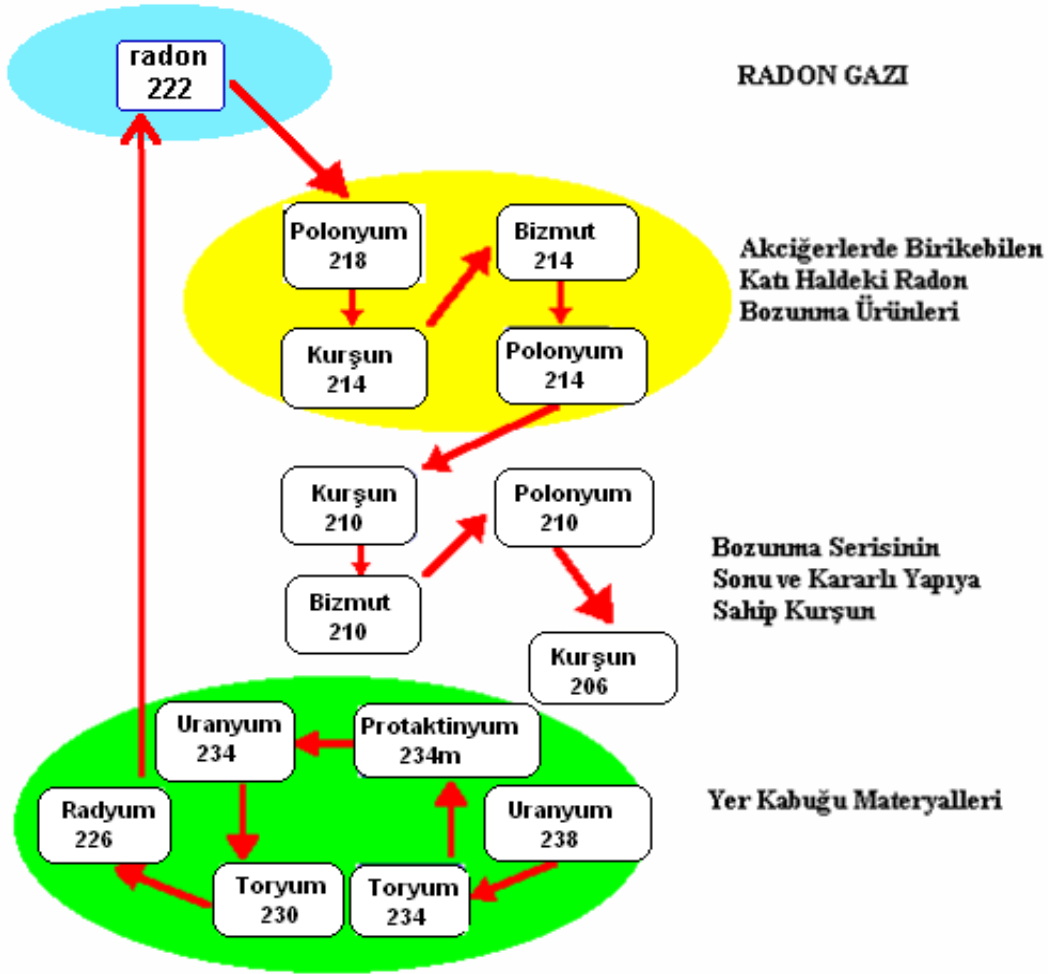


## RADON GAZI

'Radon gazı, doğal radyasyon kaynaklarından olan  $4,468 \times 10^6$  yıl yarı ömre sahip  $^{238}\text{U}$  ailesinin bir elemanı olup, bu serideki tek radyoaktif gazdır. Radon, 1602 yıl yarı ömürlü, bir alfa yayınlayıcısı olan  $^{226}\text{Ra}$ 'nın radyoaktif bozunumu sonucunda ortaya çıkar. Radonun bozunması sonucu alfa ve beta yayınlayan radon ürünleri meydana gelir. Bu katı radyoaktif maddeler havadaki tozlara ve su damlacıklarına tutunarak küçük radyoaktif aerosoller oluşturup, solunum yoluyla akciğerlere girer. Burada bozunumun devam etmesi akciğer dokusunda hasara ve dolayısıyla zaman içerisinde kansere sebep olur (Çelebi, 2008). Yarı ömrü 3,8 gün olan, yeryüzünden atmosfere yayılan  $^{222}\text{Ra}$  radyoaktif asal bir gazdır. Radon gazının atmosferdeki düzeyinin doğru şekilde ölçülmesi radyasyondan korunması, uranyum aramaları ve depremlerin önceden saptanması çalışmaları için önemlidir.



U-238'in bozunma şeması (Çelebi, 2008).

## **RADON GAZI BIRAKILMASINI VE AKTARIMINI DENETLEYEN ETMENLER**

Appleton'a (2005) göre radonun çoğu kayalarda ve toprakta kalırken yalnızca yüzeye yakın bulunan bir kısmı havaya bırakılır. Kayaların ve toprakların radon bırakma hızı büyük ölçüde bünyelerindeki uranyum miktarı ve uranyumun içinde bulunduğu mineral çeşitleriyle denetlenir. Radon gazının binalardaki göçünü ve birikimini denetleyen en önemli etmenler şunlardır:

- 1-Ana kayanın gözeneklilik ve geçirimsizlik gibi iletim özellikleri;
- 2-Karbondioksit gazı, yüzey ve yer altı sularını içeren taşıyıcı sıvıların doğası,
- 3-Hava,
- 4-Geçirimsizlik gibi toprak özellikleri,
- 5-Evin yapısının özellikleri,
- 6-Evde yaşayanların yaşam tarzıdır.

### **Mineralojik etmenler**

Radonun bırakılmasını etkileyen başlıca mineralojik etmenler uranyumlu minerallerin çözünürlüğü, iç yapısı ve özgül yüzey alanıdır. Uranyum, kayalar ve topraklarda nadiren homojen şekilde dağılır. Radon sınırlı yarı ömrü olan bir gaz olduğundan ana mineralden kaçıp gitmesi, tanenin kenarından olduğunda çok daha fazladır (Appleton, 2005). Uranyumlu minerallerdeki farklılıklar ve özellikle de ana uranyumlu minerallerin çözünürlüğü, bırakılan radon miktarını denetler. Örneğin bazı granit kayalarında bulunan uranyumun çoğu yüzey yakınında kolayca ayrılan uraninit (uranyum oksit) mineralinde bulunur. Suda daha fazla çözülebilen uranyum böylece başlangıçtaki alanından ayrılmakta, radon gazından gelen görece çözünemeyen radyum, demir oksit ve kil mineralleri karışımında kalır (Appleton, 2005). Radyumdan gelen radon, akışkanlarla yüzeye doğru hareket edebilmektedir. Soygaz olan radon, çoğunlukla kayalardaki ve ayrışma ürünlerindeki diğer gazların oluşumunu denetleyen kimyasal tamponlama tepkimelerinden etkilenir (Appleton, 2005).

Çökel kayalarda bulunan mineral birlikleri granitlerden çok farklılık gösterir. Stilolitli kireçtaşlarında 20-60 mg/kg uranyum bulunur. Kireçtaşlarındaki tüm uranyum 2 mg/kg'ın altındadır. Kireçtaşı çatlaklarındaki yüksek radon salınımları, muhtemelen çatlak ve boşlukların yüzeylerinde depolanan radyumdan dolayıdır (Appleton, 2005). Radyumun yüksek özgül yüzey alanı radonun etkin salınımına izin vermekte ve kireçtaşının yüksek geçirimsizliği de yüksek göçme hızlarını beraberinde getirmektedir. Uranyum ve radyum kireçtaşı üzerindeki kalıntı toprakta yoğunlaşabilir. Zaman zaman radyum, toprağın organik malzemesinde de konsantre olabilir (Greeman ve Rose, 1996). Kumtaşlarında ise uranyum, yüksek oranlarda uranyum içeren (100 mg/kg'ın üzerinde) apatit ve zirkon gibi ilksel detritik minerallerde yoğunlaşır. Ayrıca uranyum kumtaşı matrisi ya da ayrışma ürünlerindeki demir oksitlerin üzerine de emilebilir (Appleton, 2005).

