

Eskişehir İlinde Kapalı Ortam Radon Yoğunlukları İçin
Mevsimsel Düzeltme Faktörlerinin Belirlenmesi

Hacı Soğukpınar
DOKTORA TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Nisan 2013

Determination of Seasonal Correction Factors
For
Indoor Radon Concentrations In Eskisehir

Hacı Soğukpınar
DOCTORA THESIS

Department of Physics

April 2013

Eskişehir İlinde Kapalı Ortam Radon Yoğunlukları İçin
Mevsimsel Düzeltme Faktörlerinin Belirlenmesi

Hacı Soğukpınar

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Ana Bilim Dalında
Nükleer Fizik Bilim Dalı
DOKTORA TEZİ
Olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Emel ALĞIN

Nisan -2013

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Hacı Soğukpınar'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Eskişehir İlinde Kapalı Ortam Radon Yoğunlukları İçin Mevsimsel Düzeltme Faktörlerinin Belirlenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizece lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Emel ALĞIN

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof.Dr. M. Celalettin BAYKUL

Üye: Prof. Dr. Zeki YILDIZ

Üye: Doç. Dr. Latife ŞAHİN

Üye: Yrd.Doç. Dr. Sertaç EROĞLU

Üye: Prof. Dr. Emel ALĞIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr.Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışma Eskişehir ili merkezinde 2010 ile 2012 yılları arasında evlerde radon gazı ölçümü sonuçları ile radon yoğunluğunun değişimini incelemek üzere yapılan bazı analizlerden oluşmaktadır. İlk yıl (2010) dört mevsim (kış, ilkbahar, yaz, sonbahar) için 3 aylık periyotlar şeklinde toplamda 516 adet evde LR-115 detektörleri kullanılarak radon gazı ölçümleri yapılmıştır. Her bir ölçüm döneminde bir adet yatak odası bir adet oturma odası olmak üzere toplam iki adet detektör yedekleri ile birlikte evlere yerleştirilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre ev içi radon yoğunluğu, kış ve sonbahar mevsimlerinde yaz ve ilkbahar mevsimlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Ev içi ortalama radon yoğunluğu 25 ile 422 Bq/m³ arasında değişmektedir. Mevsimsel ölçüm sonuçlarına göre ayrıca ev içi radon yoğunluğunun katlara göre analizi yapılmış, mevsimsel ve yıllık ölçüm sonuçları kıyaslanmış, mevsimsel radon yoğunluğu sinüs fonksiyonu ile fit edilmiş ve hata hesabı yapılmıştır.

İkinci yılda (2011-2012) Eskişehir ili merkezindeki toplam 825 evde 3 aylık periyotlarda toplamda 12 dönem ölçüm yapılmıştır. Bu süreçte belirlenen evlere her ayın 10 ile 15. günleri arasında detektörler dağıtılmış üç ayın sonunda toplanarak analiz edilmiştir. Yapılan bu ölçümlerde Eskişehir ili için mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması amaçlanmıştır. Bu kısımda iki farklı mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır. İlk hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörü 2010-2011 yılları arasında 4 ayı kapsayan (üç aylık periyotlarla dört dönem için) ölçüm sonuçlarına göre olup eksik olan 8 dönemlik veriler bir sinüs fonksiyonu ile tahmin edilmiştir. 4 dönemlik ölçüm sonuçlarına göre mevsimsel düzeltme faktörleri 0,7 ile 1,3 arasında değişmektedir. Diğer mevsimsel düzeltme faktörü 12 ayı kapsayan (üç aylık periyotlarla 12 dönem için) ölçüm sonuçlarına göre olup 0,55 ile 1,45 arasında değişmektedir.

Bu çalışmada konu bütünlüğünün sağlanması açısından ölçüm yapılan mahallelerden 10 adet toprak numunesi alınarak topraktaki radyoaktif çekirdek yoğunluğu yüksek çözünürlüklü gama ışın spektroskopisi yöntemi ile incelenmiştir.

Anahtar kelime: Radon, Mevsimsel Düzeltme Faktörü, LR-115, Radyoaktivite, t testi, ANOVA, F testi.

SUMMARY

This study presents results of indoor radon measurements and some analysis to investigate seasonal variations of radon concentrations in dwellings over two consecutive years, 2010 and 2012, in downtown Eskisehir, Turkey. During the first year (2010), data were collected in 516 dwellings using LR-115 track detectors over the three month periods to represent four seasons (winter, spring, summer, and autumn). The detectors were placed so that there was one in the living room and another in the bedroom. The results clearly showed seasonal differences in radon concentrations being higher for winter and autumn seasons than the spring and the summer seasons. Yearly average indoor radon concentrations range from 25 to 422 Bq/m³. Furthermore in this study, indoor radon concentrations with respect to the floor level were analyzed, seasonal and yearly results were compared, seasonal variation of radon concentrations was estimated with a sinus function, and error estimations were calculated.

In the second year (2011), measurements were performed in 825 dwellings over twelve successive three months periods. During these periods, the detectors were distributed to dwellings in the first half of the month and collected 3 months later for the analyses. The measurements were used to derive a set of seasonal correction factors specifically for Eskisehir. For this, two different seasonal correction factors were estimated and the two results were compared. The first seasonal correction factor was calculated by using the seasonal measurements obtained from years 2010 and 2011, the missing data were estimated by fitting the data with a sinus function. Seasonal correction factors obtained from measurements associated with four months varied from 0,7 to 1,3. The other set of seasonal correction factors calculated using the results of 12 month radon measurement periods. The seasonal correction factors varied from 0,55 to 1,45.

In this study, for the sake of completeness, radionuclide activity concentrations in 10 soil samples collected from the study area using high-efficiency gamma ray spectroscopy method were also measured.

Keywords: Radon, Seasonal Correction Factors, LR-115, Radioactivity, t test, ANOVA, F test.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimi süresi boyunca, ders aşamasından deneysel çalışmaya ve tez aşamasına kadar her zaman yardım ve desteklerini esirgemeyen, çalışkanlığı ile ufkumu açan saygıdeğer büyüğüm, danışman hocam sayın Prof. Dr. Emel ALĞIN hocama teşekkür ederim.

Eskişehir ili merkezinden alınan 10 adet toprak numunesinin Kütahya Dumlupınar Üniversitesinde analiz edilmesinde yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Latife ŞAHİN hocama ve numunelerin analizinde doğrudan yardımcı olan Araştırma Görevlisi Hakan ÇETİNKAYA'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen dönem arkadaşlarımdan Melekşah ALTINSÖZ ve Kürşat Osman AY, Araş. Gör. Hakan ÇETİNKAYA ve Araş. Gör. Celal AŞICI'ya, Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi çalışanlarından Dr. Nilgün ÇELEBİ'ye ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'ndeki tüm hocalarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem, babam ve kardeşlerime, doktora süresi boyunca bana desteğini esirgemeyen değerli eşim Fatma SOĞUKPINAR ve biricik kızım Esmâ Elif SOĞUKPINAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım süresince radon gazı ölçümleri için evlerini bana açan Sevgi Çiçeği Anafen dershanesi müdürü, dersane öğretmen ve velilerine ve Eskişehir halkına teşekkür ederim.

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 2010/19014 No'lu "Mevsimsel Ve Yıllık Ortalama Radon Yoğunluğu Ölçümü Ve Mevsimsel Düzeltme Faktörü Hesabı" isimli proje ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
1.GİRİŞ.....	1
2. RADYASYON VE RADYOAKTİVİTE.....	7
2.1. Radyoaktivite.....	7
2.1.1. Madde içinde iyonlaşma.....	10
2.1.2. Canlı dokularda iyonlaşma.....	11
2.1.3. İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları.....	13
2.1.4. İyonlaştırıcı radyasyonun etkileri.....	13
2.1.5. İyonlaştırıcı radyasyonda risk ölçümleri.....	14
2.2. Doğal İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları.....	15
2.2.1. Doğal gama radyasyonu.....	16
2.2.2. İç radyasyon.....	17
2.2.3. Uranyum.....	18
2.2.4. Toryum.....	19
2.2.5. Radon gazı.....	19
2.2.6. Potasyum-40.....	20
2.2.7. Kozmik ışınlar.....	21
2.3. Yapay Radyasyon Kaynakları.....	22
2.3.1. Nükleer silah denemeleri.....	22
2.3.2. Çernobil kazası.....	22
2.3.3. Radyoaktif atıklar.....	23
2.3.4. Nükleer kirlilik.....	23
2.4. İyonlaştırıcı Radyasyonun Tıpta Kullanımı.....	25
2.4.1. Hastalıkları teşhiste iyonlaştırıcı radyasyon.....	25

İÇİNDEKİLER (devam)

2.4.2. Nükleer ilaçlar.....	26
2.4.3. Radyoterapi.....	26
2.4.4. Mesleğe bağlı radyasyona maruz kalma.....	27
2.5. Elektromanyetik Alan Ve Radyasyon.....	28
3. RADON.....	30
3.1. Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri.....	30
3.2. Toprakta Radonun Oluşumu.....	33
3.3. Farklı Derinliklerdeki Radon Yoğunluğu.....	36
3.4. Atmosferde Radon Yoğunluğu.....	37
3.5. Suda Radon Yoğunluğu.....	39
3.6. Evlerde Yapı Malzemesinden Kaynaklanan Radon Yoğunluğu.....	40
3.7. Ev İçinde Radon Gazı Dağılımı.....	42
3.8. Evlerde Gün İçi Radon Yoğunluk Farklılıkları.....	43
3.9. Ev İçi Radon Yoğunluğunun Mevsimsel Değişimi.....	44
3.10. Evlerdeki Radon Yoğunluğunun Logaritmik Dağılımı.....	45
3.11. Mevsimsel Düzeltme Faktörü.....	46
4. RADON GAZI ÖLÇÜMÜ.....	53
4.1. Katı Hal İz Detektörleri.....	53
4.2. İz Detektörlerinde Polimerler Kullanımı.....	54
4.3. İz Detektörlerinin Tasarlanması.....	55
4.4. Detektör Üzerinde İz Oluşum Mekanizması.....	56
4.5. İzlerin Enerji Bağımlılığı.....	59
4.6. İstenmeyen İzlerin Oluşmasını Engelleme.....	60
4.7. Kimyasal İz Kazıma Metodu.....	62
4.8. İz Sayma Metodu Ve İstatistiksel İncelenmesi.....	63
4.9. İz Detektörlerinin Kalibrasyonu Ve Uluslararası Karşılaştırma.....	65
4.10. Detektörleri Dış Etkilerden Koruma.....	67
4.11. Kalite Kontrol İşlemleri.....	68

İÇİNDEKİLER (devam)

5. ESKİŞEHİR İLİ MERKEZİNDE EVLERDE RADON GAZI ÖLÇÜMÜ VE MEVSİMSEL DÜZELTME FAKTÖRÜNÜN HESAPLANMASI	69
5.1. Eskişehir'in İklim Ve Jeolojik Yapısı.....	69
5.2. Önceki Çalışmalar.....	71
5.3. Detektörlerin Kalibre Edilmesi.....	75
5.4. Evlerde Radon Gazı Ölçümü Ve Mevsimsel Düzeltme Faktörü Hesabı.....	78
5.4.1. Malzeme ve yöntem.....	78
5.4.2. İl merkezinde radon gazı ölçüm sonuçları.....	84
5.4.3. Eskişehir'de ev içi radon yoğunluğunun katlara göre değişimi.....	86
5.4.4. Mevsimsel radon yoğunluğunun sinüs fonksiyonu ile fit edilmesi.....	89
5.4.5. Mevsimsel ve yıllık radon gazı ölçümlerinin kıyaslanması.....	90
5.4.6. Eskişehir için birey başına düşen etkin dozun hesaplanması.....	91
5.4.7. Evlerdeki radon yoğunluğunun bağıl hatası.....	96
5.4.8. Dört dönemlik veriler ile mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması.....	99
5.4.9. 12 dönemlik ölçümlere bağlı olarak mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması.....	101
5.5. Eskişehir İli Merkezinde Karasal Radyasyonun Ölçülmesi.....	103
5.5.1. Karasal radyasyon.....	103
5.5.2. Gama spektroskopisi.....	107
5.5.3. Eskişehir ili merkezinde toprak analizi.....	110
6. ESKİŞEHİR'DE RADON GAZI ÖLÇÜMLERİNİN t TESTİ İLE ANALİZİ	115
7. SONUÇ VE TARTIŞMA	127
KAYNAKLAR DİZİNİ	133
EKLER	141
A. Mevsimsel Düzeltme Faktörünün Hesaplanması İçin Gerekli Matlab Programı.....	141
B. En Küçük Kareler Yöntemi (OLS).....	148
C. İyonlaştırıcı Radyasyon Doz Birimleri.....	152

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sırası ile iyonlaştırıcı radyasyon (a) ve nükleer radyasyonun (b) sembolü.....	8
2.2. Radyasyon türleri verilmiştir.....	10
2.3. Yüklü parçacıkların atomu iyonlaştırması.....	11
2.4. Alfa, beta, nötron ve gama ve X ışınlarının madde ortamındaki girişkenlikleri.....	13
2.5. Dünya genelinde insanların maruz aldığı doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının etki oranları.....	17
2.6. Farklı yüksekliklerde kozmik ışınlardan kaynaklanan doz miktarları.....	21
2.7. Nükleer kirliliğin ekosistemi etkilemesi.....	24
2.8. Işık spektrumu.....	29
3.1. Radonun oluşum mekanizması.....	34
3.2. Ev içi radon yoğunluğunun havalandırmaya bağlı değişimi.....	45
3.3. Radon gazının evlere giriş yolları.....	46
4.1. Yüklü iyonların polimer moleküllerini makaslaması.....	56
4.2. Kimyasal işlemler yardımı ile iz oluşumu.....	58
4.3. İz oluşumunda kritik açı.....	59
4.4. Brag eğrisi, enerji kayıp oranının kalan enerjiye bağlı grafiği.....	61
4.5. Optik mikroskop ile iz sayımında izlenecek aşamalar.....	65
5.1. Eskişehir haritası.....	70
5.2. Kalibrasyon eğrisi.....	78
5.3. Filmlerin bardağa yerleştirilmesi filmlerin yukarıdan (a) ve yandan görünüşü (b).....	81
5.4. Filmlerin renkli iplere tutturulması (a) ve beher bardağına yerleştirilmesi (b).....	82
5.5. Filmlerin kimyasal işleme tutulduğu banyo havuzu.....	83
5.6. Filmlerin kurutulmadan önce durulanmasında kullanılan manyetik karıştırıcılar.....	83
5.7. Kimyasal işlemlerin ardından filmlerin lam içine yerleştirilmesi (a) ve optik mikroskop altında izlerin (beyaz noktalar) görünüşü (b).....	84
5.8. Evlerdeki radon yoğunluğunun mevsimlere bağlı değişim grafiği.....	85
5.9.a Aralık 2010-Mart 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.....	87
5.9.b. Mart 2011-Haziran 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.....	87

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

5.9.c. Haziran 2011-Eylül 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.....	87
5.9.d. Eylül 2011-Aralık 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.....	87
5.10. Bina içi radon yoğunluğunun katlara göre değişimi.....	88
5.11. Mevsimsel radon yoğunluğu verilerinin sinüs fonksiyonu ile fiti.....	91
5.12. Seçilen 61 ev için mevsimsel ölçüm sonuçlarının ortalaması ile yıllık ölçüm sonuçlarının kıyaslanması.....	93
5.13. Dört dönemlik radon yoğunluğu verilerinin sinüzoidal fonksiyon ile uyumu.....	100
5.14. Eskişehir il merkezinde 4 dönemlik radon gazı ölçümleri ile hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörleri ile, İngiltere ve İrlanda'nın mevsimsel düzeltme faktörlerinin karşılaştırılması.....	101
5.15. Eskişehir il merkezinde 12 dönemlik radon yoğunluğu ölçümleri ile hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörlerinin, İngiltere ve İrlanda mevsimsel düzeltme faktörleri ile kıyaslanması.....	103
5.16. Eskişehir il merkezinde 4 dönem ve 12 dönem bina içi radon yoğunluğu verileri ile hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörlerinin kıyaslanması.....	104
5.17. NaI(Tl) foto çoğaltıcı tüpün şematik gösterimi.....	109
5.18. Gama spektroskopi sistemi.....	109
5.19. Eskişehir il merkezinden alınan 1 numaralı toprak numunesinin gama spektrumu.....	112

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Radon ve toron atomlarının bozunması sonucu oluşan ürün çekirdekler, yarı ömürleri ve bozunma enerjileri	1
2.1. İngiltere’de yıllık kişi başına düşen doğal radyasyon doz değerleri	17
2.2. Uranyum izotopları	18
2.3. Farklı kaya türlerindeki uranyum oranları	19
2.4. Potasyumun izotopları	20
2.5. Yapay olarak üretilen kararsız çekirdekler	24
2.6. Hastalıkların teşhisinde kullanılan nükleer doz miktarları	26
2.7. İngiltere’de iş yeri ortamından kaynaklanan yıllık radyasyon doz değerleri	28
3.1. Radon atomunun genel özellikleri	30
3.2. Radon elementinin fiziksel özellikleri	31
3.3. Farklı ortamlardaki radon izotoplarının difüzyon mesafeleri	33
3.4. Alfa bozunması ile geri tepen çekirdeğin silis içindeki menzili	35
3.5. Farklı minerallerin emanasyon kesri	36
3.6. Farklı ortamlardaki radon miktarları	40
3.7. Bazı İsveç ev yapı malzemelerindeki Ra ve Th oranları	42
3.8. Bazı Alman ev yapı malzemeleri ve atıklardaki radyum, toryum oranı	42
3.9. Alman evlerinde farklı katlardaki radon miktarları	43
5.1. Eskişehir için ortalama iklim değerleri	72
5.2. 21 – 25 Mart 2011 tarihli veri setleri	77
5.3. Evlerdeki radon yoğunluğunun mevsimsel ve yıllık ölçümler için istatistikler	85
5.4. Binaların 1. katlarında ölçülen radon yoğunluğunun mevsimsel ölçümler için istatistiksel analizi	89
5.5. Binaların üst katlarındaki (zemin ve 1.kat hariç) ölçülen radon yoğunluğunun mevsimsel ölçümler için istatistiksel analizi	89
5.6. Dört mevsimde, evlerde ölçülen radon yoğunluğunun geometrik ortalamasının doğal logaritma değerleri	90
5.7. Dört mevsimde, evler için tahmin edilen radon yoğunluğunun geometrik ortalamasının doğal logaritma değerleri	91

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

5.8. Bağlı hata hesabı için belirlenen filmlerin iz sayısı ve hesaplanan kalibrasyon sabitleri.....	99
5.9. Evlerde yapılan 4 dönemlik radon gazı ölçümlerine bağlı olarak 12 dönem için hesaplanan mevsimsel d değerleri, m değerleri, f değerleri, İngiltere ve İrlanda'nın f değerleri.....	101
5.10. Eskişehir Eskişehir il merkezinde 12 dönemlik bina içi radon yoğunluğu ölçümlerine bağlı olarak hesaplanan d, m, f ve geometrik standart hata değerleri.....	103
5.11. Toryum (^{232}Th) bozunma serisinde oluşan gama ışını enerjileri.....	107
5.12. Uranyum (^{238}U) bozunma serisinde oluşan gama ışını ve enerjileri.....	107
5.13. Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden alınan toprak örnekleri için ölçülen ve hesaplanan deneysel veriler.....	112
5.14. Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden alınan toprak numuneleri için ölçülen karasal radyasyonların betimleyici istatistik sonuçları.....	114
6.1. Yıllık veriler için Kolmogorov -Smirnov (K-S) testi.....	117
6.2. Yıllık verilerin logaritmalarının Kolmogorov -Smirnov (K-S) testi.....	118
6.3. Yıllık verilerin logaritmalarının istatistik analiz sonuçları.....	119
6.4. Yıllık verilerin logaritmalarının tek yönlü t testi sonuçları.....	119
6.5. Kış ve yaz dönemi verilerinin Kolmogorov -Smirnov (K-S) test sonucu.....	120
6.6. Kış ve yaz dönemi veri setlerinin grup istatistiği.....	120
6.7. Kış ve yaz dönemi verilerinin logaritmalarının bağımsız grup testi.....	121
6.8. Kış ve sonbahar dönemi veri setlerinin grup istatistiği.....	122
6.9. Kış ve sonbahar dönemi verilerinin logaritmalarının bağımsız grup testi.....	123
6.10. Kış dönemi verilerinin katlara göre tanımlayıcı istatistik sonuçları.....	124
6.11. Kış dönemi veri setlerinin homojenlik testi.....	124
6.12. Kış dönemi verilerinin katlara göre tek yönlü ANOVA testi sonuçları.....	124
6.13. Tukey testi ile katlar arası değerlerin çoklu karşılaştırılması.....	125

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Bq	Becquerel
c	Işık hızı
cm	Santimetre
Ci	Curie
CR-35	Pollyallyl Di-Glycol Karbonat Detektörü
°C	Santigrat
d	Dönemlik Radon Yoğunluğunun Geometrik Ortalaması
DNA	Deoksiribonükleik Asit
e	Elektron
eV	Elektron Volt
E	Enerji
EC	Elektron yakalama
f_{γ}	Gama Yayınlanma Olasılığı
f	Mevsimsel Düzeltme Faktörü
°F	Fahrenayt
g	Gram
Gy	Gray
°K	Kelvin
lt	Litre
LR-115	Selüloz Nitrat Detektörü
m	Kütle
MeV	Mega elektron volt
m	Metre
ml	Mililitre

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
m	Aylık Radon Yoğunluğunun Geometrik Ortalaması
mSv	Milisievert
Pa	Paskal
Ppm	Milyondaki Oran
Q	Enerji
QF	Kalite Faktörü
Ra	Radyum
Rad	Maruz Kalınan Radyasyon Dozu
Rn	Radon
SI	Uluslar Arası Birim Sistemi
Sv	Sievert
T	Tesla
U	Uranyum
ν	Nötrino
$\bar{\nu}$	Anti nötrino
WL	Çalışma Seviyesi
WLM	Aylık Çalışma Seviyesi
α	Alfa
β^-	Beta - bozunumu
β^+	Beta + bozunumu
γ	Gama
$\epsilon\gamma$	Detektör Verimi

KISALTMA**AÇIKLAMA**

ADC	Analogtan Dijitale Dönüştürücü
BEIR	İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkisi Komitesi
ÇKA	Çok Kanallı Analizör
ÇNAEM	Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi
EEC	Eş Denge Yoğunluğu
IRPB	Uluslar arası Radyasyondan Korunma Komitesi
ICRP	Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi
IAEA	Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu
IARC	Uluslar Arası Kanser Araştırma Örgütü
MCA	Çok Kanallı Analizör
NRPB	İngiltere Milli Radyasyondan Korunma Komitesi
OECD	Ekonomik İşbirliği Ve Kalkınma Örgütü
TAEK	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
UNSCEAR	Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyon Komitesi
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Radon gazı toprakta doğal olarak üretilen en çok iyonlaştırıcı etkiye sahip radyasyon kaynağıdır. Radon atomlarının radyoaktif oluşu aynı zamanda gaz oluşu akciğerlere solunumla alınarak insan sağlığına olumsuz etkiler yapmasına yol açmaktadır. En önemli olumsuz etkisi ise radon gazına bağlı akciğer kanseridir. Radon gazı doğrudan akciğer kanserine sebep olmayıp radon gazının bozunması ile oluşan ürün çekirdeklerin akciğer kanserine yol açtığı bilinmektedir. Radon gazı soy gaz grubunun bir üyesi olduğu için kimyasal olarak pasiftir, reaksiyona girmez. Radon gazının yarı ömrü soluk alıp verme süresine göre uzun olduğu için solunumla alınan radon gazı soluk verme ile tekrar bozunmadan dışarı atılır. Radon atomlarının bozunması sonucunda metal atomları (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) oluşur. Bu atomlar havadaki tozlar ve aerosollere yapışarak solunumla akciğere alındıklarında içyapıyı saran akciğer epitelyum dokusuna yapışır, soluk verme sırasında tekrar dışarı atılmazlar. Bozunma ile oluşan ürün çekirdeklerden en uzun yarı ömürlü olan ^{214}Pb 27 dakikadan daha kısa sürede bozunmaktadır. Kısa ömürlü ürün çekirdekler akciğerin kendini normal temizleme periyodundan önce bozunur, hassas epitelyum hücrelerinde tahribata, DNA'nın yapısında mutasyona sebep olabilirler. Bozunma enerjisi en fazla olan ^{218}Po ve ^{214}Po çekirdekleri akciğer hücrelerine en büyük tahribatı yapmaktadır. Radon atomunun ikinci bir izotopu olan toron (^{220}Rn) atomunun bozunması ile ortalama ömrü 0,22 s olan ^{216}Po çekirdeği oluşur. Polonyum (^{216}Po) çekirdeğinin bozunması sonucunda ortalama ömrü 15,2 saat olan bizmut atomları oluşur. Bizmut (^{212}Bi) atomunun yarı ömrü uzun olduğu için akciğerde bozunmadan dışarı atılır. Eğer bizmut atomu alveollere yapışarak hapsolmuş ise bozunma sürecinde oluşan ^{212}Po olumsuz etkilere yol açabilir. (Durrani, 1997). Çizelge 1.1'de radon ve toron atomlarının bozunması sonucu oluşan ürün çekirdekler, yarı ömürleri ve bozunma enerjileri verilmiştir.

Çizelge 1.1. Radon ve toron atomlarının bozunması sonucu oluşan ürün çekirdekler, yarı ömürleri ve bozunma enerjileri.

Radon				
	Sembol	Yarı Ömür	Işıma Sekli	Işıma Enerjisi (MeV)
% 100	²²⁶ Ra	1,600 y	α	4,8 (% 95)
	²²² Rn	3,82 g	α	5,5 (% 100)
	²¹⁸ Po	3,11 d	α	6,0 (% 100)
	²¹⁴ Pb	26,8 d	β	0,65 (% 50) 0,35 (% 36)
	²¹⁴ Bi	19,7 d	γ	3,3 (% 19) 0,61 (% 47)
	²¹⁴ Po	164 μ s	α	7,7 (% 100)
	²¹⁰ Pb	21 y	β	0,016 (% 85)
	Toron			
% 64	²²⁴ Ra	3,64 g	α	5,68 (% 94)
	²²⁰ Rn	55 s	α	6,29 (% 100)
	²¹⁶ Po	0,15 s	α	6,78 (% 100)
	²¹² Pb	10,6 s	β	0,35 (% 81)
	²¹² Bi	60,6 d	β	2,27 (% 54)
	²¹² Po	0,304 μ s	α	8,78 (% 100)
Veya	²⁰⁸ Pb	Kararlı		
% 36	²¹² Bi	60,6 d	α	6,05 (% 70)
	²⁰⁸ Tl	3,1 d	β	1,8 (% 50)
	²⁰⁸ Pb	Kararlı	γ	0,58 (% 86)

Toron atomunun yarı ömrünün çok kısa oluşu normal şartlarda ortamdaki yoğunluğunun az olmasına sebep olmuştur. Radon gazı ölçümlerinde genellikle ^{222}Rn izotopu kastedilir. Çoğu zaman toron ihmal edilir. Toron atomları ortamda fazlaca bulunursa aynı şekilde olumsuz sağlık etkilerine yol açabilir. Örneğin monazit minerallerinin olduğu bölgelerde toron etkisini fazlaca göstermektedir (Durrani, 1997).

Temiz havada radon atomlarının bozunması sonucu oluşan ürün çekirdekler havada 10^{-3} atom/cm³ oranında bulunur. Şehirlerde bu oran 10^5 atom/cm³ değerine kadar çıkabilir. Kapalı ortamlarda ürün çekirdeklerin yapışacağı fazlaca yüzey (duvar, mobilya, halı, aeresoller vs.) bulunur. Evlerde radon atomları ve bozunma sonucu oluşan ürün çekirdekler çoğunlukla aktif dengeye ulaşamaz, ürün çekirdek oranı her zaman daha düşük kalır. Bu da insan sağlığı açısından faydalı bir durum oluşturur.

Radon gazına bağlı akciğer kanseri en çok uranyum maden işçilerinde rapor edilmiştir. Akciğer kanseri 1500 yılında maden işçilerinde ilk defa akciğer hastalığı olarak geçmiştir. Bu hastalığın akciğer kanseri olarak tanımlanması 1879 yılında gerçekleşmiştir. Radon gazının akciğer kanseri üzerindeki etkisi 1932 yılına kadar tahmin dahi edilememiş, 1960 yılına kadar etkisi ancak kabul edilebilmiştir. İlk defa Bale (1951) ve Harley (1952) akciğer kanserinin doğrudan radon atomlarından kaynaklanmadığını ancak radon atomunun bozunması ile oluşan ürün çekirdeklerden kaynaklandığını ortaya atmışlardır. 1988 yılında Uluslar Arası Kanser Araştırma Komitesi (IARC) radon gazını ilk defa kanser yapıcı etken olarak tanımlamıştır (WHO, 2009).

1980 yılından bugüne kadar pek çok bilimsel çalışmada ev içi radon gazı yoğunluğunun akciğer kanseri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Avrupa, Çin ve Kuzey Amerika'da yapılan bilimsel araştırmalar bir araya getirilerek analizler yapılmıştır (Lubin, *et al.*, 2004; Krewski, *et al.*, 2005). Yapılan analizler sonucunda radon gazının akciğer kanserine yol açtığına dair kesin deliller oluşmuştur. 200 Bq/m³'den düşük radyasyon değerlerinde de kansere yakalanma riski bulunmaktadır.

Maden işçilerinde yapılan araştırmalarda erkek işçiler belirli süre boyunca takip edilmekte, madenden ayrılma veya emekli olsa dahi ilerleyen uzun yıllarda bilimsel olarak değişimler not edilmektedir. Yapılan araştırmalarda kansere yakalanan işçilerin sayısı, madende çalışma süresi, maruz kalınan doz, sigara alışkanlığı, yaşı gibi bazı bilgiler analiz edilmektedir. Araştırma sürecinde bazı eksik bilgiler geçmiş sürelerde

maruz kalınan doz konusunda olabilmektedir. Çok eski yıllarda akciğer kanserinden ölen işçi sayısı belirli olabilir ancak o devirlerde radon gazı doz ölçümleri yapılmadığı için maruz kalınan doz miktarı ile ilgili kesin bilgiler bulunmamaktadır. Araştırmalarda radon atomlarından oluşan ürün çekirdeklerin yoğunluğu çalışma düzeyi (WL) ile ifade edilir. 1 çalışma düzeyi, 1 litre havada herhangi kısa ömürlü radon gazı ürün çekirdeklerinden oluşan alfa parçacıklarının $1,3 \times 10^5$ MeV'lik enerji miktarına eşittir. Bir bireyin bu yoğunluktaki radyasyona aylık 170 saat maruz kalmasına 1 çalışma düzeyi ayı denir (WLM).

Dünya genelindeki (Kuzey Amerika, Asya, Avustralya, Avrupa) bazı yer altı maden ocaklarında yapılan bilimsel araştırmalar, 1990 yılında İyonlaştırıcı Radyasyonun Biyolojik Etkisi Komitesi (BEIR, 1999) tarafından bir araya toplanmıştır. Bu araştırma 60.000 yer altı maden işçisi üzerinde yapılmıştır. Araştırılan grubun büyük çoğunluğu uranyum madeninde çalışmaktadır. Diğerleri ise demir, kalay, flor madeni işçilerinden oluşmaktadır. Maden işçilerinden 2.600 birey akciğer kanserinden ölmüştür. Yapılan araştırmaya göre maruz kalınan doz arttıkça kansere yakalanma riski de artmaktadır. Yer altı maden ocaklarında çalışan işçilerde görülen akciğer kanser oranları ev içi radon gazı yoğunluğunun da akciğer kanserine yol açabileceğini kuvvelli bir şekilde ima etmektedir.

Evlerdeki radon gazının akciğer kanserine etkisini araştırmanın en uygun yolu olay kontrollü çalışma (epidemiological study) yapmaktır. Bu çalışmada araştırma yapılan toplum içinden kanserli ve kansere yakalanmamış bireyler belirlenir. Daha sonra bu bireylerle ilgili geçmişe yönelik yaşam stilleri, iş hayatları, sigara alışkanlıkları gibi bazı konularda bilgiler toplanır, analiz edilir, akciğer kanserine sebep olacak etmenler üzerinde çalışılır. Bu çalışmada bireylerin o anda yaşadığı evde radon gazı ölçümleri yapılır. Eğer birey daha önceden farklı yerlerde yaşamış ise oralarda da radon gazı ölçümü yapılır. Bireyin geçmişe yönelik evlerde maruz kaldığı radyasyon miktarı hesaplanmaya çalışılır. Bu çalışma hem kanserli birey hem de kansere yakalanmamış bireyler için yapılarak karşılaştırılır, bilgiler analiz edilir. Akciğer kanserine etken olacak diğer bazı faktörlerin tespiti için özel istatistiksel metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlar yardımı ile bireyler arasındaki bazı ortak özellikler karşılaştırılma imkânı bulur. Örneğin ortak sigara içme alışkanlığı, benzer yaşam stilleri incelenir. İstatistiksel metotlar yardımı ile evlerde maruz kalınan ortalama radon miktarı ile kansere sebep

olan etkenler tahmin edilebilir. Evlerde maruz kalınan radon gazı miktarının akciğer kanserine etkisi üzerine en az 40 farklı olay kontrollü çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar bir havuzda toplanarak ortak analiz yapma imkânı oluşmuştur. Bunun yanında konu ile ilgili 11 çalışma kuzey Amerika'da, 13 çalışma Avrupa'da, 2 çalışma Çin'de olmak üzere toplam 27 olay kontrollü çalışma yapılmıştır. Havuzda toplanan bütün çalışmaların ortak analizine göre maruz kalınan radon yoğunluğu ile akciğer kanseri arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır (WHO, 2009).

Avrupa'da 13 farklı yerde yapılan çalışmalarda bazı özel kıstaslar geliştirilmiştir. Buna göre çalışma kapsamında en az 150 akciğer kanserli 150 tane ise sağlıklı bireyin olması gerekmektedir. Çalışma kapsamındaki her bireyin geçmişe yönelik bazı bilgilerinin ulaşılabilir olması gerekir. Örneğin bireyin ayrıntılı sigara kullanma geçmişinin bilinmesi gerekir ayrıca her bir birey için geçmişe yönelik en az 15 yıllık maruz kaldığı ortalama radon miktarının tespit edilebilir olması gerekir. Toplam 13 olay kontrollü çalışma kapsamında 7.000 akciğer kanserli bireyin, 14.000 kanser olmayan bireyin bilgileri havuzda toplanmıştır. Bu çalışmada geçmiş 30 senelik süreç incelenmeye çalışılmıştır. Ölçülemeyen radon miktarları dolaylı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Araştırma sonucuna göre fazladan maruz kalınan her 100 Bq/m³'lük artış kansere yakalanma riskini % 8 oranında artırmaktadır. Tahmin edilen bu değer bireylerin yaşına ve cinsiyetine göre beklenenden fazla değişmemektedir. Evlerindeki radon yoğunluğu 100-199 Bq/m³ aralığında olan bireylerin akciğer kanserine yakalanma riski % 20 daha fazladır (100 Bq/m³ den düşük oranlara göre).

Kuzey Amerika'da yapılan 7 farklı olay kontrollü çalışma, toplamda 3662 kanserli birey, 4966 kansere henüz yakalanmamış bireyi kapsamaktadır. Uygulanan metot Avrupa'da yapılan çalışma ile benzerdir. Yapılan 7 çalışmada veriler bir havuzda toplanarak ortak değerlendirme yapılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucuna göre her 100 Bq/m³'lük oran artışında kansere yakalanma riski % 11 artmaktadır. Araştırma radon yoğunluğu daha yüksek olan belirli bölgelerde yapıldığında risk faktörü daha da artmaktadır. Yapılan araştırmada maruz kalınan doz ile kansere yakalanma riski arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Bireylerin kansere yakalanma riski yaş ve cinsiyete bağlı olarak beklenenden fazla değildir (WHO, 2009).

Lubin ve arkadaşları (2004) Çin'in iki bölgesinde iki farklı araştırma yapmıştır. Bu araştırmada 1050 kanserli birey 1996 henüz kansere yakalanmamış birey

bulunmaktadır. Bu çalışmaya göre maruz kalınan fazladan her 100 Bq/m³'lük radon miktarı kansere yakalanma riskini % 13 artırmaktadır. Yapılan iki araştırma birbiri ile uyumlu olup aynı zamanda Avrupa ve Kuzey Amerika'daki araştırmalarla da uyumludur. Maruz kalınan radon miktarı ile kansere yakalanma riski arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır (Durrani, 1997).

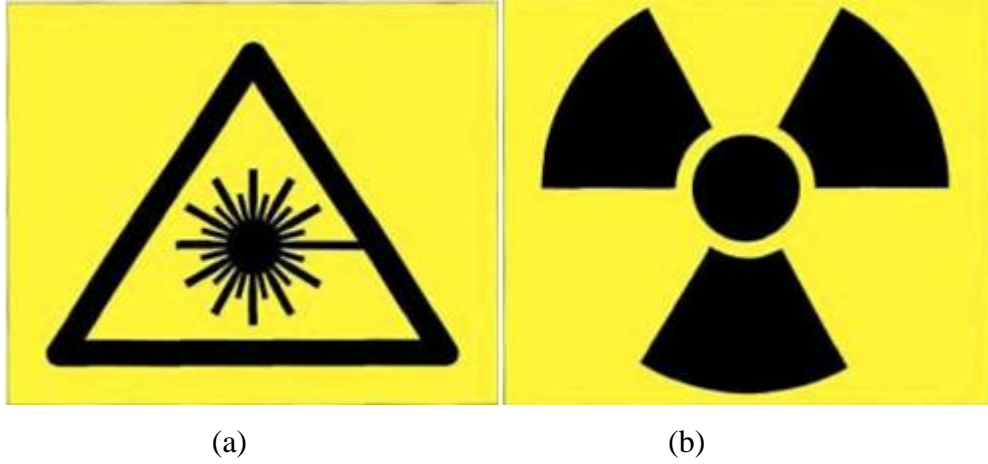
Yapılan tüm araştırmaları dikkate aldığımızda maruz kalınan radon gazı akciğer kanserine sebep olmaktadır. Herhangi bir ülkede maruz kalınan ortalama radon miktarına bakarak radon gazına bağlı akciğer kanseri riskini hesaplayabiliriz. Bu amaçla OECD ülkelerinde 30 ülkeyi kapsayan bir araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırma sonucuna göre dünya geneli ev içi ortalama radon miktarı 39 Bq/m³ olarak tahmin edilmiştir. Çoğu toplumlarda sigara içenler arasında akciğer kanserine yakalanma riski içmeyenlere göre daha fazladır. Maruz kalınan radon miktarına bağlı akciğer kanserine yakalanma oranları her iki toplumda da benzerlik göstermektedir. Radona bağlı olarak oluşan çoğu akciğer kanser vakaları radon gazı ve sigaranın ortak etkisi sonucu oluşmaktadır. Eğer birey hem sigara içmemiş hem de radon gazına maruz kalmamış ise akciğer kanserine yakalanmamaktadır. Radon gazına maruz kalanlar arasında aynı zamanda sigara içenlerin akciğer kanserine yakalanma riski daha yüksektir. Sigara içmeyenler arasında maruz kalınan radon gazı miktarı 1-800 Bq/m³ aralığında ise kansere yakalanma riski 1000'de 4-10 arasında değişmektedir. Eğer birey aynı zamanda sigara da içiyorsa (uzun ömürlü bir birey için yaşam süresi yaklaşık 75 yıl) akciğer kanserine yakalanma olasılığı 1000'de 100-220 arasında değişmektedir (WHO, 2009).

2. BÖLÜM

RADYASYON VE RADYOAKTİVİTE

2.1. Radyoaktivite

Radyoaktivite insanoğlu için kaçınılmaz bir gerçektir. Güneşten gelen ısı ve ışık da bir radyasyon çeşididir. Aynı zamanda, günlük hayatta kullandığımız mikrodalgalar, iletişim için kullandığımız elektromanyetik dalgalar (telefon, telsiz, navigasyon vs.), X ışınları, kararsız atomlardan yayımlanan ışınlar (α , β ve γ) birer radyasyon türüdür. Bu ışınların bir kısmı doğada kendiliğinden oluşurken bir kısmı ise yapay olarak üretilir. Radyasyonu madde üzerinde yaptığı etkiye göre iki sınıfa ayırabiliriz. Bunlardan birincisi iyonlaştırıcı radyasyon diğeri ise iyonlaştırıcı olmayan radyasyondur. İyonlaştırıcı radyasyonlar kozmik ışınlar, X ışınları, radyoaktif maddelerden yayımlanan α , β ve γ ışınları ile nötronlardan oluşur. İyonlaştırıcı olmayan türlere morötesi ışınlar, sıcak maddelerde oluşan kızıl ötesi ışınlar, radyo dalgaları ve mikrodalga ışınları örnek olarak verilebilir. Aynı zamanda, radyasyon doğal ve yapay olarak da sınıflandırılabilir. Radyasyon türlerinin bazıları faydalı bazıları ise zararlı olmaktadır. Zararlı olmayan radyasyonlara güneşten gelen ısı ve ışık örnek olarak verilebilir. Günlük hayatta her iki radyasyon türü de kullanılmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonlar tıpta teşhis ve tedavide, endüstride, tarımda ve bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnsanoğlu kendini bu zararlı ışınlardan olabildiğince korumaya çalışmalıdır. Bu zararlı ışınlar insanlarda ölümcül hastalıklara sebep olabilir. Bu hastalıkların oluşması ışınların ne kadar maruz kalındığına bağlı olarak değişebilir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonların insan sağlığına etkisi ışığın yoğunluğuna ve çeşidine bağlı olarak değişir. İyonlaştırıcı olmayan radyasyonlar deri ve gözde tahrişlere sebep olabilir. Bu ışınlar iç organlara nüfuz ederek organlarda ısıtma etkisi yapabilir. Uzun dönemde ise cilt kanserlerine veya katarakta sebep olabilir (NRPB, 1998). Şekil 2.1’de iyonlaştırıcı radyasyon (a) ve nükleer radyasyonun sembolleri (b) sırası ile verilmiştir.



Şekil 2.1. Sırası ile iyonlaştırıcı radyasyon (a) ve nükleer radyasyonun (b) sembolü.

Doğada bulunan pek çok kararlı atomun yanında kararlı olmayan atomlar da bulunur. Kararlı olmayan atomlar günümüzde yapay olarak da üretilebilmektedir. Bir atomun kararlı olup olmayışı proton ve nötron sayılarına bağlıdır. Hafif çekirdeklere proton ve nötron sayıları yaklaşık eşit olanlar kararlıdır. Ağır çekirdeklere kararlı olanların nötron sayısı proton sayısından daha fazladır. Bir çekirdeğin nötron sayısı proton sayısına göre çok fazla ise nötronlar protonlara dönüşerek kararlı olmak isterler. Bu dönüşüme beta (β^-) ışınması denir. Beta (β^-) ışınmasında bir nötron bir protona dönüşürken yoktan bir elektron oluşur:



Eğer çekirdekteki proton sayısı nötron sayısından çok fazla ise o zaman bir proton bir nötrona dönüşerek kararlı olmaya çalışır. Bu bozunma beta (β^+) bozunmasının farklı bir türüdür. Serbest bir proton bu tür bozunmaya uğramaz ancak kararsız bir çekirdek içinde bozunma gerçekleşebilir:



Bozunma süreçlerinde açığa çıkan fazladan enerjinin bir kısmı gama ışını şeklinde dışarı verilir. Gama ışınları yüksek enerjili fotonlardır. Maddelerde gerçekleşen ışınma olaylarına radyoaktivite, ışınmayı yapan çekirdeklere de radyoaktif çekirdek denir. Pek çok radyoaktif çekirdek doğada doğal olarak bulunur. Örneğin, normal karbon atomu (^{12}C) 6 proton ve 6 nötrondan oluşur, kararlı bir yapıya sahiptir. Kozmik ışınların azot

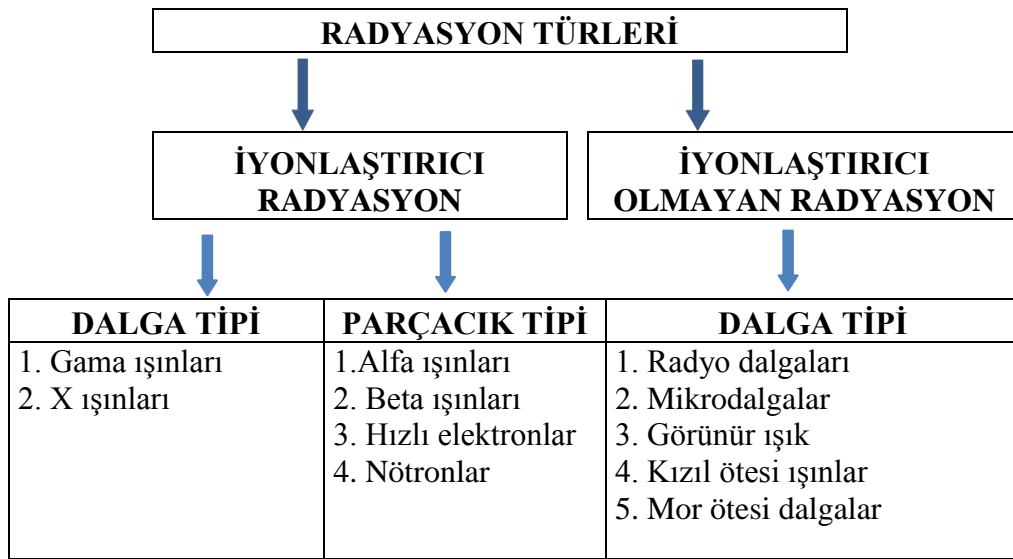
atomlarını bombardımanı sonucu karbon-14 (^{14}C) atomu oluşur. Bu çekirdek 6 proton 8 nötrondan oluşur. ^{14}C çekirdeği radyoaktif olup canlı organizmalarda çok düşük oranda bulunur, radyoaktif yaş tayinlerinde kullanılır. Bu çekirdek beta bozunması ile tekrar azot atomuna dönüşür. Doğal olarak bulunan diğer radyoaktif çekirdekler uranyum ve toryum doğal bozunma sürecinde sürekli üretilir. Bu iki doğal bozunma süreci kararlı kurşun atomları ile son bulur. Bu bozunma serilerinin bazı aşamalarında iki proton ve iki nötrondan oluşan çekirdekler fırlatılır. Bu çekirdek helyum çekirdeğidir. Helyum (^4He) çekirdeğine alfa (α) parçacığı da denir. Alfa parçacığı beta parçacığından çok daha büyük ve yüklü bir parçacıktır. Bozunma sonucu oluşan alfa, beta ve gama ışınları beraberinde bir miktar enerji taşır. Bu enerjiler elektron volt (eV) biriminde ifade edilir. Bir elektron volt, 1 elektronun bir voltluk potansiyel altında kazandığı kinetik enerjeye eşittir. Bir elektron volt, alfa, beta ve gama ışınması için küçük bir değer olduğundan elektron voltun bin katı, kilo elektron volt (keV) veya milyon katı, mega elektron volt (MeV) kullanılır. Örneğin polonyum-214 (^{214}Po) atomu 7,7 MeV enerjili alfa ışınması yapar. Kurşun-214 (^{214}Pb) çekirdeği 1 MeV'e kadar beta ışınması, 0,35 MeV'e kadar gama ışınması yapar (NRPB, 1998).

Son 30 yılda yüzlerce radyoaktif çekirdek yapay olarak üretilmiştir. Bu çekirdeklerden öne çıkanlar stronsiyum-90 (^{90}Sr), sezyum-137 (^{137}Cs) ve iyot-131 (^{131}I) çekirdekleridir. Bir radyoaktif çekirdeğin doğal bozunma hızına o çekirdeğin aktivitesi denir. Aktivite Becquerel (Bq) biriminde ifade edilir. Bu isim Fransız fizikçi Henry Becquerel anısına verilmiştir. 1 Bq saniyedeki 1 bozunmaya eşittir. Bu birim çoğu bozunma için çok küçük olduğundan bin katı kilo Becquerel (kBq) veya milyon katı Mega Becquerel (MBq) kullanılır. Örneğin 1 gram plütonyumun aktivitesi 2000 MBq'e eşittir. Her saniyede 1 gram plütonyumdan (^{239}Pu) yaklaşık 2 milyar alfa parçacığı yayılır. Bir çekirdeğin aktivitesinin yarıya indiği süreye yarı ömür denir, $t_{1/2}$ ile gösterilir, birim olarak yıl, saat, saniye vs. ile ifade edilir. Örneğin iyot-131 (^{131}I) 8 gün, sezyum-137 (^{137}Cs) 30 yıl, karbon-14 (^{14}C) 5730 yıl, plütonyum-239 (^{239}Pu) 24.000 yıl yarı ömre sahiptir. Her bir yarı ömrün sonunda radyoaktif çekirdek miktarı yarıya iner. Matematiksel eşitlikler kullanarak herhangi bir süre sonundaki aktiviteyi hesaplayabiliriz. Bir çekirdeğin aktivitesi Denklem 2.3 yardımı ile bulunur.

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.3)$$

Burada, λ , bozunma sabiti; A_0 , kaynağın t_0 anındaki aktivitesi; A ise kaynağın herhangi bir t anındaki aktivitesine eşittir.

Diğer dikkat edilmesi gereken iki radyasyon türü sırası ile nötron ve X ışınlarıdır. X ışınları hızlandırılmış elektronların bir metal hedefe çarptırılarak durdurulması veya yavaşlatılması sonucu elde edilir. Yapı olarak gama ışınlarına benzerler ancak oluşum mantığı farklıdır. X ışınları atomik enerji seviyelerinden oluşurken gama ışınları çekirdek enerji seviyelerinden oluşur. X ışınları hastanelerde görüntüleme amaçlı üretilirken nötronlar nükleer santrallerde üretilir (NRPB, 1998). Şekil 2.2’de radyasyon türleri şematik olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 2.2’de radyasyon iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak iki gruba ayrılmış olup alt gruplar ayrıca belirtilmiştir.

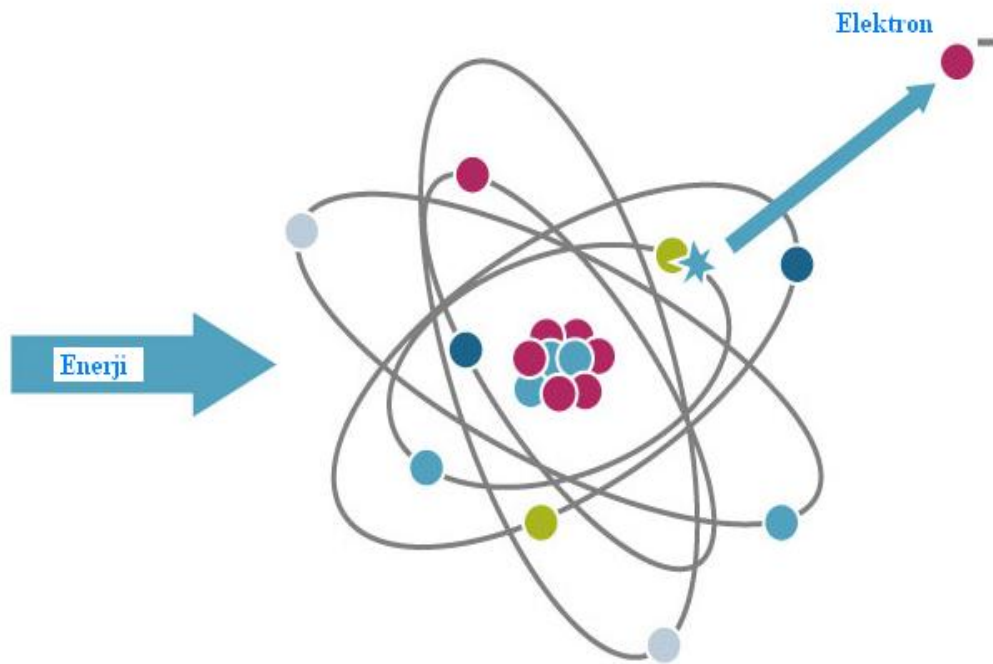


Şekil 2.2. Radyasyon türleri.

