_D \frac{A}{V} + vC_0}{(\lambda + v)} \quad (2.24)$$

formülü elde edilir.

Denklem (2.24), radon aktivite konsantrasyonunun doğal havalandırmaya bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Aşağıdaki sayısal veriler kullanılarak çözülen Denklem (2.24)'un sonucu Şekil 2.29'da gösterilmiştir.



Şekil 2.29.  $^{222}\text{Rn}$  aktivite konsantrasyonunun, sabit parametreler kullanılarak hesaplanan havalandırma hızına bağlı değişimi ( $j_D = 10 \text{ mBq.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $A = 200 \text{ m}^2$ ,  $V = 50 \text{ m}^3$  ve  $C_0 = 10 \text{ Bq.m}^{-3} \cong 0 \text{ Bq.m}^{-3}$ )

Ölçülen şarap mahzenlerindeki radon aktivite konsantrasyon değerleri birkaç  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$  bulunmuştur. Bunun anlamı belirli mahzenlerdeki havalandırma hızı  $0,03$  ile  $0,30 \text{ [saat]}^{-1}$  arasındadır. Dolayısıyla mahzen içindeki tüm hava  $3,3$  saat ile  $33,3$  saat arasında tamamen yer değiştirir [22].

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA

ERASMUS (LLLP) kapsamında Macar Bilimler Akademisi Nükleer Araştırma Enstitüsü (ATOMKI) de yapılan çalışma kapsamında kapalı alanlarda Radon ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla Macaristan'ın Sátoraljaújhely şehrinde bir şarap mahzeninde ölçümler ve analizleri yapıldı.

Mahzen ortamındaki radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) için aktivite konsantrasyonu  $2025 \pm 105 \text{ Bq.m}^{-3}$  ile  $3140 \pm 150 \text{ Bq.m}^{-3}$  arasında, toron ( $^{220}\text{Rn}$ ) için aktivite konsantrasyonu ise  $>70 \pm 70 \text{ Bq.m}^{-3}$  ile  $1185 \pm 160 \text{ Bq.m}^{-3}$  arasında değerler bulundu. Sonuçlar radon seviyesinin izin verilen limit ( $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$ ) değerini aştığını göstermiştir. Tablo 3.1'de radon aktivite konsantrasyon değerleri ve standart hataları, Tablo 3.2'de ise toron aktivite konsantrasyon değerleri ve standart hataları verilmiştir.

Tablo 3.1. Radon aktivite konsantrasyonu

Dedektör	Rn-222 aktivite konsantrasyonu [Bq.m <sup>-3</sup> ]	
	Değer	Hata
R 1	3140	150
R 2	2130	110
R 3	2055	105
*R 4	2110	110
R 5	2025	105
R 6	2140	110
R 7	2125	110
*R 8	2110	110
*R 9	2110	110
*R 10	2110	110
*R 11	2110	110
*R 12	2110	110
*R 13	2110	110
*R 14	2110	110
R 15	2185	110

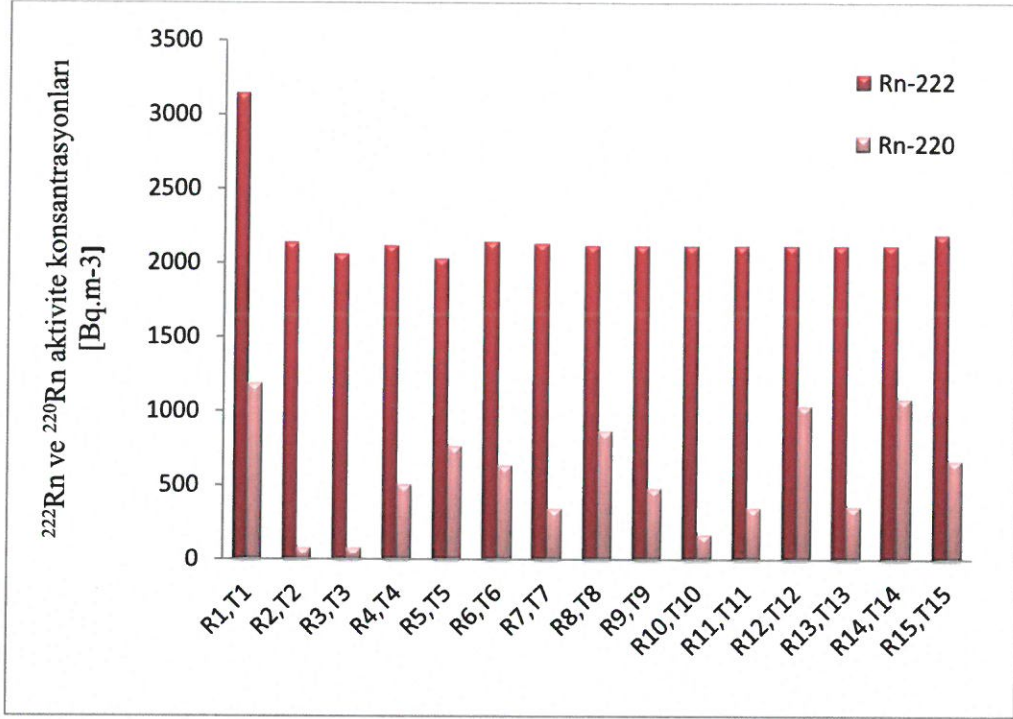
\* Aritmetik ortalama değer kullanılan dedektörler