### **Ana kayacın iletim özellikleri**

Yüksek düzeylerde radon üretilmesi sonuçta uranyum derişimine ve ana mineralin doğasına bağlı olduğu halde, radon gazının yüzeye taşınması bundan bağımsız olmaktadır (Akerblom ve Mellander, 1997). Radon gazı ana mineralden, mineral taneleri arasındaki boşluğa (tanelerarası bölge) bir kez bırakıldığında diğer etmenler devreye girer. Bunların en önemlileri;

- 1-Geçirimsizlik, gözeneklilik, gözenek boyu dağılımı ve çatlakların doğası ile dağılım özellikleri gibi kayanın sıvı iletim özellikleri,
- 2-Kayaların su tutma (doğunluk) derecesidir.

Faylar ve diğer kırıklar radon gazının yüzeye iletilmesini sağlar. Sıvı akışı olan faylar, çoğunlukla toprak gazlarından yüksek radon çıkmasının nedeni olur (Ball ve diğerleri, 1991).

### **Radon'un göçme yolları**

Radonun doğal göçme yolları; tabaka düzlemleri, eklemler, makaslama bölgeleri ve faylar gibi süreksizlik düzlemleridir. ABD’de yüksek düzeyde bulunan radon, toprak gazı ve yer altı suyundaki yüksek radon, granitlerdeki uranyumca zenginleşmiş makaslama bölgeleriyle ilişkilidir. Gerçekten de ABD’de en yüksek ev içi radon düzeylerinin bir kısmı makaslamalı fay bölgelerindedir (Appleton, 2005). İngiltere’nin güneybatısında da benzer gözlemler yapılmıştır. Radon ve diğer gazların faylar ile mağaralar ve erime boşlukları boyunca üste doğru yoğunlaşıp göçtüğü bilinir (Appleton, 2005). Yer altındaki radon göçü yapay yolları ise maden işletmeleri ile kullanılmayan tüneller ve hava bacalarıdır. Eski uranyum işletmelerinde radon değerleri genelde 10.000-60.000 Bqm<sup>-3</sup> çıkabilir (Gilmore ve diğerleri, 2001). Yüzeye yakın tesislerle ilişkili diğer yapay radon göçü yolları ise konumları yerel hizmet ajansları tarafından elde edilebilen elektrik, gaz, su, lağım ve iletişim hizmetleridir (Gilmore ve diğerleri, 2001).

Radon mineral yüzeylerinden kolaylıkla gözeneklere ve boşluklara yayılarak dağılır. Bununla beraber 3,8 gün olan kısa yarı ömrü yayılım uzaklığını sınırlar. Yüksek geçirgen olan kuru çakıltaşında radon 5 m’lik bir yayılım uzaklığında başlangıç değerinin % 10’u kadar bozuşur (UNSCEAR, 2000). Genelde nemli topraklarda bu uzaklık daha da azalır. Toprak gazında yayılan <sup>222</sup>Rn, özgül <sup>226</sup>Ra etkinliği, topraklar ve kayaların özgül yoğunluğu, etkin gözenekliliği radon yayılma katsayılarından belirlenebilir (Washington ve Rose, 1992’den Appleton, 2005). Mağaralarda 2,2 mg/kg’lık uranyum bulunduran katı kireçtaşından yayılarak dağılan radon derişiminin yaklaşık 100 Bqm<sup>-3</sup> olması beklenir. Mağaralarda radon konsantrasyonu artışı, kırıklardaki sıvılar, çatlakların kesişim noktaları, boşluklar gibi etkenlerle denetlenir. Radonun taşınması 100 m mesafeyi aşabilir (Appleton, 2005).

Karbondioksit gazı ya da su gibi taşıyıcı sıvılardaki göçmenin, radonu yüzeye taşıyan ana etkidir. Radon, yer altı suyu ile dokanak halindeki geniş yüzey alanlı kayalarda daha fazla bırakılır. Radon göçü, uranyum minerallerden ilk bırakıldığındaki kayanın ve toprağın sıvı akışı özelliklerine bağlı olur (Appleton, 2005). Su tablasının altındaki suyun akışı, toprak akiferdeki yer altı suyu taşınımı genelde yavaştır (<1-10 cm/gün). Bu yüzden su ile taşınan radon, 1-2 m’den daha az bir uzaklıkta bozuşur. Kireçtaşı gibi geçirimli kayaların olduğu bölgelerde radon, daha çabuk taşınma eğilimindedir. Taşıyıcı etkisi diğer kayalar için de önemli olabilir. Karbondioksit doygun olmayan bölgede radon gazını toplar ve radonu çatlaklar, kırıklar ve faylar boyunca taşır (Appleton, 2005). Yüzey sularındaki radon genelde çözünmüş radyumla birlikte bulunur. Yüzeydeki ırmak sularında radon derişiminin, ırmak çökelinin radyum değeriyle yakın ilişkili olduğu görülür. Suda çözünebilen radon, böylece yer altındaki kireçtaşı içindeki ırmaklarda 5 km’ye kadar çıkan uzaklığa taşınabilir. Türbülans ya da basıncın kalkması gibi bir gaz evresine girene değin sulu çözeltide kalır. Su tablasının üzerinde doğrudan gaz evresine girdiğinde ise karbondioksit gibi taşıyıcı bir gazın bulunuşu radonun göçünü etkiler (Appleton, 2005).

### **Faylar ile radon gazı ilişkisi ve sağlık**

Çin’in kuzeyinde yer alan Shanxi eyaletinin bir şehri olan ve Taihang Dağı bölgesinde yer alan Heshun’da sakat doğumların ve hamilelikte düşüklerin oldukça fazla olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda bu bölge nüfus giriş-çıkışının az olduğu kapalı bir yaşam alanı olmakla beraber, jeolojik olarak da birçok fay zonu tarafından biçilen, çekirdeğinde Arkeen yaşlı kayaları içeren bir antiklinalin üzerinde kurulmuştur. Yapılan çalışmalarda, antiklinalin çekirdeğindeki yaşlı kayaların faylar ile daha çok deforme olduğu, bu nedenle radon gazı çıkışlarının çekirdeğe ve fay zonlarına yakın alanlarda daha çok yoğunlaştığı, bunun da yöre halkında sakat doğum ve düşüklerle yol açtığı belirtilmiştir. Ayrıca fay zonlarına yakın lös platosu içine kazılan mağaralarda yaşayan insanlarda da radon gazı yoğunlaşmasından dolayı sakat doğumlar olduğu belirtilmiştir (Etiopie ve diğerleri, 2006’dan Yusufoglu, 2009). Tarihsel dönemlerde, temel kayaları içinde fayın oluşturduğu derin yarık ve çatlaklardan toksik gaz çıkışlarının olduğu,

bunların da dönemsel sismik hareketlerden kaynaklandığı belirtilmiştir (Etiyopye ve diğerleri, 2006'dan Yusufoglu, 2009).

## **Hava**

Radon değerlerini etkileyen başlıca iklimsel etmenler; barometrik basınç, yağış ve rüzgar hızıdır. Daha az geçirgen humuslu ya da kilce zengin bir üst toprak olmadığında toprak gazındaki radon derişimi doğrudan barometrik basınç ya da daha az olarak ters orantılı rüzgar hızıyla değişir. Üst toprağın daha ince taneli ve daha humuslu olduğu yerlerde barometrik basınç ve rüzgar hızının etkileri sınırlıdır (Appleton, 2005). Yağmurun radon derişimini etkilemesi toprağın geçirimliliğine bağlıdır. Yağmur sırasında geçirimli toprakların gözenekleri suyla dolacağından, bu durum radonun yüzeye çıkışını engeller. Suyu doygun yüzey tabakası altında radon birikmesi olabilmekte ve sonuçta zaman zaman bir derecelik artışlar gözlenmektedir (Appleton, 2005).

