

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BERGAMA KOZAK GRANİT ALANINDA KAPALI
ORTAMLARDA RADON AKTİVİTE
KONSANTRASYONUNUN ALFA İZ DEDEKTÖRLERİ
İLE SAPTANMASI

İpek EMEN

Nisan, 2010

İZMİR

**BERGAMA KOZAK GRANİT ALANINDA KAPALI
ORTAMLARDA RADON AKTİVİTE
KONSANTRASYONUNUN ALFA İZ DEDEKTÖRLERİ
İLE SAPTANMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Bölümü

İpek EMEN

Nisan, 2010

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

İPEK EMEN, tarafından **YARD.DOÇ.DR.ÖZLEM KARADENİZ** yönetiminde hazırlanan “**BERGAMA KOZAK GRANİT ALANINDA KAPALI ORTAMLARDA RADON AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN ALFA İZ DEDEKTÖRLERİ İLE SAPTANMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş,kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Yard.Doç.Dr.Özlem KARADENİZ

Yönetici

.....
Prof.Dr.Günseli YAPRAK

Jüri Üyesi

.....
Prof.Dr.Hamza POLAT

Jüri Üyesi

.....
Yard.Doç.Dr.Muhittin AYGÜN

Jüri Üyesi

.....
Yard.Doç.Dr.Hasan KARABIYIK

Jüri Üyesi

Prof.Dr.Mustafa SABUNCU
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince, kıymetli bilgi ve önerileri ile katkıda bulunan, çalıőmalarımı yűnlendiren ve tezimin her aőamasında bűyűk desteęini gűrdűęűm tez danıőmanlarım Sayın Yard.Doç.Dr. Őzlem KARADENİZ ve Sayın Prof. Dr. Gűnseli YAPRAK' a, en derin teőekkűrlerimi sunarım. Ayrıca her tűrlű çalıőma olanaęı saęlayan Fizik Bűlűm Baőkanımız Sayın Prof. Dr. Kemal KOCABAŐ' a teőekkűr ederim. Çalıőmalarımnda bilgi ve gűrűőlerinden yararlandıęım, arazi çalıőmalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Yard.Doç.Dr. Cűneyt AKAL' a teőekkűr ederim.

Őrneklerin hazırlanması, űlűlmesi ve tezin yazılması aőamasında, benimle birlikte bűyűk bir titizlik ve űzveri ile çalıőan sevgili arkadaşlarım Gűl ŐİMŐEK, Onur BűYŪKOK, Sadi Deniz KAYHAN ve Didem DELİPINAR'a can-ı gűnűlden teőekkűrlerimi sunarım. Ayrıca arazi çalıőmalarımızda desteęini esirgemeyen arkadaşım Yięit NALBANT'a sonsuz teőekkűr ediyorum.

İpek EMEN

**BERGAMA KOZAK GRANİT ALANINDA KAPALI ORTAMLARDA
RADON AKTİVİTE KONSANTRASYONUNUN ALFA İZ
DEDEKTÖRLERİ İLE SAPTANMASI**

ÖZ

Sunulan çalışmada Bergama-Kozak granit alanında kapalı ortam radon aktivite konsantrasyonlarının ölçülmesi ve radyolojik risk açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu anlamda, LR-115 tipi Katı-Hal Nükleer İz Dedektörler bina içlerine asılmış, 1 ay süre ile bekletilmiştir. İz dedektörleri 60 °C sıcaklıkta %10 (2,5 N) NaOH çözeltisinde 120 dakika boyunca banyo edilmiş ve gözlenen mikroskopik iz yoğunluklarından radon aktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır. Çalışılan granit alanında ölçülen bina içi radon konsantrasyonları 25 – 236 Bq m⁻³ aralığında değişmektedir. Kapalı ortamlardaki radondan kaynaklanan etkin doz eşdeğerleri 0.64 ile 5.96 mSv y⁻¹ aralığında saptanmıştır. Çalışmada elde edilen kapalı ortam radon konsantrasyonları ICRP ve USEPA limitleri ile karşılaştırıldığında (200 ve 148 Bq m⁻³), binaların çoğunun güvenli sınırlar içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Granit Alan, Radon, Nükleer İz Dedektörleri, Etkin Doz

**DETERMINATION OF RADON ACTIVITY CONCENTRATIONS IN
DWELLINGS BY ALPHA TRACK DETECTORS IN BERGAMA KOZAK
GRANITE AREA**

ABSTRACT

The present study is aimed measurement of indoor radon activity concentrations of the Kozak-Bergama granite area and assessment from radiological risk perspective. In this context, LR-115 type Solid State Nuclear Track Detectors were installed in dwellings and they were kept for 1 month. The LR-115 detectors were etched for 120 minute in %10 (2,5 N) NaOH at 60 °C and were related to radon activity concentrations were estimated from the observed microscopic track densities. Measured indoor radon concentrations in the studied area ranged from 25 to 236 Bq m⁻³. Annual effective dose equivalent due to indoor radon was determined in the range of 0.64 - 5.96 mSv y⁻¹. Comparing the current indoor radon results with those of the ICRP and USEPA (i.e. 200 and 148 Bq m⁻³) limits, majority of the houses surveyed in the present study are within the safe limits.

Keyword: Granite Area, Radon, Nuclear Track Detectors, Effective Dose.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR-GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ-GENEL BİLGİLER.....	3
2.1.Doğal Radyasyon	3
2.1.1 Karasal Orijinli Doğal Radyasyon	4
2.1.2 Karasal Gama Radyasyonuna İçsel Maruz Kalma ve Radon.....	9
2.2 Karasal Radyasyondan Kaynaklanan Etkin Doz Eşdeğerler	10
2.3 Dünya Üzerinde Yüksek Seviyeli Doğal Radyasyon Alanları	12
2.4 Radon	15
2.4.1 Radon-222 oluşumu ve bozunma ürünleri	15
2.4.2 Radon, thoron ve ürünleri için spesifik nicelikler	16
2.4.2.1 Potansiyel alfa enerjisi.....	18
2.4.2.2 Havadaki konsantrasyon.....	18
2.4.2.3 Eşdeğer denge konsantrasyonu, denge faktörü.....	19
2.4.2.4 Soluk alma yoluyla bireysel maruz kalma.....	21
2.5 Radon Ölçüm Teknikleri.....	22
2.6 Katı Hal İz Kazıma Dedektörleri	22
2.6.1 Katı Hal İz Kazıma Dedektörlerinin Temel Prensipleri.....	22
2.6.2 Katı Hal İz Kazıma Dedektörlerinin İşlenmesi	28
BÖLÜM ÜÇ-MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1 Çalışma Alanı ve Genel Jeolojik Yapısı	30

3.1.1 Kozak Plutonunun Yeri ve Konumu	30
3.1.2 Kozak Granitoidi	32
3.1.3 Bergama Volkanikleri	35
3.2 Bina İçi Radon Ölçümleri	35
3.2.1 LR-115 Plastik Detektörlerin Hazırlanması	35
3.2.2 Radon Ölçüm İstasyonlarının Oluşturulması	36
3.2.3 LR-115 Plastik Detektörlerin İşlenmesi ve İz Yoğunluğunun Ölçümü	39
BÖLÜM DÖRT-DENEYSEL BULGU VE TARTIŞMALAR	41
4.1 Bina İçi ²²² Rn Aktivite Konsantrasyonları ve Dağılımları.....	41
4.2 Bina İçi Radona Maruz Kalma Sonucunda Alınan Etkin Dozlar	44
BÖLÜM BEŞ-SONUÇ VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	47

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Radon ve kısa yarı ömürlü bozunum ürünleri, akciğerlerin aldıkları doza önemli katkısı nedeni ile radyasyon güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Doğal radyasyon kaynaklarından insanların aldıkları toplam etkin dozun yaklaşık yarısını, radon ve alfa yayımlayıcı bozunum ürünlerinin solunması oluşturmaktadır ve radon gazının solunması ile maruz kalınan içsel doz eşdeğeri 1.15 mSvy^{-1} olarak tahmin edilmektedir.

Doğal uranyum serisinde, ^{226}Ra 'nın bozunumu sonucu oluşan ^{222}Rn , dünya yüzeyindeki bütün karasal kayalarda iz miktarda (1-4 ppm) bulunan ^{238}U 'in ara bozunum ürünüdür ve kaya katmanları arasında devamlı üretilmektedir. Yarı ömrü 3.85 gün olan radon, uranyum serisindeki tek radyoaktif gazdır ve kimyasal asal gaz ailesinin (helyum, neon, argon ve ksenon) en ağır üyesidir. Yerkabuğundan atmosfere radon akısı genellikle küçüktür (yaklaşık $10^{-6} \text{ Bq s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) ve atmosfere karışarak seyreden bu radon akısının bina dışı ortamda oluşturduğu tipik aktivite konsantrasyonları $3.7\text{-}37 \text{ Bq m}^{-3}$ aralığında değişmektedir. Ancak, tünel, mağara vb. kapalı alanlarda bu konsantrasyonun birkaç bin Bq m^{-3} e ulaştığı gözlenmiştir. ICRP-65 Raporunda evlerde; $200\text{-}600 \text{ Bq m}^{-3}$ ve çalışma ortamlarında (madenlerde ve benzeri kapalı ortamlarda); $500\text{-}1500 \text{ Bq m}^{-3}$ kontrol seviyesi olarak ele alınmakta ve bunun üzerindeki konsantrasyonların radyolojik açıdan risk taşıdığı öne sürülmektedir.

Kapalı ortamlarda radyo-korunum açısından büyük öneme sahip olan radon, fay hatlarında, jeotermal kaynaklarda, gömülü uranyum yataklarında, volkanik patlamalarda ve deprem önsezişinde jeokimyasal izleyici olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dozimetrik amaçlar için havada, jeofiziksel amaçlar için toprak gazında ve yeraltı sularında ölçülen radon ve ürünleri konsantrasyonları, meteorolojik değişkenlere açıktır ve yanı sıra diğer çevresel faktörlerden

etkilenmektedir. Bu nedenle, her iki ortamda ölçülen radon konsantrasyonlarındaki geçici değişimlerin tanımlanması için zamana ve konuma bağlı faktörlerin incelenmesi gerekmektedir.

Prensip olarak radon aktivite konsantrasyonları alfa radyasyonuna duyarlı herhangi bir detektör ile ölçülebilir olmasına rağmen, günümüzde bu amaç için yaygın şekilde uzun süreli entegre (hafta/ay) radon ölçümlere izin veren katı-hal nükleer iz detektörleri (SSNTDs) kullanılmaktadır. Bu pasif detektörlerin basit ve ucuz olmaları, elektronik ekipmana gereksinim duymamaları, uzun süreli entegre radon ölçümlerine izin vererek meteorolojik olarak indüklenen hızlı dalgalanmaları ortadan kaldırmaları ve nispeten çevresel faktörlerden etkilenmemeleri gibi avantajları, dozimetrik ve jeofiziksel amaçlı kantitatif radon tayininde bu tekniği tercih edilir yapmıştır (Yaprak, 2010).

Sunulan çalışmada, Bergama-Kozak Granit alanında kapalı ortam radon aktivite konsantrasyon düzeyleri LR-115 katı-hal nükleer iz dedektörleri ile saptanmış ve sonuçlar radyolojik açıdan değerlendirilmiştir.

BÖLÜM İKİ

GENEL BİLGİLER

2.1 Doğal Radyasyon

Doğal radyasyona maruz kalmanın iki temel bileşeni vardır; bunlardan ilki solunan havadaki radon gazı ve vücuda alınan doğal radyonüklitlerin neden olduğu içsel maruz kalma, diğeri ise kozmik ışınlar, kozmojenik radyonüklitler ve karasal radyasyonun (yer kabuğunda, bina materyalinde, havada) neden olduğu dışsal maruz kalmadır (UNSCEAR, 1982; 1988; Yaprak, 2009). Tablo 2.1’de doğal radyasyona içsel ve dışsal maruz kalma ile kişi başına tahmin edilen yıllık ortalama etkin doz eşdeğerleri verilmiştir.

Tablo2.1 Doğal radyasyona maruz kalma etkin doz eşdeğerleri (UNSCEAR 2000).

Doğal Radyasyon Kaynakları	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (mSv)		
	Ortalama*	Tipik Aralık	Toplam
Kozmik ışınlar			
İyonizasyon bileşeni	0,28 (0,30)		
Nötron bileşeni	0,10 (0,08)		
Kozmojenik radyonüklitler	0,01 (0,01)	0,3-1,0	
			0,39
Karasal Radyasyona Dışsal Maruz Kalma			
Bina dışı	0,07 (0,07)		
Bina içi	0,41 (0,39)	0,3-0,6	
			0,48
Karasal Radyasyona İçsel Maruz Kalma (Soluma)			
²³⁸ U ve ²³² Th serileri	0,006 (0,01)		
²²² Rn (radon)	1,15 (1,2)		
²²⁰ Rn (toron)	0,10 (0,07)	0,2-10	
			1,26
Karasal Radyasyona İçsel Maruz Kalma (Diyet)			
⁴⁰ K	0,17 (0,17)		
²³⁸ U ve ²³² Th serileri	0,12 (0,06)	0,2-0,8	
			0,29
Toplam	2,4	1-10	

* Parantez içindeki değerler önceki UNSCEAR tahminleridir.