Tablo 3.2. Toron aktivite konsantrasyonu

Dedektör	Rn-220 aktivite konsantrasyonu [Bq.m <sup>-3</sup> ]	
	Değer	Hata
T 1	1185	160
T 2	< 75	75
T 3	< 70	70
T 4	500	95
T 5	760	110
T6	630	105
T7	335	85
T 8	860	120
T 9	470	95
T 10	165	80
T 11	345	85
T 12	1030	140
T 13	350	85
T 14	1080	140
T 15	660	110

Kazıma iz dedektörü kullanılarak elde edilen verilerden yararlanarak bulunan mahzen içindeki radon (<sup>222</sup>Rn) ve toron (<sup>220</sup>Rn) aktivite konsantrasyon dağılımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Mahzenin en uç kısmındaki aktivite konsantrasyonu (R1,T1) düşük hava sirkülasyonu sonucu yüksek değer gösterdi. Mahzenin zemin kısmında, radon (<sup>222</sup>Rn) aktivite konsantrasyon değerleri birbirine yakın çıkmış, toron (<sup>220</sup>Rn) aktivite konsantrasyon değerleri ise değişiklikler göstermiştir.



Şekil 3.1. Mahzendeki Rn-222 ve Rn-220 Aktivite Konsantrasyonları (düşey eksen: <sup>222</sup>Rn ve <sup>220</sup>Rn Aktivite Konsantrasyonları [Bq.m<sup>-3</sup>], yatay eksen: dedektör numaraları)

Radonun yeraltı madenleri, konutlar ve şarap mahzenleri gibi özel işyerlerinde çalışanlar için akciğer kanseri olma riskini arttırdığı bilinmektedir: radonun çalışma ortamlarını kirletmesi, sağlığa olan etkileri ve bu etkilerin en aza indirilmesi konusunda dünya çapında birçok çalışma yapılmaktadır. Fakat ülkemizde çalışma ortamlarında radon ölçümleri sistematik ve ciddi bir şekilde henüz yapılmamıştır.

Bir sonraki yapılacak çalışma olarak ülkemizde kömür ocaklarında ve maden ocaklarında benzer çalışmaların yapılması, çalışanların maruz kaldığı değerlerin belirlenmesi önerilebilir. Ülkemizde radon ve tehlikeleri konusunda daha detaylı bilgi sağlanması, çözüm üretilebilmesi ve toplumun bu konuda bilinçlendirilmesi açısından üniversitelerin ve sağlık kuruluşlarının bu konuda yapacağı araştırmaların desteklenmesi gerekmektedir.

Bu tez ile başlatılan çalışma devamında Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi (BAP) kapsamında “Yaşayan ve Yaşatan Kocaeli için Çevre Durum Analizi” başlıklı proje ile bölgemizde Radon ölçümlerine devam edilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Environmental Protection Agency, Radon Reference Manual, *Office of Radiation Programs Washington DC*, EPA 520/1-87-20, 9, 1987.
- [2] Keith S., Doyle J., Toxicological profile for radon, *Agency for Toxic Substances and Disease Registry U.S. Public Health Service*, TP/90-01, 57-61, 1990.
- [3] Boschi N., A risk management strategy from radon: the US experience, *Radiation Protection Dosimetry*, 1998, **78**, 6.
- [4] Szerbin P., Vaupotic J., Csige I., Kobal I., Hunyadi I., Baradacs E., Radioactivity in wine cellars in Hungary and Slovenia, *Proceedings of the International Symposium on Radiation Environment*, Dresden, Germany, 10-14 March 2003.
- [5] Szerbin P., Vaupotic J., Csige I., Kobal I., Hunyadi I., Juhász L., Baradács E., Radioactivity in vine cellars in Hungary and Slovenia, *International Congress Series 1276*, DOI:10.1016/j.ics.2004.12.063.
- [6] Gyórfi T., Hunyadi I., Csige I., Radon a hajósi borpincékben. *IV. Hungarian Radon Forum*, Veszprém, Hungary, 5 April 2007.
- [7] Csige I., Radon and space radiation measurements. Ph.D. Dissertation, Lajos Kossuth University, Debrecen, 1997.
- [8] Hakl J., Application of radon-222, as a natural tracer in environmental studies, Ph.D. Thesis, Lajos Kossuth University, Debrecen, 1997.
- [9] Ahamed M. H., Investigation of indoor radon concentration in block houses in Omderman, M.Sc. Thesis, Sudan Academy of Science, University of Khartoum, Khartoum, 2010.
- [10] European Commission, Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, Radiation protection 112, EC, 1999.
- [11] Biological Effects of Ionizing Radiation, the Health Effects of Exposure to Indoor Radon, The National Academy of Science (NAS- USA), 1999.
- [12] Boice J. D. J., Lubin J. H., Occupational and environmental radiation and cancer, *Cancer Causes Control*, 1997, **8**, 309.
- [13] Arvela H., Reisbacka H., Residential indoor radon mitigation, *Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK)*, 2008, **STUK-A229**, 132.

