

Radyasyon, radon (rn) ve toplum sağlığı

Çevresel etkenlerin sağlık üzerindeki etkilerine yönelik yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular ve bu bulguları destekleyen hastalık tanıları, radon gazı da dahil olmak üzere, yaşadığımız çevrenin jeolojik unsurlarının çok iyi belirlenmesi ve buna göre stratejiler geliştirmenin, **toplumların sağlıklılığı** üzerindeki önemini ortaya koymuştur

1. Radyasyon

Radyasyon (ışınım), günlük hayatımızın her anında maruz kaldığımız elektromanyetik dalga, parçacık veya foton olarak yayılan bir enerjidir. Radyasyon, Tablo 1'de görüleceği gibi iyonlaştırıcı radyasyon ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon diye ikiye ayrılır. Atom ile etkileşime girebilecek kadar güçlü enerji seviyesine sahip yüklü parçacıklar (alfa ve beta), elektromanyetik radyasyon (gama ışınları, X-ışınları), radon gazı ve nötronlar iyonlaştırıcı radyasyon kapsamına girmektedir. Başta alfa ve beta ışınları olmak üzere atom ile etkileşime girebilecek kadar güçlü enerji seviyesine sahip bu yüklü parçacıklar, taşıdıkları enerji düzeyine bağlı olarak hücrelere nüfuz ederek, atomlar arasında düzenli enerji birikimini sağlayarak biyolojik harabiyete neden olan değişikliklere yol açabilmektedir. Bu parçacıklar arasında serbest radikaller ve hidrojen peroksit gibi toksik materyaller sayılabilir. Gama ve X- ışınlarının, alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazla olmasına karşın, iyonlaşmaya sebep olma etkileri çok daha azdır. Kobalt-60'ın yaymış olduğu gama ışınları ve lineer hızlandırıcıdan elde edilen yüksek enerjili X-ışınları kanser tedavisinde kullanılmaktadır.

Düşük enerji seviyesine sahip olan ve organizma üzerinde büyük hasara neden olmayan elektromanyetik dalgalar iyonlaştırıcı olmayan radyasyon olarak adlandırılır.

Tablo 1. Radyasyon Türleri

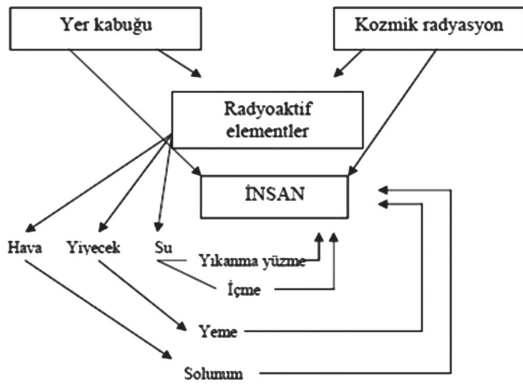
| İyonlaştırıcı Radyasyon | İyonlaştırıcı Olmayan radyasyon |
|-------------------------|---------------------------------|
| Alfa radyasyonu | Elektromanyetik dalgalar |
| Beta radyasyonu | Ultraviyole ışınlar |
| Gama radyasyonu | Lazer dahil görünür ışınlar |
| X-ışınları | İnfrared radyasyon |
| Nötronlar | Mikro dalga |
| | Elektrik ve manyetik alanlar |

Yaşamımızın her anında ve her yerde var olan ve doğal radyasyon olarak adlandırılan iyonlayıcı radyasyon Şekil 1 ve Şekil 2' de görüldüğü gibi, solduğumuz havadan, içtiğimiz sudan, yediğimiz sebze, meyve, et ve süt ürünlerinden ve temas ettiğimiz yerkabuğundan (kaya ve toprak) farklı geçiş yolları kullanarak insanlara ulaşır.

İnsanlar yaşadıkları bölgenin jeolojik ve coğrafi özelliklerine, yaşadıkları mekânın fiziki koşullarına ve yaşam standardına bağlı olarak yıllık ortalama 2,7 mSv radyasyon dozuna (etkin doz) maruz kalmaktadır. Gündelik hayatımızda maruz kaldığımız radyasyonun kaynakları ve yıllık etkin doza katılma oranları Şekil 3'de gösterilmiştir.