Dünya nüfusu tarafından alınan ortalama doza en büyük katkı karasal ve kozmik orijinli radyasyondan gelmektedir ve doğal kaynaklardan alınan yıllık ortalama etkin doz eşdeğeri 2,4 mSv olarak tahmin edilmektedir (UNSCEAR 1988)

2.1.1 Karasal Orijinli Doğal Radyasyon

Karasal orijinli doğal radyasyon, yer kabuğunda bulunan ve dünyanın başlangıcından beri ($4,5 \times 10^9$ yıl) var olan primordial radyonüklitlerden kaynaklanmaktadır. Radyolojik risk açısından en önemli primordial radyonüklitler; ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th ve her iki doğal radyoaktif serinin bozunum ürünleridir. Rb-87 ve ^{235}U ikinci derecede önemli primordial radyonüklitler olup, bunların insanların aldığı doza katkısı ihmal edilebilecek kadar azdır (Yaprak, 2009). Doğal kaynaklardan alınan yıllık ortalama etkin dozun (2,4 mSv) büyük bir kısmını ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinden alınan içsel ve dışsal doz oluşturmaktadır (Tablo 2.1).

Karasal gama radyasyonuna bina dışı ve bina içi ortamda dışsal maruz kalma sonucu tahmin edilen yıllık etkin doz eşdeğeri 480 mSv' dir (UNSCEAR 2000). İçsel maruz kalmanın en büyük kaynağı ise radon gazının solunmasıdır (UNSCEAR 2000). Tablo 2.1'de görüleceği üzere radon gazının solunması ile içsel maruz kalma sonucu alınan doz, yıllık ortalama etkin dozun yaklaşık yarısıdır (1,15 mSv).

Açık alanlarda insanlar, yüzey topraklarındaki (veya yüzeyi örten diğer tabakalar) radyoaktiviteye dayalı olarak karasal radyasyona maruz kalmaktadır ve bu doğrultuda, dışsal gama doz hızı yüzey topraklarının doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ölçülerek hesaplanmaktadır (UNSCEAR, 1993).

UNSCEAR 1988 Raporunda, normal alanlarda ^{238}U ve ^{232}Th 'nin topraklardaki ortalama konsantrasyonları 25 Bq kg^{-1} ve ^{40}K 'un 370 Bq kg^{-1} alınarak, nüfus ağırlıklı ortalama karasal gama doz hızı 55 nGy h^{-1} olarak hesaplanmıştır. UNSCEAR 1993 Raporunda bu değer 57 nGy h^{-1} olarak verilmekte ve normal alanlarda ^{238}U ve ^{232}Th 'nin topraklardaki ortalama konsantrasyonlarının 40 Bq kg^{-1} alınması önerilmektedir.

Tablo 2.2’de yüzey topraklarında gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ve bina dışı ortamda dışsal maruz kalma sonucu tahmin edilen doz hızlarına ilişkin dünya ortalamaları verilmiştir. Bu çizelge, son 20 yılda dünyanın birçok ülkesinde gerçekleştirilen ve dünya nüfusunun %70’ini kapsayan ölçüm sonuçlarına dayalı olarak UNSCEAR 2000 Raporundan derlenmiştir (Yaprak, 2009).

Tablo 2.2 Bina dışı ortamda karasal gama radyasyonuna dışsal maruz kalma (UNSCEAR 2000)

Radyonüklit	Topraklarda Ortalama Radyonüklit Aktivite Konsantrasyonu $\underline{a}/(\text{Bqkg}^{-1})$	Doz Dönüşüm Katsayıları $\underline{b}/(\text{nGyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1})$ (yaş ağırlık)	Havada Absorbe Edilen Gama Doz Hızları $\underline{a}/(\text{nGyh}^{-1})$
⁴⁰ K	400(420)	0,0417 (0.0414)	17(18)
²³⁸ U serisi	35 (33)	0,462 (0.461)	16(15)
²³² Th serisi	30(45)	0,604 (0.623)	18(27)
Toplam	$D(\text{nGyh}^{-1}) = 0,0417A_K + 0,462 A_{Ra} + 0,604 A_{Th}$		51 (60)

- \underline{a} / nüfus ağırlıklı ortalamalar parantez içinde verilmiştir.
- \underline{b} / UNSCEAR 1993 Doz Dönüşüm Katsayıları
- Gama doz hızlarının hesaplanmasında, ²³⁸U ve ²³²Th tüm bozunum ürünleri ile dengede, toprak yoğunluğu 1.6g/cm³ ve toprak nem faktörünün 0,81 (kuru ağırlık/yaş ağırlık) varsayımı yapılmıştır.

Tablo 2.2’den görüleceği üzere, UNSCEAR 2000 raporunda, bina dışı ortamda karasal gama radyasyonuna dışsal maruz kalma için nüfus ağırlıklı ortalama doz hızı, 60 nGy h⁻¹ olarak rapor edilmektedir. Ayrıca bu raporda, karasal gama radyasyonundan kaynaklanan doz hızlarının normal alanlarda 10-200 nGy h⁻¹ arasında değiştiği bildirilmektedir.

Dünya üzerinde normal alanların aksine, yüksek doğal radyasyon içeren alanlar oldukça sınırlıdır ve bu bölgeler, toryum ve uranyum içeren materyallerle birlikte bulunmaktadır. Toryumca zengin *monozit* içeren mineral kuşak bunun en önemli örneğidir. Bu şekilde iyi bilinen iki alan; Kerala’da Arap Denizi sahili ve Brezilya’da Espirito Santo sahilidir. Bu sahillerde karasal gama doz hızlarının 100- 4000 nGy h⁻¹

arasında değiştiği gözlenmiştir. İran'da Ramsar ve Mahallatta termal sularda yüksek ^{226}Ra aktivite konsantrasyonu nedeni ile bu değer 30000 nGyh^{-1} 'e çıkmaktadır. Ayrıca, birçok granit alanının normal alanların çok üzerinde gama doz hızı ürettiği gözlenmiştir (UNSCEAR, 1993; Yaprak 2009).

Binalar dışarıdan gelen kozmik ve karasal orijinli radyasyona karşı koruyucu etkiye sahip olmalarına rağmen, bina malzemelerindeki radyonüklit içeriğine bağlı olarak bina içi radyoaktivite bina dışındaki değere göre daha fazla olabilmektedir. Tablo 2.3'de karasal gama radyasyonuna bina içi ve bina dışı ortamda dışsal maruz kalma sonucu tahmin edilen ortalama doz hızları ve doz oranları verilmiştir (UNSCEAR, 1988; 1993; 2000; Yaprak 2009).

Tablo 2.3 Bina dışı ve bina içi ortamda dışsal gama doz hızları

UNSCEAR	Soğurulan Doz Hızı (nGyh^{-1})					
	Bina Dışı Ortam		Bina İçi Ortam		Bina İçi Doz Bina Dışı Doz	
	*Ortalama	Tipik Aralık	Ortalama	Tipik Aralık	Ortalama	Tipik Aralık
1988	55		70		1.3	
1993	57	24- 160	80	20-190	1.4	0,8-2,0
2000	60	10-200	84	20-200	1.4	0,6-2,3

*Nüfus ağırlıklı ortalamalar verilmiştir.

Tablo 2.3 incelendiğinde bina içi doz / bina dışı doz oranının 1.4 ortalama ile 0,6-2,3 arasında değiştiği gözlenmektedir. UNSCEAR 2000 Raporunda, dünya nüfusunun %45'ini temsil eden verilere dayalı olarak, bina içi ortamda nüfus ağırlıklı dışsal gama doz hızı ortalaması 84 nGy h^{-1} olarak tahmin edilmekte ve ülke ortalamalarının 20-200 nGy h^{-1} arasında değiştiği bildirilmektedir. Karasal gama radyasyonundan kaynaklanan doz hızının bina dışı ortamda 60 nGyh^{-1} olarak verildiği bu rapora göre, bina içi ortamda dışsal gama doz hızının % 40 daha fazla olduğu görölmektedir (Yaprak, 2009).

Bina materyalleri, üretildikleri bölgenin jeolojik yapısını yansıtırlar ve genelde ham maddeden yapıldıkları için radyoaktif atık ve ürün içermezler. Ancak, bina yapımında kullanılan granit gibi magmatik kökenli doğal taşların, uranyum içeren kil taşlarının (alumshale) ve endüstri kökenli bazı malzemelerin (fosfatlı jips ve kömür külü), bina içi maruz kalmayı hızlı şekilde arttırdığı bilinmektedir (UNSCEAR, 1993). Tablo 2.4’de farklı bina materyallerinde gözlenen doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonları ve bu materyallerin bina içi ortamda oluşturacakları dışsal gama doz hızları, aktivite indeksleri ve materyal kullanım oranları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 2.4 Bina materyali ve bina içi ortamda dışsal maruz kalma (UNSCEAR,1993).

Materyal	Radyonüklit Aktivitesi (Bqkg ⁻¹)			Aktivite İndeksi (I)	Doz Hızı nGyh ⁻¹		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K		w _m		
					1	½	¼
Tipik bina materyali	50	50	500	1,0	80	40	20
Granit blok	90	80	1200	1,9	140	70	35
Kömür külü içeren malzeme	150	150	400	2,4	180	90	45
Kil taşı (alumshale) tuğla	1300	67	770	9,0	680	390	170
Fosfatlı jips	600	20	60	3,9	290	145	70
Doğal jips	20	5	150	0,25	20	10	5

UNSCEAR 1993 Raporunda, tipik bina materyallerinde ortalama ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonları sırası ile; 50 Bqkg⁻¹, 50 Bqkg⁻¹ ve 500 Bqkg⁻¹ olarak verilmekte (Tablo 2.4) ve bina içi ortamda havadaki karasal kaynaklar nedeniyle maruz kalınan dışsal gama doz hızı 80 nGyh⁻¹ olarak tahmin edilmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu raporda, herhangi bir bina materyalinin bina içi ortamda oluşturacağı radyolojik risk, tipik bina materyalleri için önerilen ortalama doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonlarına ve materyalin bina içi kullanım yüzdesine “w_m” bağlı olarak Aktivite *İndeksi* (I) ile tanımlanmaktadır.

$$I = \left(\frac{C_{Ra}}{A_{Ra}} \cdot 0.461 + \frac{C_{Th}}{A_{Th}} \cdot 0.623 + \frac{C_K}{A_K} \cdot 0.0414 \right) w_m \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte; C_{Ra} , C_{Th} ve C_K : bina materyalinin doğal radyonüklit aktivite konsantrasyonu ($Bqkg^{-1}$), w_m : materyalin bina içi kullanım yüzdesi ve A_{Ra} :50 $Bqkg^{-1}$, A_{Th} :50 $Bqkg^{-1}$ ve A_K : 500 $Bqkg^{-1}$ 'dir.

Tipik bina materyali için **Aktivite İndeksi (I): 1** kabul edilmekte ve radyolojik risk açısından, bina materyalleri aktivite indeksinin $I \leq 1$ olması istenmektedir (UNSCEAR, 1993).

Bina materyallerinin spesifik aktivitelerini karşılaştırmak için tanımlanan bir diğer uluslararası ortak indeks, **Radyum Eşdeğer Aktivitesi Ra(eq)**'dir. Aşağıdaki eşitlik ile verilen **Ra(eq)** radyasyon zarar indeksi; 370 $Bqkg^{-1}$ ^{226}Ra , 259 $Bqkg^{-1}$ ^{232}Th ve 4810 $Bqkg^{-1}$ ^{40}K radyonüklitinin aynı miktarda gama dozu ürettiği varsayımına dayanmaktadır.

$$Ra(eq) = A_{Ra} + 1,43A_{Th} + 0,077A_K \quad (2.2)$$

Radyolojik risk açısından **Ra(eq)** aktivitesinin 370 $Bqkg^{-1}$ 'i geçmemesi istenmektedir (UNSCEAR, 1988). Benzer şekilde, bina materyallerinde ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K radyonüklitlerinden salınan gamalara bağlı dışsal maruz kalma, UNSCEAR 1982 Raporunda **Dış Zarar İndeksi (H_{ex})** ile tanımlanmakta ve aşağıdaki dozimetrik ilişkiyle verilmektedir.

$$H_{ex} = A_{Ra}/370 + A_{Th}/259 + A_K/4180 < 1,0 \quad (2.3)$$

Bu eşitliklerde, A_{Ra} , A_{Th} ve A_K ; sırası ile bina yapı malzemesinin içerdiği ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivite konsantrasyonlarıdır(Bq/kg). H_{ex} indeksinin <1 olması

durumunda bina içi ortamda maruz kalınan radyasyon dozunun yılda 1,5 mGy'i geçmeyeceği tahmin edilmektedir (UNSCEAR, 1982; Yaprak, 2009).

Sonuç olarak, bina içi ortamda radyolojik riskin değerlendirilmesine olanak tanıyan bu radyasyon zarar indeksleri, bina materyallerinde gözlenen radyoelement içeriklerine dayalı olarak hesaplanmaktadır.

2.1.2 Karasal Gama Radyasyonuna İçsel Maruz Kalma ve Radon

İnsan vücuduna diyet (yiyecek ve içecek) ve soluma ile alınan doğal radyonüklitler, içsel maruz kalmanın temel kaynağıdır. Radon dışında, ^{40}K , ^{238}U ve ^{232}Th serilerinin neden olduğu içsel maruz kalma UNSCEAR 2000 Raporunda 296 mSv (Tablo 2.1) olarak tahmin edilmektedir.

Karasal doğal radyasyona içsel maruz kalma sonucu alınan etkin doz eşdeğerinin yaklaşık %50'sini, ^{222}Rn ($t_{1/2} = 3,85$ gün) ve alfa yayımlayıcı bozunum ürünleri oluşturmaktadır. Tablo 1.1'de görüleceği üzere, radon gazının solunması ile maruz kalınan içsel doz eşdeğeri $1,15 \text{ mSv}^{-1}$ olarak, Toron ve ürünlerinin solunması ile akciğerlerin maruz kaldığı radyasyon etkin doz eşdeğeri $0,1 \text{ mSv}^{-1}$ olarak tahmin edilmektedir (UNSCEAR 2000).