2.1.1. Madde içinde iyonlaşma

Foton (γ) ve yüklü tanecikler (α , β^+) madde ortamından geçerken madde ile elektriksel etkileşmeye girerek enerji kaybeder. Kaybedilen bu enerji atomlarda uyarma veya iyonlaşmaya sebep olur. İyonlaşma ile molekül zincirleri kopabilir, yeni reaksiyon uçları veya radikaller oluşabilir. Gama ve X ışını, enerjilerini farklı yollarla kaybedebilir fakat her biri sonunda yörüngedeki bir elektronu uyarır veya koparır. Kopan elektronlar başka elektronlarla etkileşip ikincil iyonlaşmaya veya uyarıya

sebepe olabilir. Nötronlar madde ile farklı tür etkileşmeye girer. Nötronlar hidrojen atomları ile etkileşip elastik çarpışma yaparak enerjilerini ortama aktarır. Radyasyon ister yüklü (α , β^\pm) isterse foton (X ve gama ışını) olsun madde ile elektriksel etkileşmeye girerek enerjilerini kaybeder. Eğer atomun yörüngesinde bulunan elektronlar yeterli enerji alırsa iyonlaşarak atom ya da molekülü pozitif yüklü hale getirir. Yüklü atomlara iyon denir. Serbest kalan elektronlar yeterli enerjiye sahip olursa diğer atomları da iyonlaştırabilir. X ve gama ışınları ise atomların elektrik alanları ile etkileşerek iyonlaştırma veya uyarıya sebep olurlar. Eğer iyonlaştıracak kadar yeterli enerji yoksa atom uyarılabilir veya titreşebilir. Titreşim sonunda madde ortamında sıcaklık artar (NRPB, 1998). Şekil 2.3’de belirli bir enerjideki yüklü parçacığın atomu iyonlaştırması gösterilmiştir.



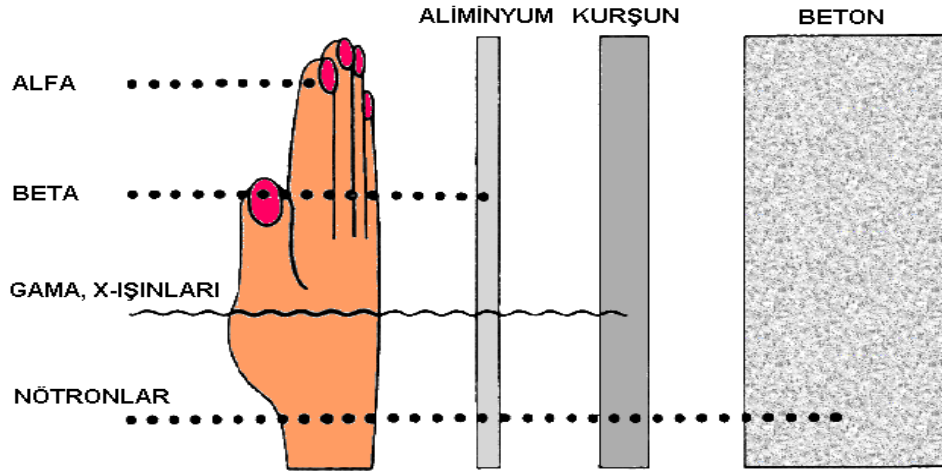
Şekil 2.3. Yüklü parçacıkların atomu iyonlaştırması.

2.1.2. Canlı dokularda iyonlaşma

Madde ortamından geçen yüklü tanecikler (yeterli enerjileri varsa) yörüngesi boyunca iyonlaşma veya uyarıya sebep olur. Yüklü tanecikler bu etkiyi enerjisi yeni bir uyarıya veya iyonlaşma yapamaz hale gelinceye kadar devam ettirir. İyonlaştırma ve uyarmanın en son etkisi dokuda sıcaklık artışıdır. Dokudaki sıcaklık artışı ile atom ya da moleküller titreşir. Bir hücrenin yaklaşık % 80’i su, kalan kısım ise karmaşık

biyolojik moleküllerden oluşur. Yüklü bir parçacık canlı hücreden geçerse iyon oluşturabilir. Oluşan yüklü tanecikler molekül zincirinde kopmaya sebep olabilir. Kopan bölgelerde serbest radikaller oluşabilir. Su molekülü parçalandığında OH^- , H^+ iyonları oluşur. Oluşan serbest radikaller (OH^- , H^+) kimyasal olarak oldukça aktiftir. Yeni oluşan radikaller reaksiyona girerek kimyasal yapıyı değiştirebilir. Canlı hücre için en önemli moleküllerden biri Deoksiribo Nükleik Asittir (DNA). DNA hücrenin çekirdeğinde bulunur, hücrede yönetim ve kalıtım görevi yapar. DNA molekülü bir canlının tüm kalıtsal bilgilerini barındırır. DNA hücre bölüneceği zaman kendini eşleyerek kalıtsal özelliklerini nesiller boyu aktarır. DNA mutasyona uğrayıp kalıtsal yapıda değişime sebep olabilir. Eğer mutasyon vücut hücrelerinde oluşursa mutasyon kalıtsal olmaz ancak farklı kanser türlerine yol açabilir. Eğer mutasyon üreme hücrelerinde oluşursa mutasyon kalıtsal hale gelebilir. Fiziksel veya zihinsel özürlü çocuklar doğabilir. Radyasyon doğrudan DNA'da iyonlaşmaya sebep olup kimyasal yapıyı değiştirebileceği gibi dolaylı olarak hücrede serbest radikal oluşturabilir sonra DNA zincirinde kopma veya bozulma olabilir.

İyonlaştırıcı radyasyon türlerinin en önemli özelliklerinden biri de girişkenlikleridir. Madde içinde girişkenlik miktarı radyasyonun çeşidine ve enerjisine bağlı olarak değişir. Aynı radyasyon tipinde enerji arttıkça girişkenlik artar. Alfa ve beta parçacıkları için girişkenlik miktarı kütleyle de bağlıdır. Eşit enerjideki beta parçacığının girişkenliği alfa parçacığının girişkenliğinden daha fazladır. Alfa parçacığı insan derisinden geçemez ancak beslenme veya solunumla alınan radyoaktif çekirdekler vücut içinde bozduklarında alfa parçacıkları oluşur, zararlı etkilere yol açabilir. Beta parçacığı deriden birkaç cm içeri nüfuz edebilir, yüze yakın organlara zarar verebilir ancak iç organlara geçemez. Eğer beta aktif radyoaktif bir çekirdek solunumla veya beslenme ile vücuda alınırse beta ışınması iç organlara zarar verebilecek duruma gelebilir. Gama ve nötron ışınlarının girişkenliği vücut ile etkileşmelerinin doğasına bağlıdır. Gama ışınları tüm vücudu baştanbaşa geçip gidebilir. Gama ışını yayan radyoaktif bir çekirdek vücut içinde ve vücut dışında zararlı etki yapabilir. X ışınları ve nötronlar vücudun içinden geçip gider. Şekil 2.4'te iyonlaştırıcı etkiye sahip bazı parçacıkların madde ortamındaki girişkenlikleri verilmiştir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi alfa parçacığının girişkenliği en az, nötron ise girişkenliği en fazla olanıdır (NRPB, 1998).



Şekil 2.4. Alfa, beta, nötron, gama ve X ışınlarının madde ortamındaki girişkenlikleri.

2.1.3. İyonlaştırıcı radyasyon kaynakları

İyonlaştırıcı radyasyon hayatımıza çok farklı şekillerde girebilir. Doğal yollarla uranyum bozunma zincirinden girebileceği gibi yapay olarak da (tıbbi X ışınları gibi) girebilir. Radyasyonu oluştukları kaynaklara göre doğal ve yapay olarak sınıflandırabiliriz. Doğal kaynaklar kozmik ışınlar, topraktan gelen gama ışınları, havada radon bozunma ürünleri, su ve besinlerde bulunan radyoaktif maddelerden oluşmaktadır. Yapay radyasyon kaynakları ise tıbbi X ışınları, gama ışınları ve nükleer deneme kalıntılarından oluşur. Bu radyasyon türlerinin tümünden insanlar belirli miktarlarda alır. Bilinçlenme ve çok basit çalışmalarla bazı kaynaklardan alınan doz miktarı azaltılabilir. Örneğin yerin altından gelen nükleer radon gazının evlerdeki miktarını basit havalandırma yöntemi ile daha düşük seviyelere indirilebilir. Kozmik ışınlar, doğal gama ışınları ve vücut içindeki doğal radyoaktiviteden kaynaklanan radyasyon miktarını ise değiştiremeyiz. Bir bireyin yıllık aldığı toplam radyasyonun % 85'i doğal, kalan kısmı ise yapay kaynaklardan gelmektedir (NRPB, 1998).

2.1.4. İyonlaştırıcı radyasyonun etkileri

Yüksek miktarda bir seferde alınan doz hemen etkisini gösterir. Örneğin vücuda alınan çok yüksek miktardaki doz birey için kısa zamanda ölümle sonuçlanabilir. Bir seferde alınan 5 Gy'lık doz hemen öldürebilir. Eğer bu doz vücudun bazı bölümleri tarafından alınmış ise ölümcül olmayabilir ancak bazı erken etkilerin oluşmasını sağlayabilir. Bir seferde alınan 5 Gy'lık doz deride kızarıklık veya yanıklara sebep

olabilir. Daha yüksek dozlar tahribatın derecesini artırır. Aynı miktar doz testislerde ve yumurtalıklarda kısırlığa yol açabilir. Eğer bu doz hafta veya ay mertebesinde alınmış ise hücrelerin kendini tamir etmesi için fırsat oluşturur, deride kızarıklık oluşmayabilir ancak vücut radyasyona uzun süre maruz kaldığı için ileride kanser oluşumuna yol açabilir.

Çoğu kanser türünün neden kaynaklandığı tam olarak bilinmemekle birlikte sigara, asbestos, mor ötesi ışınlar ve iyonlaştırıcı radyasyonların farklı kanserlere yol açtığı bilinmektedir. Radyasyonun DNA yapısını bozarak mutasyona yol açtığı düşünülmektedir. Değişime uğrayan DNA hücreyi anormal bir gelişim sürecine sokmakta ve dokularda tümör oluşumunu sağlamaktadır. Son yıllarda radyasyonun hücre üzerindeki etkisi daha iyi bilinmektedir. Radyasyona maruz kalan DNA molekülü kendini tamir etmeye çalışmakta, bazen tahribatın derecesine göre yanlış yapılan onarım mutasyonla sonuçlanmaktadır. Yapılan araştırmalara göre alınan doz miktarı ile kansere yakalanma riski arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Maruz kalınan doz miktarı azaldıkça kansere yakalanma riski de azalmaktadır. Radyasyona maruz kalan bireyin genetik yapısı kansere yakalanma riskini etkilemektedir. Bazı insanlar aynı koşullarda kansere yakalanma konusunda daha yüksek risk oluşturmaktadır. Bir topluluğun aldığı radyasyon dozu biliniyorsa her birey için aldığı doz başına kansere yakalanma riski hesaplanabilir. Grup içinde kanserli ve henüz kanser olmamış bireyler incelenir, aldıkları doz miktarları kıyaslanır, her birey için risk faktörü hesaplanır. Bütün kanser türleri ölümcül olmaz. Radyasyondan kaynaklanan tiroit kanserinde ölüm riski % 10'dur. Bu oran göğüs kanseri için % 50'ye denk gelirken, deri kanserinde % 1'dir (NRPB, 1998).

2.1.5. İyonlaştırıcı radyasyonda risk ölçümleri

Radyasyonun kansere olan etkisi ile ilgili bilgilerin çoğu Japonya'da atom bombasından hayatta kalan insanlardan elde edilmektedir. Diğer risk faktörleri ise X ve gama ışınlarına maruz kalan bireylerden elde edilir. Marshall adasında yapılmış olan atom bombası denemelerinden arta kalan aktif ürünler oradaki insanlar üzerinde fazladan bir radyasyon etkisi oluşturmaktadır. Burada yaşayan insanlar da risk faktörlerinin hesaplanmasında önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Alfa parçacıklarının kanser etkisi ile ilgili bilgiler daha çok yer altı maden işçilerinden elde edilmektedir.

Radyumun bozunması sonucu oluşan radon gazı ve ürün çekirdekleri yeraltı maden işçilerinde kanser yapıcı etkiye sahiptir. Japonya'da atom bombasından sonra hayatta kalan bireylerin kansere yakalanma riski kısa bir süre içinde almış oldukları yüksek miktar dozdan kaynaklanmaktadır. Normal şartlarda bütün bireyler uzun bir süreçte düşük dozda radyasyon almaktadır. Radyasyona maruz kalan insanlar için oluşan ortak kanaat alınan doz miktarı ile kansere yakalanma riski arasında doğrudan bir ilişki vardır. Yüksek miktarda iyonlaşmaya sebep olan alfa parçacıkları için bu ilişki doğrusaldır. Düşük oranda iyonlaşmaya sebep olan düşük doz gama ışınlarının kanser oluşturma olasılığı daha azdır. Doz miktarı arttıkça risk faktörü de artmaktadır (NRPB, 1998).

2.2. Doğal İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları

Doğal olarak üretilen iyonlaştırıcı radyasyon yaşadığımız her yerde bulunmaktadır. Uzayın derinliklerinden gelen kozmik ışınlar atmosferden deniz seviyesine kadar ulaşabilmektedir. Dünya yüzeyi, toprağın yapısında bulunan bazı elementlerden dolayı radyoaktif bir yapıya sahiptir. Doğal olarak yediğimiz besinlerde, içtiğimiz sularda ve soluduğumuz havada radyoaktif maddeler bulunur. Kimimiz az kimimiz çok, doğal radyasyona maruz kalmaktayız. Çoğu insan için başlıca radyasyon kaynağını doğal radyasyonlar oluşturmaktadır. Yaşadığımız çevrede bulunan bitkiler, hayvanlar doğal radyasyona maruz kalmakta, sonunda bizim için doğal bir radyasyon kaynağına dönüşmektedir. Doğal radyasyon kaynakları sağlığımız için büyük risk oluşturmaya da bazı çeşitleri sağlığımıza zararlı olabilmektedir.

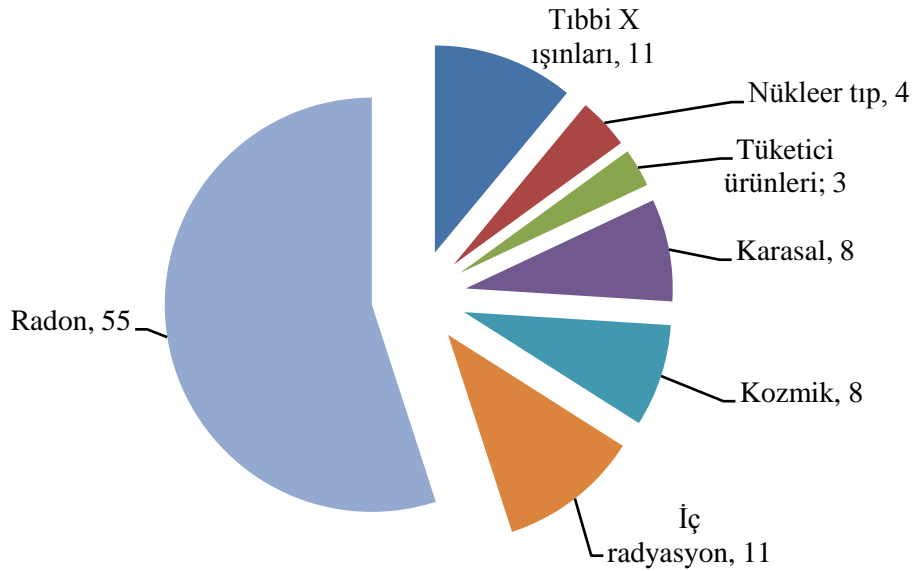
Doğal radyasyon kaynakları yeraltı maden işçileri ve uçak mürettebatı için önem taşımaktadır. Radon gazının sağlık etkilerinin insanlar tarafından öğrenilmesi ile birlikte maden ocaklarındaki radon seviyesi sürekli takip edilmekte, havalandırma ile belirli seviyede tutulmaya çalışılmaktadır. İnsanların yarısı okullarda, alışveriş merkezlerinde, çalışma ofislerinde doğal radyasyona maruz kalmaktadır. İş yerinde çalışan bireylerin % 5'e kadar olan kısmı 15 mSv doğal radyasyondan kaynaklanan doz almaktadır. Bütün çalışanları düşünürsek doğal radyasyondan kaynaklanan yıllık doz miktarı fark edilir seviyededir. Uçak mürettebatı için ortama alınan yıllık doz miktarı 2 mSv civarındadır (NRPB, 1998).

2.2.1. Doğal gama radyasyonu

Yerkabuğu farklı oranlarda radyoaktif madde bulundurur. Yerin derinliklerinde radyoaktiviteden kaynaklanan enerji aynı zamanda yerkabuğunun şekillenmesini sağlar. Doğal radyoaktiviteden gelen enerji çoğunlukla uranyum, toryum ve potasyum kaynaklıdır. Uranyum atomları toprakta milyonda birkaç atomdan bin atoma kadar bulunabilir. Yüksek oranda bulunduğu yerler nükleer santrallerde kullanılmak üzere maden olarak işletilir. Uranyum (^{238}U) doğal bozunma sürecinin sonunda kararlı kurşun (^{206}Pb) atomuna dönüşür. Uranyumun doğal bozunma zincirinde radyoaktif radon (^{222}Rn) gazı oluşur. Radon gazı atmosfere karışır, insanlar için hem olumlu hem de olumsuz etkileri bulunur. Toryum elementi de toprağın yapısında farklı oranlarda bulunur. Toryumun bozunma zincirinde toron (^{220}Rn) gazı oluşur. Toryum da sonunda kararlı kurşun (^{208}Pb) atomuna dönüşür. Potasyum atomunun yerkabuğunda bulunma oranı uranyum ve toryumdan çok daha fazladır. Potasyum yerkabuğunun % 2,4'ünü oluşturur. Potasyumun sadece milyonda 120'si (120 ppm) radyoaktiftir (^{40}K), kalan kısmı kararlı atomlardan oluşur. Yerkabuğundaki kararsız çekirdekler bozunurken gama ışınları üretir. Yeryüzünde bulunan bütün canlılar bu ışınlara maruz kalır. Bina yapı malzemeleri topraktan elde edildiği için hepsi biraz radyoaktif yapıdadır. İnsanlar hem ev içinde hem de ev dışında doğal radyasyona maruz kalır. Bireylerin aldıkları doz miktarı toprak yapısına, yaşadıkları ev tiplerine bağlı olarak farklılıklar gösterir. İngiltere'de yaşayan bir birey yıllık ortalama 0,35 mSv'lik gama ışınından kaynaklanan doz almaktadır (NRPB, 1998). Çizelge 2.1'de İngiltere'de kişi başına düşen doğal kaynaklı doz miktarları verilmiştir. Bireyin yaşadığı yere bağlı olarak bu değerden daha fazla veya daha az da doz alabilir. Şekil 2.5'te dünya geneli tüm kaynaklardan insanların almış oldukları ortalama doz oranları yüzde olarak verilmiştir. Şekil 2.5'e bakıldığında en yüksek doz değeri radon kaynaklı olup en düşük olanı ise tüketici ürünlerinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2.1. İngiltere’de yıllık kişi başına düşen doğal radyasyon doz değerleri (NRPB’den, 1998).

Kaynak	Doz değeri (mSv)	
	Ortalama	Doz aralığı
Kozmik ışınlar	0,26	0,2-0,3
Gama ışınları	0,35	0,1-1,0
Radon solunumu	1,3	0,3-100
İç radyasyon	0,3	0,1-1,0
Toplam	2,2	1,0-100



Şekil 2.5. Dünya genelinde insanların maruz aldığı doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının etki oranları (NCRP’den, 1987).

2.2.2. İç radyasyon

Uranyum ve toryumun doğal bozunma serisinde oluşan kararsız atomlar hava, su ve toprağa karışır. Yediğimiz besinlerde, içtiğimiz suda, soluduğumuz havada bu çekirdekler farklı oranlarda bulunur. Radyoaktif atomlar beslenme ve solunumla vücuda taşınır. Toryum bozunma serisinden kurşun (^{210}Pb) ve polonyum (^{210}Po) hava, su ve beslenme ile vücuda alınır. Potasyum (^{40}K) beslenme ile vücuda alınır. Radon gazını hariç tutarsak potasyum (^{40}K) iç radyasyonun ana kaynağını oluşturur. Kozmik ışınların atmosferdeki gazlarla çarpışması ile oluşan karbon (^{14}C) atomları besinlerle

vücuda alındığı için iç radyasyona katkı sağlar. İngiltere’de iç radyasyondan kaynaklanan doz miktarının 0,3 mSv olduğu tahmin edilmektedir. Bu değer yaklaşık yarısı potasyum (^{40}K) atomundan kaynaklanmaktadır. Vücuttaki potasyum miktarı biyolojik süreçlere bağlı olarak değişir. Vücuttaki potasyum miktarı kas miktarı ile doğru orantılıdır. Genç insanlar yaşlılara göre daha kaslı olduğu için potasyum miktarı genç insanlarda yaşlılara göre daha fazladır, dolaylı olarak iç radyasyon miktarı genç insanlarda daha yüksektir (NRPB, 1998).

2.2.3. Uranyum

Atom numarası 92 olan uranyum radyoaktif bir elementtir. Doğal olarak bulunan üç izotopu da radyoaktiftir. Uranyum izotoplarının bağıl bolluğu ^{238}U için % 99,284, ^{235}U için % 0,711, ^{234}U için ise % 0,0058’dir. Uranyumun bazı izotopları, doğadaki bolluk oranları, yarı ömürleri, bozunma enerjileri ve bozunma ürünleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Uranyum izotopları.

Uranyum izotopları				
İzotop	Doğada bulunma oranı	Yarı ömrü	Bozunma enerjisi (MeV)	Bozunma ürünü
^{232}U	Yapay	68,9 y	5,414	^{228}Th
^{233}U	Yapay	159.200 y	4,909	^{229}Th
^{234}U	%0,0054	245.500 y	4,859	^{230}Th
^{235}U	%0,7204	$7,038 \times 10^8$ y	4,679	^{231}Th
^{236}U	Yapay	$2,342 \times 10^7$ y	4,572	^{232}Th
^{238}U	%99,2742	$4,468 \times 10^9$ y	4,270	^{234}Th

Uranyum evrende süpernova patlamaları sırasında bir dizi nükleer reaksiyonlar ile oluşmuştur. Uranyum toprakta, suda ve kayalıkların yapısında düşük oranda bulunur. Yerkabuğundaki uranyum oranı ortalama milyonda 2 ile 4 (2 – 4 ppm) arasında değişmektedir. Farklı toprak yapısında uranyum miktarı milyonda 0,7 - 11 arasında değişmektedir. Yeryüzünün bazı bölgelerindeki granit kayalarda milyonda 100

oranında uranyum tespit edilmiştir. Uranyum suda kolayca çözündüğü için deniz suyundaki oranı milyonda 3 civarındadır. Dünyada deniz ve okyanuslardaki toplam uranyum miktarı 4,6 milyar ton civarındadır. Uranyum linyit, monazit ve fosfat minerallerinde oldukça fazla miktarlarda bulunur. Bitkiler topraktan uranyum mineralini emerek alır. Bir bitkinin kuru kütlesi milyonda 5 ile 60 arasında uranyum bulundurabilir (Krane, 1987). Farklı kayaç türlerindeki uranyum oranları Çizelge 2.3’de verilmiştir. Çizelge 2.3’e göre şistli kayaçlarda uranyum miktarı daha fazladır.

Çizelge 2.3. Farklı kayaç türlerindeki uranyum oranları (Fişne’den, 2002).

Kayaç Türü	Ortalama ²³⁸ U (ppm)
Magmatik Kayaçlar	2,6
Ultrafamik Kayaçlar	0,03
Mafik Kayaçlar	0,8
Felsik Kayaçlar	3,5
Kalkerler	2,5
Kumtaşları	0,45
Şistli Killer	4,1
Siyah Renkli Şistli	2-300
Granit	2,8-4
Alkali Granit	10-100
Yerkabuğu	0,2
Toprak	1

2.2.4. Toryum

Toryum da uranyum gibi süpernova patlamaları sonucu oluşan radyoaktifliği zayıf olan bir elementtir. Toryum yerkabuğunda düşük oranda bulunur ancak bulunma oranı uranyumdan 4 kat daha fazladır. Toryum suda kolayca çözünen bir element olmadığı için deniz ve okyanuslarda miktarı ihmal edilebilecek seviyededir. Toprakta toryum oranı ortalama milyonda 12 (12 ppm) civarındadır. Toryum genellikle monazit mineralinin yapısında bulunur. Yarılanma ömrü 14 milyar yıl olan toryum yavaşça bozunur. Toryumun doğal olarak bulunan tek izotopu ²³²Th çekirdeğidir (NCRP, 1988).

2.2.5. Radon gazı

Radyoaktif radon gazı doğal radyoaktivitenin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Radon atomlarının bozunması ile oluşan metal atomları (ürün çekirdekler) olumsuz sağlık etkilerine yol açmaktadır. Bu kısım ile ilgili ayrıntılı bilgiler 3. Bölüm altında verilecektir.

2.2.6. Potasyum-40

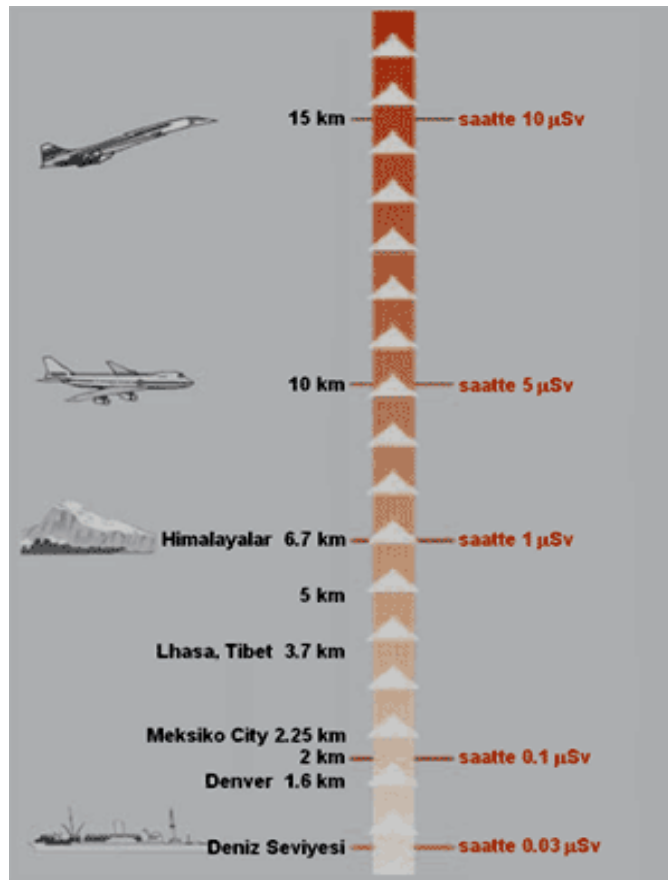
Kimyasal sembolü ^{40}K olan potasyum, uranyum ve toryum ile birlikte doğal radyoaktiviteyi oluşturur. Potasyum ^{40}K 'ın yarı ömrü $1,24 \times 10^9$ yıldır. Potasyum hücrelerin çalışabilmesi için çok önemli bir mineraldir, bütün canlı hücrelerde bol miktarda bulunur. Potasyum canlı vücudunda sinirsel aktivitelerin gerçekleşmesinde görev alır. Potasyum aynı zamanda hücre içi ve hücre dışı ozmatik basıncı dengeler. Potasyum yerkürede en çok bulunan 7. elementtir. Yerkabuğunun % 2,4'ü potasyumdur. Potasyumun bilinen 24 izotopu bulunmaktadır. Bu izotoplardan sadece üç tanesi doğal olarak bulunur. Doğal izotoplardan ^{40}K radyoaktif olup β^+ ışıması ile kararlı ^{40}Ca atomuna dönüşebilir veya β^- bozunması ile ^{40}Ar atomuna dönüşür. ^{40}K insanlar ve hayvanlar için en büyük iç radyasyon kaynağını oluşturur. Potasyumun canlı vücudunda oluşturduğu radyasyon ^{14}C 'den kaynaklanan radyasyondan daha fazladır. 70 kg kütleli bir insan vücudunda saniyede 4.400 adet potasyum bozunmaktadır. Potasyumun normal doğal aktivitesi 31 Bq/g'dır (URL-1). Çizelge 2.4'de potasyumun bazı izotopları, yarı ömürleri, bozunma enerjileri ve bozunma ürünleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. Potasyumun izotopları.

İzotop	Doğal Bolluk	Yarı Ömür	Bozunma Modu	Bozunma Enerjisi	Bozunma Ürünü
^{39}K	% 93,26	Kararlı			
^{40}K	% 0,012	$1,24 \times 10^9$ y	β^-	1,311	^{40}Ca
			E	1,505	^{40}Ar
			β^+	1,505	^{40}Ar
^{41}K	% 6,73	Kararlı			

2.2.7. Kozmik ışınlar

Kozmik ışınlar uzayın derinliklerinden gelen çoğunluğu protonlardan oluşan yüklü ve yüksek enerjili parçacıklardır. Kozmik ışınların kaynağı tam olarak bilinmemekle birlikte uzayın her yerinden düzenli olarak gelmektedir. Bazı düşük enerjili protonların güneşten geldiği düşünülmektedir. Kozmik ışınlar yüklü parçacıklar olduğu için Dünya'nın manyetik alanından etkilenmekte, kutuplarda yoğunlaşmaktadırlar. Atmosfere giren kozmik ışınlar havadaki atomlarla çarpıştığı için yüzeye yaklaştıkça miktarları azalmaktadır. İngiltere'de deniz seviyesinde birey başına yıllık kozmik ışın doz miktarı 0,25 mSv civarındadır. Yükseklerle çıktıkça alınan doz miktarı artar. Uçakların uçtuğu yükseklikte alınan doz miktarı daha fazladır. Şekil 2.6'da deniz seviyesinden itibaren bazı yüksekliklerdeki kozmik ışınlardan kaynaklanan doz miktarları verilmiştir (UNSCEAR, 2000).



Şekil 2.6. Farklı yüksekliklerde kozmik ışınlardan kaynaklanan doz miktarları.

2.3. Yapay Radyasyon Kaynakları

İş yeri ortamında bulunan yapay radyasyon kaynakları en çok nükleer santraller, nükleer tıp uygulama alanları ve endüstriyel alanda bulunmaktadır. Alınan önlemlerle buralarda maruz kalınan radyasyon miktarı son 10 yılda oldukça azaltılmıştır. İngiltere’de tüm meslek grupları için maruz kalınan yıllık ortalama radyasyon miktarı 1 mSv değerinin altında bulunmaktadır. Bu meslek gruplarına nükleer santrallerde çalışanlar dâhil edilmiştir. Bu gruplardan bazı çalışanlar yıllık 14 mSv’den daha fazla radyasyona maruz kalabilir. Endüstriyel radyografide çalışan personeller yıllık ortalama 20 mSv’lik doz alabilirler. Genel olarak sağlık hizmetlerinde çalışan insanlar düşük dozda radyasyon alır, ancak radyoterapi uygulaması yapan uzmanlar yüksek miktarda doza maruz kalabilir. Radyoterapi uygulayan kişiler çoğunlukla uygulama alanında hastanın yanında olmaları gerekebilir (NRPB, 1998).

2.3.1. Nükleer Silah Denemeleri

Yeryüzünde test amaçlı patlatılan nükleer silahlar ortama çok çeşitli radyoaktif çekirdekler bırakır. Bu çekirdekler radyoaktif trityumdan (^3H) plütonyuma (^{241}Pu) kadar değişebilir. Atmosfere karışan bu çekirdekler hava akımı ile yeryüzünün bir çok yerine yavaş yavaş taşınır sonunda toprağa karışır. Nükleer denemeleri yasaklayan 1963 ve 1983 anlaşmalarından önce yaklaşık 500 adet nükleer silah denemesi yapılmıştır. Günümüzde hava, su ve toprakta yapılan radyasyon ölçümlerinde doz değerlerinin 1960’lardakinden daha az olduğu görülmüştür (NRPB, 1998).

2.3.2. Çernobil Kazası

26 Nisan 1986 yılında Çernobil nükleer santralinde gerçekleşen patlama sonucunda oldukça fazla radyoaktif madde atmosfere karıştı. Patlamadan sonra 10 gün boyunca atmosfere radyoaktif madde salınımı devam etti. Radyoaktif atomlar hava akımı ile birlikte Ukrayna’dan tüm Avrupa’ya dağıldı. Havadaki radyoaktif parçacıkların ağır olanları kendiliğinden toprağa karışırken diğerleri yağmurla birlikte yeryüzüne indi. Radyoaktif parçacıklardan bazıları insan sağlığı açısından çok önem taşımaktadır. Örneğin, radyoaktif iyot (^{131}I) izotopu beslenme ile vücuda alınmakta tiroit bezinde tiroksin üretimi için kullanılmaktadır. Radyoaktif olduğu için tiroit bezi hücrelerinde mutasyonlara yol açabilmektedir. Sezyum (^{134}Cs , ^{137}Cs) çekirdekleri

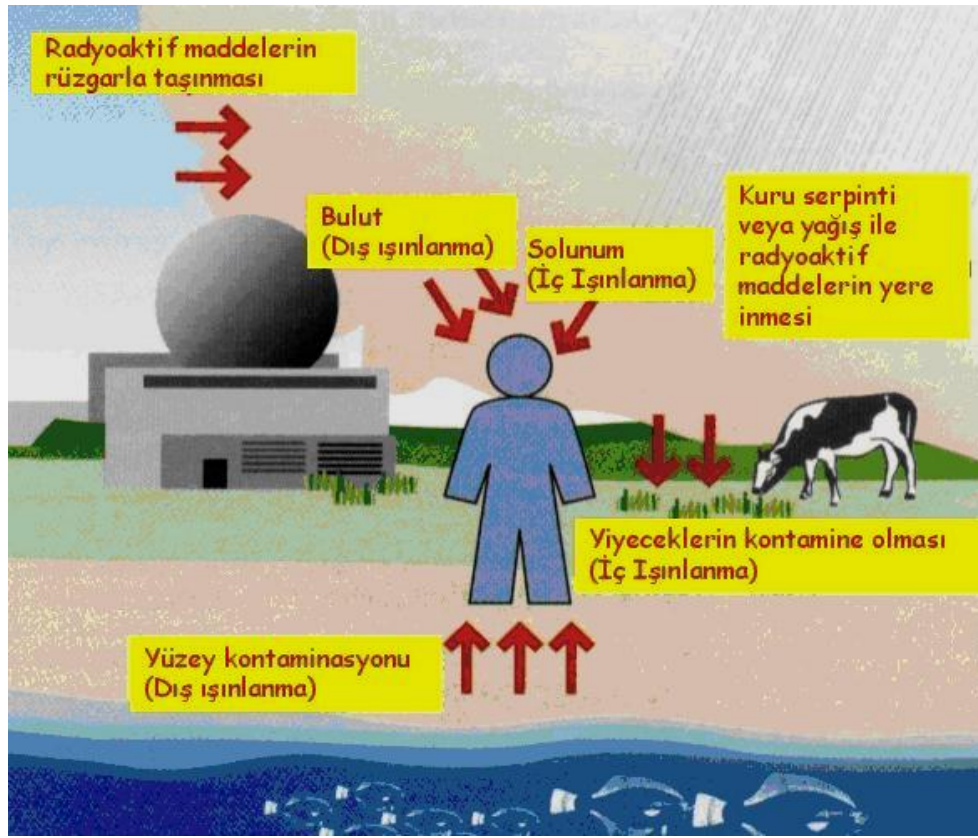
toprağın yüzeyinde biriktiği için dış radyasyon dozunu artırmakta, vücuda alındığında iç radyasyona sebep olmaktadır. Nükleer kazadan bir yıl sonra İngiltere’de kişi başına düşen doz miktarı fazladan 0,02 mSv olarak tahmin edilmiştir. Günümüz için Çernobil’den kaynaklanan doz miktarı fazladan 0,001 mSv civarındadır (UNSCEAR, 2000)

2.3.3. Radyoaktif atıklar

Nükleer santrallerde, savunma sanayisinde, araştırma merkezlerinde, hastanelerde ve diğer endüstrilerde oluşan radyoaktif atıklar doğrudan veya dolaylı olarak doğaya karışmaktadır. Bu atıklar radyoaktif olduğu için canlı organizmaya zararlıdır. Bu atıkların yetkili otoritelerce kontrol edilmesi gerekir. En çok radyoaktif atık nükleer santrallerde oluşur. Her yakıt değişiminde katı, sıvı ve gaz atıklar oluşur. Oluşan bu atıklar yüksek dozda radyasyon içerir. Bu atıkların binlerce yıl canlılardan uzak tutulması gerekir. Günümüzde bu atıkların yerin derinliklerine çelik variller içinde gömülmektedir (NRPB, 1998).

2.3.4. Nükleer kirlilik

Yapılan nükleer faaliyetlerden arta kalan atıkların su, hava ve toprağa karışması ile nükleer kirlilik oluşur. Nükleer silahların atmosferde ve toprakta denenmesi ile oluşan kararsız çekirdekler yeryüzüne dağılır. Bunun yanında nükleer santrallerde oluşan patlamalar, nükleer santrallerde kullanılan yakıtların artakalanları doğaya karışarak nükleer kirliliği oluşturur. Ayrıca yapay olarak üretilen radyoaktif çekirdekler nükleer kirliliğe katkıda bulunur. Toprağa ve suya karışan radyoaktif çekirdekler su ve besinle birlikte insan vücuduna alınır. Vücuda alınan kararsız çekirdekler oluşturdukları radyasyonla olumsuz sağlık etkilerine yol açar (NRPB, 1998). Şekil 2.7’de nükleer kirliliğin ekosisteme etki yolları ve besin zincirine karışması gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Nükleer kirliliğin ekosistemi etkilemesi.

Yapay olarak oluşan bazı radyoaktif çekirdekler Çizelge 2.5’de verilmiştir. Çizelge 2.5’e göre başlıca kaynaklar fisyon reaktörleri ve savaş silahlarıdır.

Çizelge 2.5. Yapay olarak üretilen kararsız çekirdekler (NRPB’den, 1998).

Çekirdek	Sembol	Yarı Ömür	Kaynak
Tritiyum	^3H	12,3 yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörleri
İyot-131	^{131}I	8,04 gün	Savaş silahı, fisyon reaktörleri, tiroit hastalıkları teşhis ve tedavisi
İyot-129	^{129}I	$1,57 \times 10^7$ Yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörleri
Sezyum-137	^{137}Cs	30,17 Yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörleri
Stronsiyum 90	^{90}Sr	28, 78 Yıl	Savaş silahı, fisyon reaktörleri
Tektenyum 99	^{99}Tc	$2,11 \times 10^5$ Yıl	Tıpta teşhis amaçlı kullanılır
Plütonyum 239	^{239}Pu	$2,41 \times 10^4$ yıl	Uranyumun nötron ile bombardımanı sonucu üretilir

2.4. İyonlaştırıcı Radyasyonun Tıpta Kullanımı

İyonlaştırıcı radyasyon sağlık hizmetlerinde hem teşhis hem de tedavide kullanılır. Birçoğumuz hastalıklarımızın teşhisinde X ışınlarını kullanmışızdır. Günümüzde daha az yaygın olan bir yöntem ile radyoaktif izotoplar kullanılarak organlarımızın çalışma fonksiyonları izlenebilmektedir. Sağlık fizikçileri radyoaktif madde yöntemini eğer başka bir yöntem yoksa ancak o zaman tercih etmelidir. Bu yöntemde hastaya çok düşük dozda radyoaktif madde verilerek teşhis ve tedavi yapılmaya çalışılır. Daha yüksek dozlar ise organdaki bir tümörü yok etmek veya organlardaki çalışma bozukluklarını giderme amaçlı kullanılır. Uygulanan tedavide radyasyon dışarıdan herhangi bir organa ışın olarak uygulanabileceği gibi radyoaktif maddeler doğrudan alınarak da uygulanabilir. Tıpta, radyoaktif maddelerden faydalanarak hastalıkları teşhis ve tedavi etmeye çalışan bilim dalına nükleer tıp, uygulanan yöntem ise ışın tedavisi (radyoterapi) denir (NRPB, 1998).

2.4.1. Hastalıkları teşhiste iyonlaştırıcı radyasyon

X ışınları keşfedildiğinden bugüne kadar hastalıkların teşhis edilmesinde kullanılmaktadır. X ışınları insan vücudundan doğrudan geçebilecek özelliktedir. X ışınlarının farklı organlardan geçme yüzdeleri ise farklı farklıdır. Hassas organlardan X ışınları kolayca geçerken kemikte geçirgenlik daha azdır. İnsan vücudunu geçen X ışınları elektronik ortamda değerlendirilip film üzerinde organların görüntüsü oluşturulmaktadır. X ışın yöntemi özellikle kemik dokudaki hasarların tespitinde kullanılır. Göğüs, diş, kol ve bacak filmleri X ışın yönteminin % 25'ini oluşturmaktadır. Bir göğüs filmi çektiren hastanın almış olduğu doz miktarı 0,02 mSv civarındadır. Hassas organlarda alınan etkin doz daha fazladır. Günümüzde bilgisayarlı tomografi yöntemi giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu yöntemde hasta 360°den X ışınına maruz bırakılıp her açıdan görüntü alınır. Bu görüntüler bilgisayar ortamında birleştirilerek organın çok yönlü incelenmesi sağlanır. Bilgisayarlı tomografide hastanın aldığı doz miktarı geleneksel X ışın yönteminden bir kaç kat daha fazla olabilir. İngiltere'de teşhis amaçlı radyasyondan alınan doz miktarı toplam 20.000 kişi için 1 Sv civarındadır. Bilgisayarlı tomografi toplam miktarın % 40'ını oluşturmaktadır. Eğer hastalığın teşhisinde geleneksel X ışın yöntemi yeterli oluyorsa bilgisayarlı tomografi kullanılmamalıdır (NRPB, 1998).

2.4.2. Nükleer ilaçlar

Nükleer maddeler teşhis amaçlı kullanılacağı zaman uygun görülen doz miktarı taşıyıcı bir madde içinde hastaya verilir. İlaç hastaya enjeksiyon, solunum veya ağız yolu ile verilebilir. Vücuda alınan aktif madde gama ışını yayar. Teşhis amaçlı kullanılan radyoaktif maddelerin başında teknesyum (^{99m}Tc) izotopudur. Yarı ömrü 6 saat olan ^{99m}Tc izotopu 0,14 MeV'lik gama ışını üretir. Teşhis ve tedavide kullanılan izotoplar çoğunlukla hastanelerde üretilir. İlaç hastaya verildikten sonra gama ışımına duyarlı kameralarla organlardaki fonksiyonlar incelenir. Çizelge 2.6'da organlara verilen teşhis amaçlı etkin doz miktarları verilmiştir. Çizelge 2.6'ya göre en yüksek doz beyine verilmektedir.

Çizelge 2.6. Hastalıkların teşhisinde kullanılan nükleer doz miktarları.

Organ	Etkin Doz (mSv)
Beyin	7
Kemik	4
Tiroit	1
Karaciğer, Böbrek	1

Eğer hastaya verilen radyoaktif madde ile tedavi amaçlanıyorsa doz miktarı daha da artırılır. Örneğin tiroit bezi normalin üzerinde bir aktivite ile çalışıyorsa aktivitesini azaltmak için radyoaktif iyot (^{131}I) izotopu kullanılır. Sağlığımız için kullandığımız radyoaktifler aynı zamanda çevrede nükleer kirliliğe de yol açar. Hasta bireyin yakınları gereksiz radyasyona maruz kalabilir (NRPB, 1998).

2.4.3. Radyoterapi

Bu teknik çoğunlukla kanser hastalarının tedavilerinde kullanılır. Bu yöntemle yüksek enerjili X ışınları, gama ışınları, protonlar ve elektronlar hastalıklı doku ya da organa lokal olarak uygulanır. Hastalıklı bölgeye yakın dokular ışınlardan korunmaya çalışılır. Eğer tümör çok derinde ise ışınlar farklı yönlerden uygulanır böylece yöntemden kaynaklanan hasarlar azaltılmaya çalışılır. Bazı kanser türlerinde radyasyon kaynağı geçici olarak vücuda yerleştirilebilir. Bir kanser tümörünün

öldürülebilmesi için kanserli bölgeye onlarca gray'lık doz uygulanması gerekebilir. Doz uygulanma sürecinde çok dikkatli olunması gerekir. Miktarından fazla veya az verilen doz farklı süreçlerin oluşmasına yol açabilir. Radyoterapide kullanılan dozlar çok yüksektir. Eğer başka bir yöntem yoksa ancak o zaman ışın tedavisi tercih edilmelidir. Radyoterapi yöntemi bir kanser tümörünü tedavi ederken farklı bir yerde yeni bir kanser oluşumuna sebep olabilir, ileriki yıllarda doğacak bir çocukta genetik bozuklukların oluşumuna yol açabilir. Radyoterapide asıl amaç tedavide etkinliğin artırılması, tedavi sürecinde oluşabilecek yan etkilerin azaltılması yönünde olmalıdır (NRPB, 1998).

2.4.4. Mesleğe bağlı radyasyona maruz kalma

Bazı insanlar çalıştıkları meslek gruplarından dolayı fazladan iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalırlar. Nükleer santrallerde çalışan insanlar açıkça bu gruba örnek verilebilir. Yapay radyasyon kaynakları savunma sanayisi, tıp, araştırma laboratuvarları, üniversiteler ve endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride üretilen makine parçalarının kırık ve çatlak tespitinde, havaalanları ve önemli bazı yerlerin giriş ve çıkışlarında güvenlik amaçlı, tıbbi araç gereçlerin sterilizasyonunda radyografi tekniği kullanılır. Bazı meslek grupları ise iş yerinden kaynaklanan doğal radyasyona maruz kalabilir. Yeraltı maden işçileri bu gruba verilecek en belirgin örnektir. Yerin derinliklerinden gelen radon gazı yeraltı madenlerinde birikerek olumsuz sağlık etkilerine yol açar. Sürekli uçakta bulunan uçak mürettebatı (pilot, hostes, teknisyen vs.) kozmik ışınlarla maruz kalır. Çizelge 2.7'de İngiltere için bazı iş yeri ortamlarından kaynaklanan yıllık ortalama radyasyon doz değerleri verilmiştir. Çizelge 2.7'ye göre en yüksek doz katkısı radon kaynaklı olurken en azı ise sağlık hizmetlerinden veya ARGE çalışmalarından gelmektedir (NRPB, 1998).

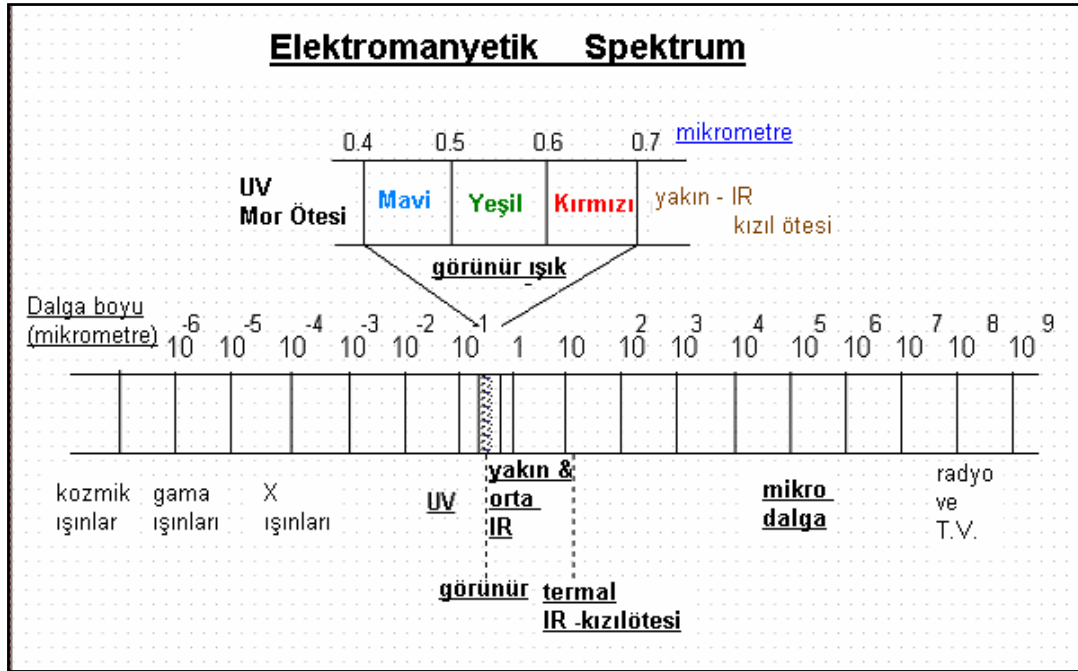
Çizelge 2.7. İngiltere’de iş yeri ortamından kaynaklanan yıllık radyasyon doz değerleri.

Kaynak	Doz Miktarı (mSv)
Nükleer Endüstri	0,7
Savunma Sanayisi	0,8
Genel Endüstri	0,4
ARGE Çalışmaları	0,1
Sağlık Hizmetleri	0,1
Radon Kaynakları	
Kömür Madeni	0,6
Metal Madenleri	4,5
İş Yeri	5
Kozmik Işın Kaynağı	
Hava Taşımacılığı	2

2.5. Elektromanyetik Alan Ve Radyasyon

İnsanlar farklı kaynaklardan farklı dalga boylarında ışığa maruz kalmaktadır. Işık dalgası hem elektrik hem de manyetik alan üretir. Işık kaynakları doğal ve yapay olarak sınıflandırılabilir. Güneş hem görünür hem de gözümüzle göremediğimiz farklı frekanslarda ışın üretir. Günlük hayatımızı kolaylaştırmak için farklı frekanslarda ışınlar yapay olarak da üretilir. Örneğin iletişim için radyo dalgaları, tıpta teşhis ve tedavide üretilen X ışınları, gama ışınları yapay olarak üretilen ışınlara birer örnektir. Farklı frekans ve özellikteki ışınlar ışık spektrumunda bir arada gösterilir. Işık spektrumu elektrik iletim hatlarında oluşan düşük frekanstan yüksek frekanstaki kozmik ışınlara kadar değişen geniş bir frekans aralığını kapsamaktadır. Dalga boyu ile frekans birbiri ile ters orantılıdır. Frekans artarsa dalga boyu azalır. Burada 300 GHz’den küçük frekansta elektromanyetik dalgalar kastedilmektedir. 300 GHz frekanslı bir ışın demetinin dalga boyu havada 1 mm civarındadır. Şehir elektriğinin frekansı 50Hz, dalga boyu 6000 km’dir. Bu kısımda bahsedilen ışık spektrumu iyonlaştırıcı olmayan radyasyona girmektedir. İyonlaştırıcı radyasyonun aksine iyonlaştırıcı olmayan yapay

radasyonlar (alternatif akım, radyo dalgaları vs.) doğal olarak üretilenden daha fazla olmaktadır. Şekil 2.8’de tüm ışık spektrumu verilmiştir (NRPB, 1998).



Şekil 2.8. Işık spektrumu.

3. BÖLÜM

RADON

3.1. Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri

Radon renksiz, kokusuz, tatsız ve radyoaktif bir gazdır. Doğrudan duyu organlarımızla hissedilemez. Radyoaktif olduğu için elektronik detektörlerle doğrudan, katı hal iz detektörleri ile dolaylı olarak miktarları belirlenebilir.

Radon kimyasal olarak pasiftir, normal şartlar altında kendiliğinden tepkimeye girmez, periyodik tablonun 8A grubunda yer alır, radyoaktif olduğu için ışımaya yapar. Bazı durumlarda flor elementi ile tepkimeye (RnF_4) girdiği rapor edilmiştir (Fields, *et al.*, 1962). Radon atomunun genel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Radon atomunun genel özellikleri.

Genel Özellikler	
İsim, Sembol, Atom numarası	Radon, Rn, 86
Element sınıfı	Soy gaz
Grup, Periyot, Kabuk	8, 6, p
Görünüm	Renksiz
Standart atom ağırlığı	(222) $g \cdot mol^{-1}$
Elektron dağılımı	[Xe] $4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^6$
Yörüngelerdeki elektron sayısı	2, 8, 18, 32, 18, 8

Radon 1900 yılında Alman kimyacı Friedrich Ernest Dorn tarafında 5. radyoaktif element (uranyum, toryum, radyum ve polonyumdan sonra) olarak keşfedilmiştir. Rutherford toryum elementinden radyoaktif bir gaz yayıldığını göstermiş ancak toronun keşfi Curie’ye verilmiştir. 1903 yılında Andre Louis Debierne Aktinyum bozunma serisinde radyoaktif bir gazın üretildiğini gözlemlemiş daha sonra aktinon ismi verilmiştir.

