

KÜTAHYA İLİ İÇME SULARINDA RADON VE
RADYUM MİKTARLARININ BELİRLENMESİ

Hakan ÇETİNKAYA

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Haziran-2009

**KÜTAHYA İLİ İÇME SULARINDA RADON VE RADYUM MİKTARLARININ
BELİRLENMESİ**

Hakan ÇETİNKAYA

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

Haziran – 2009

KABUL ve ONAY SAYFASI

Hakan ÇETİNKAYA'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Kütahya İli İçme Sularında Radon ve Radyum Miktarının Belirlenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

...../...../2009

Üye: Doç. Dr. Emel ALGIN

Üye: Yrd. Doç. Dr. Kaan MANİSA

Danışman Üye: Yrd. Doç. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun/...../2009 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

KÜTAHYA İLİ İÇME SULARINDA RADON VE RADYUM MİKTARLARININ BELİRLENMESİ

Hakan ÇETİNKAYA

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

ÖZET

Sulardaki ^{222}Rn ve ^{226}Ra 'yı belirlemenin pek çok yöntemi vardır. Bu çalışmada Kütahya ili içme sularından toplanan 30 örneğin Radon-222 ve Radyum-226 konsantrasyonları Kollektör yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca örnekleme esnasında pH, iletkenlik, su sıcaklığı, basınç, nem ve yükseklik değerleri örneklerin koordinatlarına göre ölçülmüştür. ^{222}Rn ve ^{226}Ra konsantrasyonlarının etkin doz miktarları hesaplanmıştır.

Yaptığımız çalışmanın sonunda, radon ve radyum konsantrasyonlarını USEPA ve diğer sağlık örgütlerince verilen sınır değerlerle karşılaştırdığımızda bazı noktalarda radon konsantrasyonunun bu limitlerden yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doz, İçme suyu, Radon, Radyum.

**DETERMINATION OF RADON AND RADIUM CONCENTRATIONS IN THE
DRINKING WATER AROUND THE KUTAHYA CITY**

Hakan ÇETİNKAYA

Physics Department, M.S Thesis, 2009

Thesis Supervisor Asist Doç. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN

SUMMARY

There are many methods to determine ^{222}Rn and ^{226}Ra concentration in waters. In this study, the Rn-222 and Ra-226 concentrations of 30 samples collected from the drinking water of Kütahya city were determined by using the Collector Chamber Method. Additionally, pH, conductivity, water temperature, pressure, humidity, and elevation values were measured according to sampling coordinates during sample survey.

As a result of this study, when we compared our results with USEPA and other international health organizations limits, the radon concentrations in some sampling points were determined higher than these limits.

Key Words: Dose, Drinking water, Radium, Radon.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana yardımcı olan başta danışmanım Yrd. Doç. Dr. Latife ŞAHİN-YALÇIN'a, yaptığım çalışmalarda her türlü desteği sağlayan Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Müslim Murat SAÇ'a, benden maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, tez çalışmamda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Dumlupınar Üniversitesi ve Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitü'sündenki çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.¹

Hakan ÇETİNKAYA

¹ Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 2008-16 no'lu "Kütahya ili Termal sularda ve Kapalı mekanlarda Radon ölçümü" isimli proje ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. RADYOAKTİVİTE.....	5
2.1 Birimler.....	5
2.2 Yarı Ömür ve Bozunma Sabiti	6
2.3 Ortalama Yaşam süresi.....	7
2.4 Radyoaktif Denge	7
2.5 Enerji Seviyesi Diyagramları.....	11
3. RADYOAKTİF BOZUNMA TIPLERİ.....	13
3.1 Bozunma Modları.....	13
3.2 Alfa Bozunması	13
3.3 β^- Bozunması.....	15
3.4 Gama Yayınlanması	16
3.5 Beta Artı Bozunması (Pozitron Yayınlanması)	16
3.6 Elektron Yakalama	17
4. RADYASYON KAYNAKLARI.....	18
4.1 Radyasyon	18
4.2 Doğal Radyasyon Kaynakları.....	19

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2.1 Kozmik radyasyon.....	20
4.2.2 Karasal radyasyon	20
4.2.3 Dahili radyasyon.....	20
4.2.4 Yapay radyasyon kaynakları	21
5. RADYOAKTİF SERİLER.....	22
5.1 Toryum Serisi.....	23
5.1.1 Toryum serisinin bozunma ürünleri	25
5.2 Radyum Serisi	26
5.2.1 Radyum serisinin bozunma ürünleri.....	27
5.3 Aktinyum Serisi.....	28
5.3.1 Aktinyum serisini oluşturan ürünler	29
5.4 Neptünyum Serisi	30
5.4.1 Neptünyum serisini oluşturan elementler	31
6. RADYUM VE RADON	32
6.1 Radyum.....	32
6.2 Radon.....	33
6.2.1 İçme sularında radon	35
6.2.2 Sudaki radonun kapalı ortama transferi.....	36
7. DENEYSEL ÇALIŞMA	38
7.1 Örnekleme Alanı	38
7.2 Örnekleme İşlemi	40
7.3 Kollektör Yöntemi.....	40
7.3.1 Kullanılan alfa sayım cihazı	42
7.3.2 En düşük belirlenebilir aktivite	42
7.4 İçme Suları Radon Ölçümleri.....	42
7.4.1 İçme suları radon hesaplamaları.....	42
7.4.2 İçme sularından gelen radon doz katkısı hesaplamaları	43
7.5 İçme Suları Radyum Ölçümleri.....	44
7.5.1 İçme suları radyum hesaplamaları.....	44
7.5.2 İçme sularında radyumdan gelen doz katkısı hesaplamaları	45
7.6 İçme Sularında pH Ölçümleri.....	45

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.7 İçme Sularında İletkenlik Ölçümleri	46
7.8 İçme Sularının Sıcaklık Ölçümleri	46
7.9 Nem, Basınç, Yükseklik Ölçümleri	46
8. DENEYSEL SONUÇLAR.....	47
8.1 İçme Sularının Radon Konsantrasyonları.....	47
8.2 İçme Sularının Radyum Konsantrasyonu	51
8.3 İçme Sularındaki Radon ve Radyumun Sindirilmesi ile Meydana Gelen Doz katkısı	54
8.4 İçme Sularında Yapılan Diğer Ölçümler	56
9. SONUÇ VE TARTIŞMA	66
KAYNAKLAR DİZİNİ	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. ^{226}Ra ve ürünü ^{222}Rn arasındaki ikincil denge durumu.	9
2.2. ^{140}Ba ve ürünü ^{140}La arasındaki geçici denge durumu.....	10
2.3. ^{146}Ce ve ürünü ^{146}Pr arasında dengenin olmaması durumu.	11
2.4. $^{32}_{15}\text{P}$ Enerji seviye diyagramı.	12
2.5. $^{19}_8\text{F}$ Enerji seviyesi diyagramı.....	12
3.1. U-238'in alfa bozunmaları için enerji seviyeleri.....	14
4.1. Radyasyon dozunun kaynakları.	19
5.1. Toryum serisi.	24
5.2. Radyum serisi.....	26
5.3. Aktinyum serisi	28
5.4. Neptünyum serisi.	30
6.1. Radon ve radon bozunma ürünleri.	34
7.1. Örnekleme noktaları.....	38
7.2. Kollektör sisteminin şematik gösterimi.....	40
8.1. Kütahya ili içme suları radon konsantrasyonları.....	50
8.2. Kütahya ili içme suları radon konsantrasyonları sıklık dağılımı.....	51
8.3. Kütahya ili içme suları radyum konsantrasyonları.....	53
8.4. Kütahya ili içme suları radyum konsantrasyonları sıklık dağılımı.....	54
8.5. Kütahya ili içme suları pH ölçümleri.	58
8.6. Kütahya ili içme sularının pH değeri sıklık dağılımı.	59
8.7. Kütahya ili içme suları iletkenlik grafiği.....	60
8.8. Kütahya ili içme suları iletkenlik değeri sıklık dağılımı.	61
8.9. Radon-radyum arasındaki lineer korelasyon.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.10. Radyum-pH arasındaki lineer korelasyon	63
8.11. Radyum-su sıcaklığı arasındaki lineer korelasyon.....	64
8.12. Radyum-iletkenlik arasındaki lineer korelasyon.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Q kalite faktörü	6
5.1. Radyoaktif bozunma çeşitleri.....	23
5.2. Toryum serisi bozunma ürünleri.....	25
5.3. Radyum serisi bozunma ürünleri.....	27
5.4. Aktinyum serisi bozunma ürünleri.....	29
5.5. Neptünyum serisi bozunma ürünleri.....	31
7.1. Kütahya ili içme suları örnekleme noktaları.....	39
8.1. Kütahya ili içme sularındaki radon konsantrasyonu.....	48
8.2. Kütahya ili içme suları radyum konsantrasyonu.....	52
8.3. Kütahya ili içme sularından gelen etkin doz katkısı.....	55
8.4. Kütahya ili içme sularında yapılan anlık ölçümler.....	57
8.5. Ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Q	Enerji
n	Nötron
p	Proton
e ⁻	Elektron
$\bar{\nu}$	Antinötrino
ν	Nötrino
α	Alfa
β^-	Beta eksi bozunması
β^+	Beta artı bozunması
ec	Elektron Yakalama
γ	Gama
MeV	Mega Elektronvolt
Sv	Sievert
Bq	Becquerel

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
USEPA	A.B.D. Çevre Koruma Ajansı
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
UNSCEAR	B.M. Radyasyon Etkisi Komitesi
MDA	Belirlenebilir En düşük Aktivite

1. GİRİŞ

Radyasyon, yaşadığımız dünyanın ayrılmaz bir parçasıdır. İtiğimiz sudan soluduğumuz havaya kadar her yerde bulunur. İnsanlar doğal ve yapay yollar ile radyasyona maruz kalırlar. İnsanların maruz kaldığı doza %81'lik katkı doğal kaynaklardan gelmektedir. Alınan doza yapay radyasyon kaynaklarından gelen katkı %19'dur. Toplam doz miktarıyla karşılaştırıldığında doğal kaynakların dörde bir gibi fazlalığı olduğu görülmektedir. Doğal olarak aldığımız radyasyonun büyük bir kısmı radon isimli bir gazdan gelmektedir.

Doğal olarak bulunan uranyum ve bunun bozunma ürünlerinden radyum, radon gibi alfa yayımlayan parçacıklar sağlığımız açısından önemli bir risktir. Alfa yayımlayan radyoaktif maddelerin doğrudan vücuda alınması veya solunması durumunda, bu maddeler dokularda hasara yol açabilir, bu da ömür boyu kanser riskini ortaya çıkartır.

Radyum, yarı ömrü 1600 yıl olan, uranyum bozunma zincirinde bulunan alfa yayımlayan bir elementtir. Vücuda alınması durumunda kemiklerde birikerek kemik kanseri riski oluşturmaktadır.

Radon, yarı ömrü 3,8 gün olan, uranyum bozunma zincirinin bir parçası olan radyumun kayalarda ve toprakta bozunması sonucu oluşan alfa yayımlayan bir gazdır. Yüksek dozda solunması durumunda akciğer kanserine, sindirilmesi durumunda ise mide kanserine yol açabilmektedir.

İki hidrojen ve bir oksijen atomundan meydana gelen, yaşamımızın kaynağı olan ve her alanda kullandığımız suda bu radyoaktif maddeler bulunmaktadır. Suyun içinde bulunan radyoaktif maddelerin konsantrasyonunun belirli bir seviyenin üstüne çıkması durumunda, sağlık açısından kansere kadar giden talihsiz olaylar zinciri tetiklenmiş olur. Bundan dolayı kullanım sularının düzenli olarak analizi, büyük önem taşımaktadır.

Gelişmiş ülkelere baktığımızda, doğal ve yapay radyasyon ölçümlerinin sağlık kurumlarınca yapıldığı görülmektedir. Ülkemizde ise doğal radyoaktif maddelerin tayini, çıkacak sonuçlara göre önlem alınması henüz bir standarta oturtulamamıştır. Nüfusun çoğunluğu tarafından kullanılan kaynaklarda öncelikle toplam alfa ve beta radyoaktivitesine bakılmakta, limit bunun üstüdeyse içinde bulunan radyoaktif elementler detaylıca incelenmektedir. Az sayıda insan tarafından kullanılan veya kaynağı bilinmeyen içme suları içinse detaylı çalışmalar bulunmamaktadır.

Bu çalışmada Kütahya ili içme sularında radon ve radyum konsantrasyonlarının belirlenmesi seçilmesinin en önemli sebebi, Kütahya ili içme sularında radon ve radyum konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik herhangi bir çalışmanın literatürde yer almamasıdır. Bu konsantrasyonları belirleyerek, yıllık olarak radon ve radyumdan dolayı insanların aldığı dozlar hesaplandı.

Kütahya ili Merkez ilçesinden 12, ilçelerinden 18 olmak üzere 30 içme suyundan örnek toplanmıştır. Kollektör yöntemi kullanılarak içme sularındaki radon ve radyum konsantrasyonları belirlenmiştir. Radyoaktif radon ve radyum analizinin yanında, içme sularının pH, iletkenlik ve su sıcaklık değerleri örneğin koordinat ve yüksekliğine göre anlık olarak ölçülmüştür.

Yeraltı suyu, kaynak suyu ve içme sularındaki ^{226}Ra ve ^{222}Rn konsantrasyonlarının ölçümü dünyada çeşitli ülkelerde uzun yıllardır yapılmaktadır.

Saç et al. 1994 yılında kollektör yöntemini kullanarak İzmir ilinin içme ve kullanım sularında Rn-222 ve Ra-226 konsantrasyonunu belirlemiştir. Buna göre Rn-222 konsantrasyonu düşük aktivite- 5,8 Bq/L arasında, Ra-226 konsantrasyonu düşük aktivite- 0,8 Bq/L arasında çıkmıştır [1].

Han et al. Tayvan'da yaptıkları çalışmada yeraltı sularında radon konsantrasyonunun MDA-426 pCi/L arasında çıktığını belirlemiştir [2].

Tahir et al. Pakistan'da yaptıkları bir çalışmada yeraltı sularında radon seviyesini belirlemek için yüksek çözünürlüklü gama spektroskopi sistemi kullanmıştır. 186 noktada örnekleme yapılmış, radon konsantrasyonu 2 – 7,9 Bq/L arasında ölçülmüş, radonun içilmesi sonucunda yıllık olarak alınan doz miktarı $12,6 \pm 12,8 \mu\text{S/yıl}$ olarak hesaplanmıştır [3].

Bonotto et al. Brezilya'da Guarani yer altı su havzalarında yaptıkları bir çalışmada radon ve radyum konsantrasyonunlarını sırasıyla 0,05-57,6 Bq/L ve 0,01-1,49Bq/L aralığında ölçmüştür. Aynı çalışmada nüfus ağırlıklı radon ve radyum-226 aktivitelerinin sırasıyla 14,62 Bq/L ve 0,185 Bq/L olduğu hesaplanmıştır [4].

Bonotto et al. tarafından yapılan farklı bir çalışmada yine Guarani yer altı su havzalarında radon ve alt ürünleri alfa spektrometresi ve NaI(Tl) gama spektroskopi sistemi kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır [5].

Baykara et al. Doğu Anadolu aktif fay hattı üzerinde yaptıkları bir çalışmada CR-39 pasif dedektörlerini kullanarak fay hattı üzerinde 14 noktada içme sularının radon ve etkin

radyum-226 konsantrasyonlarını belirlemiştir. Radon ve etkin radyum konsantrasyonları sırasıyla 132,5- 3319,3 Bq/m³ ve 11,3 – 270,5 Bq/m³ aralığında ölçülmüştür [6].

Ramola et al. Himalaya pınarlarında yaptıkları çalışmalarda pınarlarda ve tulumalarda radon konsantrasyonunu 1- 624 Bq/L arasında ölçmüştür [7].

Lopez et al. İspanya'nın Extramadura bölgesinde yaptıkları çalışmada radon konsantrasyonunun 0,24-1168 Bq/L arasında değiştiğini ölçmüştür. Radon konsantrasyonunu belirlemek için gama spektroskopi sistemi ve sıvı sintilasyon yöntemi kullanmışlardır. Bu çalışmada radon ile hidrolojik yer altı suları arasında karakteristik bir korelasyon ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda bu bölgenin gama haritası ile sulardaki radon haritası karşılaştırıldığında, benzerlik göstermiştir [8].

Tayyeb et al. Suudi Arabistan'da Jeddah bölgesinde yaptıkları bir çalışmada radon konsantrasyonunun 1,54-9,92 Bq/L arasında olduğunu belirlemişlerdir. İçme suyunun sindirimi ve havaya transferi sonucu gelen doz katkısını ise sırasıyla 4,52-26,07 mSv/yıl ve 4,31-26,07 mSv/yıl olarak hesaplamışlardır [9].

D'Alessandro et al. Mt. Etna volkanik bölgesinde taşınabilir Lucas tipi sintilasyon hücresi ile 119 yeraltı suyunda radon aktivitesini ölçmüş ve radon konsantrasyonunun 1,8-52,7 Bq/L arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Yapılan ölçümlerin %40'ında radon konsantrasyonunun EPA'nın belirlediği 11 Bq/L'nin üstünde olduğu tesbit edilmiştir. Bunun yanında kuyu sularının ortalama radon konsantrasyonunun yüzey sularından daha yüksek olduğu bildirilmiştir [10].

Geraldo et al. Brezilya'da Santos bölgesinde yaptıkları bir çalışmada içme sularındaki radon konsantrasyonunu belirlemek için makrofol polikarbon plastik dedektörler kullanmışlardır. Radon konsantrasyonu 0,30-36 Bq/L aralığında ölçülmüştür [11].

Bakaç et al. Gediz Nehri üzerinde yaptıkları bir çalışmada radyum konsantrasyonunun 0,021–1,041 Bq/L değerleri arasında değişmekte olduğunu belirlemişlerdir. Aynı zamanda suyun sıcaklık, pH, Eh, iletkenlik, bazlık değerleri ölçülmüş ve sırasıyla 10-30 derece; 5,55-8,28; -108 ve 36 mV; 8-5940 µS/cm; 94-750 mg/L; 56-178 cps olarak belirlemişlerdir [12].

Yadav et al. Hindistan'ın Rajahstan bölgesinde Sambhar Tuz gölünün hidrolojik sistemini belirlemişler. Bunun içinde nehir suyu, yeraltı suları, buharlaşan göletler, alt yüzey tuzlu suları dahil etmişler. Tuzluluk ve radyum, polonyum, kurşun analizleri yapmışlar. Böylelikle gölün hidrolojik karakteristiğini ortaya çıkartmışlar [13].

Gruber et al. Avusturya'da 350 içme suyunda radon ve radyoizotop analizi yapmışlar. Bu çalışmada öncelikle 205 su örneğinin analizi yapılmış, ardından konsantrasyonun yüksek çıktığı noktalarda jeolojik duruma göre (granit kayalar, jeolojik faylar) 145 örnek daha toplanmış ve analiz edilmiş. İlk yapılan ölçümlerde ortalama radon konsantrasyonu 12 Bq/L, ikincisinde ise 100 Bq/L tesbit edilmiş. Radyum konsantrasyonlarının ortalaması ise belirlenebilir minimum aktivitenin altında kalmıştır [14].

Porntepkasemsan et al. yaptıkları çalışmada sudaki Ra-226'nın alınması sonucunda yaşa bağlı olarak alınan doz miktarını hesaplamışlar. Burada yaşa göre günlük içilen su miktarının değiştiğini, böylece radyumun sindirilmesi sonucunda alınacak dozun değişeceğini belirlemişler [15].

Nikolopoulos et al. Güney Kıbrıs ve Yunanistan'da içme sularında ve kapalı ortamlarda radon seviyelerini ve bunlardan dolayı alınan yıllık dozu belirlemiş. Buna göre Güney Kıbrıs'ta kapalı ortamda radon konsantrasyonunun 14-75 Bq/m³ arasında değiştiğini, Yunanistan'da iki şehirde yapılan ölçümlerin 1,7-161; 14-75 Bq/m³ arasında değiştiğini belirlemişler. İçme sularında ise Güney Kıbrıs'ta 0,3-20 Bq/L ve Yunanistan'daki iki şehirde 0,8-24 Bq/L arasında değiştiği belirlenmiş [17].

Ramola et al. Hindistan'ın Budhakedar, Garhwal Himalaya bölgesinde yaptıkları çalışmada kapalı ortamda, toprakta ve suda radon konsantrasyonunu belirlemişler. Toprakta ve sudaki radon konsantrasyonu sırasıyla 1,10-31,8 Bq/m³ ve 8-3047 Bq/L aralığında ölçülmüş[18].

Bu çalışmada İkinci bölümde Radyoaktivite üzerinde durulmuştur. Radyoaktivite birimleri ve temel kavramları tanımlanmıştır. Üçüncü bölümde Radyoaktif Bozunma tipleri incelenmiştir. En temel radyoaktif bozunma tipleri tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde doğal ve yapay olmak üzere Radyasyon Kaynaklarına değinilmiştir. Beşinci bölümde Radyoaktif Seriler ele alınmıştır. Altıncı bölümde Radium ve Radon hakkında genel bilgi verilmiştir. Yedinci bölümde yaptığımız deneysel çalışma ile ilgili genel bilgi verilmiş, sekizinci bölümde deneysel çalışmanın sonuçları verilmiş ve dokuzuncu bölümde sonuçlar tartışılmıştır.

2. RADYOAKTİVİTE

Radyoaktivite kararsız atomik çekirdeğin nükleer parçacıklar veya elektromanyetik radyasyon yayarak kendiliğinden bozunma işlemidir [19].

Radyasyon ve radyoaktivite kaynakları olan radyoizotoplar günlük hayatımızın zorunlu bir parçasıdır. Yiyeceklerimiz, sağlığımız ve genel olarak durumumuz radyoaktivite ile alakalıdır. Tıpta, biyolojide, tarımda, endüstride ve elektrik üretiminde radyoaktif kaynakların sayısız uygulaması bulunmaktadır [19].

Radyoaktiviteye olan bağımlılığımız, Henry Becquerel tarafından 1896 yılında bulunmasından bir kaç yıl sonra başlar. 20. yüzyılın başlarında, Marie ve Pierre Curie radyumu kanser tedavisinde kullanmaya başlamıştır, bunu nükleer enerji uygulamalarının ilk barışçıl uygulaması ve nükleer tıbbın başlangıcı olarak kabul edebiliriz. Ruth 'rford 1919 yılında ilk yapay kararlı ¹⁷O izotopunu ¹⁴N çekirdeklerini alfa parçacıkları ile bombardıman ederek bulmuştur. Frederik Joliet ve Irene Joleit-Curie, 1930'lara gelmeden Rutherford'un çalışmasının bir örneği olarak ilk yapay radyoizotopu bulmuştur. Aynı zaman diliminde Ernest Lawrance ilk çalışan siklotronu 1931 yılında yapmıştır. Günümüzde küçük boyutlu siklotronlar çeşitli kanser ve hastalıkların teşhis ve tedavisinde kullanılmaktadır [19].

1939 yılında atomik çekirdeğin içindeki enerjinin açığa çıkartılması için bulunan yöntemlerin ardından, fizik ve teknolojik olarak çok ilerlenmiştir. Nükleer fisyonun II. Dünya Savaşı'nın patlak vermesi sırasında bulunmasıyla, ilk kullanımı askeri olarak oldu. Bu da bize Nükleer Enerji'nin aynı zamanda tehlikeli olabileceğini göstermektedir [20].

2.1. Birimler

Aktivite: Birim zamandaki bozunmaya uğrayan çekirdek sayısına aktivite denir, A ile gösterilir. Aktivitenin yeni birimi Becquerel'dır [22].

1 Bq = 1 saniyedeki bozunma sayısı.

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

Soğurulmuş doz, madde tarafından soğurulan dozu ifade eder. Yeni birimi Gray'dir.