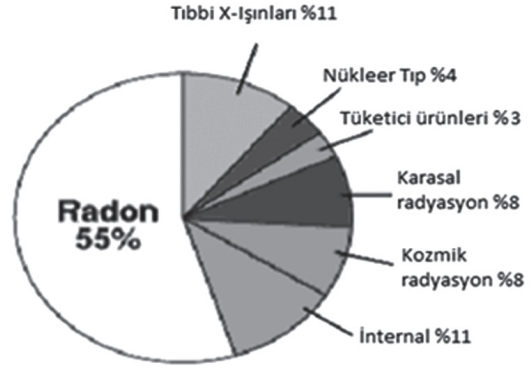


Şekil 1. Günlük hayatta ve radyasyon



Şekil 2. Doğal Radyasyonun canlılara geçiş yolları (Güler ve Çobanoğlu, 1997)

Şekil 3'den de görüldüğü gibi bu dozun büyük bir kısmı radon, karasal radyasyon, kozmik radyasyon, tüketici ürünleri ve iç ışımadan (toplam %85), daha az oranda da X-ışınları ve nükleer tıp uygulamalarından (toplam %15) kaynaklanmaktadır. Bu süreçte solunum yolları, korunması en güç sistemlerin başında gelmektedir.



Şekil 3. Günlük hayatımızda maruz kaldığımız radyasyonun kaynakları ve yıllık etkin doza katılma oranları (Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi, (ICRP;2009;URL:1)

2. Radon Gazı (^{222}Rn)

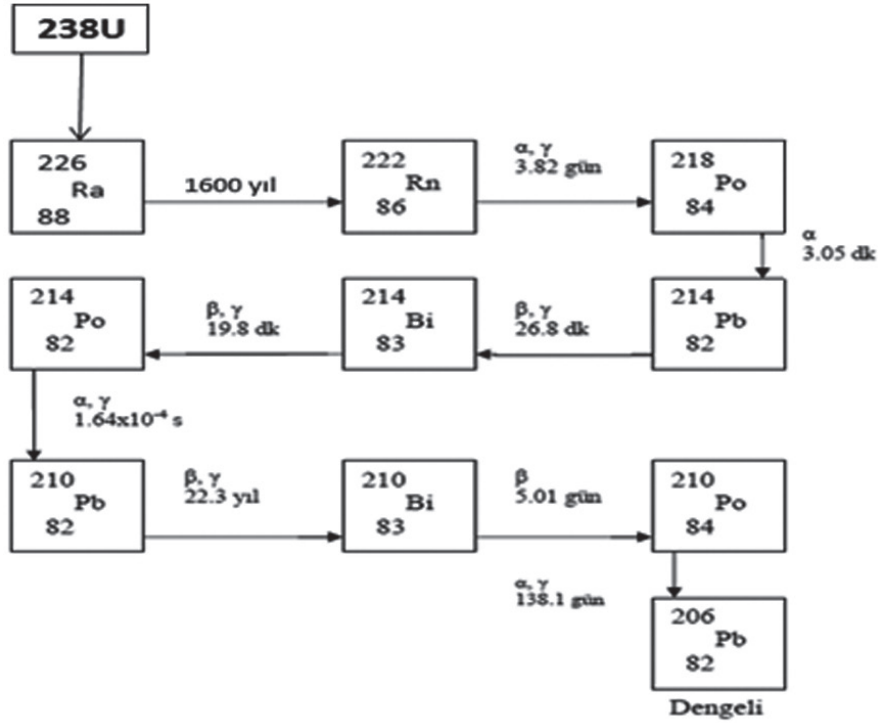
Doğal kaynaklardan alınan dozun en önemli bileşeni havada radyoaktif bir soy gaz olarak bulunan radondur (^{222}Rn). Dünya genelinde ülkelere göre değişiklik göstermekle birlikte evler, işyerleri, okullar, tüneller, metro istasyonları ve yeraltı maden ocakları gibi kapalı alanlar başta olmak üzere hemen her yerde değişik miktarda radon gazı bulunur. Radon ve bozunum ürünleri nedeniyle maruz kalınan yıllık ortalama etkin dozun 1,3 mSv (toplam etkin dozun %55'i) olduğu tahmin edilmektedir (TAEK, 2012).