Günümüzde ^{222}Rn ve ürünlerinin solunması dünya çapında bir problem ve belirgin bir kanser riski olarak tanımlanmaktadır (UNSCEAR, 1988). Bu doğrultuda, Ulusal ve Uluslararası Kuruluşlar tarafından kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonunu sınırlayan değerler belirlenmiş ve dünyanın değişik ülkelerinde geniş ölçekli sistematik çalışmalar başlatılmıştır (UNSCEAR, 1988). Bu çalışmaların derlendiği UNSCEAR Raporlarında (1988; 1993; 2000), radon konsantrasyonu dünya ortalaması bina içinde 40 Bqm^{-3} ve bina dışında 10 Bqm^{-3} olarak verilmektedir. Bu anlamda, insanların zamanlarının %80'ini geçirdiği bina içi

ortamda, bina dışına göre yüksek oranda radon konsantrasyonu gözlenmesi, radyum içeren bina yapı ve dekorasyon malzemelerine bağlanmaktadır. Bunun yanı sıra, yapının bağlı bulunduğu tabanın radon geçirgenliği, bina dışı havada bulunan radon konsantrasyonu seviyesi, musluk suyu ve havalandırma gibi koşulların bina içi radon konsantrasyonunu etkilediği bilinmektedir (UNSCEAR, 1993; Yaprak, 2009).

Radyasyon güvenliği açısından, bina içi radon konsantrasyonunun dışarıdaki kadar veya daha az olması önerilmektedir. Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları (IAEA-BSS) çerçevesinde, bina içi ortamda radon için tavsiye edilen konsantrasyon düzeyi 200-600 Bq/m³ dür. ICRP ve WHO ise gelecekteki binalar için bu değerın < 100 Bq/m³ olmasını önermektedir (Yaprak, 2009). Türkiye'de müsaade edilebilir radon konsantrasyonu TAEK tarafından 400 Bq/m³ olarak belirlenmiştir (www.taek.gov.tr).

Radon gazı ve kısa yarı ömürlü ürünlerinin solunmasına dayalı olarak, UNSCEAR 1982 Raporunda **İç Zarar İndeksi (H_{in})** tanımlanmıştır.

$$H_{in} = A_{Ra}/185 + A_{Th}/259 + A_K/4180 < 1,0 \quad (2.4)$$

Bu dozimetrik eşitlikte; A_{Ra}, A_{Th} ve A_K; sırası ile bina materyalinin Bqkg⁻¹ olarak içerdiği ²²⁶Ra, ²³²Th ve ⁴⁰K aktivite konsantrasyonlarıdır. Radyolojik risk açısından H_{in} radyasyon zarar indeksinin <1 olması durumunda bina içi ortamda maruz kalınan radyasyon dozunun yılda 1,5 mGy'i geçmeyeceği tahmin edilmektedir (UNSCEAR, 1982)

2.2 Karasal Radyasyondan Kaynaklanan Etkin Doz Eşdeğerleri

ICRP, WHO, ICRU, IRPA, IAEA, OECD-NEA gibi sağlık, radyo-korunum ve güvenliği alanında yetkili Uluslararası Organizasyonlar tarafından tavsiye edilen

radlyolojik verileri yayınlanan UNSCEAR Raporlarına, (1982; 1988; 1993; 2000) dayalı olarak Tablo-2.5 'de, bina içi ve bina dışı ortamda, karasal gama radyasyonuna dışsal ve içsel maruz kalma için doz dönüşüm faktörleri verilmiştir (Yaprak, 2009). Yıllık etkin doz eŐdeęerlerinin hesaplandığı dozimetrik bağıntılarda, insanların zamanlarının % 80'ini bina içi ortamda geçirdiği varsayımı yapılmıştır.

Tablo 2.5 Karasal gama radyasyonundan kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğerleri (UNSCEAR 2000)

Karasal Gama Radyasyonu ^a	Doz Dönüşüm Katsayısı: 0.7 SvGy ⁻¹	Yıllık Etkin Doz EŞdeğeri (DE) mSvy ⁻¹
	Dozimetrik İlişki	
Bina Dışı Ortam	60 nGyh ⁻¹ x 0,7SvGy ⁻¹ x 8760 saat/yıl x 0,2	0,07
Bina İçi Ortam	84nGyh ⁻¹ x 0,7SvGy ⁻¹ x 8760 saat/yıl x 0,8	0,41
Toplam		0,48
Radon ^b	Doz Dönüşüm Katsayısı: 9 nSv(hBqm ⁻³)	
	Dozimetrik İlişki	
Bina İçi Ortam ^c	40Bqm ⁻³ x 0,4x 7000saat x 9,0 nSvh ⁻¹ /Bqm ⁻³	1,0
Bina Dışı Ortam ^d	10Bqm ⁻³ x 0,6x 1700saat x 9,0 nSvh ⁻¹ /Bqm ⁻³	0,095
Toplam		1,095

^a çocuklar için bu değer %10 daha yüksektir.

^b Radon için verilen etkin doz eşdeğerleri, kanda çözünen radon ve sulardan alınan radon dozlarını kapsamamaktadır. Bu ilave dozların toplamı, UNSCEAR 2000'de 0,078mSv y⁻¹ verilmektedir.

^c Bina içi ortamda radon ve ürünleri arasındaki denge faktörü: 0,4 alınmıştır.

^d Bina dışı ortamda radon ve ürünleri arasındaki denge faktörü: 0,6 alınmıştır.

Radyasyondan korunma ve güvenliği alanında ICRP ve diğer Uluslararası KuruluŐların tavsiye ettiği limit değerler, mümkün olabilecek en az radyasyon dozuna maruz kalmayı ifade eden ALARA (*as low as reasonably achievable*) prensibi dikkate alınarak önerilmektedir.

Radyasyona maruz kalma sonucu oluşabilecek radyolojik risk, radyasyonun tipi ve enerjisi, radyasyon kaynağına içsel veya dışsal maruz kalma, radyasyonun insan vücudu içinde dağılımı ve radyasyona maruz kalma süresi değerlendirilerek tahmin edilmektedir. Bu doğrultuda, radyolojik risk tahmini için yaygın Şekilde kullanılan doz birimlerinin kısa tanımları aŐaęıda verilmiştir (Yaprak, 2009).

Absorbe Edilen Doz: Radyasyonla ışınlanan materyalin birim kütlesine aktarılan enerji olarak tanımlanır ve SI sistemindeki birimi Gray (1 joule/kg =1Gy)' dir.

Doz eşdeğeri: Belirli bir radyasyonun biyolojik sistem üzerindeki etkisi, absorbe edilen doz (Gy) ve kalite faktörüne (Q) bağlı olarak SI sisteminde Sievert (Sv) ile verilir. ICPR tarafından verilen kalite faktörü Q, her bir radyasyonun iyonizasyon oluşturma kapasitesidir ve lineer enerji transferi (LET) ile ifade edilir. X , γ ve β ışınları için Q=1, α ışınları için Q= 20 verilmektedir (UNSCEAR, 1988).

Etkin Doz Eşdeğeri: Radyasyona duyarlı organ ve dokular için ICRP tarafından belirlenen risk tahminlerine dayanarak (vücudun bütünü için) organ ağırlık faktörlerini de içeren etkin doz eşdeğeri birimi, SI birim sisteminde Sv olarak verilir. Etkin doz eşdeğer kavramı, radyasyon tipi, enerjisi ve biyolojik hasar arasındaki ilişkiyi tanımlayan dozimetrik niceliktir.

2.3 Dünya Üzerinde Yüksek Seviyeli Doğal Radyasyon Alanları

ICRP 60 Raporunda, müsaade edilebilir yıllık etkin doz eşdeğeri 5 mSvy^{-1} olarak verilmekte ve insanların doğal radyasyon kaynaklarından alacakları dozun 1 mSvy^{-1} 'i geçmemesi önerilmektedir (ICRP,1990). Genel olarak, insanların maruz kaldığı doğal radyasyon dozları değerlendirildiğinde, dünya coğrafyası ve jeolojik koşullarının normal dozlar ürettiği ve etkin doz eşdeğerinin, dünya nüfusunun %65'i için $1-3 \text{ mSvy}^{-1}$, %25'i için $< 1 \text{ mSvy}^{-1}$ ve %10'u için $\geq 3 \text{ mSvy}^{-1}$ olduğu gözlenmektedir (UNSCEAR 2000). Dünya nüfusunun %90'ının yıllık etkin doz eşdeğerinin $\leq 3 \text{ mSvy}^{-1}$ olduğu normal alanlarda yaşadığını ifade eden bu sonuç, radyolojik risk açısından, kalan %10 için yüksek doğal radyasyon alanları tanımının yapılmasını gerektirmektedir. UNSCEAR 1993 Raporu, kozmik ve karasal doğal radyasyondan kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğerlerini, normal ve yüksek doğal radyasyonlu alanlar için Tablo 2.6 ' da verildiği şekilde özetlemiştir.

Tablo 2.6 Normal ve yüksek doğal radyasyonlu alanlar için yıllık etkin doz eşdeğerleri (UNSCEAR 1993; Yaprak, 2009).

<i>Doğal Radyasyon</i>	<i>Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (mSv)</i>	
	<i>Normal Alanlar</i>	<i>Yüksek Radyasyonlu Alanlar</i>
<i>Dışsal Maruz Kalma</i>		
<i>Kozmik ışınlar</i>	0.38	2.01
<i>Karasal Radyasyon</i>	0.46	4.3
<i>İçsel Maruz Kalma</i>		
<i>Kozmojenik radyonüklitler</i>	0.01	0.01
<i>Karasal radyonüklitler</i>	0.23	0.6
<i>Radon</i>	1.205	10.1
<i>Toron</i>	0.07	0.1
<i>Toplam</i>	2.4	17.1

Normal alanlarda, toplam yıllık etkin doz eşdeğerinin $\frac{1}{3}$ 'ünü dışsal maruz kalma, $\frac{2}{3}$ 'ünü ise içsel maruz kalma oluşturmaktadır (Tablo 2.6). Ancak bu eğilim, yüksek seviyeli doğal radyasyon alanlarında yüksek radyoaktivite üreten doğal radyasyon kaynaklarına bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin; dışsal maruz kalma, yüzey topraklarının jeolojik yapısına (granit yapılar, volkanik alanlar, monozit içeren sahil kumları, vb.), içsel maruz kalma, Ra-Rn içeren sıcak veya soğuk kaynak suları ve/veya bina materyallerine dayalı olarak artarken, kozmik ışın dozları, deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak yüksek değerler göstermektedir.

Dünya üzerinde yüksek seviyeli doğal radyasyon alanlarının büyük bir kısmı, toryumca zengin monazit içeren ağır mineral kumlar, uranyum ve toryum içeren granitler, çeşitli volkanik ve tortul kayalar, kum taşları, kil taşları (alum shale), kireç taşları ve benzeri jeolojik yapılar üzerine yer almaktadır. Genel olarak, jeolojik yapı veya bu yapıya dayalı olarak, çevredeki karasal radyonüklitlerin jeokimyasal olaylarla taşınarak birikmesi sonucu oluşan bu alanlar Tablo 2.7 'de özetlenmiştir.

Tablo 2.7 Dünya üzerinde yüksek seviyeli doğal radyasyon alanları (Canbaz, 2007).

Ülke	Bölge	Bölgenin Özellikleri	Doz hızları ($nGyh^{-1}$)
Brezilya	Guarapari	Monazitli sahil kumları	90–90000
	Meaibe	Monazitli sahil kumları	20000*
	Mineas Gerais ve Goias	Volkanik sokulumlar	340*
	Pocos de Caldas Araxa	Volkanik sokulumlar	2800*
Çin	Yangjiang ve Quandong	Monazitli topraklar	370*
Mısır	Nil Deltası	Monazitli kumlar	20–400
Fransa	Orta (merkez) Bölge	Granitik, şistik alanlar	20–400
	Güneybatı	Uranyum Mineralleri	10–10000
Hindistan	Kerala ve Madras	Monazitli sahil kumları (200 km uzunluğunda ve 0,5 km genişliğinde sahil)	200–4 000 1800*
	Ganj Deltası	Monazitli kumlar	260–440
	Chinavilai Köyü,Tamil Nadu	Monazitli sahil kumları	2283–4566
İran	Ramsar	Radyum içeren doğal kaynak suları	70–17000
	Mahallat	Radyum içeren doğal kaynak suları	800–4000
		Uranyum içeren çeşitli volkanik ve tortul kayalar	0,092–0,457
İtalya	Lazio	Volkanik topraklar	180*
	Campania		200*
	Orvieto Kasabası		560*
	Güney Toscana		150–200
Yeni Zelanda	Pasifik	Volkanik topraklar	1100 (max)
İsviçre		²²⁶ Ra içeren karstik topraklar	100–200
Sudan	Miri Gölü	-	31311*

* Ortalama değerleri göstermektedir.

Normal alanların 100 katı ve üzerinde karasal gama doz hızları ürettiği gözlenen bu alanlarda, ayrıca yerel jeolojik malzemenin bina materyali olarak kullanılması,

Radonun bozunması ile alfa ve beta (β) yayınlayan, kısa yarı ömürlü radon ürünleri olan ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po meydana gelir (Tablo 2.8). Özellikle radon gazı bozunduğu zaman oluşan ^{218}Po atomları, iyonize halde, hava içindeki herhangi bir parçacığa yapışma eğiliminde olduğundan ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po atomlarının pek çoğu oluştuklarında bir parçacığa yapışmış haldedirler. Radonun bozunma ürünlerinin, genellikle akciğer mukozasına yerleşerek akciğer kanseri riskini artırdığı bilinmektedir.