Gray (Gy) = Gray, soğurulmuş doz için kullanılan yeni birimdir ve soğurucu meteryal tarafından kg başına 1 joule enerji alınması olarak ifade edilir.

Rad = Soğurucu maddenin gram başına 100 erg enerji almasıdır. Soğurucu dozun eski birimidir.

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$$

Eşdeğer Doz: Tüm vücuda yapılan ışınlamanın biyolojik etkisi olarak tanımlanır. Yeni birimi Sievert'tir. Soğurulmuş dozun Q kalite faktörü ile çarpılmasıyla hesaplanır. Burada Q kalite faktörü radyasyon tipine bağlıdır ve Çizelge 2.1 ile gösterilmektedir [16].

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Çizelge 2.1. Q kalite faktörü.

Radyasyon Tipi	Kalite Faktörü (Q)
X-ışını, gama veya beta radyasyonu	1
Alfa parçacıkları	20
Enerjisi bilinmeyen nötron	10
Nötronlar	
E < 10 keV	5
10 keV < E < 100 keV	10
100 keV < E < 2 MeV	20
2 MeV < E < 20 MeV	10
E > 20 MeV	5

2.2. Yarı Ömür ve Bozunma Sabiti

Radyoaktif bozunma rastgele bir süreçtir. Kararsız bir çekirdek bozduğunda bu kestirilemez. dt süresi boyunca bir atomun bozunma olasılığı λdt ile verilir, burada λ bozunma sabiti olarak bilinen orantıdır.

Bir sistemde başlangıçta $N(0)$ atomumuz bulunsun, dt zamanı içinde bozunan atomların sayısı: $-dN = \lambda N dt$ denklemi ile verilir. Küçük zaman aralıklarında bu şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.1)$$

Zamanı dikkate alarak integre ettiğimizde, bize herhangi bir t zamanındaki atom sayısını verir.

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Yarı ömür $t_{1/2}$, başlangıçtaki atom sayısının yarıya düştüğü zamanı verir. Mesela $\frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$. Bağıntıdan yarı ömür aynı zamanda bozunma sabitiyle de bağlantılıdır [21].

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}. \quad (2.3)$$

2.3. Ortalama Yaşam süresi

Çekirdeğin yarı ömrü istatistiksel bir özelliktir ve çok sayıda atomun olaya dahil olmasından dolayı geçerli bir görüştür. Çekirdeğin bağımsız atomları herhangi bir zamanda sıfırdan sonsuza transfer olabilir. Bazı hesaplamalarda çekirdeğin ortalama ömrünü kullanmak daha uygun olabilir. Ortalama ömür bağımsız atomların ömürlerinin toplamının merkezde şu anda bulunan toplam atom sayısına bölünmesi ile bulunur. t ile $t+dt$ zaman aralığında, toplam dönüşüm sayısı $\lambda N dt$ 'dir. Bu zaman aralığında bozunan her bir atomun ömrü t 'dir. dt zaman aralığında bozunan tüm atomların yaşam ömürlerinin toplamı, $t=0$ 'dan geriye kalanlar $t \lambda N dt$ 'dir. Böylece ortalama ömür şu şekilde verilir:

$$\tau = \frac{1}{N(0)} \int_0^{\infty} t \lambda N dt. \quad (2.4)$$

Ortalama ömür ile yarı ömür arasındaki bağıntı denklem 2.18 ile verilmektedir [21].

$$\tau = 1,44 t_{1/2} \quad (2.5)$$

2.4. Radyoaktif Denge

3 tane çekirdeğin bulunduğu basitleştirilmiş bir radyoaktif bozunma işlemini ele alalım, bu 3 çekirdek N_1, N_2 ve N_3 olsun. Çekirdek 1, çekirdek 2'ye bozunur, daha sonra çekirdek 2 çekirdek 3'e bozunur.

Çekirdek 1, çekirdek 2'nin ana çekirdeğidir (veya çekirdek 2, çekirdek 1'in bozunma ürünüdür). Yukarıda verilen denklemlerden, çekirdek 2'nin atomlarının sayısı şu şekilde verilir:

$$\begin{aligned} N_2(t) &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemden, radyoaktif dengeye ulaşmak için gerekli olan zamanın ana çekirdeğin ve bozunma ürününün yarı ömrüne bağlıdır. Şu 3 durum tartışılabilir:

1. $\tau_1 \gg \tau_2$. Bu durumda ana çekirdeğin ömrü, bozunma ürününün yarı ömründen çok çok büyüktür.
2. $\tau_1 > \tau_2$. Bu durumda ana çekirdeğin ömrü, bozunma ürününün yarı ömründen büyüktür.
3. $\tau_1 < \tau_2$. Bu durumda bozunma ürününün ömrü, ana çekirdeğin yarı ömründen büyüktür.

Bu 3 durumu ele alalım.

İkincil Denge ($\tau_1 \gg \tau_2$)

İkincil denge durumunda ana çekirdeğin yarı ömrü, bozunma ürününün ömründen çok çok büyüktür. $\tau_1 \gg \tau_2$. Bu durumda 2.19 denklemini şu hale dönüştür:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1(0) \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.7)$$

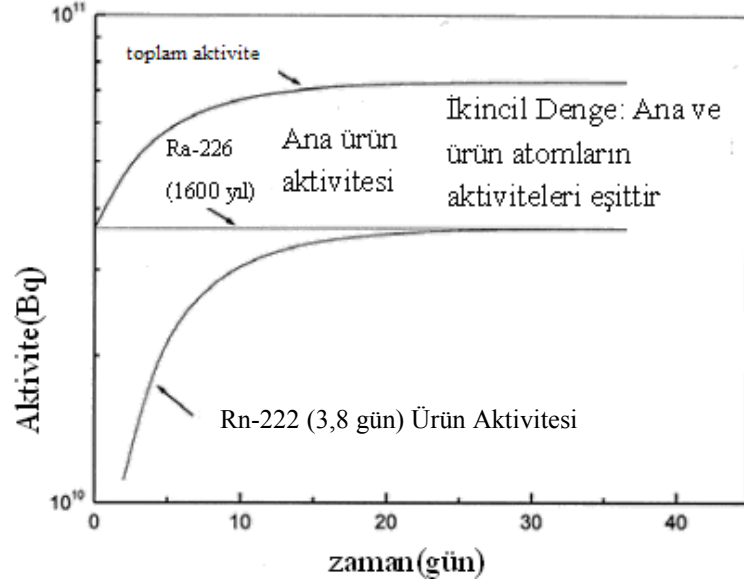
$t \gg \frac{1}{\lambda_2}$ zamanları için radyoaktif denge kurulur ve sıradaki bağıntı tutulur:

$$\text{İkincil Denge: } \frac{N_2}{N_1(0)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (2.8)$$

Ana çekirdeğin yarı ömrü çok büyük olduğundan miktarı aşağı yukarı sabittir ($N_1(0) = N_1$).

$$\text{Yani } N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1, \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \text{ ve } A_1 = A_2 \quad (2.9)$$

Burada λ bozunma sabiti olmak üzere A , $\lambda \cdot N$ ile tanımlanan aktivitedir. Böylece kalıcı radyoaktif denge durumunda sayıların ve kütlelerin oranı sabittir, aynı zamanda aktiviteleri eşittir (Şekil 2.1).



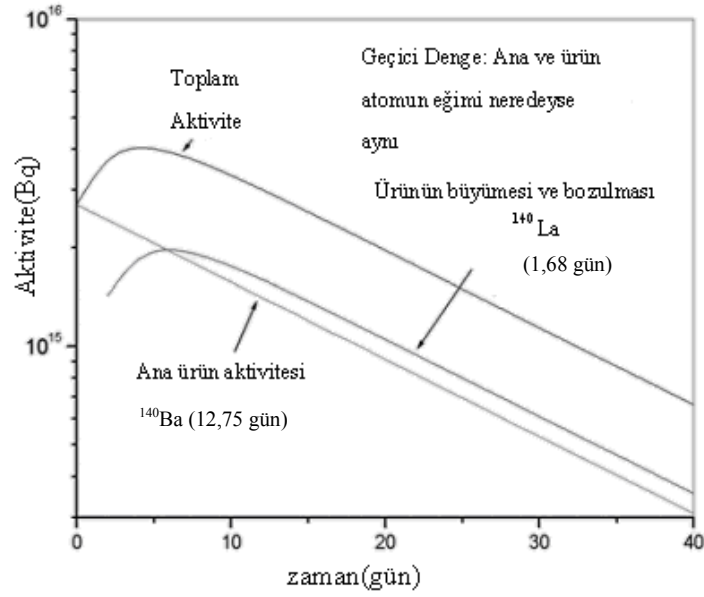
Şekil 2.1. ^{226}Ra ve ürünü ^{222}Rn arasındaki ikincil denge durumu.

Geçici Denge Durumu ($\tau_1 \geq \tau_2$):

Geçici denge durumunda bozunma ürününün ömrü, ana çekirdekle aynı derecede fakat ondan daha küçüktür, $\tau_1 > \tau_2$ ($\lambda_1 < \lambda_2$). 2.19 denkleminde bozunma ürünü için denklem:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.10)$$

^{140}Ba bir örnek olarak Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. ^{140}Ba ve ürünü ^{140}La arasındaki geçici denge durumu.

Denklem 2.23'te $e^{-\lambda_2 t}$ terimi $e^{-\lambda_1 t}$ teriminden daha hızlı olarak sıfıra gider ve dolayısıyla bu terim ihmal edilebilecektir. Böylece şu denklem elde edilir:

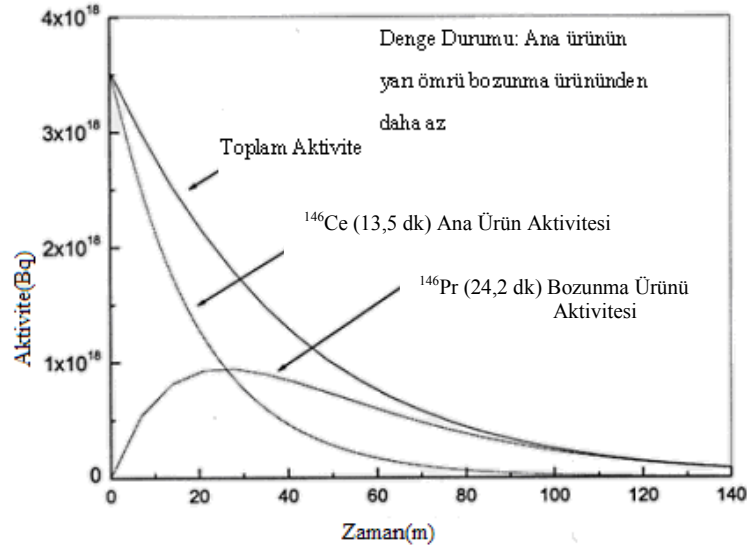
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.11)$$

Burada $N_1 = N_1(0) \cdot (e^{-\lambda_1 t})$ denklemi kullanılmıştır.

Denge Durumunun Olmaması: ($\tau_1 < \tau_2$)

Denge durumunun olmaması durumunda, ana çekirdeğin yarı ömrü – bozunma ürünün yarı ömründen daha kısadır. Ana çekirdeğin yarı ömrünün üründen daha kısa olması durumunda, ürünün aktivitesi maksimuma ulaşır ve kendine özgü karakteristik yarı ömrü ile bölünür [21].

^{146}Ce için bunun örneği Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. ^{146}Ce ve ürünü ^{146}Pr arasında dengenin olmaması durumu.

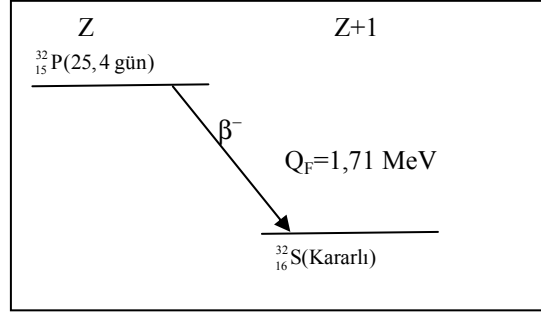
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.12)$$

olduğu gösterilebilir. Belirli bir zaman sonra ürün çekirdek λ_2 bozunma sabitiyle bozunacaktır. Ana çekirdek bitecektir, ürün çekirdek kendi bozunma hızıyla bozunmasına devam edecektir.

2.5. Enerji Seviyesi Diyagramları

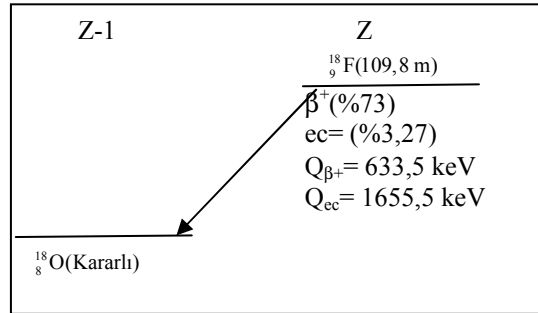
Nükleer veriler nükleer enerji seviyesi diyagramları şeklinde de görüntülenebilir. Bu veriler nükleer enerjiye karşılık atom numarası grafiği olarak çizilir ve bölünmelerde nükleer geçişleri göstermekte çok kullanışlıdır. Temel bölünme verisinden enerji seviyesi diyagramları şu prosedüre göre gerçekleştirilir:

- Oluşan çekirdeğin taban durum enerjisi 0 olarak seçilir.
- Eğer atom numarasında artış varsa (β^- bozunmasında olduğu gibi), oluşan ürün ana ürünün sağ tarafında gösterilir. Şekil 2.4 $^{32}_{15}\text{P}$ bozunmasının enerji seviyesi diyagramının bir örneğidir.



Şekil 2.4. ${}^{32}_{15}\text{P}$ Enerji seviye diyagramı.

Eğer radyoaktif bozunma atom numarasında düşüşe sebep olursa (alfa yayımlanması, pozitron yayımlanması, elektron yakalama gibi) oluşunlar ana çekirdeğin sol tarafında gösterilir. ${}^{19}_8\text{F}$ çekirdeğinin enerji seviyesi diyagramına bir örnek verelim (Şekil 2.5). Bozunma enerjisi $2m_e c^2$ (1,022 MeV)'den büyük olduğu durumlarda pozitron yayımlanması elektron yakalama ile rekabet halinde olur.



Şekil 2.5. ${}^{19}_8\text{F}$ Enerji seviyesi diyagramı.

Bozunma modlarını ve enerjilerini göstermenin dışında; bu grafiklerde yarı ömürler, dallanma oranları, nükleer izomerizm, v.s. gösterilebilir [21].

3. RADYOAKTİF BOZUNMA TİPLERİ

3.1. Bozunma Modları

Radyoaktif bozunma, yeni bir element oluşmasıyla sonuçlanan rastgele nükleer dönüşümdür. Bu işlemde, kararsız X ana ürünü Y alt ürününe farklı yollardan bozunur. Sembolik olarak bu işlem şu şekilde tanımlanabilir:



Burada $y_1 + y_2 + \dots$, yayımlanan ışık ürünleridir. Bu işleme genelde gama ışını yayımlanması eşlik eder. Eğer ürün çekirdek kararsızsa, bu reaksiyon alt ürün kararlı hale gelinceye kadar devam eder. Radyoaktif çekirdekler en temel aşağıdaki gibi bozunabilir:

- Alfa Bozunması
- Beta-eksi bozunması
- Gama yayımlanması
- Beta-artı bozunması
- Elektron yakalanması

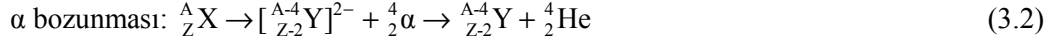
Radyoaktif bozunma nükleer bir işlemdir ve çekirdeğin kimyasal ve fiziksel durumundan genelde bağımsızdır. Asıl radyoaktif bozunma işlemi nötron proton oranına, ana-ürün ve yayımlanan parçacıkların kütle-enerji ilişkisine bağlıdır. Herhangi bir nükleer reaksiyonda, farklı korunum kanunları uygulanır.

3.2. Alfa Bozunması

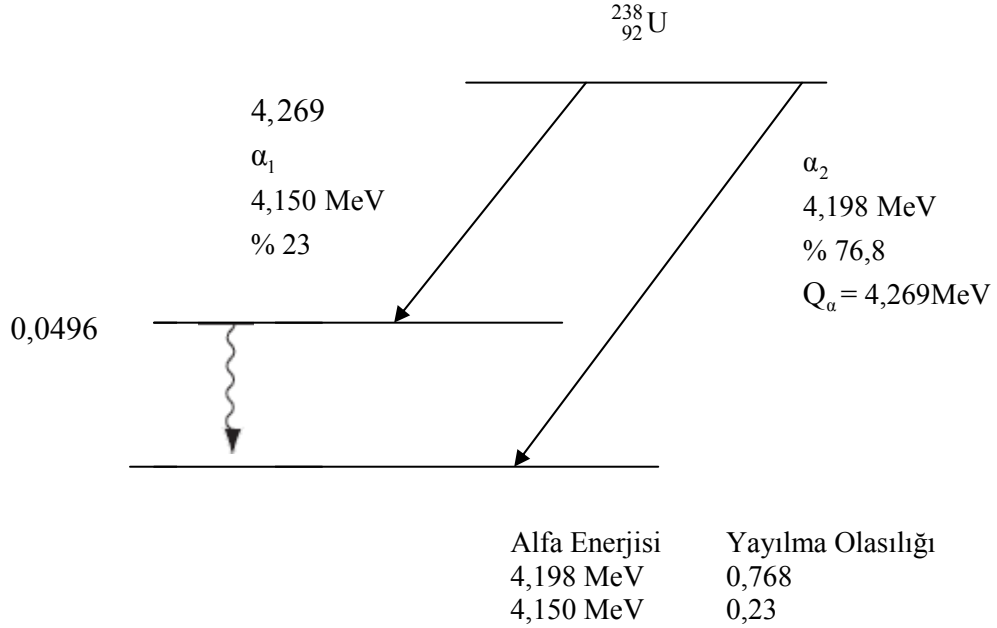
Alfa parçacığı yapısal olarak helyum atomunun çekirdeğine eşittir ve Yunan harfi α ile gösterilir, iki proton ve iki nötron içerir. Ağırlıklı olarak atom numarası 82'den büyük olan radyoizotoplardan yayınlanır.

Alfa bozunmasında ana çekirdek A_ZX , ${}^4_2\alpha$ alfa atomu yayınlar, bozunma ürünü ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ 'yi oluşturur. Alfa parçacığının yayınlanmasından sonra bozunma ürününün ana çekirdekten gelen Z tane elektronu mevcuttur, böylece Y bozunma ürününün fazladan 2 elektronu olur ve ${}^{A-4}_{Z-2}Y^{2-}$ olarak gösterilir.

Bu fazladan elektronlar, alfa parçacık yayınlanmasından sonra bozunma ürününden ayrıldıktan kısa bir süre sonra kaybolur ve bozunma ürününü elektriksel olarak nötr halde bırakır. İlave olarak, alfa parçacığı yavaşlar ve kinetik enerjisini kaybeder. Düşük enerjilerde alfa parçacığı nötr helyum atomuna dönüşmek için 2 elektron toplar. Alfa bozunma işlemi şu şekilde gösterilir:



Alfa bozunma işlemi genelde proton zenginleştirmede görülür. Ağır çekirdeklerde bağlı nükleer kuvvetlere göre yüksek numaralı çekirdeklerin elektrostatik itme kuvvetinden dolayı daha hızlı artış gösterirler. İlave olarak, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi yayınlanan parçacığın potansiyel duvarını geçmek için yeterli enerjisi olmalıdır. Potansiyel duvarının yüksekliği yaklaşık olarak 25 MeV’dir. Kuantum tüneli yoluyla alfa parçacıkları bu duvardan kaçabilir.



Şekil 3.1. U-238’in alfa bozunmaları için enerji seviyeleri.

Alfa parçacıklarının madde ile etkileşmesinde, alfa parçacıkları enerjilerini verir ve nötr helyum atomlarına dönüşür. Sıvılarda ve katılarda menzilleri çok kısadır, mikrometre mertebesindedir. Havadaki menzilleri ise birkaç santimetredir. Bu kısa menzillerinden dolayı sağlık açısından zarar vermezler. Hasara yol açmadan önce derinin üst kısmı tarafından

soğurulurlar. Vücuda soluma veya sindirim yoluyla alınır, yüksek enerjilerinden dolayı dokular için zararlıdır. Bu özellik tedavide kanserli hücreleri öldürmek için de kullanılabilir [35].

3.3. β^- Bozunması

β^- bozunması kararsız bir çekirdekten elektron yayınlandığında görülür. Bu olay nötron fazlalığı olduğunda görülür. Teorik kabuller, çekirdekte elektron olmasını kabul etmez. Bu sebepten dolayı beta parçacığının nötronun protona dönüştüğü nükleer dönüşümden çıktığı kabul edilir:



Burada $\bar{\nu}_e$, antinötrindir. Çekirdekten çıkan yüksek enerjili elektronun e^- simgesiyle gösterilen diğer elektronlardan ayırt edilmesi için β^- simgesiyle gösterilir.

Beta yayınlanması alfa yayınlanmasından farklılık gösterir. Beta yayınlanmasında parçacığın sürekli enerji spektrumu vardır, bu değer sıfır ile maksimum bir bitiş enerjisi değeri arasında değişir, bu o izotopun karakteristiğidir. Gerçekte beta parçacıkları tek enerjili değildir, tanımlanan maksimum enerjiye kadar sürekli dağılım gösterirler. Bu kısmı yerine getirecek bir başka parçacık vardır, mesela ν .

Bitiş enerjisi, enerji korunumundan ana çekirdekle ürün arasındaki kütle farkına karşılık gelir. Beta parçacığının ortalama enerjisi, maksimum enerjisinin 1/3'ü kadardır.

Daha açık söylemek gerekirse, beta eksi bozunmasında yayınlanan parçacık antinötrindir (beta artı bozunmasında nötrino yayınlanır). Nötrinonun sıfır yükü vardır ve kütlesi neredeyse sıfırdır. Beta parçacıklarının maksimum enerji menzili 10 keV ile 4 MeV arasında değişir. Aynı zamanda beta eksi parçacıklarının alfa parçacıklarına göre daha uzun menzili vardır; suyun kalın tabakası, cam, metal v.s. onu durdurabilir. Beta eksi bozunması işlemi denklem 3.4 ile tanımlanmaktadır.



Beta bozunmasını takiben, ürün çekirdeğinin ana çekirdekle aynı sayıda elektronu vardır ve pozitif yüklüdür. Çok çabuk bir şekilde ürün atom elektron toplar ve nötr hale gelir.

Beta radyasyonu dış radyasyon riski içerir. Enerjisi 200 keV'den düşük olan beta parçacıklarının dokudaki etkileşimi sınırlıdır. Ne var ki beta parçacıkları Bremsstrahlung radyasyonuna yükselirse bunun dokulardaki etkileşimi oldukça yüksektir [35].

3.4. Gama Yayınlanması

Gama yayınlanması işlemi ilk bozunma işlemi değildir fakat genelde alfa ve beta bozunmasına eşlik eder. Bu tür radyasyon genelde ürün çekirdek alfa veya beta yayınladıktan sonra uyarılmış durumdaysa ortaya çıkar. Uyarılmış durum çok hızlı bir şekilde gama yayınlayarak taban duruma döner. Alfa ve beta parçacıkları gibi iyi tanımlanmış bir menzile yerine, gama ışınları madde içerisinde karakteristik olarak birim uzunluk başına enerjilerinin bir kısmını kaybeder. Gama ışınları yüksek oranda içe işleyicidir ve önemli derecede organik hasara sebep olur. Gama yayınlayıcı parçacıklar iyi bir şekilde zırhlmalıdır ve uzaktan kullanılmalıdır.