Radon donma sıcaklığına kadar (-71 °C; -96 °F) soğutulursa parlak fosfor rengini alır, sıcaklık daha da azaltılırsa sarımsı renge dönüşür. Havanın sıvılaştığı (-180 °C; -292,3 °F) sıcaklıkta turuncu-kırmızı renk alır. Sıcaklığın azalmasına rağmen kendi iç radyoaktivitesinden dolayı parlar (Akyıldırım, 2005). Radon atomunun bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Radon elementinin fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikleri	
Fiziksel hali	Gaz
Erime noktası	202 K
	(-71,15 °C, -96 °F)
Kaynama sıcaklığı	211,3 K
	(-61,85 °C, -79,1 °F)
Kritik nokta	377 K, 6,28 MPa
Erime ısısı	3,247 KJ·mol ⁻¹
Buharlaşma ısısı	18,10 kJ·mol ⁻¹
Özgül ısı değeri	(25 °C) 20,786 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹

Radon gazı uranyum rezervlerinde uranyum cevherinin % 1’lik HCl ve HBr asitlerinde çözünme işleminden sonra açığa çıkan H₂, O₂, He, Rn, CO₂, H₂O gazlarının 1000 °K’lik sıcaklıktan geçirilip diğer gazlardan ayrıştırılması ile elde edilir. Radon gazını ticari olarak küçük miktarlarda edinmek mümkündür ancak radyoaktif oluşu, kısa yarı ömürlü oluşu, çok küçük miktarlarının bile çok pahalı olmasına sebep olmuştur.

Radon gazı yerin derinliklerinde uranyum ve toryum atomlarının bozunma zincirinden düzenli olarak üretilir. Radon doğal olarak üretilen üç izotopa sahiptir. Bu izotoplar ²²²Rn, ²²⁰Rn ve ²¹⁹Rn çekirdekleridir. ²²²Rn izotopu uranyum (²³⁸U) elementinin doğal bozunma serisinde sürekli üretilir. ²²⁰Rn izotopu toryum (²³²Th) elementinin doğal bozunma serisinin bir ürünüdür. ²¹⁹Rn ise uranyum (²³⁵U) izotopunun bozunma serisi ürünüdür. Doğal olarak üretilen izotoplardan ²²²Rn en uzun

yarılanma ömrüne sahiptir (^{222}Rn , $t_{1/2}$ 3,82 gün). Diğer iki izotopun yarılanma ömrü ise çok daha kısa olup ^{220}Rn (toron) için $t_{1/2}= 55,6$ s ve ^{219}Rn (aktinon) için $t_{1/2}= 3,96$ s'dir. Toron ve aktinon çekirdeklerinin kısa ömürlü olması, aktinon ana çekirdeğinin bağıl bolluğunun çok az oluşu ölçümlerde bu iki çekirdeğin yaklaşık ihmal edilmesine sebep olmuştur. Radon gazı ölçümlerinde genellikle ^{222}Rn izotopu kastedilir. Dünyada ^{232}Th miktarının çok olduğu bazı bölgelerde ^{219}Rn oranı ^{222}Rn 'den çok daha fazladır. Örneğin Hindistan'ın Kerala bölgesinde fazlaca bulunan monazit (ThPO_4) çakıllarında çok fazla ^{220}Rn aktivitesi bulunmaktadır (Durrani, 1997).

Radonun atmosferdeki yoğunluğu molekül başına 6×10^{-20} tanedir. Yaklaşık her bir mililitre havada 150 radon atomu bulunur. Atmosferdeki radon yoğunluğu toprakta bulunan uranyum ve radyum miktarına bağlı olarak değişir. Topraktaki tipik ^{238}U ve ^{226}Ra aktivitesi 40 Bq/m^3 'e eşittir. Radonun temel kaynağı yerkabuğu olduğu için tüm dünyada yerin derinliklerinden sürekli üretilir. Radonun topraktaki ortalama üretim hızı 17 mBq/kg civarındadır (NCRP, 1997). Toplamda atmosfere salınan yıllık radon gazı miktarının $9 \times 10^{19} \text{ Bq}$ olduğu tahmin edilmektedir.

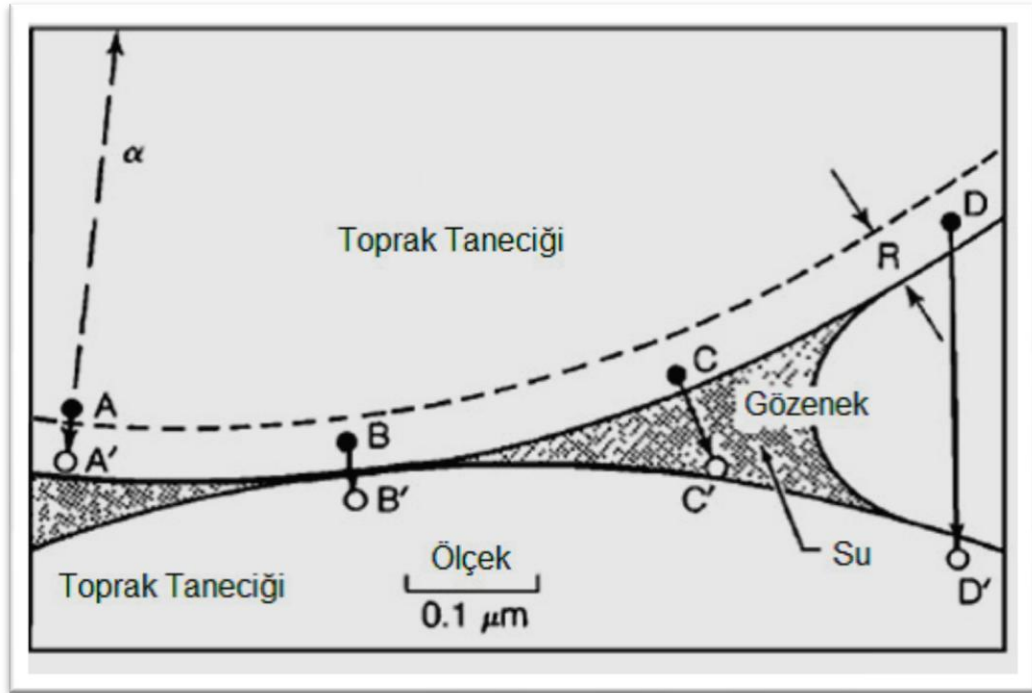
Radonun havadaki difüzyon katsayısı $0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir. Ortalama difüzyon mesafesi $\sqrt{D \cdot \tau}$ eşitliği yardımı ile bulunur. Burada D difüzyon katsayısı, τ ise çekirdeğin ortalama ömrüne eşittir. Bu eşitliğe göre ^{222}Rn bozunmadan havada ortalama 2,2 m, ^{220}Rn ise 0,029 m hareket edebilir. Havada difüzyon mesafesi ^{219}Rn için çok daha kısadır. ^{222}Rn gözenekli kuru toprakta bozunmadan ortalama 1,6 m, suda ise sadece 1,6 cm hareket edebilmektedir. Radon gazı kayalıklardaki çatlak ve kırıklardan bir günde difüzyonla 100 m hareket edebilmektedir. Çizelge 3.3'de radon atomlarının farklı ortamlardaki difüzyon mesafesi ve difüzyon sabitleri verilmiştir. Çizelge 3.3'e göre radon atomları havada en uzun difüzyon mesafesine sahiptir. Radon gazı olduğu için yerkabuğu çatlak ve kırıklarından difüzyonla, toprak gazı (N_2 , CH_4 ve CO_2) ile, su içinde çözünerek su ile birlikte yeryüzüne taşınır, atmosfere karışır ve seyreltik hale geçer. Havadan yaklaşık 7 kat daha yoğun ($9,73 \text{ g/l}$) olan radon gazı binaların zemin katlarındaki çatlaklardan, bağlantı noktalarından, tesisat boşluklarından, yapı malzemelerinden ve şebeke suyundan sızarak binalarda birikip olumsuz sağlık etkilerine yol açar, yükseklere çıktıkça oranı azalır. Radon gazının topraktan atmosfere taşınması toprağın gözenekliliğine, geçirgenliğine, nem miktarına ve hava durumuna (rüzgâr, yağış, sıcaklık vs.) bağlı olarak farklılıklar gösterir (Gunby, *et al.*, 1993).

Çizelge 3.3. Farklı ortamlardaki radon izotoplarının difüzyon mesafeleri (Durrani'den, 1997).

Ortam	Ortalama Menzil		Difüzyon Sabiti
	²²² Rn (cm)	²²⁰ Rn (cm)	(<i>D</i>) cm ² .s ⁻¹
Hava	220	2,85	10 ⁻¹
Gözenekli Toprak	155	2,0	5.10 ⁻²
Su	2,2	0,0285	10 ⁻⁵
Yoğun Gözenekli Toprak	1,55	0,020	5.10 ⁻⁶

3.2. Toprakta Radonun Oluşumu

Radon atomları toprakta bulunan radyumun bozunması ile oluşur ancak oluşan radon atomlarının çoğunluğu serbest kalarak gözeneklere geçemez, buldukları yerlerde zamanla bozularak metal olan polonyum atomuna dönüşür. Toprak taneciklerindeki radyumun alfa bozunması sonucunda yüksek miktarda kinetik enerji açığa çıkar. Açığa çıkan bu enerjinin 4,78 MeV'lik kısmı alfa parçacığı tarafından taşınır. Momentumun korunumu gereği radon atomu 86 keV'lik geri tepme enerjisine sahiptir. Bu enerjideki radon atomu mineral içinde 20-70 nm arasında hareket (geri tepme) edebilir. Şekil 3.1'de radonun oluşarak serbest kalma mekanizması verilmiştir.



Şekil 3.1. Radonun oluşum mekanizması (Durrani'den, 1997).

Eğer radyum atomu mineral taneciğinin dışından 20 ile 70 nm derinliğinde ise oluşan radon atomlarının serbest kalarak gözeneklere geçme olasılığı vardır. Çizelge 3.4'de alfa bozunması ile geri tepen çekirdeğin silis içindeki menzilleri verilmiştir. Örneğin, Çizelge 3.4'e göre 86 keV enerjiye sahip ^{222}Rn atomları SiO_2 mineralinde 26 nm hareket edebilir. Eğer radyum atomu bu mineralin dışından 26 nm'lik mesafede ise oluşan radon atomu serbest kalabilir. Serbest kalmasını etkileyen diğer bir faktör ise gözeneklerin hava veya su ile dolu olmasıdır. Gözenekler su ile dolu ise geri tepen radon atomlarının su içindeki geri tepme kesri çok küçük olduğu için radonun su içinde durgun hale gelme olasılığı daha yüksektir. Eğer gözenekler hava ile dolu ise geri tepme etkisi ile radon atomları gözenekleri geçerek karşı mineral taneciğine saplanarak kalabilir ve sonunda gözeneklere taşınmamış olur. Bu durumdaki radon atomu, bozunmadan önce suyun aşındırma etkisi sonucunda serbest kalabilir. İnce tanecikli kumul ve topraklarda oluşan radon atomlarının serbest kalma olasılığı daha yüksektir. Kil tanecikleri çok küçük olduğu için kilde oluşan radon atomlarının çoğunluğu gözeneklere geçer. Kilde oluşan radon atomlarının gözeneklere geçme oranı % 40 ile % 70 arasında değişir.

Çizelge 3.4. Alfa bozunması ile geri tepen çekirdeğin silis içindeki menzili (Durrani'den, 1997).

Bozunan Çekirdek	Geri Tepen Çekirdek	SiO ₂ İçindeki Menzil (nm)
²²⁶ Ra	²²² Rn	26
²²² Rn	²¹⁸ Po	30
²¹⁸ Po	²¹⁴ Pb	34
²¹⁴ Po	²¹⁰ Pb	45
²²⁴ Ra	²²⁰ Rn	31
²²⁰ Rn	²¹⁶ Po	35
²¹⁶ Po	²¹² Pb	38
²¹² Po	²⁰⁸ Pb	52
²¹² Bi	²⁰⁸ Tl	35

Kuru kum ve çakılda oluşan radon atomlarının % 30'u serbest kalabilmektedir. Bu kum ve çakıl için yüksek bir orandır. Yapılan araştırmalara göre kum ve çakıl çevredeki radyum atomlarını yüzeylerine (<0,15 nm) absorbe etmektedir. Kum ve çakıl yüzeyinde bulunan radyum küçük taşlarda büyük taşlara göre 3-8 kat daha fazla radon yoğunluğu oluşturur. Diğer bir açıklama ise radyum atomları kum ve çakıl üzerine çökelti oluşturmaktadır. Yapılan bu iki açıklama kum ve çakıllardaki yüksek miktardaki radon atomunun serbest kalmasını açıklamaktadır (Durrani, 1997). Çizelge 3.5'de farklı mineral yapısında oluşan radon atomlarının serbest kalma olasılığı verilmiştir.

Çizelge 3.5. Farklı minerallerin emanasyon kesri (Durrani'den, 1997).

Toprak Türü	Emanasyon Kesri (%)
Çakıl	15-40
Kum	15-30
Kil	30-70
Çakıl (Boyut 1-8 mm)	5-15
Ufalanmış Granit Kayalık (1-8 mm)	15-30

3.3. Farklı Derinliklerdeki Radon Yoğunluğu

Yüzeyden derinlere indikçe radon yoğunluğu artar. Belirli derinliğe ulaştıktan sonra oluşan radon miktarı ile başka yerlere taşınan radon miktarı dengeye ulaşır. Bu derinliklerde ölçülen radon yoğunluğu değişmez. Toprakta radon gazı ölçümlerini tam bu denge noktalarında ölçmek uygun olurdu. Böylece yukarılara doğru toprağın geçirgenliği, toprağın nem miktarı, radon gazının difüzyon miktarı, topraktaki radyum oranı gibi durumlar daha rahat incelenebilirdi. Ancak hem ekonomik açıdan hem de pratik açıdan bu her zaman mümkün olmayabilir. Yapılan bir dizi araştırmaya göre toprağın 0,5 m derinliğindeki radon yoğunluğu, denge değerindeki radon yoğunluğunun % 50'sine eşittir (Kraner, *et al.*, 1964; Malmqvist, *et al.*, 1980; Hesselbom, 1985). Toprağın 1 m derinliğindeki radon yoğunluğu denge değerinin % 70-80 miktarına eşittir (Rose, *et al.*, 1990).

Kanada'da bir araştırma projesi olarak uranyum maden atıklarında farklı derinlikteki radon yoğunlukları incelenmiştir. Bu araştırmada 5,7 m derinliklerine kadar inilmiş AlfaGuard (α probe 601) cihazı ile her aşamadaki radon miktarı kaydedilmiştir. Uranyum cevheri işlendikten sonraki kısım çoğunlukla çakıl taşı ve ince kumdan oluşmaktadır. Bu atıklardaki radyum miktarı 3.000-4.750 Bq/kg aralığında, toprak geçirgenliği % 50 civarında, nemlilik oranı ise % 5-10 arasında değişmektedir. Bu araştırma toprak gazındaki radon yoğunluğunun derinliğe bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. 50 cm'lik derinlik farkı radon yoğunluğunu 670 kBq/m³ değiştirebilmektedir. 5,7 m derinliğinde radon miktarı ise yaklaşık 4000 kBq/m³ civarındadır.

Yapılan pek çok araştırma sonucuna göre en uygun ölçüm derinliği 1 m olarak belirlenmiştir (Durrani, 1997). Bu derinlikteki toprak gazı radon yoğunluğu çoğunlukla sabit kalmaktadır. Daha derinlere inmek edinebileceğimiz bilgileri çok az etkilemektedir. Eğer toprak iri çakıl taşlarından oluşuyorsa ve toprağın geçirgenliği fazla ise daha derinlere inmek gerekir. 0,7-1 m iklimsel değişimlerin de ölçülebilmesi açısından ideal derinlik olduğu kabul görmüştür. Daha derinler yerleştirilecek detektörler bakımından risk (topraktaki su ve nemlilik bakımından) oluşturmaktadır. Ölçüm sonuçlarının tutarsızlığından dolayı 70 cm'den daha az derinlikte ölçüm yapmaktan kaçınılmalıdır.

Topraktaki radon yoğunluğu mevsimsel farklılıklar gösterir. Bu farklılıklar toprağın geçirgenliğine ve topraktaki nem miktarına bağlı olarak değişir. Topraktaki radon yoğunluğunun mevsimsel etkisi pek çok araştırma projeleri kapsamında incelenmiştir (Rose, *et al.*, 1990). Yapılan araştırma kapsamında LR 115 detektörleri kullanılmıştır. Yerin derinliklerine sabitlenmiş boruların üst kısmına filmler yerleştirilmiştir. Araştırma sonucuna göre toprak yüzeyi kar ve buz ile kaplandığında toprak gazındaki radon yoğunluğu en yüksek değerde ölçülmüştür. Bu şartlarda 0,9 m derinliğinde topraktaki radon yoğunluğu 40.000 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. Kar ve buz eridikten sonra toprak doğal olarak havalandırıldığı için atmosfere gaz çıkışı başlamıştır. Bu süreçte aynı derinlikteki radon yoğunluğu 10.000 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. Mevsimsel olarak kış aylarında toprak gazında radon yoğunluğu artmakta yaz aylarında ise azalmaktadır.

Toprak yapısı, nem miktarı, rüzgâr miktarı değişirse aynı derinlikte yakın noktalar arasında farklı radon yoğunlukları ölçülebilir. Homojen toprak yapısına sahip olmayan bölgelerde yakın noktalarda farklı radon değerleri normal olarak görülür. Yakın noktalar arasında 2-3 kat farklılık oluşabilir. Aynı bölgede uygulanan farklı metot ve ölçüm aletleri de farklı sonuçlar verebilir. Doğru değerler bulmak için yılın farklı zamanlarında pek çok ölçüm yapmak gerekir (Durrani, 1997).

3.4. Atmosferde Radon Yoğunluğu

Radon gazının atmosferdeki varlığı radonun keşfedilmesinden itibaren bugüne kadar bilinmektedir. Toprakta oluşan radon gazı atmosfere karışarak hemen seyreltik hale geçer. Diz seviyesinde radon yoğunluğu ihmal edilebilecek oranda bulunur. Ev

dışı küresel radon yoğunluğu ortalama 8-14 Bq/m³ civarındadır. Farklı hava koşulları atmosferdeki radon yoğunluğunu etkilemektedir. Rüzgârlı havalarda radon gazı rüzgârın etkisi ile atmosfere hızlıca dağılırken rüzgârsız bir havada difüzyon ile yayılır. Toprakta oluşan radon gazı difüzyon ile atmosfere karışır. Radon gazının difüzyon hızı pek çok faktöre bağlı olarak değişir. Topraktaki radon oluşum hızı, toprak ile hava arasındaki basınç farkı, topraktaki gözeneklerde bulunan su ve nem miktarı, toprağın gözenek yapısı, havadaki yağış durumu, havanın sıcaklığı radon atomlarının topraktan havaya taşınma hızını etkileyen başlıca faktörlerdir. Yağmurlu havalarda toprak gözenekleri kapalı olduğu için radon atomlarının difüzyon hızı yavaşlar. Kışın kar ve don etkisi ile gözenekler kapanır topraktan havaya radonun taşınması yavaşlarken yaz aylarında gözenekler açıldığı için difüzyon hızı artar. Rüzgârlı havalarda atmosferde alçak basınç oluştuğu için topraktaki gazlar vakum etkisi ile havaya karışır. Sıcak havalarda topraktaki nem miktarı azalır gözenekler açılır, topraktan havaya gaz geçişi hızlanır. Sıcak hava yükseldiği için zeminde alçak basınç etkisi yapar, topraktaki radon gazını çeker.

Toprakta bozunma ile oluşan radon atomları toprak gazına karışır. Yerin 3-4 metre derinliklerindeki radon aktivitesi yaklaşık 55 kBq/m³ değerinden toprağın 5 cm altında 1000 Bq/m³ seviyesine inmektedir. Havaya karışan radon gazı hızlıca seyreltik hale geçer. Toprağın hemen altı ile üstü arasındaki oran 100 kata kadar değişebilir. Toprak seviyesinden 1 m yukarıda küresel radon oranı ortalama 8 Bq/m³'dür. Toprağın difüzyon katsayısı havanın difüzyon katsayısından küçüktür. Toprakta 1 m'lik fark radon yoğunluğunu % 50 değiştirebilir. Atmosferde ise 1000 m'de radon yoğunluğu ancak yarıya inebilmektedir. Troposfer tabakasının denizden 10-20 km yukarisına kadar radon atomları bulunmaktadır.

Okyanus yüzeyinde havadaki ortalama radon yoğunluğu 0,04 Bq/m³'dir. Okyanuslardan atmosfere radon gazının akış hızı ise sadece 0,1 m.Bq.m⁻².s⁻¹'dir. Bu değer topraktan atmosfere akış hızı ile kıyaslandığında ihmal edilecek seviyededir.

Havadaki radon yoğunluğu günlük ve mevsimsel farklılıklar gösterir. Güneşin doğuşu ile hava ısınır, gün batımı ile hava tekrar soğumaya başlar. Gece gündüz sıcaklık farklılıkları hava akımlarının oluşmasını sağlar. Gece soğuyan hava yüzeye çöker, içerisindeki radon yoğunluğu artar, güneşin doğması ile ısınan hava yükselir,

havadaki radon yoğunluğu azalır. Yapılan araştırmalara göre güneş doğduktan 1 saat sonra havadaki radon seviyesi en fazla, gün batımından 1-2 saat önce ise en düşüktür.

Açık havada ölçülen radon miktarı mevsimsel farklılıklar gösterir. Açık havada kışın radon yoğunluğu en az, yazın ise en yüksektir. Amerika da 1977 – 1986 yılları arasında New York, 1983 ile 1987 yılları arasında New Jersey şehirlerinde yapılan ölçümlere göre ev dışı radon yoğunluğu yazları artmakta, kışın azalmaktadır. New Mexico şehrinde 4 yıl boyunca yapılan ölçüm sonuçlarına göre radon oranı yazın artmakta ve kışın azalmaktadır. Chicago Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda yapılan araştırmaya göre ev dışı radon yoğunluğu sonbahar aylarında sabah erken, gün ortası ve akşam saatlerinde yüksektir (Durrani, 1997; H. Moses, *et al.*, 1960).

3.5. Suda Radon Yoğunluğu

Radon suda kolayca çözünen bir gazdır. 1 atmosfer basıncı altında 0 °C'de radonun sudaki çözünürlüğü 510 cm³/kg'dır. Sıcaklık arttıkça çözünme miktarı azalır. Çözünme miktarı 20 °C'de 230 cm³/kg iken 30 °C'de bu değer 169 cm³/kg'a düşer (UNSCEAR, 1982). Yer altı suyu ile yüzey suları kayalık ve toprak ile karışmış durumdadır. Mineral ve toprakta radyumun bozunumu ile gözeneklerdeki suya karışan radon yoğunlukla su içinde kalır. Eğer su hareket ediyorsa bir miktar radon buharlaşabilir. Yerin derinliklerinde bulunan ana taşlardaki (yatak taşları) radon yoğunluğu diğer taşlardan daha yüksektir. Granit kayalıkların kırık ve çatlaklarında bulunan sulardaki yüksek radon yoğunluğu uranyum etkisini göstermektedir. Granit taşlarda ortalama uranyum yoğunluğu milyonda 12 atom (12 ppm) civarındadır. Bu değer 148 kBq/m³'lük uranyum aktivitesine denk gelmektedir. Granit kayalarda radyum ile uranyum atomunun kalıcı dengeye ulaştığı düşünülürse buralarda 400 kBq/m³'lük radon yoğunluğu oluşabilir. Su, kayalıklardan, çakıllardan ve toprak içinden geçerken radon atomları suya karışır. Yerleşim yerinin şebeke suyu yüzey sularından karşılanıyorsa sudaki radon yoğunluğu ortalama 40 Bq/m³'den daha azdır. Eğer şebeke suyu yer altı sularından karşılanıyorsa sudaki ortalama radon yoğunluğu 4 – 40 kBq/m³ arasında değişebilir. Suda çözülmüş halde bulunan radon gazı sudan kolayca atmosfere karışamaz. Atmosfere salınan radon gazının sadece % 1-2'lik kısmının deniz ve okyanuslardan salınması bu bilgiyi doğrular niteliktedir. İçerisinde 400 kBq/m³

radon yoğunluğu bulunduran bir şebeke suyu musluk ve duşlardan evlere fazladan 40 Bq/m³ radon salınımına sebep olmaktadır.

Su içinde ölçülen yüksek radon yoğunluğu o bölgede yüksek uranyum miktarı anlamına gelmediği gibi düşük ölçülen radon yoğunluğu da çevredeki uranyum miktarının az olduğunu göstermez. Radon, gaz olduğu için difüzyon ve diğer yollarla (su, toprak gazı, basınç farkı vs.) taşınarak gittiği yerlerde birikip yüksek yoğunluğa sebep olacağı gibi oluştuğu yerlerde düşük yoğunlukta bulunabilir. Örneğin şebeke suyu yardımı ile yüksek orandaki radon evlere taşınıp evlerde yüksek radon yoğunluğunun oluşmasına yol açabilir. Çizelge 3.6'da farklı ortamlardaki radon yoğunlukları verilmiştir. Çizelge 3.6'ya bakıldığında okyanus yüzeyinde radon yoğunluğu en düşük seviyede bulunur.

Çizelge 3.6. Farklı ortamlardaki radon miktarları (Durrani'den, 1997).

Yer	Yoğunluk (Atom/cm ³)
Okyanus Yüzeyi	0,04
Açık Hava	4
Tipik Amerikan Evleri	20
Toprak Gazı	20.000
Bazı Mineraller	500.000

3.6. Evlerde Yapı Malzemesinden Kaynaklanan Radon Yoğunluğu

Evlerde oluşan radon atomlarının başlıca kaynaklarından biri de ev yapı malzemeleridir. Ev yapımında kullanılan bütün materyaller az ya da çok uranyum atomu (²³⁸U) bulundurur. Bazı malzemeler yüksek oranda uranyum (²³⁸U) ve radyum (²²⁶Ra) içerir. Bu durum hem doğal hem de yapay malzemeler için geçerlidir. Granitler yüksek oranda uranyum bulundurur. İnşaat yapı malzemesi olarak kullanılan bazı yatak taşları yüksek oranda uranyum içerebilir. Bazı toprak çeşitleri özellikle kil, yüksek oranda uranyum içerebilir. Yapay olarak üretilen beton içinde yüksek oranda uranyum bulunduran toprak çeşitleri bulunabilir. Gama ışın spektrometreleri duvardaki radon emisyon miktarını ve yerini kolayca tespit edebilir. Bu amaç için kullanılacak gama ışın spektrometrelerinin enerji ölçüm aralığının 50 keV ile 3 MeV arasına ayarlanması

gerekir. Duvardan gelen gama ışın yoğunluğu $0,25 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ 'i aşıyorsa duvar önemli bir radon kaynağıdır. Duvarlardan yüksek oranda radon emisyonu evlerde yüksek radon yoğunluğu anlamına gelmez. Havalandırma evlerde oluşacak radon yoğunluğunu belirleyici en önemli faktörlerdendir. Havalandırması düzenli olarak yapılan evlerde yüksek radon konsantrasyonu oluşmaz. Bazı alçı türleri yüksek oranda radyum içerir, dolayısı ile yüksek oranda radon yoğunluğu oluşturur. Radyum miktarı da gama ışın spektrometresi ile kolayca tespit edilebilir. Eğer uranyum bakımından zengin madde ufalanarak yüzey ve duvarlarda ince yalıtım malzemesi olarak kullanılmış ise gama ışın spektrometresi radyasyon kaynağının yerini tam tespit edemeyebilir. Uranyum bakımından zengin taşlar kullanılarak yapılan yalıtım malzemeleri evler için önemli bir radon kaynağı oluşturur. Duvarlardaki küçük kanalcıklardan dışarı radon emisyon miktarı, kılcalların büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Duvar yüzeyinde bulunan kılcallardan dışarı yönde oluşan radon emisyonu, Denklem 3.1 yardımı ile ifade edilir:

$$E=c.D^{-x} \quad (3.1)$$

Burada E, emisyon oranı; c, bir sabit; x, duvar yoğunluğu olup 0,5 ile 1 arasında değişir. D ise duvar büyüklüğünün istatistiksel dağılımıdır. Çizelge 3.7'de bazı İsveç bina yapı malzemelerindeki ^{226}Ra ve ^{232}Th oranları verilmiştir. Buna göre şistli hafif beton en yüksek ^{226}Ra yoğunluğunu oluştururken kil en yüksek toryum yoğunluğunu oluşturur. Alçı ^{232}Th ve ^{226}Ra bakımından en düşük aktiviteye sahiptir. Çizelge 3.8'de Alman bina yapı malzemelerinde ve bazı artık malzemelerdeki ^{232}Th ve ^{226}Ra oranları verilmiştir. Her iki çekirdek yoğunluğu bakımından da en düşük seviyede bulunan malzeme kireç taşıdır (NCRP, 1988).

Çizelge 3.7. Bazı İsveç ev yapı malzemelerindeki Ra ve Th oranları (Möre'den, 1985)

Malzeme	²²⁶ Ra (Bq.kg ⁻¹)	²³² Th (Bq.kg ⁻¹)
Tuğla	40-164	71-180
Kireç Taşı	7-15	4-10
Beton	31-63	46-127
Hafif Beton (Kumlu)	3-132	4-157
Hafif Beton (Şistli)	788-2.627	19-96
Alçı	2-9	0-12
Kil	137-189	161-184

Çizelge 3.8. Bazı Alman ev yapı malzemeleri ve atıklardaki radyum, toryum oranı (Durrani'den, 1997).

Malzeme	²²⁶ Ra (Bq.kg ⁻¹)	²³² Th (Bq.kg ⁻¹)
Granit	30-500	17-311
Tuğla	10-200	12-200
Kireç Taşı	4-41	2-20
Alçı	2-70	2-100
Beton	7-92	4-71
Hafif Beton	6-80	1-60
Bakır Curuf	861-2100	18-78
Kalay Curuf	1.000-1.200	230-340
Kömür Külü	4-200	6-150

3.7. Ev İçinde Radon Gazı Dağılımı

Evlerdeki radon gazının ana kaynağı önem sırasına göre toprak, bina yapı malzemeleri ve şebeke suyudur. Bunların dışındaki faktörlerin ev içi radon yoğunluğuna katkısı çok düşüktür. Radon gazının evlere giriş yolları belirli geçiş noktalardan gerçekleşebilir. Örneğin müstakil evlerde radon gazının ana kaynağı evin

altında bulunan topraktır. Toprakta oluşan radon gazı belirli yerlerde bulunan çatlaklardan eve taşınır. Daha sonra difüzyon ile evin her tarafına yayılır. Odaların kapılarının açık veya kapalı olması ve havalandırma oda içindeki radon yoğunluğunu etkiler. Eğer ev bir apartman dairesi ve üst katlarda ise başlıca radon kaynağı bina yapı malzemesi ve musluk suyudur. Evlerdeki şebeke suyu kullanıldıkça içinde bulunan radon gazı önce suyun kullanıldığı odaya birikir sonra evin diğer odalarına difüzyon ile dağılır. Evlerin zemin katından içeri giren radon gazı aynı evin üst katlarına doğru taşınır ancak üst katlara çıktıkça radon gazının miktarı azalır. Burada en önemli etken radon gazının yoğunluğunun havanın yoğunluğundan çok daha fazla olmasıdır (Durrani, 1997). Eskişehir il merkezinde yapılan radon gazı ölçümlerinde, aynı evin alt katı ile üst katı arasındaki ölçümlerde ciddi farklılıklar gözlemlenmiştir.

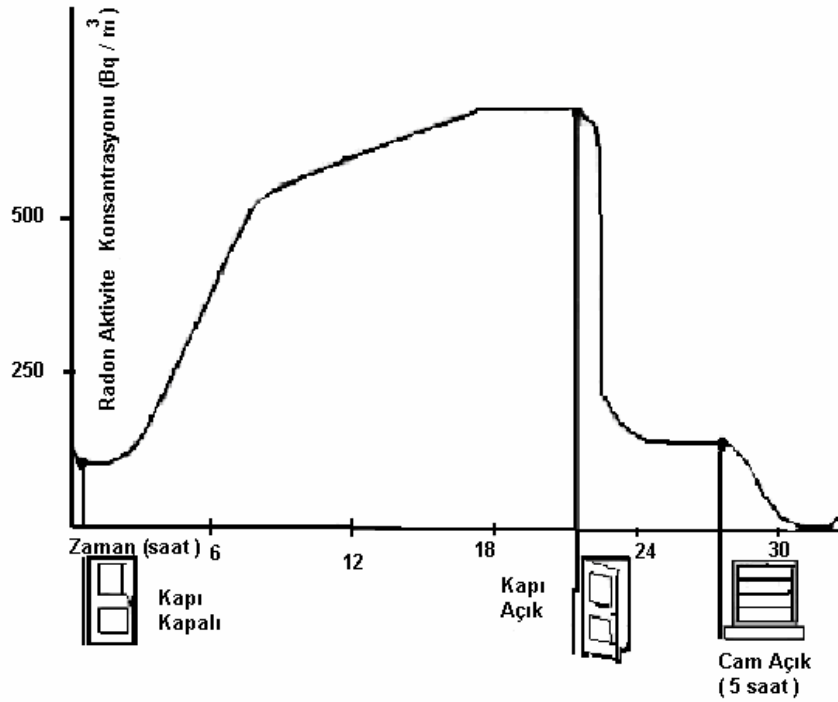
Çizelge 3.9. Alman evlerinde farklı katlardaki radon miktarları (Heller and Poulheim'den, 1992).

Kat →	Bodrum Kat	Zemin Kat	1. Kat	2.Kat	Açık Hava
Ortalama Radon Seviyesi (Bq/m ³)	52	43	38	33	14

Bodrum katlar havalandırması en az olan ortamlar. Aynı zamanda bodrum katlar yere en yakın ortamlar olduğundan toprakta bulunan radon gazı kırık ve çatlaklardan kolaylıkla bodrum katlara geçebilir, havadan daha yoğun olduğu için zemine yakın yerlerde daha çok birikir. Ev içinde bir odanın kapısının açık ya da kapalı olması odadaki radon yoğunluğunu önemli ölçüde etkiler. Evlerde mutfaklar en iyi havalandırılan bölümlerdir dolayısı ile mutfaklarda radon yoğunluğu çok düşük seviyede bulunur. Almanya genelinde yapılan bir araştırma ile 3 katlı evlerin (tripleks) ev içi radon gazı dağılımı incelenmiştir. Yapılan araştırma sonuçları Çizelge 3.9'da görülmektedir. Çizelge 3.9'a bakıldığında evin bodrum katından 2. katına çıkıldıkça ortamın radon yoğunluğu azalmıştır. Bodrum kat yere en yakın ve havalandırılması en az olduğu için radon yoğunluğu en fazla olmaktadır. Aynı araştırmada odalara göre radon gazı yoğunluğu incelenmiş mutfaktaki radon yoğunluğu diğer odalara göre en düşük ölçülmüştür (Heller and Poulheim, 1992).

3.8. Evlerde Gün İçi Radon Yoğunluk Farklılıkları

Güneş gündüz yeryüzünü ısıtır, gün batımı ile yeryüzü soğumaya başlar. Gece gündüz sıcaklık farklılıkları oluşur. Gece yüzeyde oluşan serin hava yüzeyde radon gazının birikmesini sağlar. Gündüz ısınan hava yükselirken radon gazını da birlikte yukarı taşır. Yapılan araştırmalarda açık havadaki radon yoğunluğu güneş doğduktan kısa bir süre sonra en yüksek değerine çıkmaktadır. Güneş batmadan kısa süre önce açık hava radon yoğunluğu en düşük değerindedir. Havalandırma evlerdeki radon yoğunluğunu belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Sadece doğal olarak havalandırılan evlerde hava durumu evdeki radon yoğunluğunu etkiler. Hava durumuna göre oluşan basınç farklılıkları hava akımının yönünü belirler. Rüzgârlı havalarda hava akımı fazla olduğundan evlerdeki radon oranı azalır. Rüzgârsız havalarda zayıf hava akımı oluşur, ev içi radon yoğunluğu artar. Evlerdeki yüksek radon yoğunluğunun ana kaynağı topraktan gelen radon gazıdır. Evlerdeki radon miktarı evdeki bireylerin yaşam stillerine göre değişir. Evin düzenli olarak havalandırılması ve mutfak fanlarının çalışması radon miktarını belirli seviyede tutar. Evde yakıt doğrudan yakılarak ev ısıtılmıyorsa eve düzenli olarak taze hava girmesi gerekir, bu vesile ile radon yoğunluğu da dengelenmiş olur. Kışın evin içi sıcak, dışarısoğuk olduğundan ev içinde oluşan alçak basınç radon yoğunluğunu artırır. Kısa süreli yapılan havalandırma ile evdeki radon yoğunluğu azalır, ancak radon yoğunluğu hızlıca tekrar artar. Şekil 3.2’de ev içi radon yoğunluğunun havalandırmaya bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.2’ye göre havalandırma yolları kapandığında ev içi radon yoğunluğu artmakta kapı ve pencerenin açılması ile radon yoğunluğu hızlıca azalmaktadır (Durrani, 1997).

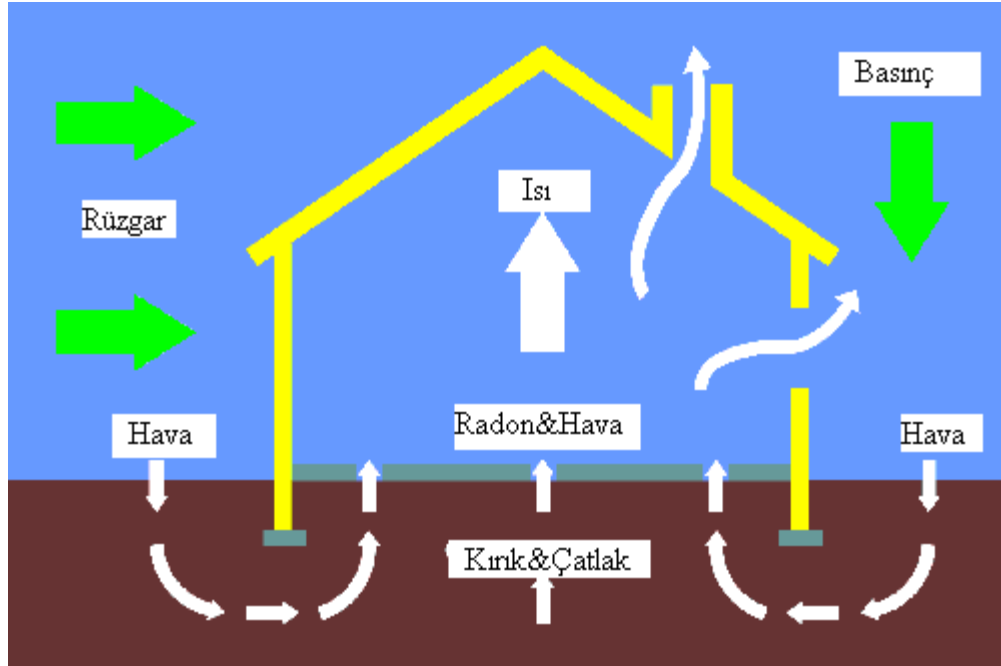


Şekil 3.2. Ev içi radon yoğunluğunun havalandırmaya bağlı değişimi (URL-1).

3.9. Ev İçi Radon Yoğunluğunun Mevsimsel Değişimi

Evlerde radon yoğunluğu mevsimsel farklılıklar gösterir özellikle doğal olarak havalandırılan evlerde bu etki daha belirgindir. Yazları ev içi sıcaklığı açık hava sıcaklığından biraz daha düşüktür. Dışarısı sıcak olduğu için dışarıda alçak basınç bölgesi oluşur. Evden dışarı doğal hava akımı meydana gelir. Evlerdeki radon yoğunluğu azalır. Eğer evlerdeki ana radon kaynağı su veya bina yapı malzemeleri ise evden dışarı yönde oluşan hava akımı ev içi radon yoğunluğunu azaltır. Kışın evler açık havaya göre daha sıcak ve havalandırma daha az olduğu için evlerde alçak basınç oluşur. Sıcak ortamda oluşan alçak basınç çevredeki gazları içeri çektiğinden içerdeki radon gazı miktarı artar. Evlerdeki radon yoğunluğu sonbahar aylarında yükselmeye başlarken ilkbahar aylarında ise azalmaya başlar. Evlerdeki radon yoğunluğunun mevsimsel farklılıklar göstermesi ev tiplerine, radon kaynaklarına, evde yaşayan insanların yaşam stillerine, evin havalandırma sistemine, evin ısıtılmasına ve mevsime bağlıdır. Şekil 3.3'de radon gazının evlere giriş yolları verilmiştir. Şekil 3.3'e göre

radon gazının evlere taşınmasında ev içi ve ev dışı basınç farkı önemli rol oynamaktadır (Durrani, 1997).



Şekil 3.3. Radon gazının evlere giriş yolları.

Aynı bölgede bulunan aynı tip evlerde bile farklı radon yoğunluğu oluşabilir. Önceden hazırlanmış hiçbir harita tek bir evin radon yoğunluğunu tam olarak tahmin edemez. Hazırlanan radon gazı haritaları belirli bölgeler için yaklaşık radon miktarları hakkında bilgiler verebilir. Radon gazı haritaları yardımı ile hangi bölgeler sınır değerinin üzerinde hangileri altında önceden belirlenebilir (Durrani, 1997).

3.10. Evlerdeki Radon Yoğunluğunun Logaritmik Dağılımı

Evlerdeki radon yoğunluğunu etkileyen pek çok faktör bulunur. Topraktaki radyum miktarı, toprağın geçirgenliği, binanın ayrıntılı yapısı önemli bazı faktörlerdendir. Radon miktarının pek çok faktöre bağımlılığı evlerde farklı yoğunlukta radon oluşmasına neden olur. Evlerde ölçülen radon miktarı log-normal bir dağılım gösterir. Ölçüm yapılan yerin tüm ülke veya küçük bir alan olması sonucu değiştirmez. Radon yoğunluğunun log-normal bir dağılım göstermesi istatistiksel olarak şöyle açıklanabilir: Eğer bir parametre bağımsız olarak pek çok faktöre bağlı ise parametrenin

sahip olabileceği değerler normal dağılım gösterir. Eğer evlerdeki radon yoğunluğunu düşünürsek radon yoğunluğunu etkileyen çok fazla etken bulunmaktadır. Bu faktörlerin radon yoğunluğuna etkisi aritmetik olarak değil geometrik olarak olmaktadır. Evlerdeki radon yoğunluğu Denklem 3.2'deki gibi ifade edilebilir:

$$Rn_{iç} = Rn_{dış} + K.L.M... \quad (3.2)$$

Burada, $Rn_{iç}$, ev içi radon yoğunluğu, $Rn_{dış}$ ise açık hava radon yoğunludur. K, L, M vs., ev içi radon yoğunluğunu etkileyen diğer parametrelerdir. Bu parametreler topraktaki radyum yoğunluğu, toprağın geçirgenliği, radon gazının evlere giriş kanalları, havalandırma, basınç ve sıcaklık olabilir. Bu faktörler radon gazının evlere ne kadar taşındığını ve evlerde ne kadar süre kaldığını belirler. Uygulanacak modellemeye göre her bir faktör birbirinden bağımsız ve sonuca çarpım olarak etki etmektedir. Denklem 3.2'nin doğal logaritması alındığında

$$\ln(Rn_{iç} - Rn_{dış}) = \ln(K) + \ln(L) + \ln(M) + \dots \quad (3.3)$$

elde edilir. Burada radon yoğunluğuna etki eden her bir faktörün doğal logaritması birbirinden bağımsız dağılım oluşturur ve ortalamaya etkisi aritmetiktir. $\ln(Rn_{iç} - Rn_{dış})$ ifadesi normal dağılıma uyar. Yapılan bilimsel araştırmalarda, ülke genelinde yapılan radon gazı ölçümlerinde evlerdeki radon yoğunluğunun log-normal dağılıma uyduğu gözlemlenmiştir (Gunby, *et al.*, 1993; Miles, 1994; Durrani, 1997).

3.11. Mevsimsel Düzeltme Faktörü

Evlerdeki radon yoğunluğu mevsimsel farklılıklar gösterdiği ifade edildi. Evlerde radon yoğunluğu kışın en fazla yazın ise en azdır. Evlerdeki ortalama radon yoğunluğunun doğru hesaplanabilmesi için bir yıl veya daha uzun sürelerde ölçüm yapmak gerekir. Ancak her zaman uzun süreli ölçüm mümkün olmayabilir. Bunun yerine kısa süreli ölçümler (birkaç ay) bir düzeltme katsayısı ile çarpılıp ölçüm sonucu uzun süreli ölçümlerle uyumlu hale getirilebilir. Hesaplama kullanılan düzeltme katsayılarına mevsimsel düzeltme faktörleri denir. Bu yolla kısa süreli ölçümler kullanılarak yıllık ortalama radon yoğunluğu yaklaşık bulunur. Mevsimsel düzeltme faktörü ilk defa Pinel tarafından geliştirilmiş ve İngiltere'de uygulanmıştır (Pinel,

1995). Mevsimsel düzeltme faktörünün kullanımı ile ilgili pek çok farklı görüş bulunmaktadır.

Farklı ev tipleri, rüzgârın yönü ve hızı evlerdeki radon yoğunluğunu dış sıcaklıklardan daha fazla etkiler. Bazı ev tiplerinde (İngiltere için evlerin % 10-20'si) mevsimsel farklılıklar oluşmamaktadır ancak normal ev tiplerinde yapılan ölçümlerde mevsimsel farklılık görülmektedir. Normal ev tiplerinde yıllık ortalama radon yoğunluğunun hesaplanmasında mevsimsel düzeltme faktörü daha sağlıklı bilgiler elde etmemizi sağlamıştır (Miles, 2001).

Ev içi ve dışı sıcaklık farklılıkları sonucunda oluşan rüzgârla birlikte evlerde alçak basınç oluşur. Evlerde oluşan alçak basınç etkisi ile zemindeki radon gazı (giriş yolu bulabilirse) vakumlama ile içeri çekilir, ev içi radon yoğunluğu artar. Mevsimsel sıcaklık değişimleri, ev içindeki radon yoğunluğunda farklılıklar oluşturur. Bu sebeplerden dolayı bir yıldan daha kısa süreli ölçümlerde mevsimsel düzeltme faktörü uygulamak gerekir (Wrixon, *et al.*, 1988).

Mevsimsel düzeltme faktörü 1988 tarihinde Wrixon ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaların sonucuna göre Pinel tarafından geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada 1989-1992 tarihleri arasında güney batı İngiltere'de 2057 evde yapılan radon gazı ölçüm sonuçları kullanılmıştır.

Evlerdeki radon yoğunluğu pek çok faktöre bağlı olarak farklılıklar gösterir. Bu faktörlerden bazıları toprağın jeolojik yapısı, toprağın geçirgenliği, bina yapısı, bireylerin yaşam sitemleri ve mevsim farklılıklarıdır. Evlerdeki radon yoğunluğunda toprağın jeolojik yapısı en belirleyici etkidir (Gunby, *et al.*, 1993).

Tortul kayalıkların olduğu yerlerde evlerdeki radon yoğunluğu mevsimsel olarak değişir. Volkanik kayalıkların olduğu yerlerde evlerdeki radon yoğunluğu mevsimsel olarak sabit kalmaktadır (Groves –Kirkby, *et al.*, 2009).

Pek çok araştırmaya göre tek bir mevsimsel düzeltme faktörü geniş bir coğrafyaya uygulanamaz (Pinel, *et al.*, 1995).

Tek set mevsimsel düzeltme faktörü karmaşık coğrafyalara uygulanamaz (Gillmore, *et al.*, 2005).

Pinel'in güneybatı İngiltere için hesapladığı mevsimsel düzeltme faktörü farklı coğrafik yapıda olmasına rağmen tüm ülke için uyum göstermektedir (Wrixon, *et al.*, 1988).

Büyük Britanya Çocuk Kanseri Araştırma Merkezi (2000) her bölge için ayrı mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması gerektiğini ve bu şekilde daha sağlıklı bilgilerin elde edileceğini söylemiştir.

Diğer çalışmalarda, bölgesel düzeltme faktörünün ulusal alanla uyumlu olduğu (Grainger, *et al.*, 2000) veya çok az farklılıkların olduğu (Baysson, *et al.*, 2003) söylenmiştir.

Mevsimsel düzeltme faktörü uzun dönem radon yoğunluğunun tahmin edilmesinde daha sağlıklı bilgiler vermektedir (Burke, *et al.*, 2010).

Mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanmasında istatistiksel metot kullanılır. Bu metot 1995 yılında Pinel tarafından geliştirilmiştir. Bu metot ev içi radon yoğunluğundan arka fon değerinin çıkarılmasını gerektirir. Mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanmasında Fourier ayrıştırma analizi kullanılır. Fourier parametreleri en küçük kareler yöntemi kullanılarak tahmin edilir. Evlerdeki düzeltilmiş (arka fon radyasyon değeri çıkarılmış) radon yoğunluğunun logaritmik değeri normal dağılım gösterir (Nero, *et al.*, 1986). Kullanılan farklı karşılaştırma yöntemleri ve modellemeler evlerdeki radon yoğunluğunun log-normal dağılım gösterdiğini doğrulamaktadır (Murphy and Organo, 2008). Ev içi düzeltilmiş radon yoğunluğunun logaritması normal dağılım gösterir ve Denklem 3.4 ile ifade edilir (Burke, *et al.*, 2010).

$$\text{Log}(Y_j - Y_b) \sim \text{normal} \quad (3.4)$$

Burada, Y_j , j evinde ölçülen ortalama radon yoğunluğu; Y_b , arka fon radon yoğunluğu değeridir. İstatistiksel değerlendirmelere göre İrlanda Ulusal Radon Araştırma Merkezi arka fon radyasyonunu 6 Bq/m^3 olarak almıştır. Yapılan analizlere göre alınan bu değer kullanılan model ile uyumlu sonuçlar göstermektedir. İrlanda 6 Bq/m^3 'lük değeri alırken verilerin uyumluluğuna bakmış ve en uyumlu değer 6 Bq/m^3 olduğu sonucuna varmıştır. Kendi deneysel çalışmamız için, bölgesel karşılaştırmalar yapılarak Eskişehir için en uyumlu arka fon radyasyon değeri 4 Bq/m^3 alınmıştır. İrlanda Radyasyondan Korunma Enstitüsü (RPII) mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplamasında 3 aylık ölçümleri önermektedir. Yapılan ölçüm aralığı 80 gün ile 100 gün arasında sınırlandırılmıştır. Bu tez çalışmasında İrlanda için kullanılmış olan metotlar aynen kullanılmıştır (Burke, *et al.*, 2010). Yapılan ölçümlerde log-normal dağılımdan çok fazla uzaklaşan sonuçlar işleme alınmamıştır. Her bir ölçüm periyodunda elde edilen

değerler belirli aylara tahsis edilir. Örneğin Pinel'in (1995) yapmış olduğu üç aylık ölçümlerde, $i - 1$ ayının ortasında (15. günü) başlayıp $i + 2$ ayının ortasında son bulan ölçüm sonucu i ayına tahsis edilmiştir. Daha basitleştirirsek aralık ayının ortasında başlayıp mart ayının ortasında son bulan bir ölçüm sonucu şubat ayına tahsis edilmiştir. Eğer ölçümler $i - 1$ ayının ikinci yarısında başlayıp $i + 2$ ayının ikinci yarısında son buldu ise ölçümler $i + 1$ ayına tahsis edilir.