Tablo 2.8 Radon-222 ve bozunma ürünlerinin özellikleri

İzotopik gösterimi	Radyasyon tipi	Yarıömrü	Bozunma faktörü (dak^{-1})
^{222}Rn	α	3,82 gün	$1,26 \times 10^{-4}$
^{218}Po	α	3,05 dak	$2,27 \times 10^{-1}$
^{214}Pb	β, γ	26,8 dak	$2,59 \times 10^{-2}$
^{214}Bi	β, γ	19,7 dak	$3,52 \times 10^{-2}$
^{214}Po	α	$1,6 \times 10^{-4}$ sn	$2,77 \times 10^{-5}$
^{210}Pb	β	22 yıl	-

Radonun: ^{235}U serisi \rightarrow ^{219}Rn (aktinon), ^{232}Th serisi \rightarrow ^{220}Rn (toron) ve ^{238}U serisi \rightarrow ^{222}Rn (radon) olmak üzere üç doğal izotopu bulunmaktadır. Sözü edilen üç radon izotopundan Aktinonun, seri başı ^{235}U 'in doğal izotopik bolluğunun ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) çok düşük olması (%0,725) ve çok kısa yarı ömrü (3,9 saniye) nedeni ile radyolojik risk açısından değerlendirilmemektedir. Benzer şekilde, ^{232}Th ' in bozunum ürünü olan ^{220}Rn , 55,35 saniyelik kısa ömrü nedeniyle daha az dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, bina içi etkin doz eşdeğerinin %10'una ^{220}Rn ve ürünlerinin neden olduğu tahmin edilmektedir (UNSCEAR 2000; Yaprak, 2009). Toron ve ürünlerinin solunması ile akciğerlerin maruz kaldığı radyasyon etkin doz eşdeğeri $0,1 \text{ mSv}^{-1}$ olarak tahmin edilmektedir.

2.4.2 Radon, Thoron ve Ürünleri İçin Spesifik Nicelikler

Radon (^{222}Rn) ve toron (^{220}Rn), U ve Th un bozunum zincirindeki doğal olarak oluşan gaz radyonüklitlerdir. Bunların bozunum ürünleride radyonüklittir fakat metaliktir. Radonun kısa ömürlü ürünleri olan ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po (Tablo

2.9a) radyasyondan korunma açısından oldukça önemlidir. Önemli toron ürünleri ise ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi and ^{212}Po 'dir. (Tablo 2.9 b)

Tablo 2.9 (a) Radon (^{222}Ra) ürünleri

	Radyonüklit	Yarı ömür	Atom sayısı		Potansiyel alfa enerjisi			
			Bq/atom	ϵ /atom	ϵ / λ Bq	K		
	i	$T_{1/2}$	A/ λ	[MeV]	[10^{-12} J]	[MeV]	[10^{-12} J]	
^{218}Po	1	3,10 dk	268	13,69	2,19	3 670	589	0,106
^{214}Pb	2	26,8 dk	2 320	7,69	1,23	17800	2 860	0,513
^{214}Bi	3	19,9 dk	1 723	7,69	1,23	13100	2 100	0,381
^{214}Po	4	164 μs	¹⁾	7,69	1,23	2×10^{-3}	$2,9 \times 10^{-4}$	6×10^{-8}

¹⁾ Tüm atomlar 1 s den daha kısa zamanda bozunacağından ve hesaplanan sayı 1 den çok daha küçük olacağından sayı verilmemiştir

Tablo 2.9(b) Toron (^{220}Ra) ürünleri

	Radyonüklit	Yarıömür	Atom sayısı		Potansiyel alfa enerjisi			
			Bq/atom	ϵ /atom	ϵ / λ Bq	K		
	i	$T_{1/2}$	A/ λ	[MeV]	[10^{-12} J]	[MeV]	[10^{-12} J]	
^{216}Po	1	0,15 s	¹⁾	14,6	2,34	3,32	0,51	6×10^{-6}
^{212}Pb	2	10,6 saat	55 056	7,8	1,25	429 000	68 710	0,913
^{212}Bi	3	60,6 dk	5 246	7,8 ²⁾	1,25	40 900	6 554	0,087
^{212}Po	4	304 ns	¹⁾	8,8	1,25	$3,8 \times 10^{-6}$	6×10^{-7}	8×10^{-12}

¹⁾ Tüm atomlar 1 s den daha kısa zamanda bozunacağından ve hesaplanan sayı 1 den çok daha küçük olacağından sayı verilmemiştir

²⁾ ^{212}Bi ve ^{212}Po nin alfa parçacık emisyonu ile bozunumundan gelen ortalama değer

Havada genellikle radon/toron ve kısa ömürlü radon/thoron ürünlerinin karışımı bulunur. Bu ürünler çoğunlukla aerosollere yapışırken, yüzde bir kaçını yapışmamaktadır. Ürünler akciğerlerde depolanırlar. Bu ürünlerin alfa parçacık emisyonu ile bozunmaları akciğer kanserlerinin en önemli nedenleridir. Spesifik nicelikler bu durumlar dikkate alınarak hesaplanmıştır.

2.4.2.1 Potansiyel Alfa Enerjisi

Radon ve toronun bozunum zincirindeki bir i atomunun potansiyel alfa enerjisi ε_i , bu atomun sırasıyla uzun ömürlü ^{210}Pb veya kararlı ^{208}Pb 'a bozunumu sırasında yayımlanan alfa parçacıklarının toplam enerjisidir.

i tipi N atomlarının potansiyel alfa enerjisi $N.\varepsilon_i$ ' dir. Aktivite (Bq) başına atomların sayısı N , A/λ ' ya eşittir. Burada A , bu radyonüklitin aktivitesi ve λ da onun bozunum sabitidir. Aktivite (Bq) başına potansiyel alfa enerjisi böylece ε/λ olarak verilir (birim: J.Bq^{-1} , çoğunlukla MeV.Bq^{-1} kullanılır).

2.4.2.2 Havadaki Konsantrasyon (Potansiyel Alfa Enerji Konsantrasyonu)

Havada kısa ömürlü bir radon (veya toron) ürününün potansiyel alfa enerji konsantrasyonu $C_{p,i}$, bu ürünün bir V hacminde bulunan tüm atomların potansiyel alfa enerji ε_i toplamının bu hacme oranıdır.

$$C_{p,i} = \frac{N_i \varepsilon_i}{V} = C_i \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i} \text{ birim: } \text{J.m}^{-3} \text{ çoğunlukla } \text{MeV.m}^{-3} \quad (2.5)$$

Burada N_i : V hacmindeki ürün atomlarının sayısı, C_i : karşılık gelen aktivite konsantrasyonu ve λ_i : bozunum sabitidir. Birimler $1 \text{ J.m}^{-3} = 6,242 \times 10^{12} \text{ MeV.m}^{-3}$ ile ilişkilidir.

Havada kısa ömürlü radon (veya toron) ürün karışımlarının potansiyel alfa enerji konsantrasyonu (PAEC) C_p , incelenen hacimdeki tüm ürünlerin potansiyel alfa enerjilerinin toplamıdır.

$$C_p = \sum_i C_{p,i} = \sum_i \varepsilon_i \cdot C_i / \lambda_i \text{ birim: J.m}^{-3} \text{ çoğunlukla MeV.m}^{-3} \quad (2.6)$$

Tarihsel süreçte, potansiyel alfa enerji konsantrasyonu için çalışma seviyesi birimi (WL) (working level) kullanılmıştır. $1 \text{ WL} = 1,300 \times 10^8 \text{ MeV.m}^{-3} = 2,08 \times 10^{-5} \text{ J.m}^{-3}$.

2.4.2.3 Eşdeğer Denge Konsantrasyonu, Denge Faktörü

Radyoaktif denge durumunda, radonun aktivite konsantrasyonu C_{Rn} ve radon ürünlerinin aktivite konsantrasyonu eşittir. Yalnız bu durum havada geçerli değildir. Denge durumunda olmayan karışımlar için eşdeğer denge konsantrasyonu C_e niceliği tanımlanmıştır.

Havada ürünlerin dengede olmadığı bir karışıma karşılık gelen eşdeğer denge konsantrasyonu C_e kısa ömürlü ürünleri ile radyoaktif dengede olan radonun hayali aktivite konsantrasyonudur. Burada kısa ömürlü ürünlerin potansiyel alfa enerji konsantrasyonları C_p dengede olmayan gerçek karışımın alfa enerji konsantrasyonuna eşittir. Daima $C_e \leq C_{Rn}$ dur. C_e ve C_{Rn} niceliklerinin her ikisinde SI birim sisteminde Bq.m^{-3} ile verilir.

Eşdeğer denge konsantrasyonu C_e ürünün aktivite konsantrasyonlarından şu denklem ile hesaplanabilir;

$$k_i = (\varepsilon_i / \lambda_i) / \sum (\varepsilon_i / \lambda_i) \text{ olmak üzere } C_e = \sum_i k_i \cdot C_i \quad (2.7)$$

(k_i faktörü Tablo 2.13 a ve b de verilmiştir.)

radon ürünü için :

$$C_e = 0.106 C_{Po-218} + 0.513 C_{Pb-214} + 0.381 C_{Bi-214} + 6 \times 10^{-8} C_{Po-214} \quad (2.8)$$

toron ürünleri için:

$$C_e = 7 \times 10^{-6} C_{Po-216} + 0.913 C_{Pb-212} + 0.087 C_{Bi-212} + 8 \times 10^{-12} C_{Po-212} \quad (2.9)$$

Açıkça, ^{216}Po , ^{214}Po ve ^{212}Po radyonüklitleri C_e hesaplanırken çok küçük k_i değerleri nedeniyle ihmal edilebilir.

Denge faktörü F , eşdeğer denge konsantrasyonunun ve havadaki ana nüklit (radon) aktivite konsantrasyonunun oranı olarak tanımlanır:

$$F = C_e / C_{Rn} \quad (2.10)$$

F 'nin değeri 0 ile 1 arasında değer alır ve radon ile ürünlerinin arasında ne derecede bir radyoaktif denge olduğunun ölçüsüdür. Evler için genellikle 0,4 ortalama değeri uygundur.

Havadaki aerosollere yapışmamış olan ürünler ise özel durumdur. Aerosollere yapışmamış f_p kesri şöyle verilir:

$$f_p = \frac{C_p^f}{C_p} = \frac{C_p^f}{C_p^a + C_p^f} \quad (2.11)$$

Burada C_p^a aerosollere yapışmış ürünün potansiyel alfa enerji konsantrasyonudur. C_p^f ise serbest haldeki (yapışmamış) ürünlerin kesri ve C_p ise ikisinin toplamını ifade etmektedir.

2.4.2.4 Soluk Alma Yoluyla Bireysel Maruz Kalma

Radon ürünlerine bireysel maruz kalma P_p havadaki potansiyel alfa enerji konsantrasyonunun zaman integrali olarak tanımlanır. T etkileşim periyodu olmak üzere,

$$P_p(T) = \int_0^T C_p(t) dt \quad \text{ile verilir.} \quad (2.12)$$

Denge konsantrasyonu $C_e(t)$ olarak alınırsa benzer bir integrale karşılaşıyoruz. Bu integral denge eşitlik etkileşimi $P_e(T)$ olarak adlandırılır:

$$P_e(T) = \int_0^T C_e(t) dt \quad (2.13)$$

Potansiyel alfa enerji etkileşimi P_p , aylık çalışma düzeyi (WLM) terimleriyle ifade edilir. Bu nicelik özellikle belirli mesleki maruz kalmalar için tanımlanır ve belirlenmiş 170 saatlik zaman periyodunu içerir. Bu yüzden ortalama aylık çalışma zamanına eşittir. SI birim sisteminde: $1\text{WLM}=3,54 \times 10^{-3} \text{ J.h.m}^{-3} = 2,21 \times 10^{10} \text{ MeV.h.m}^{-3}$

2.5 Radon Ölçüm Teknikleri

Havada radon ve bozunum ürünlerinin ölçümüyle ilgili birçok farklı teknik vardır. Havanın aktif veya pasif olarak alınışına göre iki gruba ayrılabilir. Aktif ve pasif olmak üzere iki temel ölçüm yöntemi vardır.

Aktif ölçüm yöntemi, elektronik sistemler, pompalar, güç kaynakları gibi cihazlar gerektirir. Aktif sistemde iyon odaları, sintilasyon hücreleri veya spektroskopik sayım cihazları kullanılır.

Pasif ölçüm yönteminde termoluminesans detektörler (CaSO₄:Dy veya LiF gibi), veya katı hal nükleer iz detektörleri; selüloz nitrat (LR-115) veya alil diglikol karbonat (CR-39) kullanılır.

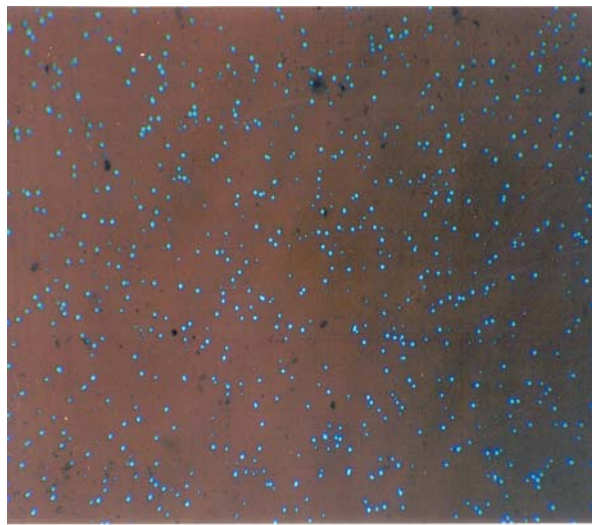
2.6 Katı Hal İz Kazıma Dedektörleri

Hareketli bir iyon, yalıtılmış bir katıdan geçtiğinde yolu boyunca katının fiziksel yapısında bir hasar oluşturur. Bu hasarla oluşan iz kimyasal olarak kazındığında mikroskop altında görülebilir olmaktadır (Yaprak, 1988; 2003). Hareketli iyonun hasar oluşturabileceği karakterde olan bu ortam katı hal iz kazıma detektörü veya dielektrik iz detektörü olarak tanımlanmaktadır.