Topraktaki radon derişimi artışı sıklıkla geceleri kırağı olduğu ve bu toprak gazındaki alfa etkinliğinde iki kat artışa yol açtığı zaman gerçekleşir. Kurak iklim şartları kilce zengin toprakların kurummasına ve çatlamasına neden olur. Bu durum toprak gazlarının daha kolay çıkışına izin verir ve böylece toprak yüzeyindeki radon konsantrasyonunda bir artış olmaktadır (Appleton, 2005). Radon konsantrasyonunun değiştiği kışın daha düşük ve yazın daha yüksek olma eğiliminde bulunduğunu keşfeden Rose ve diğerleri (1990), toprakta radon derişimindeki mevsimsel değişimleri gözlemiştir. Değişiklik, büyük oranda kış mevsiminde toprak gözenek suyunda daha fazla radonun tutulduğu çözeltili toprağın nem içeriğindeki değişimlerden kaynaklanır. Değişim, toprağın nem içeriğindeki daha büyük kısa dönemli değişimlere bağlı olarak toprağın 70 cm derinliğinin üstünde, altında olduğundan daha fazladır (Appleton, 2005). Toprak gazı ölçümlerinde radonun, yağışın neden olduğu geçici değişimlerin etkisini azaltmak için 70 cm'den daha derinlerden alınması gerekir (Appleton, 2005).

## **Toprak özellikleri**

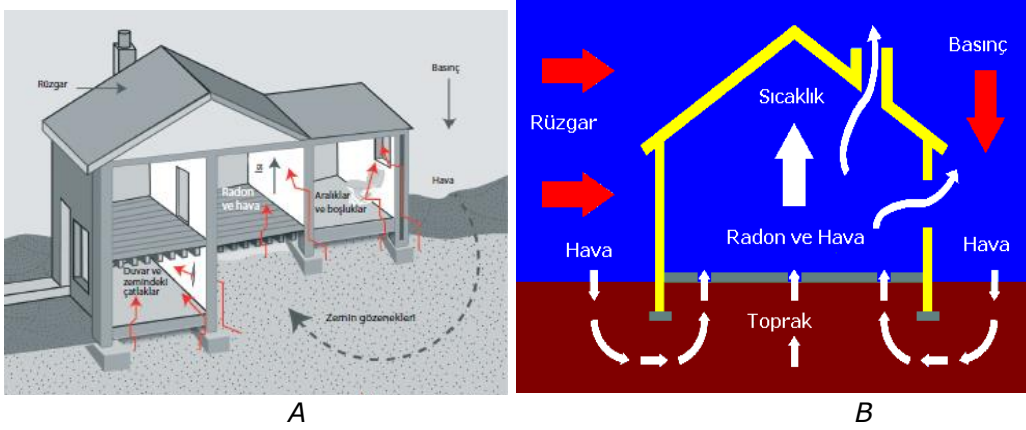
Toprak gazında radonun bırakılma hızı ve toprak boyunca aktarımını etkileyen başlıca toprak özellikleri; toprağın geçirimliliği ve nemidir. Genellikle toprağın geçirimliliği toprağın dokusu, yapısı, gözenek çapı, gözenek boyu dağılımı, gözenek hacmi, istiflenme yoğunluğu, toprağın katı yoğunluğu ve tane büyüklüğüdür. Toprağın mineralojisi toprak gazı radon derişimlerini denetleyen önemli bir etkidir. Bazı hallerde toprak gazındaki  $^{222}\text{Rn}$ 'un başlıca kaynağı organik  $^{226}\text{Ra}$  olabilir (Greeman ve diğerleri, 1990; Greeman ve Rose, 1996). Radonun hacim olarak etkinliği toprakta kaba taneli materyalin çoğalmasıyla artar. Kışın zeminin donduğu ya da suya doygun olduğu zaman humuslu ve killi topraklar geçirimsiz olur. Çok kurak dönemlerde ise çatlayıp geçirgen bir davranış gösterebilirler (Appleton, 2005). Toprağın geçirimliliği ve yağış evlerindeki radon konsantrasyonlarını denetler. Toprağın geçirimliliği genelde altındaki kayalar ile buzul tili, alüvyon ya da çakıl gibi yüzey çökellerinin geçirimliliğini yansıtır (Appleton, 2005).

Binaların temel kazıları sırasında, zeminin üst tabakası ve toprak örtüsü kaldırılmakta ve böylece temel kayasının yüzeylenmesi gerçekleşmektedir. Temel kayalarının kırık ve çatlaklı, gözenekli yapılarından dolayı, toprak örtüsüne göre radon potansiyeli daha fazla olmaktadır (Appleton, 2005). Çoğu toprakta açığa çıkan radonun sadece % 10-15 kadarı minerallerin gözeneklerinden kaçarak boşluklara gitmektedir. ABD'deki toprakların radon içeriği genelde 5 ve 80 Bq/l arasındadır. Evlerdeki radonun yüksek düzeyde olması; daha kuru, yüksek geçirimli topraklar, kireçtaşları, kaba taneli buzul çökelleri ile çatlaklı ya da boşluklu ana kaya ve tepelerin yamaçlarıyla ilişkilidir (Appleton, 2005).

## Binalarda radonu etkileyen unsurlar

Evlerin tasarımı, yapısı ve havalandırması ev içindeki radon düzeylerini etkiler. Radon gazı binalara; zemindeki çatlaklar, askıdaki beton ve kereste döşemelerdeki boşluklar, yapı bağlantı noktaları, duvar çatlakları, asma kat boşlukları, tesisat boşlukları, duvar arası boşluklardan girer (Şekil 31). Ayrıca yapı malzemeleri, mutfakta veya ısınma amaçlı kullanılan doğal gaz ve içme sularında bulunan radon da bina içi konsantrasyonu artırır. Binalardaki radon kaynağının büyük bir kısmı, binanın temelindeki toprak ve kayalardır. Ayrıca evlerdeki suların kullanım sırasında püskürtülmesi veya çalkalanması büyük miktarda radonun salınmasına neden olur (Çelebi, 2008).

Radon gazı, toprak boyunca yükselerek, binanın altında tutulur ve basınç oluşturur. Binanın altındaki bu yüksek basınç nedeniyle gazlar yerden ve duvarlardan, özellikle çatlak ve boşluklardan, bina içlerine sızabilir. Topraktaki ve yapı malzemelerindeki <sup>226</sup>Ra miktarı, toprak ve yapı malzemelerinin nem oranı, difüzyon potansiyeli, toprakla temasta olan yapının yüzey alanı ve izolasyon niteliği, bina zemini, binadaki havalandırma kapasitesi, iklim koşulları, iç-dış hava sıcaklık ve basınç farkı binalardaki radon konsantrasyonunu etkileyen temel unsurlardır (Arıkan ve Uslu, 2004).



A- Ev içi radon konsantrasyonuna etki eden faktörler (TAEK, 2009), B- Etki eden faktörlerin şematik gösterimi (Çelebi, 2008),

Radon miktarı genelde bodrum katlarında ve toprak ya da ana kayayla temas ettiği zemin döşemelerinde en yüksektir. Duş ya da diğer ev etkinlikleri sırasında kuyu suyuyla bırakılan hava da evdeki radon düzeylerine, toplam değer görecek küçük bir miktar olsa da katkıda bulunabilir (Appleton, 2005). ABD’de bodrumlu bir ev inşa edildiği zaman bir kuyu kazılır, ayaklıklar kurulur ve bodrum dilimine taban olarak genellikle kaba çakıl döşenir. Bodrum duvarları ile dıştaki zemin arasındaki boşluk sıklıkla, başlangıçtaki zeminden daha geçirimli olan malzemeye doldurulur. Radon bu geçirimli malzemeye ve çevresindeki toprağın altındaki çakıl yatağa doğru hareket eder. Dolgu malzemesi genelde temel alanındaki kayalar ve topraklardan alınırken bazen farklı radon yayılma özelliğindeki yöresel kayalar ve topraklardan farklı malzemeler alınır. Bundan dolayı, geçirimli malzemedeki radon miktarı yöresel ya da dışarıdan alınan uranyum miktarı ile birlikte toprağın tipi, geçirimsizliği ve nem içeriğine bağlıdır (Appleton, 2005).