Arka fon düzeltilmiş j evinde ölçülen radon yoğunluğunun ortalaması Denklem 3.5 yardımı ile gösterilir.

$$Y_j - Y_b = \frac{1}{t_{2,j} - t_{1,j}} \int_{t_{1,j}}^{t_{2,j}} h_j p(t) dt \quad (3.5)$$

Burada, h_j , tipik bina içi radon yoğunluğu ile j evinde ölçülen radon yoğunluğunun arasındaki farkı temsil eden çarpımsal bir faktördür. $p(t)$, t zamanında tipik bir evde bulunan radon düzeyini açıklar. $p(t)dt$ ise t zamanında belirli bir evde radon yoğunluğunu temsil eden bir fonksiyondur. Ölçüm döneminin başlangıç ve bitiş zamanları sırası ile t_1 ve t_2 ile gösterilmektedir. Denklem 3.5'teki integral j evindeki radon yoğunluğunun ortalamasını hesaplar. Bizim verilerde, ölçümler ayrık zaman dilimlerinde aylar üzerinden alınır. Bu da bize Denklem 3.5'te verilen 3 aylık bir süre için farklı bir toplam yapmak üzere integral dönüşümüne izin verir. İntegral dönüşümü Denklem 3.6 yardımı ile ifade edilir.

$$Y_j - Y_b = \frac{1}{3} h_j \sum_{k=i-1}^{i+1} m_k \quad (3.6)$$

Burada, ölçüm süresi ($t_{2,j} - t_{1,j}$) yaklaşık üç ay, m_k ise $p(t)$ integralinin verilen üç aylık süre boyunca farklı bir uygulamasını gösteren bilinmeyen periyodik bir fonksiyondur. Denklem 3.6'nın logaritmik dönüşümü yapılırsa her bir ölçüm dönemi için, evlerdeki radon yoğunluğunun logaritmasının aritmetik ortalaması, Denklem 3.7 ile hesaplanır.

$$x_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j \in T_i} \log(Y_j - Y_b) = \frac{1}{N_i} \sum_{j \in T_i} \log\left(\frac{1}{3} \sum_{k=i-1}^{i+1} m_k\right) + \frac{1}{N_i} \sum_{j \in T_i} \log(h_j) \quad (3.7)$$

Burada, $j \in T_i$ i ayındaki ölçümlerin yapıldığı evlerin grubunu, N_i ise bu gruptaki evlerin sayısını göstermektedir. Denklem 3.7'nin sol tarafındaki x_i terimleri normal dağılım göstermektedir, böylece $d_i = \exp(x_i)$ eşitliği lognormal veri olarak doğru

modellenmiştir. Bu eşitliğin lineer hale getirilmesi için bir hata teriminin (ε_i) eklenmesi gerekir. Yeni hata terimleri yaklaşık olarak normal dağılım göstermektedir.

$$d_i = \exp(x_i) = \prod_{j \in T_i} (Y_j - Y_b)^{\frac{1}{N_i}} = \frac{1}{3} h_j \sum_{k=i-1}^{i+1} m_k + \varepsilon_i \quad (3.8)$$

Burada, x_i , her bir ölçüm periyodundaki radon yoğunluklarının logaritmasının ortalamasına eşittir ve ölçüm sonuçlarından kolayca hesaplanır. m_i henüz tespit edilememiş bilinmeyen aylık değerlerdir.

Cramer Teoremine göre Denklem 3.7'nin sol ve sağ tarafındaki terimler normal dağılıma uymak zorundadır. Denklem 3.7'nin sağ tarafındaki ikinci terim, ev etkilerinin logaritmasının ortalamasını ifade etmekte olup sifıra eşitlenebilir. Mevsimsel m_i terimi Fourier ayrıştırması kullanılarak Denklem 3.9'daki gibi ifade edilir.

$$m_i = \beta_0 + \sum_{r=1}^6 \left[\alpha_r \sin\left(\frac{2\pi r i}{12}\right) + \beta_r \cos\left(\frac{2\pi r i}{12}\right) \right] + \beta_0 \cos(2\pi r) \quad (3.9)$$

α_1 ve β_1 henüz bulunmamış Fourier parametreleridir. Denklem 3.9 çok kapsamlı periyodiklik için geçerli olup bu çalışma için sadece 12 aylık periyodiklik yeterli olmaktadır. Denklem 3.9 12 aylık periyodiklik için basitleştirilerek Denklem 3.10'daki gibi gösterilir.

$$m_i = \beta_0 + \alpha_1 \sin\left(\frac{2\pi i}{12}\right) + \beta_1 \cos\left(\frac{2\pi i}{12}\right) \quad (3.10)$$

Denklem 3.10 Denklem 3.8'de yerine konulursa aradaki ilişki Denklem 3.11'de bir matris biçiminde yeniden ifade edilir.

$$d = XF\theta + \varepsilon \quad (3.11)$$

Burada, d , dönemlik radon yoğunluğunun geometrik ortalamasıdır. Her 3 aylık ölçüm dönemi için $d_i = \exp(x_i)$ formülü ile hesaplanır. Evlerde yapılan ölçümler her bir ayın ortasında başlamak şartı ile üç aylık periyotlarda 12 defa ölçüm yapılır. Her bir ölçüm sonucu ölçüm periyodunun ortasına gelen aya tahsis edilir. Ölçüm sürecinin sonunda Denklem 3.12'deki gibi her bir aya tahsis edilmiş 12 adet d değeri elde edilmiş olur.

$$d = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_{12})^t \quad (3.12)$$

Burada, t , transpozu ifade eder.

$$\begin{aligned}
X = & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
F = & \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{4\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{6\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{8\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{10\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{10\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{12\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{12\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{14\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{14\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{16\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{16\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{18\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{18\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{20\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{20\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{22\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{22\pi}{12}\right) \\ \sin\left(\frac{24\pi}{12}\right) & \cos\left(\frac{24\pi}{12}\right) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Burada, $\Theta = (\beta_0, \alpha_1, \beta_1)^t$ değerlerini alırken, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots \varepsilon_{12})^t$ değerlerini alır.

X matrisi, m_i üzerinden ortalamayı gösterir. F matrisi, Fourier ayrıştırma analizi öğelerini barındırır ve Fourier parametreleri vektörü tahmin edilir. ε nin yaklaşık normallığı nedeni ile en küçük kareler yaklaşımı bilinmeyen parametreleri tahmin etmek için kullanılır. ε , hata terimidir burada yaklaşık sıfır alınır. Denklem 3.9 yerine Denklem 3.10 kullanıldığı için OLS içindeki matrislerin hepsi tam ranktır doalyısı ile tersi alınabilir. Böylece OLS metodu bize tüm $(\beta_0, \alpha_1, \beta_1)$ parametrelerin tahminini sağlar. OLS dönüşümü m_i gerçek değerlerinin tahminini üretir. Denklem 3.11'deki Matris çarpımı yapılırsa Denklem 3.14'deki gibi 12 tane eşitlik elde edilir.

$$d_i = A_i\beta_0 + B_i\alpha_1 + C_i\beta_1 \tag{3.14}$$

Denklem 3.14'deki değişkenler Denklem 3.15 ve 3.16'daki aralıklarda değerler alır.

$$d = (d_1, d_2, d_3, \dots d_{12}), \quad A = (A_1, A_2, A_3, \dots A_{12}), \tag{3.15}$$

$$B = (B_1, B_2, B_3, \dots B_{12}), \quad C = (C_1, C_2, C_3, \dots C_{12}) \tag{3.16}$$

Elde edilen 12 adet denklem en küçük kareler yöntemi ile çözülür β_0, α_1 ve β_1 katsayıları tahmin edilir.

Denklem 3.17 ile mevsimsel m_i terimleri hesaplanır.

$$m_i = \beta_0 + \alpha_1 \sin\left(\frac{2\pi i}{12}\right) + \beta_1 \cos\left(\frac{2\pi i}{12}\right) \tag{3.17}$$

Üç aylık ölçümler için, radon yoğunluğu ile aylık m_i değeri arasındaki ilişki Denklem 3.18'deki gibi yazılır.

$$Y_j - Y_b = \frac{1}{3} h_j \sum_{k=i-1}^{i+1} m_k \quad (3.18)$$

Bir yıllık ölçümler için, radon yoğunluğu ile aylık m_i değeri arasındaki ilişki Denklem 3.19'deki gibi yazılır.

$$Y_j^{12} - Y_b = \frac{1}{12} h_j \sum_{k=1}^{12} m_k \quad (3.19)$$

Bir yıllık ve üç aylık ölçümler için yazılan 3.18 ve 3.19 denklemleri birleştirilirse

$$Y_j^{12} - Y_b = f_i (Y_j - Y_b) \quad (3.20)$$

elde edilir. Burada, f_i , mevsimsel düzeltme faktörüdür, f_i ifadesi çekilirse

$$f_i = \frac{3 \sum_{k=1}^{12} m_k}{12 \sum_{k=i-1}^{i+1} m_k} \quad (3.21)$$

elde edilir. Denklem 3.21 ile 3 aylık ölçümler için mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanır. Buradan her bir ay için toplamda 12 adet düzeltme faktörü değeri elde edilir (Burke, *et al.*, 2010).

4. BÖLÜM

RADON GAZI ÖLÇÜMÜ

Radon gazı ve radon gazının bozunması ile oluşan ürün çekirdekler çoğunlukla alfa aktiftir. Bozunma ile oluşan radon gazı ve ürün çekirdekleri doğrudan veya dolaylı olarak ölçülebilirler. Radon atomlarından bozunma ile oluşan bazı ürün çekirdekler (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{210}Bi) alfa ışımalarının yanında beta ve gama ışması da yapar. Radon gazı ölçümleri bozunma ile oluşan α , β ve γ ışımalarının tespitine dayanır. Radon gazı ölçümleri iki ana bilimsel alanda yoğunlaşmaktadır. Bu alanlar sağlık fiziği ve yerbilimlerinden oluşmaktadır. Sağlık fiziği alanında yapılan araştırmalar radon gazının insanlar üzerinde sebep olabileceği farklı kanser türleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Radon gazının sağlık etkileri üzerine yapılan bilimsel araştırmalar her geçen gün logaritmik olarak artmaktadır. İkinci kısımda yapılan araştırmalar ise daha çok depremler, yer altı uranyum rezervleri, hidrokarbon yatakları ve volkanik faaliyetlerle ilgilidir (Durrani, 1997).

4.1. Katı Hal İz Detektörleri

Ortamdaki radon yoğunluğunun ölçümünde katı hal iz detektörleri uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Tespit edilebilir her alfa parçacığı detektör üzerinde bir iz bırakır. Kimyasal işlemler yardımı ile bu izler büyütülür ve optik mikroskop altında gözlemlenir. Katı hal iz detektörleri farklı duyarlılıklara sahiptir. İz detektörleri, bozunma sonucu oluşan alfa parçacıklarına duyarlıdır. Radon gazı ölçümlerinde kullanılan detektörler genellikle Selüloz Ester (Nitrat ve Asetat), Polikarbonat ve CR-39'dur. Katı hal iz detektörleri beta ve gama ışınlarına karşı duyarlı değildir. Bu ışınlar katı hal iz detektörleri üzerinde kazınabilir iz oluşturmaz. Katı hal iz detektörleri uzun süreli ölçüm yapmak için çok kullanışlıdır. İz detektörleri çoğunlukla radon gazı ölçümlerinde, nükleer fizikte, hızlandırıcıya bağlı çalışmalarda, nötron takibinde ve uzay araştırmalarında kullanılır. İz detektörlerinin küçük boyutlarda olması, basit oluşu ve uzun süreli ölçümler için çok uygun oluşu bu detektörlerin çok yaygın kullanılmasını sağlamıştır. Katı hal iz detektörleri radon, toron veya radon atomlarından oluşan ürün çekirdeklerin ölçümüne bağlı olarak farklı şekilde sahaya yerleştirilir. Detektörün

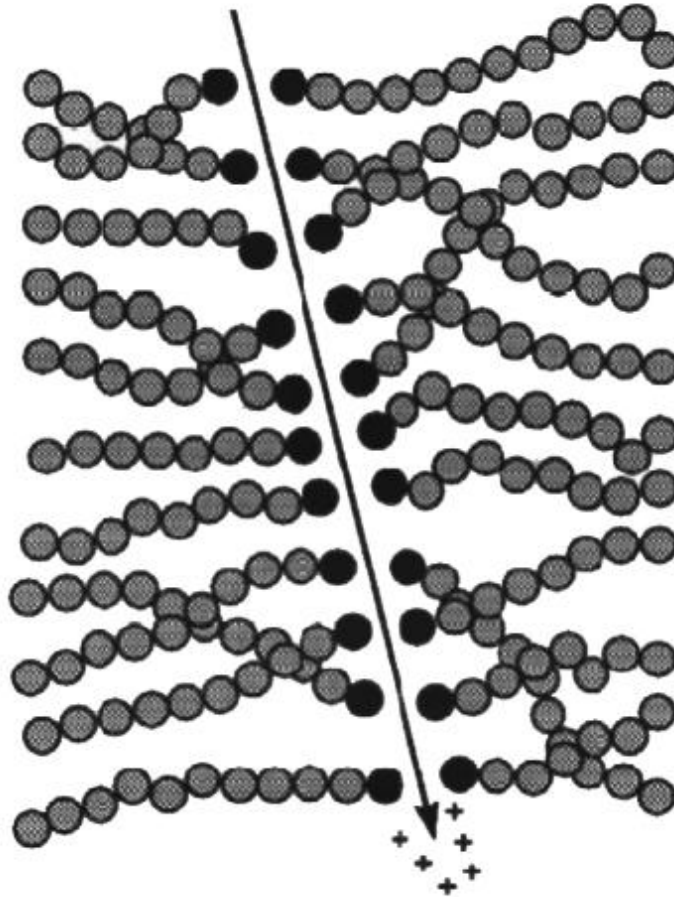
yerleştirileceği aparatlar difüzyon bariyeri kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak farklı Şekillerde hazırlanır. Katı hal iz detektörlerinin en büyük eksikliği zamana bağlı anlık sonuçlar vermez. Diğer bir eksiklik ise oluşan izlerin sayılması insanlara sıkıcı gelebilir (Durrani, 1997).

4.2. İz Detektörlerinde Polimerler Kullanımı

Polimerler iz detektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Polimerler, bilinen iz detektörleri arasında yüklü taneciklere karşı en duyarlı olan detektörlerdir. Bazıları protona da duyarlıdır. Bütün selüloz nitrat detektörleri belirli enerjide alfa parçacığına duyarlıdır. Bazı plastiklerin ise belirli yükler için eşik değeri bulunur. Örneğin Lexan ve Macrofol detektörler atom numarası 6 ve üzeri iyonlara duyarlı iken bazı özel tekniklerle alfa parçacığına da duyarlı olması sağlanır. Bu tip detektörlere kazıma işleminden önce morötesi ışınlar uygulanarak veya kimyasal çözeltiliye alkol eklenerek alfa parçacığından etkilenmesi sağlanır. Daha önce de söylediğimiz gibi bilinen hiçbir polimer beta parçacığından etkilenmez. CR-39 aynı zamanda hızlı nötronlardan da etkilenir. Polimere gelen hızlı nötronlar hidrojen atomu ile elastik çarpışıp saçılan protonlar detektörde iz bırakır. Bazı detektörlerde ise hızlı nötronlar önce nükleer reaksiyona girip alfa parçacığı oluşturur sonra oluşan alfa parçacığı detektör üzerinde iz bırakır. Bu detektörlerde hızlı nötronlar önce lityum borat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) molekülüne çarparak ($n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$) alfa parçacığı oluşturur sonra oluşan alfa parçacığı CR-39 ile etkileşerek iz oluşur.

Yüklü taneciklerin polimer üzerine hareketi ile polimer moleküllerinin makaslandığı düşünölmektedir. Makaslanma sonucunda bazı zincirler kopar ve kopan kısımlarda yeni reaksiyon uçları (radikaller) oluşur. Oluşan radikallerin uzun süre kalıcı olduğu düşünölmektedir. Detektörün kimyasal işleme sokulması ile zincir uçları (radikaller) çözünerek genişletilir. Kimyasal işlem sonucunda iz 100-1000 kat arasında büyütölür. Kimyasal işlemin ardından genişletilen hasarlı kısım kalıcı hale gelir. Kimyasal işleme tutulmayan izler sıcaklığın etkisi ile kaybolabilir. Yüklü taneciğin yapmış olduğu hasarın boyutu (kimyasal işlemin ardından oluşan çukurun boyutları) yüklü taneciğin yolu boyunca ortama aktardığı enerjiye bağlıdır. Şekil 4.1'de yüklü iyonların polimer moleküllerini makaslaması Şematik olarak modellenmiştir. Şekil

4.1'e göre yüklü tanecikler yörüngesi boyunca molekül zincirlerini koparmaktadır (Durrani, 1997).



Şekil 4.1. Yüklü iyonların polimer moleküllerini makaslaması (Durrani'den, 1997).

4.3. İz Detektörlerinin Tasarlanması

Pasif detektörler, kapalı ve açık olmak üzere iki şekilde kullanılır. Kapalı detektör sistemlerinde radon atomlarının detektör içine girmesine müsaade edilirken radon ürün çekirdeklerinin içeri girmesi engellenir. Kapalı kap içinde bozulan radon atomları detektör üzerinde yoğunlukla doğru orantılı izler oluşturur. Bu tip detektörlerin kalite kontrolleri kolayca yapılabilir. Detektör maddesi ışıktan ve çevresel kirlere uzak tutulur. Farklı kapalı detektör tasarımları bulunmaktadır. Tasarı, radon atomlarının detektör yüzeyine ulaşması ve istenmeyen parçacıkların ise engellenmesi

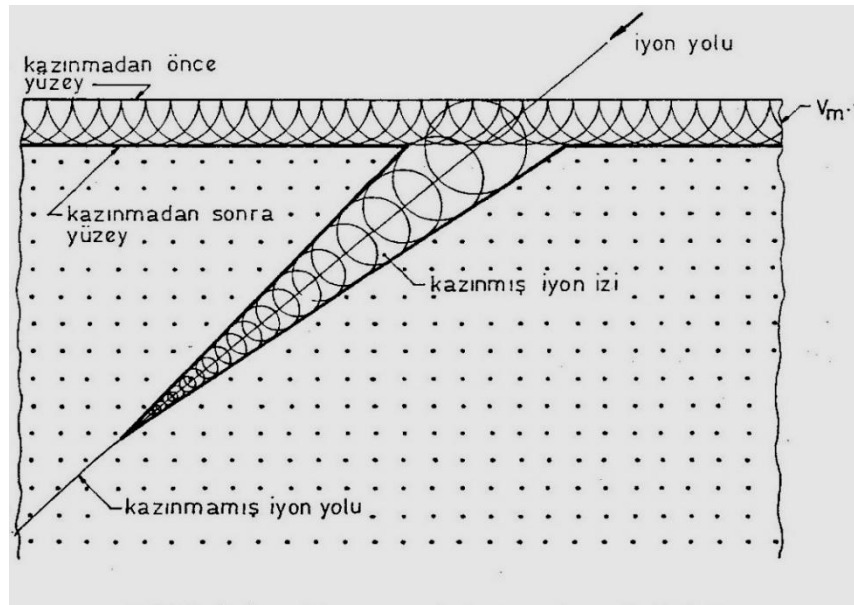
mantığına dayanır. Yapılan çalışmalara göre kapalı detektörler içindeki yüklü parçacıklar detektörlerin verimliliğini etkilemektedir (Urban, 1986). Radon atomları bozduğunda yüklü alfa parçacıkları oluşur ve bu parçacıklar ortamdaki diğer yüklerden etkilenir. Ortamda bulunan elektrik yükleri alfa parçacıklarının detektörle etkileşme noktalarını etkileyebilmektedir. Kapalı kap içinde bulunan farklı yük miktarları aynı ortamda farklı sayıda iz yoğunluğu oluşturmaktadır. Detektör kabında istenmeyen yük miktarlarını azaltmak için iletken plastikler veya metal kaplar kullanılabilir. Yük birikmesini önlemek için detektör yüzeyinin iletken olması gerekir veya detektörler iletken bir solüsyona daldırılabilir. % 0,2'lik deterjanlı su bu işlem için yeterlidir.

Açık detektörler kapalı detektörlere göre radon ve ürün çekirdeklerine daha duyarlıdır. Duyarlılık, aynı zamanda detektör maddesine de bağlıdır. CR-39 detektörleri havada bulunan tüm alfa parçacıklarından iz oluşturabilir. CR-39'un duyarlılığı atmosferik durumlara bağlıdır. CR-39'un açık olarak kullanılması tavsiye edilmez. LR-115 açık olarak kullanılan bir detektördür. LR-115 1,7-4,1 MeV enerji aralığındaki alfa parçacıklarına karşı duyarlıdır (Jönsson, 1981). Radon atomlarının bozunması sonucu oluşan ürün çekirdekler film üzerine yapıştıktan sonra bozunursa kazanabilir iz oluşturmaz. LR-115 üzerinde, yüzeyden belirli uzaklıkta bozunarak oluşan alfa parçacıklarından iz oluşur. Verilen enerji aralığının dışındaki alfalar kazanabilir iz oluşturmaz. Bu tip detektörler atmosferik koşullardan bağımsız olarak ortamdaki radon yoğunluğu ile doğru orantılı iz oluşturur. LR-115 açık olarak uygulandığından çevresel faktörlerden daha fazla etkilenir ve deformasyona uğrama olasılığı daha yüksektir. LR-115'in uzun süreli güneş ışığına direk maruz bırakılmaması gerekir. Güneş ışınları detektör yapısını bozmaktadır (Durrani, 1997). Kendi deneysel çalışmalarımızda güneş altında bırakılan detektörlerin kimyasal işlemlerde tamamen soyulduğu gözlemlenmiştir.

4.4. Detektör Üzerinde İz Oluşum Mekanizması

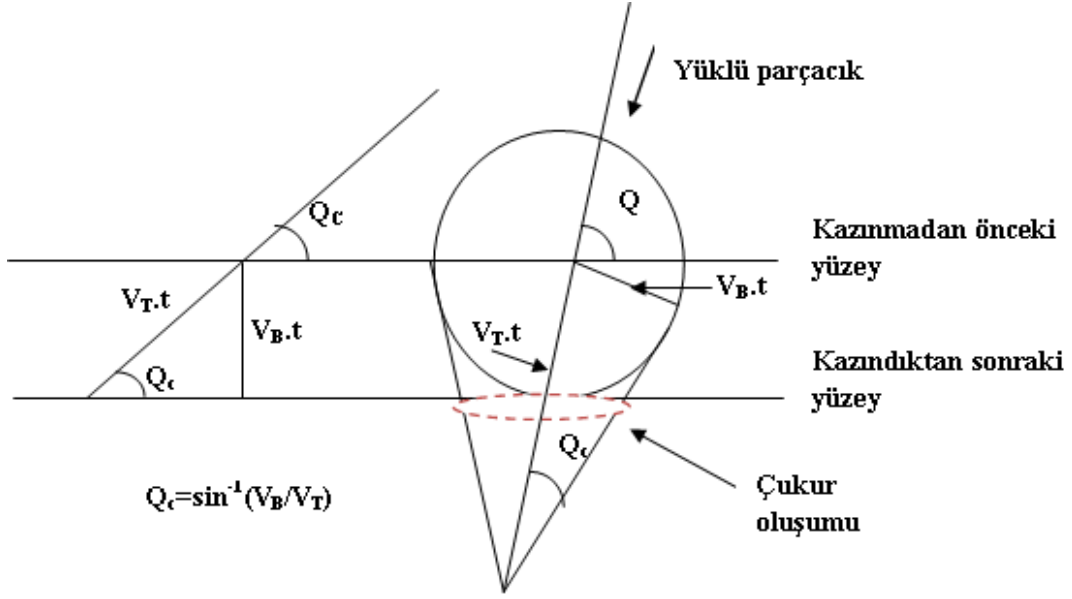
Yüklü taneciklerin oluşturduğu izlerin kimyasal işlemler sonucunda sahip oldukları şekil ve oluşan çukurun yarıçapı iki parametreye bağlıdır. Bunlardan birinci parametre, detektörün yapıldığı maddenin karakteristik özelliğine, kullanılan kimyasalların molaritesi ve sıcaklığına bağlıdır. İkinci parametre ise yüklü parçacığın

karakteristik (yüklü parçacığın cinsi, enerjisi, yörüngesi, yük miktarı) özelliklerine bağlıdır. Şekil 4.2’de kimyasal işlemler yardımı ile izlerin kazınarak genişletilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kimyasal işlemler yardımı ile iz oluşumu (Yaprak'tan, 1988).

Kimyasal kazıma sürecinde iki farklı hız tanımlanır. Bunlardan birincisi, detektör materyalinin yapısına bağlı olarak değişen, kimyasal maddenin kazıma hızı, V_B (bulk etching velocity). İkincisi ise yüklü parçacığın karakteristik yapısına bağlı olarak detektör materyalinde iz kazıma hızı, V_T (track etching velocity). Bu hızların oranı (V_T/V_B) yüklü parçacığın yalıtkan ortamda iz oluşturma koşulunu belirler. Bu hızların oranı aynı zamanda kazıma etkinliğini ve kazıma işlemleri için kritik açı parametrelerini belirler. Alfa parçacıklarına maruz kalan detektör uygun kimyasal maddelerle kazıma işlemine tabi tutulur. Alfa parçacığının polimer üzerinde hareket ettiği yörünge boyunca kazıma işlemi gerçekleştirilir. Daha önce tanımladığımız yüklü parçacığa bağlı kazıma (V_T) hızı, detektör materyaline bağlı olan kazıma hızından (V_B) daha büyüktür. (Durrani, 1997).



Şekil 4.3. İz oluşumunda kritik açı (Durrani'den, 1997).

Şekil 4.3'de iz oluşumunda kritik açı gösterilmiştir; Şekil 4.3'de V_T/V_B oranı üç olarak hesaplanmıştır (Durrani, 1997). Kazıma sürecinde kimyasal madde detektör yüzeyinde dikey olarak $V_{B.t}$ yolunu almıştır. Bu süreçte yüklü parçacığın yörüngesine bağlı V_T hızı menzilin sonuna gelmiştir (Şekil 4.3 sol taraf). Şekil 4.3'e bakıldığında yüklü parçacığın yörüngesi boyunca kazıma işlemi V_T hızı ile gerçekleşirken, yatay yöndeki genişleme işlemi V_B hızında gerçekleşmiştir. Detektör yüzeyinde görülebilir izlerin oluşabilmesi için yüklü parçacığın detektör yüzeyi ile yaptığı açının kritik açıdan büyük olması ($Q > Q_c$) gerekir. Kritik açı parametresi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Kritik açı Q_c iz oluşumu için yüklü parçacığın detektör yüzeyi ile yaptığı en küçük açı değeri olarak tanımlanmıştır.

Görülebilir iz oluşma olasılığı geometrik olarak $\cos^2 Q_c$ ile ifade edilir. Burada $Q_c = \sin^{-1}(V_B/V_T)$ 'ye eşittir. Gözlemlenebilir iz oluşmasına kazıma verimliliği denir. V_T , verilen ortamda yüklü parçacığın cinsine ve enerjisine bağlı bir büyüklüktür. Atom numarası büyük olan çekirdekler için V_T değeri V_B değerinden çok daha fazladır. Bu tür bir parçacığın oluşturduğu iz uzun, yarı silindirik, iğne batması şeklinde, derin ama dar bir görünüme sahiptir. Kimyasal işlemlerden sonra oluşan iz yarıçapı yaklaşık $2V_{B.t}$, derinlik ise yaklaşık $V_T.t$ değerine eşittir. Alfa parçacığı için V_T/V_B oranı çok fazla değildir. Örneğin CR-39 detektörü için V_T/V_B oranı sadece 2 veya 3 olabilir. Plastik

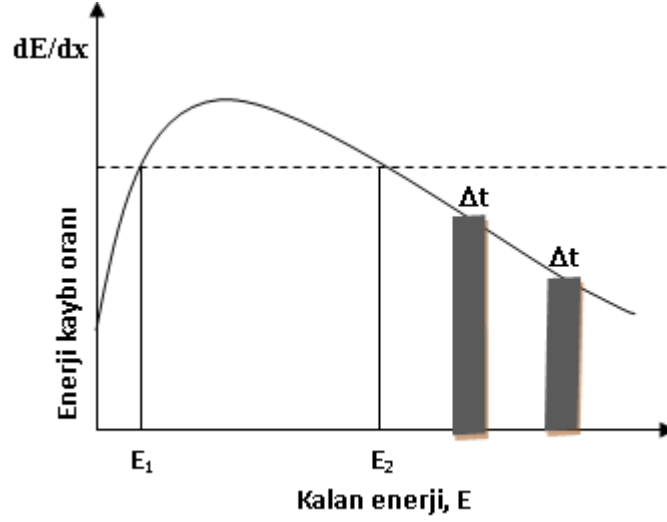
için V_B değerinin hesabı çok kolaydır ($h=V_B.t$). V_T/V_B oranı küçük olduğu durumlarda V_T değerinin hesabı o kadar kolay olmaz. Bu durumlarda $V= V_B/V_T$ oranı Denklem 4.1 yardımı ile bulunur.

$$V=\frac{1+x^2}{1-x^2} \quad (4.1)$$

Burada, x , normal alfa parçacığının oluşturduğu çukur yarıçapının fisyon ürünleri tarafından oluşturulan çukur yarıçapına oranıdır. Eğer V_B biliniyorsa yukarıdaki eşitlikten V_T hesaplanabilir (Durrani, 1997).

4.5. İzlerin Enerji Bağımlılığı

Radyoaktif bozunma ile oluşan alfa parçacığı ortamda belirli enerji ve menzile sahiptir. Alfa parçacığının detektör ile temas ettiği andaki enerjisi ve geliş açısı izin şeklini ve boyutunu belirler. Alfa parçacığının oluşturduğu izler yıkama işleminin ardından büyüklük bakımından istatistiksel farklılıklar gösterir. Eğer izler, alfa parçacığının tüm menzili boyunca kazanabilse aynı kimyasal kazıma sürecinde, aynı şartlarda enerjisi büyük olan alfa parçacıklarının oluşturduğu çukur daha geniş olurdu. Ancak kimyasal kazıma işlemlerinde alfa parçacığının detektör içindeki menzilin çok kısa bir kısmı kazıma işlemine tabi tutulur. Detektöre temas anında enerjisi yüksek olan alfa parçacıkları düşük enerjili alfa parçacıklarına göre daha küçük iz oluşturur. Bunun sebebi Şekil 4.4'ten daha iyi anlaşılır. Şekil 4.4'e göre yüksek enerjideki parçacığın enerjisindeki azalma miktarı azdır, dolayısı ile ortama aktarılan enerji miktarı da az olur. Ortama aktarılan enerji az ise detektör üzerindeki iyonlaşma ve makaslanan zincir sayısı da azdır ve sonunda küçük bir iz oluşur. Düşük enerjili alfa parçacıklarının detektör ortamında enerjisindeki azalma miktarı (dE/dx) daha fazladır dolayısı ile iyonlaşma ve zincirlerdeki makaslama miktarı daha fazla olur. Şekil 4.4'e göre düşük enerji bölgesinde grafik altında kalan alan daha küçüktür. Tüm menzil boyunca kazıma işlemi yapılsaydı düşük enerjili alfalar daha küçük çukurlar oluştururdu. Bütün kimyasal kazıma işlemleri kısa süreli yapıldığından detektöre temas anında küçük enerjili alfalar büyük enerjili alfalara göre daha geniş çukur oluşturur. (Durrani, 1997).



Şekil 4.4. Brag eğrisi, enerji kaybı oranının kalan enerjiye bağlı grafiği (Durrani'den, 1997).

Alfa parçacıkları, düşük enerji bölgesinde birim zamanda detektör yüzeyine daha fazla enerji aktarır, dolayısı ile oluşan çukur genişliği ortama aktarılan enerji miktarı ile doğru orantılıdır. Alfa parçacığının menziline R olduğunu düşünelim. Gözlemlenebilir bir iz oluşması için alfa parçacığının filmde 0-R mesafesinde oluşması ve geliş açısının kritik açıdan büyük olması gerekir. Alfa parçacığının filme temas anındaki enerjisi ve geliş açısı oluşacak izin şekil ve boyutlarını belirler. Geliş açısı 90° ile kritik açı (Q_c) arasında olursa iz oluşur (Durrani, 1997).

4.6. İstenmeyen İzlerin Oluşmasını Engelleme

Alfa parçacığı sadece radon atomlarının ($E_\alpha=5,49$ MeV) bozunması ile oluşmaz. Radon gazının bozunması ile oluşan ürün çekirdekler (^{218}Po , $E_\alpha=6,00$ MeV; ^{214}Po , $E_\alpha=8,78$ MeV) zincirin devamında bozularak tekrar alfa parçacığı oluşturur. Ölçüm yapılan ortamda çoğu zaman yeteri kadar toron (^{220}Rn) konsantrasyonu da bulunabilir. Toron atomları da radyoaktif olup kısa sürede bozunur. Radon gazı ölçümlerinde aynı zamanda toron atomları ($E_\alpha=6,29$ MeV) ve torondan oluşan ürün çekirdekler (^{216}Po , $E_\alpha=6,78$ MeV; ^{212}Bi , % 36, $E_\alpha=6,05$ MeV; ^{212}Po , % 64, $E_\alpha=8,78$ MeV) alfa parçacığı yayar. Sonuç olarak ölçüm için kullanılan detektör yüzeyine geniş bir enerji spektrumunda alfa parçacığı bombardımanı gerçekleşir. Sadece radon atomlarından kaynaklanan alfaların enerjisi 6 MeV'den azdır ve ortamda oluşan diğer bütün alfa

parçacıklarının (ürün çekirdeklerden kaynaklanan) enerjisi 6 MeV'e eşit ya da daha fazladır. Bazen radyoaktif çekirdek film yüzeyine yapışarak olduğu yerde bozunabilir ve oluşan alfa parçacığı tüm enerjisini film yüzeyine aktarabilir. Yarıiletken detektörler yardımı ile yapışan atomlardan oluşan alfaların tüm enerji spektrumu gözlemlenebilir. Yarıiletken detektörlerde çok kanallı analizörler farklı pikleri farklı kanallara aktararak alfa parçacıklarını enerjilerine göre ayırıştırır. Enerji spektrumundan alfaların hangi çekirdekten kaynaklandığı tespit edilebilir.

Katıhal iz detektörleri, farklı enerjideki alfa parçacıklarını yavaşlatıcı ince katmanlar yardımı ile ayırıştırabilir. Detektör üzerine farklı maddelerden yapılmış farklı kalınlıkta katmanlar eklenerek belirli enerjideki alfaların film yüzeyine ulaşması engellenebilir. Hazırlanan folyolar metalden veya plastikten olabilir. Genel olarak plastik folyolar tercih edilir. Metal folyolar alüminyum, plastik olanlar polikarbonat veya makrafol olabilir. Folyoların kalınlıkları alfa parçacığının bu maddelerdeki menziline göre seçilir. Detektör üzerine aynı anda çok katlı folyolar eklenebilir. Örneğin 6,00 MeV ve daha düşük enerjili alfalar 7,69 MeV enerjili alfalardan ayırıştırılmak isteniyorsa hazırlanacak engelleyici folyonun kalınlığı $R_{\alpha,1}$ (engellenmek istenen alfa parçacığı) değerinden biraz kalın olması gerekir. Aynı folyonun kalınlığı ($R_{\alpha,2}$), detektöre ulaşması gereken alfaların menziline biraz ince olması gerekir.

Farklı kaynaklardan gelen alfa parçacıklarını ayırmanın diğer bir yolu ise kaynak çekirdeklerin yarı ömür farklılıklarıdır. Radon ^{222}Rn atomunun yarı ömrü yaklaşık 3,8 gündür. Bu süre yarı ömrü 55,6 saniye olan toron (^{220}Rn) atomundan çok daha uzundur. Eğer her iki izotop da aynı mesafeden detektöre ulaşıyorsa kullanılacak bir filtre ya da difüzyon mesafesi toron (^{220}Rn) atomlarının detektöre ulaşmasını engelleyebilir. Kullanılacak 30 cm'lik difüzyon mesafesi toron atomlarını ihmal edilecek seviyeye inmesini sağlar. Toprak gazında radon ölçümlerinde bu yöntem sıklıkla kullanılır. Radon gazının detektöre ulaşmadan 25 cm'lik bir yol kat etmesi sağlanır. Bu süreçte istenmeyen toron (^{220}Rn) atomları bozunarak ihmal edilebilecek seviyeye iner.

Alfa parçacıklarını ayırmanın başka bir yolu ise farklı duyarlılıktaki detektör tiplerini kullanmaktır. Farklı yapıdaki detektörler farklı enerjide ve tipte yüklü parçacıklara duyarlı olacak şekilde üretilmiştir. Örneğin Selüloz Nitrat tipi detektörler CN85 ve LR 115 olarak iki farklı ticari marka altında üretilmektedir. Bu iki detektör en

fazla 4-6 MeV arasındaki enerjiye duyarlıdır. Daha yüksek enerjiden etkilenmezler. Bunun yanında CR-39 20 MeV'e kadar olan alfalara duyarlıdır. CR-39 detektörleri radon (^{222}Rn) atomlarından ve oluşan ürün çekirdeklerden etkilenmektedir. LR-115 radon (^{222}Rn) atomlarından etkilenirken radon atomlarının bozunması ile oluşan ürün çekirdeklerden (^{218}Po $E_{\alpha}=6,00$ MeV; ^{214}Po $E_{\alpha}=7,69$ MeV) etkilenmez. Eğer ürün çekirdeklerin enerjileri detektöre ulaşmaya kadar biraz azaltılırsa bu çekirdeklerin yoğunluğu LR-115 ile ölçülebilir (Durrani, 1997).

4.7. Kimyasal İz Kazıma Metodu

Tarihte ilk defa iz kazıma yöntemi 1958 yılında Young tarafından kullanılmıştır. Yapılan çalışma bilim çevresi tarafından 1962 yılına kadar fark edilememiştir. Price ve Wolker 1962 yılında kimyasal solüsyonlar kullanılarak alfa parçacıklarının oluşturduğu iz genişletilip optik mikroskop altında görülebileceğini göstermiştir. İşte bu süreçte iz kazıma yönteminin daha önce Young tarafından yapıldığı fark edilmiştir. İz kazıma yöntemi ilk yapıldığı günden bu güne kadar farklı kristal yapılarda uygulanmaktadır. Kristal yapıların kimisi camdan kimisi ise plastikten oluşmaktadır. Farklı maddeler alfa parçacıklarına karşı farklı duyarlılık gösterir. Organik maddeler en duyarlı tepkiyi gösterirken mineral ve cam yapılar en az duyarlı olanlarıdır. Organik yapıdaki materyaller radon atomları ve radon atomlarından oluşan ürün çekirdeklerin ölçümlerinde kullanılır. Organik detektörlerin yapıldığı maddeler, selüloz nitrat (LR-115, CN 85), Bispenol-A, Polcarbonate (Lexan, Makrofol), Pollyallyl Di-Glycol Carbonate (PADC) maddelerinden oluşmaktadır. PADC, aynı zamanda CR-39 olarak bilinir. CR-39 çok geniş enerji aralığındaki alfa parçacıklarına karşı duyarlıdır.

Alfa parçacıkları plastik film üzerinde gizli iz (hasar) bırakır. Bırakılan bu izler normal sıcaklıklarda uzun ömürlüdür. Alfa parçacıklarının film üzerinde oluşturduğu hasarlar 0 °C'nin altında ve yüksek sıcaklıklarda uzun süreli kalıcıdır. Alfa parçacığı film ile etkileşmeye başladıktan sonra enerjisini yavaş yavaş kaybeder ve kaybettiği enerjiyi ortama aktarır. Alfa parçacığının yörüngesinin sonuna doğru Bragg piki oluşur. Alfa parçacığının oluşturduğu gizli iz TEM mikroskobu altında gözlemlenebilir. Oluşan iz nanometre (nm) mertebesinde yarıçapa sahiptir.

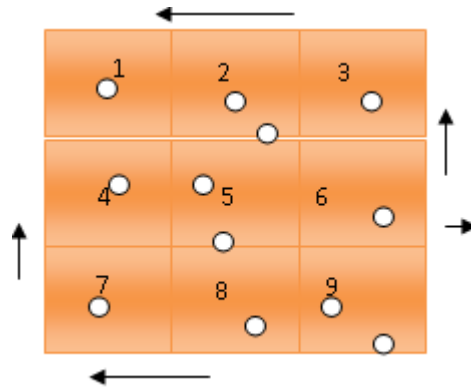
Kimyasal kazıma işlemi ısıtılabilir banyo havuzu yardımı ile gerçekleştirilir. Kimyasal işlemde banyo havuzunun sıcaklığı 40-70 °C aralığında olabilir. Kazıma

işlemi için NaOH veya KOH çözeltisi tercih edilebilir. Çözeltinin derişimi 2-6 M arasında ve kazıma süresi 2-6 saat arasında olabilir. Banyo havuzunun sıcaklığı, kimyasal solüsyonun derişimi ve banyo süresi artırılırsa oluşan çukur genişliği artar. Bazı kimyasal kazıma işlemlerinde çözeltiye etil alkol eklenebilir. Polikarbonat türü detektörler için yıkama sürecinde KOH çözeltisine etil alkol eklenerek görülebilir ve iz oluşturma duyarlılığı artırılır. Etil alkol CR-39 detektörü için duyarlılığı azaltır. Plastik detektör bir ip yardımı ile çözelti içine daldırılır. Filmler seri halinde birbirinden uzak tutularak da kimyasal işleme sokulabilir. Kimyasal işlem sırasında detektörlerin sıvı içinde dönmesi sağlanabilir. Kimyasal işlem boyunca sıcaklığın sabit kalması sağlanır. Kazıma işlemlerinin ardından filmler çözeltiden çıkarılarak önce normal suda durulur daha sonra saf su içinde bekletilerek kimyasal işlemlerden kalan kalıntıların uzaklaşması sağlanır. Bütün bu işlemlerin ardından film kurumaya bırakılır. Kuruduktan sonra lam içine konulup iz sayımı için hazır hale getirilir. Kimyasal işlemlerin sonunda genişletilmiş izlerin çapları birkaç mikrometre boyutundadır. Kimyasal işlem süresi uzatılarak izlerin çapı 50 µm ve üzeri genişliğe kadar çıkarılabilir. Kimyasal işlemler sonucunda izler büyütülerek optik mikroskop altında görülebilir hale getirilir (Durrani, 1997).

4.8. İz Sayma Metodu Ve İstatistiksel İncelenmesi

Burada sadece optik mikroskopta gözle sayma yönteminden bahsedilecektir. Radon gazı çalışmalarında istatistiksel olarak doğru bilgilerin elde edilebilmesi için oluşan izlerin doğru sayılması gerekir. Genelde çok fazla iz oluşmadığı için izlerin üst üste gelme olasılığı çok düşüktür. Oluşan izlerin şekilleri alfa parçacığının geliş açısına göre değişir. Dik gelen yüklü parçacıklar yuvarlak iz oluştururken eğimli gelenler eliptik şekiller oluşturur. Kritik açıdan küçük açı ile gelen parçacıklar görülebilir iz oluşturmaz. Alfa parçacığının havadaki menzili en fazla 4 cm'dir. Filmin önünden itibaren en fazla 4 cm uzakta oluşan alfa parçacıkları gözlemlenebilir iz oluşturabilir. 0 cm uzaklıktan gelen alfa parçacığının oluşturduğu iz kimyasal işlemde sonra 0,3 µm civarındadır. Bu değer optik mikroskop için görülebilir sınır değeridir. Daha küçük izler optik mikroskopta gözlemlenemez.

Sayım işini yapan kişilerin gerçek iz ile film kusurlarını ayırt edebilmesi gerekir. Gerçek izler daha parlak, yuvarlak ya da eliptik noktacıklar şeklinde olurken film kusurları daha soluk irili ufaklı noktacıklar olabilir. İzleri sayabilmek için mikroskobun optiğini yavaş yavaş hareket ettirerek saymamız gerekir. Gerçek izlerle film kusurları parlaklık ve düzgün geometri yönü ile kolayca ayırt edilebilir. Gerçek izler bir iğne batması şeklinde olurken film kusurlarının özel bir şekli olmaz. Her filmde mutlaka arka plan gerçek izleri bulunur. Bu gerçek oluşumlar çevredeki radyoaktif kalıntılardan, kozmik ışıklardan oluşan hızlı nötronlardan ve film hazırlanırken çevredeki radon yoğunluğundan kaynaklanabilir. Arka fon izlerini azaltmak için üzerinde kolayca çıkabilen koruyucu şerit bulunduran filmler tercih edilebilir. CR-39 filmleri üzerlerinde ince yeşilimsi şerit bulunur. Bu şeritler kullanmadan hemen önce çıkarılır böylece arka fon izleri önlenir. Filmler kullanılana kadar buzdolabında tutulması tavsiye edilir. Böylece istenmeyen ışık ve oksijen etkisinden uzak tutulur. Bazı laboratuvarlar filmleri kuru azot içinde muhafaza eder.



Şekil 4.5. Optik mikroskop ile iz sayımında izlenecek aşamalar.

Şekil 4.5’de film üzerindeki izler kareler içinde gösterilmiştir. İz sayımında görev alacak kişilerin önce mikroskobun optik kısmını ayarlayarak 1 numaralı kareye getirmesi gerekir. Buradan hareketli sahneyi yavaşça ok yönünde (sol tarafa) hareket ettirerek 2 ve 3 numaralı karedeki izler sayılır. Sonra kendi belirlediğimiz referans noktalarına göre sahneyi y ekseninde (yukarı) hareket ettirip ardından sahneyi sağa hareket ettirerek sırasıyla 6, 5 ve 4 numaralı kareleri saydıktan sonra sahneyi tekrar y yönünde (yukarı) hareket ettirip önce 7 daha sonra 8 ve 9 numaralı kareleri sayarak iz sayım işlemi tamamlanır. İzlerin sayımı esnasında netlik bozulabilir, sayan kişinin her

sahne değişiminde netlik ayarı yapması gerekebilir. Eğer izler çok fazla ise her yüz izi kayıt altına alarak sayma işlemine devam edilebilir. Her film setinde arka fon iz sayımı yapılması gerekir. Normal hazırlanan bazı filmler doğrudan kimyasal işleme sokulduktan sonra arka fon sayımı yapılır. Arka fon için film başına 10-40 iz/cm² normaldir. Örneğin film üzerinde 1000 iz/cm² sayıldığını düşünelim. Arka fon iz sayısı ise 40 iz/cm² olsun. Son durumdaki iz sayısı $(1000 \pm \sqrt{1000}) - (40 \pm \sqrt{40}) = 960 \pm \sqrt{1040}$ olarak ifade edilir. Toplam hata payı % 3,36 civarında bulunur. İz sayımında diğer nükleer olaylarda olduğu gibi Poisson istatistiği kullanılır. Bu istatistikte gerçek iz sayısının karekökü hata payı olarak alınır. Örneğin 400 adet iz için standart sapma % 5 ($400 \pm \sqrt{400}$) olarak hesaplanır. Yine 10⁻³ cm²'lik film alanında sayılan iz sayısı 400 olsun. İz yoğunluğu $\rho = \frac{N \pm \sqrt{N}}{A} = \frac{400 \pm \sqrt{400}}{10^{-3}} = 4 \times 10^5 \pm \% 5 \text{ (iz/cm}^2\text{)}$ olarak hesaplanır. Yukarıdaki işlem tamamlanırsa iz yoğunluğu $\rho = 4 \times 10^5 \pm 2 \times 10^4 \text{ iz/cm}^2$ olarak gösterilir (Durrani, 1997).

4.9. İz Detektörlerinin Kalibrasyonu Ve Uluslararası Karşılaştırma

Prensip olarak iz detektörlerinin kullanılması kolaydır. Hata yapma olasılığı çok düşüktür ancak uluslararası yapılan kıyaslamalar çok deneyimli laboratuvarların bile hata yapabileceğini göstermiştir. Kalite ölçümleri iki alanda yeterli standartların oluşturulmasını öngörür. Birincisi laboratuvarlarda gerekli kalite kontrollerin yapılması, ikincisi ise diğer laboratuvarlarla ölçüm sonuçlarının kıyaslanmasıdır. Yapılan araştırmalarda doğru analizlerin yapılabilmesi için gerekli standartların oluşturulması gerekir.

Detektörlerde oluşan sayılabilir izler yapılan kimyasal sürece ve iz sayma koşullarına bağlı olarak farklılık gösterir. Genel olarak hazırlanmış kalibrasyon faktörleri her deney koşuluna uyumlu olmayabilir. Kalibrasyon radyasyon yoğunluğu bilinen ortama iz detektörlerinin yerleştirilmesi ve elde edilen verilerin belirli standartlarla kıyaslanması yolu ile yapılır. Kalibrasyon işlemleri belirli donanıma sahip kalibrasyon odası içinde yapılır. Uluslararası Atom Enerji Kurumu (IAEA) üç çeşit kalibrasyon odası tanımlamıştır. Bu kalibrasyon odaları araştırma amaçlı, geniş hacimli ve ucuz tip olarak üç çeşittir. Araştırma amaçlı kalibrasyon odaları bazı referans laboratuvarlarında bulunur. Geniş hacimli kalibrasyon odaları uluslararası

karşılaştırmalar ve teknik destek amaçlı bulundurulur. Ucuz tipli kalibrasyon odaları bireysel ve organize kurum ya da kuruluşlarca bulundurulabilir. Ucuz tipli olanlar detektörlerin kalibrasyonları için kullanılır. Kalibrasyon odalarında sabit yoğunlukta radon kaynakları bulunur. Genel olarak radyum (^{226}Ra) atomları radon kaynağı olarak kullanılır.

Açık detektörlerin kalibre edilebilmesi ve farklı denge faktörlerinin elde edilebilmesi için kalibrasyon odalarındaki nem ve aerosol miktarlarının ayarlanabilir olması gerekir. Ortamda bulunan yüksek aerosol miktarı bozunma ürünlerinin aerosollere yapışmasını sağlar, aerosoller radon atomlarını tuttuğu için yüksek kalibrasyon faktörlerinin oluşmasına yol açabilir. Düşük aerosol miktarı ise oluşan ürün çekirdeklerin detektör yüzeyine ulaşmasını sağlar ve düşük kalibrasyon faktörlerinin oluşmasına yol açabilir. Çoğu ucuz tipli kalibrasyon odalarında sıcaklık kontrollerine gerek duyulmaz ancak nem ve aerosol miktarı sürekli kontrol edilmelidir. Bal mumu yardımı ile fazladan aerosol oluşması sağlanabilir. İhtiyaç duyulduğunda iç filtre yardımı ile aerosol miktarı azaltılabilir. Kalibrasyon odasında homojenliğin sağlanabilmesi için yeterli karışımın olması gerekir. Eğer sadece radon kalibrasyonu yapılıyorsa doğal hava akımı yeterli olabilir. Kalibrasyon odasında radon atomlarından oluşan ürün çekirdeklerin homojen olarak dağılması sağlanmalıdır.

Radon gazı ölçümleri tüm dünyada yapılmaktadır. Yapılan ölçüm sonuçlarının diğer yapılanlarla kıyaslanması yapılan ölçümlerde belirli standartların oluşmasını sağlar. Lineerlik, radon ve ürün çekirdekler arasındaki denge faktörünün oluşması gibi konularda karşılaştırmalar yapılabilir. Yapılan ortak analizlerle detektör materyali, kullanılan yöntemler, sayma teknikleri ve laboratuvarların performansları hakkında bilgi alış verişi yapılabilir. Farklı laboratuvarların ölçümlerinin güvenilirliğini artırmak için Uluslararası Radon Meteoroloji Programı (IRMP) dahilinde yapılan çalışmalar desteklenmektedir. Bu amaç için bölgesel koordinasyon laboratuvarları (IAEA, 1996) kurulmuştur. Uluslararası Meteoroloji Radon programı kapsamında kurumsal yapılar oluşturulmuştur. Kurumsal yapı içinde referans laboratuvarlar bulunmaktadır. Bu laboratuvarlar radon, toron, ürün çekirdekler, laboratuvar koşulları, kalibrasyon, ölçüm aletleri ve araştırma metotları gibi konularda rehberlik yapmaktadır. Bölgesel koordinasyon laboratuvarlarına teknik destek sağlanmaktadır. Bu kapsamda uluslararası laboratuvarlarca doğrulanmış kalibrasyon odaları bölgesel laboratuvarlara teknik destek

sağlamaktadır. Bölgesel koordinasyon laboratuvarları imkânlar dâhilinde lojistik destek ve teknik asistan gibi konularda destek olmaya çalışmaktadır. Ulusal laboratuvarlar ülkelerde bulunur. Ulusal laboratuvarlar, detektörlerin kalibrasyonunu yapabilir veya kalibrasyon için bölgesel laboratuvarlara gönderebilir (Durrani, 1997).