Katı hal iz kazıma detektörleri öz direnci 2000 ohm-cm den büyük dielektrik maddelerden yapılmaktadır. Plastik ve polimerler gibi organik olanların yanı sıra cam ve mineral gibi inorganik olanları da mevcuttur. Işık geçirebilen maddeden yapılan selüloz nitrat, selüloz asetat selüloz triasetat organik dedektörleri plastik levhanın bir yüzüne 10–1000 mikro metre kalınlığında gerekli madde kaplanarak hazırlanmaktadır (Yaprak, 1988).

Genel olarak radon aktivite konsantrasyonları alfa radyasyonuna duyarlı herhangi bir detektör ile ölçülebilir olmasına rağmen, basit ve ucuz olmaları, elektronik ekipmana gereksinim duymamaları, uzun süreli entegre (hafta/ay) radon ölçümlerine izin vererek meteorolojik olarak indüklenen hızlı dalgalanmaları ortadan kaldırmaları ve nispeten çevresel faktörlerden etkilenmemeleri gibi avantajları, dozimetrik ve jeofiziksel amaçlı kantitatif radon tayininde *Katı Hal İz Kazıma Dedektörlerini (SSNTD)* tercih edilir yapmıştır (Yaprak, 1988; 1999; 2003). Nükleer Fizik, Fizik, Astrofizik, Reaktörfiziği, yüksek enerjili partikül fiziği, Jeoloji, Radyobioloji, nükleer tıp, hidroloji ve kimya gibi bilim alanlarında uygulama bulan bu yeni teknik, ayrıca alfa-nötron dozimetresi ve doğal çevreden gelen radyasyon ölçümlerinde de kullanılmaktadır (Yaprak, 1988).

Birçok tipi bulunan bu pasif detektörlerin temel prensibi, birim hacimdeki radon konsantrasyonu ile film detektörler üzerindeki iz yoğunluğunun orantılı olmasıdır. Günümüzde dozimetrik ve jeofiziksel amaçlı kantitatif radon tayininde yaygın şekilde pratik bir radyometre olan alfa duyarlı LR-115 selüloz-nitrat plastik iz detektörleri kullanılmaktadır. 100 µm kalınlığında saydam polyeester zemin üzerine 13 µm selüloz-nitrat kaplı bu plastik detektörler üzerinde alfaların bıraktığı iz kırmızı zeminde, beyaz benekler şeklinde olmaktadır (Şekil 2.2).



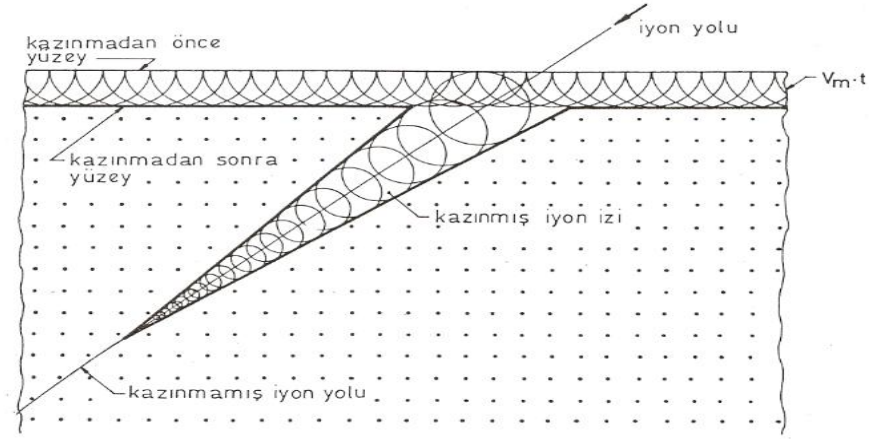
Şekil 2.2 LR-115 katı hal iz dedektörleri üzerindeki iz yoğunluğu (Yaprak, 2006)

2.6.1 Katı Hal İz Kazıma Dedektörlerinin Temel Prensipleri

Bütün yüklü tanecikler ($Z \geq 2$) madde içinden geçerken yolları boyunca ortama enerji transfer ederler. Ortam içindeki moleküller veya atomlara ait elektronlarla Coulomb etkileşmesi yapan yüklü tanecik enerjisini yitirerek madde içinde durur. Çok sayıda uyarılma ve iyonlaşma ile iyon yolu boyunca yapısal hasar oluşur. Enerji depolanışının yayılımı iyon yoluna diktir. Submikroskopik dar iyon yolu boyunca transfer edilen enerji, birkaç A^0 başına 1 MeV/akb iyon gibi büyük miktarlardadır. Organik materyallerde bu enerji kaybı yaklaşık 50–100 A^0 arasında submikroskopik oyuk oluşturur. Bunlara gizli iz denir. Bu izler ancak elektron mikroskopu altında görülebilir. Organik materyal bir kimyasal kazıma çözeltisine (6 N, 2,5 N NaOH) yerleştirildiğinde gizli izin etrafındaki hacim ortaya çıkar. Böylece nükleer parçacığın izi normal mikroskop altında 1–30 μm çapında bir silindir veya koni şeklinde görülebilir olur. Nükleer izlerin geometrik şekli, yüklü, ağır tanecikler tarafından gizli izde depolanmış olan enerji kaybına dedektörün doğrudan cevabıdır. Bazı özel yöntemler uygulanarak iz şekillerinden tanecik parametreleri (hız, enerji, yük) hesaplanabilir (Yaprak, 2010).

Mikroskop altında görülebilen izler oluşmasını sağlayan iz kazıma işlemi daha ayrıntılı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır. Bir plastik dedektör için iki tür kazıma hızı vardır. Birincisi hasar görmemiş materyal için hacim yada materyal kazıma hızı [V_m ($\mu\text{m}/\text{t}$)] dir. Sonuncusu yani iz kazıma hızı, yüklü taneciğin enerji kaybına kuvvetle bağlıdır.

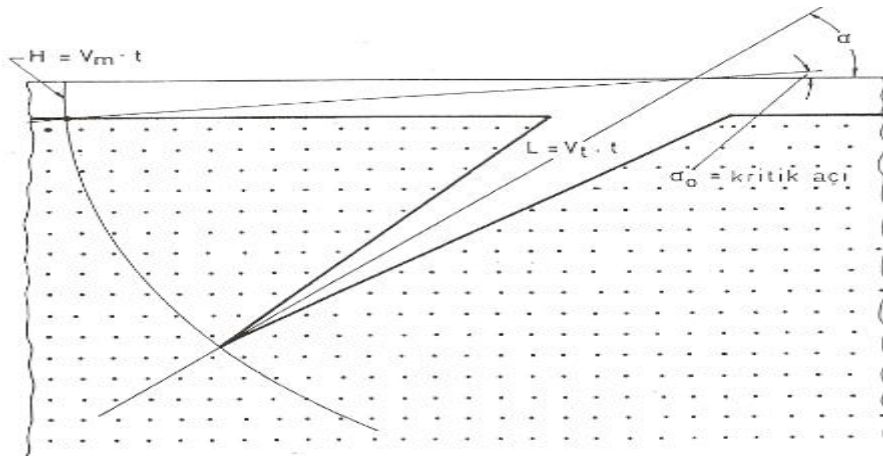
İyon yolu çevresinde kazınan koninin formu Huygens prensibi uygulandığında kolaylıkla anlaşılır. Plastik yüzeyin her yanında materyal kazıma hızı V_m ' in bütün yönlerde eşit olarak çalıştığı düşünülürse, sonraki bir (t) kazıma süresinde yüzey $V_m.t$ ile çıkarılmış olacaktır. Yarıçapları $V_m.t$ olan bütün elementer kazıma kürelerinin içi yeni plastik yüzeyi verir. Şekil (2.3)' de bu prensibin yandan görünüşü resmedilmiştir.



Şekil 2.3 Kazınmış izin yandan görünüşü (Yaprak, 1988; Yaprak, 2010)

Bu olay iyonun gittiği yola da uygulanılabilir. Burada materyal kazıma işlemi, iz boyunca iz kazıma hızının verilen bir noktadan geçmesinden önce başlamaz. Daha açık olarak ifade edilirse; örneğin, toplam kazıma zamanı t ' nin $1/3$ ' ünden sonra koninin tepesi iyonun yolu boyunca yüzeyden $V_{i/3} \cdot t$ kadar uzağa ilerlemiş olsun. Bu noktada materyal sadece $2/3 t$ süresince kazınır. Bu sürede materyal yarıçapı $V_m \cdot (2/3) \cdot t$ olan bir küre içinde çıkarılacaktır.

Nükleer iz kazımayı anlamak için kritik açı (α_0) olgusu da bilinmelidir. Aşağıdaki şekil bu durumu görüntülemektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Kazınmış iz ve kritik açı arasındaki bağıntı (Yaprak, 1988; Yaprak, 2010)

Söz konusu bu durumda V_m ve V_t sabit kabul edilmiştir. Çıkarılan yüzey $H = V_m.t$ ve iz uzunluğu $L = V_t.t$ (t- toplam kazıma süresi)' dir. Bütün tanecik geliş açıları için $\alpha > \alpha_0$ olduğunda kazınabilen iz var olacaktır. α_0 için sınır koşulu aşağıdaki şekilde verilir.

$$\sin \alpha_0 = H / L = V_m.t / V_t.t = V_m/t \quad (2.14)$$

Nükleer izlerin geometrik şekli, ağır yüklü tanecikler tarafından gizli izde depolanmış olan enerji kaybına dedektörün doğrudan cevabıdır. Bazı özel metodlar uygulanarak iz şekillerinden tanecik parametreleri (hız, enerji, yük) hesaplanabilir.

Plastik materyalde iz oluşumunu açıklamak üzere birçok model geliştirilmiştir. Bunların çoğu iz kazıma uygulamaları için anlamlı farklılıklar göstermezler. Bu modellerden bir tanesi REL (Restricted Energy Loss) modeldir. Bu modelde sadece düşük enerjili sekonder elektronlar tarafından dedektör materyaline transfer edilen enerji kaybı hesaba katılmaktadır. Kısaca toplam enerjinin yalnızca sınırlanmış bir kısmı iz oluşumu için kullanılmaktadır.

İz kazıma hızı V_t , REL' in bir fonksiyonudur. V_t ' in (REL) bilinmesiyle koni uzunluğu L, tam olarak şu bağıntıyla tanımlanmaktadır.

$$L(t) = \int_0^t V_t(REL).dt \quad t: \text{kazıma süresi} \quad (2.15)$$

Çoğunlukla V_t (REL) kalibrasyon ölçümlerinden bulunabilir ve bu integral sayısal olarak integre edilmiş olur. Plastik materyal homojense iz boyunca REL ve V_t (REL) sabit kalır. Bu durumda yukarıdaki integral basitleşir ve aşağıdaki şekli alır.

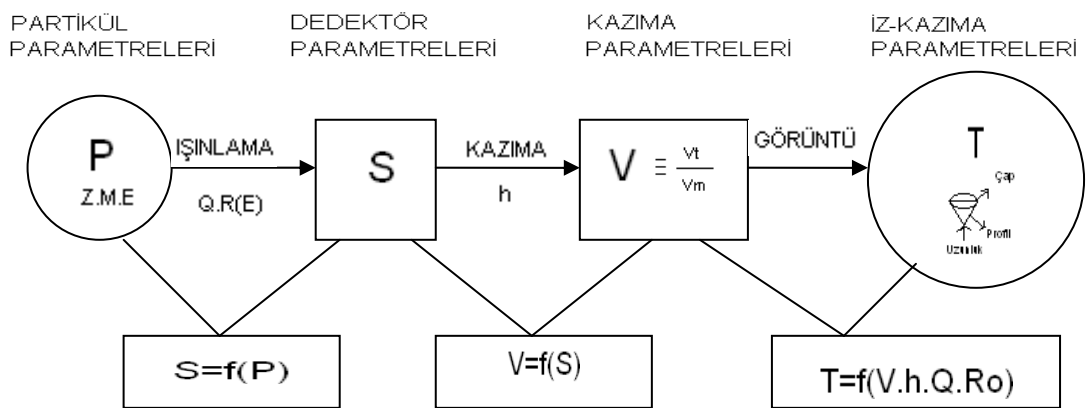
$$L = V_t.t \quad (2.16)$$

Burada V_t , $V_t(\text{REL})$ ' in ortalama değeridir. Kazınmış nükleer izlerin geometrisinin gelişmesinin anlaşılması için esas ilişki

$$T = F(V.h.Q.R_o) . \quad (2.17)$$

fonksiyonu elde edilir. Şekil 2.5 bu fonksiyonu şematize etmektedir.

Katı hal iz kazıma dedektörleri bilimin ve teknolojinin çeşitli alanlarında başarıyla uygulanmasına rağmen, bu dedektörlerdeki iz oluşumunun basit mekanizması hala tartışmaya açıktır. Bu anlamda plastik materyalde iz oluşumunu açıklamak için birçok model (birincil hasar modeli, ikincil hasar modeli, sınırlandırılmış enerji kaybı modeli vb.) geliştirilmiştir. Bu modellerin ortak sonucu, bir katı hal iz kazıma dedektöründe iz durumunun ışınlayıcı taneciğin, Z proton sayısına, α_0 kritik geliş açısına (kritik açı, kullanılan plastik iz dedektörüne göre değişir. LR-115 için 30 derece ve CR-39 için 10 derece olarak verilmektedir), m kütlesine, N kazıma çözeltisinin normalitesine, T kazıma çözeltisinin sıcaklığına, V_t çözeltinin iz kazıma hızına, V_m çözeltinin materyal kazıma hızına bağlı olarak geliştiğidir (Yaprak, 1988).