İngiltere’de radonun ortalama  $20 \text{ Bq/m}^3$  olarak bulunduğu tipik bir yapıda, radonun % 60’i binanın üzerinde durduğu zeminden, % 12’si yapı malzemelerinden, % 12’si havadan, % 2’si su kaynağından ve % 1’i de gaz kaynağından gelir. Bu değerler ortalama bir İngiltere’ye özgü olmakla birlikte değişebilir ve zeminden eve giren radon miktarı normalde yüksek radon düzeyli evlerdekinden çok daha yüksek olabilir. Radonun ana giriş mekanizması, basınç etkisinde tabandaki çatlaklar ve deliklerdir (Appleton, 2005). Dışarıdaki rüzgar ve bina içi ısıtmadan kaynaklanan ev içi ve dışı düşük basınçlı hava, radonla kirlenen havanın zeminden binaya geçmesine neden olur. Çift sırlı, enerjisi

tutan önlemler hava girişini kısıtlar ve böylece ev içi radon konsantrasyonu azalır (Appleton, 2005).

## **SUDA RADON GAZI**

Radon, yer kabuğunu oluşturan çeşitli jeolojik yapı taşlarındaki uranyumdan yer altı sularına geçer. Özellikle yerin derinliklerindeki uranyumu zengin kristalin kaya tabakaları arasındaki derin yer altı sularında radon bol bulunur. Radonlu suların, yerleşim yerlerine içme ve kullanma suyu olarak dağıtılması yoluyla, doğrudan ya da suda havaya geçerek dolaylı yoldan, insan vücuduna ulaşır (Atakan, 2008). Vücuda solunan hava ve içilen suyla giren radon çabucak kana karışıp vücudun tüm hücrelerine yayılır. Radon, hücrelerdeki maddelerle kimyasal olarak etkileşmemesine karşılık, atom çekirdeklerinin yaydığı (2 proton ve 2 nötrondan oluşan) alfa ışınları yoluyla ve ürettiği ağır metallere vücuda etkiler (Atakan, 2008).

Çok uçucu olan radon, göl ve ırmaklar gibi yüzeysel sularda az bulunur. Radon, köylerdeki çiftlik ve bahçelerdeki kuyulardan evlerin musluklarına gelen suyla birlikte girebilir. Ayrıca ırmak ve göl suları da bazı yerlerde evlere verilmekte ya da o yöredeki halk bunları doğrudan kullanmaktadır. Bu gibi sularla beslenen yerlerdeki içme sularındaki radon radyoaktivitesi genellikle 1 Bq/l'den daha az olmaktadır (Atakan, 2008). Musluk suyundan havaya ulaşan radonun solunması sonucu ise, ABD'de her yıl 170 kadar kişinin kansere yakalanabileceği, bunun % 89'nun akciğer kanseri, % 11'nin de radonlu suyun içilmesiyle mide kanseri olacağı hesaplanmıştır (Atakan, 2008). Radon, yer altından ya gaz ya da suda çözünmüş olarak yer yüzüne çıkar. 3,8 günlük yarılanma süreli radon ( $^{222}\text{Ra}$ ) bozunarak kısa yarılanma süreli (radyoaktif bozunmayla yarıya inene kadar geçen süre)  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  ve  $^{214}\text{Po}$  gibi ağır metalleri üretir.

Yer altı suyunda çözünen radon kırıklar ve mağaralarda, sıvı akış hızına bağlı olarak uzun mesafeler kat edebilir. Suda çözülebilen radon bu sayede yer altı suyunda kireçtaşı birimlerden geçen ırmaklarda 5 km kadar uzağa taşınabilir. Radon, gaz evresine gelinceye kadar türbülans ya da basıncın kalkması ile sulu çözeltide kalır. Gaz evresine su tablasının üzerinde doğrudan salınırsa karbondioksit gibi taşıyıcı bir gazın bulunması radonun taşınmasını etkileyecektir (Appleton, 2005). Bu durum yer altındaki mağaralar ve çatlakların gaz evresine hızla aktarılmasını sağlayan kireçtaşı oluşumlara özgüdür. Su kaynaklarındaki radon insanların iki şekilde radyasyona uğramasıyla sonuçlanabilir. Suyun yutulması ya da radonun ve bozuşma ürünlerinin solunmasına izin veren duş ya da banyo sırasında radonun bırakılması ile gerçekleşir (Appleton, 2005).

$^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{235}\text{U}$  doğal radyoaktif serilerindeki radyonüklidler ve  $^{40}\text{K}$  radyonüklidi, özellikle yer altı suları olmak üzere sulardaki doğal radyoaktivitenin temel kaynağıdır. Bu radyonüklidlerin aktivite derişimleri normal değerinde olduğunda, yer altı sularından beslenen kaynaklardan dağıtılan içme ve kullanma suları insanların maruz kaldığı radyasyon dozunu arttırabilir (Appleton, 2005).

Yer altı suyundaki birçok radyonüklid kayaçlar ile yer altı suyunun etkileşme ürünleridir. Bu elementlerin yer altı suyundaki içerikleri ve dolayısıyla radyoaktiflik düzeyleri, akifer kayalarında bu elementlerin derişimleri, kimyasal tepkimeler ve su-kayaç ara yüzeyindeki fiziksel bozunma süreçlerini içeren birçok etmenin birlikteliğine bağlıdır (Appleton, 2005). Radyoaktif yer altı suyunun bulunuşunu belirleyen ilk etmen jeolojik faktörlerdir. Bozunma zincirlerinde ana elementlerin yüksek düzeyde bulunması, ilişkili yer altı suyunda bir ya da birkaç radyonüklidin etkinliğine bağlıdır. Şeyl ve fosfatlı kayaçlar uranyumca zengin kayalar olup, uranyum bozunma zincirinin ürünü olan  $^{226}\text{Ra}$  bulunduran yer altı suyunu barındırır. Benzer biçimde granit gibi silisçe zengin magmatik kayalar hem uranyum hem de toryumca zenginleşebilir ve bu yüzden ilişkili yer altı suları, ürünleri  $^{226}\text{Ra}$  ve  $^{228}\text{Ra}$  içerebilir (Vengosh, 2006). Örneğin ABD'nin güneydoğusunda kıyı ovasının üst kesiminde kumlu akiferlerdeki yer altı suyu, litre başına maksimum 5 pikoküri düzeyinin üzerinde yüksek  $^{226}\text{Ra}$  düzeyleri içermektedir. Bu zenginleşme,

Piedmont'de çatlaklı kaya akiferlerinden (granit ve gnays) kıyı ovasındaki kil ve gevşek kum akiferlerine geçiş boyunca görülür (Vengosh, 2006).

Akifer kayalarından radyonüklitlerin hareketliliğini denetleyen ikinci etmen, uranyum elementlerin yer altı suyuna geçişini sağlayan yer altı suyu kimyasıdır. Özellikle asitlik (pH), tuzluluk, sıcaklık ve yer altı suyu yükseltgenmesi radyonüklid hareketliliğini etkiler (Vengosh, 2006). Ek olarak her bir radyonüklidin jeokimyasal özellikleri de sudaki erişilirliğini belirler. Örneğin radyum yer altı suyuna kil minerallerinin üzerine yapışarak, ikincil minerallerle çökelerek ve radyoaktif çürümeyle geçebilir. Birçok çalışma kil mineralleriyle olan tepkimenin, düşük tuzluluğa sahip yer altı suyunda radyum etkinliğini denetleyen ana süreç olduğunu gösterir (Vengosh, 2006).