4.10. Detektörleri Dış Etkilerden Koruma

Detektörler, sahaya yerleştirilmesi ve deney sürecinin sonunda toplanması sırasında radyasyona maruz kalabilir. Eğer detektörlerin toplanması ve yerleştirilmesi deney süresinden çok kısa ise bu sürelerde oluşabilecek fazladan izler ihmal edilebilir. Eğer deneysel analizlerin yapıldığı yerler deney alanından çok uzakta bulunuyorsa detektörler ısı ve radon atomlarına karşı yalıtkan kılıflar içinde taşınması gerekebilir. Radon atomları PVC ve Polietilen maddesinden kolayca geçebilir. Bu maddelerden yapılmış poşetlerin kullanılması tavsiye edilmez. Alüminyum folyo alfa parçacıklarını ve radon atomlarını geçirmez fakat kolayca yırtılabilir, tek başına kullanılması tavsiye edilmez. Isı yalıtımlı plastikler, besinlerin saklanması için ticari ürün olarak üretilmektedir. Bu plastikler Poliamide veya Polietilen Terephthalate maddesinden yapılmıştır. Ticari olarak bulunan bu tip saklama poşetleri aynı zamanda radon atomlarını da geçirmez. Bu tür plastiklerin kullanılmadan önce test edilmesi gerekir. Bu tür maddelerin radon atomlarını tutabilmesi için ısı yalıtkanlığına sahip olması gerekir. Yapılan bazı araştırmalar bu tür plastiklerin bazı koşullarda radon atomlarını sızdırdığını göstermiştir (Dudenly, *et al.*, 1995).

Yapılan araştırmalara göre ortamdaki ısı ve nem ile birlikte oksijen gazı iz detektörlerinin duyarlılığını etkilemektedir (Homer and Mile, 1986). Dış faktörlerin etki miktarı detektör maddesine, kazıma ve sayma tekniğine bağlı olarak değişir. Yapılan bir çalışmada CR-39 detektörü 6 ay boyunca bir evde bırakılmıştır. Yapılan kimyasal işlemlerin sonucunda izler yarı otomatik bir sistemle sayılmıştır. Yapılan analiz sonucunda detektör materyalinin duyarlılığının % 18 azaldığı görülmüştür (Wrixon, *et al.*, 1988; Durrani, 1997). Detektörlerin deneysel amaçlı yerleştirileceği yerler amaca uygun olmalıdır. Aynı zamanda, yerleştirdiğimiz yerler detektör yüzeyine çevresel faktörlerin (ısı, ışık, nem vs.) en az etki edeceği şekilde seçilmelidir. Genel olarak detektörlerin yerleştirileceği yerler ısı kaynağı ve havalandırmadan uzak

seçilmelidir. Açık olarak kullanılan LR-115 detektörlerinin deney süresi boyunca direk güneş ışığı alması engellenmelidir.

4.11. Kalite Kontrol İşlemleri

Detektörler sahaya yerleştirilmeden önce hassasiyet testlerinin yapılması ve arka fon radyasyondan kaynaklanan iz miktarının sayılması gerekir. Bu süreç her ölçüm periyodunda tekrarlanmalıdır. Detektörlerin duyarlılık testi detektör üzerine bilinen bir kaynaktan radon atomları uygulanarak yapılabilir. Aynı ortama yerleştirilen detektörler analiz edilerek ölçümlerde standart sapmalar hesaplanabilir. Kazınabilir iz miktarı uygulanan kimyasal sürece doğrudan bağlıdır. Laboratuardaki kimyasal süreçler düzenli olarak takip edilmelidir. Kimyasal maddeler güvenilirli kaynaklardan temin edilmeli eğer solüsyon laboratuarda hazırlanıyorsa sürekli test edilmelidir. Kimyasal solüsyonun sıcaklığı başta ve sonda düzenli olarak ölçülmelidir. Her yıkama setinde test amaçlı detektörler bulunmalıdır. Bu detektörler yardımı ile farklı setlerin sonuçları kıyaslanabilmelidir. Detektörler sahaya yedekleri ile birlikte yerleştirilip, sonuçlar ayrı laboratuarlarda analiz edilip doğruluk testine tabi tutulmalıdır (Durrani, 1997).

5. BÖLÜM

ESKİŞEHİR İLİ MERKEZİNDE EVLERDE RADON GAZI ÖLÇÜMÜ VE MEVSİMSSEL DÜZELTME FAKTÖRÜNÜN HESAPLANMASI

5.1. Eskişehir'in İklim Ve Jeolojik Yapısı

Eskişehir, 30° 31' doğu boylamı ile 39° 47' kuzey enlemi arasında, İç Anadolu Bölgesi'nin kuzeybatısında yer almaktadır. Kuzeyde Karadeniz, kuzeybatıda Marmara, batı ve güneybatıda Ege Bölgesi ile komşudur. Eskişehir ili, güneyden Afyonkarahisar'ın Emirdağ ve İnsaniye, güneydoğudan Konya'nın Yunak, doğudan Ankara'nın Polatlı, Nallıhan ve Beypazarı, kuzeybatıdan Bolu'nun Göyükk, batıdan Bilecik'in Gölpaazarı, Söğüt, Bozüyük ilçeleri ve Kütahya ile çevrelenmiş durumdadır. Eskişehir, merkezi nüfusu 631.905, merkez yüz ölçümü 2.678 km², toplam yüzölçümü 13.653 km², deniz seviyesinden yüksekliği ise 788 m'dir. Yaklaşık % 22'sini dağların oluşturduğu ilin, yeryüzü şekilleri içinde ovaların payı % 26 dolayındadır.



Şekil 5.1. Eskişehir haritası.

Şekil 5.1’de Eskişehir haritası ilçeleri ile birlikte gösterilmiştir. Eskişehir ilinin topografik yapısını Sakarya ve Porsuk havzalarındaki düzlükler ile bunları çevreleyen dağlar oluşturur. Havza düzlüklerini, kuzeyden Bozdağ-Sündiken Sıradağları, batı ve güneyden ise İç Batı Anadolu eşiğinin doğu kenarında yer alan Türkmen Dağı, Yazılıkaya Yaylası ve Emirdağ kuşatır. Eskişehir merkezi bir vadi üzerine kurulmuş olup Porsuk nehri batıdan doğuya doğru vadi üzerinden akmaktadır. Eskişehir 4. jeolojik zamanda oluşmuş, toprak yapısı çoğunlukla çakıl, kum, mil ve kilden oluşmuş olup genel olarak tarıma elverişli alüvyon topraklardan oluşur. Vadinin merkezinde alüvyon toprak derinliği 100 m diğer kısımlarda 30-40 m arasında değişir.

Eskişehir, İç Anadolu, Batı Karadeniz ve Akdeniz iklimlerinin etkisi altında olması nedeniyle kendine özgü bir iklime sahiptir. Yıllık sıcaklık ortalaması 10,9 °C’dir. Aylık ortalamaya göre yılın en soğuk ayı -2 °C ile ocak ayıdır. Aralık ayının ortalarından şubat ayının ortalarına kadar çok soğuk günler ve don olayları yaşanır. Sıcaklık -10 °C ile -25 °C arasında değişir. Ancak ocak ayı içinde 10 °C ile 15 °C’lik ılık günler de geçirilir. Mart ayında daha çok don olayına rastlanır. Baharın ikinci yarısında maksimum sıcaklık 20 °C’nin üstüne çıkar. Haziran, temmuz ve ağustos aylarında en sıcak günler yaşanır. Bu dönemde en düşük sıcaklık 10-15 °C arasında olabilir. Temmuz ayının ikinci yarısı ile ağustos ayının ilk yansında en yüksek sıcaklık 30 – 40 °C arasında değişir. Burada kara iklimi özelliğini gösteren en belirgin olay gece ile gündüz sıcaklıklarında 12 °C ile 29 °C arasında büyük sıcaklık farklarının olmasıdır. Sonbahar mevsimi sıcaklığın 20 °C’nin altına düşmesiyle ağustos ayının ikinci yarısından itibaren kendini belli eder. Eylül ayının sonunda sıcaklık 0 °C’ye kadar inebilir. En yüksek sıcaklık ise yine eylül ayı içinde, yazın devamı olarak 20 ile 30 °C arasında oynayabilir. Ekim ayında ortalama sıcaklık 10 °C civarında seyredir. Eskişehir’de yağışlar, kışın kar ve yağmur şeklinde görülür. Aralık ayından itibaren yağışlar daha çok kar şeklindedir. Nisan ayı sonundan itibaren havalar ısınmaya başlar. Eskişehir’de bahar yağmurları batı ve güneybatıdan gelerek sağanak halinde düşer. Yıllık ortalama yağış miktarı 378,9 kg/m³’dür. Temmuz ve ağustos aylarında Akdeniz yaz kuraklığı özelliklerini gösterir. Ancak çok hafif olarak Karadeniz yaz yağmurlarını da alır. Ekim ayında yağmur, kasım ayında sulu karın yağması kışın başladığını gösterir. Eskişehir’de rüzgârlar kışın doğudan batıya eser. Baharın ilk aylarında kuzeybatı rüzgârları hâkimdir. Baharın sonunda güneybatı, batı ve kuzeybatıdan gelen

rüzgârlar görülür. Yaz mevsiminde bazen geçici olarak günlük şiddetli doğu rüzgârları da görülebilir. Sonbaharda ise eylül sonundan itibaren doğu, kuzeydoğu ve güneydoğu rüzgârları ortaya çıkar (URL-2). Çizelge 5.1’de Eskişehir’in ortalama iklim değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Eskişehir için ortalama iklim değerleri (URL-3).

Aylar	Oca.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.	Eki.	Kas.	Arl.	Yıllık
Ort.En Yüksek °C (°F)	3,8 (38,8)	6,2 (43,2)	11,2 (52,2)	16,4 (61,5)	21,8 (71,2)	25,9 (78,6)	28,9 (84,0)	29,2 (84,6)	25,0 (77,0)	19,8 (67,6)	12,4 (54,3)	5,5 (41,9)	17,18 (62,92)
Ort.En Düşük °C (°F)	-4,1 (24,6)	-3,9 (25,0)	-1,5 (29,3)	2,8 (37,0)	6,9 (44,4)	10,4 (50,7)	13,1 (55,6)	13,0 (55,4)	8,4 (47,1)	4,4 (39,9)	0,3 (32,5)	-2 (28)	3,98 (39,17)
Yağış mm (inches)	39,8 (1,567)	28,7 (1,13)	31,5 (1,24)	43,2 (1,701)	44,2 (1,74)	25,9 (1,02)	12,7 (0,5)	9,4 (0,37)	15,6 (0,614)	30,4 (1,197)	34,5 (1,358)	44,0 (1,732)	359,9 (14,169)
Ort. Yağmur. Gün	12,9	11,4	11,3	11,5	10,3	7,2	3,7	3,2	4,7	8,3	9,9	12,8	107,2
Ort. Karlı. Gün	10	9	5	1	0	0	0	0	0	0	3	6	34
Güneşli gün (saat)	77,5	140,6	158,1	183	260,4	309	353,4	331,7	267	186	123	65,1	2.454,8

5.2. Önceki Çalışmalar

Bu bölümde, Türkiye’nin farklı yerlerinde binalarda daha önce yapılan radon gazı araştırmalarından bahsedilecektir.

Melekşah Altınsöz (2012) tarafından yapılan bir çalışmada Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Yerleşkesinde Fen-Edebiyat Fakültesi, Mühendislik Fakültesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Eğitim Fakültesi ve Merkez Kütüphane binalarında radon gazı ölçümü yapılmıştır. Yapılan çalışmada LR-115 detektörleri kullanılarak 3 ay süreli 4 dönemde (ilkbahar, yaz, sonbahar, kış) toplamda 391 ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre bina içi ortalama radon yoğunluğu $101,51 \text{ Bq/m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Hatice Davutoğlu (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, Dumlupınar Üniversitesi Yerleşkesinde Fen-Edebiyat Fakültesi, Mühendislik Fakültesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Eğitim Fakültesi ve Rektörlük binasına yerleştirilen LR-115

detektörleri ile binalarda radon yoğunluğu ölçülmüştür. Bu çalışmada toplam 22 adet film yukarıda isimleri söylenen bölümlerde ofislere 1 ay süreli tek dönem olarak yerleştirilmiştir. Bu çalışmada sigara kullanma alışkanlığı, odanın havalandırılması, oda boyutlarının radon yoğunluğuna etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda bina içi ortalama radon yoğunluğu $487,18 \text{ Bq/m}^3$ olup 123 ile 874 Bq/m^3 arasında değişim göstermektedir.

Enis Kapdan (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, Sakarya iline bağlı Adapazarı merkez ilçesinde binalarda radon yoğunluğu ölçülmüştür. Bu çalışmada toplam 136 adet CR-39 detektörü bazı bina, okul ve fabrikalara yerleştirilmiştir. Çalışma kış mevsiminde 70 gün süreli tek dönemlik yapılmıştır. Yapılan çalışma sonuçlarına göre Adapazarı Merkezi Organize Sanayi Bölgesinde bulunan fabrika ve iş yerlerinde radon yoğunluğu ortalama $51,00 \text{ Bq/m}^3$, okullarda $65,48 \text{ Bq/m}^3$ ve evlerde $59,14 \text{ Bq/m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Vakkas Bozkurt (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, Niğde ilinde bulunan bazı tarihi mekânlarda radon gazı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada CR-39 detektörleri kullanılarak 63 gün süreli tek seferlik ölçüm yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucuna göre radon yoğunlukları Sungur Bey Camii $31,6 \text{ Bq/m}^3$, Alâeddin Camii 52 Bq/m^3 , Dışarı Camii 47 Bq/m^3 ve Ak Medrese için 31 Bq/m^3 ölçülmüştür.

Hakan Akyıldırım (2005) tarafından yapılan bir çalışmada Isparta ilinde bina içi radon yoğunluğu ölçülmüştür. Yapılan çalışmada ölçümler için ALPHAGUARD cihazı kullanılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre ortalama radon yoğunluğu Süleyman Demirel Üniversitesi yerleşkesinde 372 Bq/m^3 , Isparta il merkezinde 118 Bq/m^3 , Yedişehitler Mahallesi 134 Bq/m^3 , Muzaffer Türkeş Mahallesi 196 Bq/m^3 , Batıkent mahallesi 172 Bq/m^3 , Yalvaç İlçesinde 92 Bq/m^3 , Davraz Mahallesi 359 Bq/m^3 , Halıkent Mahallesi 44 Bq/m^3 , Piri Mehmet Mahallesi 190 Bq/m^3 , Gökçay Mesireliğinde 27 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür.

Meltem Değerlier (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, Adana ili çevresinde binalarda radon gazı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada il içinde seçilen 52 eve CR-39 detektörleri 60 gün süreli 2 dönem (ocak-şubat ve haziran-temmuz)

yerleştirilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre kış dönemi radon yoğunluğu 15 ile 64 Bq/m³, yaz dönemi ise 5 ile 64 Bq/m³ arasında değişmektedir.

Özlem Karadeniz ve arkadaşları (2011), İzmir'in Dikili ilçesinde binalarda radon gazı ölçümleri yapmıştır. Yapılan çalışmada 22 evde LR-115 detektörleri ile 2 aylık periyotlarla toplamda 4 defa (aralık-temmuz) ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre ev içi radon yoğunluğu 11 ile 727 Bq/m³ arasında değişmekte olup binalardaki radon yoğunluğunun geometrik ortalaması 63 Bq/m³ olarak hesaplanmıştır.

Nedim Çelik ve arkadaşları (2007), Kars ilinde binalarda radon gazı ölçümleri yapmıştır. Yapılan çalışmada makrafol katıhal iz detektörleri ile, seçilen 87 evde 3 ay süreli bir defa ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre bina içi radon yoğunluğu 20 ile 600 Bq/m³ arasında değişmektedir, bina içi ortalama radon yoğunluğu 114 Bq/m³ hesaplanmıştır.

Erol Kam ve arkadaşları (2009), Tekirdağ ilinde binalarda radon gazı ölçümleri yapmıştır. Yapılan çalışmada CR-39 detektörleri ile 92 farklı binada 3 ay süreli tek dönemlik ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu 11 ile 247 Bq/m³ arasında değişmekte olup ortalama radon yoğunluğu 86 Bq/m³ hesaplanmıştır.

Songül Vaizoğlu ve arkadaşları (1996-1997), Ankara il merkezinde binalarda radon gazı ölçümleri yapmıştır. Yapılan çalışma ile CR-39 detektörleri kış döneminde 3 ay süreli toplamda 200 binaya yerleştirilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu 2 ile 408 Bq/m³ arasında değişmektedir. Bu çalışmada bina içi radon yoğunluğunu oluşturabilecek kaynaklar araştırılmıştır.

Yasemin Örgün ve arkadaşları (2007), Çanakkale ili Ezine ilçesinde bina içi radon yoğunluğunu incelemiştir. Yapılan çalışmada yaz döneminde 58 binada CR-39 detektörleri ile 3 aylık tek seferlik ölçüm yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu 9 ile 996 Bq/m³ arasında değişmekte olup, ortalama radon yoğunluğu 115,5 Bq/m³ olarak hesaplanmıştır.

Metin Mihçı ve arkadaşları (2009), Sivas ilinde binalarda radon gazı ölçümleri yapmıştır. Bu çalışmada CR-39 detektörleri 3 ay süreli 2 dönem (kış için 33 ev, yaz

için 66 ev) binalara yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu kış dönemi için ortalama olarak 89 Bq/m^3 , yaz dönemi için 98 Bq/m^3 hesaplanmıştır.

Ahmet Bozkurt ve arkadaşları (2006), Edirne ilinde binalarda radon gazı ölçümleri yapmıştır. Bu çalışmada CR-39 detektörleri ile 88 adet ölçüm 3 ay süreli olarak bir dönem yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre bina içi ortalama radon yoğunluğu $49,2 \text{ Bq/m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Y. Yarar ve arkadaşları (2005), Dikili jeotermal bölgesinde bulunan binalarda radon gazı ölçümü yapmıştır. Bu çalışmada CR-39 detektörleri ile 62 farklı evde 3 ay süreli tek dönem radon gazı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu 31 ile 280 Bq/m^3 arasında değişmektedir.

Asiye Uluğ ve arkadaşları (2003), Isparta ili ve bazı ilçelerde binalarda radon gazı ölçümü yapmıştır. Bu çalışmada CR-39 detektörleri ile 3 ay süreli tek dönemlik 280 ölçüm yapılmıştır, Üç farklı bölge için ortalama radon yoğunluğu 78 Bq/m^3 ile 279 Bq/m^3 arasında değişmektedir.

A. Kurnaz ve arkadaşları (2006), Trabzon ilinde binalarda radon gazı ölçümü yapmıştır. Çalışmada CR-39 detektörleri ile 97 farklı binada 3 ay süreli 4 dönem (kış, ilkbahar, yaz, sonbahar) için ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonucuna göre bina içi radon yoğunluğu 8 ile 583 Bq/m^3 arasında değişmektedir.

B. Küçükömeroğlu ve arkadaşları (2009), Bayburt ilinde binalarda radon gazı ölçümü yapmıştır. Yapılan çalışmada CR-39 detektörleri ile 44 farklı binada 3 ay süreli tek dönem radon gazı yoğunluğu ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu 17 ile 125 Bq/m^3 arasında değişmektedir. Binalar için hesaplanan ortalama radon yoğunluğu 56 Bq/m^3 'dir.

F.S. Ereeş ve arkadaşları (2004), Manisa ilinde binalarda radon gazı ölçümü yapmıştır. Yapılan çalışmada CR-39 detektörleri ile 22 farklı binada 1 ay süreli tek dönem radon gazı ölçümü yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu 47 ile 146 Bq/m^3 arasında değişmektedir.

Pinel ve arkadaşlarının (1995) yaptığı bir çalışma ile, Büyük Britanya genelinde radon gazı ölçümü yapılmıştır. Çalışmada 1989-1992 yılları arasında güney batı İngiltere’de toplam 2057 evde 6 ay süreli toplamda 12 dönemlik radon gazı ölçümü yapılmıştır. Yapılan çalışmada İngiltere için mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır. Ölçüm sonucuna göre mevsimsel düzeltme faktörü 0,74 ile 1,56 arasında değişim göstermektedir.

H. Baysson ve arkadaşları (2003), Fransa genelinde yaklaşık 1400 evde radon gazı ölçümü yapmıştır. Ülke genelinde ölçümler 1982 yılından itibaren yapılmaya başlanmıştır. Ölçümler, LR-115 detektörleri ile 2 ay ve 6 ay süreli olarak toplamda 12 dönemlik yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre Fransa için mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır. 6 aylık ölçümlere göre mevsimsel düzeltme faktörü 0,87 ile 1,17 arasında değişmektedir.

Orlaith Burke ve arkadaşları (2010), İrlanda genelinde radon gazı ölçümleri yapmıştır. Ölçümler ülke genelinde 1980 yılından itibaren yapılmaktadır. Ölçümler CR-39 detektörleri ile 3 ay süreli 12 dönemlik yapılmıştır. 2010 yılına kadar ülke genelinde toplan 5640 evde radon gazı ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde İrlanda için mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır. Yapılan hesaplara göre mevsimsel düzeltme faktörü 0,86 ile 1,14 arasında değişmektedir.

5.3. Detektörlerin Kalibre Edilmesi

Detektörlerin kalibrasyonu ile ilgili teorik kısımlar Bölüm 4.9’da ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Deney kapsamında kullanılan LR-115 detektörleri İstanbul Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezinde (ÇNAEM) kalibre edilmiştir. Kullanılan kalibrasyon odası, sınıflandırmada ucuz tipli olan kısma girmektedir. Kalibrasyon odası, içerisinde radyum kaynağı bulunan sayesinde $3,2 \text{ kBq/m}^3$ radon yoğunluğuna sahip bir varilden ibarettir. Kalibrasyon işlemlerinde aşağıdaki metot takip edilmiştir.

- İçerisine LR-115 filmleri yerleştirilen plastik bardaklar kalibrasyon odasına ağzı açık bir şekilde yerleştirilir.
- Kalibrasyon için kullanılacak plastik bardağın deney çalışmasında kullanılan bardakla aynı olması gerekir.

- Radon odasının kapağı hızlı bir şekilde açılır, detektörler radon odasına yerleştirilir, aynı hızla radon odasının kapağı kapatılır böylece radon odasındaki radon yoğunluğunun azalması engellenir.
- Kalibrasyon eğrisinin çizilmesi veya kalibrasyon faktörünün hesaplanması için bardaklar 1, 2, 3 ve 4 gün kalibrasyon odasında tutulur.
- Kalibrasyonun doğruluğu açısından radon odasına gün başına 3-4 detektör konulması uygun olur.
- İşlemler sırasında radon gazı mümkün olduğunca solunmamalıdır.
- Filmler radon odasından aldıktan sonra alüminyum folyo ile sarılır.

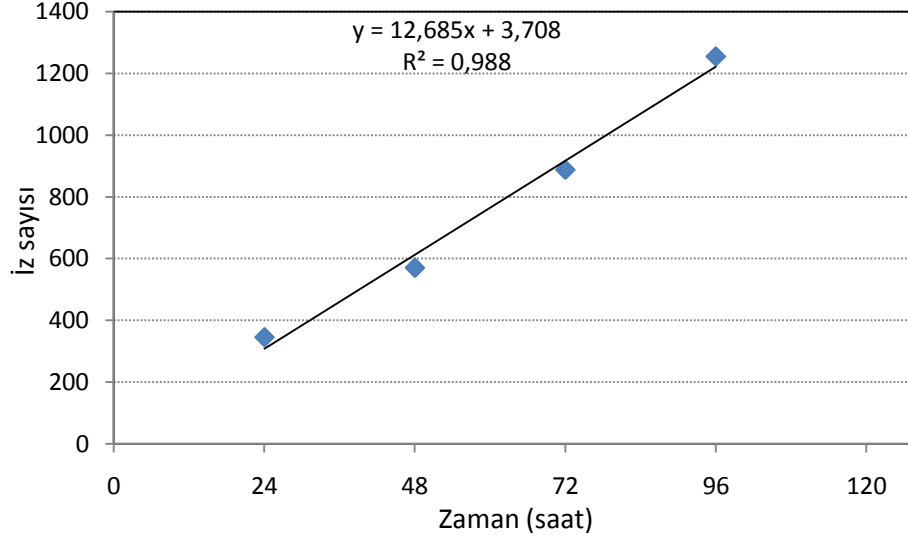
Bu çalışmada kullanılan LR-115 filmleri 21 - 25 Mart 2011 tarihleri arasında ÇNAEM’ de kalibre edilip teorik hesaplamalar kendi laboratuvarımızda yapılmıştır. Kalibrasyon işlemlerinde toplam 96 adet film kullanılmıştır.

Çizelge 5.2. 21 – 25 Mart 2011 tarihli veri setleri.

Süre (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
24	378	312	380	436	374	293	389	312	285	285	318	391
48	487	487	580	523	504	585	468	634	988	453	516	617
72	828	622	1200	1029	893	848	646	856	862	743	1327	803
96	1290	1280	1639	1651	1552	1043	1163	920	1125	1023	933	1440

Çizelge 5.2’de 12 adet veri seti için süreye bağlı iz sayıları verilmiştir. Her bir veri setinin kendi içinde aritmetik ortalaması alınarak Şekil 5.2’deki kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Grafiğin eğimi 12,685 olarak hesaplanmıştır. Grafiğe göre saatte oluşan ortalama iz sayısı 12,685’dir. Bunun anlamı 3,2 kBq/m³’lük radon yoğunluğuna sahip bir yerde 1,5 cmx1,5 cm boyutundaki bir filmde saatte ortalama 12,685 iz oluşmaktadır. Kalibrasyon eğrisi kullanılarak matematiksel olarak orantı kurup herhangi bir yerdeki radon yoğunluğunu hesaplayabiliriz. Örneğin 3 aylık süre boyunca herhangi bir evde bulunan aynı ebattaki (1,5 cmx1,5 cm) bir detektörde 1000 iz oluştuğunu düşünelim. İncelenen evde bulunan detektör üzerinde saatte oluşan iz sayısı 1000/(24x90) yani

0,4629'dir. $3,2 \text{ kBq/m}^3$ radon yoğunluğunda saatte 12,685 iz oluşuyorsa, saatte 0,4629 iz oluşan evin radon yoğunluğu orantı kurularak $116,79 \text{ Bq/m}^3$ olarak hesaplanır.



Şekil 5.2 Kalibrasyon eğrisi.

Yukarıda oluşturulan orantıyı denklem haline getirirsek iz sayısına bağlı olarak herhangi bir ortamın radon yoğunluğunu Denklem 5.1 yardımı ile bulabiliriz.

$$C_{Rn} = \frac{X \cdot 3,2 \text{ kBq/m}^3}{24 \text{ saat} \times 90 \times 12,65 \text{ iz/saat}} \quad (5.1)$$

Burada, X, iz sayısını, C_{Rn} ise bina içi radon yoğunluğunu (Bq/m^3) ifade eder. Burada, X hariç diğer değişkenler (bu çalışma için) sabittir dolayısı ile sadeleştirilebilir. Sadeleşmeler yapıldığında,

$$C_{Rn} = 0,11679 \cdot X \quad (5.2)$$

elde edilir. Burada, X ev içi radon yoğunluğu, bu çalışmada hesaplanan kalibrasyon faktörü ise $K=0,11679$ 'dır. Herhangi bir evdeki radon yoğunluğu iz sayısının kalibrasyon faktörü ile çarpılması sonucu bulunur. Örneğin, bir evde 3 ay boyunca oluşan iz sayısı 1000 ise evdeki radon yoğunluğu Denklem 5.2'den $116,79 \text{ Bq/m}^3$ olarak hesaplanır.

5.4. Evlerde Radon Gazı Ölçümü Ve Mevsimsel Düzeltme Faktörü Hesabı

5.4.1. Malzeme ve yöntem

“Mevsimsel ve Yıllık Ortalama Radon Yoğunluğu Ölçümü ve Mevsimsel Düzeltme Faktörü Hesabı” proje kapsamında detektörler evlere dağıtılmadan önce, Eskişehir il merkezi sınırları içinde ölçüm için kullanılacak evler belirlenmeye çalışılmıştır. Evlerin tespit edilmesinde her mahalleden belirli sayıda evler seçilmiş olup kalabalık mahallelerden daha fazla ev belirlenmiştir. Evlerin belirlenmesinin ardından radon gazı ve etkileri konusunda evde yaşayan bireylere broşür dağıtılıp yazılı ve sözlü olarak kısa bilgilendirmeler yapılmıştır. Konuşmalarda radon gazının hayatımızdaki önemi özellikle sağlık etkileri vurgulanmıştır. Proje kapsamında seçilen evler için gerekli bilgileri içerecek anket hazırlanıp filmlerin dağıtılacağı evlerde yaşayan bireylere uygulanarak evlerle ilgili bilgiler toplanmıştır. Anketlere göre filmlerin dağıtıldığı evlerin tamamı beton yapılardan oluşmaktadır. Evlerin bir kısmı müstakil bir kısmı ise apartman dairelerinden oluşmaktadır. İnsanların yoğunluğu apartmanlarda yaşadığı için deney kapsamında seçilen evlerin çoğunun apartman dairesi olmasına dikkat edilmiştir. Evlerin yoğunluğunda ısı yalıtımı bulunmakta ve camların tamamına yakını PVC pencere sistemlerinden oluşmaktadır. Filmler 3 aylık periyotlarda dağıtıldığı için ara ara telefonda kısa mesaj gönderilerek gerekli uyarılar iletilmeye çalışılmıştır. Filmlerin dağıtımı ve toplanması sürecinde bazı aksamalar olsa da genel olarak vaktinde dağıtılıp vaktinde toplanmıştır.

Deney için farklı mahallelerden yaklaşık 220 farklı ev belirlenmiştir. Her ölçüm döneminde dağıtılan ve toplanan filmler sayısal olarak farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıkların oluşmasında evde yaşayan bireylerin farklı illere taşınması, evdeki filmlerin kaybolması ve deneysel çalışmaya zamanla gösterilen isteksizlik etkili olmuştur.

Eskişehir ili merkezinde LR-115 detektörleri 2010-2011 yıllarında kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri için toplamda 4 dönemlik dağıtılıp toplanmıştır. Aynı ölçüm yılında ayrıca evlere 1 yıl kalmak üzere filmler dağıtılıp toplanmıştır. 2010-2011 yıllarında yapılan 4 mevsimlik ölçümlerde bina içi radon yoğunluğu, katlara göre bina içi radon yoğunluk değişimi, 3 aylık ölçümlerle yıllık ölçümlerin kıyaslanması, kişi başına alınan radyasyon doz miktarının hesaplanması yapılmıştır.

Proje kapsamında Eskişehir il merkezinde evlerde yapılan radon gazı ölçümleri için mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır. Mevsimsel düzeltme faktörünü hesaplamada kullanılan metot daha önceki kısımlarda ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması için ilgili metot çerçevesinde bir Matlab programı yazılmış olup yazılan program 3 aylık ölçümler için geçerlidir. Hazırlanan programa mevsimsel radon yoğunluğunun geometrik değeri veri olarak girildiği zaman mevsimsel düzeltme faktörü ve grafiği doğrudan elde edilebilmektedir.

İlk başta mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanmasında ilk yıl sadece dört mevsimi kapsayacak şekilde 4 dönem için ölçümler alınmıştır. 12 dönem için hazırlanan metot 4 dönemlik ölçümlere uyumlu olacak şekilde düzenlendi. Ancak 4 dönemlik ölçümler Fourier analizinde elde edilen periyodik fonksiyonu tam olarak ifade edememekte ve mevsimsel değişime uyum göstermemektedir. Bu nedenle ikinci yılda (2011-2012) ölçüm döneminin 12'ye tamamlanması için il merkezinde radon gazı ölçümlerine devam edildi. 2011-2012 yılları arasında her ayın 10 ile 15. günleri arasında deney bardakları evlere dağıtılıp 3 ayın sonunda toplandı ve tekrar yenileri verilerek ölçümler 12 dönem boyunca ölçümler tekrar edildi.

Bu çalışmada iki farklı veri seti kullanılarak mevsimsel düzeltme faktörü hesabı yapılmıştır. İlk olarak hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörü, 2010-2011 yılları arasındaki 4 dönemlik ölçüm sonuçları ile elde edilmiştir. İkinci olarak hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörü 2010-2012 yılları arasında yapılan 12 dönemlik tüm ölçüm sonuçları ile elde edilmiştir. İlk yapılan ölçümlere (2010-2011) bağlı olarak hesaplanan mevsimsel düzeltme faktöründe 4 dönemlik deneysel veriler kullanılarak eksik olan 8 dönemlik veriler bir fonksiyon yardımı ile tahmin edilmiştir. Daha sonra 4 dönemlik deneysel veri ve 8 dönemlik tahmini veriler kullanılarak mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır.

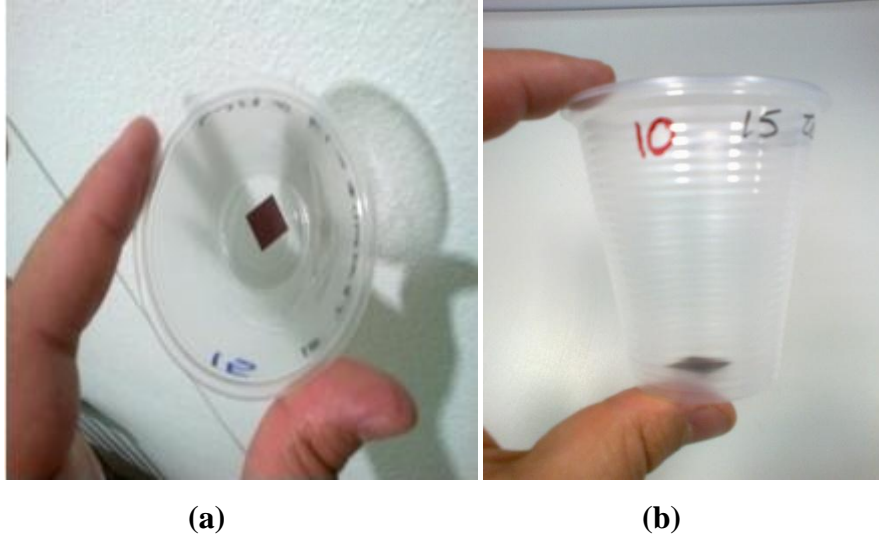
Diğer mevsimsel düzeltme faktörü hesabı için hem dört hem de 2011-2012 arasında elde edilen 12 dönemlik veri seti kullanılmıştır. Daha sonra 4 dönem ve 12 dönem radon gazı ölçümlerine bağlı olarak hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörleri kıyaslanmıştır.

LR-115 filmleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarında aşağıdaki yöntem izlenerek hazırlanmıştır.

- Filmler 1,5 cm x 1,5 cm uzunluklarda kesilir.

- Ön yüzü dışa gelecek şekilde plastik bardakların tabanına tutturulur.
- Bu işlemler el değmeden pamuklu eldiven yardımıyla yapılır.

Şekil 5.3’de bardağa yerleştirilen filmlerin yukarıdan ve yandan görünüşü verilmiştir. Filmler bardakların tabanına oyun hamuru ile tutturulmuştur.



Şekil 5.3. Filmlerin bardağa yerleştirilmesi filmlerin yukarıdan (a) ve yandan görünüşü (b).

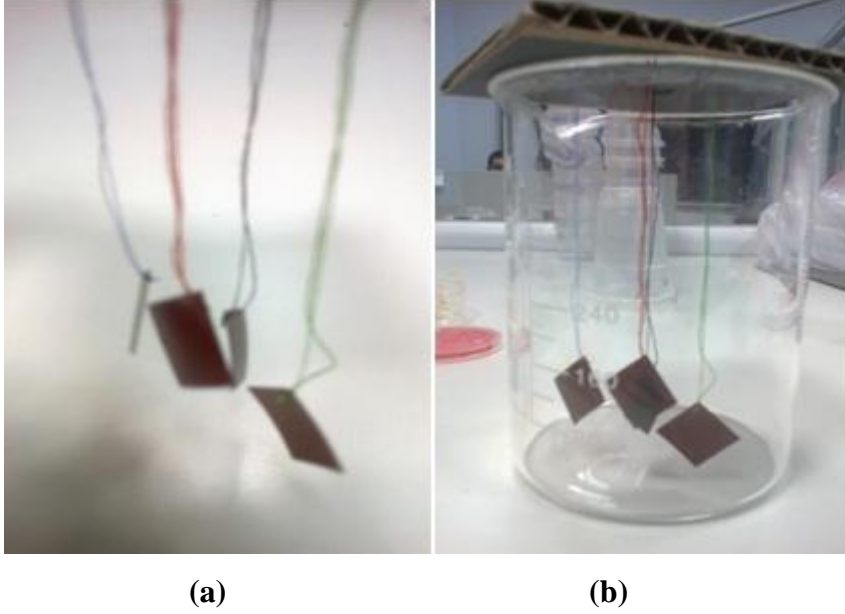
Hazırlanan film bardakları numaralandırıldıktan sonra alüminyum folyo ve streç filmle sarılarak önceden belirlenen evlere elden teslim edilmiştir. Filmler evlere yerleştirilirken havalandırma ve ısı kaynağından uzak bir yere, yerden yaklaşık 1 m yükseklikte, duvardan 10-15 cm uzağa yerleştirilmesi konusunda gerekli bilgilendirme yapılmıştır. Deney bardaklarından birinin yatak odasına diğerinin oturma odasına yedekleri ile birlikte yerleştirilmesi sağlanmıştır. Bardakların süresi dolduğunda evde oturan bireylere önceden haber verilerek film bardakları alüminyum folyo ve streç filmle sarılarak toplanıp yenileri verilmiştir.

Üç ay bekledikten sonra toplanan filmler Osmangazi Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarında kimyasal işlemlere tutulup analizleri yapılmıştır.

Kimyasal işlemlerde aşağıdaki metot takip edilmiştir:

- Filmler el değmeden bardaktan çıkarılarak bir köşesinden iğne deliği açılır.

- Açılan deliklere renkli ipler geçirilerek bir yüzeye tutturulur.
- Bu sırada filmler ve renkleri not alınarak filmlerin karışması önlenir. Şekil 5.4'de filmlerin kimyasal işlemlerden önce renkli iplere tutturulması ve beher bardağına yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Filmlerin renkli iplere tutturulması (a) ve beher bardağına yerleştirilmesi (b).

- Beher içinde % 10'luk 200 ml NaOH çözeltisi hazırlanır.
- Filmler behere temas etmeyecek şekilde çözeltiliye batırılır.
- Beher içindeki filmler beherle birlikte 60 (± 1) °C ye kadar ısıtılan banyo havuzuna yerleştirilir.
- Kimyasal işlem sürecinde sıcaklığın sabit kalması sağlanır. Şekil 5.5'de filmlerin kimyasal işleme tutulduğu banyo havuzu gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Filmlerin kimyasal işleme tutulduğu banyo havuzu.

- 95 dakika sonra beherler havuzdan çıkarılır, filmler beherden alınarak saf suya konulur.
- Filmler oda sıcaklığında magnetik karıştırıcıda saf su içinde 20 dakika karıştırılarak durulanır. Filmlerin durulandığı manyetik karıştırıcı Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Filmlerin kurutulmadan önce durulanmasında kullanılan manyetik karıştırıcılar.

- Durulanan filmler 40 °C sıcaklıktaki fırında yaklaşık 20 dakika kurutulur.

- Kurutma işlemlerinin ardından filmler lam içine konularak izlerin sayılmasına geçilir.

İzler sayımı sırasında aşağıdaki metot takip edilmiştir:

- Kurutulan filmler lam içine konulur.
- Film sayısı çok olduğu için her bir lam numaralandırılır.
- Filmler lam içinde mikroskop altına konulur. Yaklaşık 0,5 mm²'lik film alanındaki izler Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Film üzerindeki beyaz noktalar alfa parçacıklarının oluşturduğu izlerin kazıma sürecinin sonundaki görüntüsüdür.



(a)

(b)

Şekil 5.7. Kimyasal işlemlerin ardından filmlerin lam içine yerleştirilmesi (a) ve optikmikroskop altında izlerin (beyaz noktalar) görünüşü (b).

- İz sayısı az ise izler tek tek sayılabilir, iz sayısı çok ise rastgele seçeceğimiz 4-5 farklı film satırında iz sayımı yapılır ve bunların aritmetik ortalaması alınır.
- Aritmetik ortalaması alındıktan sonra ortalama iz sayısı (filmler ekranda 20 film satırından oluşur) 20 ile çarpılarak toplam iz sayısı yaklaşık olarak bulunur.
- İz sayım işi bittiğinde değerler bilgisayar ortamına aktarılarak kalibrasyon sabiti ile çarpılıp ortamın radon yoğunluğu Bq/m³ biriminde bulunur.

5.4.2. İl merkezinde radon gazı ölçüm sonuçları

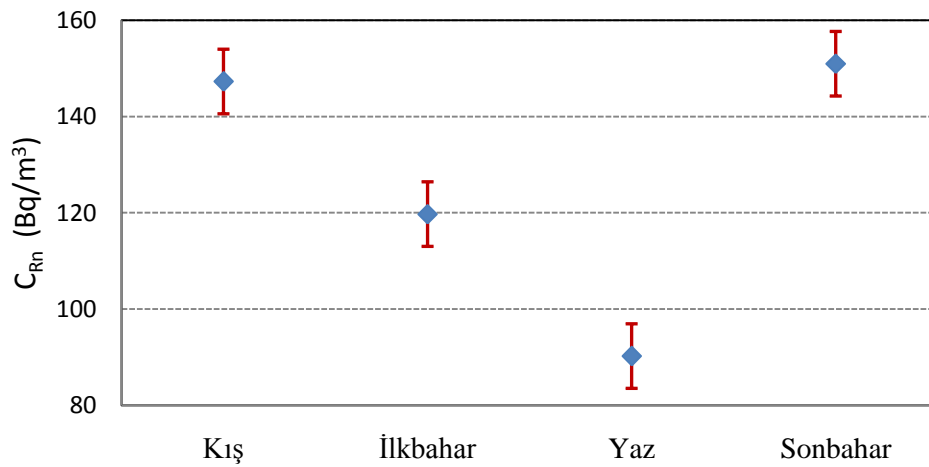
Eskişehir il merkezinde dört dönemlik (kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar) ölçümler için filmler 17-27 Aralık 2010, 17-27 Mart 2011, 17-27 Haziran 2011 ve 17-27 Eylül 2011 tarihleri arasında evlere yedekleri ile birlikte dağıtılıp üç ayın sonunda aliminyum folyo ve streç filmle sarılarak toplanmıştır. İlk dönem (kış) dağıtılan filmlerden 169, ikinci dönem (ilkbahar) dağıtılan filmlerden 137, üçüncü dönem (yaz) dağıtılan filmlerden 125, dördüncü dönem (sonbahar) dağıtılan filmlerden 103 tanesi analiz edilmiştir. 17-27 Aralık 2010 tarihleri arasında evlere 1 yıl süreli dağıtılan filmlerden 83 film toplanıp analiz edilmiştir.

Çizelge 5.3’de 4 mevsimlik ve 1 yıllık ev içi radon gazı ölçümlerinin istatistiksel analizi verilmiştir. Evlere 3 ay ve bir yıl süreli dağıtılan ve toplanan filmler arasında sayısal olarak ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 5.3’e bakıldığında ölçüm sayıları sürekli azalmaktadır. Sürenin uzun olması, evde oturan bireylerin başka illere taşınması filmlerin kaybolmasına veya bozulmasına sebep olmuştur. Ayrıca bu durumun oluşmasında en büyük sebep deneye karşı zamanla gösterilen ilgisizlik olmuştur.

Çizelge 5.3. Evlerdeki radon yoğunluğunun mevsimsel ve yıllık ölçümler için istatistikler.

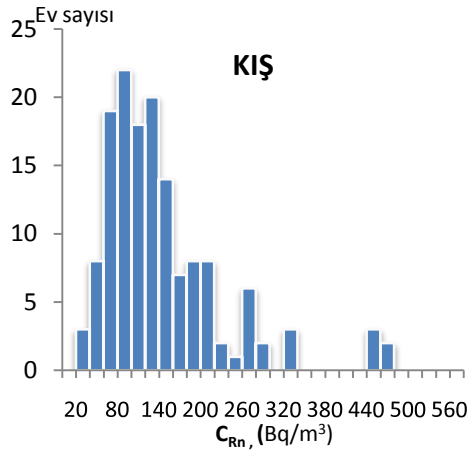
	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Yıllık
Ölçüm Sayısı	169	137	125	103	83
Aritmetik Ortalama (Bq/m ³)	147	120	90	151	98
Arit. Ort. Stand. Hatası (Bq/m ³)	7,11	6,59	5,16	7,97	6,85
Standart Sapma (Bq/m ³)	92	77	58	81	63
En Küçük Değer (Bq/m ³)	34	22	25	19	19
En Büyük Değer (Bq/m ³)	531	424	320	412	338
Geometrik Ortalama (Bq/m ³)	126	98	76	131	84
Geometrik Standart Sapma (Bq/m ³)	1,72	1,89	1,80	1,75	1,73

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre (Çizelge 5.3) ev içi mevsimsel ortalama radon yoğunlukları kış, ilkbahar, yaz, sonbahar ve yıllık ölçümler için sırası ile 147 Bq/m^3 , 120 Bq/m^3 , 90 Bq/m^3 , 151 Bq/m^3 , 98 Bq/m^3 olarak ölçülüp hesaplanmıştır. Evlerdeki radon yoğunluğu mevsimsel farklılıklara uymaktadır, bina içi radon yoğunluğu yaz döneminde en düşük kış ve sonbahar döneminde en yüksek seviyede bulunmuştur. Çizelge 5.3'e göre mevsimsel ölçüm sonuçları ile yıllık ölçüm sonuçları paralellik göstermemektedir. Bu konu ileride ayrı bir başlık altında ele alınacaktır. Evlerdeki radon yoğunluğu sonbahar aylarında yükselirken ilkbahar aylarında azalmaya başlar. Bu çalışmada sonbahar ayında yapılan ölçüm sonucu kış ayında yapılan ölçüm sonucuna göre daha yüksek çıkmıştır. 2011 yılı kış mevsiminin 2010 yılı kış mevsimine göre çok daha sert geçmesi bu durumun oluşmasında en büyük etkidir. Şekil 5.8'de Eskişehir'de yapılan mevsimsel radon gazı ölçümlerinin mevsimlere göre değişimi grafiği verilmiştir. Şekil 5.8'e göre bina içi radon yoğunluğu mevsimsel değişime uymaktadır.

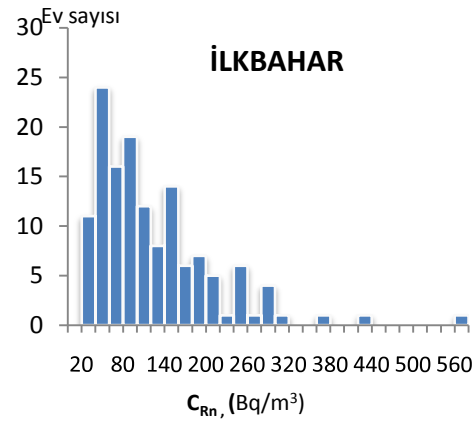


Şekil 5.8. Evlerdeki radon yoğunluğunun mevsimlere bağlı değişim grafiği.

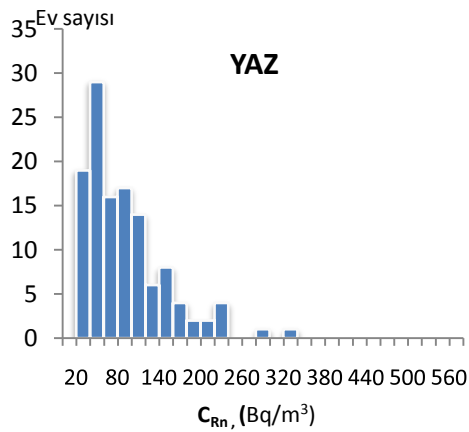
Eskişehir il merkezinde evlerde her mevsim döneminde ölçülen radon yoğunluğunun ev sayısına bağlı grafikleri Şekil 5.9'da verilmiştir. Grafiklere göre bina içi radon yoğunluğunun ev sayısına bağlı grafiği yaklaşık olarak normal dağılıma uymaktadır. Normal dağılımla ilgili teorik bilgiler Bölüm 6'da verilecektir.



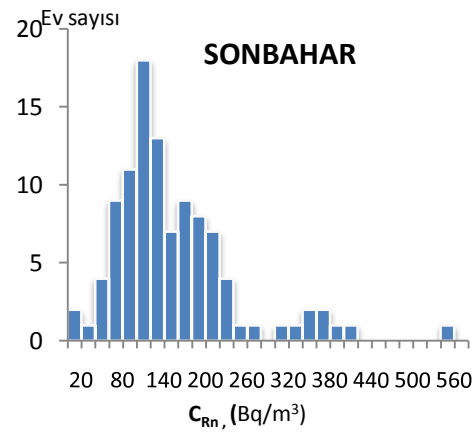
Şekil 5.9 a) Aralık 2010-Mart 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.



Şekil 5.9 b) Mart 2011-Haziran 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.



Şekil 5.9 c) Haziran 2011-Eylül 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.

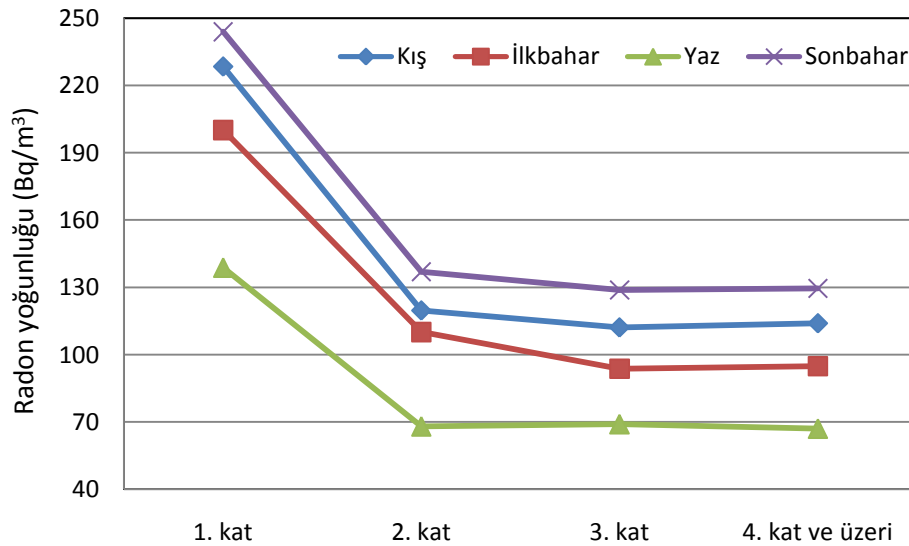


Şekil 5.9 d) Eylül 2011-Aralık 2011 tarihleri arasında evlerde ölçülen radon yoğunluğunun frekans dağılımı.

5.4.3. Eskişehir’de ev içi radon yoğunluğunun katlara göre değişimi

Evlerde biriken radon gazının ana kaynağı, binaların altında topraktaki uranyum ve türevleridir. Radon gazı, toprak ve taşın yapısında bulunan uranyum ve türevlerinin bozunması sonucu oluşur. Binaların toprağa en yakın olan katlarında radon yoğunluğu üst katlara göre daha fazladır. Yerin farklı derinliklerinde oluşan nükleer radon gazı binalara zemin çatlaklarından, tuğlalar arası boşluklarından, beton blokların gözenek ve

çatlaklarından, bağlantı noktalarından, binaya giren tesisat çevrelerindeki boşluklardan difüzyonla taşınarak bina içinde birikir. Üst katlara çıkıldıkça topraktan kaynaklanan radon etkisi azalır. Üst katlardaki radon gazının ana kaynağını bina yapı malzemeleri ve şebeke suyu oluşturur. Eğer evde kullanılan su artezyen kuyulardan sağlanıyorsa ev içi radon yoğunluğuna katkısı normal şebeke suyundan çok daha fazladır. Kendi deneysel çalışmamızda binalarda yapılan radon gazı ölçümlerinde katlara göre radon yoğunluğu analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları Şekil 5.10'da görülmektedir. Şekil 5.10'a göre binaların birinci katlarından bir üst kata çıkıldığında radon yoğunluğu keskin bir şekilde azalmaktadır. Üst katlardaki radon kaynakları ortak olduğu için ikinci kattan itibaren ev içi radon yoğunluğu fazla değişmemektedir.



Şekil 5.10. Bina içi radon yoğunluğunun katlara göre değişimi.