Şekil 2.5 İz parametrelerinin ilgisinin şematik gösterimi (Yaprak, 1988; Yaprak, 2010)

2.6.2 Katı Hal İz Kazıma Dedektörlerinin İşlenmesi

Genelde, katı hal iz kazıma dedektörlerinin kazınması için birkaç tane uygun çözelti olmasına rağmen, bu çözeltilerin sıcaklığı, konsantrasyonu, kazıma süresi geniş bir aralıkta değişmektedir. Tablo 2.10'da kantitatif radon tayininde kullanılan bazı yaygın plastik dedektörler için kazıma sıcaklığı, konsantrasyonu ve süresi verilmiştir (Yaprak, 1988; 2003)

Tablo 2.10 Bazı plastik dedektörler için iz kazıma koşulları

Detektör Tipi	Detektör Materyali	Kazıma Sıcaklığı	Kazıma Konsantrasyonu	Kazıma Süresi
LR-115	Selüloz Nitrat	60 °C	%10; 2,5 N NaOH	2 Saat
CR-39 (500 µm)	Poli-karbonat	70 °C	%25; 6,25 N NaOH	12 Saat
CN-85	Selüloz Asetat	60 °C	%10; 2,5 N NaOH	20-30 dak.

Detektör yüzeyinde birim alandaki iz sayısı “iz yoğunluğu” olarak tanımlanmaktadır ve birim hacimdeki radon konsantrasyonu ile film dedektörler üzerindeki iz sayısı orantılıdır. İz yoğunluğundan aktivite konsantrasyonuna geçmeyi sağlayan bu orantı sabiti kalibrasyon sabiti olarak adlandırılmaktadır. Detektör üzerindeki net iz sayısı (iz yoğunluğu), gözlenen iz sayısı ile ışınlanmamış materyal üzerindeki ortalama iz sayısı arasındaki fark alınarak bulunur. Birim alanda ölçülen iz yoğunluğundaki (N) hata, Poisson istatistiğine uyar ve toplam sayımın karekökü ($\sigma = \sqrt{N}$) ile verilir.

BÖLÜM ÜÇ

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Çalışma Alanı ve Genel Jeolojik Yapısı

3.1.1 Kozak Plütonunun Yeri ve Konumu

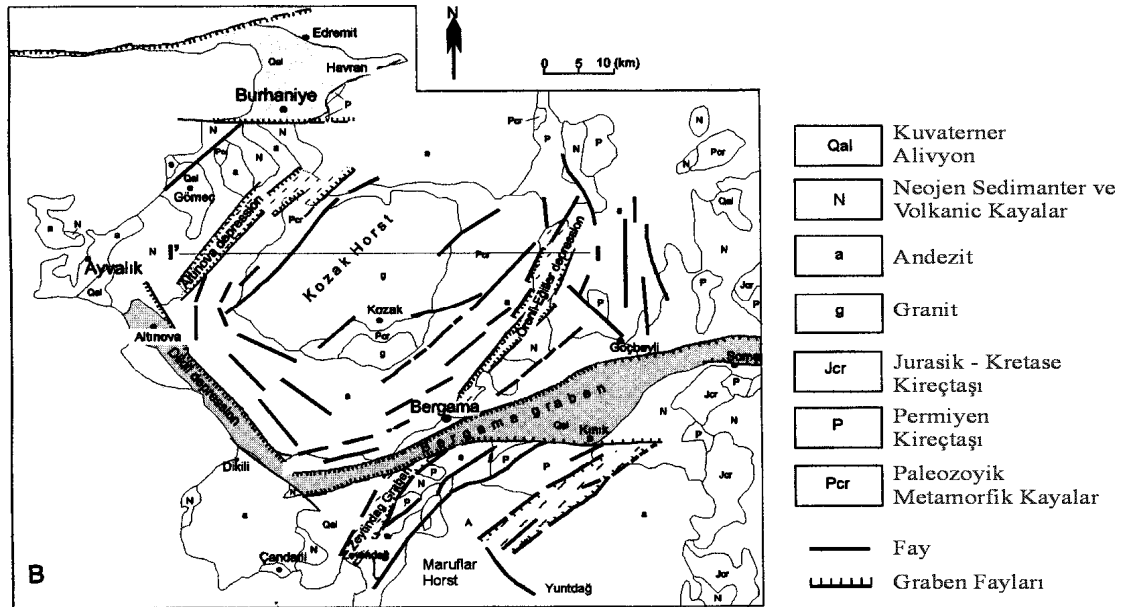
Kozak dağı magmatik kompleksi, Kuzey Anadolu Fayı'nın güneyinde Paleozoyik yaşlı metamorfik ve metamorfik olmayan kayalar içine yerleşmiş birden fazla sokulumlardan biri olup Türkiye'nin en batı ucunda Ayvalık, Bergama ve Burhaniye üçgeninin içinde yer almaktadır (Şekil 3.1)

Kozak plütonunu yerleşimi ile başlayan magmatik aktivite geç Oligosen - Erken Miyosen boyunca etkin olmuştur. Plüton yarı derinlik eşdeğerleri çevresinde gözlenmektedir. Kısmen erken Miyosen boyunca granitin bölgeye yerleşimi ile eş yaşlı olan volkanik kayalar tarafından çevrelenmiştir (Yılmaz et al., 1996).

Yılmaz et al., (1996) tarafından yapılan çalışmalarda arazi ve petrografik özelliklerine göre üç farklı plütonik kaya grubu ayırt edilmiştir: (a) Kozak granodioriti; (b) aplogranit (ince taneli ve açık renkli granodiorite); ve (c) microgranite. İçinde saçınmış halde mafik mikrogranular anklavlar içeren plüton birçok aplitik ve pegmatitik damarlar tarafından kesilmiştir. Yankaya ile dokanak yaptığı kesimlerde aplitik damarların sayıları fazlaşmaktadır.

Kozak Plütonu, Alt Triyas yaşlı yeşil şist fasiyesinde metamorfizma geçirmiş Çavdarstepe Formasyonu, metaspilit, metadiabaz, albit diabaz ve bunların tüflerinden oluşan Kocaçukur üyesi ile kısmen ilksel özelliklerini korumuş metakonglomera, metakumtaşı, mateçakıltaşı, metaçamurtaşı, kumlu kireçtaşı, kumtaşı, aglomera ve metavolkanitten oluşan Kınık Formasyonu içine sokulmuştur (Akyürek, 1989).

Kozak plütünü çevresinde gözlenen granodiorit porfir daykları genellikle Alt Triyas yaşlı çökelleri yer yer keserek kontak metamorfik etkiler geliştirmişlerdir (Ercan et al., 1984).

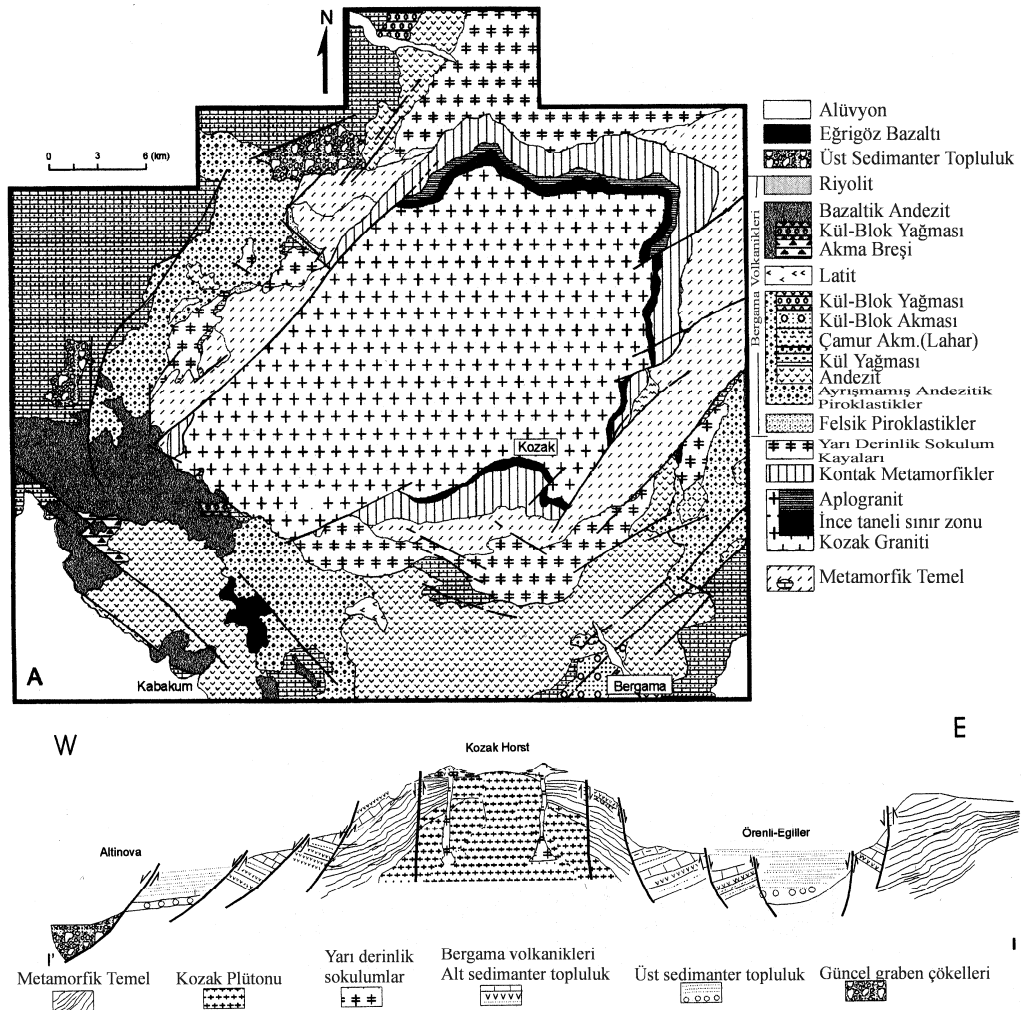


Şekil 3.1 Bergama grabenin ve çevresinin tektonik haritası (Yılmaz ve diğ., 2001).

Plütunun bölgeye yerleşimini takip eden evrede gelişen volkanik faaliyetler sonucu dasit ve andezit bileşimindeki volkanik kayalar granit - adamellit - granodiorit bileşimindeki kayaları ile metamorfik temel kayaları örtmüşlerdir (Yılmaz et al., 1996). Plütun etrafında geniş alanlar kaplayan volkanik kayalar andezit - latit andezit - dasit - riyodasit ve bunların tüflerinden oluşmaktadır. Akyürek ve Soysal (1983) tarafından Yuntdağı voklanitleri olarak adlandırılan kayaların Borsi et al. (1972) tarafından K/Ar yöntemi çalışmaları ile 16,7 - 17,3 - 17,6 - 18,5 milyon yıl, Benda et al. (1974) ise 18.1 ± 0.3 - $1,2 \pm 0.4$ milyon yıllık yaşlar bulmuşlardır. Kozak plütönüne ait ilk yaş tayini Bürküt (1966) tarafından toplam radyojenik kurşun yöntemi ile zirkonlardan yapılmış ve $79,8 \pm 8$ milyon yıl olarak saptanmıştır. Daha sonraki yıllarda yapılan çeşitli çalışmalarda, plütönun'un bölgeye yerleşim yaşı İzdar (1968) tarafından Paleozoyik sonu - Alt Jura öncesi, Bingöl (1976) tarafından Üst Kretase sonrası; Akyürek'e (1989 a - b) göre Alt Triyas sonrasıdır. Ataman (1975), Rb/Sr yöntemiyle 13, 16.5 ve 23 milyon yıl, Bingöl ve

diğ. (1982) ise K/Ar yöntemiyle biotitlerden yaptığı analizlerde 20.3 ± 3 ile 24.6 ± 1.5 ve ortoklastlardan yaptığı analizlerde ise 24.2 ± 1.1 ve 37.6 ± 3.3 milyon yıl olarak saptamıştır.