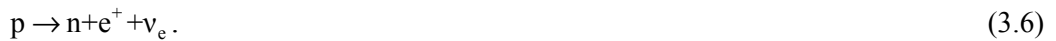
Gama bozunması şu şekilde tanımlanır:



Burada *'lı durum uyarılmış durumu tanımlar [35].

3.5. Beta Artı Bozunması (Pozitron Yayınlanması)

Nötron proton oranının düşük olduğu çekirdeklerde enerjisel olarak alfa yayınlanması mümkün değildir, çekirdek pozitron yayınlayarak daha kararlı duruma geçer. Çekirdeğin içinde proton nötrona, pozitrona ve nötrinoya dönüşür.



β^- bozunmasına benzer olarak, pozitron β^+ karakteristik maksimum enerjiye kadar sürekli düzgün dağılım gösterir. Pozitron çekirdekten yayımlandıktan sonra atomik elektronlarla kuvvetli bir elektrotatik etkileşime girer. Pozitron ve negatif elektronların birbirlerini yok etmesi sonucu 0,511 MeV enerjili farklı yönlerde giden iki foton oluşturur.

Pozitronların yol açtığı riskler β^- 'lerin yol açıklarına benzer. İlave olarak, pozitron elektron yok olması sonucunda oluşan gama radyasyonu dış sağlık tehlikesine yol açar.

β^+ bozunması şu şekilde tanımlanabilir:



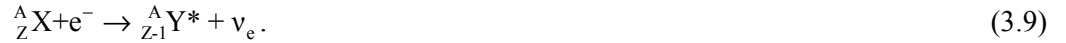
Pozitron yayınlanmasına takiben, bozunma ürününün ana atomun yörünge elektron sayısı kadar elektronu vardır ve yükü negatiftir. Çok çabuk bir şekilde ürün atom elektriksel olarak nötr hale geçmek için elektronlarını kaybeder [35].

3.6. Elektron Yakalama

Kararlı duruma geçmek için nötronu eksik çekirdekler, atomik yörünge K veya L kabuklarından elektron yakalayarak kararlı duruma ulaşır. Sonuç olarak çekirdekteki proton nötrona dönüşür.



İşlem β^+ bozunmasına benzer, çekirdeğin yükü 1 azalır. EC işlemi şu şekilde tanımlanabilir:



Ürün genelde uyarılmış durumda oluşur. Son çekirdek kararsızdır ve K veya L kabukları dış yörünge elektronu tarafından doldurulduğunda gözlemlenemeyen X-ışını karakteristiği gösteren bir nötrino yayınlar [35].

4. RADYASYON KAYNAKLARI

4.1. Radyasyon

Tüm yaşayan canlılar, zamanın başlangıcından bu yana radyasyona maruz kalmıştır ve maruz kalmaya devam etmektedir [23].

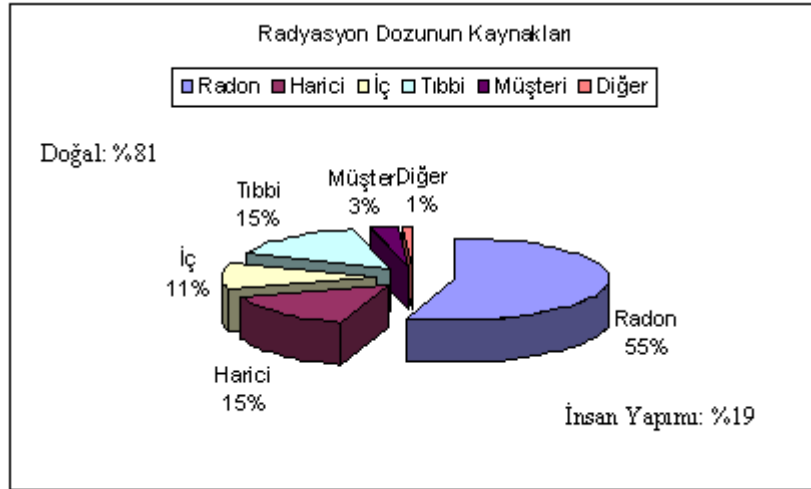
Radyasyon uzay boyunca yol alan bir enerjidir. Güneş ışığı radyasyonun en tanıdık formlarından birisidir. Işığı, ısıyı ve güneş zerreciklerini alır. Güneşin etkisini güneş gözlükleri , gölge, klimalar, şapkalar, giysiler ve güneş etkisi ile kontrol ederiz [24].

Bu kadar çok güneş ışığı olmadan dünyada yaşam olamaz, fakat bir kişinin üstünde bu kadar çok güneş ışığının olması iyi birşey değildir. Gerçekte, bu tehlikelidir; bu yüzden güneşin üzerimize etkisini kontrol ederiz [24].

Güneş ışığı uzun dalgaboylu kızıl ötesi ile kısa dalgaboylu mor ötesi menziline radyasyon içermektedir [24].

Mor ötesinde tıpta kullandığımız gibi yüksek enerjili radyasyon türleri bulunmaktadır. Düşük dozda uzaydan, havadan ve dünyadan radyasyon alırız. Toplu olarak bu radyasyon türlerine iyonlaştırıcı radyasyon deriz. Madde üzerinde ve yaşayan organlarda hasara sebep olur. Yüksek seviyelerde maruz kalınması tehlikelidir, sonuç olarak buna maruz kalmak tehlikeli olabilir [24].

Çevrede yaşayan canlılar önemli miktarda doğal radyasyona maruz kalmaktadır. Daha ileriye gidersek, birçoğumuz hayatlarını insan yapımı olan yapay radyasyon kaynaklarına borçludur. Tıbbi X-ışını kullanımı görünmeyen sorunlarımızı çözmemizde bizlere yardımcı olmaktadır. Kullanılan diğer radyasyonlar ise hastalıkların tesbiti için, bazıları ise insanları tedavi etmek için kullanılmaktadır. Radyoaktif materyallerin dikkatli kullanımı sonucunda yapılan malzemelerin çoğundan hepimiz faydalanmaktayız [24].



Şekil 4.1. Radyasyon dozunun kaynakları.

Arkaplan radyasyon dozu, doğal arka fon ve yapay kaynaklardan alınan arka fon dozunun toplamını içerir.

Doğal radyasyon, yıllık aldığımız dozun %81'ine karşılık gelmektedir. Geriye kalan %19'luk kesim ise yapay kaynaklardan alınan arka fon dozudur. Doğal ve yapay radyasyon tür ve etki olarak bir farklılık yaratmaz. Yapay radyasyon tıbbi, ticari ve endüstriyel aktivitelerde kullanılmaktadır [24].

4.2. Doğal Radyasyon Kaynakları

Doğal kaynaklardan yayımlanan iyonlaştırıcı radyasyona sürekli maruz kalırız. Doğal radyasyon önlenemez bir şekilde çevremizde mevcuttur. Seviyeleri yüksek oranlarda büyüyebilir. Granit bölgelerde veya mineralli kumun olduğu bölgelerde yaşayanlar daha çok karasal radyasyona maruz kalır, yüksek seviyelerde çalışan veya yaşayanlar daha çok kozmik radyasyona maruz kalır. Maruz kaldığımız doğal radyasyonun büyük bir kısmı radon gazından gelmektedir, yer kabuğundan çıkar ve soluduğumuz havada mevcuttur [24].

Doğal radyasyon kaynaklarını 3 grupta sınıflandırabiliriz:

- I- Kozmik Radyasyon
- II- Karasal Radyasyon
- III- Dahili Radyasyon

4.2.1. Kozmik radyasyon

Dünya ve üstünde yaşayan canlılar yağmurun sürekli yağması gibi uzaydan gelen radyasyonla sürekli bombardıman altındadır. Güneşten ve yıldızlardan gelen yüklü parçacıklar dünyanın atmosferi ve manyetik alanı ile etkileşir ve genellikle beta-gama radyasyonu oluşturur. Kozmik radyasyondan gelen doz, dünyanın çeşitli bölgelerinde yüksekliği ve dünyanın manyetik alanından dolayı farklılık gösterir [23].

4.2.2. Karasal radyasyon

Radyoaktif maddeler toprakta, suda ve bitkilerde bulunur. Aynı zamanda radyoaktif maddeler doğada her yerde bulunur. Düşük konsantrasyonlu uranyum, toryum, ve bunların bozunma ürünleri her yerde mevcuttur. Bu materyallerin bir kısmı yiyecek ve su ile sindirilir, radon gibi bir kısmı ise solunur. Karasal kaynaklardan kaynaklı doz, dünyanın çeşitli bölgelerinde farklılık gösterir. Toprağında yüksek konsantrasyonlu uranyum ve toryum bulunan bölgeler, yüksek doz seviyelerine sahiptir [23].

Endişenin kaynağı olan temel radyoaktif kaynak uranyum ve bunun toryum, radyum, radon gibi bozunma ürünleridir.

Radon yer kabuğunda uranyum ve toryum gibi radyoaktif materyallerden düşük seviyelerde bulunmaktadır. Uranyum ve toryum diğer radyoaktif atomlara bozunur, bunlara radyum ve radon da dahildir. Radon bir soygazdır, topraktan çıkar ve havaya ulaşır. Radon dünya atmosferinin doğal bir parçasıdır. Topraktaki uranyum ve radyum miktarları jeolojik bölgeye ve toprak tipine göre değişmektedir. Aynı zamanda radon miktarı da bu elementlere bağlı olabilir [24].

4.2.3. Dahili radyasyon

Kozmik ve karasal radyasyona ek olarak, her insanda doğuştan bu yana bulunan radyoaktif materyaller ve bunun alt ürünleri bulunmaktadır. Bunların başlıcaları ^{40}K , ^{210}Pb ve ^{14}C 'tür. Bu tip radyasyonda doz, karasal ve kozmik radyasyon kadar büyük değildir. Dahili radyasyondan gelen ortalama doz miktarı 0,4 milisievert/yıldır [23].

4.2.4. Yapay radyasyon kaynakları

İnsan yapımı olan ve insanlara etkisi olan en önemli kısım tanınan X-ışını, nükleer tıp ve radyasyon tedavisi gibi tıbbi işlemlerdir. İnsanlara etkiyen başlıca izotoplar: I-131, Tc-99m, Co-60, Ir-192 ve Cs-137'dir.

İnsanlar çevrelerinde bulunan çeşitli tüketici ürünlerden (televizyon, X-ışını v.b.) dolayı yapay radyasyona maruz kalırlar.

Daha az büyüklükte olsa da insanlar nükleer yakıtlardan dolayı radyasyona maruz kalmaktadır. Buna uranyum madenleri ve bu madenlerin çıkartılması da eklenebilir.

Son olarak bu listeye radyoaktif materyallerin taşınması, radyoaktif silah testleri ve Çernobil gibi radyoaktif kazalar eklenebilir [23].

5. RADYOAKTİF SERİLER

Nükleer Fizik'te bozunma zinciri radyoaktif bozunmaya karşılık gelir. Radyoaktif bozunmada neredeyse tüm bozunma ürünleri radyoaktiftir. Bundan dolayı birçok radyoaktif element, kararlı hale doğrudan geçemez. Bunun yerine geri dönüşü olmayan seriler halinde kararlı hale geçinceye kadar bozunmaya devam eder [26].

Bozunma aşaması, önceki ve sonraki aşamalar arasındaki ilişki ile tanımlanır. Ana çekirdek, alt ürünleri oluşturmak için bozunmaya uğrar. Alt ürün kararlı olabilir veya kararlı hale geçmek için bozunma yapabilir. Alt ürünün alt ürünü olan çekirdek, bazı zamanlarda torun ürün olarak adlandırılabilir.

Bir tek ana çekirdeğin alt ürünlere bozunması geniş bir zaman aralığında değişir, sadece farklı ürün-alt ürün zincirinde değil, aynı zamanda özdeş ana ürün çekirdekleri içinde bu geçerlidir. Tek bir atomun bozunması rastgele oluşurken, özdeş atomların t süresi boyunca başlangıçtaki sayının bozunması üssel bir dağılım gösterir, $e^{-\lambda t}$, burada λ bozunma sabitidir. Bu üssel ifadenin doğasından dolayı, çekirdeklerin özelliklerinden birisi de yarı ömrüdür, başlangıçtaki atom sayısının yarıya inmesi için geçen süredir. Yarı ömür laboratuvarlarda binlerce radyoaktif izotop için belirlenir. Bu an 10^{19} yıl veya daha fazlasına kadar değişebilir.

Bu ara aşamada orjinal radyoaktif izotoptan daha fazla radyoaktivite yayınlanır: Dengeye ulaşıldığında torun izotopun bulunması yarı ömrüyle orantılıdır; fakat aktivitenin yarı ömür ile ters orantılı olduğunu göz önünde bulundurursak, bozunma zincirindeki herhangi bir çekirdek ana zincirin başındaki ürün kadar katkı sağlar. Mesela doğal uranyum belirgin bir şekilde radyoaktif değildir, fakat uranyum maden cevheri içerdiği radyum ve diğer bozunma ürünlerinden dolayı 13 kat daha fazla radyoaktiftir. Sadece kararsız durumdaki radyum izotopu belirgin bir şekilde radyoaktif yayımlayıcı değildir, diğer aşamada radyum radyoaktif gaz radon oluşturur. Toryum ve/veya uranyum içeren kayalardan (granitler gibi) radon gazı yayımlanır ve bu gaz zemin katlar veya madenler gibi kapalı mekanlarda toplanır. Radona maruz kalındığında kansere sebep olur [25].

Radyoaktif Bozunma Serileri:

Radyoaktif bozunmanın en genel dört tipi alfa bozunması, beta eksi bozunması, beta artı bozunması (elektron yakalama ve pozitron yayımlanması birlikte), ve izometrik geçişlerdir. Bu bozunma işlemleri sırasında, alfa bozunması çekirdeğin atomik kütle numarasını (A) değiştirir, ve her zaman 4 azaltır.

Üç bozunma zinciri doğada görülmektedir, bunların genel olarak adları toryum serisi, radyum serisi (uranyum serisi), ve aktinyum serisidir. 4 sınıftan 3'ünü bu doğal seriler temsil etmektedir, ve kurşunun farklı kararlı izotopları ile son bulmaktadırlar. Bu zincirlerdeki her bir izotopun kütle numarası Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Radyoaktif bozunma çeşitleri.

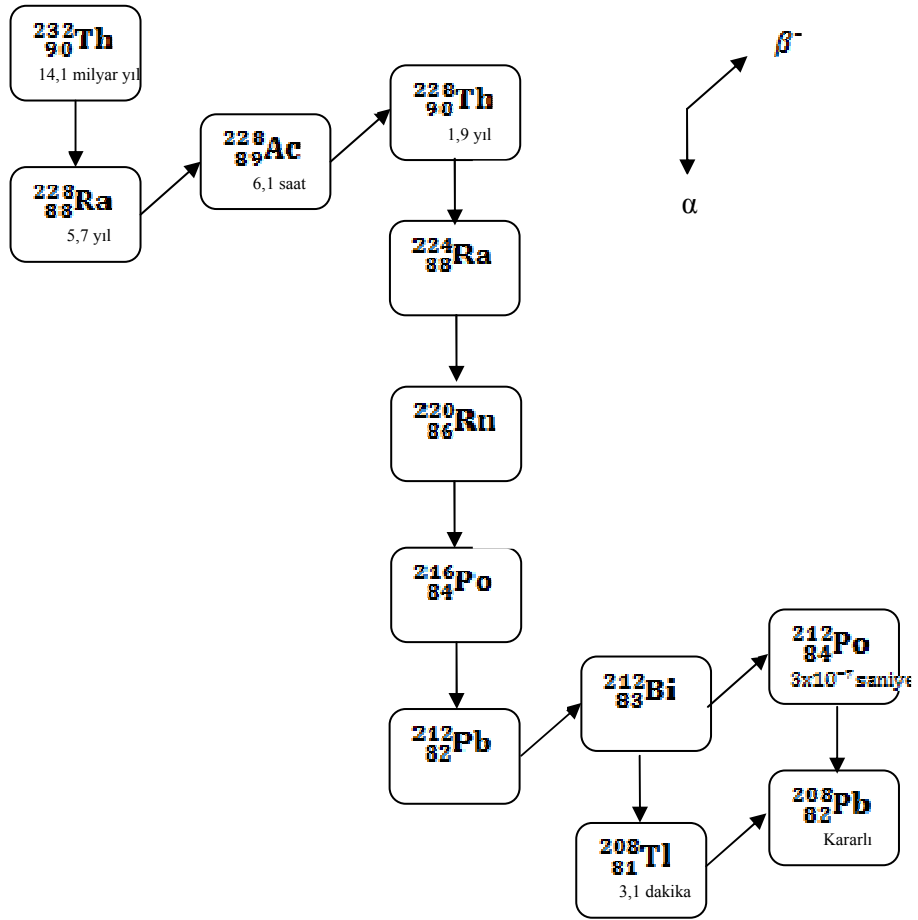
Doğal Seri:	Yapay Seri:
A = 4n Toryum Serisi	A = 4n+1 Neptinyum Serisi
A = 4n+2 Radyum Serisi	
A = 4n+3 Aktinyum Serisi	

Bu seriler dünyanın başlangıcından bu yana var olan uzun ömürlü izotoplar ile başlarlar, bu izotoplar sırasıyla ^{232}Th , ^{238}U , and ^{235}U 'dir. Plutonyum izotoplarından olan Pu-244 ve Pu-239, dünya üzerinde izlenebilecek miktarlarda bulunmaktadır.

Başlangıç izotopu ^{237}Np nin göreceli kısa yarı ömrü sebebiyle (2,14 milyon yıl), dördüncü bozunma serisi olan neptünyum serisi $A=4n+1$ ile başlar ve yapay bir seridir, doğada tükenmiştir, son oran limitinin haricinde tutarsak, ^{209}Bi 'un bozunmasıdır. Bu zincirin son izotopu şu anda ^{205}Tl olarak bilinmektedir. Bazı eski kaynaklar son izotopu ^{209}Bi olarak vermektedir, fakat ^{209}Bi 'un radyoaktif olduğu ve yarı ömrünün $1,9 \times 10^{19}$ yıl olduğu bulunmuştur.

5.1. Toryum Serisi

^{232}Th 'nin 4n zinciri genelde toryum serisi olarak adlandırılır. Doğada kendiliğinden görülen ^{232}Th elementi ile başlar, bu seri şu elementleri içermektedir: Aktinyum, bizmut, kurşun, polonyum, radyum ve radon (Şekil 5.1). Hepsi doğal toryum içeren örneklerde en azından geçici olarak metal, bileşik, veya mineral olarak bulunmaktadır [25, 49].



Şekil 5.1. Toryum serisi.

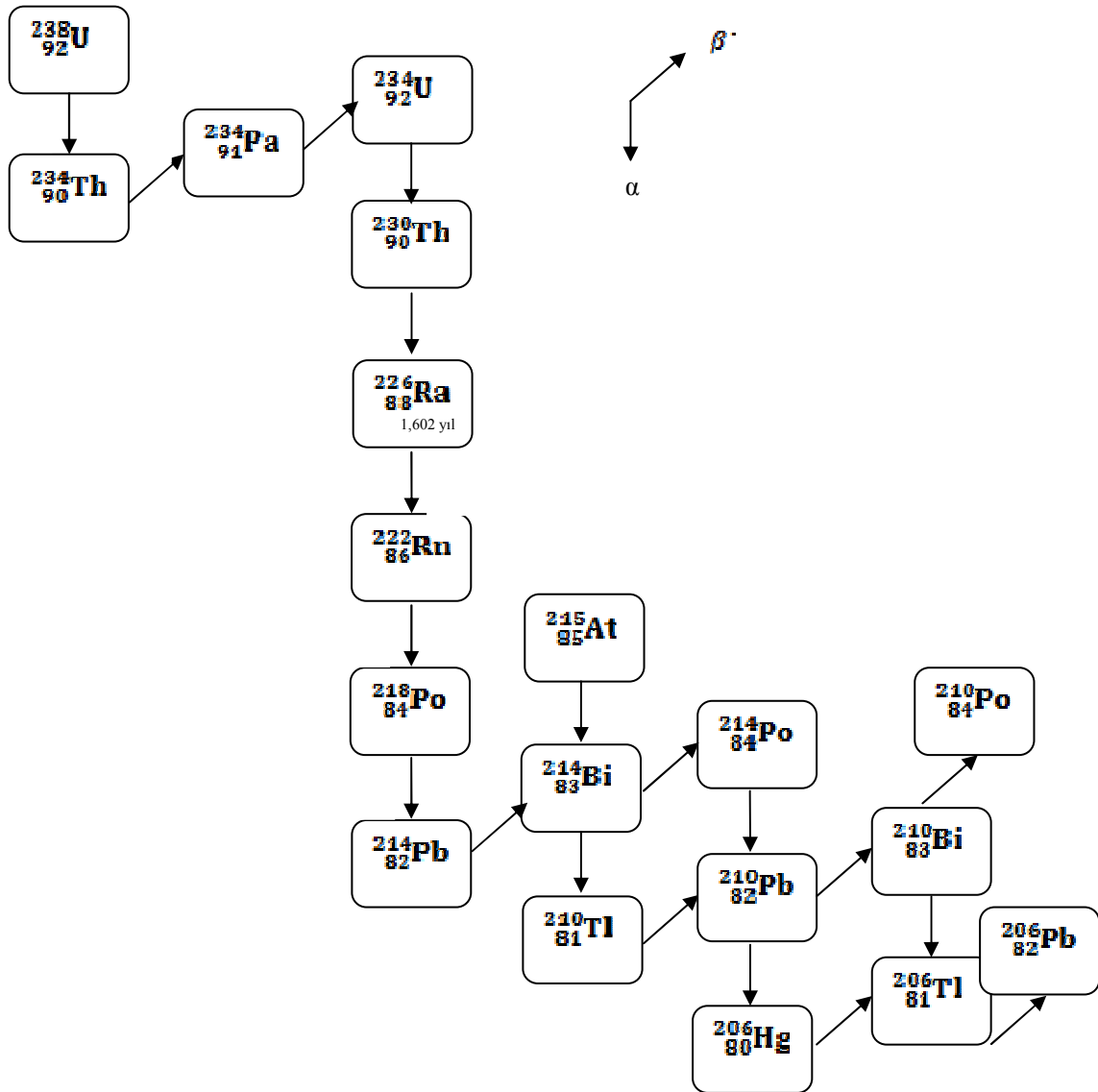
5.1.1. Toryum serisinin bozunma ürünleri

Çizelge 5.2. Toryum serisi bozunma ürünleri.