USGS ekibi New Jersey'in güneyinde Kirkwood-Cohansey akiferinde açılan 170 kuyunun % 33'ünde maksimum kirletici düzeyinin üzerinde olduğu yüksek radyum konsantrasyonları bulmuştur. Bu değerler düşük pH ve yüksek nitrat konsantrasyonlarıyla ilişkilidir. Tarım sahalarındaki kuyularda rastlanan yüksek radyum düzeyleri, nitrifikasyonu etkileyen ve pH'ı düşüren tarımsal girdilerin beslenmesiyle ilgilidir (Vengosh, 2006). Böylesi bir birleşim kil minerallerinin üzerindeki alışveriş alanlarından radyumun atılmasını çoğaltarak sonuçta ilişkili yer altı suyunda radyum düzeylerini arttırmaktadır.

New Jersey'deki durum iyi olmayıp, nitrat kirlenmesi, asitli su oluşumu ve yer altı suyunda radyonüklidlerin artışıyla birlikte dünyada en sık karşılaşılan yer altı suyu niteliğinin bozulması vardır (Vengosh, 2006). Birçok çalışmada <sup>226</sup>Ra dağılımında tuzluluğun önemli olduğu görülmüştür. Örneğin Missouri, Kansas ve Oklahoma'daki akiferlerin yer altı suyunda <sup>226</sup>Ra ve tuzluluk arasında doğrusal bir ilişki görülür. Radyum etkinliği ve tuzluluk arasındaki güçlü ilişkiyi Celile Denizi ile Lut Gölü arasındaki rift vadisinde yer alan ile Necef Çölündeki Judea Grubu kayalarında bulunan yer altı sularında görülebilir. Genelde tatlı sularda radyumun çoğu akifer kayalarında kaldığı halde tuzlu koşullarda radyum, kayalardan kaçmakta ve yer altı suyunda yüksek konsantrasyonlara çıkabilmektedir.

Bazı çalışmalar oksijensiz yer altı suyunun uranyuma göre radyumca zenginleştiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, New York'ta Columbia Üniversitesi araştırmacıları New Mexico'nun güneybatısındaki Delaware Havzası'nda oksijensiz yer altı sularının düşük uranyum ve yüksek radyum konsantrasyonları içerdiğini bulmuştur. Benzer şekilde Judea Grubu karbonat akiferindeki yer altı suyunda çözülmüş oksijen ve radyum konsantrasyonları arasında tersine bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Vengosh, 2006). Oksijensiz sudaki yüksek radyum etkinliği manganın hareketliliğinden ileri gelir. Oksijen olduğunda radyum mangan oksite kuvvetle bağlanır ve oksijensiz koşullarda mangan oksit artık duraylı değildir ve hem radyum hem de mangan ilişkili yer altı suyuna bırakılır.

Sıcaklık, kayalardan gelen radyum değerini arttıran önemli bir etkidir. İsrail'de güney Arava Vadisinde radyum etkinliği, Nübye Kumtaşı akiferindeki kuyuların derinliğine de yansıdığı üzere yer altı suyunun sıcaklığıyla artar (Vengosh, 2006). Wyoming'de Yellowstone, Ölü Deniz Rift Vadisi, Orta Fransa Masifi ile Doğu Avrupa'daki jeotermal kaynak çalışmalarıyla belgelendiği gibi bir çok jeotermal kaynak radyumca zenginleşir. Kayalardan radyum gelişi sıcaklık ve tuzlulukla arttığından dolayı, şişelenmiş maden suyu olarak kullanılan jeotermal kaynaklar yüksek radyum konsantrasyonlarına sahip olabilir (Vengosh, 2006).

Macaristan'da jeotermal ve şişelenmiş maden sularındaki radyoaktivite araştırması, dünyaca ünlü Budapeşte hamamları da dahil olmak üzere birçok jeotermal kaynağın litrede 27 pikoküriye kadar çıkan yüksek <sup>226</sup>Ra konsantrasyonları içerdiğini göstermektedir. <sup>226</sup>Ra konsantrasyonları Macaristan'da ticari olarak işletilen şişelenmiş maden sularında da yüksektir (Vengosh, 2006). Toplam çözülmüş tuzlar ile <sup>226</sup>Ra arasında pozitif bir ilişki olduğu açıktır. Örneğin, litre başına 2 gr kadar toplam çözülmüş

tuz içeren şişelenmiş maden suyu, ABD maksimum kirletici düzeyinin yaklaşık 15 katı olan litre başına 78 pikokürilik bir radyum konsantrasyonuna sahip olacaktır. Bu çalışmalara rağmen, ihraç edilen şişelenmiş maden suyunda radyonüklid düzeyinin sistemli bir şekilde denetlenmesi hala yapılamamıştır.

Radyonüklidlerin yer altı suyuna hareketini etkileyen son etmen fizikseldir. Radyoaktif bozunma ilişkili yüksek kinetik enerjilerinden dolayı, yavru izotoplar kaya içindeki ana izotoplardan suya doğru hareket halindedir. Radyonüklidlerin radyoaktif bozunma hızları ile yer altı suyunun akış hızı arasındaki ilişkiler, bu mekanizmayla suya eklenen radyoaktivite miktarını belirleyecektir (Vengosh, 2006). Örneğin durgun (ve eski) yer altı suyu, genelde su ve akifer kayaları arasındaki etkileşim uzun süreli olduğundan hem kısa hem de uzun ömürlü izotoplar açısından zenginleşir. Kayalar ve çatlaklardaki su arasında artan etkileşmeye bağlı olarak yer altı sularında oldukça yüksek radon düzeyleri genelde çatlaklı granit kayalarıyla ilişkilidir.

Kuzey Caroline Çevre ve Doğal Kaynaklar Bölümü eyaletin batı dağlarında çatlaklı granit ve gnays akiferlerindeki sığ yer altı suyunda 45.000 pikoküriye kadar çıkan yüksek radon içeriği olduğunu belirlemiştir. Birçok kuyuda radon içeriği EPA'nın içme suyunda tavsiye ettiği litrede 300 pikokürinin üzerine çıkmaktadır (Vengosh, 2006). ABD'de özellikle Pennsylvania, Maine ve New Hampshire'da birçok alanda silikatça zengin magmatik kayaların bulunduğu bölgelerde yüksek radon içerikli yer altı suları bulunur. Bu etki 1600 yıllık yarı ömre sahip <sup>226</sup>Ra'u da içeren tüm radyonüklidlerin bozunma hızıyla çok düşük akış hızına sahip bir yer altı suyunda fazlaşır. Orta Doğu'daki Nübye Akiferi gibi çok düşük-eğimli akifer sistemlerinde yer altı suyundaki radyoaktiflik üzerinde bu etki önemlidir (Vengosh, 2006).

### **Türkiye'de radon kaplıcaları ve içmeleri**

Atakan (2007a) tarafından yapılan araştırmaya göre Türkiye'de adı radon termal banyosu olan bir kaplıca Kuşadası Davutlar'da bulunur. Bu kaplıcanın suyunda litrede 2 Bq radon vardır. Bu değer, birçok içme suyunun radon konsantrasyonu düzeyindeki kadar az olduğundan, bu kaplıcaya radon kaplıcası denemeyeceği açıktır. Nitekim İzmir içme ve kullanma sularındaki 0,3 ile 6 Bq/l arasındaki <sup>222</sup>Ra değerleri, bu kaplıcanın suyundakinden daha yüksektir. Kaplıcalardan; Kayseri Bayramhacılı: 380 Bq/l; Muğla Köyceğiz Sultaniye: 335 Bq/l; Çanakkale Kestanbol: 240 Bq/l; Afyon Sandıklı: 160 Bq/l radon içerir (Atakan, 2007b) (Ölçüm yapılan birkaç başka kaplıcadaki radon değerleri litrede 100 Bq/l'den daha da azdır).