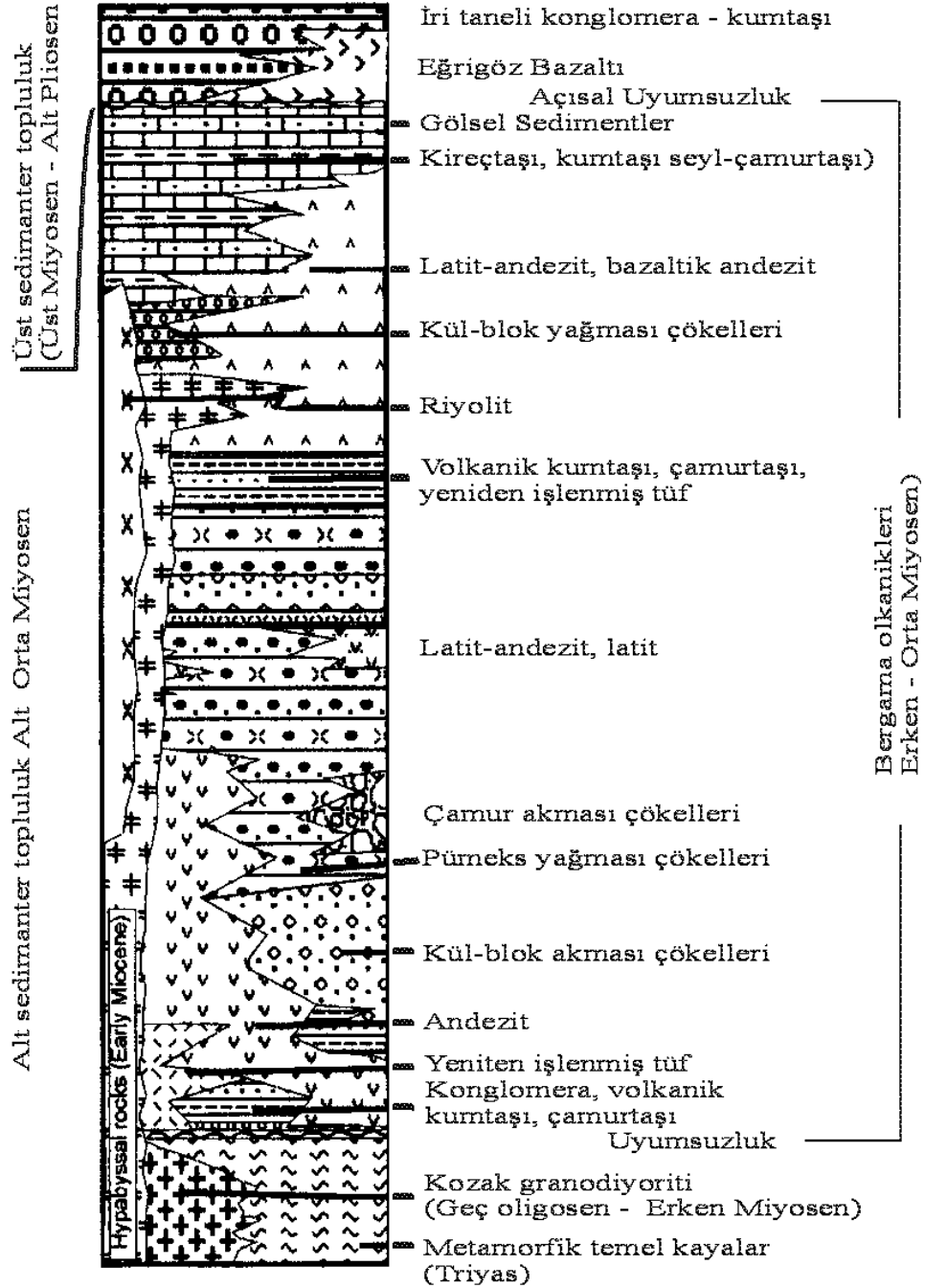
3.1.2 Kozak Granitoidi



Şekil 3.2 Kozak dağının ve çevresinin jeolojik haritası ve jeolojik kesiti (Yılmaz et al., 2001) (Bölgenin genelleştirilmiş stratigrafik istifi Şekil 3.3 te verilmektedir).

Kozak plütonu içinde genelde saçınmış olarak yer alan mafik microgranular anklavların plütunun orta ve yankaya ile dokanak yaptığı kesimlerinde yoğunlaştığı gözlenmektedir. Elipsoidal şekilli mafik mikrogranular anklavların boyutları 2cm ile

1.5 metre arasında değişmektedir. İri mafik microgranular anklavlara ana kayanın çevre kaya ile dokanak yaptığı kesimlerde rastlanmaktadır ve pütünü kesen aplitik damarlar anklavlarında kesmektedirler.



Şekil 3.3 Kozak bölgesinin genelleştirilmiş stratigrafik istifi (Altunkaynak et al., 1998).

Bergama ilçesinin kuzey batısında yer alan ve adını Kozak kasabasından alan plüton Kozak dağının merkezinde 300 km² lik bir alanda yüzlek vermektedir (Şekil 3.2). Eliptik bir şekle sahip olan plütonunun uzun eksini GB-ND uzanımlıdır. Baskın kayaları geçişli bir dokanak sunan granodioritler ve granitler oluşturmaktadır. Genelde orta taneli olan plüton içinde ince taneli mikrogranodioritik kesimler yer almaktadır ve özellikle Çamavlu Köyü çevresinde gözlenmektedirler. Mikrogranodiorit ana kayaya göre daha felsiktir. Oldukça sık rastlanabilen applitlerin kalınlıkları 2 cm - 2.5 m arasında değişirken yüzlek verdikleri kesimlerde uzunlukları maksimum 50 m' ye ulaşabilmektedir. Plüton içinde değişik doğrultular sunan applitlerin çeperlerinde pegmatitik damarlar gelişmiştir. Aşağıcumalı kuzeyinde ve Çamavlu köyü içinde büyük aplitik damarlar yer almaktadır. Kozak plütonunun içine sokulduğu çevre kayalarla dokanak yaptığı kesimlerinde, her ikisini kesen kalınlıkları maksimum 2 cm ile 40 cm arasında değişen ince uzun birçok aplitik damar bulunmaktadır. Bu aplitik damarların içlerinde ve çevresinde ince pegmatitik oluşumlar bulunmaktadır.

Kozak plütonu içinde, genişlikleri ve uzunlukları değişken olan pegmatitik damarların yanı sıra sayıları fazla olmayan merccek ve/veya jeod şeklinde pegmatitik oluşumlar bulunmaktadır. Bunların boyutları 10 - 50 cm arasında değişmektedir. Applitleri ana kaya ile olan dokanakları boyunca gözlenen pegmatit damarlarının mineral bileşimlerini potasyum feldispat, sodyum feldispat, kuvars, biotit, turmalin, topaz ve pirit kristalleri oluşturmaktadır. Merccek ve/veya jeodlar şeklindeki pegmatitik oluşumların mineral bileşimleri zengin olup özşekilli kristaller halinde potasyum feldispat, sodyum feldispat, kuvars, topaz epidot, granat, turmalin, zeolit ve kalsitleri içermektedir.

Kozak granodiyorit'nin genel mineral bileşimi kuvars, plajyoklas, ortoklas, biotit, hornblend, sfen, allanit (ortit), apatit, zirkon, opak minerallerden oluşan granitoidin bileşimindeki kloritler biotitlerin, kalsitler ise plajyoklasların alterasyon ürünleridir. Plütonu oluşturan orta ve ince taneli kesimlerin mineral bileşimleri aynı olup ince taneli ve mikrogranit olarak adlandırılan kesimler daha felsiktirler. Holokristalen allotrimorf / hipidiamorf taneli doku sunan granitoid içindeki aplitik damarlarda

poligonal doku gözlenmektedir. Orta taneli olan granitoidin kuzey-kuzeybatı kesimlerinden alınan örneklerden yapılan kesitlerde ortoklaslar porfirler halindedir.

Metamorfik çevre kayaları kesen fay düzlemlerini kullanarak yükselen Kozak granodiyoriti sığ sokulumlu bir plüton olup granodiyoriti çevreleyen yarıderinlik ve volkanik kayalar plüton ile benzer petrokimyasal özelliklere sahiptirler. Plütonun metamorfik temel ile dokanak yaptığı kesimlerde özümsememiş köşeli yapılar sunan metamorfik seriye ait ksenolitler gözlenmektedir ve plütonun üstünde yükselim sırasında kalmış metamorfik yamalar yer almaktadır (Altunkaynak et al., 1998).

3.1.3 Bergama Volkanikleri

Metamorfik temeli uyumsuzluk ile örten volkanik topluluk dasit-riyolit den bazaltik andezite kadar farklılıklar sunan volkanik kayalardan ve piroklastiklerinden oluşmaktadır. Altunkaynak et al. (1998) tarafından yapılan çalışmalarda volkanik seriyi oluşturan magmanın kompozisyonun ilerleyen bir değişim ile alttan üste doğru farklılıklar sunduğu belirtilmektedir. Seri tabanda riyolitik ve dasitik kompozisyondaki felsik volkanikler ile başlamaktadır. Üste doğru ortaç nitelikteki andezit ve latitler ile bunlara eşlik eden piroklastiklere geçilmektedir. Volkanik serinin en üstünde bazaltik andezit ve bazaltik trakiandezit lav akmaları yer almaktadır (Şekil 3.3).

Asidik ve ortaç karakterdeki volkaniklerden erken – orta Miyosen'e karşılık gelen 20.8 ile 15 my arasında yaşlar elde edilmiştir (Borsi et al., 1972; Benda et al., 1974; Krushensky, 1976, Ejima et al., 1987).

3.2 Bina İçi Radon Ölçümleri

3.2.1 LR-115 Plastik Detektörlerin Hazırlanması

Bergama/Kozak Granit alanında bulunan köylerde bina içi radon aktivite konsantrasyonlarının ölçülmesi amacıyla, köylerin muhtarlık odalarına asılacak olan

plastik detektörler, 1,2 x 1,2 cm boyutunda kesilip numaralandırılmıştır ve plastik kapların dibine tutturulmuştur (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Radon ölçümleri için hazırlanan plastik dedektörler

3.2.2 Radon Ölçüm İstasyonlarının Oluşturulması

Kozak/Bergama yaylasında yer alan Kozak Köylerinde 19 tane radon gözlem istasyonu oluşturulmuştur (Şekil 3.5). Bu istasyonlardan 18 tanesi granit alan içinde, 1 tanesi (Tıfillar Köyü) normal alan içinde bulunmaktadır. İstasyonlar ve özellikleri Tablo 3.1 altında detaylandırılmıştır. Her bir istasyonda yerinde gama ve doz ölçümleri yapılmıştır.

Tablo 3.1 Radon gözlem istasyonlarının özellikleri

Film No	Köy İsmi	Koordinatlar	Sayım Hızı (sayım/sn)
1	Yukarıbey Köyü	35 S 0507944 UTM 4344890	Dışarıda: 90 İçerde: 150
2	Karaveliler Köyü	35 S 0512889 UTM 4349021	Dışarıda: 90 İçerde: 130
3	Kıranlı Köyü	35 S 0513702 UTM 4350431	Dışarıda: 120 İçerde: 140
4	Çamavlu Köyü	35 S 0512178 UTM 4352408	Dışarıda: 90 İçerde: 150
5	Güneşli Köyü	35 S 0510851 UTM 4355049	Dışarıda: 155 İçerde: 140
6	Yukarıcuma Köyü	35 S 0508278 UTM 4352149	Dışarıda: 140 İçerde: 160
7	Terzihaliler Köyü	35 S 0505902 UTM 4349133	Dışarıda: 135 İçerde: 135
8	Hacıhamzalar Köyü	35 S 0503926 UTM 4349441	Dışarıda: 90 İçerde: 120
9	Aşağıcuma Köyü	35 S 0501260 UTM 4346971	Dışarıda: 110 İçerde: 130
10	Bağyüzü Köyü	35 S 0477178 UTM 4350573	Dışarıda: 90 İçerde: 100
11	Okçular Köyü	35 S 0497006 UTM 4348655	Dışarıda: 100 İçerde: 100
12	Hacıbozlar Köyü	35 S 0500956 UTM 4352960	Dışarıda: 120 İçerde: 130
13	Demircidere Köyü	35 S 0493098 UTM 4346345	Dışarıda: 100 İçerde: 80
14	Göbeller Köyü	35 S 0501685 UTM 4344945	Dışarıda: 110 İçerde: 130
15	Aşağıbey Köyü	35 S 0494443 UTM 4346122	Dışarıda: 80 İçerde: 120
16	Hisar Köyü	35 S 0501634 UTM 4344937	Dışarıda: 120 İçerde: 100
17	Ayvatlar Köyü	35 S 0498451 UTM 4346510	Dışarıda: 100 İçerde: 110
18	Kaplan Köyü	35 S 0508088 UTM 4344924	Dışarıda: 130 İçerde: 130
19	Tıfıllar Köyü*	35 S 0490129 UTM 4350852	Dışarıda: 100 İçerde: 100

* Normal alan



Şekil 3.5 Kozak köylerinde oluşturulan radon gözlem istasyonları.

Radon ölçümleri için hazırlanan kaplar, köy muhtarlık odaları içinde uygun bulunan yerlere, yerden 150-200 cm yukarıya asılmıştır (Şekil 3.6). Her bir istasyona 1 detektör yerleştirilmiştir. Alfa duyarlı LR-115 dedektörleri, radon ve ürünlerini toplaması için 5 hafta süre ile bırakılmıştır. Uzun süreli entegre ölçüm tekniği, ölçümlerde oluşabilecek istatistiksel hatalardan kaçınılmasını ve aylık/mevsimlik ortalama radon konsantrasyonu seviyesinin elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.6 Radon dedektörlerinin oda içlerinde asıldığı yerler

3.2.3 LR-115 Plastik Detektörlerin İşlenmesi ve İz Yoğunluğunun Ölçümü

Kimyasal kazıma işleminde; iz detektörleri, 60 °C sıcaklıkta %10 (2,5 N) NaOH çözeltisinde 120 dakika boyunca banyo edilmiştir. Tanımsız izler elde etmemek için her bir detektör için taze hazırlanmış 25 ml (2,5 N) NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Çözelti sıcaklığının sabit tutulabilmesi için ± 0.1 °C sıcaklık kontrollü termostat ve

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bergama-Kozak granit alanında gerçekleştirilen bu radyolojik gözlem programı kapsamında, bina içi radon aktivite konsantrasyon düzeyleri saptanmış, bina içi ortamda radon ve ürünlerinin solunması ile alınacak dozlar hesaplanmış ve sonuçlar radyolojik risk açısından değerlendirilmiştir.

4.1 Bina İçi ²²²Rn Aktivite Konsantrasyonları ve Dağılımları

Bergama-Kozak Granit alanında yapılan bu çalışmada, granit alan içinde 18 ve normal alan içinde 1 olmak üzere toplam 19 köyün muhtarlık binalarında bina içi radon konsantrasyonu ölçülmüştür. Muhtarlık odalarında gözlenen radon konsantrasyonları Tablo 4.1 de verilmiştir. Tablo 4.1’de, LR-115 katı hal iz dedektörleri üzerindeki iz yoğunluğu (iz/cm^2) dedektör kalibrasyon parametresi ($k=0.106 \text{ Bq}^{-1}\text{m}^3 \text{ iz cm}^{-2} \text{ gün}^{-1}$) kullanılarak radon aktivite konsantrasyonu Bq/m^3 olarak verilmiştir.