- [14] Tirmarche M., Harrison J. D., Laurier D., Paquet F., Blanchardon E., Marsh J.W., Lung Cancer Risk from Radon and Progeny, *ICRP Publication 115*, DOI: 10.1016/j.icrp.2011.08.011.
- [15] Nikezic D., Yu K. N., Formation and growth of tracks in nuclear track materials, *Materials Science and Engineering*, 46, 51-123, 2004.
- [16] Durrani S. A., Bull R. K., *Solid State Nuclear Track Detection: Principles, Methods and Applications*, Pergamon Press, Oxford, 52-54, 1987.
- [17] Swakon J., Kozak K., Paszkowski M., Gradzinski R., Łoskiewicz J., Mazur J., Janik M., Bogacz J., Horwacik T., Olko P., Radon concentration in soil gas around local disjunctive tectonic zones in the Krakow area, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, 78, 137-149.
- [18] Eissa M. F., Chemical etching phases of irradiated CR-39 track detector by positron annihilation doppler broadening spectroscopy, *International Journal of Polymeric Materials*, 2007, 57, 288-293.
- [19] Sextro R. G., Moed B. A., Nazaroff W. W., Rezvan K. L., Nero A. V., Investigations of Soil as a Source of Indoor Radon: Radon and its Origins, *American Chemical Society*, ISBN 0-8412-1015-2, 10-29, 1987.
- [20] Speelman W., Modeling and Measurement of Radon Diffusion Through Soil for Application On Mine Tailings Dams, Master of Science full thesis, University of the Western Cape, Department of Physics, Cape Town, 2004.
- [21] Gervino G., Bonetti R., Cigolini C., Marino C., Prati P., Pruiti L., Radon monitoring: comparing drawbacks and performances of charcoal canisters, alpha-track and E-PERM detectors, *Elsevier*, DOI: 10.1016/j.nima.2003.11.054.
- [22] Bíborka, B.E., Csige I., Radon and thoron in wine cellars in Tokaj-Hegyalja, *VI. Hungarian Radon Forum, Veszprém, Hungary*, 16-17 May 2011.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Özkan N., Güray R. T., Durkaya B., **Yıldız A.**, Tan W., Aprahaminian A., Battaglia A., Bucher B., Deboer R., Calderon S., Görres J., Kontos A., Li Q., Wiescher M., Greene J.,  $^{164}\text{Er}(p,\gamma)^{165}\text{Tm}$  cross section measurements related to the astrophysical p-process, *Turkish Physical Society 29<sup>th</sup> International Physics Congress*, Bodrum, Turkey, 5-8 September 2012.
- [2] Durkaya B., Özkan N., Güray R. T., **Yıldız A.**, Tan W., Aprahaminian A., Battaglia A., Bucher B., Deboer R., Calderon S., Görres J., Kontos A., Li Q., Wiescher M., Greene J., Cross section measurements related to the p-process nucleosynthesis for proton-induced reactions on  $^{164}\text{Er}$  isotope, *Open Problems and Future Directions in Heavy Element Nucleosynthesis Workshop*, Debrecen, 10-12 April 2013.
- [3] Özkan N., Güray R. T., Durkaya B., **Yıldız A.**, Tan W., Aprahaminian A., Battaglia A., Bucher B., Deboer R., Calderon S., Görres J., Kontos A., Li Q., Wiescher M., Greene J.,  $^{164}\text{Er}(p,\gamma)^{165}\text{Tm}$  cross section measurements related to the astrophysical p-process, *Balkan Physics Letter*, 2013, **21**, 206-214.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1988 yılında Malatya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2006 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fizik Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansını yapmaya başladı. Abdulkadir YILDIZ halen Fizik Yüksek Lisans programında öğrenimini sürdürmektedir.