Atakan'a (2007a) göre Türkiye'deki bazı içmeler ve bunların sularındaki radon konsantrasyonları, litrede Becquerel (Bq/l) olarak şu şekildedir: Ankara Beypazarı Dutlu Vezir İçmesi: 3171; Erzurum Hasankale (Pasinler) maden suyu: 2921; Nevşehir Kozaklı Kozoğlu Hamamı: 3167; Nevşehir Kozaklı Uyuz Hamamı: 2299; Kırşehir Çiçekdağ Mahmutlu Büyük Hamam: 737; Nevşehir Kozaklı Belediye Hamamı: 615; Balıkesir Susurluk Kepekler Hamamı: 406; Kuşadası Güzelçamlı İçmecesesi: 3; Kuşadası Kemerli kaynak 146; Kuşadası açık kaynak: 281; Kuşadası Sümerbank kaynağı: 88 Bq/l'dir. Tüm bu değerler ölçümlerin yapılmış olduğu günler için geçerli olup, sistematik olarak zamanla değişimleri ve hata oranları henüz incelenememiştir. Avrupa'daki radon uygulamalarının yapıldığı kaplıcalarda, radon konsantrasyonları genellikle litrede 666 ile 3000 Bq arasında değişmektedir. Ancak buralarda insanlar kontrollü olarak günde 20 dakika kadar kalabilmektedir (Atakan, 2007a).

Türkiye'de içmeler adındaki suların, içme suları olarak kullanılmadığı, yalnızca geleneksel kaplıca iyileştirmelerinde kullanıldıkları sanılmaktadır. Ancak bu iyileştirme programlarının, hastaların ve personelin fazla radyasyon dozu almalarını önleyecek önlemleri içerip içermediği bilinmemekte ve bunların araştırılması gerekmektedir (Atakan, 2007a). İçmelerdeki, henüz sistematik ölçümlerle sınınamamış, radon konsantrasyon değerleri çok yüksektir. İçme sularındaki <sup>222</sup>Rn üst sınır değeri 22 Bq/l olduğundan bu



İçmeler adındaki suların her ne kadar kaplıca suları olarak kullanıldığı belirtilmiş ise de, gerçekten çevredeki halk tarafından soğutulduktan sonra (radon miktarı bir miktar azalsa da), maden suları gibi içilip içilmediğinin ve içilmemesi için herhangi bir önlem alınıp alınmadığının da araştırılması gerekir (Atakan, 2007a).

## **RADON ÖLÇÜMÜ**

Radonun sağlık üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, insanların zamanlarının büyük bir kısmını geçirdikleri evlerde, radon konsantrasyonunun belirlenmesi son derece önemlidir. Türkiye’de evlerde radondan dolayı alınan radyasyon dozunu hesaplamak ve radonu yüksek bölgeleri tespit etmek amacıyla 1984 yılında Türkiye’de Konutlarda Radon Ölçümü Projesi başlamıştır (Çelebi, 2008).

### **Radon ölçüm yöntemleri**

Radon ve ürünlerini ölçmek için iki temel yöntem geliştirilmiştir. Bunlar aktif ölçüm yöntemi ile pasif ölçüm yöntemidir. Aktif ölçüm yöntemi; elektronik sistemler, pompalar, güç kaynakları gibi cihazlar gerektirir. Aktif sistemde iyon odaları, sintilasyon hücreleri veya spektroskopik sayım cihazları kullanılır. Pasif ölçüm yönteminde ise termoluminesans detektörler ( $\text{CaSO}_4$ : Dy veya LiF gibi), veya katı hal nükleer iz detektörleri; selüloz nitrat (LR-115) veya allil diglikol karbonat (CR-39) kullanılır. Pasif alfa detektörü kullanılarak yapılan radon dozimetreleri 3 farklı yolla oluşturulur (Çelebi, 2008):

1-Detektörün önünde bulunan bir filtre üzerinde radon ürünlerinin toplandığı gaz akışlı aktif cihazlardır.

2-Gaz akışı olmayan ağız kapaklı odacıklar; Radon oda içine difüzlenererek, oda hacmi içinde ürünlerini de oluşturarak, radon ve ürünlerinden gelen alfa parçacık izlerini bu odacık içine yerleştirilmiş bir alfa detektörü üzerinde bırakır.

3-Açık bir detektör üzerinde, havadaki radon ve ürünlerinden gelen alfa parçacıklarının kaydedildiği pasif aygıtlardır (Çelebi, 2008).

### **Evde radon testi**

Radon, renksiz ve kokusuz olmasına rağmen uygun aletlerle kolayca ölçülebilir. En yaygın radon ölçüm yöntemleri radonun alfa tanelerini yayan tek doğal gaz olduğu gerçeğinden hareketle gerçekleştirilir. ABD’de insanlar evlerinde radon testi yapmak için, Çevre Koruma Ajansı (EPA) ya da eyaletlerce karşılanmakta, kiralanabilmekte ya da ödenme yoluyla edinebilmektedir. EPA, insanlara tüm evlerin üçüncü katından aşağı katlara doğru radon testinden geçirilmesini tavsiye etmektedir (Appleton, 2005). Kısa dönemli yaygın test cihazları aktif karbon kutuları, alfa izi saptayıcıları, sıvı sintilasyon saptayıcıları, elektrot iyon odaları ve sürekli gözlemcilerdir. Kısa dönemli bir test cihazı, türüne bağlı olarak evde 2-90 gün arası kalır. Radon düzeyleri günden güne ve mevsimden mevsime değişme eğiliminde olduğundan evin yıllık ortalama radon düzeyinin ölçümü için uzun dönemli bir test daha uygundur (Appleton, 2005).

Aktif karbon kutuları ve sıvı sintilasyon saptayıcıları az miktarda etkinleşmiş mangal kömürü bulundurur. Radon ve bozuşma ürünleri mangal kömürüne soğurularak adsorbe olur, sodyum iyodür saptayıcısı ya da sıvı sintilasyon sayacı ile sayılarak ölçülür. Etkilenmenin başında soğurulan radon, birkaç gün sonra bozduğu zaman ölçüm süresi kısıtlanır ve cihaz, ortalama etkilenmeyi doğru ölçemez (Appleton, 2005). Aktif karbon saptayıcıları sadece sonuçların acilen istendiği kısa dönemli testler için elverişli olup, düşük hassasiyetli bir ölçüm kabul edilebilir. Kısa dönemli ölçümlerden sonra uzun dönemli bir ölçümün yapılması gerekir (NRPB, 2000).

Alfa (oyulmuş) izi saptayıcılarında, bir ya da üç aylık bir dönemde etkilenen küçük bir plastik tabaka bulunur. Alfa taneleri buna çarptıkça plastiği oyar. Bu izlere sonradan kimyasal işlemler uygulanır ve radon derişimi, mikroskopta sayılarak belirlenir. Oyulan iz

saptayıcıları görece ucuz, uzun dönemli ölçümler için elverişli olup, genellikle üç aylık bir döneme uygulanır (Appleton, 2005).

Elektrot iyon saptayıcıları ise elektrostatik yüklü bir teflon disk içerir. İyonlar, radon çarpması bozuşmasıyla oluşur ve diskin yüzey gerilimini düşürür. Gerilim düşüşünün ölçülmesiyle radon derişimi hesaplanır. Doğal radyasyonun yarattığı iyonlaşma önemsizdir. Birkaç gün, birkaç aylık dönemlik ölçümlerde farklı elektrot tipleri uygun olmaktadır (Appleton, 2005). Kesin sonuçların alınması için saptayıcılar dikkatle kullanılmalıdır. Sürekli gözlemciler, işlemek için enerji gerektiren etkin cihazlardır. Yetişmiş deneyiciler tarafından işletilmesi ve evdeki radon miktarının sürekli ölçülerek kaydedilmesi gerekir. Bu aletlerle hava sürekli örneklenerek radon ya da bozuşma ürünleri ölçülebilir (NRPB, 2000).