Çekirdek	Bozunma Modu	Yarı Ömrü	Yayınlanan Parçacık Enerjisi, MeV	Ürün
²⁵² Cf	α	2,645 y	6,1181	²⁴⁸ Cm
²⁴⁸ Cm	α	3,4×10 ⁵ y	6,260	²⁴⁴ Pu
²⁴⁴ Pu	α	8×10 ⁷ y	4,589	²⁴⁰ U
²⁴⁰ U	β ⁻	14,1 s	0,39	²⁴⁰ Np
²⁴⁰ Np	β ⁻	1,32 s	2,2	²⁴⁰ Pu
²⁴⁰ Pu	α	6561 y	5,1683	²³⁶ U
²³⁶ U	α	2,3×10 ⁷ y	4,494	²³² Th
²³² Th	α γ	1,405×10 ¹⁰ y	4,081 63,8 (%0,267)	²²⁸ Ra
²²⁸ Ra	β ⁻	5,75 y	0,046	²²⁸ Ac
²²⁸ Ac	β ⁻ γ	6,25 s	2,124 57,7 (%0,487) 99,5 (%1,28) 129,0 (%2,42) 154,0 (%0,737) 209,3 (%3,88) 270,2 (%3,43) 328,0 (%2,95) 338,3 (%11,3) 409,5 (%1,94) 463,0 (%4,44) 772 (%1,50) 794,9 (%4,36) 835,7 (%1,61) 911,2 (%26,6) 964,8 (5,11%) 969,0 (%16,2) 1588,2 (%3,27)	²²⁸ Th
²²⁸ Th	α γ	1,9116 y	5,520 84,4 (%1,22)	²²⁴ Ra
²²⁴ Ra	α γ	3,6319 g	5,789 241,0 (%3,97)	²²⁰ Rn
²²⁰ Rn	α γ	55,6 sn	6,404 550 (%0,07)	²¹⁶ Po
²¹⁶ Po	α	0,145 sn	6,906	²¹² Pb
²¹² Pb	β ⁻ γ	10,64 s	0,570 238,6 (%43,6) 300 (%3,34)	²¹² Bi
²¹² Bi	β ⁻ α γ	60,55 dk	2,252 (%64,06) 6,208 (%35,94) 39,9 (%1,1) 727,3 (%6,65)	²¹² Po ²⁰⁸ Tl
²¹² Po	α	299 n.sn	8,955	²⁰⁸ Pb
²⁰⁸ Tl	β ⁻	3,053 dk	4,999 277,4 (%6,31) 510,77 (%22,6) 583,2 (%84,5) 763,1 (%1,81) 860,6 (%12,4)	²⁰⁸ Pb
²⁰⁸ Pb	Kararlı	.	.	

5.2. Radyum Serisi

^{238}U 'in $4n+2$ zinciri genelde radyum serisi olarak adlandırılır (Bazen uranyum serisi olarak adlandırılır). Doğada bulunan ^{238}U ile başlar, bu seri şu elementleri içermektedir: astatin, bizmut, kurşun, polonyum, protaktinyum, radyum, radon, talyum ve toryum (Şekil 5.2). Hepsisi doğada bulunmaktadır [25, 47].



Şekil 5.2. Radyum serisi.

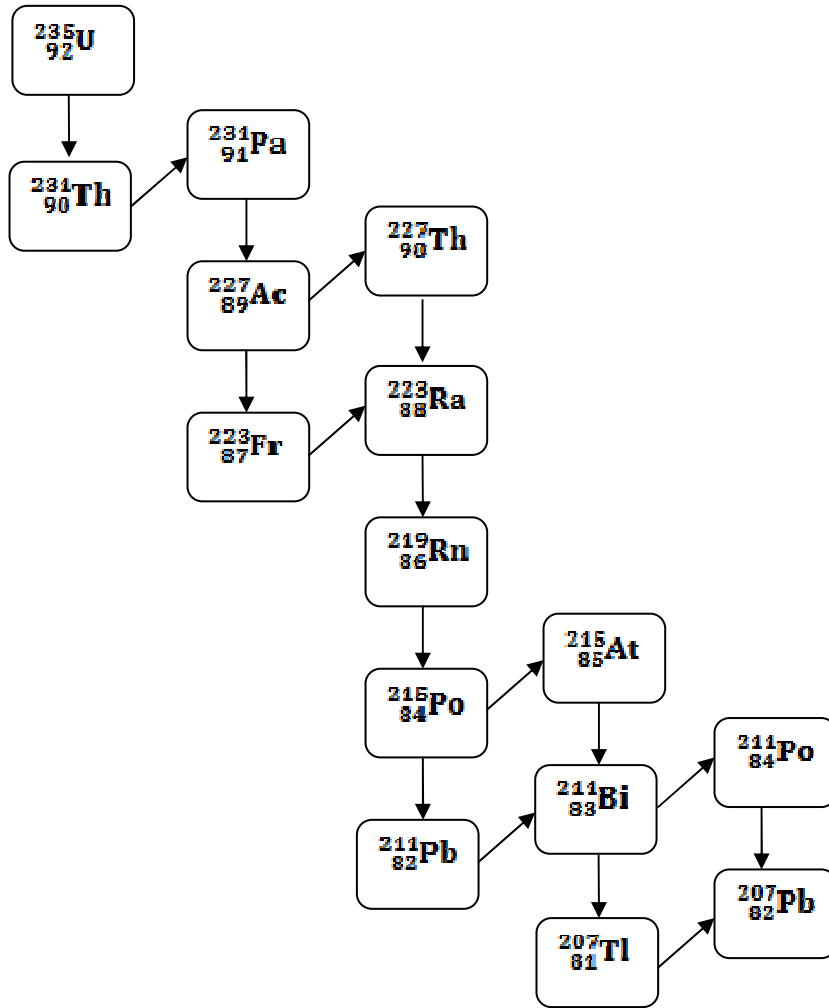
5.2.1. Radyum serisinin bozunma ürünleri

Çizelge 5.3. Radyum serisi bozunma ürünleri.

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü	Yayınlanan Parçacık Enerjisi, MeV	Ürün
²³⁸ U	α	4,468 ×10 ⁹ y	4,270	²³⁴ Th
²³⁴ Th	β ⁻	24,10 g	0,273	²³⁴ Pa
²³⁴ Pa	β ⁻	6,70 s	2,197	²³⁴ U
²³⁴ U	α	245500 y	4,859	²³⁰ Th
	γ		0,053 (%0,123)	
²³⁰ Th	α	75380 y	4,770	²²⁶ Ra
	γ		0,067 (%0,373)	
²²⁶ Ra	α	1602 y	4,871	²²² Rn
	γ		0,186 (%3,50)	
²²² Rn	α	3,8235 g	5,590	²¹⁸ Po
	γ		0,510 (%0,076)	
²¹⁸ Po	α	3,10 dk	6,115 (%99,98)	²¹⁴ Pb
	β ⁻		0,265(%0,02)	²¹⁸ At
²¹⁸ At	α	1,5 sn	6,874 (%99,90)	²¹⁴ Bi
	β ⁻		2,883 (% 0,10)	²¹⁸ Rn
²¹⁸ Rn	α	35 m.sn	7,263	²¹⁴ Po
²¹⁴ Pb	β ⁻	26,8 dk	1,024	²¹⁴ Bi
	γ		0,053 (%1,1)	
			0,242 (%7,46)	
			0,295 (%19,2)	
			0,351 (%37,1)	
			0,785 (%1,09)	
²¹⁴ Bi	β ⁻	19,9 dk	3,272 (%99,98)	²¹⁴ Po
	α		5,617 (%0,02)	²¹⁰ Tl
	γ		0,609 (%46,1)	
			0,768 (%4,89)	
			0,806 (%1,23)	
			0,934 (%3,16)	
			1,120 (%15,0)	
			1,238 (%5,92)	
			1,377 (%4,02)	
			1,408 (%2,48)	
			1,509 (%2,19)	
			1,764 (%15,9)	
²¹⁴ Po	α	0,1643 m.sn	7,883	²¹⁰ Pb
	γ		0,799 (%0,014)	
²¹⁰ Tl	β ⁻	1,30 dk	5,484	²¹⁰ Pb
	γ		0,296 (%80)	
			0,795 (%100)	
			1,310 (%21)	
²¹⁰ Pb	β ⁻	22,3 y	0,064	²¹⁰ Bi
	γ		0,046 (%4,05)	
²¹⁰ Bi	β ⁻	5,013 g	1,426(%99,99987)	²¹⁰ Po
	α		5,982 (%0,00013)	²⁰⁶ Tl
²¹⁰ Po	α	138,376 g	5,407	²⁰⁶ Pb
	γ		0,803(%0,0011)	
²⁰⁶ Tl	β ⁻	4,199 dk	1,533	²⁰⁶ Pb
²⁰⁶ Pb	-	Kararlı	-	-

5.3. Aktinyum Serisi

^{235}U 'in $4n+3$ zinciri genelde aktinyum serisi olarak adlandırılır. Doğal ^{235}U ile başlar, seri şu elementleri içermektedir: Aktinyum, astatin, bizmut, fransiyum, kurşun, polonyum, protaktinyum, radyum, radon, talyum ve toron (Şekil 5.3). Hepsi doğada mevcuttur [25, 48].



Şekil 5.3. Aktinyum serisi

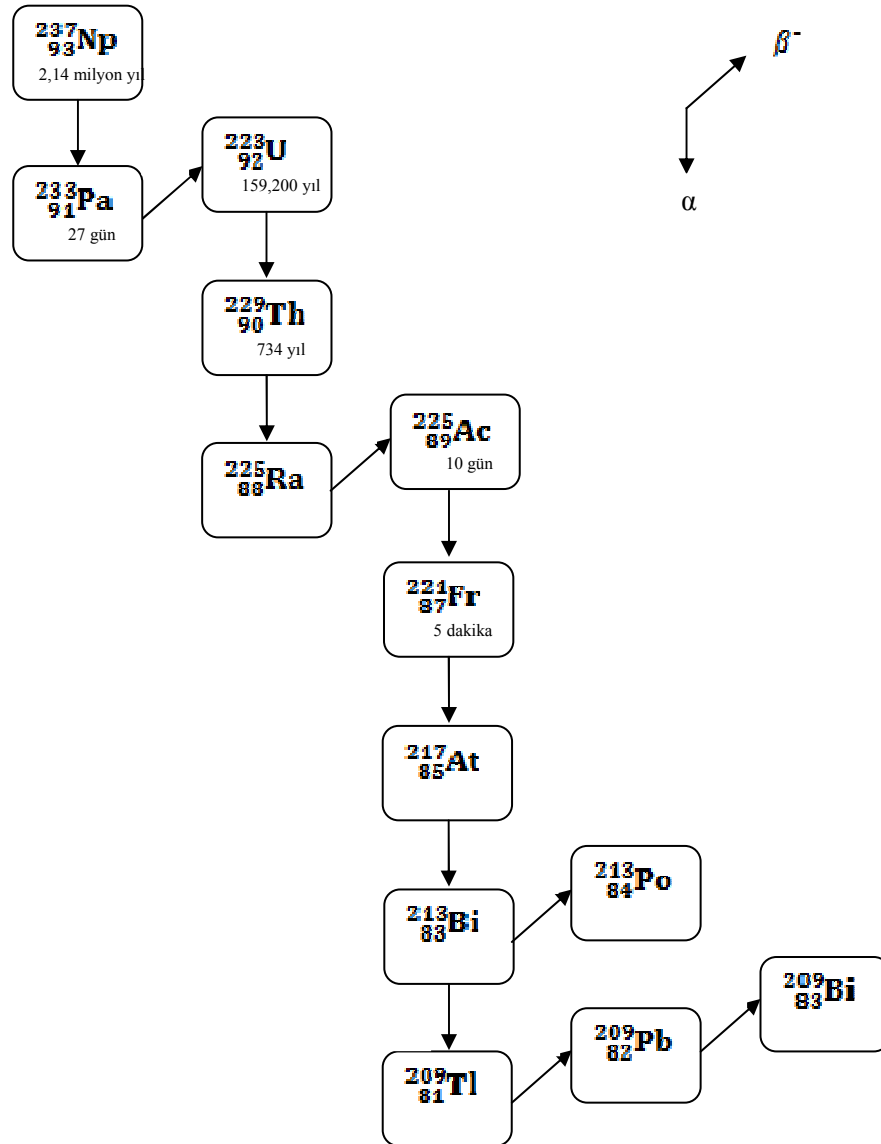
5.3.1. Aktinyum serisini oluşturan ürünler

Çizelge 5.4. Aktinyum serisi bozunma ürünleri.

Çekirdek	Bozunma modu	Yarı Ömrü	Yayımlanan Parçacık Enerjisi, MeV	Ürün
²³⁹ Pu	α	2,41×10 ⁴ y	5,244	²³⁵ U
²³⁵ U	α γ	7,04×10 ⁸ y	4,678 0,1438(%10,96) 0,16333 (%5,08) 0,1857 (%57,2) 0,2053 (%5,01)	²³¹ Th
²³¹ Th	β ⁻ γ	25,52 s	0,391 0,2564 (%14,6) 0,842 (%6,71)	²³¹ Pa
²³¹ Pa	α γ	32760 y	5,150 0,274 (%11,1) 0,300 (%2,41) 0,3027 (%2,47)	²²⁷ Ac
²²⁷ Ac	β ⁻ α γ	21,772 y	0,045 (%98,62) 0,42 (%1,38) 0,070(%0,08)	²²⁷ Th ²²³ Fr
²²⁷ Th	α γ	18,68 g	6,147 0,501 (%8,5) 0,236 (%11,2) 0,2563 (%6,8) 0,300 (%2,0) 0,3299 (%2,75)	²²³ Ra
²²³ Fr	β ⁻ γ	22,00 dk	1,149 0,0501 (%36) 0,0797 (%9,1) 0,2348 (%3)	²²³ Ra
²²³ Ra	α γ	11,43 g	5,979 0,144 (%3,26) 0,154 (%5,59) 0,158 (%0,69) 0,269 (%13,6) 0,323 (%3,90) 0,338 (%2,78)	²¹⁹ Rn
²¹⁹ Rn	α γ	3,96 sn	6,946 0,271 (%9,9) 0,401 (%6,64)	²¹⁵ Po
²¹⁵ Po	α β ⁻	1,781 m.sn	7,527 (%99,99977) 0,715 (%0,00023)	²¹¹ Pb ²¹⁵ At
²¹⁵ At	α	0,1 m.sn	8,178	²¹¹ Bi
²¹¹ Pb	β ⁻ γ	36,1 dk	1,367 0,404 (%3,83) 0,427 (%1,72) 0,832 (%3,81)	²¹¹ Bi
²¹¹ Bi	α β ⁻ γ	2,14 dk	6,751 (%99,724) 0,575 (%0,276) 0,351 (%12,8)	²⁰⁷ Tl ²¹¹ Po
²¹¹ Po	α γ	516 m.sn	7,595 0,569 (%0,0016) 0,897 (%0,26)	²⁰⁷ Pb
²⁰⁷ Tl	β ⁻ γ	4,77 dk	1,418 0,897 (%0,16)	²⁰⁷ Pb
²⁰⁷ Pb	.	Kararlı	.	.

5.4. Neptünyum Serisi

^{237}Np 'nin $4n+1$ zinciri genelde “neptünyum serisi” olarak adlandırılır. Bu seride sadece 2 element doğada bulunur, bizmut ve talyum. ^{241}U içeren duman dedektörleri önemli miktarda ^{237}Np 'yi amorsiyum ürünleri olarak iyonizasyon odasında toplar; şu elementler neptünyumun bozunma zincirinde bulunmaktadır: Aktinyum, astatin, bizmut, fransiyum, kurşun, protaktinyum, radyum, talyum, toryum ve uranyum(Şekil 5.4). Bu seri üstüne yapılan çalışmalar çok eski değildir [25]. Bu serinin üyeleri Çizelge 5.5'te verilmektedir.



Şekil 5.4. Neptünyum serisi.

5.4.1. Neptünyum serisini oluşturan elementler

Çizelge 5.5. Neptünyum serisi bozunma türünleri

Çekirdek	Bozunma Modu	Yarı Ömür	Yayınlanan Parçacık Enerjisi, MeV	Ürün
²⁴⁹ Cf	α	351 y	5,813+0,388	²⁴⁵ Cm
²⁴⁵ Cm	α	8500 y	5,362+0,175	²⁴¹ Pu
²⁴¹ Pu	β^-	14,4 y	0,021	²⁴¹ Am
²⁴¹ Am	α	432,7 y	5,638	²³⁷ Np
²³⁷ Np	α	$2,14 \cdot 10^6$ y	4,959	²³³ Pa
²³³ Pa	β^-	27,0 g	0,571	²³³ U
²³³ U	α	$1,592 \cdot 10^5$ y	4,909	²²⁹ Th
²²⁹ Th	α	$7,34 \cdot 10^4$ y	5,168	²²⁵ Ra
²²⁵ Ra	β^-	14,9 g	0,36	²²⁵ Ac
²²⁵ Ac	α	10,0 g	5,935	²²¹ Fr
²²¹ Fr	α	4,8 dk	6,3	²¹⁷ At
²¹⁷ At	α	32 m.sn	7,0	²¹³ Bi
²¹³ Bi	α	46,5 dk	5,87	²⁰⁹ Tl
²⁰⁹ Tl	β^-	2,2 dk	3,99	²⁰⁹ Pb
²⁰⁹ Pb	β^-	3,25 s	0,644	²⁰⁹ Bi
²⁰⁹ Bi	α	$1,9 \cdot 10^{19}$ y	3,14	²⁰⁵ Tl
²⁰⁵ Tl	.	Kararlı	.	.

6. RADYUM VE RADON

6.1. Radyum

^{226}Ra , Uranyum serisinin doğada bulunan bir elementidir ve yarı ömrü 1602 yıldır. ^{226}Ra alfa yayımlayarak bozduğunda, yarı ömrü 3,8 gün olan alt ürünü ^{222}Rn 'ye dönüşür. Benzer şekilde ^{232}Th bozunma zincirinde bulunan ^{224}Ra bozunma yaptığında, yarı ömrü 54 saniye olan ve toron olarak bilinen ^{220}Rn 'ye bozunur. Aktinon olarak bilinen ^{219}Rn , ^{235}U bozunma zincirinin bir üyesidir ve çok hızlı bir şekilde bozunur, yarı ömrü 3,92 saniyedir. Tüm radon izotopları soygazdır, polar olmayan, tek atomlu moleküllerdir ve pratik olarak tepkimeye girmezler. ^{222}Rn izotopu diğer kısa ömürlü radon izotoplarından farklıdır ve kolayca atmosferde yayılabilir.

Radyum gümüş renkli, parlak, yumuşak, şiddetli derecede radyoaktif bir elementtir. Havayla tepkimeye girdiğinde kolayca oksitlenir, saf beyazdan siyaha döner. Suyun içinde radyum hidroksit oluşturmak için oksitlenir.

Ana ürün radyum toprakta veya kayalarda bozduğunda, ortaya çıkan radon atomu geri teper. Geri tepen atomların bir kesri jeolojik sıvılarda bulunur. Radonun bir kesri toprak suyundan toprak gazına girer, öncelikle difüzyonla, daha sonra hareketli hale geçer. Toprak gazı atmosfer gazıyla değiştiğinde radon atmosfere ulaşır.

^{226}Ra , sağlık riski oluşturmasından ve jeokimyasal işlemlerde bir izleyici olarak görev almasından dolayı sularda ölçümü sızdır.

Radyum sindirildiğinde, kalsiyum gibi davranır ve iskelette tutunur. ^{226}Ra kemiklerde düzgün olmayan bir dağılım içinde depolanır. ^{226}Ra 'nın kemik içerisinde bozunmasıyla oluşan radonun %70'i dışarı atılır ve kalan kısmı kana karışır.

Başlangıçta kemik yüzeyine tutunur ve daha sonra orantılı olarak kemik mineraliyle birleşir. ^{226}Ra alfa parçacıkları yayımlar ve ^{222}Rn 'ye bozunur. ^{228}Ra beta parçacıkları yayımlar fakat ürünleri ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn gibi alfa yayımlayıcılarıdır. Alfa parçacıklarının kısa menzilden dolayı (yumuşak dokuda 40-50 μm , kemik mineralinde daha az) doku yüzeyine yakın yerlerde bozulan atomlar etkilenir. ^{226}Ra ve ^{228}Ra , ikisi birlikte kemik uruna sebep olabilir. Kanseri riski ^{226}Ra 'nın radona bozunmasına dayandırılabilir. Bozunmadan sonra ^{222}Rn 'nin paranazal sinüsler ve mastoid işlemi ve sonrasında epitel yapıdaki hücreler radon ürünleri olan alfa parçacıklarına maruz kalır. ^{220}Rn 'nin ana ürünü ^{228}Ra 'den bozunup yayılma ihtimali kısa yarı ömründen dolayı oldukça düşüktür [34].

İçme sularında bulunan ^{226}Ra için üst limit, USEPA tarafından 20 pCi/L (0,74 Bq/L) olarak belirlenmiştir. Bunun yanında USEPA'nın yönetmeliğine göre, içme sularındaki ^{226}Ra konsantrasyonunun 3 pCi/L'den yüksek olması durumunda ^{228}Ra konsantrasyonu belirlenmelidir [45].

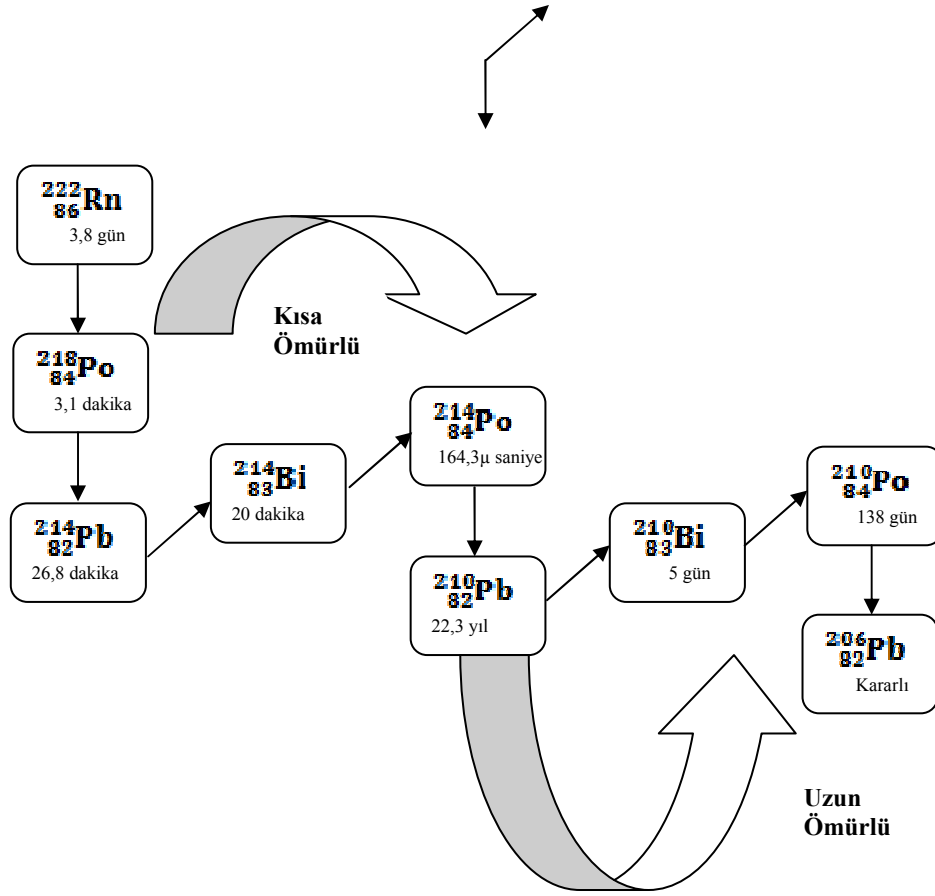
6.2. Radon

Radyasyon, yaşadığımız çevrenin doğal bir parçasıdır. Tüm insanlar topraktaki, sudaki, havadaki ve yiyeceklerimizdeki doğal radyasyona maruz kalır. Maruz kaldığımız doğal radyasyonun en büyük kısmı radyoaktif gaz olan radondan gelir. Radon kimyasal olarak tepkimeye girmeyen, kokusuz, renksiz, tatsız ve doğada kendiliğinden görülen bir radyoaktif gazdır. Uranyumun bozunma zincirinde bulunan radyumdan üretilir. Uranyum, dünya varolduğundan bu yana yer kabuğunda bulunmaktadır. Radon miktarı, uranyum miktarı ile orantılıdır. Toprakta bulunan uranyum konsantrasyonu değişkenlik gösterdiği için, radon konsantrasyonu da değişkendir.

Radon gazı, çeşitli miktarlarda tüm kayalarda ve toprakta dünyanın her yerinde bulunur. Radyoaktif olmasından dolayı, radon atomlarının rastgele bir şekilde bozunur veya diğer atomlarla değişebilir.