Ölçüm yapılan binaların birinci katları ile diğer bütün üst katların istatistiksel analizi Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'de verilmiştir. Birinci katlar için yapılan istatistiksel analize göre (Çizelge 5.4) bina içi radon yoğunluğu (ortalama) 73 Bq/m^3 ile 479 Bq/m^3 arasında değişmektedir. Bina içi ortalama radon yoğunluğu ise 203 Bq/m^3 hesaplanmıştır. Birinci katlar için elde edilen radon yoğunluğu, tüm katlar için hesaplanan ortalama radon yoğunluğunun yaklaşık iki katıdır.

Çizelge 5.4. Binaların 1. katlarında ölçülen radon yoğunluğunun mevsimsel ölçümler için istatistiksel analizi.

Örneklem	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
Ölçüm Sayısı	37	29	27	23
Aritmetik Ortalama (Bq/m ³)	228	200	139	244
Arit. Ort. Stand. Hatası (Bq/m ³)	18,30	19,31	14,88	23,86
Standart Sapma (Bq/m ³)	111	104	77	114
En Küçük Değer (Bq/m ³)	94	42	38	77
En Büyük Değer (Bq/m ³)	471	570	320	554
Geometrik Ortalama (Bq/m ³)	206	176	119	220
Geometrik Standart Sapma (Bq/m ³)	1,57	1,73	1,81	1,61
Medyan (Bq/m ³)	195	188	117	217

Çizelge 5.5. Binaların üst katlarında (zemin ve 1. kat hariç) ölçülen radon yoğunluğunun mevsimsel ölçümler için istatistiksel analizi.

Örneklem	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
Ölçüm Sayısı	111	99	84	72
Aritmetik Ortalama (Bq/m ³)	116	102	76	133
Arit. Ort. Stand. Hatası (Bq/m ³)	5,13	6,71	4,36	7,53
Standart Sapma (Bq/m ³)	54	67	40	64
En Küçük Değer (Bq/m ³)	34	22	25	19
En Büyük Değer (Bq/m ³)	325	424	214	379
Geometrik Ortalama (Bq/m ³)	105	86	66	118
Geometrik Standart Sapma (Bq/m ³)	1,57	1,81	1,66	1,71
Medyan (Bq/m ³)	108	87	63	123

Çizelge 5.5'e göre üst katlardaki radon yoğunluğu birinci kata göre çok daha azdır. Üst katlar için yapılan istatistik analize göre bina içi radon yoğunluğu (ortalama) 25 Bq/m³ ile 335 Bq/m³ arasında değişmektedir. Bina içi ortalama radon yoğunluğu ise 107 Bq/m³ hesaplanmıştır. Üst katlar için hesaplanan bina içi ortalama radon yoğunluğu birinci katlar için hesaplanan değerinkinin yaklaşık yarısına eşittir. Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'e göre birinci katta oturan bir birey üst katlarda oturanlara göre yaklaşık 2

kat radon kaynaklı radyasyona maruz kalmaktadır. Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'e bakarak 1. katlarda oturanlar için akciğer kanserine yakalanma riskinin daha fazla olduğunu söyleyebiliriz.

5.4.4. Mevsimsel radon yoğunluğunun sinüs fonksiyonu ile fit edilmesi

Mevsimsel radon gazı yoğunluğu sinüs fonksiyonu ile yaklaşık olarak Denklem 5.3'deki gibi ifade edilebilir (Stojanovska, *et al.*, 2011).

$$\ln(C_{Rn})=y_0+a\sin(x-\phi) \quad (5.3)$$

Burada, C_{Rn} , bina içi radon yoğunluğu, x , kış için 0,0, ilkbahar için 0,25, diğer mevsimler için 0,25 artan değerleri olarak devam eder. y_0 , mevsimsel ölçümler için radon yoğunluğunun geometrik ortalaması veya serbest parametre olarak alınabilir. ϕ ise faz farkını ifade eder. Bilgisayar ortamına (Gnuplot) mevsimsel radon yoğunluğunun geometrik ortalamasının logaritması veri olarak girilmiştir (Bq/m^3). Bilgisayar ortamına girilen deneysel veriler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Dört mevsimde, evlerde ölçülen radon yoğunluğunun geometrik ortalamasının doğal logaritma değerleri.

Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
4,84	4,59	4,33	4,88

Gnuplot yardımı ile parametreler aşağıdaki gibi tahmin edilmiştir.

y_0 serbest parametre olarak alındığında:

$$a=4,65768\pm 0,07447$$

$$b=-0,294269\pm 0,1053$$

$$c=1,05898\pm 0,3579$$

y_0 sabit parametre olarak alındığında:

$$a=4,6576758555 \text{ (sabit parametre)}$$

$$b=-0,294269\pm 0,07442$$

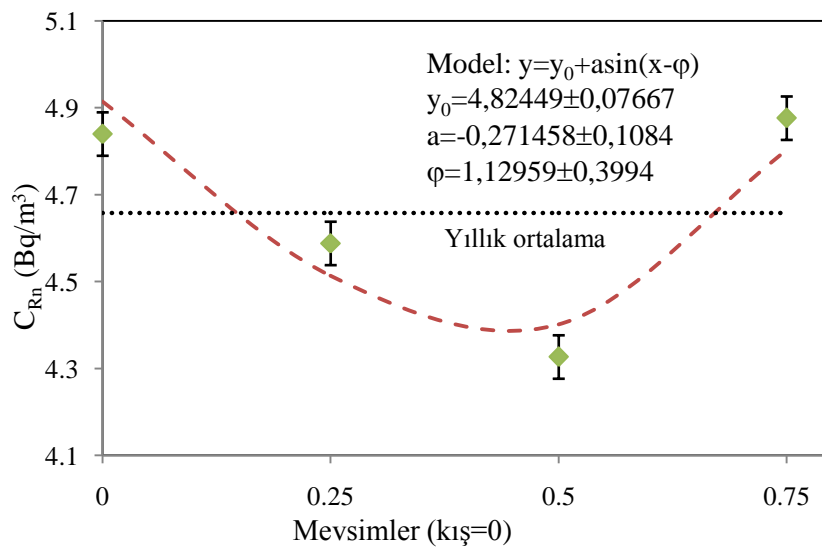
$$c=1,05898\pm 0,3579$$

Tahmin edilen parametrelere baktığımızda iki durumda da aynı değerler elde edilmiştir. Tahmin edilen mevsimsel radon yoğunluğunun logaritmik değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Dört mevsimde, evler için tahmin edilen radon yoğunluğunun geometrik ortalamasının doğal logaritma değerleri.

	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
Tahmin Edilen (Bq/m ³)	4,91	4,51	4,4	4,8
Deneysel değerler (Bq/m ³)	4,84	4,59	4,33	4,88
Deneysel değerlerin Ort. (Bq/m ³)	4,66	4,66	4,66	4,66

Şekil 5.11’de kırmızı renkli eğri (- - -) mevsimsel radon verileri ile Denklem 5.3’ün fit sonucunu verir. Şekil 5.11’de siyah renkli düz eğri (...) ise mevsimsel ölçümlere bağlı yıllık radon yoğunluğunun geometrik ortalamasının logaritmik değeridir. Şekil 5.11’de deneysel değerler (◇◇), verilerin doğal logaritmasının aritmetik ortalamasının standart hatası ile birlikte gösterilmiştir. Şekil 5.11’de x eksenini mevsimleri temsil eder, kış için 0,0 ilkbahar için 0,25 diğer mevsimler için 0,25 artarak devam eder.



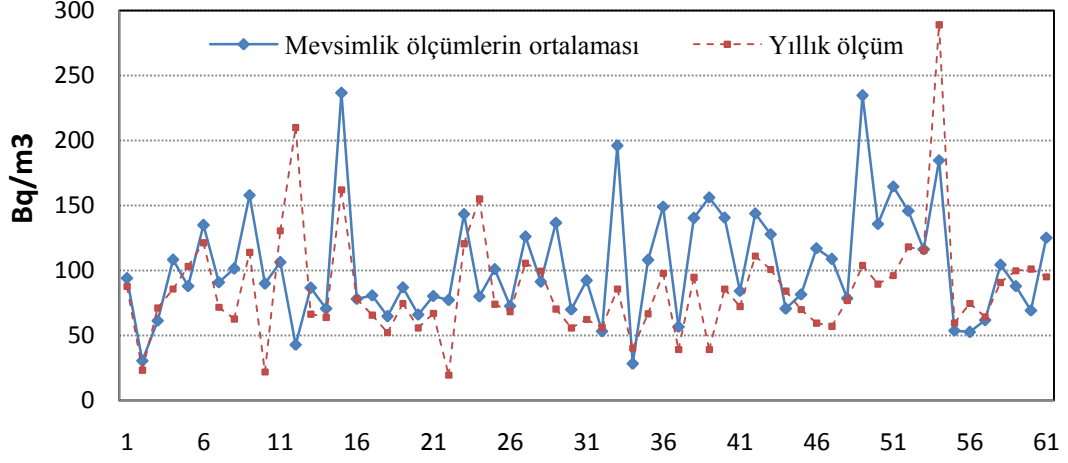
Şekil 5.11. Mevsimsel radon yoğunluğu verilerinin sinüs fonksiyonu ile fiti.

5.4.5. Mevsimsel ve yıllık radon gazı ölçümlerinin kıyaslanması

Bu bölümde mevsimsel ölçümlerle (kış, ilkbahar, yaz, sonbahar) yıllık ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. Eskişehir il merkezinde yapılan 61 adet 1 yıllık ölçümlerle 61 adet mevsimsel ölçüm (kış, ilkbahar, yaz, sonbahar) sonuçlarının ortalaması kıyaslanmıştır. Teorik olarak mevsimsel ölçüm sonuçlarının ortalaması (Bq/m^3) ile yıllık ölçüm sonuçlarının (Bq/m^3) aynı veya birbirine çok yakın olması gerekir. Mevsimsel verilerin aritmetik ortalaması ile yıllık ölçüm sonuçları Şekil 5.12’de görülmektedir. Şekil 5.12’ye bakıldığında mevsimsel ölçümlerin aritmetik ortalamasının yıllık ölçüm sonuçlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun oluşmasında pek çok sebep sayılabilir. Uzun dönem ölçümlerinde detektör üzerinde biriken tozlar önemli bir problem oluşturmaktadır. Zamanla detektör yüzeyinde bir toz tabakası oluşmakta, dolayısıyla bozunma ile oluşan alfa parçacığı detektör yerine tozlarla etkileşmekte ve detektör üzerinde kazanabilir iz oluşmamaktadır. Detektör üzerinde toz miktarı arttıkça oluşacak iz sayısı azalmaktadır. Diğer bir sorun ölçüm süresi uzadıkça detektörlerin alfa parçacıklarına gösterdiği duyarlılık azalmakta ve sonunda iz sayısı olması gerekenden daha az olmaktadır. Yıllık ölçümlerde daha az iz oluşmasının başka bir nedeni ise havadaki nem oranıdır. Havanın biraz soğuması ile havadaki nem yoğunlaşarak su damlacıklarına dönüşmekte detektör üzerinde bulunan su damlacıkları alfa parçacıkları ile etkileşerek gözlemlenebilir iz oluşumunu engellemektedir (Durrani, 1997). Başka bir görüşe göre sıcaklıkla birlikte havada bulunan nem ve oksijen detektörlerin duyarlılığını azaltmaktadır (Homer ve Miles, 1986). Açık detektörlerin direk güneş ışığına maruz kalması zamanla detektörün alfa parçacıklarına karşı duyarlılığını azaltmaktadır. Hatta kendi deneysel çalışmamızda cam önüne konulan ve doğrudan güneş ışığı alan detektörlerin kimyasal kazıma sürecinde tamamen soyulduğu gözlemlenmiştir.

5.4.6. Eskişehir için birey başına düşen etkin dozun hesaplanması

Radon gazı ve radon gazının bozunması ile oluşan ürün çekirdeklere bağlı doz ölçümleri doğrudan epitelyum dokusu üzerinden yapılmaktadır. Solunum yolunda hassas hücreler tarafından alınan doz miktarı, havada bulunan aerosol miktarı,



Şekil 5.12. Seçilen 61 ev için mevsimsel ölçüm sonuçlarının ortalaması ile yıllık ölçüm sonuçlarının kıyaslanması.

aerosollere tutunmayan radyonüklit oranı, solunum sıklığı, hedef hücrelerin solunum yolunda bulunduğu yerler, mukusların temizlenme oranı, solunum yoluna tutunmuş radyonüklit oranlarından tahmin edilebilir. Alfa parçacıklarından kaynaklanan doz miktarını etkileyen en önemli faktörler aerosollerin büyüklük dağılımı, aerosollere tutunmayan nüklitlerin oranı, solunum sıklığı ve hücre çekirdeğinin sitoplâzmadan uzaklığıdır. Radon atomlarının bozunması ile oluşan yüklü veya yüksüz ürün çekirdeklerin çapı 0,5 nm civarındadır. Oluşan bu çekirdekler havada toz taneciklerine veya su moleküllerine tutunarak 0,5-5 nm çapında boyutlara ulaşabilir. Ürün çekirdeklerin havadaki tozlara veya su moleküllerine tutunma oranı ortamın aerosol miktarına bağlı olarak değişir. Tozlu ve sigara dumanının olduğu ortamlarda tutunmamış kısım daha az, tutunmuş oran daha fazladır. Temiz hava ortamında tutunmamış oran daha yüksektir. Normal durumlarda havadaki partiküllere tutunmamış polonyum (^{218}Po) atomlarının tutunmamış kurşun (^{214}Pb) atomlarına oranı 0,1'dir. Ev içi aerosol özellikleri çoğu araştırma ile incelenmiştir. Ev içi ortalama aerosol boyutları 100 nm olsa da kaynak ve aktiviteye bağlı olarak boyutlar değişim gösterebilir. Evde kullanılan elektrik motoru, açık alev ve elektrikli ısıtıcı daha küçük boyutlarda aerosol oluşmasını sağlar. Sigara içilen yerlerde 30 nm boyutlarında aerosollar oluşabilir. Ortamdaki aerosol boyutları da log-normal dağılıma uyar. Bireylerin solunum sıklığı

doz ölçümünde önemli bir faktör oluşturmaktadır çünkü solunum sıklığı aynı zamanda akciğerlere alınan hava miktarını belirler. Solunum sıklığı alınan doz miktarını 2 kata kadar değiştirebilir. Solunum sıklığı bireylerin aktivitesine göre değişim gösterir. Yetişkin erkeklerin solunum sıklığı dinlenme zamanında (8 saat) tahmini $0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, hafif aktivitelerde $1,20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ olabilir. Yetişkin kadınlarda dinlenme süresi erkeklerden % 20, hafif aktiviteler ise % 5 daha kısadır. Solunum sıklığı verileri UNSCEAR 2000 raporunda tekrar güncellenmiş, erkek ve kadınlar için solunum sıklığı sırası ile $22,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ve $17,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bronşların epitelyum hücrelerinde biriken aerosol miktarını bulmak için cerrahi yöntemle alınan parçalar incelenir. Burun yolu ile alınan, epitelyum dokuya yapışmamış çekirdek oranı ağız yolu ile alınandan % 15 daha fazladır. Burun yolu ile alınan, epitelyum dokuya yapışmış çekirdek yoğunluğu durgun ve durgun olmayan hava akımında her yaş için yaklaşık aynıdır. 200 nm 'nin altındaki çekirdekler difüzyonla, daha büyük çaplı çekirdekler ise birbirini sıkıştırarak epitel dokuya yapışıp birikebilir. Üst solunum yollarında biriken nüklitleri bulmak için deneysel formül (Cohen, *et al.*, 1990) türetilmiştir. En son fiziksel ve biyolojik parametrelere bağlı bilgiler kullanılarak alınan doz miktarı eş denge yoğunluğu (EEC) biriminde hesaplanır. Aerosol boyutları tek boyutta olmadığı gibi emsalsiz de değildir. Alınan doz miktarını, maruz kalınan birim miktarına bağlı olarak ortalama aerosol boyutlarına ve geometrik standart sapma (σ_g) miktarına bağlı olarak hesaplamak uygun olur. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre solunum yollarında bulunan ana epitelyum hücreleri tarafından alınan doz miktarları $5\text{-}25 \text{ nGy}$ arasında değişmektedir. Epitelyum hücreleri tarafından alınan ortalama doz ise 9 nGy olarak tahmin edilmiştir (ortalama durum için, solunum oranı $0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, aerosol ortanca çap değeri $100\text{-}150 \text{ nm}$, yapışmayan oran $0,05$). Bronşlar ve bronşlar arası boşluk için ağırlık faktörü $0,08$, kalite faktörü 20 alınmıştır. Birim EEC başına alınan etkin doz miktarı 15 nSv olarak hesaplanmıştır.

ICRP havada bulunan aerosollerle alınan, akciğer etkin doz miktarını hesaplamak için ayrıntılı bir model geliştirmiştir. Bunun yanında solunum sistemi ve psikolojik davranışlar basitçe ele alınmıştır. Bu model doz ölçümünde henüz önerilmemekte olup deneyle teori arasında uyumsuzluklar bulunmaktadır. Bu modelde ölçümle ilgili aerosolların boyutlarını, yapışan ve yapışmayan oranını hesaplamada zorluklar

bulunmaktadır. Bu model şu anda biyolojik ve fiziksel parametrelerin akciğer dozuna katkısını hesaplamak için kullanılır.

Akciğer dokusuna yapışan ^{222}Rn ürün çekirdeklerinin doz etkileri UNSCEAR tarafından (2000) hazırlanan “annexb” raporunda Tablo 26’da karşılaştırılmıştır. Parametre değerlerindeki farklılıklar açıkça görülmektedir. Hedef hücrelerin derinliği, akciğer hava yollarının karakteristik özellikleri, yapışan çekirdeklerin miktar ölçümleri doz ölçümündeki verimliliği artırmaktadır. Doz ölçüm yöntemlerine alternatif bir yöntem ICRP tarafından geliştirilmiştir. ICRP yapılan epidemiyolojik çalışmalar neticesinde, ölümcül vakalarda alınan doz miktarından radon gazından kaynaklanan doz miktarını tahmin etmeye çalışılır. Maruz kalınan radon miktarından dolayı sayısal olarak ölüm oluşma katsayısı 1 mJ.h.m^{-3} başına 8×10^{-5} ’dir. Bu değer maden işçileri üzerinde, radyasyona maruz kalma süresine göre belirlenmiştir. Madenlerde maruz kalınan radyasyon miktarı evlerdekinden farklı olsa da farklılıklar telafi edilecek seviyededir. Örneğin madenlerde aerosollere tutunmayan nükleit miktarı daha az, solunum sıklığı evlerdekinden daha fazladır. Burada düzeltme katsayısı alınan etkin doz başına oluşan ölüm oranları ile ilgilidir. Düzeltme katsayısı çalışanlar için milisievert başına $5,6 \times 10^{-5}$, diğer insanlar için $7,3 \times 10^{-5}$ ’dir. Dönüştürme kuralı çalışanlar için $8 \times 10^{-5} \div 5,6 \times 10^{-5} = 1,43 \text{ mSv}$, genel halk için ise $8 \times 10^{-5} \div 7,3 \times 10^{-5} = 1,1 \text{ mSv}$ olarak elde edilir. ICRP tarafından uyarlanmış değerler sırası ile 1,4 ve 1,1 mSv’dir.

Radon için doz dönüşüm faktörünün oranları yapılan olay endeksli araştırmalardan ve fiziksel doz ölçüm yöntemlerinden elde edilmiştir. Elde edilen doz değerleri 6-15 nSv arasında değişir. UNSCEAR 1993 raporunda doz değeri 9 nSv olarak alınmıştır. Yer altı maden işçileri üzerinde yeni yapılan olay endeksli 11 çalışmada maruz kalınan doz başına risk faktörlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan araştırmaya göre daha yüksek doz dönüşüm faktörüne gerek duyulmaktadır. Halka yönelik yapılan olay endeksi araştırmalarda henüz doz dönüşüm faktörünü gerektirecek yeterli deliller bulunmamaktadır. Daha önce yayınlanan raporda verilen 9 nSv’lik doz dönüşüm faktörü ortalama etkin doz hesabında şu anda da kullanılabilir durumdadır. Ev içi radon yoğunluğu için denge faktörü 0,4, ev dışı radon yoğunluğu için 0,6 olarak alınabilir. Ev içinde bulunma faktörü 0,8, ev dışında bulunma faktörü ise 0,2 alınır. Ev içi radon yoğunluğunun hesaplanmasında genel olarak radon yoğunluğunun aritmetik

ortalaması alınır. Kişi başına alınan etkin dozun (ED) hesaplanması için Denklem 5.4 kullanılır.

$$ED \text{ (mSv.y}^{-1}\text{)} = A_C \text{ (}^{222}\text{Rn)} \cdot D_f \cdot Q_f \cdot E_f \cdot T \quad (5.4)$$

Burada,

A_C , ev içi radon yoğunluğunun (Bq/m^3) aritmetik ortalaması,

D_f , doz dönüşüm katsayısı (her 1 Bq.m^{-3} için 9 nSv.h^{-1}),

Q_f , ev içinde bulunma faktörü (0,8),

E_f , ev içi radon yoğunluğunun denge faktörü,

T ise radyasyona maruz kalma süresidir (h.y^{-1}). Radon gazından dolayı Eskişehir için alınan ev içi etkin doz miktarı denklem 5.4 yardımı ile:

$$E_{iç} \text{ (mSv.y}^{-1}\text{)} = 127 \text{ Bq/m}^{-3} \times 9 \text{ nSv.h}^{-1} \text{ (Bq.h/m}^3\text{)}^{-1} \times 0,8 \times 0,4 \times 8760 \text{ h.y}^{-1} = 3,21 \text{ mSv.y}^{-1}.$$

Radon gazından dolayı Eskişehir için alınan ev dışı etkin doz miktarı:

$$E_{dış} \text{ (mSv.y}^{-1}\text{)} = 4 \text{ Bq/m}^{-3} \times 9 \text{ nSv.h}^{-1} \text{ (Bq.h/m}^3\text{)}^{-1} \times 0,2 \times 0,6 \times 8760 \text{ h.y}^{-1} = 0,037 \text{ mSv.y}^{-1}.$$

Solumla alınan radon gazının kana karışması sonucu Eskişehir için birey başına alınan ev içi ve ev dışı radon yoğunluğundan kaynaklanan etkin doz miktarı:

$$E_{iç} \text{ (mSv.y}^{-1}\text{)} = 127 \text{ Bq/m}^{-3} \times 0,17 \text{ nSv.h}^{-1} \text{ (Bq.h/m}^3\text{)}^{-1} \times 0,8 \times 8760 \text{ h.y}^{-1} = 0,15 \text{ mSv.y}^{-1}.$$

$$E_{dış} \text{ (mSv.y}^{-1}\text{)} = 4 \text{ Bq/m}^{-3} \times 0,17 \text{ nSv.h}^{-1} \text{ (Bq.h/m}^3\text{)}^{-1} \times 0,8 \times 8760 \text{ h.y}^{-1} = 0,048 \text{ mSv.y}^{-1}.$$

Yukarıda hesaplanan değerler toplanırsa, Eskişehir il merkezinde yapılan 4 mevsimlik ev içi radon gazı ölçümlerinde radon ve bozunma ürünlerinden kaynaklanan etkin doz miktarı ortalama $3,445 \text{ mSv.y}^{-1}$ bulunur. Dünya genelinde yapılan ölçüm sonuçlarına göre radon gazına bağlı kişi başına alınan etkin doz miktarı ortalama $1,15 \text{ mSv.y}^{-1}$ olarak hesaplanmış olup kişi başına alınan etkin doz miktarı $0,5 \text{ mSv.y}^{-1}$ ile $3,5 \text{ mSv.y}^{-1}$ arasında değişmektedir. Uluslar Arası Radyasyondan Korunma Komitesi (IRPB) $3-10 \text{ mSv.y}^{-1}$ arası değerleri eylem seviyesi olarak belirlemiştir. Eskişehir'de yapılan radon gazı ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan etkin doz değeri uluslar arası eylem seviyesinin en alt değerlerinde bulunmaktadır.

Kozmik ışınlardan kaynaklanan dünya geneli kişi başına alınan etkin doz miktarı ortalama $380 \mu\text{Sv.y}^{-1}$, kozmik ışınlarla bağlı ^{14}C 'den $12 \mu\text{Sv.y}^{-1}$, ^{22}Na 'den $0,15$

$\mu\text{Sv.y}^{-1}$, ^3H 'den $0,01 \mu\text{Sv.y}^{-1}$, ^7Be 'den ise $0,03 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K 'ın doğal bozunma serisinden karasal radyasyona maruz kalınmaktadır. Potasyum canlı organizmalar için çok önemli bir mineraldir. ^{40}K doğal olarak bulunup radyoaktiftir. Küresel olarak kişi başına ^{40}K 'dan alınan ortalama etkin doz miktarı yetişkinler için $165 \mu\text{Sv.y}^{-1}$, çocuklar için ise $185 \mu\text{Sv.y}^{-1}$ hesaplanmıştır. Uranyum, toryum ve potasyumdan kaynaklanan kişi başına alınan toplam etkin doz miktarı $310 \mu\text{Sv.y}^{-1}$. Küresel gama radyasyonundan dolayı kişi başına alınan ev içi ve ev dışı etkin doz miktarı $0,48 \text{mSv.y}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Kişi başına alınan radyasyon dozlarının hepsini düşündüğümüzde radon gazından kaynaklanan miktar diğer hepsinden daha fazladır (UNSCEAR, 2000).

5.4.7. Evlerdeki radon yoğunluğunun bağlı hatası

Katı hal iz detektörlerinin hazırlanmasından binalara yerleştirilmesine ve analiz sürecinin sonuna kadar bütün aşamalarda pek çok hata kaynağı bulunur. Radon gazı yoğunluk ölçümü, en başından en sonuna kadar uzman kişilerce yürütülmelidir. Aksi takdirde insan kaynaklı hatalar artar. Deney için kesilen film boyutları, filmlerin paketlenmesi, evlere yerleştirilmesi, zamanında toplanması, kimyasal analiz için uygun ve orantılı çözeltilerin ayarlanması, kazıma sürecinde zamanın ve sıcaklığın ayarlanması, durulama ve kurutma işlemlerinin itina ile yapılması, izlerin mikroskopta sayılması, gerçek izle film kusurlarının ayırt edilebilir olması, verilerin analizi uzmanlık gerektiren bir iştir. Bu süreçlerde gerekli itina gösterilmezse pek çok hata kaynağı ortaya çıkar. Kullanılan filmlerden, ısı banyosundan, kullanılan kimyasallardan ve diğer malzemelerden kaynaklanan hata kaynakları da bulunur. Kendi deneysel çalışmamızda filmlerin hazırlanmasından analiz kısmına kadar bütün süreçler için önceden uygulanmış metotlar çerçevesinde ayrı ayrı metot hazırlanmıştır. Yaklaşık 2 yıldan fazla süren deney süresince önceden hazırlanan metotlara uyulmaya çalışılmış, her bir ölçüm döneminde her bir film seti için aynı yöntemler uygulanmıştır. Filmler $1,5 \text{ cm} \times 1,5 \text{ cm}$ ebatlarında hazırlanmıştır; ancak film boyutlarında gözle fark edilemeyecek farklılıklar oluşabilir. Filmlerin yerleştirilmesi ve toplanması arasındaki sürede evler arasında az da olsa zaman farklılığı oluşmuştur. Filmlerin evlerde yükseklik olarak biraz aşağıda veya yukarıda olması oluşacak iz sayısını etkilemektedir.

Dolayısı ile filmin oda içindeki yüksekliğinden kaynaklanan hatalar da bulunmaktadır. Filmlerin güneş alması, odanın nemli olması, havalandırmaya uzaklığı, sigara içilip içilmemesi oluşacak iz sayısını etkilemekte bu da farklı hata kaynakları oluşturmaktadır. Film yüzeyinde zamanla biriken toz tabakası, filmin zamanla duyarlılığını kaybetmesi, önemli hata kaynaklarını oluşturmaktadır. Kendi deneysel çalışmamızda kimyasal kazıma sürecinde % 10'luk NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Çözelti laboratuarda hazırlandığı için her bir çözelti beherinde katı NaOH kristallerinde miligram, suda mililitre bazında farklılıklar oluşabilmektedir. Çözeltinin biraz seyreltik biraz derişik olması farklı bir hata kaynağı oluşturur. İzlerin mikroskop altında sayım işlemi önemli bir hata kaynağı oluşturur. İzleri sayan kişinin uzman olması her zaman istenen durumdur. Ancak bu çalışmalar doktora veya yüksek lisans tezleri için yapılıyorsa sayan kişiler genel olarak öğrencilerden oluşmaktadır. Bu durum iz sayımından kaynaklanan hata kaynağını oluşturur. Bu çalışmada sadece iz sayımından kaynaklanan hatalar incelenecektir. İz sayımında en önemli nokta gerçek iz ile film kusurlarının ayırt edilebilmesidir. Gerçek iz bir iğne batması şeklinde ve parlak olurken film kusurları düzensiz şekillerde ve genel olarak soluk renklidir. İz sayısının çok olmasına bağlı olarak izler üst üste gelebilir ve olması gerekenden daha az iz sayılabilir. Kendi deneysel çalışmamızda film üzerindeki iz yoğunluğu az olduğu için üst üste binme nadiren gözlemlenmiştir.

Bu bölümde arka fon filmleri, kalibrasyon filmleri ve aynı evde aynı yere yerleştirilen filmler için bağıl hata hesabı verilecektir. Bu amaç için 12 adet 1 gün süreli yerleştirilen kalibrasyon filmi, 12 adet radyasyona maruz kalmamış arka fon filmi ve 12 adet aynı eve 3 ay süreli yerleştirilmiş filmler kullanılmıştır. Burada Planinić ve arkadaşlarının (1993) çalışmasından yararlanılmıştır. Bu çalışma daha önce Altınsöz (2012) tarafından Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde Meşelik yerleşke içi binalarda radon gazı ölçümlerinde bağıl hata hesabı için kullanılmıştır. Burada tekrar tüm metot çıkarımı yapılmayacaktır. Evlerdeki radon yoğunluğu Denklem 5.5 ile bulunur:

$$c = K(\rho - \rho_b) \quad (5.5)$$

Burada, K , kalibrasyon faktörü, ρ , 3 ay boyunca evlerde oluşan iz sayısı, ρ_b ise arka fon iz sayısıdır. Kalibrasyon faktörünün hesaplanması Bölüm 5.3'de ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Matematiksel işlemler, ilgili metot (Planinić, *et al.*, 1993) çerçevesinde yapılırsa bağıl hata Denklem 5.6'daki gibi elde edilir:

$$V_c^2 = \frac{\sigma_K^2}{K^2} + \frac{\sigma_\rho^2}{(\rho - \rho_b)^2} + \frac{\sigma_{\rho_b}^2}{(\rho - \rho_b)^2} \quad (5.6)$$

Burada σ_K, σ_ρ ve σ_{ρ_b} sırası ile her bir kalibrasyon filmi için hesaplanan kalibrasyon sabiti, evlere yerleştirilen filmlerin iz sayısı, radyasyona maruz bırakılmamış izler için standart sapmalardır.

Çizelge 5.8. Bağlı hata hesabı için belirlenen filmlerin iz sayısı ve hesaplanan kalibrasyon sabitleri.

Kalibrasyon		Arka Fon	Ev
İz Sayısı	Kalibrasyon Sabiti	İz Sayısı (İz/cm ²)	İz Sayısı (İz/cm ²)
378	0,09406	24	793
312	0,11396	24	780
380	0,09357	24	800
436	0,08155	25	533
374	0,09507	25	506
293	0,12135	26	673
389	0,09140	27	666
312	0,11396	29	540
285	0,12476	29	713
285	0,12476	29	693
318	0,11181	30	586
391	0,09093	30	746

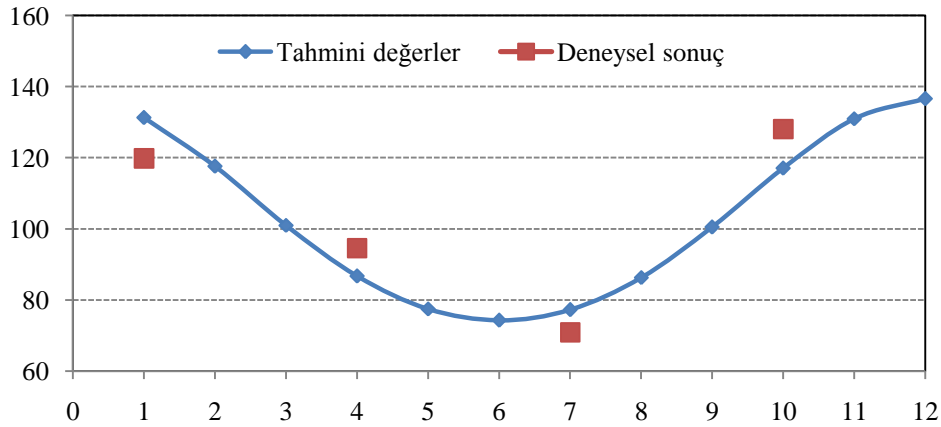
Çizelge 5.8'de bağlı hata hesabı için belirlenen filmlerin iz sayısı ve hesaplanan kalibrasyon sabitleri verilmiştir. Çizelge 5.8'deki verilerin istatistiksel analizi yapılırsa $\sigma_K=0,015183$, $K=0,10476$, $\sigma_\rho=105,2784$, $\rho=669,08$, $\sigma_{\rho_b}=2,443296$, $\rho_b=26,83$ değerleri elde edilir. Burada, K, her bir kalibrasyon filmi için hesaplanan kalibrasyon faktörlerinin aritmetik ortalaması, ρ , evlere yerleştirilen filmlerdeki izlerin aritmetik ortalaması, ρ_b ise arka fon izlerinin aritmetik ortalamasıdır. Bu veriler Denklem 5.6'da yerine konulursa bağlı hata % 21,88 olarak hesaplanır.

5.4.8. Dört dönemlik veriler ile mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması

Mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanabilmesi için normalde 12 dönemlik ölçüm yapmak gerekir ancak bilinen bir şey var ki ev içi radon yoğunluğu mevsimsel farklılıklar (kışın artan, yazın azalan) gösterir ve mevsimsel (kış, ilkbahar, yaz, sonbahar) ölçüm sonuçları sinüs dağılımına uyum gösterir. Elde bulunan 4 dönemlik deneysel veriler Denklem 5.7'deki fonksiyon yardımı ile fit edilip eksik olan 8 dönemlik değerler yaklaşık tahmin edilebilir (Stojanovska, *et al.*, 2011).

$$\ln(C_{Rn}) = y_0 + a \sin(\omega(x - \varphi)) \quad (5.7)$$

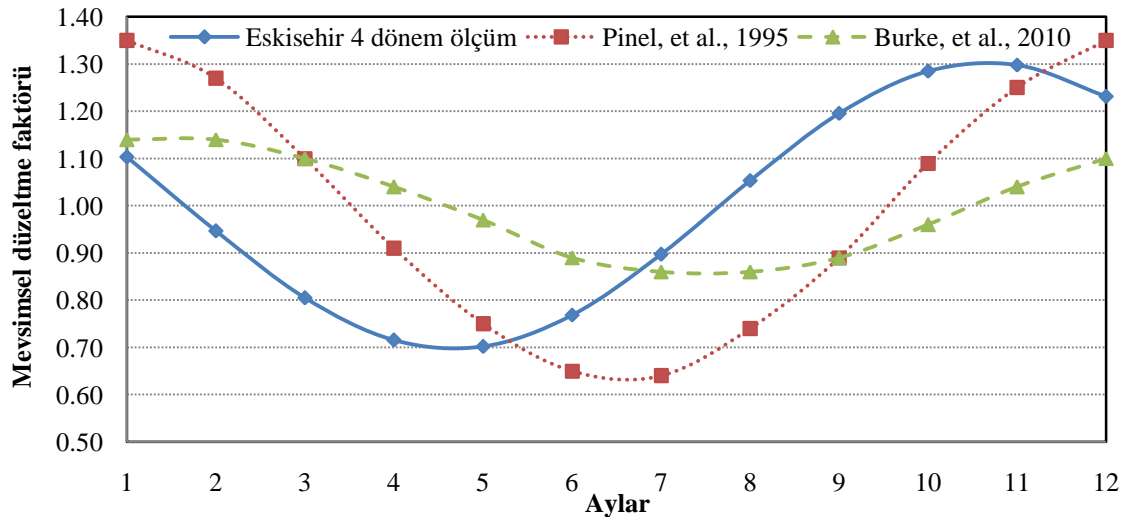
Eksik verilerin tahmin edilmesinde program olarak Linux tabanında çalışan GNUPLOT kullanılmıştır. Programa veri olarak 4 dönemlik radon değerlerinin geometrik ortalaması (d değeri) girilmiştir. Programa veriler girildikten sonra y_0 , a ve φ değerleri sırası ile 4,6125, -0,304508 ve 1,05572 olarak elde edilmiştir. Daha sonra Denklem 5.7 ile eksik 8 dönemin değerleri kısa bir Matlab yazılımı ile elde edilmiştir. Bu kısımda mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması için gerekli 12 veriden 4 tanesi deneysel olarak hesaplanan, 8 tanesi ise tahmin edilen değerlerden oluşmaktadır. Elde edilen verilere bağlı olarak Şekil 5.13, Çizelge 5.9 ve Şekil 5.14 oluşturulmuştur.



Şekil 5.13. Dört dönemlik radon yoğunluğu verilerinin sinüzoidal fonksiyon ile uyumu.

Çizelge 5.9. Dört dönemlik radon gazı verileri kullanılarak 12 dönem için hesaplanan mevsimsel d değerleri, m değerleri, f değerleri ile İngiltere ve İrlanda'nın f değerleri.

Dönemler	Eskişehir			İngiltere (Pinel, et al., 1995)	İrlanda (Burke, et al., 2010)
	d	m	f	f	f
Ocak	119,82	37,78	1,10	1,35	1,14
Şubat	117,57	31,96	0,95	1,27	1,14
Mart	101,00	26,67	0,80	1,10	1,10
Nisan	94,59	23,33	0,72	0,91	1,04
Mayıs	77,49	22,84	0,70	0,75	0,97
Haziran	74,29	25,32	0,77	0,65	0,89
Temmuz	70,93	30,11	0,90	0,64	0,86
Ağustos	86,31	35,93	1,05	0,74	0,86
Eylül	100,47	41,21	1,20	0,89	0,89
Ekim	128,09	45,56	1,28	1,09	0,96
Kasım	130,96	45,04	1,30	1,25	1,04
Aralık	136,59	42,56	1,23	1,35	1,10



Şekil 5.14. Eskişehir il merkezinde 4 dönemlik radon gazı ölçümleri ile hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörleri ile İngiltere ve İrlanda'nın mevsimsel düzeltme faktörlerinin karşılaştırılması.

Mevsimsel düzeltme faktörü Pinel (1995) tarafından geliştirilen metoda göre hesaplanmıştır. Hesaplamalar metot çerçevesinde yazılan Matlab programı ile otomatik olarak yapılmıştır. Metot çerçevesinde Eskişehir arka fon radyasyon değeri yaklaşık olarak 4 Bq/m^3 alınmıştır. Şekil 5.13'de 4 dönemlik radon yoğunluğu verilerine bağlı olarak 8 dönemlik eksik verilerin tahmin edildiği fit grafiği verilmiştir. Şekil 5.13'e bakıldığında kullanılan fonksiyon deneysel veriler için en uyumlu tahmini yapmıştır. Şekil 5.14'de ise tahmini ve deneysel verilere bağlı olarak elde edilen mevsimsel düzeltme faktörlerinin aylara göre grafiği çizilmiştir. Eskişehir için hesaplanan mevsimsel düzeltme grafik eğrisi mevsimsel değişime uymakta olup havalar ısınca azalmakta soğuyunca artmaktadır.

Çizelge 5.9'da Eskişehir il merkezi için hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörleri ile İngiltere ve İrlanda'nın mevsimsel düzeltme faktörleri birlikte verilmiştir. Çizelge 5.9'a bakıldığında Eskişehir için hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörlerinden Mayıs ayı değeri en düşüktür. İngiltere için hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörlerinde Haziran değeri en düşük, İrlanda için hesaplanan faktörlerden Temmuz ve Ağustos değerleri en düşüktür. Bu farklılıklar iklimsel farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Eskişehir için hesaplanan veriler İrlanda ve İngiltere için hesaplanan verilerle paralellik göstermektedir. Ölçümlerimizde sonbahar (2011) ayının ortalama radon yoğunluğu ve mevsimsel düzeltme faktörleri geçen senenin (2010) kış aylarına göre biraz yüksek çıkmıştır. Bu farklılığın oluşmasında iklim şartları belirleyici olmaktadır. Bu farklılığın oluşmasında ikinci bir etken ise Eskişehir'de merkezi ısıtmaya bağlı evlerde kaloriferlerin 15 Ekimden önce yakılmasının yasak olmasıdır. Bu süreçte evler soğuk olduğu için havalandırma az yapılmakta buna bağlı olarak ev içi radon yoğunluğu yüksek çıkmaktadır.

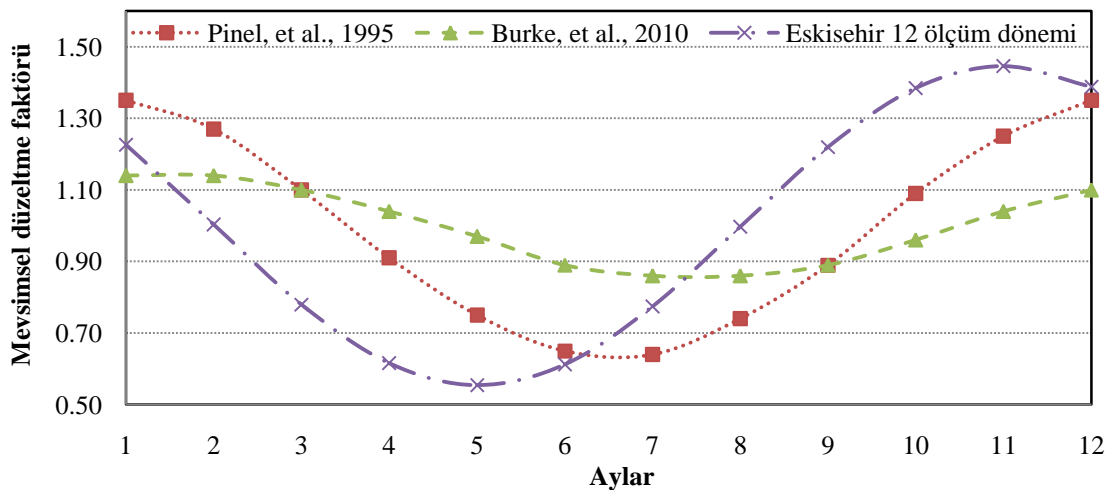
5.4.9. 12 dönemlik ölçümlere bağlı olarak mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması

Bu amaç için 2010-2012 yılları arasında Eskişehir il merkezinde evlerde 12 dönemlik ölçümler yapılmıştır. Bu süreçte ölçüm yapılan her bir eve her ayın 10 ile 15. günleri arasında deney bardakları yerleştirilmiş 3 ayın sonunda toplanarak analiz edilmiştir. Her bir dönemin ölçüm sonucu 3 aylık zaman diliminde ortaya gelen aya tahsis edilmiştir. Örneğin haziran, temmuz ve ağustos ölçüm döneminde elde edilen

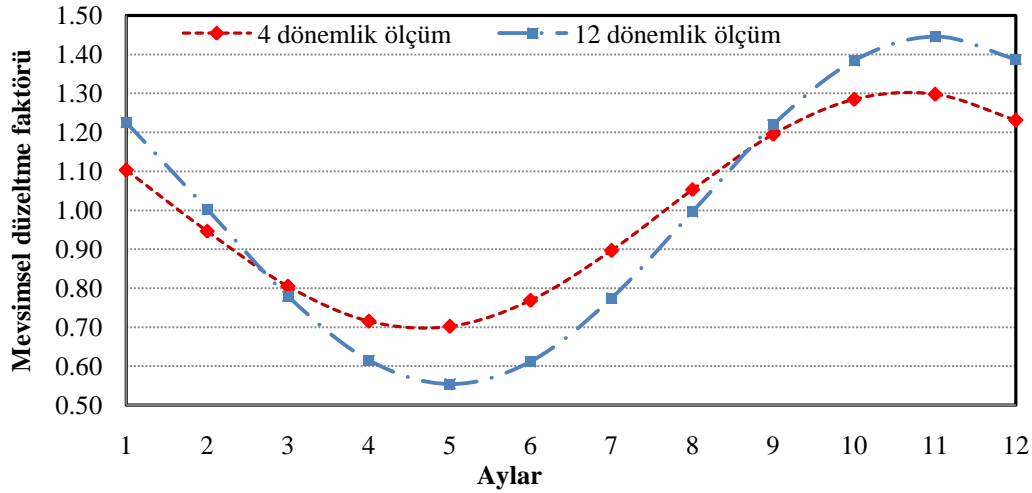
sonuç temmuz ayına tahsis edilmiştir. 12 dönemlik ölçüm sonucunda her bir ayın verisi elde edilmiştir. Burada mevsimsel düzeltme faktörlerinin hesaplanmasında 2010- 2012 yılları arasında il merkezinde yapılan 825 adet ölçüm kullanılmıştır.

Çizelge 5.10. Eskişehir il merkezinde 12 dönemlik bina içi radon yoğunluğu ölçümlerine bağlı olarak hesaplanan d, m, f ve geometrik standart hata değerleri.

	Ev sayısı	d	m	f	Geo. Std. Hata
Ocak	169	119,59	37,11	1,23	0,13638
Şubat	29	133,68	29,85	1,00	0,37908
Mart	29	124,68	22,55	0,78	0,21494
Nisan	174	95,62	17,18	0,62	0,14982
Mayıs	34	64,74	15,18	0,55	0,38453
Haziran	34	48,03	17,08	0,61	0,28955
Temmuz	151	63,58	22,37	0,77	0,15685
Ağustos	33	50,42	29,63	1,00	0,32870
Eylül	32	72,09	36,93	1,22	0,31386
Ekim	91	113,36	42,30	1,38	0,24079
Kasım	22	123,97	44,30	1,45	0,36494
Aralık	24	126,59	42,40	1,39	0,41308



Şekil 5.15. Eskişehir il merkezinde 12 dönemlik radon yoğunluğu ölçümleri ile hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörlerinin, İngiltere ve İrlanda mevsimsel düzeltme faktörleri ile kıyaslanması.



Şekil 5.16. Eskişehir il merkezinde 4 dönem ve 12 dönem bina içi radon yoğunluğu verileri ile hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörlerinin kıyaslanması.

Şekil 5.15’de 12 dönemlik ölçümlere bağlı mevsimsel düzeltme faktörleri İngiltere ve İrlanda için hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörleri ile birlikte verilmiştir. Veriler aylara göre paralellik göstermekte olup aradaki farklılıklar mevsimsel etkilerden kaynaklanmaktadır. Çizelge 5.10’da Eskişehir il merkezinde 4 dönemlik ve 12 dönemlik radon gazı ölçümlerine bağlı elde edilen veriler bir arada verilmiştir. Veriler aylara göre paralellik gösterse de arada sayısal olarak belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 5.10’da verilen 4 dönem ve 12 dönem mevsimsel düzeltme faktörlerinin grafikleri Şekil 5.16’da birlikte çizilmiştir. Grafikler aylara göre uyumlu bir değişim göstermekte olup sadece 3. ve 9. ayların değerleri çakışmaktadır. Bu çakışma, 4 dönem için yapılan hesaplamalarda kullanılan yüksek sayıda verinin 12 dönemlik ölçümlere bağlı hesaplamalarda da kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanmasında 4 dönemlik ölçümlere bağlı kalmak yanlış tahminler yapılmasına sebep olabilir dolayısı ile mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması için 12 dönemlik ölçüm yapmak gerekmektedir.

5.5. Eskişehir İli Merkezinde Karasal Radyasyonun Ölçülmesi

5.5.1. Karasal radyasyon

İnsanlar, toprağın yapısında doğal olarak bulunan uranyum (^{238}U) ve toryum (^{232}Th) doğal bozunma serisi çekirdekleri ile radyoaktif potasyumdan (^{40}K) kaynaklanan

radyasyona maruz kalmaktadır. Doğal olarak bulunan radyoaktif çekirdekler (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) farklı ortamlarda (insan vücudu dâhil) farklı oranlarda bulunur. Bu radyoaktif çekirdeklerden yarı ömrü dünyanın yaşına yakın olanlar (uranyum, toryum) önemli miktardadır. İnsan vücudu bu doğal çekirdeklerden daha çok gama ışımına maruz kalmaktadır. Küresel doğal radyasyonun ana kaynağı ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K çekirdekleridir. Bu çekirdekler ve doğal bozunma zincirinden üretilen diğer bazı ürün çekirdekler insan vücudunda da bulunur, organ ve dokularda alfa, beta ve gama ışınları yapar. ^{235}U ve doğal bozunma zinciri ile oluşan ürün çekirdekleri ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm , ve ^{176}Lu doğada az miktarda bulunur. Bu serideki çekirdeklerin insanlar üzerindeki doz katkısı çok düşüktür.

Dünya genelinde bazı bölgelerde, insanlar karasal radyasyondan kaynaklanan yüksek dozlara maruz kalmaktadır. Bu durum uranyum, toryum ve potasyum minerallerinin toprakta daha çok olmasından kaynaklanır. Bu tip yerler dünyada fazla değildir. Bu gibi yerlerde açık havada maruz kalınan doz değeri saatte birkaç yüz nGy olabilir. Bu bölgelerdeki çok yüksek doz oranlarının farklı sebepleri bulunmaktadır. Örneğin bu tip bölgelerde bulunan monazit kayalıkları yüksek oranda toryum bulundurmaktadır. Dünya’da monazit kayalıklarının olduğu yerler Brezilya’da Guarapari bölgesi, Çin’de Yangiang bölgesi, Hindistan’da Kerala ve Madras bölgesi, Mısır’da Nil deltası örnek olarak verilebilir. Bazı bölgeler ise volkanik topraktan oluşmaktadır, bu bölgelerde de yüksek miktarda doğal radyasyon oluşmaktadır. Bu bölgeler Brezilya’da Minas Gerais, Pasifik okyanusunda Niue adası ve İtalya’da bulunmaktadır. Bazı bölgelerde bulunan granit kayalar ve şistli toprak yapısı yüksek oranda uranyum ile birlikte radyum içerir. İran’da bulunan Ramsar ve Mahallat gibi bölgelerde yüksek miktarda radyum yoğunluğu bulunmaktadır. Radyumun bu bölgelere su yardımı ile gelip biriktiği düşünülmektedir (UNSCEAR, 2000).

Yüksek miktarda arka fon radyasyonu olan bölgelerde doz değerleri zamanla değişim gösterebilir. Yağmurun ve rüzgârın etkisi toprak yapısında değişimlere yol açabilir, bu alanların şehirleşmesi ile radyasyon değeri de normal değerlere inebilir.

En düşük karasal radyasyon doz değerleri Kıbrıs, İzlanda, Mısır, İrlanda, Burunei ve Büyük Britanya’da görülmüştür. Bu ülkelerde ölçülen doz değerleri 40 nG.h^{-1} dan daha düşüktür. En yüksek değerler Avustralya, Malezya ve Portekiz’de ölçülmüştür. Bu ülkelerde ölçülen doz değerleri 80 nG.h^{-1} dan daha yüksektir. Toprakta ölçülen doz

miktarları ile açık havada ölçülen doz miktarları uyum göstermektedir. Lüksemburg, İsveç gibi bazı ülkelerde topraktaki ^{40}K miktarı çok çıkmıştır. Suriye, Arnavutluk gibi ülkelerde ise topraktaki bütün nükleer çekirdeklerin doz oranı düşük çıkmıştır. İrlanda'da açık hava radyasyon değerleri oldukça düşük seviyede ölçülmüştür. Son 50 yılda açık havada doğrudan doz ölçümleri pek çok ülkede yapılmaktadır. Yapılan ölçümler dünyanın % 70'ini kapsamaktadır. Küresel olarak kişi başına düşen doz miktarı revize edilerek 57 nGy.h^{-1} 'dan 59 nGy.h^{-1} 'a çıkarılmıştır. Kişi başına düşen doz miktarı 18 ile 93 nGy.h^{-1} arasında değişmektedir (UNSCEAR, 2000). Açık havada kişi başına maruz kalınan doz miktarı 10 ile 200 nGy.h^{-1} arasında değişmektedir.