Tablo 4.1 Bergama-Kozak Granit alanı köylerinde bina içi Radon gazı konsantrasyonları ve yıllık etkin doz eşderleri.

Film No	Köy İsmi	İz Yoğunluğu (İz/cm ²)	²²² Rn Konsantrasyonu (Bq/m ³)	Yıllık Etkin Doz Eşdeğeri (DE)** (mSv/y)
1.	Yukarıbey Köyü	368	105 ± 10	2,65
2.	Karaveliler Köyü	120	34 ± 6	0,87
3.	Kıranlı Köyü	351	100 ±10	2,53
4.	Çamavlu Köyü	154	44 ±7	1,11
5.	Güneşli Köyü	502	144 ± 12	3,62
6.	Yukarıcuma Köyü	136	39 ± 6	0,98
7.	Terzihaliler Köyü	826	236 ± 15	5,96
8.	Hacıhamzalar Köyü	200	57 ± 8	1,44
9.	Aşağıcuma Köyü	628	180 ± 13	4,53
10.	Bağyüzü Köyü	326	93 ± 10	2,35
11.	Okçular Köyü	194	55 ± 7	1,40
12.	Hacıbozlar Köyü	201	57 ± 8	1,45
13.	Demircidere Köyü	89	25 ± 5	0,64
14.	Göbeller Köyü	231	66 ± 8	1,67
15.	Aşağıbey Köyü	165	47 ± 7	1,19
16.	Hisar Köyü	209	60 ± 8	1,51
17.	Ayvatlar Köyü	142	41 ± 6	1,02
18.	Kaplan Köyü	239	68 ± 8	1,72
19.	Tıfıllar Köyü*	109	31 ± 6	0,78

* Normal alan

** Bina içi ortamda radon ve ürünleri arasındaki denge faktörü ortalama 0,4 alınmıştır.

Buna bağılı olarak, çalışılan farklı köylerde ölçülen bina içi ^{222}Rn aktivite konsantrasyonları 25 – 236 Bq m^{-3} aralığında saptanmıştır. Çalışma kapsamında, 4 köyün ICRP tarafından önerilen 100 Bq/m^3 lük kapalı ortam ^{222}Rn aktivite konsantrasyon limitini aştığı görülmektedir. Ayrıca, granit alan sınırlarında bulunan 18 köyün 81 Bq m^{-3} lük ortalama ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu değerinin, normal alan içinde bulunan Tıfillar Köyüne ait ^{222}Rn aktivite konsantrasyonundan (31 Bq m^{-3}) büyük olduğu saptanmıştır.

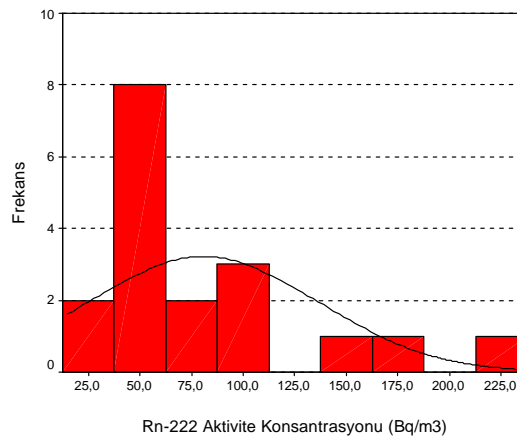
Granit alanda saptanan bina içi ^{222}Rn aktivite konsantrasyonlarının, aritmetik ortalaması, medyanı, geometrik ortalaması, minimum ve maksimum değerleri, standart sapmaları ve aktivite konsantrasyonları değişim katsayısı (%CV= Ölçülen aktivite konsantrasyonlarının standart sapması/aritmetik ortalama) SPSS 8.0 istatistik programı kullanılarak derlenmiştir (Tablo 4.2). Ayrıca, bina içlerinde saptanan ^{222}Rn aktivite konsantrasyonlarının frekans dağılımları elde edilerek (Şekil 4.1) bu dağılımların normal ve log-normal dağılım fonksiyonları ile uygunluğu tartışılmıştır.

Tablo 4.2 Bina içi ^{222}Rn aktivite konsantrasyonlarının medyan, aritmetik ortalama, aritmetik ortalamasının standart hatası (OSH), standart sapma (SS), geometrik ortalama, değişim katsayısı (CV), geometrik değişim katsayısı (GCV), menzil ve frekans dağılımlarının skewness ve kurtosis katsayıları

	^{222}Rn (Bq m^{-3})
Medyan	58,60
Aritmetik Ortalama \pm OSH	80,70 \pm 13,11
S.D.	55,62
Geometrik Ortalama	67,47
CV (%)	68,92
GCV(%)	82,43
Menzil	25,44 – 236,13
Skewness	1,71
Kurtosis	2,69
Frekans dağılımı	Log-normal

Frekans dağılımlarının normal ve log-normal dağılım fonksiyonları ile karşılaştırılmasında, Kolmogorov-Smirnov normalite testi yanında kullanılan daha basit bir yöntem, dağılımların aritmetik ortalaması, medyan ve geometrik ortalamasının karşılaştırılmasıdır (Karadeniz ve Yaprak, 2008; Camgöz ve Yaprak,

2009). Normal dağılımlarda aritmetik ortalama ile medyan benzer iken, log-normal dağılımlarda geometrik ortalama ile medyan birbirine benzer olmaktadır (Blagoeva ve Zikovssky 1995; Al-Hamarneh et al., 2003). Bu doğrultuda, normal dağılımın aritmetik ortalama, log-normal dağılımların ise medyan değeri ile ifade edilmesi önerilmektedir. Elde edilen ^{222}Rn aktivite konsantrasyonu dağılımına uygulanan Kolmogorov-Smirnov normalite testi ($\alpha = 0,05$ anlam düzeyinde) ve gözlenen medyan ve geometrik ortalama değerlerinin benzer olması bu histogramların Log-normal dağılıma uyduğunu göstermiştir.



Şekil 4.1 ^{222}Rn aktivite konsantrasyonlarının (Bq m⁻³) frekans dağılımı.

4.2 Bina İçi Radona Maruz Kalma Sonucunda Alınan Etkin Dozlar

Ölçülen bina içi radon konsantrasyonlarına karşılık gelen ortalama yıllık efektif doz eşdeğeri, 9 nSv (Bq saat m⁻³)⁻¹ doz dönüşüm katsayısı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama için, UNSCEAR (2000) tarafından verilen model kullanılmıştır:

$$H = C \times F \times O \times T \times D \quad (4.1)$$

Burada C bina içi radon konsantrasyonu ($Bq\ m^{-3}$), F eşdeğer denge konsantrasyon faktörü (0.4), O bina içi kullanım oranı (%80), T zaman ($8760\ saat\ yil^{-1}$) ve D doz donüŐüm katsayısıdır.

Çalışılan granit alan içinde, kapalı ortamda radon aktivitesinden kaynaklanan etkin dozlar 0.64 ile $5.96\ mSv\ y^{-1}$ aralığında değişmektedir (Tablo 4.1). Bina içi radondan kaynaklanan en düşük doz Demircidere köyünde bulunurken, en yüksek doz Terzihaliler köyünde bulunmuŐtur.

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) tarafından bina içi ortamda radon ve ürünlerinin solunması ile alınacak dozun $20\ mSv/yil$ 'ı aŐmaması istenmektedir. Çalışma kapsamında saptanan etkin doz eşdeğerleri ICRP tarafından önerilen değerinin altında olmakla birlikte, bazı köylere ait verilerin dünya ortalaması olan $1.15\ mSv\ y^{-1}$ değerinden (UNSCEAR 2000) yüksek olduğu görülmektedir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışılan Bergama-Kozak Granit alanında bina içi radon konsantrasyonları belirlenmiş ve radon nedeniyle köy halkının maruz kaldığı radyasyon dozları tahmin edilmiştir. Bina içi radon aktivite konsantrasyonları 25 – 236 Bq m⁻³ aralığında saptanmıştır. Radondan kaynaklanan etkin dozların 0.64 ile 5.96 mSv y⁻¹ aralığında değiştiği belirlenmiştir. Çalışmada granit alan içinde bulunan köylerde bina içi radon konsantrasyonlarının normal alanlara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ölçülen radon konsantrasyonları TAEK tarafından önerilen 400 Bq/m³ lük sınır değerini aşmamaktadır ve radyolojik risk oluşturmayacak düzeydedir.

WHO ve IAEA tarafından yapılan tavsiyeler dikkate alındığında, incelenen binaların %95 inin güvenli sınırlar içinde olduğu, diğer taraftan USEPA tarafından yapılan 148 Bq m⁻³ lük limit dikkate alındığında ise incelenen binaların %11 inin güvenli sınırlar içinde olduğu görülmektedir.

Bina içi radon aktivite konsantrasyonlarının mevsimsel meteorolojik koşullar ile büyük değişim gösterdiğinden, doğal radyoaktivite düzeyinin yüksek olduğu bilinen Bergama-Kozak köylerinde radon ölçümlerinin farklı mevsimlerde tekrarlanması gerekmektedir. Ayrıca, muhtarlık binalarının betonarme yapıda olmakla birlikte köylerde bazı evlerin doğal taşlardan inşa edilmiş olduğu gözlenmiştir. Bu anlamda, çalışmanın taş binalarda da tekrarlanması radyolojik açıdan önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Akyürek, B. (1989-a) 1/ 100 000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Balıkesir - G4 Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi 12s. (Yayımlanmamış).
- Akyürek, B. (1989-b). 1/ 100 000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Balıkesir - G3 Paftası, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi 8s. (Yayımlanmamış).
- Al Hamarneh, I., Wreikat, A., Toukan, K., 2003. Radioactivity concentrations of ⁴⁰K, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁸Pu and ²³⁹⁻²⁴⁰Puradionuclides in Jordanian soil samples. *Journal of Environmental Radioactivity* 67, 53-67.
- Altunkaynak, Ş. and Yılmaz, Y., (1998) The mount Kozak magmatic complex, Western Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal research* 85, 211-231.
- Benda, L., Innocenti, F., Mazzuoli, R., Radicati, F. ve Steffens, P., (1974). Stratigraphic and radiometric data of the Neogene in Northwest Turkey: Z. *Deutsch. Geol. Ges.* 125, 183-193.
- Blagoeva, R., Zikovsky, L., 1995. Geographic and vertical distribution of Cs-137 in soils in Canada. *Journal of Environmental Radioactivity* 27 (3), 269-274.
- Borsi, S., Ferrara, G., Innocenti, F., ve Mazzuoli, R., (1972). Geochronology and petrology of recent volcanics in the Eastern Aegean sea: *Bull. Volcan.*, 36/I, 473-496.
- Camgöz, Y.I., Yaprak, G., 2009. Küçük Menderes Havzası Tarım Topraklarında Doğal Radyonüklit Seviyesinin Belirlenmesi, *Ekoloji*, 18, 70, 74-80.
- Ejima, Y., Fujina, T. Takagi, H., Shimada, K., Iwanaga, T., Yoneda, Y., Murakomi, Y., 1987. *The pre-feasibility study on the Dikili-Bergama geothermal development project in the Republic of Turkey. Progress Report II.*

Ercan, T., Türkecan, A., Akyürek, B., Günay, E., Çevikbaş, A., Ateş, M., Can, B., Erkan, M. ve Özkirişçi, C., (1984). *Dikili-Bergama-Çandarlı (Batı Anadolu) Yöresinin Jeolojisi ve Magmatik Kayaçlarının Petrolojisi*: Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 20, 47-60

ICRP (1990), *Recommendations of the International Commission on radiological Protection., Publication 60. Ann. Pergamon. Pres, Oxford. International Commission on radiation, Protection.*

Karadeniz Ö, Yaprak G (2008) Geographical and vertical distribution of radiocesium levels in coniferous forest soils in Izmir. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 277(3): 567-577.

Krushensky, R.D., 1976. Volcanic rocks of Turkey. *Bulletin of Geological Survey, Japan*, 26–393

UNSCEAR 1982 Report, *United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations*, United Nations, New York.

UNSCEAR 1988 Report, *United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations*, United Nations, New York.

UNSCEAR 1993 Report, *United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations*, United Nations, New York.

UNSCEAR 2000 Report, *United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations*, United Nations, New York.

Yaprak, G., Yener, G., 1988. *Uranyum Keşfi için Katı Hal İz Kazıma Dedektörleri ile Toprak Gazı Radon Ölçümü ve Fiziksel Parametrelerinin İncelenmesi*, Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

- Yaprak, G., 1999 Indoor Rn-222 Concentrations in the Vicinity of a Turkish Coal-Fired Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*. 46 (1), 131-135
- Yaprak, G., Kaya, O., Candan, O., Batmaz, İ., Gür, F., Camgöz, B., 2003. *Aktif Gediz Grabeninde Yer Alan Alaşehir/Manisa Yöresinde Tektonik Aktiviteye Dayalı Radon Anomalilerinin İncelenmesi*. TÜBİTAK Proje no:100Y059.
- Yaprak, G., 2009. *Çevresel Radyoaktivite I ve II Ders Notları* (yayınlanmamış), E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü.
- Yaprak, G., 2010. *Nükleer İz Dedektörlerinin Uygulamaları Ders Notları* (yayınlanmamış), E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Elmas, A., Gürer, F.Ö. ve Altunkaynak, Ş., (1996). *Bergama Grabeni ve Çevre Alanlarda Genç Magmatizma ile Tektonizma İlişkilerinin Araştırılması*, Tübitak, Üniversite-MTA Ulusal Deniz Jeolojisi ve Jeofiziği Programı, YDABÇAG 228/G, 4-10.
- Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Karacık, Z., ve Altunkaynak, Ş., (2001). Two contrasting magmatic associations of NW anatolia and their tectonic significance. *Journal of Geodynamics* 31, 243- 271.