Radon, yer kabuğundan kolayca sızabilir ve radon ürünleri adı verilen kısa ömürlü parçacıklara bozunur (Şekil 6.1). Kısa ömürlü ürünleri, alfa adı verilen ağır iyonizasyon radyasyonu olarak bilinen alfa parçacıkları yayımlar. Ortaya çıkan atomlar, radon ürünü olarak adlandırılır. Elektriksel olarak yüklüdür ve kapalı ortamdaki toz parçacıklarına tutunabilirler. Bu toz parçacıkları ise kolayca solunabilir ve akciğerlere tutunabilir. Alfa parçacıkları akciğer hücrelerinin DNA'sında hasara yol açabilir. DNA'da hasar oluşması, kansere kadar götüren olaylar zincirinde ilk adımdır. Alfa parçacıkları vücudumuz içinde oldukça kısa yol almaktadır. Böylece radon ürünlerinin bozunması sonucu oluşan alfa parçacıkları diğer organların hücrelerine ulaşamaz, böylece soluduğumuz havada bulunan radonun en büyük potansiyel tehlikesi akciğer kanseridir.

Radon gazı maden veya zemin kat gibi kapalı bir alanda kaldığında, radon ürünlerinden dolayı radyasyon tehlikesi artmaktadır. Radon gazı atmosfere dağıldığında, katı radon ürünleri toprakta ve suda depolanır, yiyecek zincirine dahil olur; kuşların, hayvanların, balıkların ve böceklerin vücutlarına girer.



Şekil 6.1. Radon ve radon bozunma ürünleri.

Radon gazı solunduğunda, bozunmadan önce büyük kısmı dışarı verilir. Solunmuş radonun ve bozunma ürünlerinin küçük bir kısmı ciğerlerden kana ve son olarak organlara transfer olabilir. Fakat alınan doz, kanser riski ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir.

Hava tarafından seyreltilmesinden dolayı dış ortamlardaki radon konsantrasyonları genellikle çok düşüktür. Binalarda bulunan radonun çoğu doğrudan topraktan gelir. Aynı zamanda radon içme sularında da bulunur ve kullanıldığı zaman evlere girer. Duşta, giysilerimizi yıkadığımızda, tuvaletleri temizlediğimizde, radon sudan yayılır ve havaya karışır. Sudaki radon, kapalı mekanlarda bulunan radona katkıda bulunur. Ek olarak, içme suyu erimiş radon içerir. Radonun bozunmasıyla oluşan alt ürünler ve alfa radyasyonun kana karışması sonucunda midedeki hassas hücreler ve diğer organlar radyasyona maruz kalır.

6.2.1. İçme sularında radon

Sudaki radon, ^{226}Ra 'nın bozunması sonucunda oluşur ve konsantrasyonu ^{226}Ra 'yı çevreleyen toprak ve kayalarla bağlantılıdır [29].

^{222}Rn 'nin yüksek konsantrasyonları yer altı sularında bulunur ve kayalarda bulunan ^{226}Ra 'nın konsantrasyonu ile bağlantılıdır. Kristal kaya yapılarından özellikle granitin bulunduğu bölgeler, yüksek konsantrasyonun sebebidir. Oysa ki tortu kayalarının bulunduğu yerlerde bu seviye daha düşüktür. Radon gazı toprak ve kayalar üzerinden sızar ve suda çözünür[29]. Yapılan çalışmalarda, yeraltı sularındaki radon konsantrasyonunun yüzey sularındaki radon konsantrasyonundan çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yeraltı suları, uranyumca zengin kaya ve toprak üzerinden geçerken suyun içine radon salınır [31].

İçilebilir sudaki çözünmüş ^{222}Rn , insanların maruz kaldığı radyasyon miktarına katkıda bulunur. Çeşme suyundan salınan ^{222}Rn , evlerde ortamdaki radon miktarının artışına sebep olur.

Sudaki çözünmüş radon, çok kısa bir sürede kaynağından uzaktaki bir noktaya transfer olabilir. Radonun çözünürlüğü suyun sıcaklığına, pH'ına gibi çeşitli etmenlere bağlıdır. Banyoda, mutfakta, lavaboda kullandığımız su havaya radon salınmasına sebep olur. Bu salınan radon, kapalı ortamdaki radon konsantrasyonunun artışına sebep olur [27].

Quabi yaptığı bir çalışmada, banyoda su açıldığında banyodaki radon konsantrasyonunun arttığını ve aynı zamanda evin diğer bölümlerinde alfa aktivitesinde artış olduğunu gözlemlemiştir [27].

Sulardaki radon, insan sağlığı için iki tür tehlike içerir: Suyun sindirilmesinden ve sudan salınan radon ve radon ürünlerinin solunmasından dolayı akciğer ve mide kanseri riski ortaya çıkabilir [27, 28]. Evde geçirdiğimiz zaman diliminin büyük olmasından dolayı evler, radona maruz kalma yeri olarak, büyük önem taşımaktadır [28].

Mose et al ABD'de Virginia ve Maryland'te yaptıkları çalışmada radonca zengin kuyu sularının kullanımı sonucunda kanser vakalarının arttığını tesbit etmişlerdir [30]. Tanooka et al Japonya'da yaptıkları bir çalışmada, alfa parçacıklarının oluşturduğu kanser riskinin doz oranına bağlı olduğunu gözlemlemiştir [32].

Sudaki çözünmüş radonun sindirilmesi sonucunda oluşan kanser riski, organlar tarafından soğurulan doz kesrinden faydalanılarak hesaplanır [31, 44]. NCR tarafından yapılan bir çalışmada ömür boyu 1 Bq/m^3 'lük radon konsantrasyonu içeren suyun sindirilmesi sonucunda oluşan kanser riskinin %80'ini mide kanseri oluşturmaktadır [32].

NRC tarafından 1999 yılında yapılan bir çalışmada, içme suyundan havadaki ortama radon transferi katsayısı 10^{-4} olarak belirlenmiştir. 2006 yılında Vinson et al tarafından yapılan bir çalışmada, bu katsayının 10^{-4} civarında olduğu tekrarlanmıştır [33]. Bunu bir örnek ile açıklarsak, sudaki radon konsantrasyonu 10000 Bq/L ise havaya transfer edilen radon konsantrasyonu 1 Bq/L'dir.

EPA 1991 yılında içme sularında bulunan radon için maksimum konsantrasyon seviyesi belirlemiştir, bu 11 Bq/L'dir. Bu seviyenin aşılması durumunda kullanılan su kaynağında önlem alınması gerekmektedir. 2000 yılında 11 Bq/L'lik konsantrasyon seviyesine bir alternatif seviye belirleyerek, sudaki radon konsantrasyonunun kapalı ortamda bulunan radon konsantrasyonundan daha büyük olmaması gerektiğini önermiştir. Buna göre, kapalı ortamdaki radon konsantrasyonu 1 Bq/L ise sudaki radon konsantrasyonu 10 000 Bq/L'den daha büyük olamaz [45].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme suyu kaynaklarında 100 Bq/L'nin aşılması durumunda tehlike arz ettiğini belirtmiştir [46].

6.2.2. Sudaki radonun kapalı ortama transferi

Erimiş radon içeren suyun binalarda kullanımı sonucunda havaya karışan Rn-222 konsantrasyonunun tahmini kompleks bir problemdir. İşin içine sudaki radonun çözünürlüğü, binalardaki kullanılan su miktarı, binanın hacmi, ve havalandırma oranı girmektedir. Su yoluyla taşınan ve havaya karışan radon miktarı binadan binaya değişiklik gösterir, fakat aktif su kullanımı olan banyolarda ve mutfaklarda daha yüksektir. Bu aynı zamanda sudaki radon konsantrasyonuna bağlıdır. Bununla birlikte binadaki ortalama artış miktarını belirlemek ($\overline{\Delta C_a}$) ve sudaki ortalama konsantrasyon C_w için bir transfer katsayısı türetmek yaygındır:

$$\text{Transfer Katsayısı} = \frac{\overline{\Delta C_a}}{C_w} \quad (6.1)$$

Bu bağıntı Nazaroff et al tarafından transfer katsayısını tahmin etmek için türetilmiştir [39]. Transfer fonksiyonu şu şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{\overline{\Delta C_a}}{C_w} = \frac{We}{\lambda V} \quad (6.2)$$

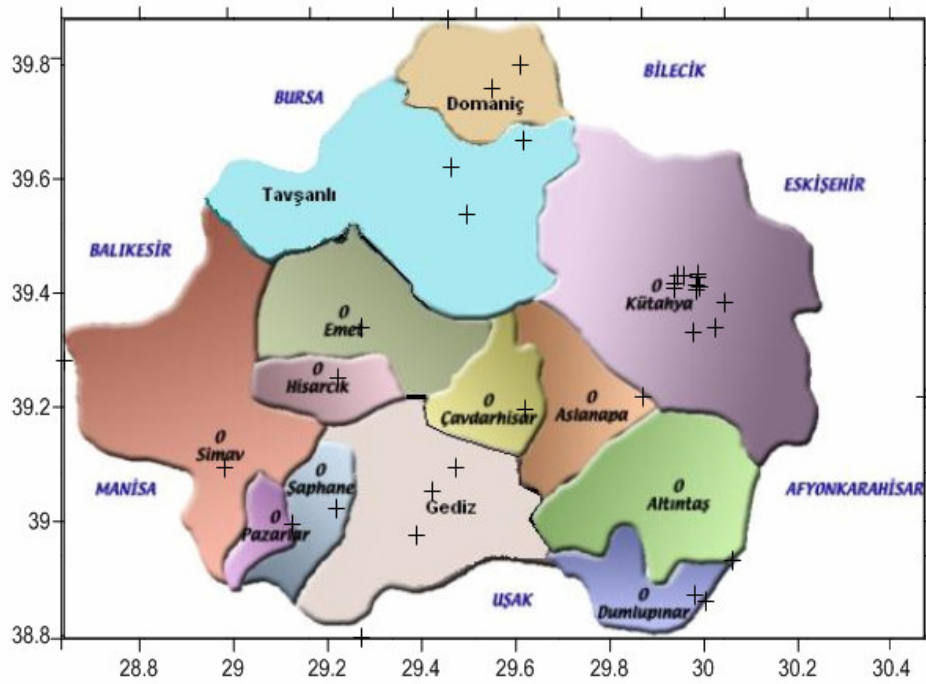
Burada W , ortalama su kullanım zamanı; e kullanım ağırlıklı Rn-222'nin sudan havaya transfer verimliliği; λ hava değişim oranı, ki su kullanım oranıyla orantısız olduğu kabul edilir; ve V binanın hacmidir.

Yapılan alışmalarda NRC, transfer katsayısını $0,8$ ve $1,2 \times 10^{-4}$ arasında kabul etmiş ve bu değerleri tavsiye etmiştir. Yani sudaki radonun kapalı ortama transferi onbinde bir mertebesindedir [38].

7. DENEYSEL ÇALIŞMA

7.1. Örnekleme Alanı

Kütahya ili ve ilçelerinde bulunan 30 noktadan örnek toplanarak radon ve radyum seviyeleri belirlenmiştir. Örnekleme işlemi 25.01.2009 ve 03.05.2009 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Örnekleme işlemi esnasında anlık olarak pH, iletkenlik, su sıcaklığı, nem, basınç, yükseklik ve koordinatlar anlık olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.1. Örnekleme noktaları.

Kütahya ili Türkiye'nin batısında, İç Ege bölgesinde yer almaktadır. Yüz ölçümü 11.875 km²'dir, Türkiye'nin yüz ölçümünün yaklaşık %1,5'ini oluşturmaktadır. Kütahya ili, 38 derece 70 dakika ve 39 derece 80 dakika kuzey enlemleri ile 29 derece 00 dakika ve 30 derece 30 dakika doğu boylamları arasında yer almaktadır.

30 örnekleme noktasından 12'si Kütahya İli Merkez ilçesinden, 18'i Kütahya ili ilçelerinden seçilmiştir. Örneklerin toplandığı noktalar Şekil 7.1'de gösterilmiştir.

Kütahya ili Merkez İlçesi'nde bulunan örnekleme noktaları, şebeke içme suyunu sağlayan depolar, şebeke içme suları ve çoğunluğun kullandığı içme suyu kaynaklarından

seçilmiştir. Bu esnada şebeke içme suyunun %90'ını sağlayan Porsuk Terfi Merkezi Toplama deposu ve Özbek Depo'sundan örnekler alınmıştır [40].

Kütahya ili ilçelerinde bulunan örnekleme noktaları ise şebeke suyu ve halkın çoğunlukla kullandığı içme suyu kaynaklarından seçilmiştir. Su örneklerinin alındığı kaynaklar ve örnekleme tarihleri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Kütahya ili içme suları örnekleme noktaları.

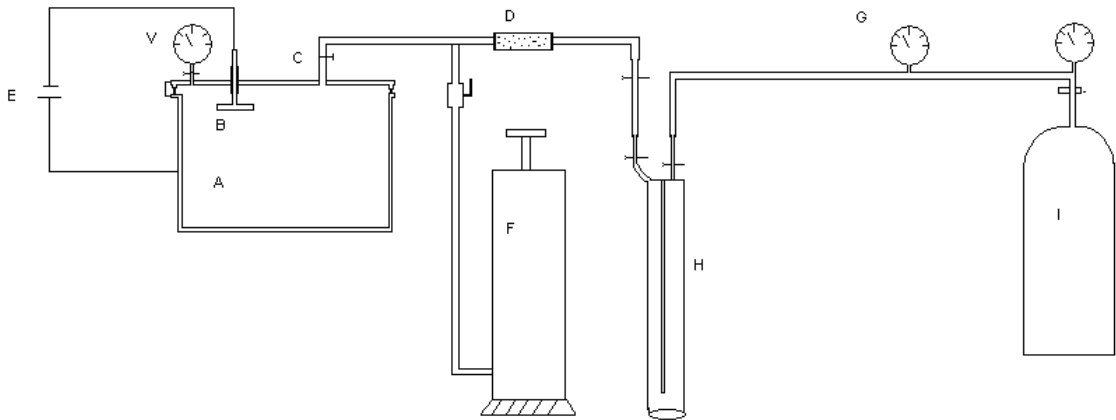
Örnek No:	Örnekleme Noktası:	Örnekleme Tarihi:
1	Çelebi	25.01.2009
2	Kunduören	25.01.2009
3	İncik Suyu	25.01.2009
4	Gelinkaya	25.01.2009
5	Porsuk	25.01.2009
6	Aksu	25.01.2009
7	Meydan	25.01.2009
8	Bahçelievler	25.01.2009
9	Aydınlıkevler	25.01.2009
10	Maltepe	25.01.2009
11	Zafertepe	25.01.2009
12	Hamidiye	25.01.2009
13	Tavşanlı	01.03.2009
14	Gediz	01.03.2009
15	Aslanapa	01.03.2009
16	Emet	01.03.2009
17	Gediz	01.03.2009
18	Hisarcık	01.03.2009
19	Çavdarhisar	01.03.2009
20	Simav	01.03.2009
21	Eski Gediz	01.03.2009
22	Domaniç(Bölge 1)	03.03.2009
23	Tavşanlı	03.03.2009
24	Domaniç (Bölge 2)	03.03.2009
25	Dumlupınar (Bölge 1)	03.03.2009
26	Dumlupınar (Bölge 2)	03.03.2009
27	Tavşanlı	03.03.2009
28	Dumlupınar (Bölge 3)	03.03.2009
29	Şaphane	03.05.2009
30	Pazarlar	03.05.2009

7.2. Örnekleme İşlemi

Su örnekleri, özel yapım radon şişelerine, her bir şişede 100 mL olacak şekilde toplanmıştır. Örnekleme işleminden önce şişeler, saf su ile yıkanmıştır. Örnekleme işlemi sırasında su kaynağı en az 5 dakika süreyle akıtılmıştır. Radon gazı ölçümlerinin daha net olması için su, şişelere bir hortum yardımıyla çekilmiştir. Daha sonra şişenin her iki ucuda radon gazının kaçışını engellemek için sıkıca kapatılmıştır. Alınan su örneklerinin radon ve radyum sayımlarının tayini için, örnekler Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'ne götürülmüştür. Örnekleme esnasında, örneğin alındığı saat ve tarih kaydedilmiştir.

7.3. Kollektör Yöntemi

Bu yöntem ile sudaki radon ve radyum miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 7.2. Kollektör sisteminin şematik gösterimi.

A: Kollektör Odası, B: Bakır Plaka, C: Hava Musluğu, D: CaCl Filtre, E: Güç Kaynağı,
F: Pompa, G: Basınç Ölçer, H: Radon Şişesi, I: Basıncılı Hava, V: Vakum Ölçer

Sudaki radon konsantrasyonu, Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü tarafından geliştirilen Kollektör yöntemi kullanılarak belirlendi [11]. Yapılan bir çalışmada bu yöntemin optimum çalışma şartları belirlenmiştir. Kollektör çapı $R=4,5$ cm, kollektör cinsi Bakır, kollektör odası hacmi $V=2,47$ lt ($h=8,7$ cm, $r=9,5$ cm), ve uygulanan voltaj $V=600$ V olarak bulunmuştur [41].

Özel radon şişeleri Şekil 7.2’de görülen kollektör sistemine bağlanarak öncelikle vakum ortamının oluşması sağlanır. Şişenin bir ucu bekletilmiş basınçlı hava tüpüne, diğer ucu ise şişenin içindeki havayı kollektör odasına aktarmak için kollektör odasına bağlanır. Şişenin bağlantıları kapalıyken öncelikle -0,6 mb’lık basınç oluşturulur. Daha sonra şişenin bekletilmiş basınçlı hava tüpüne bağlı kısmı yavaşça açılır. Burada bekletilmiş hava kullanılmasındaki amaç; 100 mL’lik su örneği içindeki radon gazını, ölçüm sonuçlarını etkilemeyecek taşıyıcı bir gaz yardımıyla uzaklaştırmaktır. Ardından şişenin kollektör odasına bağlı kısmı yavaşça açılır. Basınç 0’a geldiğinde şişenin her iki bağlantı ucu da kapatılır. Burada amaçlanan, şişenin içinde hapsedilmiş olan radon gazının havayla yer değiştirerek kollektör odasına aktarılmasıdır.

Radon ile bozunum ürünleri yaklaşık 4 saat sonra dengeye ulaşır. Bu zaman süresinde kapalı ortamda yeterli voltaj uygulanırsa, pozitif yüklü olarak oluşan radon ürünlerinin negatif kutup (kollektör) üzerinde toplanması sağlanabilir.

Kollektör odası, hava sızdırmayacak şekilde içinde bir tarafı yalıtılmış bakır plaka bulunan odadır. Kollektör odası ortalama 4 saat boyunca bağlanır. Bu sürede kollektör odası pozitif, bakır plaka negatif olmak üzere 600 volt doğru akım uygulanmıştır. Burada kollektör odası hava almayacak şekilde kapatılmıştır.

Kollektör odasında örneklere 4 saat boyunca yüksek elektrostatik alan uygulanır. Biliniyor ki ^{222}Rn bozunma ürünleri pozitif iyonlar olarak üretilir. Bu işlemle birlikte tüm pozitif iyonlar bakır plaka üstünde toplanır.

Bu işlem sonucunda radon ürünlerinin bakır kollektör plakası üstünde toplanmasını bekliyoruz. Çünkü alfa parçacıklarının çekirdekten çıkışları sırasında, yörünge elektronlarını götürmesinden dolayı radonun bozunma ürünlerinden büyük bir kısmı pozitif iyonlar olarak oluşur [1].

Kollektör odasından çıkarılan bakır plaka ZnS(Ag) alfa sintilasyon sayıcısı (Eberline Model SAC-4) tarafından 20 dakika boyunca sayılır.

Sistemin kalibrasyon faktörünün tayin edilmesinde 8 farklı radyum standartı kullanılmış, daha sonra ortaya çıkan kalibrasyon eğrisinden kalibrasyon faktörü hesaplanmıştır. Alınan sayımlar dakika başına sayım cinsinden olduğu için, bunları 0,087 cpm/pci/L’lik kalibrasyon faktörü kullanarak pCi/L birimine çevrildi [1, 43].

7.3.1. Kullanılan alfa sayım cihazı

Kollektör yönteminde kullanılan alfa sayım cihazı Model SAC-4 Eberlin sintilasyon alfa sayıcısıdır. Dedektörün örnek boyutu maksimum 21/32 inç çapta; 3/8 inç kalınlıkta sintilasyon fosforu, plastik boru üzerine ZnS(Ag) tozu. 1 inç çaplı Pu-239 kaynağı ve 2π sayım geometrisi ile verimi %80 [1].

7.3.2. En düşük belirlenebilir aktivite

Kollektör yönteminde, radon ve alt ürünlerinin bakır plaka üzerinde toparlanmasından sonra bakır disk, 20 dakika boyunca alfa sayıcısında sayılmıştır. Sistemin radon ve radyum için sayabildiği minimum sayım, 1 sayım/20 dakikadır.

Bunu göz önüne alırsak, sistemin 20 dakikalık sayım boyunca belirleyebildiği en düşük aktivite radon ölçümleri için 0,021 Bq/L ve radyum ölçümleri için 0,015 Bq/L olarak belirlenmiştir.

Belirlenen değerler, dedektörün en düşük belirleyebildiği aktiviteden farklıdır.

7.4. İçme Suları Radon Ölçümleri

Örneklerin toplanmasının ardından, örneklerin radon tayini 2 gün içerisinde yapılmıştır. Radon ölçümleri şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

Özel radon su toplama şişesinin bir ucu bekletilmiş basınçlı hava tüpüne, diğer ucu ise şişenin içindeki havayı kollektör odasına aktarmak için kollektör odasına bağlanır. Daha sonra sistemde -0,6 mb'lık vakum oluşması sağlanır.

Basınç oluştuğunda, şişenin bekletilmiş basınçlı hava tüpüne bağlı ucu açılır.

Ardından şişenin kollektör odasına bağlı kısmı yavaşça açılır. Basınç 0'a geldiğinde şişenin her iki ucuda kapatılır.

Kollektör odası, 4 saat boyunca 600 V'luk doğru akım kaynağına bağlanır. 4 saatin sonunda kollektör odası açılır ve içinde bulunan bakır plaka, alfa sintilasyon sistemi ile 20 dakika boyunca sayılır.

7.4.1. İçme suları radon hesaplamaları

Toplanan içme sularındaki radon konsantrasyonları denklem 7.1 yardımıyla hesaplanır[42].

$$C_{Rn} \left(\frac{pCi}{L} \right) = \frac{(C-B) \times 1}{20 \times e^{-\lambda t}} \times CF \quad (7.1)$$

$C_{Rn} \left(\frac{pCi}{L} \right)$ = pCi/L cinsinden radon Konsantrasyonu

C= Brüt sayım oranı (Sayım/20 dakika)

B= Arkaplan sayım oranı (Sayım/20 dakika)

λ = Rn-222'nin bozunma katsayısı

t= Örnek alımı ile örneğin kollektör odasına aktarılması arasında geçen süre (saat)

CF= 0,087 cpm/pCi/L, Kalibrasyon Katsayısı [1, 42, 43].