Karasal gama ışını, kararsız çekirdeklerden genel olarak alfa veya beta ışımasının arkasından yayınlanır çünkü çekirdek bir alfa veya bir beta ışıması yaptıktan sonra genellikle kararlı bir durumda olmaz. Fazla kalan enerji gama ışıması olarak ortama verilir. Gama ışınlarının ortama giricilik kabiliyetleri daha fazladır. Atomik spektrumlarında olduğu gibi, çekirdeklerin gama spektrumları da keskin çizgilerden ibarettir; dolayısı ile bir çekirdek farklı enerji seviyelerine sahiptir. Yayınlanan gama ışınının enerjisi Denklem 5.8 yardımı ile basitçe gösterilir.

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_s \quad (5.8)$$

Burada, ΔE , gama ışınının enerjisi, E_i , çekirdeğin ilk enerji durumu, E_s , çekirdeğin gama ışını yayınlandıktan sonraki enerji durumudur.

Gama ışınları madde ile üç farklı etkileşime girer bunlar fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Bu etkileşimlerin her birinde gama ışını enerjisini ortama (elektronlara) aktarmış olur. Bu etkileşimlerden yararlanarak gama ışınlarının doz miktarı hesaplanabilir.

Toprağın yapısında bulunan radyonüklitlerden ^{40}K doğal potasyumun % 0,0118'lik kısmını oluşturur, ^{40}K bozunarak (β^+ , β^- , EC,) kararlı ^{40}Ca veya ^{40}Ar atomlarına dönüşür. Bozunma sonucunda 1,46 MeV enerjili gama ışıması yapar. Toryumun doğal bozunma serisi potasyuma göre daha uzun ve karmaşıktır (Çavaş, 2006). Doğal olarak gerçekleşen ^{232}Th bozunma serisinde bozunan izotoplar, gama ışın şiddetleri ve enerjileri Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Toryum (^{232}Th) bozunma serisinde oluşan gama ışını enerjileri (Çavaş'dan, 2006).

Bozunan İzotop	Gama Enerjisi (MeV)	Gama Şiddeti (%)
^{212}Pb	0,2386	45
^{228}Ac	0,3386	12
^{208}Tl	0,5107	9
^{208}Tl	0,5831	30
^{212}Bi	0,7272	7
^{228}Ac	0,9111	29
^{228}Ac	0,9667	23
^{228}Ac	1,5881	4,6
^{208}Tl	2,6147	35,9

Toryum serisinde gama ışınmasının çoğunluğu ^{208}Tl ve ^{228}Ac çekirdeklerinden gelir. Uranyum (^{238}U) doğal bozunma serisinde gama ışını üreten çekirdekler, gama şiddetleri ve ürettikleri gama ışınlarının enerjileri Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Uranyum (^{238}U) bozunma serisinde oluşan gama ışını ve enerjileri (Çavaş'dan, 2006).

Bozunan İzotop	Gama Enerjisi (MeV)	Gama Şiddeti (%)
^{214}Pb	0,2952	17,9
^{214}Pb	0,352	35
^{214}Bi	0,609	43
^{214}Bi	1,1204	14,5
^{214}Bi	1,2382	5,6
^{214}Bi	1,3778	4,6
^{214}Bi	1,7647	14,7
^{214}Bi	2,2045	4,7
^{214}Bi	2,448	1,5

Uranyum serisinde oluşan gama ışımalarının % 99,9'u nükleer radon gazının bozunması ile oluşan kısa ömürlü ^{214}Pb ve ^{214}Bi çekirdeklerinden kaynaklanır.

İnsanların maruz kaldığı karasal radyasyonun çoğu toprağın ilk 30 cm derinliklerinden kaynaklanır. Fosil yakıtların içinde de radyoaktif atomlar bulunur, fosil yakıtlar yandığı zaman içinde bulunan radyonüklitler önce atmosfere sonra toprağa karışarak karasal radyasyonun az da olsa artmasına sebep olur.

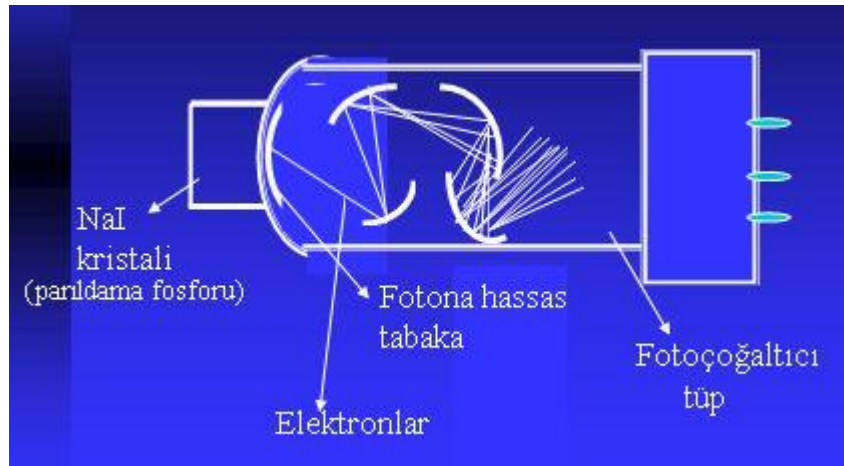
5.5.2. Gama spektroskopisi

Gama spektroskopisi yöntemi uyarılmış durumdan taban durumuna inen çekirdekten yayınlanan gama ışınlarının enerjilerine göre ayrılması esasına dayanır. Uyarılmış durumdan taban durumuna inen çekirdekte, enerji aralığına eşit enerjide gama ışınları gerçekleşir. Gama spektroskopisi ile incelenen örnek içinde gama yayan çekirdeklerin aynı anda incelenmesi mümkün olur. Gamalar yüksek enerjili foton olduğu için madde içinden geçerken yoğunluk azalması çok az olur. Gamaların numune içinde soğrulma olasılığı çok düşük olduğu için deney aşamasında sayım istatistiğinin düzgün olması için numune miktarı fazla alınabilir.

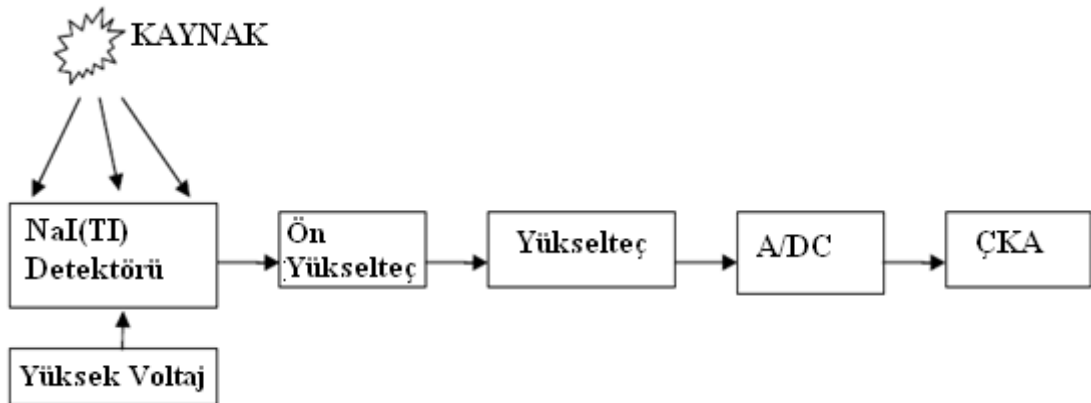
Bir gama spektrumunda herhangi bir fotopikin altındaki alan gama detektörünün o enerjide algıladığı gama ışını sayısına eşittir. Bu sayı gama ışını yayınlayan radyoaktif çekirdek yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Elde edilen bu sayım, ϵ_γ , ilgilenilen pik için detektör verimi, t , sayım süresi (s), m , numunenin kütlesi (kg) ve I_γ , gama enerjisinin yayınlanma olasılığına (%) bağlı olarak örnekteki radyoaktif miktarı (Bq/kg) bulunur.

Deneyde kullanılan NaI(Tl) kristali neme karşı hassas olduğundan fotoçoğaltıcıya optik kontak yapılan yüzü hariç diğer kısımları alüminyum levha ile kaplıdır. Levhanın iç yüzü ise MgO ile kaplanmış olup bu kısım ışık yansıtıcı olarak görev yapar. Gama ışınlarının kristal içinde yaptığı iyonlaşma sonucu serbest elektronlar meydana gelir. Oluşan elektronların tekrar kristal atomlarına bağlanması ile 3300 -5000 °A aralığında görünür ışınlar oluşur. Kristalden yayınlanan ve yüzeyden yansıyan bu ışınlar foto çoğaltıcı tüpün katodu üzerine düşer. Fotokatodun yüzeyi ince selyum-antimon alaşımı levha ile kaplı olduğundan buraya gelen ışınlar yüzeyden elektron koparır. Fotoçoğaltıcı peş peşe voltaj artması olacak şekilde 800 ile 1500 volt arasında çalışır. Fotoçoğaltıcı ile elektron sayısı her aşamada artırılır. Bu yolla girişte

oluşan her bir elektron sayısı çıkışta 10^6 civarında olur. Elektron artışında elde edilen darbenin yüksekliği gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Şekil 5.17’de NaI(Tl) foto çoğaltıcı tüpü ile Şekil 5.18’de gama spektroskopi sistemi ayrı ayrı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.17. NaI(Tl) foto çoğaltıcı tüpün şematik gösterimi (URL-1).



Şekil 5.18. Gama spektroskopi sistemi.

Gama spektroskopi detektörü birbirine bağlantılı pek çok elektronik sistemden oluşur. Bu sistemin parçaları bir adet NaI(Tl) sintilasyon detektörü, yüksek voltaj kaynağı, ön yükselteç, yükselteç ve darbe yüksekliği analizöründen (ÇKA) oluşmuştur. Kaynakta oluşan radyasyon detektörde iyonlaşmaya bağlı bir akım oluşturur ve oluşan akım iki aşamada yükseltilir sonra şekillendirilerek (A/DC) çok kanallı analizöre (ÇKA) gelir. Akım çok kanallı analizörde sayısal verilere çevrilerek ekranda spektrum olarak gözlemlenir. Çok kanallı analizörde en önemli devre elemanı analog-dijital

dönüştürücüdür. Bu kısma gelen her bir akım darbesi dijital hale dönüştürülüp genliği ile orantılı bir hafıza kanalında depo edilir. Her kanal belirli enerjiye karşılık gelir, sayım süresi boyunca darbelerin birikmesi ile pikler oluşur. Bu pikler ölçülmek istenen radyonüklitlerin varlığını açığa çıkarır.

Sistemin kalibrasyonu, aktivite ve yayınladıkları gama enerjileri bilinen kaynaklar yardımı ile yapılır. Bu çalışmada enerji kalibrasyonları için IAEA (International Atomic Energy Agency) referanslı RGU-1 uranyum, RGTh-1 toryum, RGK-1 potasyum kaynakları (IAEA, 1996) ve ^{60}Co nokta kaynağı kullanılmıştır. Enerji kalibrasyonunun amacı spektrumda gözlenen piklerin kanal numaralarının hangi enerjiye karşılık geldiğini bulmaktır. Bunun için enerjileri bilinen piklere sahip standart kaynaklara ihtiyaç vardır. Standart kaynağın spektrumu elde edildikten sonra hangi kanalın hangi enerjiye karşılık geldiği belirlenir.

Kaynaktan yayılan gama ışınları sayısı ile spektrumda sayılan sayımların sayısı arasında ilişki verim kalibrasyonu ile belirlenir. Gama spektrometre sisteminde pikin altında kalan alan radyoaktivite miktarını belirler. Radyoaktivite miktarını belirlemek için pik alanına ve pik verimine ihtiyacımız vardır. Pik verimi aktivitesi bilinen kaynaklar kullanılarak belirlenir. Pik verimi Denklem 5.9 yardımı ile ifade edilir:

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{N_{Net}}{A \cdot I_{\gamma} \cdot t} \quad (5.9)$$

Burada, ε_{γ} , E_{γ} enerjisi için sayım verimi, N_{Net} , E_{γ} enerjili fotonun oluşturduğu pikin net alanı, t, standart kaynağın detektördeki sayım süresi (s), A, kullanılan gama standart kaynağında bulunan radyoaktif çekirdeklerin bilinen aktivitesi (Bq/kg), I_{γ} , radyoaktif çekirdeğin bozunumunda yayınlanan fotonun yayınlanma olasılığı (%).

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi'nde yapılan hesaplamalara göre NaI detektörünün sayım verimi Denklem 5.10 yardımı ile hesaplanmıştır:

$$\ln(\varepsilon_{\gamma}) = -18,61 + 5,969 * \ln(E_{\gamma}) - 0,5468 * \ln(E_{\gamma})^2 \quad (5.10)$$

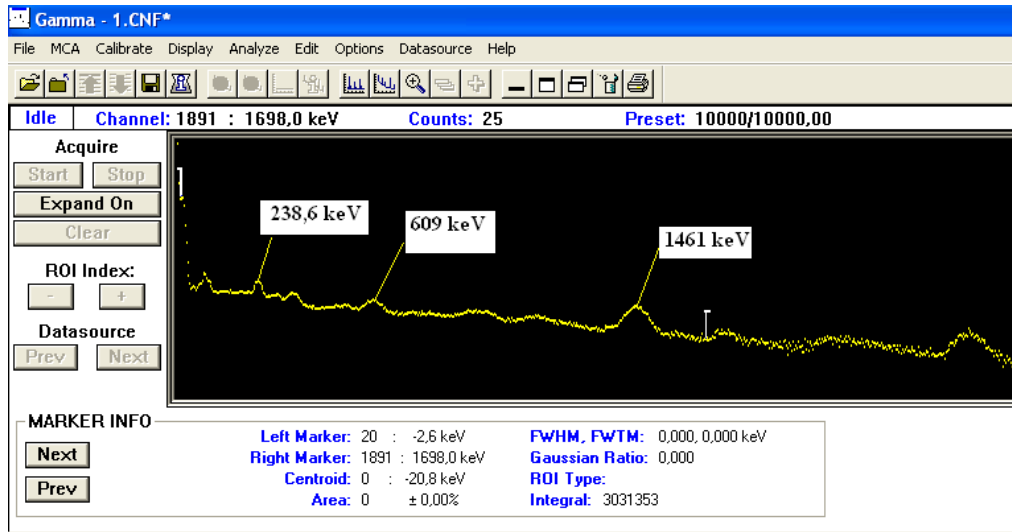
Detektörün enerji ve verim kalibrasyonu yapıldıktan sonra aktivite hesaplanır. Herhangi bir radyoaktif çekirdeğin aktivitesi Denklem 5.11 yardımı ile bulunur. Burada, m, numunenin kütlesi (kg)'dir, diğer değişkenler yukarıda belirtilmiştir (Bostancı, 2011).

$$A \left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right) = \frac{N_{Net}}{\varepsilon_{\gamma} \cdot I_{\gamma} \cdot t \cdot m} \quad (5.11)$$

5.5.3. Eskişehir ili merkezinde toprak analizi

İl genelinde farklı mahallelerden alınan toprak örneklerinde, gama spektroskopisi yöntemi ile bazı radyonüklitlerin (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) topraktaki aktivite (Bq/kg) değerleri hesaplanmıştır. Bu amaç için NaI (Tl) gama spektroskopisi detektörü kullanılmıştır. Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden toplamda 10 adet toprak numunesi alınarak numuneler 0,1 mm aralıklı elekten elenip fırında $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 1 gün süreyle kurutulmuştur. Her bir numune daha sonra 1300'er gram tartılarak özel plastik kaplara konulup ağzları sıkıca kapatıldıktan sonra 30 gün boyunca beklemeye alınmıştır. Bu süreçte radyoaktif çekirdekler ürün çekirdekleri ile aktif dengeye gelmektedir. Numunelerin analizleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Nükleer Fizik Laboratuvarında yapılmıştır.

Potasyum spektrumu tek enerjili bir gama kaynağı olduğu için NaI (Tl) detektörü ile tespiti kolaydır. ^{40}K pikinin enerjisi 1,461 MeV'dir. Uranyum spektrumunda pek çok ürün çekirdekten gama ışını detektöre ulaşır dolayısı ile tespit potasyum kadar kolay olmaz. Uranyumun aktivitesinin tespit edilmesinde, uranyum doğal bozunma zincirinde üretilen ^{214}Bi çekirdeğinin yayınladığı 609 keV enerjili gama ışınından faydalanılır. ^{214}Bi çekirdeğinin verilen enerjide gama bozunma olasılığı % 46,1'dir. Toryum spektrumu da uranyum gibi pek çok gama ışın pikine sahiptir. Toryumun aktivitesinin tespit edilmesinde ^{212}Pb çekirdeğinden yayınlanan 238,6 keV enerjili gama ışınından faydalanılır. ^{212}Pb çekirdeğinin bu enerjide yayınlanma olasılığı % 45'dir. İl geneli mahallelerden alınan toprak örneklerinde ^{232}Th , ^{238}U ve ^{40}K aktivitelerinin hesaplanmasında kullanılan enerji pikleri Şekil 5.19'da sırası ile verilmiştir.



Şekil 5.19. Eskişehir il merkezinden alınan 1 numaralı toprak numunesinin gama spektrumu.

Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden alınan toprak örneklerinin ölçüm sonuçları Çizelge 5.13’de verilmiştir. Çizelge 5.13’de radyonüklitlerin yayınladıkları gama enerji değerleri (keV), gama ışınlarının detektörle etkileşmesi sonucu spektrumda oluşan gama ışın sayısı, arka fon gama ışın sayısı, net sayım, ilgilenilen pik için detektör verimi ε_γ , gama enerjisinin yayınlanma olasılığı I_γ , sayım süresi (s), numunenin kütlesi (kg), hesaplanan aktivite değerleri (Bq/kg) verilmiştir.

Çizelge 5.13. Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden alınan toprak örnekleri için ölçülen ve hesaplanan deneysel veriler.

Örnek	Radyo-nüklid	Gama Enerjisi (keV)	Sayım	Arka Fon Sayım	Net Sayım	ε_γ	I_γ	Sayım Süresi (s)	Kütle (Kg)	Aktivite (Bq/kg)
1	U	609	7571	511	7060	0,059	0,461	10000	1,3	19,82
	K	1461	12063	3528	8535	0,015	0,107	10000	1,3	399,40
	Th	238,6	14349	228	14121	0,098	0,45	10000	1,3	24,60
2	U	609	7755	454	7301	0,059	0,461	10000	1,3	20,53
	K	1461	12342	3668	8674	0,016	0,107	10000	1,3	398,94
	Th	238,6	14644	228	14416	0,098	0,45	10000	1,3	25,11
3	U	609	5626	574	5052	0,059	0,461	10000	1,3	14,18

	K	1461	7609	3665	3944	0,016	0,107	10000	1,3	181,15
	Th	238,6	11425	310	11115	0,098	0,45	10000	1,3	19,36
4	U	609	10449	740	9709	0,059	0,461	10000	1,3	27,30
	K	1461	9637	3344	6293	0,016	0,107	10000	1,3	288,37
	Th	238,6	16755	500	16255	0,098	0,45	10000	1,3	28,31
5	U	609	8990	531	8459	0,059	0,461	10000	1,3	23,83
	K	1461	6947	3668	3279	0,016	0,107	10000	1,3	150,07
	Th	238,6	13865	357	13508	0,098	0,45	10000	1,3	23,53
6	U	609	8690	845	7845	0,059	0,461	10000	1,3	22,10
	K	1461	11799	3678	8121	0,016	0,107	10000	1,3	370,45
	Th	238,6	17508	414	17094	0,098	0,45	10000	1,3	29,77
7	U	609	5485	454	5031	0,059	0,461	10000	1,3	14,12
	K	1461	10431	3666	6765	0,016	0,107	10000	1,3	307,75
	Th	238,6	10262	414	9848	0,098	0,45	10000	1,3	17,15
8	U	609	7324	763	6561	0,059	0,461	10000	1,3	18,58
	K	1461	8272	3595	4677	0,016	0,107	10000	1,3	213,06
	Th	238,6	13941	414	13527	0,098	0,45	10000	1,3	23,56
9	U	609	9534	531	9003	0,059	0,461	10000	1,3	25,40
	K	1461	10494	3983	6511	0,016	0,107	10000	1,3	297,42
	Th	238,6	15928	414	15514	0,098	0,45	10000	1,3	27,02
10	U	609	10933	817	10116	0,059	0,461	10000	1,3	28,49
	K	1461	11628	3943	7685	0,016	0,107	10000	1,3	349,61
	Th	238,6	16585	228	16357	0,098	0,45	10000	1,3	28,49

Çizelge 5.14. Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden alınan toprak numuneleri için ölçülen karasal radyasyonların betimleyici istatistik sonuçları.

Örnek	Numune Sayısı	En Düşük (Bq/kg)	En Yüksek (Bq/kg)	Arit. Ortalama (Bq/kg)	Std. Sapma (Bq/kg)
Uranyum (^{238}U)	10	14,12	28,49	21,43	4,98
Toryum (^{232}Th)	10	17,15	29,77	24,69	4,04
Potasyum (^{40}K)	10	150,07	399,40	295,62	88,98

Çizelge 5.14’de Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden alınan toprak numuneleri için ölçülen karasal radyasyonların betimleyici istatistik sonuçları verilmiştir. Şekil 5.14’e göre Eskişehir il merkezinden alınan toprak örneklerinde uranyumun (^{238}U) aktivitesi 14,12 ile 28,49 Bq/kg arasında değişmekte olup ortalama 21,43 Bq/kg’dir. Toryumun (^{232}Th) aktivitesi 17,15 ile 29,77 Bq/kg arasında değişmekte olup ortalama 24,69 Bq/kg’dir. Potasyumun (^{40}K) aktivitesi 150,07 ile 399,40 Bq/kg arasında değişmekte olup ortalama 295,62 Bq/kg’dir. Birleşmiş Milletlerin hazırlamış olduğu UNSCEAR 2000 raporunda, dünya geneli bazı ülkeler için karasal radyasyon verileri yayınlanmıştır. Yapılan küresel ölçümlere göre ortalama uranyum (^{238}U) aktivitesi 33 Bq/kg, toryum (^{232}Th) aktivitesi 45 Bq/kg, potasyum (^{40}K) aktivitesi ise 420 Bq/kg ölçülmüştür. Kendi deneysel çalışmamızda yapılan ölçüm sonuçlarına göre Eskişehir il merkezinde karasal radyasyon değerleri dünya ortalamasından daha düşüktür.

Toprakta bulunan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K ’dan kaynaklanan, yüzeyden 1 m yükseklikteki havada soğurulan gama doz hızı Denklem 5.12 yardımı ile hesaplanır.

$$D=[0,604A_{\text{Th}} + 0,463A_{\text{U}} + 0,0417A_{\text{K}}] \text{ nGy/sa} \quad (5.12)$$

Burada, A_{Th} , toryumun aktivitesi (Bq/kg), A_{U} , uranyumun aktivitesi (Bq/kg), A_{K} ise potasyumun aktivitesidir (Bq/kg). Eskişehir il merkezinde ölçülen karasal radyasyon değerleri verilen eşitlikte yerine konulursa ^{238}U , ^{232}Th ve ^{40}K için soğurulan doz hızı ortalama 37,16 nGy/sa hesaplanır. UNSCEAR 2000 verilerine göre soğurulan dozun dünya ortalaması 60 nGy/sa’dır. Kendi ölçümlerimizde Eskişehir il merkezi için

hesaplanan değer dünya ortalamasının oldukça altında yer alır. Karasal radyasyondan kaynaklanan etkin doz miktarı Denklem 5.13 yardımı ile hesaplanır.

$$\text{Etkin Doz Hızı (mSv/y)} = \text{Doz Hızı (nGy/sa)} \times 8760 \text{ sa} \times 0,2 \times 0,7 \text{ (Sv/Gy)} \times 10^{-6} \quad (5.13)$$

Burada, soğurulan doz için dönüşüm (0,7 Sv/Gy) ve dış ortamda maruz kalma faktörü 0,2 alınır. Eskişehir için yapılan hesaplamalarda etkin doz miktarı 0,04557 mSv/y, bu da 45,57 $\mu\text{Sv/y}$ 'a eşittir. UNSCEAR 2000 verilerine göre küresel kişi başına alınan etkin doz miktarı 70 $\mu\text{Sv/y}$ olarak hesaplanmıştır (Bostancı, 2011).

6. BÖLÜM

ESKİŞEHİR'DE RADON GAZI ÖLÇÜMLERİNİN t TESTİ İLE ANALİZİ

Eskişehir il merkezi içinde 2010-2011 yılları arasında 4 dönemlik (kış, ilkbahar, yaz, sonbahar) ve bir yıllık radon gazı ölçümleri yapılmıştır. Evlerde dönemsel radon yoğunluklarının t testi ile kıyaslanması için verilerin aynı evlerden alınması gerekir. Dolayısı ile farklı evlerden alınmış veriler tek grup t testi ya da bağımsız gruplar arası farkların testi ile karşılaştırılmaz. Bu kısımda aynı evlerde yapılan dört mevsimlik radon yoğunluklarının ortalaması ile bu evlerin yıllık ölçümleri kıyaslanmıştır. Teorik olarak mevsimsel ölçümlerin ortalamasının yıllık ölçümlerin ortalamasına eşit olması gerekir. Bu ölçümlerle ilgili veriler daha önceki kısımlarda betimleyici istatistik yöntemleri ile kıyaslanmış gerekli yorumlar yapılmıştır. Burada 82 adet bir yıl süreli ölçümler ile aynı evlerin mevsimsel verilerin aritmetik ortalaması SPSS 9.05 paket programında Tek Grup "t"-Testi (One-Sample t Test) ile kıyaslanacaktır. t testinin yapılabilmesi için verilerin normal dağılıma tam uyması veya yaklaşık uyması gerekir. Önce verilerin normallik testinin yapılması gerekir. Verilerin normal dağılıma uyup uymadığı Kolmogorov-Smirnov (K-S) Testi yardımı ile belirlenir. Kolmogorov-Smirnov (K-S) Testi rastgele elde edilmiş bir veri setinin belirli bir dağılıma (uniform, normal veya poisson) uyup uymadığını anlamak için yapılır. Verilerin Kolmogorov-Smirnov (K-S) Test sonuçları Çizelge 6.1'de aşağıdaki gibidir.

Çizelge 6.1. Yıllık veriler için Kolmogorov-Smirnov (K-S) testi.

Tek Grup Kolmogorov-Smirnov Testi		
N		82
Normal Parametreler	Arit. Ortalama	99,135
	Std. Sapma	62,256
En Uç Farklılıklar	Mutlak	0,227
	Pozitif	0,227
	Negatif	-0,145
Kolmogorov-Smirnov Z		2,055
p Değeri		<0,001

Hipotezler:

H_0 : Normal Dağılıyor.

H_1 : Normal Dağılmıyor.

Güven Düzeyi: % 95.

Serbestlik Derecesi: Yok.

Test Değeri: $K_{sz}=2,055$.

p Değeri: $p<0,001$.

Sonuç: $p<0,05$ Olduğu İçin H_0 Ret.

Yorum: Veriler Normal Dağılım Göstermiyor.

Kolmogorov-Smirnov (K-S) Testine göre, yıllık veriler normal dağılıma uymadığı için verileri t testi ile analiz etmemiz mümkün değildir. Daha önceki kısımlarda evlerdeki radon yoğunluğunun normal dağılıma uymadığından ancak verilerin logaritmalarının normal dağılıma uyduğundan bahsetmiştik. Yıllık verilerin logaritmalarını mevsimsel verilerin logaritmasının ortalaması ile t testi analizi yapabiliriz. Önce yıllık verilerin logaritmalarına Kolmogorov-Smirnov (K-S) Testi yaparak normal dağılıma uyup uymadıklarına bakalım. Yıllık verilerin logaritmalarının Kolmogorov -Smirnov (K-S) Test sonucu Çizelge 6.2'deki gibidir.

Çizelge 6.2. Yıllık verilerin logaritmalarının Kolmogorov -Smirnov (K-S) testi.

Tek Grup Kolmogorov-Smirnov Testi		
N		82
Normal Parametreler	Arit. Ortalama	1,932
	Std. Sapma	0,233
En Uç Farklılıklar	Mutlak	0,115
	Pozitif	0,115
	Negatif	-0,114
Kolmogorov-Smirnov Z		1,041
p Değeri		0,228

Hipotezler:

H_0 : Normal Dağılıyor.

H_1 : Normal Dağılmıyor.

Güven Düzeyi: % 95.

Serbestlik Derecesi: Yok.

Test Değeri: $K_{sz}=1,041$.

p Değeri: $p=0,228$.

Sonuç: $p>0,05$ Olduğu İçin H_0 Kabul.

Yorum: Veriler Normal Dağılım Gösteriyor.

2010-2011 yılları arasında 82 evde bir yıl süreli yapılan bina içi radon gazı ölçüm sonuçlarının logaritmik değerleri normal dağılıma uyduğu için veri analizinde t testini kullanabiliriz. Burada aynı evler için yıllık ölçümlerin logaritmik değerleri ile mevsimsel verilerin ortalamasının logaritması “Tek grup t-Testi” (One-Sample t Test) ile karşılaştırılıp aralarında anlamlı bir ilişki olup olmadığı incelenmiştir. Verilerin istatistiksel analizi ve Tek grup t-Testi sonuçları Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Yıllık verilerin logaritmalarının istatistik analiz sonuçları.

Tek Grup İstatistiği			
N	Arit. Ort	Std. Sapma	Arit. Ort Std. Hatası
82	1,932	0,233	0,026

Çizelge 6.4. Yıllık verilerin logaritmalarının tek yönlü t testi sonuçları.

Tek Grup "t"-Testi					
Test Değeri = 2,04					
t	Serbestlik Derecesi	p Değeri	Ortalama Farkı	% 95 Güven Aralığı	
				Alt değer	Üst değer
-4,206	81	<0,001	-0,108	-0,159	-0,057

Hipotezler:

H_0 : Mevsimsel ortalama yıllık Ortalamaya eşittir.

H_1 : Ortalamalar Eşit Değildir.

Güven Düzeyi: % 95.

Serbestlik Derecesi: 81.

Test Değeri: $t=-4,206$.

p Değeri: $p < 0,001$.

Sonuç: $p < 0,05$ Olduğu İçin H_0 Ret.

Yorum: Yıllık ölçüm sonuçları ile 4 mevsimlik ölçüm sonuçları arasında anlamlı bir fark vardır, teorik olarak yıllık verilerin ortalaması ile mevsimsel verilerin ortalamalarının eşit veya yaklaşık eşit olması gerekir ancak yıllık ölçüm sonuçlarının ortalaması mevsimsel ölçüm sonuçlarının ortalamasından daha azdır. Bu farklılıkların oluşmasındaki nedenler Bölüm 5.4.5'te açıklanmıştır.

Eskişehir il merkezinde aynı evlerde yapılan 4 mevsimlik ölçümlerden kış dönemi ve yaz dönemi sonuçları bağımsız iki grup arası farkların testi (Independent Samples "t" Test) ile test edilebilir. Bu kısımda 95 adet evde yapılan kış ve yaz dönemi verilerinin

logaritmaları t testi ile kıyaslanmıştır. Evlerdeki radon yoğunluğunun mevsimsel farklılık gösterdiği ve kış döneminde en yüksek yaz döneminde ise en düşük seviyede olduğu daha önceki kısımlarda anlatılmıştır. Kış ve yaz dönemi verilerinin logaritmalarının normallik testinin yapılması gerekir. Normal dağılıma uymayan veri seti t testi ile incelenemez. Kış ve yaz dönemi verilerinin Kolmogorov-Smirnov (K-S) Test sonucu Çizelge 6.5’de aşağıdaki gibidir.

Çizelge 6.5. Kış ve yaz dönemi verilerinin Kolmogorov -Smirnov (K-S) test sonucu.

Tek Grup Kolmogorov-Smirnov Testi			
		Yaz	Kış
N		95	95
Normal Parametreler	Art. Ortalama	1,879	2,081
	Std. Sapma	0,261	0,238
En Uç Farklılıklar	Mutlak	0,064	0,053
	Pozitif	0,064	0,053
	Negatif	-0,045	-0,049
Kolmogorov-Smirnov Z		0,621	0,513
p Değeri		0,836	0,955

Çizelge 6.5’e göre yaz ve kış dönemleri için anlamlılık değerleri sırası ile $p_{Yaz}=0,836$, $p_{Kış}=0,955$ ’dir. Her iki dönem için $p>0,05$ olduğundan kış ve yaz dönemi veri setlerinin logaritmik değerleri normal dağılıma uyum göstermektedir. Aynı evler için kış ve yaz dönemi veri setlerinin bağımsız iki grup arası farkların test (Independent Samples "t" Test) sonuçları Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7’deki gibidir.

Çizelge 6.6. Kış ve yaz dönemi veri setlerinin grup istatistiği.

Grup İstatistiği				
Veri	N	Arit. Ort.	Std. Sapma	Arit. Ort. Std. Hatası
Kış	95	2,081	0,238	0,024
Yaz	95	1,879	0,261	0,027

Çizelge 6.7. Kış ve yaz dönemi verilerinin logaritmalarının bağımsız grup testi.

Bağımsız Grup Testi									
Varyansların Eşitliği İçin Levene Testi			Ortalamaların Kıyaslandığı t-Testi						
	F	p Değeri	t	Serbestlik derecesi	p Değeri	Art. Ort. Farkı	Std. Hata Farkı	%95 Güven Aralığı	
								Alt	Üst
Varyanslar Eşit Olursa	1,939	0,165	5,58	188	0,00	0,202	0,036	0,131	0,274
Varyanslar Farklı Olursa			5,58	186,5	0,00	0,202	0,036	0,131	0,274

Bağımsız iki grubun karşılaştırıldığı t testinde gruplar arasında varyans farkının olup olmadığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Karşılaştırılan grupların varyanslarının eşit olup olmamasına bağlı olarak iki farklı hesaplama yapılmaktadır. t testinde varyansların eşit olup olmadığı Levene testi ile belirlenir. Eğer varyanslar eşit ise Çizelge 6.7'nin üst satırındaki test değerleri dikkate alınır. Eğer varyanslar farklı ise Çizelge 6.7'nin alt satırındaki test değerleri dikkate alınır. Varyansların eşitliği durumunda iki gruba ait varyans birleştirilir. Aksi taktirde ayrı ayrı varyans hesaplamasına gidilir. SPSS'te her iki durum için de hesaplama yapılmakta ve analiz çıktılarında verilmektedir. Sonuçların değerlendirilmesinde Levene testine bağlı olarak yorum yapmak gerekmektedir. Çizelge 6.7'ye göre Levene testinde anlamlılık düzeyi $p > 0,05$ olduğundan varyanslar eşit alınmıştır, t testinin yorumunda Çizelge 6.7 içindeki üst satır dikkate alınacaktır.

Hipotezler:

H_0 : Ortalamalar Eşittir.

H_1 : Ortalamalar Eşit Değildir.

Güven Düzeyi : % 95.

Serbestlik Derecesi : 188.

Test Değeri : $t=5,58$.

p Değeri : $p<0,001$.

Sonuç: $p<0,05$ Olduğundan H_0 Red.

Yorum: Kış dönemi ile yaz dönemi ölçümleri arasında anlamsal farklılıklar vardır.

Bağımsız iki grup arası farkların testinde (Independent Samples "t" Test) p değeri 0,05'den küçük olduğu için iki veri setinin ortalamaları birbirinden farklıdır. Kış dönemi radon gazı ölçümleri ile yaz dönemi radon gazı ölçüm sonuçları arasında anlamsal farklılıklar vardır.

Eskişehir il geneli radon gazı ölçümlerinde aynı evlerden alınan kış ve sonbahar dönemi verilerinin logaritmik değerleri bağımsız iki grup arası farkların testi ile test edilmiştir. Bu kısımda 88 evden alınan kış ve sonbahar verileri t testi ile kıyaslanmıştır. Burada amaç, kış ve sonbahar dönemi radon gazı yoğunlukları arasında bir ilişki olup olmadığını t testi ile görmektir. Kış ve sonbahar dönemi Eskişehir'de genel olarak soğuk olduğundan, ev içi radon gazı değerleri bu iki dönemde yüksektir. İklimin ev içi radon gazına sonbahar ve kış aylarında etkisi ortaktır. Dolayısı ile amaç, t testi ile veriler arasında anlamsal ilişki olup olmadığını görmektir. Kış ve sonbahar dönemi veri setlerinin logaritmik değerlerinin bağımsız gruplar arası t testi sonuçları ve grup istatistiği Çizelge 6.8 ve Çizelge 6.9'daki gibidir.

Çizelge 6.8. Kış ve sonbahar dönemi veri setlerinin grup istatistiği.

Veri	N	Arit. Ort.	Std. Sapma	Arit. Ort. Std. Hatası
Kış	88	2,098	0,224	0,024
Sonbahar	88	2,144	0,258	0,027

Çizelge 6.9. Kış ve sonbahar dönemi verilerinin logaritmalarının bağımsız grup testi.

	Varyansların Eşitliği İçin Levene Testi		Ortalamaların Kıyaslandığı t-Testi						
	F	p Değeri	t	Serbestlik Derecesi	p Değeri	Art. Ort. Farkı	Farkın Std. Hatası	%95 Güven Aralığı	
Veri								Alt	Üst
Varyanslar Eşit Olursa	0,46	0,499	-1,273	174	0,205	-0,046	0,036	-0,118	0,026

Çizelge 6.9'a göre Levene testinde anlamlılık düzeyi $p > 0,05$ olduğundan varyanslar eşit alınmıştır, t testinin yorumunda Çizelge 6.9 içindeki üst satır dikkate alınacaktır. Bağımsız iki grup arası farkların testinde (Independent Samples "t" Test) p değeri 0,05'den büyük olduğu için H_0 reddedilememiştir ve kış ve sonbahar aylarında ev içi radon gazı yoğunluklarının farklı olmadığı ortaya çıkmıştır. Yani kış ve sonbahar mevsimlerinde ev içi radon gazı yoğunlukları birliktelik göstermiştir. Eskişehir'de sonbahar ve kış dönemi soğuk olduğundan her iki dönemde de radon gazı yoğunluğu diğer mevsimlere göre yüksek ve yaklaşık eşit çıkmıştır. Kış ve yaz dönemi ölçümleri için yapılan t testinde veriler arasında ciddi anlamsal farklılıklar görülmemiştir çünkü kış ve yaz döneminde mevsimin ev içi radon yoğunluğuna etkisi terstir. Sonbahar ve kış döneminde mevsimin ev içi radon yoğunluğuna etkisi ise paraleldir.

Eskişehir il merkezinde evlerde ölçülen radon gazı yoğunluğu bina içinde katlara göre farklılıklar gösterir. Genelde toprakla teması olan birinci katlarda yoğunluk en fazla olmakta üst katlara doğru çıktıkça ise yoğunluk azalmaktadır. Radon yoğunluğu Bölüm 5.4.3'de betimleyici istatistiksel yöntemlerle katlara göre analiz edilmiştir. Burada sadece kış döneminde (2010-2011) yapılan birinci, ikinci ve üçüncü kat ölçüm verileri kullanılarak tek yönlü varyans analizi yapılmıştır. İncelenen veri setinin normal dağılıma uyması gerekmektedir, dolayısı ile veri seti olarak ev içi radon değerlerinin logaritmik değerleri alınacaktır. Burada verilerin test edilmesinde SPSS paket programı kullanılmıştır. Menüden Analyze → Compare Means → One way ANOVA seçilir. Test sonuçları Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.10. Kış dönemi verilerinin katlara göre tanımlayıcı istatistik sonuçları.

Katlar	N	Arit. Ort.	Std. Sapma	Std. Hata	%95 Güven Aralığı		Minimum	Maksimum
					Alt Limit	Üst Limit		
1.	37	2,3137	0,1966	0,0323	2,2482	2,3793	1,97	2,67
2.	57	2,0339	0,1953	0,0258	1,9821	2,0857	1,53	2,51
3.	18	2,1084	0,1219	0,0287	2,0478	2,1691	1,91	2,32
Toplam	112	2,1383	0,2237	0,0211	2,0964	2,1802	1,53	2,67

Çizelge 6.10'da ölçüm yapılan katlardaki ev sayıları, radon yoğunluğu verilerinin logaritmalarının aritmetik ortalamaları, standart sapmaları, aritmetik ortalamanın standart hatası, ölçümlerin % 95 güven aralığı, maksimum ve minimum değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.11. Kış dönemi veri setlerinin homojenlik testi.

Levene İstatistiği	df1	df2	p Değeri
2,497	2	109	0,087

Çizelge 6.11'de Levene istatistiği verilmiştir. Burada df1 gruplar arası serbestlik derecesi, df2 ise grup içi serbestlik derecesidir. p değeri 0,05'den büyük olduğu için veriler homojen dağılım göstermektedir.

Çizelge 6.12. Kış dönemi verilerinin katlara göre tek yönlü ANOVA testi sonuçları.

	Kare toplamı	Df	Kare Ortalaması	F	p Değeri
Gruplar arası	1,776	2	0,888	25,603	< 0,001
Grup içi	3,781	109	0,0347		
Toplam	5,557	111			

Çizelge 6.12'de radon gazı yoğunluğunun katlara göre tek yönlü ANOVA testi verilmiştir. Tabloda verilerin karelerinin toplamı gruplar arası ve grup içi olarak,

verilerin serbestlik derecesi (Df), verilerin karelerinin ortalaması, F testi sonucu ve p değeri verilmiştir. p değeri 0,05'den küçük olduğu için katlardaki radon yoğunlukları arasında anlamlı farklılıklar vardır. Katlardaki radon yoğunluğunun ortalamaları birbirinden farklıdır. Eğer p değerinin 0,05'den büyük olması durumunda o zaman veriler arasında fark olmadığı söylenir.

Çizelge 6.13. Tukey testi ile katlar arası değerlerin çoklu karşılaştırılması.

Katlar		Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p Değeri	% 95 Güven Aralığı	
(I) Kat	(J) Kat				Alt limit	Üst Limit
1	2	0,28	0,039	< 0,001	0,186	0,373
	3	0,205	0,054	0,001	0,078	0,333
2	3	-0,075	0,05	0,304	-0,194	0,045

ANOVA gruplar arası farkın olup olmadığını ortaya çıkarır ama hangi grubun diğerinden farklı olduğunu söylemez. Grupların ayrıntılı olarak kıyaslanması için Tukey testi veya Scheffe testi kullanılır. Bu çalışmada Tukey testi kullanılmıştır. Çizelge 6.13'de verilerin çok karşılaştırmalı Tukey test sonuçları verilmiştir. Tukey testi ile katlar arası radon yoğunlukları ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Yapılan analizde katlar arası ortalama farklılıkları, ortalamanın standart hatası, p değeri ve % 95 güven aralığının alt ve üst değerleri verilmiştir. Birinci ve ikinci kat radon yoğunlukları kıyaslandığında p değeri sıfır olduğu için birinci kat ile ikinci kat radon yoğunlukları arasında çok ciddi anlamsal farklılıklar bulunmaktadır. İkinci ve üçüncü katların radon yoğunluğu arasında anlamsal bir ilişki vardır ($p>0,05$), bu katlardaki yoğunluk değerleri birbirine yakındır çünkü bu katlardaki radon gazının oluşum kaynakları ortaktır (bina yapı malzemeleri ve şebeke suyu). 1. kat ile 3. kat arasında da anlamsal farklılıklar vardır ancak 1. kat ile 3. kat arasında 1. kat ile 2. kat arasına göre daha fazla anlam ilişkisi vardır. Bu durumu şöyle açıklayabiliriz: 1. kattan sonra üst katlardaki radon gazı kaynakları genel olarak bina yapı malzemeleri ve şebeke suyudur. 3. katta ölçülen radon yoğunluğu 2. katta ölçülen radon yoğunluğundan ev yalıtımı, havalandırma ve bireylerin yaşam stillerine bağlı olarak yüksek çıkabilir. Örneğin 3. katta

havalandırılmayan bir evde 2. katta havalandırılan bir eve göre radon yoğunluğu daha yüksek çıkabilir üst katlardaki radon kaynakları ortaktır aradaki farklılıklar evdeki ya da bireydeki farklılıklardan kaynaklanır.

7. BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMA

Radyoaktif radon gazı yerin derinliklerinde uranyumun doğal bozunma serisi ürünü olarak oluşup difüzyon ve diğer bazı yollarla yukarı yönde hareket ederek atmosfere karışır. Toprak yüzeyinden atmosfere karışan radon gazı hava akımının da etkisi ile hemen seyreltik hale geçer. Nükleer radon gazı binaların zemininde bulunan çatlaklardan hareket edip bina içinde birikerek ev içi radon yoğunluğunu oluşturur. Bina yapı malzemeleri de topraktan elde edildiği için içerdiği uranyum türevlerinden dolayı ev içi radon yoğunluğuna katkı sağlar. Ayrıca evlerde kullanılan şebeke suyu ev içi radon yoğunluğuna katkı sağlar. Ev içi radon yoğunluğu oluşturmada toprak birinci sırayı, bina yapı malzemeleri ve şebeke suyu önem sırasına göre ikinci ve üçüncü sırayı oluşturur.

Son dönemlerde Avrupa, Amerika ve Asya'da yapılan çalışmalara göre radon gazı sigaradan sonra akciğer kanserinin en büyük etmenidir. Akciğer kanseri vakalarının % 3 ile % 14'ünün radon kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Sigara içen bireylerde akciğer kanserine yakalanma riski içmeyenlere göre daha fazladır. Maruz kalınan radon kaynaklı radyasyon dozu arttıkça sigara içen ve içmeyenlerde akciğer kanserine yakalanma riski paralel olarak artmaktadır. İnsanların çoğu evlerde düşük veya normal seviyede radon yoğunluğuna maruz kalmasına rağmen radon bağlantılı kanser vakalarının çoğu düşük ve normal seviyedeki radon yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Sigara içen bireylerde sigara ve radon gazına bağlı ortak etki kanser riskini daha da artırmaktadır (WHO, 2009).

Eskişehir il merkezinde 2 yıllık (2010-2012) bir zaman diliminde binalarda radon gazı ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre ev içi radon yoğunluğu kış mevsiminde $34 \text{ Bq/m}^3 - 531 \text{ Bq/m}^3$, ilkbaharda $23 \text{ Bq/m}^3 - 424 \text{ Bq/m}^3$, yaz mevsiminde $25 \text{ Bq/m}^3 - 320 \text{ Bq/m}^3$, sonbaharda ise $19 \text{ Bq/m}^3 - 412 \text{ Bq/m}^3$ arasında değişmektedir. Tek seferlik yaptığımız bir yıl süreli ölçüm sonuçlarına göre bina içi radon yoğunluğu $19 \text{ Bq/m}^3 - 338 \text{ Bq/m}^3$ arasında değişim göstermektedir. 2010-2011 yılları arasında yapılan ölçümlere göre Eskişehir için yıllık ortalama radon yoğunluğu

127 Bq/m³ olarak hesaplanmıştır. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) evler ve binalar için üst limit değerlerini sırası ile 400 Bq/m³ ve 1000 Bq/m³ olarak belirlemiştir ancak WHO'nun yaptığı son çalışmalarda sağlık risklerinin azaltılması için 100 Bq/m³'ü üst limit değer olarak belirlemiştir. Eğer bu limit oluşturulamıyorsa radon yoğunluğunun 300 Bq/m³'ü aşmaması tavsiye edilmektedir. Ancak yıllık ortalama radon yoğunluğu 300 Bq/m³ olursa yapılan son hesaplamalara göre kişi başına alınan etkin doz değeri 10 mSv olmaktadır (ICRP). Yapılan hesaplamalara göre Eskişehir için ölçülen ortalama radon yoğunluğu 127 Bq/m³ daha önce Türkiye için hesaplanan 52 Bq/m³ radon yoğunluğunun iki katından daha fazla, TEAK üst limit değerinden çok daha azdır. TEAK önderliğinde yapılan Türkiye geneli ölçümler, genel olarak kış ve yaz aylarında yapılmış olup bazı illerde ise sadece tek mevsimlik ölçümlerden oluşmaktadır. Bazı illerde ölçüm yapılmamış veya o illerin ölçümleri devam etmektedir. TAEK'in açıkladığı Türkiye ortalaması tüm illeri kapsamamaktadır. Bazı illerde ölçümler henüz tamamlanmamıştır. Dünya geneli ölçüm sonuçlarına göre ev içi radon yoğunluğu ortalama 39 Bq/m³ olarak tahmin edilmektedir. Dünya geneli veriler bazı OECD ülkelerinden alınan radon sonuçlarına göre yapılmış olup tüm dünya ülkelerinin verilerini yansıtmamaktadır. Bazı ülkeler için ölçülen ortalama radon yoğunlukları UNSCEAR 2000 "Annexb" raporunda Tablo 24 ile verilmiştir. Sıcak iklim kuşağında bulunan ülkelerde ölçülen çok düşük radon yoğunlukları dünya ortalamasını düşürmektedir. Eskişehir ili için yapılan ölçüm sonuçları dünya ortalamasının yaklaşık 4 katıdır. Soğuk iklimlerde bina içi radon yoğunluğu genel olarak yüksektir, ancak ekvatora yakın olan ülkelerde evler sürekli havalandırıldığı ve ısı yalıtımı yapılmadığı için değerler çok düşüktür. Evlerdeki radon yoğunluğunun yaşanan coğrafyaya bağlı farklılıkları UNSCEAR 1993 raporunda verilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca katlara göre radon yoğunluk analizi yapılmış olup ölçüm sonuçlarına göre üst katlara çıktıkça radon yoğunluğu azalmaktadır. Binanın birinci veya zemin katından bir üst kata radon yoğunluğu keskin bir şekilde azalmaktadır. Diğer üst katlarda ise radon yoğunluğu yaklaşık sabit kalmaktadır. Bu durum radon gazının en büyük kaynağının toprak olmasından kaynaklanır.

Binalardaki radon yoğunluğu bina yapısına, havalandırma alışkanlığına bağlı olarak farklılıklar gösterir. Ev içi radon yoğunluğu sadece mevsimsel etkilere bağlı olmayıp günün hangi saati olduğuna göre de farklılık gösterir. Bu değişimlerden dolayı

yıllık ortalama radon yoğunluğunun tahmin edilmesi için uzun süreli ölçümler yapmak gerekir. Dünya sağlık örgütünün yaptığı araştırmaya göre bina içi radon yoğunluğunu ölçmede ülkeler tarafından kullanılan en popüler detektörler katı hal iz detektörleridir. Aktif ölçüm cihazları elektrik akımına gereksinim duyarken iz detektörleri her sahaya kolayca uygulanabilir bir yapıya sahiptir. İz detektörleri yıl bazında ölçüm yapmak için çok kullanışlıdır. Elektronik ölçüm detektörleri ise anlık değişimleri kaydetmesi yönü ile faydalıdır.

Bu çalışmada ayrıca 3 aylık ölçümlerle 1 yıllık ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre üç aylık ölçüm sonuçları ile 1 yıllık ölçüm sonuçları uyum göstermemiştir. İz detektörleri ile ölçüm süresi uzadıkça sonuçlardaki hata payı da artmaktadır. Bu durum uzun süre kullanılan iz detektörlerine bağlı bazı çevresel ve yapısal etkilerden kaynaklanmaktadır.