Kısa dönemli testlerde güvenilir sonuçlara ulaşmak istenirse sıkı bir süreç izlenmelidir. Örneğin kapılar ve pencereler testten 12 saat önce ve test dönemi sırasında kapalı tutulmalıdır. Test, alışılmadık derecede ciddi fırtınalar ya da yoğun rüzgarlı havalarda yapılmamalıdır (Appleton, 2005). Test cihazı normalde düzenli olarak kullanılan bir odada tabandan en az 50 cm yukarıda olmalı, evin en düşük kotlu yerine yerleştirilmeli ve yüksek oranda nem ya da egsoz yelpazesinin çalışmasının testin geçerliliğini etkileyebileceği mutfak ya da banyoda yapılmamalıdır (Appleton, 2005). Test döneminin sonunda takım, analiz için laboratuvara gönderilir. Sonuçlar birkaç hafta içinde gelir. Kısa dönemli bir testin sonucu  $100 \text{ Bqm}^{-3}$  ü aşarsa uzun dönemli bir test önerilir. Radon konsantrasyonu belirli düzeyleri aştığında evin iyileştirilmesi tavsiye edilir (Appleton, 2005).

Kış aylarında binaların havalandırılmaları yaz aylarına göre fazla yapılmadığından temelden sızabilecek radonun ev içinde konsantrasyonu daha fazla olabilecektir. Yıllık ortalama radon düzeylerini hesaplariken dönemsel düzeltmelerin uygulanması zorunludur. İş yerlerinde, iş uygulamaları ile yapı dizayını ve kullanımının dikkatle yapılması gerekir. Küçük binalarda en sık kullanılan iki odada en az bir ölçüm yapılmalıdır. Daha büyük binalarda ise her  $100 \text{ m}^2$ 'lik alan için en az bir ölçüm yapılması gerekir (Appleton, 2005).

### **Evde radon ölçümü geçerlilik düzeni**

Binalarda salınan radonun hızı ölçüm işlemleri, gözlem cihazının geçici değişimleri dikkate alması için uzun bir dönem sırasında doğru bir yere yerleştirilmesini gerektiren bir dizi karmaşık etmen tarafından denetlendiğinden dolayı büyük özen gerektirir (Appleton, 2005). Geçerlilik düzenleri;

1-Örgütlerin, radon ölçümünü kabul edilebilen bir belirsizlik düzeyinde ölçmesini sağlamak;

2-Saptayıcıların, ev halkına verilmeden önce ve sonra uygun bir biçimde kullanıldığını belirlemek,

3-Dönemsel değişim etmenlerinin gerekliliğini kapsayan sonuçların yorumlanıp sunulduğu minimum standartları sağlamaktır. ABD'de EPA, radon ölçüm şirketlerini ve sundukları hizmetleri değerlendiren, gönüllü bir Ulusal Radon Yeterlilik Programını yürütmektedir. İngiltere'de NRPB ve ABD'de EPA test hizmetlerinin onaylanmış örgütlerden satın alınabileceğini tavsiye etmektedir (Appleton, 2005).

### **Toprak gazındaki radonun ölçümü**

Pompalı gözlemcilerden yararlanarak toprak gazında radon ölçümü, alttaki kayalar, örtü kayasını ve toprağın radon potansiyelini belirlemede en etkili yöntem olarak önerilmiştir (Appleton, 2005). Toprak gazı radonunun belirlendiği aletler genelde ya bir saptayıcıya toprak gaz örneği aktarılması için pompa gözlemcinin kullanımını ya da sadece zemine saptayıcının yerleştirilmesine dayalıdır. İlk yöntemde genellikle ince sert boşluklu bir tüp uygun derinliğe kadar zemine gömülür, bu sayede toprak kesiti çok daha

az bozulur (Appleton, 2005). Radon genellikle çinko sülfid sintilasyon yöntemi ya da iyonlaşma odası yoluyla saptanır.

Alfa taneleri, plastik ya da metal bir fincan ya da cam bir kap (Lucas hücresi) içine döşeli olan çinko sülfitle etkileştiğinde ışık huzmeleri çıkarır. Bu huzmeler foto çoğaltıcı ya da uygun sayaçlar kullanılarak sayılabilir. Radon izotopları yalnızca alfa yayıcı gazlar olduğundan derişimleri görece basit aletlerden yararlanılarak belirlenebilir. Bu izotopların ve yakın ürünlerinin farklı yarı ömürleri yüzünden radon ve toronun etkileri hesaplanır. Aletler arazide kullanılacak kadar sağlamdır ve kirlendiğinde hücre hızla değiştirilecek şekilde tasarlanmıştır (Appleton, 2005). Üretilmiş olan çok sayıda alet arazi kullanımına elverişli olup, bunlarla topraktaki radon derişiminin miktarı genelde birkaç dakikada ölçülebilmektedir.

Radon ayrıca zeminde alfa iz saptayıcıları yerleştirilerek de ölçülebilir. Delikler genelde bir matkapla ya da deliciyle en az 0,5 m ve tercihen 1,0 m derine kadar kazılabilir. Delikler normalde saptayıcının yerleştirildiği ve borunun üstünün kapatıldığı yerde plastik borularla örtülür. Saptayıcılar gömülmeden önce ters çevrilen plastik bir fincanın altına bantlanır. 3-4 hafta sonra saptayıcı tekrar çıkarılır. Bu süreç, radon derişiminde kısa vadeli değişim sorunlarını aşacak uzun vadeli gözlem gerektiğinde kullanılır (Appleton, 2005). Alfa izi saptayıcıları radon akışlarında geçici değişimle ilişkili sorunların çoğunu aşsa bile her alana iki kez gitmeyi gerektirdiğinden zaman alıcıdır. Daha da önemlisi laboratuvar süreci evresi gerektirir. Uygulamada genellikle sonraki evrelerde önemli bir rolü bulunsa da ilk çalışmalarda pek tercih edilmemektedir (Appleton, 2005). Torona duyarlı olup, ancak saptayıcıdan 5 cm kadar uzakta polietilen bir film contası varsa radon üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi varken kısa yarı ömürlü toronun miktarını azaltır. Polietilen film, radona izin verirken su buharının yayılmasına izin vermemektedir. Film yüzeyindeki su damlacıkları kayıtlı alfa sayılarını etkilediğinden su buharı emicilerinin örnekleme cihazına takılması gerekebilir (Appleton, 2005).

### **Suda radon ölçümü**

Radonun, ince gaz kabarcıklarının sudan geçişi etkin bir çıkarım aracı sağlayacak kadar yüksek bir ayırılma katsayısı (gaz, su) vardır. Gaz, boşaltılmış bir Lucas hücresine çekilebilir. Aynı bir seçenek olarak kapatılmış bir yeniden dolaşım sistemi kurulabilir. Standart radon çözümleriyle birlikte sürecin dikkatle ayarlanması, sayma ve gaz çıkarma işlemlerine çok dikkat edilmesi gerekir (Appleton, 2005). Diğer yöntemler ise pahalı araçlar ve laboratuvar sürecini gerektirir. Örnek olarak, radondan bozuşarak gelen <sup>214</sup>Bi foto zirve yayılımı, sodyum iyodür sintilasyon kristali ya da yüksek çözünürlüklü, lityum-birikmeli germanyumdan yapılmış yarı kondüktör saptayıcı kullanılarak ölçülebilir (Appleton, 2005).