7.4.2. İçme sularından gelen radon doz katkısı hesaplamaları

İçme sularında bulunan radonun vücuda ve organlara doz katkısı bulunmaktadır. Suyun içilmesi sonucunda vücudumuza radon gazından gelen doz katkısı denklem 7.2 yardımıyla hesaplanır [53]. $3,5 \times 10^{-9}$ Sv/Bq doz çevirme faktörü ve içme suyunun ortalama sindirimi 60 L/yıl, UNSCEAR tarafından 2000 yılında yayınlanan rapordan alınmıştır.

$$D_w = C_w \times CR_w \times D_{cw} \times 10^{-3} m^3 L^{-1} \quad (7.2)$$

D_w = Hesaplanan yıllık etkin doz miktarı

C_w = Radon konsantrasyonu (kBq/m³)

CR_w = Suyun tahmini sindirim miktarı = 60 L/yıl

D_{cw} = Doz çevirme faktörü= $3,5 \times 10^{-9}$ Sv/Bq

Tükettiğimiz içme suyu doğrudan midemize gider. Yapılan araştırmalarda içme suyunun içinde bulunan radon konsantrasyonu yüksekse, midede kanser riski oluşturabileceği hesaplanmıştır. Buna göre sadece midemizin aldığı doz miktarı denklem 7.3 yardımıyla hesaplanır. Doz hesaplamalarında kullanılan doku ağırlık faktörü, 1993 yılında ICRP yayınlanan rapordan alınmıştır.

$$C_s = D_w \times w_T \quad (7.3)$$

C_s = Midemizin aldığı yıllık doz miktarı

w_T = Doz hesaplamalarında mide için kullanılan ağırlık fonksiyonu; 0,12 [18, 53].

İçme suyundaki radon ve radon ürünlerinin solunmasından dolayı gelen doz katkısı denklem 7.4 yardımıyla hesaplanır. $9nSv(Bqhm^{-3})^{-1}$ doz çevirme faktörü, UNSCEAR tarafından yayınlanan 2000 yılındaki rapordan alınmıştır.

$$H_E = C_W (\text{Bq/m}^3) \times 10^{-4} \times 0,4 \times T \times 9\text{nSv}(\text{Bqhm}^{-3})^{-1} \quad (7.4)$$

H_E = İçme suyundaki radon ve alt ürünlerinin solunmasından dolayı gelen doz katkısı

T = Saat cinsinden bu konsantrasyonu maruz kalma süresi (Yıllık 7000 saat olduğu kabul edilir).

C_W = Sudaki radon Konsantrasyonu

$9\text{nSv}(\text{Bqhm}^{-3})^{-1}$ = Doz çevirme faktörü [37].

0,4= Denge faktörü.

7.5. İçme Suları Radyum Ölçümleri

İçme sularındaki radyum ölçümleri için Kollektör yöntemi kullanılmıştır. Radon ölçümü yapılmış şişe, radyum ve alt ürünlerinin dengeye gelmesi için 7 gün süreyle bekletilir. Ardından kollektör sistenine bağlanır ve 4 saat sonunda bakır plaka, 20 dakika boyunca alfa sisteminde sayılır.

7.5.1. İçme suları radyum hesaplamaları

Alınan örnekteki radyum konsantrasyonu denklem 7.5 yardımıyla hesaplanır.

$$C_{\text{Ra}} = \frac{(C-B)}{CF \times G \times A} \quad (7.5)$$

C_{Ra} = Radyum Konsantrasyonu (pCi/L)

C = Brüt sayım oranı (Sayım/20 dakika)

B = Arkaplan sayım oranı (Sayım/20 dakika)

CF = Kalibrasyon Katsayısı

$G = \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_1}}$, Ra-226'dan oluşan Rn-222 faktörü

t_1 = Rn-222 oluşması için geçen süre

λ = Rn-222'nin bozunma katsayısı

$A = \frac{1}{e^{-\lambda t_2}}$, t_2 = de-emanasyon ve sayım arasındaki süredir [42].

7.5.2. İçme sularında radyumdan gelen doz katkısı hesaplamaları

İçme sularında bulunan Ra-226'nın sindirilmesi sonucu oluşan doz katkısı denklem 7.6 yardımıyla hesaplanır [15]. Burada doz çevirme faktörü $2,8 \times 10^{-7}$ Sv/Bq, ICRP tarafından 1993 yılında yayınlanan rapordan alınmıştır.

$$D = 365 \times DWI \times DCF \times C \quad (7.6)$$

D = Sudaki Ra-226'nın sindirilmesi sonucunda Ra-226'dan gelen yıllık etkin doz miktarı

C = Sudaki radyum konsantrasyonu

DWI = belirlenen yaş grubuna göre günlük su alımı, yetişkinler için günlük 2 litre.

DCF = Doz çevirme faktörü = Yetişkinler için $2,8 \times 10^{-7}$ Sv/Bq

$$D=365 \times DWI \times DCF \times C$$

7.6. İçme Sularında pH Ölçümleri

İçme sularında pH ölçümleri, örnekleme esnasında Orion- 4 star iletkenlik/pH metre kullanılarak 29 noktada anlık olarak yapılmıştır. 1 noktada pH metrenin probundaki hasardan dolayı pH ölçümü yapılamamıştır.

Bir çözeltilerdeki hidrojen konsantrasyonunun logaritmasının negatif değeri, çözeltinin pH'ı olarak adlandırılır. Nötr suyun pH'ı 7'dir. pH değeri 0-7 arası asidik, 7-14 arası bazik olarak tanımlanır.

pH değeri, su kalitesi açısından önemli değerlerden birisidir. pH değerinin düşük olması, suyun aşındırıcı özellikte olmasına sebep olur. Dağıtım sistemine giren suyun pH'ını kontrol etmek önemlidir, bunun sebebi de suyun dağıtım sisteminde ve borularda aşındırma oluşturmasını minimize etmektir. Dünya Sağlık Örgütü tarafından içme sularında pH için verilen değer aralığı 6,5-8,5; ülkemizde TSE 266 ile belirlenen değer ise 6,5-9,2 aralığındadır [45, 46].

İçme sularındaki anlık pH ölçümleri için, her arazi çalışmasından önce Orion-4 star pH/iletkenlik metrenin kalibrasyon işlemi gerçekleştirildi. pH değerleri bilinen 3 sıvı (4,01; 7,00 ve 10,01) kalibrasyon işleminde kullanıldı. Üreticinin verdiği bilgiye göre kalibrasyon eğiminin 80-100 arasında çıkması kalibrasyon işleminin başarılı olduğunu göstermekte. Aynı şekilde kalibrasyon eğiminin 80-100 aralığı dışında çıkması, kalibrasyon işleminin hatalı olduğu

sonucunu vermekte. Yaptığımız kalibrasyon işlemlerinde, kalibrasyon eğrisi 80-100 aralığında çıkmıştır.

7.7. İçme Sularında İletkenlik Ölçümleri

İçme sularında iletkenlik ölçümü, Orion-4 star iletkenlik/pH metre kullanılarak 30 noktada anlık olarak yapılmıştır.

İçme sularındaki iletkenlik değeri, suyun elektrik iletme yeteneğidir. Su içinde çözülmüş mineral miktarı arttıkça, suyun iletkenliği artar. İletkenlik, bir nevi sudaki tuzun gösterge seviyesidir. Sıcaklık arttıkça, suyun iletkenliği de artacaktır. İletkenlik değeri, aynı zamanda sudaki tuzun türüne bağlıdır.

İletkenlik değeri sıcaklıkla değişir.

7.8. İçme Sularının Sıcaklık Ölçümleri

İçme sularının sıcaklık ölçümleri, Orion 4-star iletkenlik/pH metre ve termometre kullanılarak 30 örnekleme noktasında yapılmıştır. Suyun pH, iletkenlik, ve radon gibi ölçülen parametreleri sıcaklıkla değişmektedir.

7.9. Nem, Basınç, Yükseklik Ölçümleri

Ortamın nem ölçümleri, Isolab Thermogymeter kullanılarak anlık olarak yapılmıştır. Basınç, koordinat ve yükseklik ölçümleri Garmin eTrex Vista kullanılarak yapılmıştır.

8. DENEYSEL SONUÇLAR

Yaptığımız bu çalışmada, Kollektör yöntemi kullanarak radon ve radyum konsantrasyonları belirlenmiştir. Arkafon sayımları saf su kullanılarak yapılmıştır, 20 dakikada 3 sayım olarak ölçülmüştür. Ölçtüğümüz brüt sayım oranı (C) ve arkafon sayım oranı (B) olmak üzere denklem 7.1 ve 7.7 kullanılarak içme sularındaki radon konsantrasyonunu pCi/L cinsinden bulundu. Radyum konsantrasyonunu hesaplamak için denklem 7.5 ve 7.7 kullanılarak pCi/L cinsinden radyum konsantrasyonu bulundu.

Bq/L ve pCi/L arasındaki dönüşümü yapmak için, pCi/L olarak çıkan sonuçlarımızı 0,037 ile çarparak Bq/L birimine geçiş yaptık.

Radon ve radyum konsantrasyonları Çizelge 8.1 ve 8.2’de sırasıyla verilmiştir. İletkenlik, pH, sıcaklık, nem, yükseklik gibi anlık ölçülen değerler Çizelge 8.5’te verilmiştir. Radonun sindirilmesi ve solunması, radyumun sindirilmesi ile oluşan doz değerleri Çizelge 8.3’te verilmiştir.

Radon konsantrasyonunun örnekleme noktalarına göre grafiği Şekil 8.1.’de verilmiştir. Radyum konsantrasyonunun örnekleme noktalarına göre grafiği Şekil 8.3’de verilmiştir. Radon ve radyum konsantrasyonlarının sıklık dağılımı sırasıyla Şekil 8.2 ve Şekil 8.4’te verilmiştir. Örnek noktalarına göre pH ve iletkenlik grafikleri sırasıyla Şekil 8.5 ve 8.7’de verilmiştir. Radon ve radyum konsantrasyonlarının pH, iletkenlik, yükseklik, su sıcaklığı ve basıncı arasındaki korelasyonu Çizelge 8.6’da verilmiştir.

Radondan aldığımız yıllık etkin doz miktarı, midenin aldığı yıllık etkin doz miktarı, içme suyundaki radon ürünlerinin solunması sonucunda alınan yıllık etkin doz miktarı, radyumdan aldığımız yıllık etkin doz miktarı Çizelge 8.4’te verilmiştir.

8.1. İçme Sularının Radon Konsantrasyonları

Kütahya ili içme sularında 25.01.2009- 03.05.2009 tarihleri arasında toplanan 30 örneğin radon konsantrasyonları Çizelge 8.1’de verilmiştir.

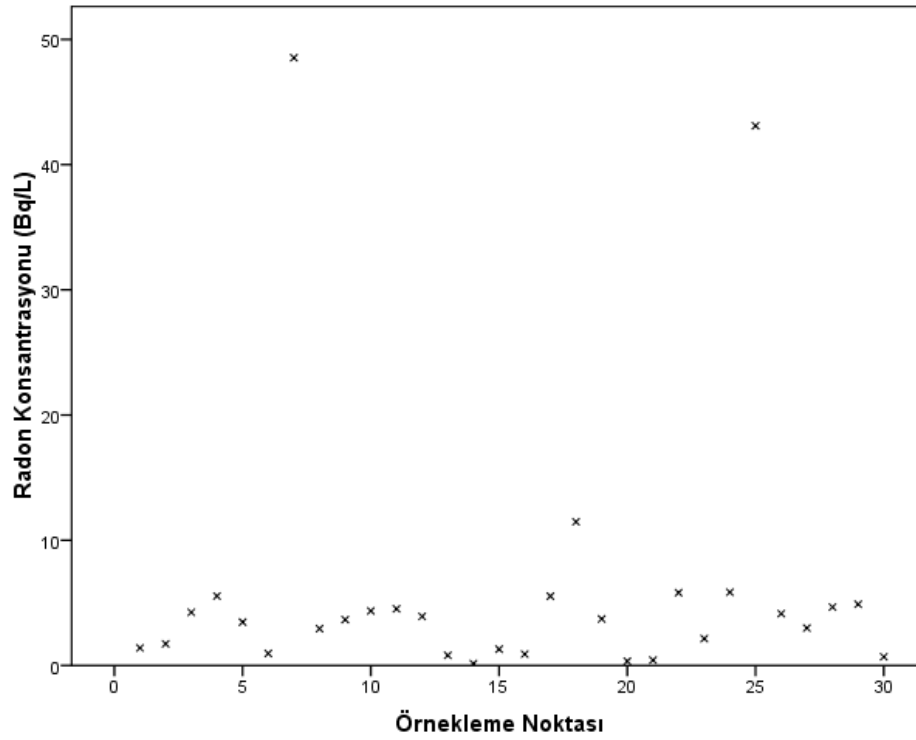
Çizelge 8.1. Kütahya ili içme sularındaki radon konsantrasyonu.

Örnek No:	Örnekleme Noktası	Rn-222 Konsantrasyonu±Hata (Bq/L)
1	Çelebi	1,389±0,170
2	Kunduören	1,719±0,187
3	İncik Suyu	4,236±0,291
4	Gelinkaya	5,536±0,336
5	Porsuk	3,453±0,264
6	Aksu	0,920±0,120
7	Meydan	48,510±3,46
8	Bahçelievler	2,899±0,202
9	Aydınlıkevler	3,618±0,224
10	Maltepe	4,314±0,244
11	Zafertepe	4,481±0,251
12	Hamidiye	3,882±0,237
13	Tavşanlı	0,799±0,129
14	Gediz	0,119±0,067
15	Aslanapa	1,272±0,149
16	Emet	0,889±0,135
17	Gediz	5,509±0,295
18	Hisarcık	11,461±0,480
19	Çavdarhisar	3,704±0,269
20	Simav	0,328±0,09
21	Eski Gediz	0,410±0,099
22	Domaniç (Bölge 1)	5,803±0,337
23	Tavşanlı	2,132±0,205
24	Domaniç (Bölge 2)	5,834±0,334
25	Dumlupınar (Bölge 1)	43,092±1,117
26	Dumlupınar (Bölge 2)	4,131±0,287
27	Tavşanlı	2,979±0,239
28	Dumlupınar (Bölge 3)	4,654±0,302
29	Pazarlar	4,881±0,313
30	Şaphane	0,682±0,124
Ortalama		6,140±0,365

Çizelge 8.1’de verildiği üzere Kütahya ili içme sularından alınan 30 örnekteki radon konsantrasyonu $0,119 \pm 0,067$ Bq/L ile $48,510 \pm 3,46$ Bq/L arasında değişmektedir. Kütahya ili içme sularında radon konsantrasyonlarının ortalama değeri $6,140 \pm 0,365$ Bq/L olarak hesaplanmıştır. En düşük radon konsantrasyonu $0,119$ Bq/L ile Gediz’de, $48,510$ Bq/L ile Kütahya’nın Meydan Mahalle’sinde bulunan bir çeşmede tesbit edilmiştir. Meydan Mahallesi’nden 25.01.2009 ve 01.03.2009 tarihlerinde 2 defa örnek toplanmıştır. İlk örnekte radon konsantrasyonu $50,70$ Bq/L, ikinci örnekte radon konsantrasyonu $46,32$ Bq/L olarak belirlenmiştir. Çizelge 8.1’de Meydan Mahallesi sonucu verilirken iki ölçümün ortalaması alınmış, bu iki ölçümün standart hatası denklem 7.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Yeraltı suları yüzeye çıkmadan önce kayaların üzerinde hareket eder ve kayalardan parçalar kopartırlar. Eğer yeraltında radyoaktif bir üründen yüksek miktarda varsa, bunun yüzeye sular vasıtasıyla taşınması mümkün olabilir. Burada radon konsantrasyonunun yüksek çıkması, radyum veya daha uzun ömürlü başka bir radyoaktif maddenin bu su kaynağı çevresinde bulunabileceğini göstermektedir.

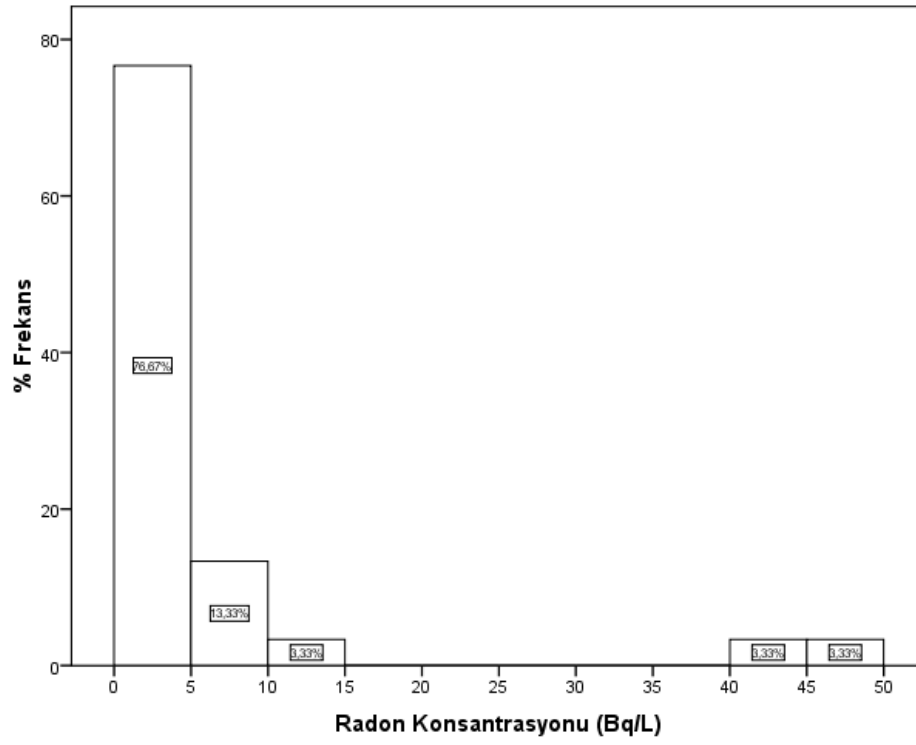
Belirlenen radon konsantrasyonları A.B.D. Çevre Koruma Ajansı (USEPA), B.M. Radyasyon Etkisi Komitesi (UNSCEAR) ve Dünya Sağlık Örgütü(WHO)’nün verdiği sınır değerlerle karşılaştırıldığında, Kütahya ili içme sularından toplanan 30 örnekte 3’ünün USEPA’nın verdiği 11 Bq/L’yi, 2 örnekte ise UNSCEAR’ın verdiği 40 Bq/L’yi geçtiği tesbit edilmiştir. Sadece içme sularındaki Rn-222 konsantrasyonu üzerine bir genelleme yapmanın yanlış olacağından, su içindeki diğer radyoizotopların ve ortamdaki radon konsantrasyonunun belirlenmesi gerekmektedir.

Şekil 8.1’de içme sularında örnek noktasına göre radon konsantrasyonundaki değişim verilmiştir.



Şekil 8.1. Kütahya ili içme suları radon konsantrasyonları.

İçme sularındaki radon konsantrasyonunun sıklık dağılımı Şekil 8.2’de verilmiştir. Ölçüm yapılan noktalardan % 76,67’si 0-5 Bq/L aralığında, % 13,33’ü 5-10 Bq/L aralığında, % 3,33’ü 10-15 Bq/L aralığında, % 3,33’ü 40-45 Bq/L aralığında, % 3,33’ü ise 45-50 Bq/L aralığında ölçülmüştür.



Şekil 8.2. Kütahya ili içme suları radon konsantrasyonları sıklık dağılımı.

8.2. İçme Sularının Radyum Konsantrasyonu

Kütahya ili içme sularında 25.01.2009- 03.05.2009 tarihleri arasında toplanan 28 örneğin radyum konsantrasyonları Çizelge 8.2’de verilmiştir.

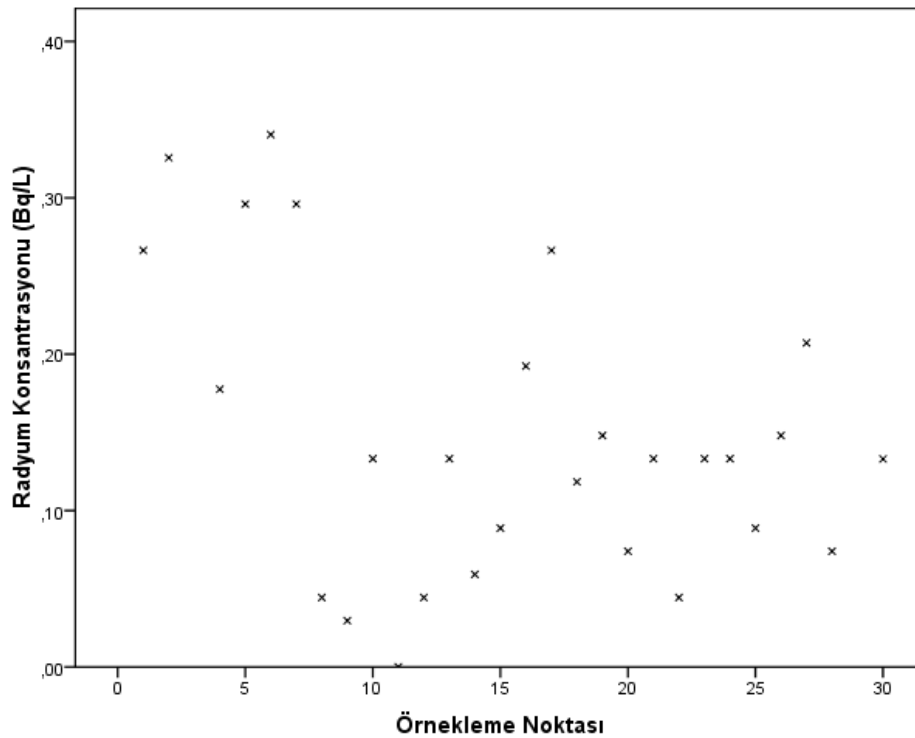
Çizelge 8.2. Kütahya ili içme suları radyum konsantrasyonu.

Örnek No:	Örnekleme Noktası	Ra-226 Konsantrasyonu±Hata (Bq/L)
1	Çelebi	0,266±0,072
2	Kunduören	0,325±0,078
3	İncik Suyu	Ölçülmedi
4	Gelinkaya	0,177±0,062
5	Porsuk	0,296±0,075
6	Aksu	0,340±0,079
7	Meydan	0,296±0,0051
8	Bahçelievler	0,044±0,044
9	Aydınlıkevler	0,029±0,041
10	Maltepe	0,133±0,057
11	Zafertepe	<0,015
12	Hamidiye	0,044±0,055
13	Tavşanlı	0,133±0,057
14	Gediz	0,059±0,046
15	Aslanapa	0,088±0,051
16	Emet	0,192±0,064
17	Gediz	0,266±0,072
18	Hisarcık	0,118±0,055
19	Çavdarhisar	0,148±0,059
20	Simav	0,074±0,049
21	Eski Gediz	0,133±0,057
22	Domaniç (Bölge 1)	0,044±0,044
23	Tavşanlı	0,133±0,057
24	Domaniç (Bölge 2)	0,133±0,057
25	Dumlupınar (Bölge 1)	0,088±0,051
26	Dumlupınar (Bölge 2)	0,148±0,059
27	Tavşanlı	0,207±0,066
28	Dumlupınar (Bölge 3)	0,074±0,049
29	Şaphane	Ölçülmedi
30	Pazarlar	0,133±0,057
Ortalama		0,152±0,057

Çizelge 8.2’de verildiği üzere Kütahya ili içme sularından toplanan 28 örneğin radyum konsantrasyonu $<0,015 - 0,340 \pm 0,079$ Bq/L aralığında değişmektedir. Kütahya ili içme sularında radyum konsantrasyonlarının ortalama değeri $0,152 \pm 0,057$ Bq/L olarak hesaplanmıştır. En düşük radyum konsantrasyonu Kütahya ili Zafertepe Mahallesi’nde, en yüksek radyum konsantrasyonu Aksu’da tesbit edilmiştir. Radon konsantrasyonunun yüksek çıkmasından dolayı Meydan Mahallesi’nden iki örnek toplanmış, 25.01.2009 tarihli örnekte radyum konsantrasyonu 0,473 Bq/L, 01.03.2009 tarihli örnekte radyum konsantrasyonu 0,118 Bq/L olarak belirlenmiştir.

Kütahya ili içme sularından toplanan 28 örnekte A.B.D. Çevre Koruma Ajansı tarafından içme sularında bulunan Ra-226 konsantrasyonu için belirlenen 0,74 Bq/L üst sınırını geçen örnek yoktur.