Evlerde ortalama yıllık radon yoğunluğunu ölçmek için bir yıl veya daha uzun süreli ölçüm yapmak gerekir ancak uzun süreli ölçüm yapmak pratik açıdan oldukça zordur. Filmlerin yerleştirilmesi, toplanması ve tekrar yenisinin verilmesi özel bir ilgi gerektirmektedir çünkü ölçüm süresi içinde bireyler başka illere veya mahallelere taşınabilmekte deneyde aksaklıklar oluşabilmektedir. 12 dönemlik ölçümlerde bir evde yıl boyunca yedekleri ile birlikte aynı anda 12 adet deney bardağı bulunmakta bu da evin bireylerinde deneye karşı isteksizlik oluşturmaktadır. Uzun süreli ölçümlerde, film üzerinde biriken toz ve neme bağlı yanlış veriler oluşabilmektedir. Diğer bir sorun ölçüm süresi uzadıkça detektörlerin alfa parçacıklarına gösterdiği duyarlılık azalmakta ve sonunda iz sayısı olması gerekenden daha az olmaktadır. Mevsimsel düzeltme faktörü kullanılarak kısa süreli ölçümlerle yıllık tahmini ortalama radon yoğunluğu bulunabilir. Eskişehir il merkezinde 2 yıl süreli yapılan ölçüm sonuçlarına göre 2 farklı mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır. Bunlardan ilki 4 dönemlik (kış, ilkbahar, yaz, sonbahar) ölçüm sonuçlarına göre, Mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanabilmesi için 12 dönemlik ölçümlere ihtiyaç vardır ancak 12 dönem evlerde ölçüm yapmak oldukça zordur. Ev içi radon yoğunluğu mevsimsel farklılık göstermektedir, radon yoğunluğunun genel eğilimi kış döneminde en fazla yaz döneminde en az olmasıdır. 4 dönemlik ölçüm sonuçlarının aylara göre grafiği çizildiğinde grafik sinüs dağılımına uyum göstermektedir. Eksik olan 8 veri sinüs fonksiyonu yardımı ile tahmin edilmiştir. Bu yolla 4 veriden 12 dönemlik mevsimsel

düzeltilme faktörü tahmin edilmiştir. Elde edilen mevsimsel düzeltilme faktörleri 0,7 ile 1,3 arasında değişim göstermektedir. Hesaplanan mevsimsel düzeltilme faktörleri mevsimsel değişim ile paralellik göstermektedir. İkinci aşamada, 2 yıl (2010-2012) boyunca, Eskişehir il merkezindeki evlerde yapılan 12 dönemlik ölçüm sonucuna göre (825 ölçüm yapılarak) mevsimsel düzeltilme faktörü hesaplanmıştır. İkinci aşamada her ayın 10 ile 15. günü detektörler evlere yerleştirilmiş 3 ay sonunda tekrar toplanıp yenileri yerleştirilmiştir. İkinci aşamada tüm hesaplamalar deney sonuçlarına göre yapılmış olup mevsimsel düzeltilme faktörleri 0,55 ile 1,45 arasında değişmektedir. Ölçüm sonuçları mevsimsel değişime uyum göstermektedir. Birinci ve ikinci aşamada yapılan ölçüm sonuçları kıyaslandığında değerler birbirine yakındır, bazı aylar için mevsimsel düzeltilme faktörleri belirgin farklılıklar göstermektedir. Her hangi bir yer için mevsimsel düzeltilme faktörü hesaplanacaksa 12 dönemlik ölçüm yapmak gerekir. 4 mevsim ölçüm yapıp eksik değerler sinüs fonksiyonu ile tahmin edilebilir ancak elde edilen mevsimsel düzeltilme faktörleri ayların gerçek değerini yansıtmayabilir.

Bu tez çalışmasında ayrıca Eskişehir il merkezinde farklı mahallelerden 10 adet toprak numunesi alınarak doğal gama radyasyon değeri incelenmiştir. Bu amaç için NaI(Tl) gama sintilasyon detektörü kullanılmış olup, numuneler Kütahya Dumlupınar Üniversitesi'nde analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre topraktaki potasyum aktivitesi (^{40}K) 150,07 ile 399,40 Bq/kg arasında, uranyumun (^{238}U) aktivitesi 14,12 ile 28,49 Bq/kg arasında, Toryumun (^{232}Th) aktivitesi 17,15 ile 29,77 Bq/kg arasında değişmektedir. Eskişehir il merkezinde topraktaki aktivitelere dolaylı hava içinde soğrulan doz hızı ortalama 37,16 nGy/h olarak hesaplanmıştır. UNSCEAR 2000 raporunda belirtilen küresel ölçüm sonuçlarına göre soğrulan karasal gama doz hızı 18-93 nGy/h arasında değişmekte olup dünya ortalaması 60 nGy/h olarak hesaplanmıştır. Eskişehir il merkezinde yapılan toprak analizi sonuçlarına göre soğrulan doz miktarı dünya ortalamasının altında ölçülmüştür.

Eskişehir il merkezinde 2010-2012 yılları arasında evlerde yapılan radon gazı ölçüm sonuçları istatistiksel test yöntemleri ile analiz edilmiştir. Evlerdeki radon yoğunluğunun log-normal dağılıma uyduğu Kolmogorov-Smirnov (K-S) testi ile doğrulanmıştır. Evlerde yapılan 4 mevsimlik ölçüm sonuçlarının ortalaması ile aynı evlerin yıllık ölçüm sonuçları tek grup t testi ile kıyaslanmıştır. Yapılan analize göre bir

yıl süreli ölçüm sonuçları ile mevsimsel ölçüm sonuçlarının ortalamaları arasında anlamsal farklılıklar olduğu görülmüştür. Mevsimsel ölçümlerden kış dönemi ile yaz dönemi radon gazı yoğunluk verileri aynı evler için bağımsız grup t testi ile analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre kış dönemi verileri ile aynı evlerin yaz dönemi verileri arasında ciddi anlamsal farklılıkların olduğu görülmüştür. Evlerdeki radon yoğunluğunun katlara göre değişimi varyans analizi (F testi) ile test edilmiştir. ANOVA test sonuçlarına göre katlardaki radon yoğunlukları arasında anlamsal farklılıklar gözlemlenmektedir. Katlara göre ayrıntılı radon yoğunluğu Tukey testi ile incelenmiştir.

Eskişehir ili merkezinde ev içi radon yoğunluğu ölçüm sürecinde, yapılan anketlere göre Eskişehir halkının doğal radyasyon konusunda bilgisi olmadığı anlaşılmıştır oysa radon sigaradan sonra akciğer kanserinin en büyük etmenidir. Yeni yapılan evlerde ısı yalıtımına çok önem verilmekte, dolayısı ile yüksek yalıtımlı evlerde radon yoğunluğu daha yüksek çıkmaktadır. Yalıtımlı evlerde doğal havalandırma çok zayıf olduğu için evlerdeki radon yoğunluğu mevsimsel değişime uyumsuzluk gösterebilmektedir. Bu tip evlerde kalan bireyler havalandırma konusunda bilinçlendirilmeli, özellikle yatak ve oturma odaları mutlaka düzenli olarak havalandırılmalıdır. Kısa süreli havalandırma ise radon problemini çözmekte, havalandırmanın kesilmesi ile kısa sürede radon yoğunluğu eski seviyesine gelmektedir. Ülkemizde doğal gaz kullanan evlerde mutfaklara menfez takılması kanuni bir zorunluluktur. Genel bir bilinçlenme ile tüm odalar aynı şekilde düzenli havalandırılabilir.

Ülkemizde şehir nüfusunun her geçen gün artması, gürültünün artması ve enerji fiyatlarının artması sonucu evler ısıya ve sese karşı yalıtımlı yapılmaktadır. Örneğin pencerelerin PVC, duvarların ısı yalıtımlı olması doğal havalandırmayı çok azaltmaktadır. Eğer gerekli bilinçlenme yapılamazsa gelecekte bina içi maruz kalınan radyasyon dozunun artacağı tahmin edilmektedir. Buna bağlı olarak radon gazına bağlı akciğer kanser vakaları da artabilir. Amerika ve Avrupa ülkelerinde evlerde radon yoğunlukları düzenli olarak ölçülmekte halk bilinçlendirilmektedir. Evlerin satışında radon gazı test sonucu istenmektedir. Ülkemiz deprem kuşağında olduğu için depreme dayanıklı binaların yapılması konusunda ciddi bilinçlenme olduğu halde radon gazı ve sağlık etkileri konusunda ulusal bir çalışma henüz yapılmamıştır. Binalar yapılırken zemin etüdü bir zorunluluktur ancak radonla ilgili herhangi bir test yapılmamaktadır.

Yeni binaların planlanması aşamasında topraktan gelen radon yoğunluğu hesaba katılmalı, inşaat yapım aşamasında radon gazını azaltıcı yönde havalandırma sistemleri kurulmalıdır. Önceden yapılmış evlerde ev içi radon yoğunluğunu azaltacak stratejiler geliştirilmelidir. Zemindeki çatlak ve kırıkların onarılması, evlerin düzenli olarak havalandırılması konusunda bireyler bilinçlendirilmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akkurt, Ahmet, 2006, Afyon Jeotermal Sularında Radon (Rn-222) Aktivitesi Tayini, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Akyıldırım, Hakan, 2005, Isparta İlinde Radon Yoğunluğunun Ölçülmesi Ve Haritalandırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Altınsöz, M., 2012, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Kampüsü Radon Yoğunluğu Ölçümü, Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Amrani, D. and Belgaid, M., 2001, Some Investigations And Use Of LR-115 Track Deectors For Radon Measurements, Radiation Physics And Chemistry, 61 pp. 639-641.
- Bale, W. F., 1951, Hazards Associated with Radon and Thoron, Memo. Div.Biol. and Med., Atomic Energy Commission, Washington, D. C. (March 14, 1951).
- Baysson, H., Billon, S., Laurier, D., Rogel, A., Tirmarche, M., 2003, Seasonal Correction Factors For Estimating Radon Exposure In Dwellings In France, Radiation Protection Dosimetry, 104 (3), 245-252.
- Biological Effects of Ionizing Radiation VI Report, 1999, Health effects of exposure to indoor radon BEIR, National Academy Press, Washington D.C.
- Bostancı, S. (2011), Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü ve Samsun il Merkezinin Doğal Radyoaktivite Seviyesinin Belirlenmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi,
- Bozkurt, A. and Kam, E., 2006, Indoor Radon Measurement In The City Of Edirne, Turkey, Sixth International Conference Of The Balkan Physical Union, Date: 22-26 Ap. Conf. Proc. 899, Pp. 395-396.
- Burke, Ó., Long, S., Murphy, P., Organo, C., Fenton, D., Colgan, P.A., 2010, Estimation Of Seasonal Correction Factors Through Fourier Decomposition Analysis - A New Model For Indoor Radon Levels In Irish Homes, Journal Of Radiological Protection., 30, 433-443.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Canbazoglu, C., Dogru, M., Celebi, N., Kopuz, G., 2012, Assessment Of Natural Radioactivity In Elazığ Region, Eastern Turkey, By Journal Of Radioanalytical And Nuclear Chemistry, ISSN 0236-5731, Volume 292, Issue 1, pp. 375 – 380.
- Çavaş, Mustafa., 2006, NaI(TI) Dedektörü İle Topraktaki Radyasyonun Ölçümü Ve Maruz Kalınan Dozların Hesabı, Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Celik, N., Poffijn, A., Cevik, U., Schepens, 2008, ²²²Radon Concentration In Dwellings Of The Kars Province In Turkey, Radiation Protection Dosimetry, ISSN 0144-8420 , Volume 128, Issue 4, pp. 432 – 436.
- Cohen, B.S. and Asgharian, B., 1990, Deposition Of Ultrafine Particles In The Upper Airways: An Empirical Analysis, J. Aerosol Sci. 21: 789.
- Davutoğlu, H., 2008, Radon Gazını Ölçme Metotları, Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Degerlier, M. and Celebi, N., 2008, The Indoor Radon Concentration In Adana, Radiation Protection Dosimetry, ISSN 0144-8420, Volume 131, Issue 2, p. 259.
- Değerlier, Meltem, 2007, Adana İli Ve Çevresinin Çevresel Doğal Radyoaktivitesinin Saptanması Ve Doğal Radyasyonların Yıllık Etkin Doz Eşdeğerinin Bulunması, Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Dilek, Mustafa, İşçi, Öznur, Atilla, Göktaş, 2010, “Uygulamalı İstatistik”, Muğla Üniversitesi Basımevi, Muğla, 239s.
- Doğru, Mahmut, Canbazoglu, Cumhuri, Celebi, Nilgün, Kopuz, Güner, 2005, Measurement Of Radon Concentration In Different Construced Houses And Terrestrial Gamma Radiation In Elazig, Turkey, Recent Advances In Multidisciplinary Applied Physics, ISBN 9780080446486, pp. 859 – 863.
- Dudenly, C.S., Wilson, D.L., Bertini, H., Gammage, R.B, and Otten, J.A., 1995, On The Reduction Of Error In Alpha Track Detector Measurements Of Indoor ²²²Rn, Health Phys. 69, pp. 501-507.
- Durrani, S. A. and Ilic, R., 1997, Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications to Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment, World Scientific.
- Elsevier, 1990, Radon In The Environment, Elsevier Science Publishers B.V., ISBN 0-444-88 163-8.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fields, P.R., Stein, L., and Zirin, M.H., 1962, Radon Fluoride, J. Amer. Chem. Soc. 84, 4164-4165.
- Fişne, A., 2002, Yeraltı Madenlerinde Radon Gazı Konsantrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi ve İşçi Sağlığı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gillmore, G. K., Phillips, P. S., and Denman, A. R., 2005, The Effects Of Geology And The Impact Of Seasonal Correction Factors On Indoor Radon Levels: a case study approach, J. Environ. Radioact. 84, 469–479.
- Grainger, P., Shalla, S. H., Preece, A. W., and Goodfellow, S. A., 2000, Home Radon Levels And Seasonal Correction Factors For The Isle Of Man, Phys. Med. Biol. 45, 2247–52.
- Groves-Kirkby C. J., Denman, A. R., Phillips, P. S., Crockett, R. G. M. and Sinclair, J. M., 2009, Seasonal Variation In European Radon Measurements, Geophys. Res. Abstr. 11 EGU2009-4351-1.
- Gunby, J.A., Darby, S.C., Miles, J.C.H., Green, B.M.R. and Cox, D.R., 1993, Factors Affecting Indoor Radon Concentrations In The United Kingdom, Health Physics, 64, 2-12.
- Güloğlu, Alper, 2007, Çeşme Bölgesi Aktif Fay Hatlarındaki Kaplıcalarda Radon Anomalileri İle Sismik Aktiviteler Arasındaki İlişkilerin İncelenmesi, Ege Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Moses, H., Stehney, A., and Lucas, H., 1960, The Effect Of Meteorological Variables Upon. Vertical And Temporal Distributions Of Atmospheric Radon, J. Geophys. Res., 65, 1223-1238.
- Harley, J. H., 1952, Sampling And Measurement Of Airborne Daughter Products Of Radon, Doctoral Dissertation (Rensselaer Polytechnic Institute).
- Heler, H. and Poulheim, K. F., 1992, Die Exposition Durch Radon und Seine Zerfallsprodukte in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung. Veröffentlichungen der strahlenschutzkommission, Band 19, Gustav Fischer Verlag, Studdgart (In German).
- Hesselbom, A., 1985, Radon In Soil Gas – A Study Of Metods And Instruments For Determining Radon Concentrations In The Ground, Geological Survey of Sweden, Serie C, No.83, pp. 1-58.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Homer, J.B., Miles, J.C.H., 1986, The Effects Of Heat And Humidity Before, During And After Exposure On The Response Of PADC (CR-39) To Alpha Particle, Nucl. Tracks. 12, 1-6, 133-136.
- IAEA, 1996., Instrumentation And Methods For Assessment Of Radon In The Indoor Environment,
- Jönsson, G., 1981, The Angular Sensitivity Of Kodak LR-Film To Alpha Particle, Nucl. Instr. Meth. 190, 407-414.
- Kaçaroğlu, F. and Günay, G., 1997, Groundwater Nitrate Pollution In An Alluvium Aquifer, Eskişehir Urban Area And Its Vicinity, Turkey, Environmental Geology, Volume 31, Numbers 3-4, 178-184, DOI: 10.1007/s002540050178.
- Kam, Erol, Yarar, Yasemin, Bozkurt, Ahmet A., 2010, Study Of Background Radioactivity Level For Tekirdag, Turkey Radiation Protection Dosimetry, Issn 0144-8420, Volume 138, Issue 1, pp. 40 – 44.
- Kapdan, E., Altınsoy, N., 2012, A Comparative Study Of Indoor Radon Concentrations Between Dwellings And Schools, Radiation Physics and Chemistry, 81 pp. 383–386.
- Karadeniz, Özlem, Yaprak, Günseli, Akal, Cüneyt And Emen, Ipek, 2011, Indoor Radon Measurements In The Granodiorite Area Of Bergama (Pergamon)-Kozak, Turkey, Radiation Protection Dosimetry, pp. 1–8.
- Kocuyigit, A., 2000, Orta Anadolu'nun Genel Neotektonik Özellikleri Ve Depremselliği, Haymana-Tuzgözü-Ulukışla Basenleri Uygulamalı Çalışma, (WORKSHOP), TPJD Special Issue 5, 1-26 (in Turkish with English abstract).
- Köksal, E. M., Çelebi, N., Ataksor, B., Ulug, A., Taşdelen, M., Kopuz, G., Akar, B. and Karabulut, M.T., 2004, A Survey Of ²²²Rn Concentrations In Dwellings Of Turkey, J. Radioanal. Nucl. Chem. 259(2), pp. 213–216.
- Krane, K. S., 1987, Introductory Nuclear Physics, Wiley, New York, pp. 160-236.
- Kraner, H.W., Adams, J. A. S., and Lowder, W. M., 1964, Measurements Of The Effects Of Atmospheric Variables On ²²²Rn Flux And Soil Gas Concentration, In Natural Radiation Environment, University Press, Chicago, pp. 191-190.
- Krewski, D., 2005, Residential Radon And Risk Of Lung Cancer: A Combined Analysis Of 7 North American Case-Control Studies, Epidemiology, 16:137-145.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kurnaz, A., Küçükömeroğlu, B., Cevik, U., and Celebi, N., 2011, Radon Level And Indoor Gamma Doses In Dwellings Of Trabzon, Turkey Applied Radiation And Isotopes: Including Data, Instrumentation And Methods For Use In Agriculture, Industry And Medicine, ISSN 0969-8043, Volume 69, Issue 10, pp. 1554 – 1559.
- Küçükömeroğlu, B., Kurnaz, A., Damla, N., Cevik, U., Celebi, N., Ataksor, B., and Taskin, H., 2009, Environmental Radioactivity Assessment For Bayburt, Turkey, J. Radiol. Prot. 29, pp. 417–428, doi:10.1088/0952-4746/29/3/006.
- Lubin, J. H., 2004, Risk Of Lung Cancer And Residential Radon In China: Pooled Results Of Two Studies, Int. J. Cancer, 109 pp. 132-137.
- Malmqvist, L., 1980, Radon Measurements With Alpha Track Film, A New Technique For Geological Surveys, Exploration And For Mapping Of Radiation. The Swedish Board For Technical Development, STU Report 77-3590 (IN Swedish).
- Mihci, Metin, Buyuksarac, Aydin, Aydemir, Attila, Celebi, Nilgun, 2010, Indoor And Outdoor Radon Concentration Measurements In Sivas, Turkey, In Comparison With Geological Setting Journal Of Environmental Radioactivity, ISSN 0265-931x, Volume 101, Issue 11, pp. 952 - 957.
- Mile, J.C.H., 1994, Mapping The Proportion Of The Housing Stock Exceeding A Radon Reference Level, Radiat. Prot. Dosim. 56, pp. 207-210.
- Miles J. C. H., 2001, Temporal Variation Of Radon Levels In Houses And Implications For Radon Measurement Strategies, Radiat. Protect. Dosim. 93, pp. 369–75.
- Möre, H., 1985, Radioactive Substance In Building Materials, Swedish Radiation Protection Institute, SSI-report 85-08.
- Murphy, P. and Organo, C., 2008, A Comparative Study Of Lognormal, Gamma And Beta Modeling In Radon Mapping With Recommendations Regarding Bias, Sample Sizes And The Treatment Of Outliers, J. Radiol. Prot. 28, pp. 293–302.
- Nero, A. V., Schwehr, M. B., Nazaroff, W. W., and Revzan, K. L., 1986, Distribution Of Airborne Radon-222 Concentrations In US Homes, Science, 234 992–7.
- NCRP 78, 1984, Evaluation Of Occupational And Environmental Exposures To Radon And Radon Daughters In The United States, National Council on Radiation Protection and Measurements.
- NCRP 97, 1988, National Council on Radiation Protection and Measurements; Measurements of Radon and Radon Daughters in Air, NCRP Report No. 97.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- NRPB, 1998, Living With Radiation, Fifth Edition, ISBN 085951-419-6.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Şahin, S. Y., Ataksor, B., And Çelebi, N., 2008, A Study Of Indoor Radon Levels In Rural Dwellings Of Ezine (Çanakkale, Turkey) Using Solid-State Nuclear Track Detectors, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 131, No. 3, pp. 379–384.
- Planinić, J., 1993, More About Track Etching Statistics, J. Radioanal. Nucl. Chem., 175: 95–101.
- Pinel, J., Fearn, T., Darby, S.C., and Miles, J.C.H., 1995, Seasonal Correction Factors For Indoor Radon Measurements In The United Kingdom, Radiat. Protec. Dosim. 58, pp. 127-132.
- Rose, A.W., Hutter, A.R., and Washington J.W., 1990, Sampling Variability Of Radon In Soil Gas, J. Geochem. Explorat. 38, pp. 173-191.
- RPII and NCRI, 2005, Health Risks Due To Exposure To Radon In Homes In Ireland, The Implications Of Recently Published Data Joint Statement By The Radiological Protection Institute Of Ireland And National Cancer Registry Of Ireland (Dublin: Radiological Protection Institute of Ireland), p. 10.
- Said, Rahman, Matiullah, B.M., 2010, Comparison Of Seasonal And Yearly Average Indoor Radon Levels Using CR-39 Detectors, Radiation Measurements, Volume 45, Issue 2, pp. 247–252.
- Stojanovska, Zdenka, Januseski, Jovan, Bossew, Peter, Zunic, Zora S, Tollefsen, Tore, Ristova, Mimoza, 2011, Seasonal Indoor Radon Concentration In FYR Of Macedonia, Radiation Measurements 46 , pp. 602-610.
- Swedish Radon Commission, 1983, Radon In Dwellings, SOU 1983.
- Tabar, Emre, 2010, Dikili ve Bergama Bölgelerindeki Tektonik Aktivitenin Jeotermal Sularda Radon Ölçümleri İle Değerlendirilmesi, Ege Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- The UK Childhood Cancer Study Investigators, 2000, The United Kingdom Childhood Cancer Study: Objectives, Materials And Methods Br. J. Cancer 82, pp. 1073–102.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ulug, Asiye, Karabulut, Melek, And Çelebi, Nilgün, 2004, Radon Measurements With Cr-39 Track Detectors At Specific Locations In Turkey, Nuclear Technology & Radiation Protection, Udc: 539.1.074:697.921:614.876 Biblid: 1451-3994, 19 (2004), 1, pp. 46-49.
- UNSCEAR, 1982, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Ionizing Radiation, Sources and Biological Effects (United Nations, New York).
- UNSCEAR, 1993, United Nations Scientific Committee On The Effects Of Atomic Radiation, Sources, Effects, And Risks Of Ionizing Radiation, United Nations Sales Publication No.E. 94.IX.2. New York.
- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee On The Effects Of Atomic Radiation Sources And Biological Effects Of Ionizing Radiation, 2000 Report, United Nations.
- Urban, M., 1986, Passive One Element Track Etch Detector For Simultaneous Measurement Of Radon, Thoron, And Decay Products In Air, Nucl. Tracks 12, pp. 685-688.
- URL-1. <http://www.taek.gov.tr>.
- URL-2. <http://www.tr.wikipedia.org/wiki/Eskişehir>.
- URL-3. <http://www.mgm.gov.tr/>.
- Üzbey, Sefa, 2009, Çorum İli Genelinde Faaliyet Gösteren Kömür Ocaklarındaki Radon Gazının Ölçülmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- WHO,2009, Handbook On Indoor Radon Is A Key Product Of The WHO International Radon Project, Which As Launched In 2005, ISBN 978 92 4 154767 3.
- Wrixon, A. D., Green, B. M. R., Lomas, P. R., Miles, J. C. H., Cliff, K. D., Francis, E. A., Driscoll, C. M. H., James, A. C. and O’Riordan M. C., 1988, Natural Radiation Exposure in UK Dwellings, Chilton NRPB-R190 (London: HMSO), p 188.
- Vaizoglu, S. and Guler, C., 1999, Indoor Radon Concentrations In Ankara Dwellings, Indoor and Built Environment, DOI: 10.1177-1420326X9900800508. pp. 327-331,

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vakkas, B., 2008, Niğde İlinde Bulunan Tarihi Mekanlardaki Radon Gazı Ölçümleri, Niğde Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Yarar, Y., Günaydi, T., and Celebi, N., 2006, Determination Of Radon Concentrations Of The Dikili Geothermal Area In Western Turkey, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 118, No. 1, pp. 78–81.
- Yaprak, Günseli, 1988, Uranyum Keşfi İçin Katı Hal İz Kazıma Dedektörleri İle Toprak Gazı Radon Ölçümü Ve Fiziksel Parametrelerin İncelenmesi, Ege Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi,
- Zdenka, Stojanovska., Jovan, Januseski., Peter, Bossew., Zora S. Zunic., Tore, Tollefsen., Mimoza, Ristova., 2011, Seasonal Indoor Radon Concentration In FYR Of Macodonia, Radiation Measurements, Volume 46, Issues 6–7, Pages 602–610.

EKLER

EK-A

Mevsimsel Düzeltme Faktörünün Hesaplanması İçin Gerekli Matlab Programı

Bu program mevsimsel $d_1, d_2, d_3, \dots, d_{12}$ değerleri (dönemlik radon yoğunluğunun geometrik ortalaması) hesaplandıktan sonraki bütün kısımları (mevsimsel düzeltme faktörü ve grafik çizimi) içermektedir. Programa d değerleri girildikten sonra mevsimsel m değerleri ve f değerleri otomatik olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca program mevsimsel düzeltme faktörünün aylara göre grafiğini çizerek çıktı olarak vermektedir.

%Bu Program Hacı Soğukpınar Tarafından Yazılmıştır.

%Programımız 12 adet mevsimsel d değerinin girilmesi ile başlamaktadır.

```
d1=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d1 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d2=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d2 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d3=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d3 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d4=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d4 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d5=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d5 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d6=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d6 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d7=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d7 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d8=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d8 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d9=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d9 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
d10=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d10 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
fprintf('\n');
```

```
d11=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d11 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
```

```
fprintf('\n');
```

```
d12=input('LÜTFEN MEVSİMSEL d12 DEĞERİNİ GİRİNİZ ');
```

```
fprintf('\n');
```

```
%Girilen d değerleri 12x1'lik bir d matrisinde depolanmaktadır.
```

```
d=[d1;d2;d3;d4;d5;d6;d7;d8;d9;d10;d11;d12];
```

```
%Aşağıda 12x12'lik X ve f matrisleri bulunmaktadır.
```

```
x=[1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1;
```

```
1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
```

```
0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0;
```

```
0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0;
```

```
0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0;
```

```
0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0;
```

```
0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0;
```

```
0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0;
```

```
0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0;
```

```
0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0;
```

```
0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1;
```

```
1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1];
```

```
f=[1,sin(2*pi/12),cos(2*pi/12);
```

```
1,sin(4*pi/12),cos(4*pi/12);
```

```
1,sin(6*pi/12),cos(6*pi/12);
```

```
1,sin(8*pi/12),cos(8*pi/12);
```

```
1,sin(10*pi/12),cos(10*pi/12);
```

```
1,sin(12*pi/12),cos(12*pi/12);
```

```
1,sin(14*pi/12),cos(14*pi/12);
```

```
1,sin(16*pi/12),cos(16*pi/12);
```

```
1,sin(18*pi/12),cos(18*pi/12);
```

```
1,sin(20*pi/12),cos(20*pi/12);
```

```
1,sin(22*pi/12),cos(22*pi/12);
```

```
1,sin(24*pi/12),cos(24*pi/12)];
```

```
%Aşağıdaki matris çarpımı ile ileride kullanacağımız ( $\beta_0$ ,  $\alpha_1$  ve  $\beta_1$ ) katsayıları bulunacaktır.
```

```
s=x*f;
```

disp('d = XFθ + ε');

% Aşağıdaki işlemle x ve f matrislerinin çarpımının sonucu çıktı olarak

% gösterilecektir (d = XF).

disp([d,s]);

%(β₀, α₁ ve β₁) değerlerinin hesaplanması için en küçük kareler yöntemi kullanılacaktır. Bu

% yöntemin matematiksel ispatı başka yerde yapıлып, burada sadece son aşama olan matris

% gösterimi bulunmaktadır.

% En küçük kareler yönteminde x değişkeninin 1 den 12 ye kadar olan değerlerinin toplamı:

x1=s(2)+s(5)+s(8)+s(11)+s(14)+s(17)+s(20)+s(23)+s(26)+s(29)+s(32)+s(35);

% En küçük kareler yönteminde y değişkeninin 1 den 12 ye kadar olan değerlerinin toplamı:

y1=s(3)+s(6)+s(9)+s(12)+s(15)+s(18)+s(21)+s(24)+s(27)+s(30)+s(33)+s(36);

% En küçük kareler yönteminde x'in karesinin 1 den 12 ye kadar olan değerlerinin toplamı (x

% in karesi x2 olarak gösterilmiştir).

x2=s(2)*s(2)+s(5)*s(5)+s(8)*s(8)+s(11)*s(11)+s(14)*s(14)+s(17)*s(17)+s(20)*s(20)+s(23)*s(23)+s(26)*s(26)+s(29)*s(29)+s(32)*s(32)+s(35)*s(35);

% En küçük kareler yönteminde y'nin karesinin 1 den 12 ye kadar olan değerlerinin toplamı

% y'nin karesi y2 olarak gösterilmiştir.

y2=s(3)*s(3)+s(6)*s(6)+s(9)*s(9)+s(12)*s(12)+s(15)*s(15)+s(18)*s(18)+s(21)*s(21)+s(24)*s(24)+s(27)*s(27)+s(30)*s(30)+s(33)*s(33)+s(36)*s(36);

% En küçük kareler yönteminde z değişkeninin 1 den 12 ye kadar olan değerlerinin toplamı:

z1=d(1)+d(2)+d(3)+d(4)+d(5)+d(6)+d(7)+d(8)+d(9)+d(10)+d(11)+d(12);

% En küçük kareler yönteminde x ve y değişkenlerinin çarpımının 1 den 12 ye kadar olan

% değerlerinin toplamı x1y1 değişkenine atanmıştır.

x1y1=s(2)*s(3)+s(5)*s(6)+s(8)*s(9)+s(11)*s(12)+s(14)*s(15)+s(17)*s(18)+s(20)*s(21)+s(23)*s(24)+s(26)*s(27)+s(29)*s(30)+s(32)*s(33)+s(35)*s(36);

% En küçük kareler yönteminde x ve z değişkenlerinin çarpımının 1 den 12 ye kadar olan

% değerlerinin toplamı x1z1 değişkenine atanmıştır.

x1z1=s(2)*d(1)+s(5)*d(2)+s(8)*d(3)+s(11)*d(4)+s(14)*d(5)+s(17)*d(6)+s(20)*d(7)+s(23)*d(8)+s(26)*d(9)+s(29)*d(10)+s(32)*d(11)+s(35)*d(12);

% En küçük kareler yönteminde y ve z değişkenlerinin çarpımının 1 den 12 ye kadar olan

% değerlerinin toplamı y1z1 değişkenine atanmıştır.

y1z1=s(3)*d(1)+s(6)*d(2)+s(9)*d(3)+s(12)*d(4)+s(15)*d(5)+s(18)*d(6)+s(21)*d(7)+s(24)*d(8)+s(27)*d(9)+s(30)*d(10)+s(33)*d(11)+s(36)*d(12);

% En küçük kareler yönteminde en son aşama katsayıların bulunması için Crammer teoremi

% kullanılacaktır.

% Aşağıda del, dela, delb, delc matrislerini tanımladık.

del=[36,x1,y1;3*x1,x2,x1y1;3*y1,x1y1,y2];

dela=[z1,x1,y1;x1z1,x2,x1y1;y1z1,x1y1,y2];

delB=[36,z1,y1;3*x1,x1z1,x1y1;3*y1,y1z1,y2];

delC=[36,x1,z1;3*x1,x2,x1z1;3*y1,x1y1,y1z1];

A=det(dela)/det(del);

B=det(delB)/det(del);

C=det(delC)/det(del);

% Aşağıda β_0 , α_1 ve β_1 değerleri bir çıktı olarak gösterilmiştir.

disp('β₀, BETA SIFIR DEĞERİ');

disp(A);

disp('α₁, ALFA BİR DEĞERİ');

disp(B);

disp('β₁, BETA BİR DEĞERİ');

disp(C);

% Aşağıda β_0 , α_1 ve β_1 katsayıları kullanılarak mevsimsel m değeri hesaplanacaktır. Bu

% değerler mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanmasında kullanılacaktır.

m1=A+B*sin(2*pi/12)+C*cos(2*pi/12);

m2=A+B*sin(4*pi/12)+C*cos(4*pi/12);

m3=A+B*sin(6*pi/12)+C*cos(6*pi/12);

m4=A+B*sin(8*pi/12)+C*cos(8*pi/12);

m5=A+B*sin(10*pi/12)+C*cos(10*pi/12);

m6=A+B*sin(12*pi/12)+C*cos(12*pi/12);

m7=A+B*sin(14*pi/12)+C*cos(14*pi/12);

m8=A+B*sin(16*pi/12)+C*cos(16*pi/12);

m9=A+B*sin(18*pi/12)+C*cos(18*pi/12);

m10=A+B*sin(20*pi/12)+C*cos(20*pi/12);

m11=A+B*sin(22*pi/12)+C*cos(22*pi/12);

m12=A+B*sin(24*pi/12)+C*cos(24*pi/12);

% Aşağıda her bir ay için mevsimsel düzeltme faktörü hesaplanmıştır.

f1=(m1+m2+m3+m4+m5+m6+m7+m8+m9+m10+m11+m12)/(m12+m1+m2)/4;

f2=(m1+m2+m3+m4+m5+m6+m7+m8+m9+m10+m11+m12)/(m1+m2+m3)/4;

$f_3=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_2+m_3+m_4)/4;$
 $f_4=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_3+m_4+m_5)/4;$
 $f_5=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_4+m_5+m_6)/4;$
 $f_6=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_5+m_6+m_7)/4;$
 $f_7=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_6+m_7+m_8)/4;$
 $f_8=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_7+m_8+m_9)/4;$
 $f_9=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_8+m_9+m_{10})/4;$
 $f_{10}=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_9+m_{10}+m_{11})/4;$
 $f_{11}=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_{10}+m_{11}+m_{12})/4;$
 $f_{12}=(m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7+m_8+m_9+m_{10}+m_{11}+m_{12})/(m_{11}+m_{12}+m_1)/4;$
%Aşağıda her bir ay için hesaplanan mevsimsel düzeltme faktörünün çarpma işlemine göre
%tersi alınmıştır.

$f_1=1/f_1;$
 $f_2=1/f_2;$
 $f_3=1/f_3;$
 $f_4=1/f_4;$
 $f_5=1/f_5;$
 $f_6=1/f_6;$
 $f_7=1/f_7;$
 $f_8=1/f_8;$
 $f_9=1/f_9;$
 $f_{10}=1/f_{10};$
 $f_{11}=1/f_{11};$
 $f_{12}=1/f_{12};$

%Aşağıda her bir ayın düzeltme faktörü ayrı ayrı çıktı olarak verilmiştir.

disp('OCAK AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f1);
disp('ŞUBAT AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f2);
disp('MART AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f3);
disp('NİSAN AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f4);

```

disp('MAYIS AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f5);
disp('HAZİRAN AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f6);
disp('TEMMUZ AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f7);
disp('AĞUSTOS AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f8);
disp('EYLÜL AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f9);
disp('EKİM AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f10);
disp('KASIM AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f11);
disp('ARALIK AYI DÜZELTME FAKTÖRÜ');
disp(f12);
%Aşağıda her bir ay, aylık d değerleri, aylık m değerleri, mevsimsel düzeltme
%faktörü ayrı ayrı sütunlar şeklinde çıktı olarak verilmiştir.
mm=[m1;m2;m3;m4;m5;m6;m7;m8;m9;m10;m11;m12];
ff=[f1;f2;f3;f4;f5;f6;f7;f8;f9;f10;f11;f12];
ay=char('Ocak','Subat','Mart','Nisan','Mayis','Haziran','Temmuz','Agustos','Eylul','Ekim','Kasim','
Aralik');
disp(ay);
disp('Aylık d degerleri Ocak-Aralık');
disp(d);
disp('Aylık m degeri Ocak-Aralık');
disp(mm);
disp('Aylık f degeri Ocak-Aralık');
disp(ff);
aay=[1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;11;12];
%Burada ise aylar 1,2,3... şeklinde, d değerleri, m değerleri ve f değerleri tek tabloda
%verilmiştir.
disp([' Aylar   ','d_değeri  ','m_değeri  ','f_değeri']);
disp([aay,d,mm,ff]);

```

%Aşağıda mevsimsel düzeltme faktörünün aylara göre grafiği çıktı olarak verilmiştir, aynı
%zamanda grafik içinde İrlanda'da hesaplanmış olan mevsimsel düzeltme faktörünün grafiği
%de bulunmaktadır.

```
ir=[1.14,1.14,1.10,1.04,0.97,0.89,0.86,0.86,0.89,0.96,1.04,1.10];
```

```
%İrlanda için hesaplanan düzeltme faktörleri:
```

```
x=1:1:12;
```

```
f=[f1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,f8,f9,f10,f11,f12];
```

```
plot(x,f,x,ir,'r--');
```

```
legend('Eskisehir','ir');
```

```
axis([1,12,0.6,1.6]);
```

```
xlabel('ÖLÇÜM YAPILAN AYLAR OCAK-ARALIK');
```

```
ylabel('MEVSİMSEL DÜZELTME FAKTÖRÜ');
```

```
title('MEVSİMSEL DÜZELTME FAKTÖRÜNÜN AYLARA GÖRE DEĞİŞİM GRAFİĞİ')
```

```
grid on
```

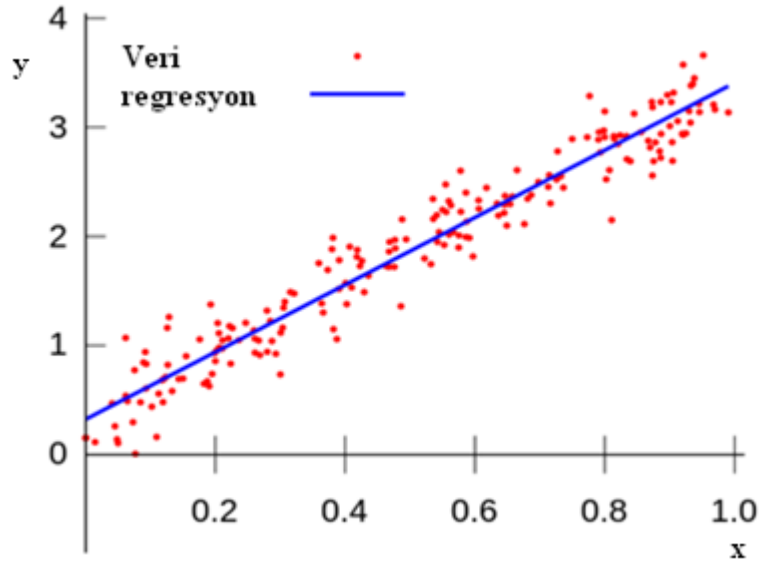
EK-B

En Küçük Kareler Yöntemi (OLS)

Birbirine bağılı olarak değişen iki büyüklük arasındaki bağlantıyı matematiksel olarak gerçeğe uygun bir denklem olarak yazmak için kullanılan standart bir yaklaşım yöntemidir. Başka bir deyişle bir ölçüm sonucunda elde edilen pek çok noktadan gerçeğe en yakın fonksiyon eğrisini bulmaya yarar. Basitçe ifade etmek istersek aralarında doğrusal bir bağlantı bulunan X ve Y adında iki fiziksel büyüklük düşünelim. İki denklem arasındaki doğrusal bağlantı Denklem B.1'deki gibi ifade edilebilir. Burada Denklem B.1 deneysel veriler ile fit edilerek, deneysel verilere en uygun eğriyi tanımlayan a ve b parametreleri belirlenir

$$Y=aX+b \quad (B-1)$$

Deneysel verilerin çok sayıda x_i, y_i çifti oluşturduğunu düşünerek Şekil B-1'deki grafiği çizelim.



Şekil B-1. Herhangi bir ölçüm sonucunda elde edilen verilere bağlı x, y dağılımı.

Kartezyen düzlemde bu çiftlere (x_i, y_i) karşılık gelen noktalar tek tek işaretlenirse düz bir çizgi üzerine yayılmış bir noktalar bulutu elde edilir. Bu noktalardan geçen lineer eğrinin çiziminde deneysel verilerin ağırlıklı katkıları gözetilir. Elde edilen doğru denklemi a ve b katsayılarının cevabını içinde barındırır. En küçük kareler yöntemi, denklemin verdiği y değerleri ile ölçümlerin verdiği y değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamının küçültülmesi fikrine dayanır. Bu yöntem denklemdaki a ve b sayılarını bahsedilen kareler toplamını en küçük yapacak şekilde ayarlar.

Kendi deneysel çalışmamızda mevsimsel düzeltme faktörünün hesaplanması için gerekli olan aylık m_i değerlerinin bulunması gerekir. Bu değerlerin bulunmasında fourier ayrıştırma analizi kullanılır. Fourier ayrıştırma analizinin kullanılabilmesi için bilinmeyen katsayıların (β_0, α_1 ve β_1) bulunması gerekir (Bölüm 3.11). Bu katsayıların bulunmasında en küçük kareler yöntemi kullanılır. Metot içindeki (Denklemler 3.11) matris hesabı ile Denklem B-2'deki gibi 12 adet denklem elde edilir.

$$d_i = 3\beta_0 + x_i \alpha_1 + y_i \beta_1 \quad (\text{B-2})$$

Burada, $d_i = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_{12})$, $x_i = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{12})$, $y_i = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_{12})$ aralığında değerler alır. Bu durumda i. gözlemdeki x_i değerinden hesaplanan $d_i = 3\beta_0 + x_i \alpha_1 + y_i \beta_1$ değeri ile gözlemden elde edilen gerçek d_i değeri arasındaki farkı minimum olacak şekilde bir doğru denklemi bulmak istenirse i. gözlemdeki fark Denklem B-3'deki gibi ifade edilir.

$$u_i = d_i - (3\beta_0 + x_i \alpha_1 + y_i \beta_1) \quad (\text{B-3})$$

Bu fark (+) veya (-) olabileceğine göre teorik fonksiyonun göstereceği doğru en uygun doğru olmayabilir. Bu nedenle farklar yerine farkların kareleri toplamının minimum olması şartını sağlayan fonksiyonu belirlemek gerekir.

$$S_i = \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad (\text{B-4})$$

$$S_i = \sum_{i=1}^n (d_i - (3\beta_0 + x_i \alpha_1 + y_i \beta_1))^2 \quad (\text{B-5})$$

Denklem B-5'de S, β_0, α_1 ve β_1 'e bağlı olarak değişecektir. S'nin β_0, α_1 ve β_1 'e göre kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenirse Denklem B-6, B-7 ve B-8 elde edilir.

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_0} = 0, \quad \sum_{i=1}^n 3\beta_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_1 x_i + \sum_{i=1}^n \beta_1 y_i = \sum_{i=1}^n d_i \quad (\text{B-6})$$

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_1} = 0, \quad \sum_{i=1}^n 3\beta_0 x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_1 x_i^2 + \sum_{i=1}^n \beta_1 x_i y_i = \sum_{i=1}^n x_i d_i \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = 0, \quad \sum_{i=1}^n 3\beta_0 y_i + \sum_{i=1}^n \alpha_1 x_i y_i + \sum_{i=1}^n \beta_1 y_i^2 = \sum_{i=1}^n d_i y_i \quad (\text{B.8})$$

Denklem B-6, B-7 ve B-8 matris formunda Denklem B-9 gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} 3n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n 3x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n 3y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \alpha_1 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n d_i \\ \sum_{i=1}^n x_i d_i \\ \sum_{i=1}^n y_i d_i \end{bmatrix} \quad (\text{B-9})$$

Bu matrisin hesaplanmasında Çizelge B-1’de oluşturulan veriler kullanılır.

Çizelge B.1. En küçük kareler yönteminde kullanılan veriler.

N	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	d_i	$x_i d_i$	$y_i d_i$
1							
2							
3							
.							
.							
.							
N							
$\sum_{i=1}^n$	$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n y_i$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$	$\sum_{i=1}^n y_i^2$	$\sum_{i=1}^n d_i$	$\sum_{i=1}^n x_i d_i$	$\sum_{i=1}^n y_i d_i$

Tabloda bilinmeyenlerin hesaplanması için deneysel olarak elde edilen veriler kullanılır. 12 dönemlik ev içi radon gazı ölçüm sonuçlarından 12 adet mevsimsel d_i değeri elde edilir. Bu veriler kullanılarak oluşturulan matris denklemi (Denklem 3.11) çözüldüğü zaman Denklem B-10’daki gibi 12 adet eşitlik elde edilir. Bu denklemlerden yararlanılarak tablodaki veriler matematiksel olarak hesaplanır.

$$d_i = 3\beta_0 + x_i \alpha_1 + y_i \beta_1 \quad (\text{B-10})$$

Tablo içindeki her bir sütün kendi içinde toplanır. Cramer Kuralı ile B-9'daki sistemin çözümü için Denklem B-11, B-12, B-13 ve B-14'deki determinantlar elde edilir.

$$\Delta = \begin{bmatrix} 3n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n 3x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n 3y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B-11})$$

$$\Delta\beta_0 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n d_i & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i d_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i d_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B-12})$$

$$\Delta\alpha_1 = \begin{bmatrix} 3n & \sum_{i=1}^n d_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n 3x_i & \sum_{i=1}^n x_i d_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n 3y_i & \sum_{i=1}^n y_i d_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B-13})$$

$$\Delta\beta_1 = \begin{bmatrix} 3n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n d_i \\ \sum_{i=1}^n 3x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i d_i \\ \sum_{i=1}^n 3y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i d_i \end{bmatrix} \quad (\text{B-14})$$

Hesaplanan 4 adet matris kullanılarak bilinmeyen katsayılar Denklem B-15'deki eşitlikler yardımı ile bulunur.

$$\beta_0 = \frac{\Delta\beta_0}{\Delta}, \quad \alpha_1 = \frac{\Delta\alpha_1}{\Delta}, \quad \beta_1 = \frac{\Delta\beta_1}{\Delta} \quad (\text{B-15})$$

EK-C

İyonlaştırıcı Radyasyon Doz Birimleri

İyonlaştırıcı radyasyonların etkileri ortama aktardıkları enerji miktarına bağlıdır. İyonlaştırıcı radyasyon ortamda atom ve molekülleri iyonlaştırarak enerjisini aktarır. İyonlaştırıcı radyasyonların etkilerinin araştırılabilmesi için öncelikle radyasyon birimlerinin tanımlanması gerekir. Uluslararası Radyasyon Birimleri Komisyonu (ICRU) 1925 yılından bu yana yaptığı çalışmalar neticesinde aktivite, ışınlama dozu, soğrulma dozu ve doz eşdeğeri için özel birimler tanımlamıştır. Komisyonun yaptığı çalışmalar neticesinde soğrulan doz için Rad, ışınlama dozu için Röntgen, aktivite birim için Curie, doz eşdeğeri için birim olarak Rem'i tanımlamıştır. MKS birim sistemini esas alan Uluslar Arası Birimler Sisteminin (SI) kabul edilmesi ile ICRU 1971 yılında SI radyasyon birimlerini yeniden tanımlamıştır. SI birim sistemine göre aktivite için Becquerel (Bq), ışınlama dozu için Coulomb/kg, soğrulan doz için Gray (Gy), doz eşdeğeri için ise Sievert (Sv) tanımlanmıştır.

Aktivite birimi

Radyoaktif maddenin belirli bir zaman aralığındaki bozunma miktarıdır. Aktivite SI birim sisteminde Becquerel (Bq) geleneksel birim sisteminde Curie (Ci)'dir. 1 Becquerel bir saniyedeki bozunma sayısına eşittir.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ bozunma.s}^{-1} \quad (\text{C-1})$$

Aktivite birimi ilk başta radyumun aktifliğinden yararlanılarak ifade edilmiştir. Buna göre 1 gram radyumun bozunma hızı birim olarak tanımlanmıştır, daha sonra 1 gram radyumla dengede olan radon gazı miktarında 1 saniyedeki bozunma hızı olarak değiştirilmiştir. O süreçte radyumun atom ağırlığının ve bozunma sabitinin çok hassas tayinleri yapılamamış olduğundan aktivite tarifinin radyumdan bağımsız olarak yapılma fikri oluşmuştur. Uluslararası Standart Ve Radyoaktivite Birimleri Komisyonu tanımı genişleterek bütün radyonüklitler için 1 Curie (Ci)'yi bir saniyede $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma olarak tanımlamıştır. Buna göre:

$$1 \text{ Bq} = 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ci ve ya } 1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq'dir.} \quad (\text{C-2})$$

Işınlama birimi

X ve gama ışınlarının havada iyonlaştırdıkları yük miktarının bir ölçüsüdür. Burada geleneksel birim Röntgen (R)'dir. 1R normal şartlarda (0 °C sıcaklık, 76 cmHg hava basıncı) 1 kg havada $2,58 \times 10^{-4}$ C'luk yük (+ ve -) oluşturan X ve γ ışın miktarıdır. SI birim sisteminde ışınlama birimi olarak Coulomb/kg (C/kg) kullanılır. 1 C/kg normal şartlarda (0 °C sıcaklık, 76 cmHg hava basıncı) 1 kg havada 1 C yük (+ ve -) iyonlaştıran X ve γ ışın miktarına eşittir.

$$1 R = 2,58 \times 10^{-4} C \text{ ve } 1 C/kg = 3,876 \times 10^3 R. \quad (C-3)$$

Soğrulan doz birimi

İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan maddelerin enerji soğurma hızları birbirinden farklıdır. Buna göre farklı maddelerin radyasyon kaynaklarından soğurdukları enerji miktarının tanımlanmasında bir standardın olması gerekir. Bu niceliğe soğrulan doz denir. Soğrulan doz birim kütlede maddeye verilen enerji miktarıdır. Soğrulan dozun geleneksel birimi Rad'dır. 1 Rad 1 gram madde tarafından soğrulan 100 erg'lik enerji miktarına eşittir. Bu doz birimi sadece soğrulan enerji miktarını gösteren hem parçacık hem de foton özellikli radyasyonlara uygulanabilen birimdir. SI birim sisteminde soğrulan doz birimi gray (Gy)'dir. 1 Gy 1 kg madde tarafından soğrulan 1 joule enerjiye eşittir. 1 Gy 100 rad'a eşittir.

Doz eşdeğeri

Bazı radyasyon tipleri enerjilerini uzun bir yol boyunca ortama aktarırken bazıları çok kısa bir mesafede aktarır. Örneğin alfa (α) parçacığı enerjisini çok kısa bir mesafede ortama aktarırken beta (β) ve gama (γ) ışınları daha uzun bir yol boyunca aktarır. Hücrelerin 1 rad'lık α radyasyonundan hasar görme miktarı 1 rad'lık γ radyasyonuna göre daha fazladır. Farklı radyasyon tiplerinden (α , β , γ) gelen eşit enerjili miktarlarının hücre üzerindeki farklı biyolojik etkilerinin tanımlanması gerekir. Bu farklılıkların nicel olarak belirlenebilmesi için belirli bir radyasyon dozunun aynı biyolojik etkiyi yapan X ışın dozuna oranı olarak bağıl biyolojik etki (RBE) kavramı tanımlanır. Alfa radyasyonu için RBE 1'den 20'ye kadar değer alır. RBE'nin ölçülmesi zor olduğu için onun yerine birim mesafede aktarılan enerjiye bağlı kalite

faktörü (QF) tanımlanır. Birim mesafede az enerji aktaran β ve γ ışınları için kalite faktörü yaklaşık 1'e eşittir. Birim uzunluk başına çok enerji aktaran α 'lar için kalite faktörü 1'den 20'ye kadar değişir. Çizelge C-1'de soğrulan bazı radyasyon tipleri için kalite faktörleri verilmiştir.

Çizelge C-1 Farklı radyasyon türleri için kalite faktörleri.

Radyasyon	Kalite Faktörü (QF)
X ışınları, β , γ	1
Düşük enerji p, n (~keV)	2-5
Yüksek enerjili p,n (~MeV)	5-10
α	20

Belirli bir radyasyonun türünün biyolojik sistemler üzerindeki etkisi soğrulan doz (D) ve kalite faktörüne (QF) bağlıdır. Doz eşdeğeri (DE) bu iki niceliğin çarpılması sonucu bulunur.

$$DE=D.QF \quad (C-4)$$

Doz radyan biriminde ölçülürse doz eşdeğeri rem biriminde ifade edilir. Soğrulan doz için gray kullanılırsa doz eşdeğeri sievert (Sv) biriminde ifade edilir.

$$1 \text{ Sv}=100 \text{ rem.} \quad (C-5)$$

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Malatya'nın Güzelyurt beldesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya'da tamamladı. 2001 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik bölümünden mezun oldu. 2008 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümü'nde doktora eğitimine başladı.