### **Katı malzemelerde radon ölçümü**

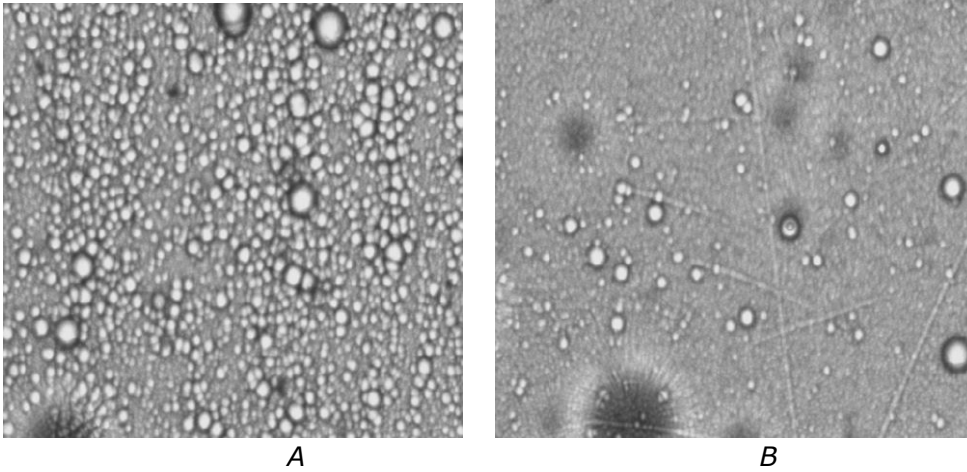
Radonun katı bozuşma ürünlerinden biri <sup>214</sup>Bi'dir. Bu madde 1,76 MeV'ta yüksek enerjili gama radyasyonu yayar. Arazide ve laboratuvarında uranyumun gama spektrometrik tayinleri çoğunlukla, bozunma zincirinin dengede olduğu varsayımından hareketle bu foto zirveyi kullanılır ve bu yüzden bu ölçüm etkin bir toplam radon belirteçidir. Toryum, nadir toprak elementlerince zengin uranyum oksitler ve silikatlar, monazit ve zirkonun geç ayrışmaları durumunda radyum ve uranyum miktarı bakımından dengede olabilecektir (Appleton, 2005). Böylesi minerallerde radon ölçüm miktarları genelde düşüktür. Katı örneklerden bırakılan radonun ölçümü alternatif yöntem gerektirir. Topraklar, ırmak çökelleri ve pekişmemiş akifer kumları saf sulu kapalı bir cam kapta çalkalanır. Yirmi-otuz gün kadar bekledikten sonra sıvı bir sintilasyon sayacı radonun ölçülmesi yapılır. Katı kayaç örneklerinden radonun bırakılması da benzer bir yöntemle belirlenir (Appleton, 2005).

## **Türkiye’de konutlarda radon ölçümleri**

Türkiye’de evlerde radon ölçümleri 1984 yılında başlamıştır. Bu çalışmalar kapsamında önce pasif radon ölçüm tekniği için bir laboratuvar kurulmuş ve kalibrasyon sistemi geliştirilmiştir. Radon ölçümlerinde pasif nükleer iz detektörlerinden olan CR-39 detektörleri kullanılmıştır. Bu dedektörlerin kalibrasyonu 225 l’lik bir varilin tabanına bir  $^{226}\text{Ra}$  kaynağı yerleştirilerek oluşturulan bir radon odasında gerçekleştirilmiştir (Çelebi, 2008). Varilin ağzı sızdırmazlık sağlanacak şekilde bir kapakla kapatılmış, radyum ve radonun dengeye gelmesinden sonra varil içindeki havadan, aktif radon ölçme yöntemi olan Lucas odasına hava emdirme yöntemiyle hava örneği alınarak radon konsantrasyonu ölçülmüştür. Radon odasının radon konsantrasyonu  $3,2\pm 0,1$  kBqm<sup>-3</sup> olarak bulunmuştur. Bu ölçümler zaman zaman tekrarlanmıştır (Çelebi, 2008).

### **Kimyasal iz kazıma yöntemi**

Radona maruz kalan CR-39 plastik detektörleri üzerinde oluşan alfa izlerinin görünür hale getirilmesi için kimyasal iz kazıma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem detektörlerin sıcak NaOH çözeltisi içinde belirli bir süre tutulması esasına dayanır. Yapılan bir seri deney sonucu NaOH çözeltisinin en uygun konsantrasyonu %30, iz kazıma ortam sıcaklığı 70°C, süresi ise 17 saat olarak bulunmuştur. Detektörler üzerinde oluşan izler 500 büyütmeli bir mikroskopta sayılmış ve radon radyoaktivite konsantrasyonları hesaplanmıştır (Çelebi, 2008).



A, B-Radon konsantrasyonuna bağlı olarak CR-39 plastiği üzerinde oluşan alfa izleri (Çelebi, 2008)

### **Kapalı ortamlarda radon gazı kontrolü**

Kapalı ortamlarda radon gazı kontrolü amacıyla gerek ülkeler gerekse uluslararası kuruluşlar tarafından limit değerler belirlenmiştir. Söz konusu limit değerlerin aşılması halinde, radon konsantrasyonunu azaltıcı tedbirlerin alınması tavsiye edilir. Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları (IAEA-BSS) çerçevesinde, radon için tavsiye edilen düzeyler 300 Bq/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Türkiye’de izin verilebilir radon konsantrasyonu ise **400 Bq/m<sup>3</sup>tür** (24.03.2000 tarihli ve 23999 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinin, 29 Eylül 2004 tarih ve 25598 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile değişik 37. maddesi) (<http://taek.gov.tr>).

Çekmece Nükleer Araştırma Merkezi (ÇNAEM) 2008 yılına kadar 54 ilde 4337 evde radon konsantrasyon ölçümleri yapmıştır. Türkiye ev içi radon konsantrasyonu aritmetik ortalaması  $74\pm 38$  Bq/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır (Çelebi, 2008). İlk çalışmalara, ÇNAEM personelinin evlerinde radon ölçümleri yapılarak başlamıştır. Radon dedektörleri oturma ve yatak odalarına konmak üzere birer çift dağıtılmış ve mevsimlik değişimleri de

saptamak amacıyla kış ve yaz aylarını kapsamak üzere iki dönem boyunca ölçümler yapılmıştır (Çelebi, 2008).

Genelde iller üçer aylık dönemlerle yıllık olarak taranmaya çalışılmış, bazı şehirlerde 6 aylık dönemlerle yaz ve kış aylarını kapsayan ölçümler yapılmıştır. Tüm ölçümlerin aritmetik ortalaması yıllık ortalama radon konsantrasyonu olarak alınmıştır (Çelebi, 2008). Evlere, yatak odası ve oturma odası olarak birer çift detektör dağıtılmış ve detektörlerle birlikte evin cinsi (betonarme, ahşap, taş), katı, adresi, yapım tarihi gibi bilgileri içeren bir sorgulama kağıdı da birlikte verilmiştir. İki detektör ortalaması bir evi temsil edecek şekilde değerlendirme yapılmıştır. 2003 yılında radon detektörleri ve okuma sistemi değiştirilmiş otomatik sayım sistemine geçilmiştir (Çelebi, 2008).

Sonuç olarak, 2007 yılı sonuna kadar 54 ilde 4,337 evde radon konsantrasyon ölçümleri yapılmış ve illerin aritmetik ortalaması  $74 \pm 38$  Bq/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Bu çalışma devam etmekte olup, Türkiye'nin radon haritası tamamlanmaya çalışılmaktadır. Türkiye istatistiksel radon konsantrasyon dağılımına göre ev içi radon konsantrasyonu 40-49 Bq/m<sup>3</sup> arasında bir maksimum gösterir. Evlerin % 99'unda radon konsantrasyonu 200 Bq/m<sup>3</sup>'ün altındadır. Türkiye'deki evlerde radon konsantrasyonunda bölgesel artmalar görülmesine rağmen, il ortalamalarında Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından önerilen yıllık müsaade edilen radon konsantrasyonu limiti, 400 Bq/m<sup>3</sup> değerinin aşılmadığı görülür (Çelebi, 2008). Şekil 33'de Türkiye'de 1984 -2007 yılları arası kapalı ortam ortalama radon konsantrasyonları verilmiştir (<http://taek.gov.tr>).

**Radon gazıyla ilgili bu yazı;**  
**'EŞREF ATABEY. 2013. TÜRKİYE'DE DOĞAL RADYASYON KAYNAKLARI VE TIBBİ JEOLJİK ETKİLERİ.**  
**MTA YERBİLİMLERİ VE KÜLTÜR SERİSİ-10"**  
**kitabının 53-64 sayfaları ile 70-74 sayfaları arası bilgi amaçlı alınmıştır.**  
**Kaynak gösterilmeden kullanılamaz.**