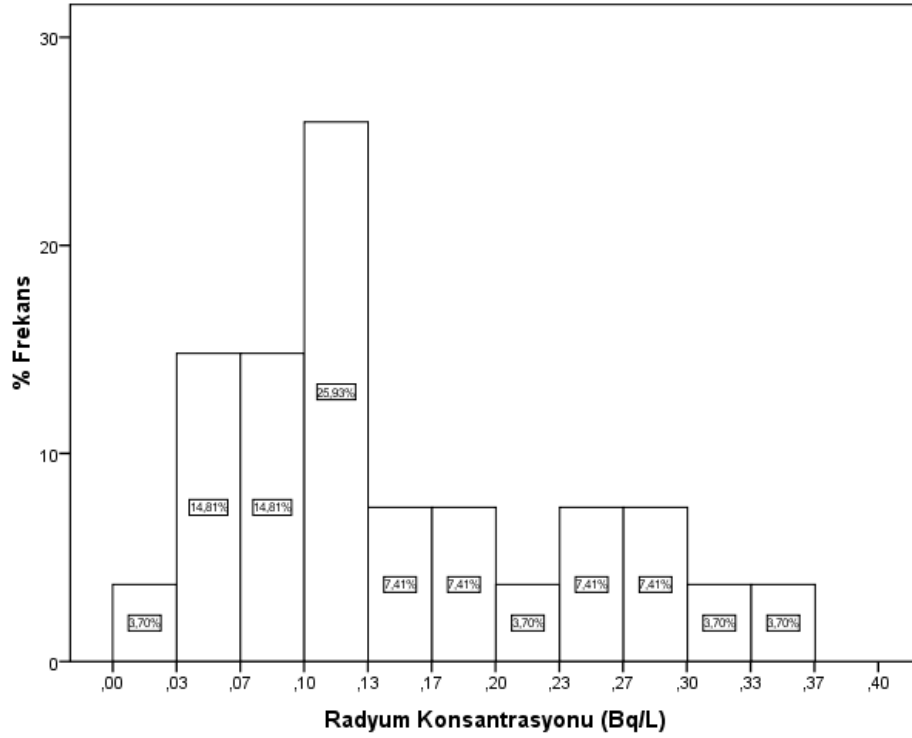
Örnekleme noktasına göre radyum grafiği Şekil 8.3.’te verilmiştir.



Şekil 8.3. Kütahya ili içme suları radyum konsantrasyonları.

İçme sularındaki radyum konsantrasyonunun sıklık dağılımı Şekil 8.4’te verilmiştir. Grafikte görüleceği üzere örneklerin % 7,14’ü 0-0,03 Bq/L aralığında, % 14,29’u 0,03-0,07 Bq/L aralığında, % 14,29’u 0,07-0,10 Bq/L aralığında, % 25’i 0,1-0,13 Bq/L aralığında, %

7,14'ü 0,13-0,17 Bq/L aralığında, % 7,14'ü 0,17-0,20 Bq/L aralığında, % 3,57'si 0,20-0,23 Bq/L aralığında, % 7,14'ü 0,23-0,27 Bq/L aralığında, % 7,14'ü 0,27-0,3 Bq/L aralığında, % 3,57'si 0,3-0,33 Bq/L aralığında, % 3,57'si 0,33-0,37 Bq/L aralığında ölçülmüştür.



Şekil 8.4. Kütahya ili içme suları radyum konsantrasyonları sıklık dağılımı.

8.3. İçme Sularındaki Radon ve Radyumun Sindirilmesi ile Meydana Gelen Doz katkısı

İçme sularındaki radon ve radyumun sindirilmesi sonucunda vücudumuzun aldığı toplam doza katkıda bulunur. İçme sularındaki radonun sindirilmesi ile vücudumuza gelen doz katkısını denklem 7.2 kullanılarak, midemize gelen doz katkısını denklem 7.3 kullanılarak hesaplanır. Sudaki radon ve ürünlerinin solunmasıyla gelen doz katkısını denklem 7.4 kullanılarak hesaplanır. İçme sularındaki radyumun sindirilmesi ile tüm vücudumuza gelen doz katkısını denklem 7.5 kullanılarak hesaplanır. İçme suyundaki radonun sindirilmesi, solunması, içme suyundaki radyumun sindirilmesi, içme suyundaki radonun mideye doz etkisi Çizelge 8.3'te verilmiştir.

Çizelge 8.3. Kütahya ili içme sularından gelen etkin doz katkısı.

Konum	Radon Sindirimi (µSv/yıl) ^a	Radon-mide (µSv/yıl) ^b	Radonun Solunması (µSv/yıl) ^c	Radyum Sindirimi (µSv/yıl) ^d	Toplam Doz (µSv/yıl) ^e
1	0.294	0.035	3.525	54.453	54.747
2	0.363	0.043	4.357	66.554	66.917
3	0.892	0.106	10.698	-	0.892
4	1.165	0.139	13.974	36.302	37.467
5	0.727	0.087	8.724	60.504	61.231
6	0.202	0.024	2.425	69.579	69.781
7	10.193	1.223	122.316	60.504	70.697
8	0.618	0.074	7.410	9.075	9.693
9	0.769	0.092	9.224	6.050	6.819
10	0.915	0.109	10.979	27.226	28.141
11	0.950	0.113	11.395	0	0.950
12	0.823	0.098	9.877	9.075	9.898
13	0.171	0.020	2.047	27.226	27.397
14	0.031	0.003	0.367	12.100	12.131
15	0.273	0.327	3.272	18.151	18.424
16	0.190	0.022	2.278	39.327	39.517
17	1.163	0.139	13.956	54.453	55.616
18	2.410	0.289	28.916	24.201	26.611
19	0.780	0.093	9.363	30.252	31.032
20	0.072	0.008	0.859	15.126	15.198
21	0.089	0.010	1.067	27.226	27.315
22	1.221	0.146	14.652	9.075	10.296
23	0.450	0.054	5.403	27.226	27.676
24	1.228	0.147	14.736	27.226	28.454
25	9.051	1.086	108.617	18.151	27.202
26	0.870	0.104	10.435	30.252	31.122
27	0.628	0.075	7.541	42.353	42.981
28	0.980	0.117	11.756	15.126	16.106
29	1.027	0.123	12.325	-	1.027
30	0.145	0.017	1.743	27.226	27.371
Ortalama	1,29	0,154	15,475	31,260	50,548

a : Radonun sindirilmesi sonucu gelen doz katkısı, b: radonun sindirilmesi sonucu mideye gelen toplam doz katkısı, c: içme suyunun havaya transfer edilmesi sonucu gelen toplam doz katkısı, d: radyumun sindirilmesi sonucu gelen doz katkısı, e: Toplam Doz katkısı = Rn-222'nin sindirimi ile gelen doz katkısı + Ra-226'dan tüm vücuda gelen doz katkısı.

Çizelge 8.3'te verildiği üzere, Kütahya ilinde içme sularındaki radonun sindirimden gelen toplam katkı 0,031-10,193 µSv/yıl değerleri arasında, ve ortalaması 1,29 µSv/yıl'dır. Kütahya ilinde içme sularındaki radonun sindirimden mideye gelen katkı 0,003–1,223 µSv/yıl değerleri arasında, ve ortalaması 0,154 µSv/yıl'dır. Kütahya ilinde içme sularındaki radon ürünlerinin solunması sonucu gelen doz katkısı 0,36-122,3 µSv/yıl değerleri arasında, ve ortalaması 15,475 µSv/yıl'dır. Kütahya ilinde içme sularındaki Ra-226'nın sindirilmesi sonucunda vücuda gelen toplam katkı 6,05–69,5 µSv/yıl değerleri arasında, ve 31,260

$\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır. İçme suyundaki radyum ve radonun sindirilmesi sonucu gelen yıllık toplam doz katkısı 0,892-70,697 $\mu\text{Sv/yıl}$ değerleri arasında, ve ortalaması 50,548 $\mu\text{Sv/yıl}$ 'dır. En büyük doz katkısının görüldüğü yer, Kütahya ili Meydan Mahallesi'dir.

UNSCEAR tarafından 2000 yılında yayınlanan rapora göre dünya genelinde doğal kaynaklardan alınan doz miktarının 1-10 mSv değerlerinin arasında olduğu tahmin edilmektedir. 2,4 mSv bu değerlerin tahmini ortalama değeri olarak kabul edilmektedir [50]. Doğal kaynaklardan aldığımız doz katkısının %55'lik bir diliminin radondan geldiğini göz önünde bulundurursak, radondan aldığımız yıllık katkı 1,3 mSv olarak hesaplanabilir. Ek olarak 2004 yılında WHO tarafından yayınlanan rapora göre içme sularında yıllık referans doz limiti 0,5 mSv olarak belirlenmiştir [51].

İçme sularındaki radon ve radyumun sindirimi ile alınan ortalama doz miktarı UNSCEAR ve WHO tarafından verilen değerlerle karşılaştırıldığında içme sularından gelen katkının düşük olduğu görülmektedir.

8.4. İçme Sularında Yapılan Diğer Ölçümler

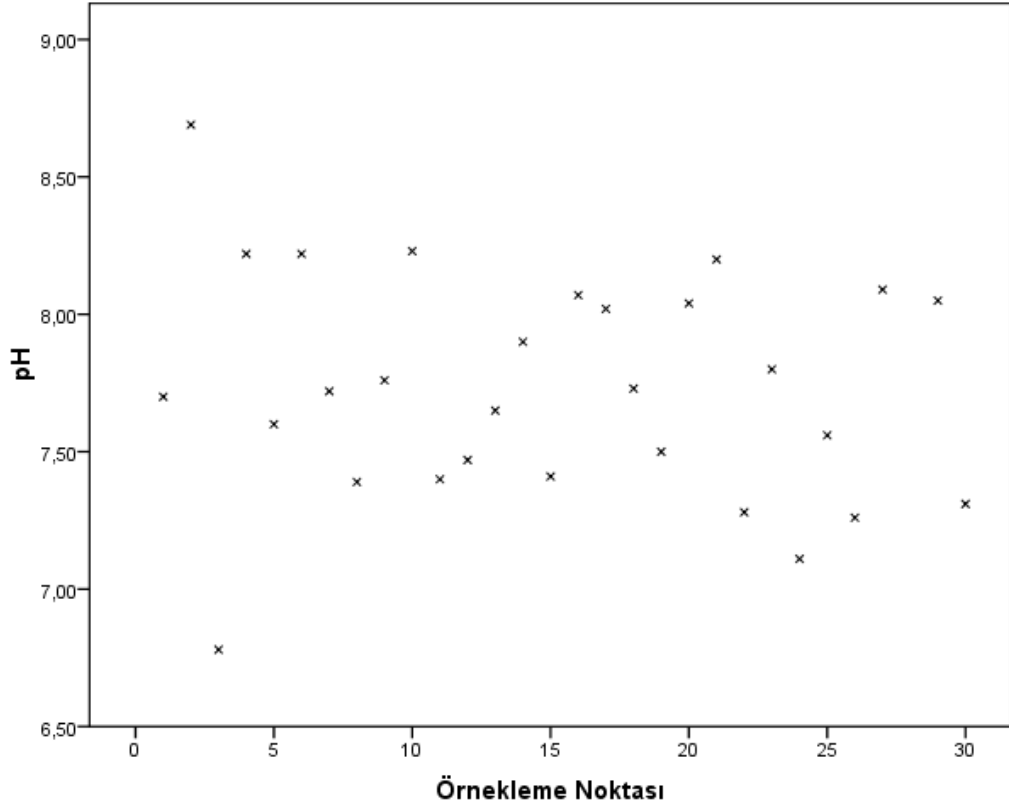
Kütahya ili içme sularında yapılan pH, iletkenlik, su sıcaklığı, nem, basınç ve yükseklik ölçümleri Çizelge 8.4'te verilmiştir.

Çizelge 8.4. Kütahya ili içme sularında yapılan anlık ölçümler.

Örnek No:	pH	İletkenlik (µS/cm)	Su Sıcaklığı (°C)	Nem (%)	Basınç (mbar)	Yükseklik (m)
1	7,7	356	7	83	1041	1077
2	8,69	630	7,5	88	1005	1217
3	6,78	99	8,1	88	1047	1020
4	8,22	508	11,1	80	1009	1035
5	7,6	594	19,5	77	1043	1064
6	8,22	330,2	11,2	59	982,3	1283
7	7,72	495	14,1	84	1044	1045
8	7,39	806	11,9	78	1044	1059
9	7,76	603	6,2	64	1011	1315
10	8,23	516	7,1	58	1023	1110
11	7,4	544	9,5	79	1049	1082
12	7,47	404	14,1	65	1007	1122
13	7,65	439	6,7	49	1019	797
14	7,9	420	7,2	22	1008	1149
15	7,41	599	2,7	22	1024	992
16	8,07	508	7	34	993	851
17	8,02	434	11,2	22	1016	654
18	7,73	765	6,7	51	1010	727
19	7,5	456	10,3	41	1014	961
20	8,04	448	8,1	29	1060	760
21	8,2	396	11,5	18	993	769
22	7,28	853	6,8	65	988	840
23	7,8	394	11,3	83	1013	843
24	7,11	864	8,6	90	1027	743
25	7,56	566	6,2	75	1000	1270
26	7,26	464	6,8	76	1007	1216
27	8,09	427	6,2	99	1000	789
28	-	537	6,2	82	1013	1080
29	8,05	455	13,1	21	991,4	948
30	7,31	690	14,4	18	1013	914

Yukarıdaki tabloda görüleceği üzere pH değerleri 6,78–8,69 arasında; iletkenlik değerleri 99–869 µS/cm arasında; nem değerleri % 18-99 arasında; basınç ve yükseklik değerleri sırasıyla 982,3–1049 mbar, 743-1270 m arasında, su sıcaklığı 2,7-19,5 derece arasında ölçülmüştür.

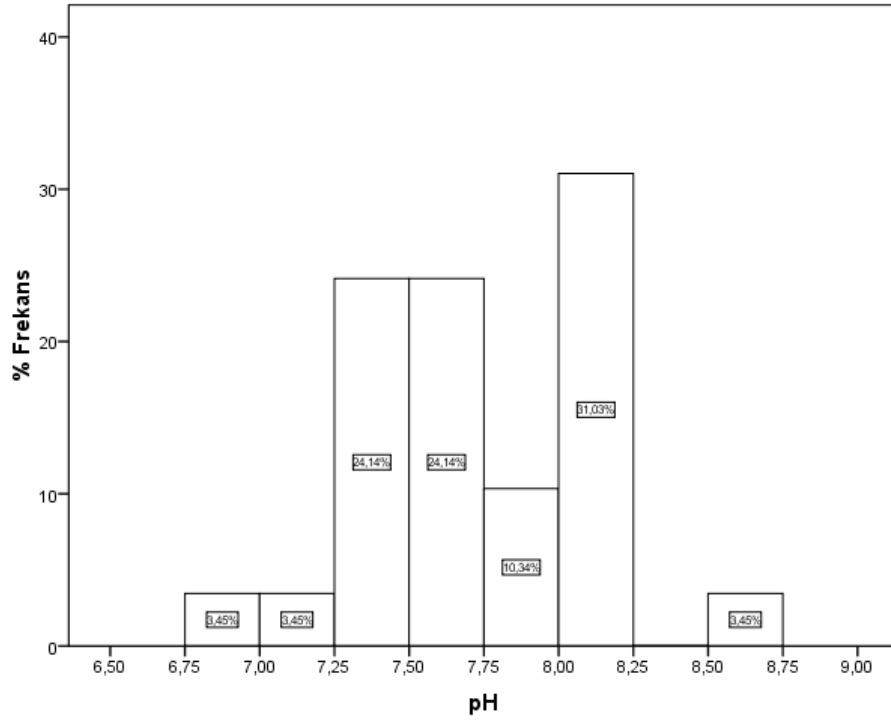
Kütahya ili içme sularının pH ölçümleri, örnekleme noktasına Şekil 8.5'te verilmiştir.



Şekil 8.5. Kütahya ili içme suları pH ölçümleri.

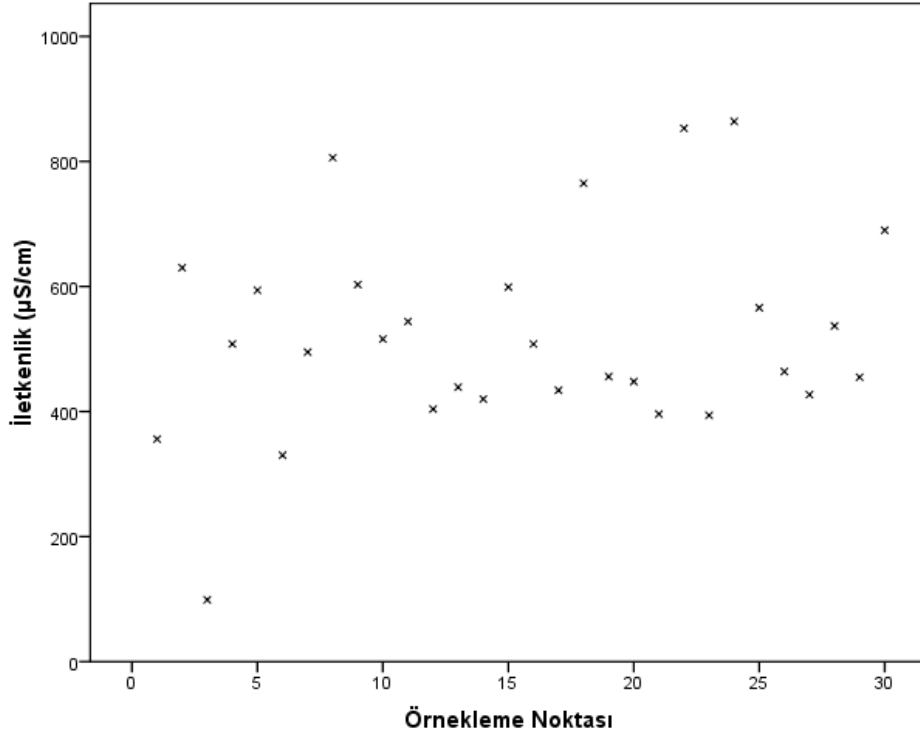
Kütahya ili içme sularının pH ölçümleri sıklık dağılımı, Şekil 8.6'da verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere örneklerin % 3,45'i 6,75-7 arasında, % 3,45'i 7-7,25 arasında, % 24,14'ü 7,25-7,50 arasında, % 24,14'ü 7,50-7,75 arasında, % 10,34'ü 7,75-8 arasında, % 31,03'ü 8-8,25 arasında, % 3,45'i 8,50-8,75 arasında değişmektedir.

Kütahya ili içme sularında yapılan 29 pH ölçümünden TSE 266 ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenen sınırları aşan değer yoktur.



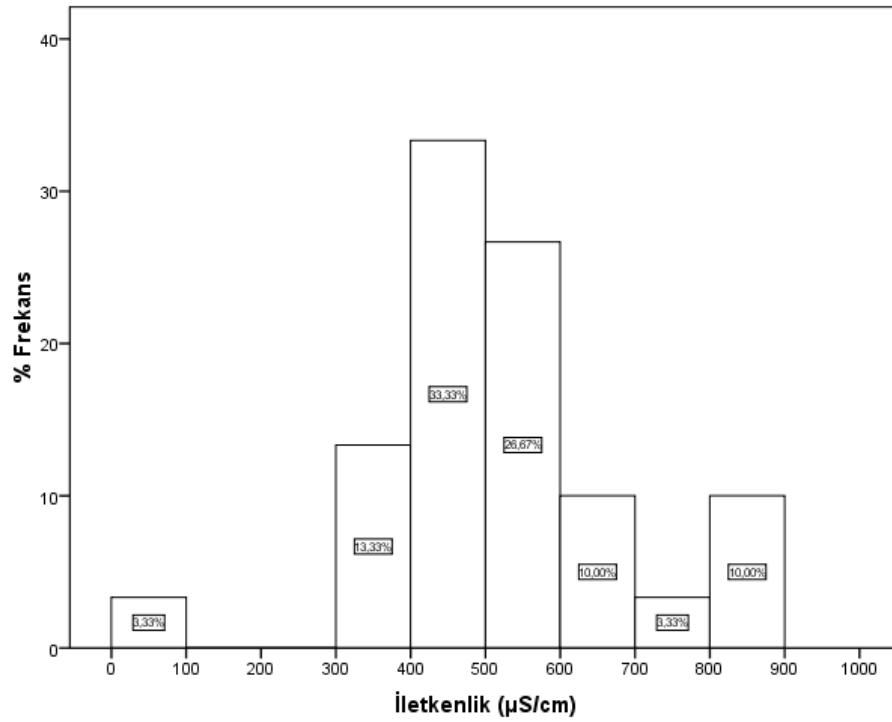
Şekil 8.6. Kütahya ili içme sularının pH değeri sıklık dağılımı.

Kütahya ili içme sularının örnekleme noktasına göre iletkenlik değişimi Şekil 8.7’de verilmiştir.



Şekil 8.7. Kütahya ili içme suları iletkenlik grafiği.

Kütahya ili içme sularının iletkenlik ölçümleri sıklık dağılımı, Şekil 8.8’de verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere % 3,33’ü 0-100 µS/cm arasında, % 13,33’ü 300-400 µS/cm arasında, % 33,33’ü 400-500 µS/cm arasında, % 26,67’si 500-600 µS/cm arasında, % 10,00’u 600-700 µS/cm arasında, % 3,33’ü 700-800 µS/cm arasında, % 10,00’u 800-900 µS/cm arasındadır.



Şekil 8.8. Kütahya ili içme suları iletkenlik değeri sıklık dağılımı.

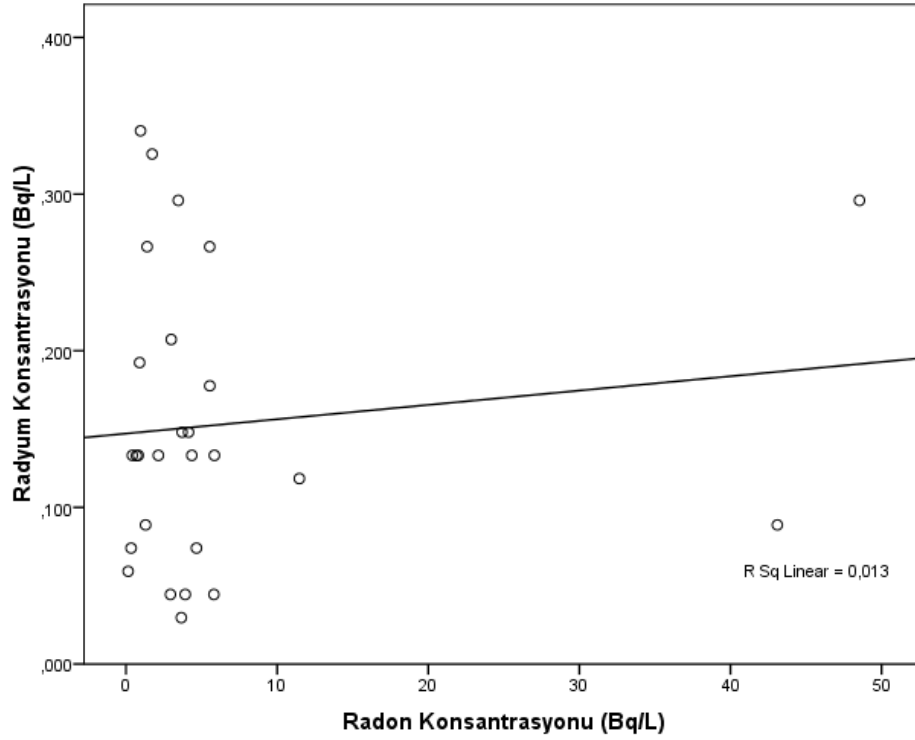
Yapılan çalışmalarda, radyoaktif maddeler ile kimyasal değerler ve ortam değerleri arasında doğrusal bir ilişki olabileceği düşünülmüş, Çizelge 8.5 ile verilen lineer korelasyon değerlerinin görüldüğü bulunmuştur.

Çizelge 8.5. Ölçüm sonuçları arasındaki korelasyon.

	Radon	Radyum	pH	İletkenlik	Sıcaklık	Yükseklik	Nem	Basınç
Radon	1	0,114	-0,104	0,089	0,083	0,192	0,258	-0,083
Radyum		1	0,469	-0,319	0,344	0,054	0,225	0,012
pH			1	-0,144	0,0013	0,025	-0,187	-0,368
İletkenlik				1	0,044	-0,134	0,054	-0,044
Sıcaklık					1	-0,028	-0,029	0,144
Yükseklik						1	0,320	-0,236
Nem							1	-0,054
Basınç								1

Kütahya ili içme sularında yapılan ölçümlerde en yüksek korelasyonların 0,469 ile radyum-pH arasında ve -0,368 ile pH-basınç arasında olduğu belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarına ait bazı lineer korelasyon grafikleri aşağıda verilmiştir.

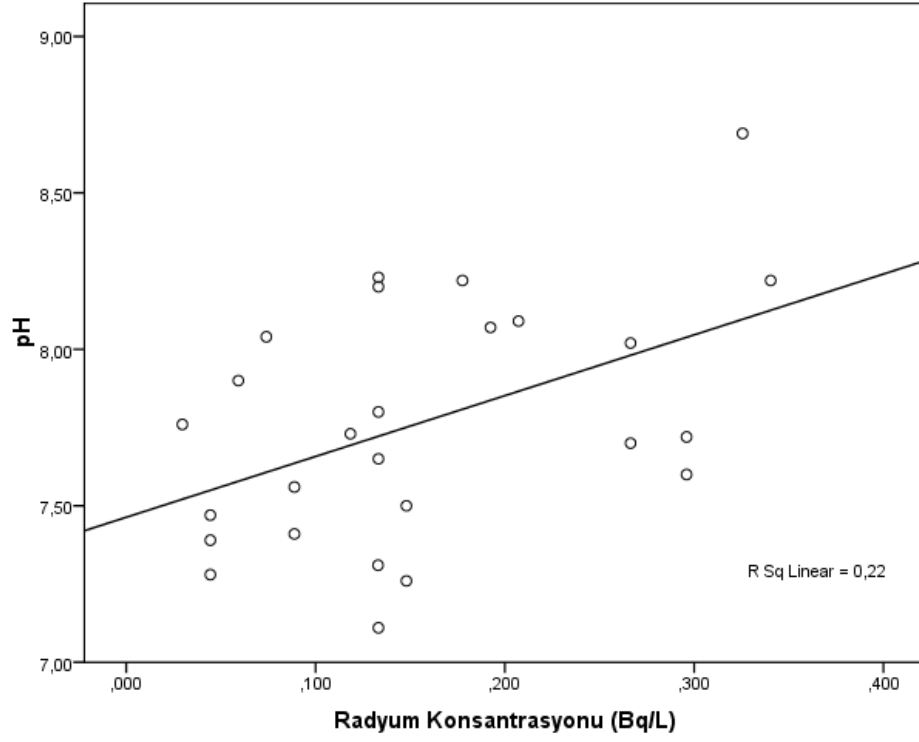
Radon-radyum arasındaki lineer korelasyon Şekil 8.9’da verilmiştir.



Şekil 8.9. Radon-radyum arasındaki lineer korelasyon

Radon ve radyum, uranyum bozunma zincirinin bozunma ürünlerindedir. Radon, radyumun alfa parçacığı yayınlaması sonucunda oluşur. Ana ürün- bozunma ürünü ilişkisinden dolayı radon ve radyum arasında lineer korelasyon olabileceği düşünülmüştür. Şekil 8.9’dan görüleceği üzere radon-radyum arasında pozitif bir korelasyon olduğu tesbit edilmiştir.

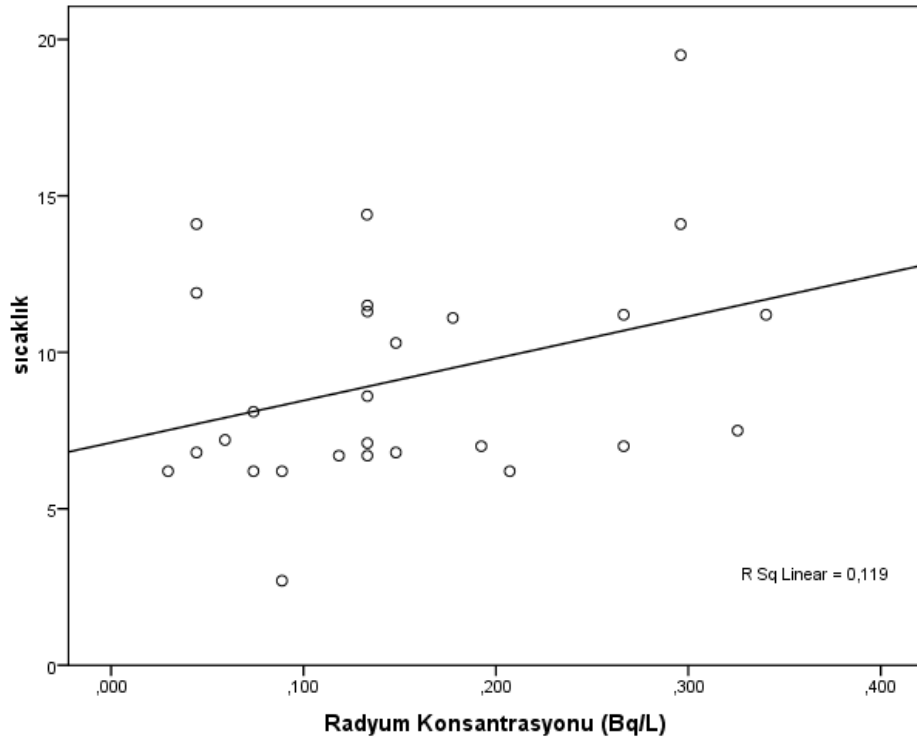
Radyum-pH arasındaki lineer korelasyon Şekil 8.10’da verilmiştir.



Şekil 8.10. Radyum-pH arasındaki lineer korelasyon

Şekil 8.10'dan görüleceği üzere radyum-pH arasında pozitif bir korelasyon olduğu tesbit edilmiştir.

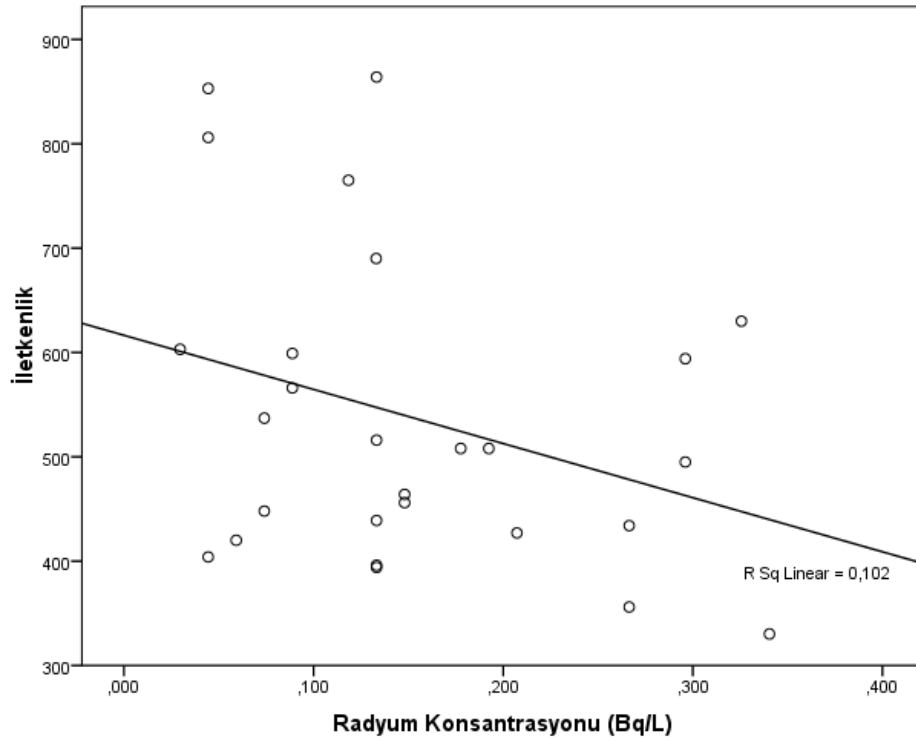
Radyum-sıcaklık arasındaki lineer korelasyon Şekil 8.11'de verilmiştir.



Şekil 8.11. Radyum-su sıcaklığı arasındaki lineer korelasyon

Şekil 8.11'den de görüleceği üzere radyum-su sıcaklığı arasında pozitif bir korelasyon vardır.

Radyum-iletkenlik arasındaki lineer korelasyon grafiği Şekil 8.12'de verilmiştir.



Şekil 8.12. Radyum-iletkenlik arasındaki lineer korelasyon

Şekil 8.12'den de görüleceği üzere radyum-iletkenlik arasında negatif bir korelasyon vardır.

9. SONUÇ VE TARTIŞMA

Kütahya ili merkezi ve ilçelerinden toplam 30 adet su örneği 25.01.2009- 03.05.2009 tarihleri arasında toplanmıştır. Su örneklerinin radon ve radyum tayini kollektör yöntemi kullanılarak yapılmıştır. pH, iletkenlik, su sıcaklığı, ve basınç değerleri anlık olarak belirlenmiştir.

Radon, radyum, pH, iletkenlik, su sıcaklığı, basınç, ve yükseklik arasında lineer korelasyon Çizelge 8.6'da verilmiştir. Buna göre radon-radyum arasında pozitif, radon pH arasında negatif, radon-iletkenlik arasında pozitif, radon-sıcaklık arasında pozitif, radon-yükseklik arasında pozitif, radon-nem arasında pozitif, ve radon-basınç arasında negatif bir korelasyon görülmektedir. Radyum-pH arasında pozitif, radyum-iletkenlik arasında negatif, radyum-sıcaklık arasında pozitif, radyum-yükseklik arasında pozitif, radyum-nem arasında pozitif bir korelasyon görülmektedir. pH-iletkenlik arasında negatif, pH-nem arasında negatif, ve pH-basınç arasında negatif bir korelasyon görülmektedir. Yapılan ölçümlerde en iyi korelasyon radyum ve diğer ölçüm parametreleri arasında çıkmıştır. Buradaki tabloya göre radon, radyum, pH, iletkenlik, su sıcaklığı, basınç, ve yükseklik arasındaki korelasyonun lineer olmayan bir korelasyona ve başka etmenlere de bağlı olabileceğini görüyoruz.

Dünyada sudaki radon ve radyumun insan sağlığı açısından inceleme yapan kurumlar, içme sularında radon ve radyum için kabul edilebilir üst sınırlar belirlemişlerdir. A.B.D. Çevre Koruma Ajansı (USEPA) içme sularındaki radon için üst sınırı 11 Bq/L olarak, B.M. Radyasyon Etkisi Komitesi (UNSCEAR) 40 Bq/L olarak, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ise 100 Bq/L olarak belirlemiştir. Yaptığımız çalışmanın sonuçlarını bu limitlerle karşılaştırdığımızda, 3 noktadaki radon ölçüm sonuçlarının USEPA'nın vermiş olduğu 11 Bq/L sınırının üstünde kaldığı görülmektedir. Aynı şekilde 2 noktada UNSCEAR'ın vermiş olduğu 40 Bq/L sınırının üstünde kaldığı görülmektedir.

Sudaki radyum için USEPA 0,74 Bq/L'lik bir üst sınır belirlemiştir. Yaptığımız radyum ölçümleriyle üst limiti karşılaştırdığımızda, radyum konsantrasyonlarının USEPA'nın vermiş olduğu 0,74 Bq/L'lik sınırı geçmediği görülmektedir.

İçme sularındaki radonun sindirilmesi ve solunması sonucu aldığımız dozu kıyasladığımızda, doz miktarının radon konsantrasyonuna göre değiştiği görülmektedir. Kütahya ili içme sularında yaptığımız ölçümlerde suyun sindirilmesi ve sudaki radon ürünlerinin solunması sonucu ortaya çıkan doz miktarlarını kıyasladığımızda, sadece sudaki radonun solunmasından bile sindirimden 10 kat daha fazla doz alındığı görülmektedir. Buna

göre radonun solunması konusunda çok dikkatli olmak gerekmektedir. Sudaki radyumun sindirilmesi ile sudaki radonun sindirilmesi karşılaştırıldığında, konsantrasyonları aynı olmasa bile sağlık açısından radyumun radona göre daha önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmaktadır. Mide tarafından alındığını tahmin ettiğimiz doz ise çok düşüktür.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme sularından alınan doz miktarı için toplam gösterge dozu belirlemiştir, bu değer 0,1 mSv'tir. Dünya Sağlık Örgütü, 0,1 mSv değerini toplam alfa ve toplam beta aktiviteleri için vermiştir. Kendi yapmış olduğumuz radon ve radyum sonuçlarını bu çalışmaya uyarladığımızda tüm sonuçlarımızın bu limitin altında kaldığı görülmektedir. UNSCEAR tarafından 2000 yılında yayınlanan rapora göre toplam doz miktarı 2,4 mSv olarak tahmin edilmektedir. Bunun yaklaşık 1,3 mSv'i radondan gelmektedir. Kütahya ili içme sularındaki radonun sindiriminden gelen ortalama katkının UNSCEAR tarafından rapor edilen yıllık doz miktarının yaklaşık binde 5'ini oluşturduğu görülmektedir. Aynı şekilde Kütahya ili içme sularındaki radyumun sindiriminden gelen doz miktarı, tahmin edilen toplam doz miktarının %1'ini oluşturmaktadır. Sonuç olarak sulardaki radyoaktivite miktarının insan sağlığı açısından tehdit oluşturmasının sudaki radyoizotopların konsantrasyonuna bağlı olduğu görülmektedir. WHO tarafından 2004 yılında yayınlanan 0,5 mSv'lik referans doz limiti ile Kütahya ili içme sularındaki Ra-226 ve Rn-222'nin sindirimi ile alınan ortalama doz miktarı karşılaştırıldığında bu seviyenin altında kaldığı görülmektedir.

Anlık olarak yaptığımız pH ölçümleri 6,78-8,69 arasındadır. Bu ölçüm sonuçları Dünya Sağlık Örgütü'nün belirlemiş olduğu limitler dahilindedir.

Yapmış olduğumuz iletkenlik ölçümleri 99-864 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığındadır. 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ değerinin üstündeki sular, acı su olarak kabul edilmektedir. Aldığımız ölçümlerde bu değeri geçen yoktur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Saç, M.M., 1994, İzmir ili içme ve kullanım sularında Rn-222 ve Ra-226 konsantrasyonlarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, 69 s.
- [2] Han, Y.L, Kuo, Tom M. C. and Lee, Y.P., Monitoring of Radon in Taiwan groundwaters
- [3] Manzoor F., Alameer A.S. and Tahir N.A., 2008, Exposures to Rn-222 from consumption of underground municipal water supplies in Pakistan, Radiation protection dosimetry, 130(3):392-6
- [4] Bonotto D.M. and Mello C.B., 2006, A combined method for evaluating radon and progeny in waters and its use at Guarani aquifer, São Paulo State, Brazil, Journal of Environmental Radioactivity, 86, 337-353
- [5] Bonotto D.M. and Bueno T.O., 2008, The natural radioactivity in Guarani aquifer groundwater, Brazil; Applied Radiation and Isotopes, 66, 1507– 1522
- [6] Baykara, O. and Doğru, M., 2006, Measurements of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian Active Fault Systems (Turkey), Radiation Measurements, 41, 362–367
- [7] Prasad, Y., Prasad, G., Choubey, V.M. and Ramola, R.C, 2008, Geohydrological control on radon availability in groundwater, Radiation Measurements, xxx, 1–5
- [8] Lopez, Galan M. and Sanchez, M., 2008, Present status of Rn-222 in groundwater in Extremadura, Journal of Environmental Radioactivity, 99, 1539-1543
- [9] Tayyeb, Z.A., Kinsara, A.R. and Farid, S.M., 1998, A Study on the Radon Concentrations in Water in Jeddah (Saudi Arabia) and the Associated Health Effects, 38,(1) 97-104(8)
- [10] D'Alessandro, W. and Vito, F., 2003, Groundwater radon measurements in the Mt. Etna area, Journal of Environmental Radioactivity, 65, 187–201
- [11] Marques, A.L., Santos, W., Paulo, L. and Geraldo, L.P., 2004, Direct measurements of radon activity in water from various natural sources using nuclear track detectors, Applied Radiation and Isotopes, 60, 801–804
- [12] Bakaç, M. ve Kumru, M.N., 2003, Orta Gediz Havzasından (Ege Bölgesi) Toplanan Su, Sediment ve Toprak Örneklerinin İçerdiği Doğal Radyasyon Miktarları, 8th National Nuclear Sciences and Technology Conference, 15-27 October 2003 Kayseri/TURKEY pp.127
- [13] Yadav, D.N. and Sarin, M.M., 2009, Ra–Po–Pb isotope systematics in waters of Sambhar Salt Lake, Rajasthan (India): geochemical characterization and particulate reactivity, Journal of Environmental Radioactivity, 100, 17–22

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [14] Gruber, V., Maringer, F.J. and Landstetter, C., 2009, Radon and other natural radionuclides in drinking water in Austria: Measurement and assessment, Applied Radiation and Isotopes [Article in press]
- [15] Porntepkasemsan, B. and Srisuksawad, K., 2008, Assessment of Ra-226 age-dependent dose from water intake, Applied Radiation and Isotopes, 66, 1654–1656
- [16] <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/r/radiation-weight-factor.htm> Erişim: 20 Mayıs 2009.
- [17] Nikolopoulos, D. and Louizi, A., 2008, Study of indoor radon and radon in drinking water in Greece and Cyprus: Implications to exposure and dose, Radiation Measurements, 43, 1305 – 1314
- [18] Prasad, G., Prasad, Y. Gusain, G.S. and Ramola, R.C., 2008, Measurement of radon and thoron levels in soil, water and indoor atmosphere of Budhakedar in Garhwal Himalaya, India, Radiation Measurements, 43, S375–S379
- [19] L'Annunziata, M.F., 2007, Radioactivity Introduction and History, First Edition, Elsevier, 2 p.
- [20] Merrill Eisenbud and Thomas Gesell, 1997, Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources, Fourth Edition, Academic Press, 2 p.
- [21] Joseph Magill and Jean Galy, 2004, Radioactivity Radionuclides Radiation, Springer, 19-31 p.
- [22] L'Annunziata, M.F., 2003, Handbook of Radioactivity Analysis, Academic Press, 2nd Edition, 114 p.
- [23] <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/06.pdf> Erişim: 23 Mart 2009
- [24] <http://www.doh.wa.gov/ehp/rp/factsheets/factsheets-htm/fs10bkvsman.htm> Erişim: 23 Mart 2009
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_series Erişim: 23 Mart 2009
- [26] <http://www.economicexpert.com/a/Decay:chain.htm> Erişim: 23 Mart 2009
- [27] Quabi, H., 2009, Modeling of radon and its short-lived decay products emanating from tap water used inside a house: Dose to adult members of the public, Applied Radiation and Isotopes, 67, 115-121

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [28] Krewski, D. and Lubin, J.H. and Zielinski, J.M. and Alavanja, M., Catalan, V.S., Field, R.W., Klotz, J.B., Letourneau, E.G., Lynch, C.F., Lyon, J.L., Sandler, D.P., Schoenberg, J.B., Steck, D.J., Stolwijk, J.A., Weinberg, C. and Wilcox, H.B., 2006, Combined Analysis of North American Case-Control Studies of Residential Radon and Lung Cancer, *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 69, 533-597
- [29] L'Annunziata, M.F., 2003, *Handbook of Radioactivity Analysis*, Academic Press, 2nd Edition, p. 593
- [30] Mose, Douglas G. and Mushrush, George W., 1997, Carcinogenic Risk Associated with Radon-Enriched Well Water, *Utilization and Environmental Effects*, 19:7,705 -713
- [31] Zoughool M. And Krewski D., 2009, Health effects of radon: A review of the literature, *Int. J. Radiat. Biol.*, Vol. 85, No. 1, pp. 57–69
- [32] Cancer Mortality Studies in Misara, a Radon Hot Spring in Japan: A Summary up to 2003, Hiroshi Tanooka1 and Tomotaka Sobue, *Human and Ecological Risk Assessment*, 10: 1189–1194, 2004
- [33] Vinson, D.S., Campbell, T.R. and Vengosh, A, 2008, Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air, *Applied Geochemistry*, 23, 2676–2685
- [34] Harrison, J.D. and Muirhead, C.R., 2003, Quantitative comparisons of cancer induction in humans by internally deposited radionuclides and external radiation, *Int. j. radiat. biol*, vol. 79, no. 1, 1–13
- [35] Joseph Magill and Jean Galy, 2004, *Radioactivity Radionuclides Radiation*, Springer, 59-71 p.
- [36] ICRP, 1991b, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60, Ann ICRP 21 (1-3).
- [37] Eissa, M.F., 2006, Measurements of Radon Concentration in Water and Air in Ehnasia City, Egypt using Track Detectors, *International Journal of Pure and Applied Physics*, Volume 2, Number 1, pp. 127–134
- [38] Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water Board on Radiation Effects Research Commission on Life Sciences National Research Council, 1999, *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*, NATIONAL ACADEMY Press
- [39] Knoll, G.F., *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley and Sons Inc, Third Edition, 66-74 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [40] Dayıoğlu, H., Özyurt, M.S., Bingöl, N. ve Yıldız, C., 2004, Kütahya İli İçme Sularının Bazı Fiziksel, Kimyasal ve Bakteriyolojik Özellikleri, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 7
- [41] Öznur, Ö., 1993, Kollektör Yönteminin Geliştirilmesi ve Optimum Koşullarının Araştırılması, Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
- [42] Kumru, M.N., 1992, Determination of Radium-226 in Environmental Samples by the Collector Chamber Method, Applied Radiation Isotopes, Vol. 43, 8, 1031-1034
- [43] F.S. Erees, S. Aytas, M.M. Sac, G. Yener and M. Salk; 2007; Radon concentrations in thermal waters related to seismic events along faults in the Denizli Basin, Western Turkey; Radiation Measurements, 42, 80– 86
- [44] Risk Assesment of Radon in Drinking Water, Committee on Risk Assesment of Exposure to Radon in Drinking Water Board on Radiation Effects Research Commission on Life Sciences, National Academy Press, Washington D.C., 1999.
- [45] National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Notice of Data Availability, [Federal Register: April 21, 2000 (Volume 65, Number 78)]
- [46] Guidelines for Drinking-water Quality First Addendum to Third Edition, Volume 1 Recommendations.
- [47] <http://www.csupomona.edu/~pbsiegel/www/decaychain/U238.html> Erişim: 22 Mayıs 2009
- [48] <http://www.csupomona.edu/~pbsiegel/www/decaychain/U235.html> Erişim: 22 Mayıs 2009
- [49] <http://www.csupomona.edu/~pbsiegel/www/decaychain/Th232.html> Erişim: 22 Mayıs 2009
- [50] Unsear 2000 Report Vol. I, Annex B: Exposures From Natural Radiation Sources
- [51] WHO, 2004, Guidelines for Drinking-Water Quality, third ed. Geneva, Switzerland
- [52] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1993. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2 Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67, Ann ICRP 23(3/4), Pergamon Press, Oxford
- [53] Unsear 2000 Report Vol. I, Annex B, Dose assessment methodologies