Radon; 1900 yılında keşfedilmiş havadaki varlığı ise 1901 yılında tanımlanmış, doğada bütünüyle radyoaktif olarak bulunan, havadan 7.5 kez daha ağır, gözle görülemeyen, renksiz, kokusuz, tatsız bir soy gazdır. Radon, başta kayaç, toprak ve su olmak üzere doğada değişik miktarlarda bulunan uranyum (U) elementinin radyoaktif bozunmasıyla açığa çıkan radyum (^{226}Ra) izotopunun radyoaktif bozunum ürünüdür ve uranyum elementinin doğada var olan üç temel radyoaktif bozunma serisinin tek gaz ürünüdür.

Radon'un 27 izotopu vardır; bunlardan en önemlileri radon (^{222}Rn), toron (^{220}Rn) ve aktinon (^{218}Rn) olarak bilinen radyoaktif gazlardır. Hem yarı ömürlerinin çok kısa hem de miktarlarının çok küçük olması nedeniyle (örneğin doğada radon miktarı toron'dan 20 kat fazladır) ölçümlerde özellikle ^{222}Rn dikkate alınır (UNSCEAR report, 1988). Yarılanma ömrü 1600 yıl olan ^{226}Ra 'un radyoaktif bozunumunun sonucunda ortaya çıkan kararsız ^{222}Rn gazı kararlı hale geçene

kadar alfa parçacıkları (helyum çekirdeği) ve beta parçacıkları yaymak suretiyle radyoaktif bozunmaya maruz kalır ve kısa yarı ömürlü- gaz olmayan- katı

radyoaktif bozunum ürünleri ortaya çıkar (Şekil 4). Bozunum kararlı ^{206}Pb ile son bulur.



Şekil 4. Radon gazının (Rn-222) bozunum ürünleri ve bozunum süreleri (URL:2)

Özellikle ^{218}Po atomları, iyonize halde hava içindeki herhangi bir parçacığa tutunma eğiliminde olduğundan, ^{218}Po 'nun bozunma ürünleri olan ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po atomlarının pek çoğu da bir parçacığa tutunmuş halde meydana çıkarlar ve sağlık açısından asıl tehlikeli olan da radon gazının bu bozunum ürünleridir (Çelebi, 1995).

3.Radon Gazının Kaynakları

Radon gazı ve bozunum ürünlerinin oluşması ve miktarı esas olarak yaşam ortamının jeolojik özellikleriyle ilişkilidir. Bu bağlamda Şekil 5'de gösterildiği gibi radon gazının en önemli kaynakları kayalar, toprak, su kaynakları ve yapı malzemeleridir (kum, çakıl, beton, tuğla, vb).

Dolayısıyla, şehirlerin kurulduğu bölgedeki kayalar ve toprağın mineralojik ve jeokimyasal bileşimi; kayaların, toprağın ve kullanılan yapı malzemelerinin

radyonüklid içeriği; kayaların tektonik örselenmişliği, özellikle fayların varlığı; yeraltı suyunun varlığı ve seviyesi ile kayaların, toprağın ve kullanılan malzemenin nem miktarı doğal radyasyon açısından uzun süreçte insan sağlığı üzerinde rol oynayan temel unsurlardır. Buna göre binalardaki radon gazının dört temel kaynaktan ortaya çıktığı söylenebilir. Bu kaynaklar önem sırasına göre aşağıda tanıtılmıştır.



Şekil 5. Radon gazının başlıca kaynakları (URL-2)

3.1. Kayalar ve Toprak

Radon gazının en önemli temel kaynağı kayalar ve kayalardan türeyen topraktır. Kayalar, uranyum (U) ve toryum (Th) içeriği açısından değerlendirildiğinde, asitik kayaç olarak adlandırılan SiO_2 içeriği %60'dan büyük olan granitik ve volkanik kayaçlar öne çıkmaktadır; granitik kayaçların ortalama U içeriği 5 ppm, Th içeriği ise 15 ppm'dir (Tzortzis and Tsertos, 2004). Dolayısıyla bu asitik granitik ve volkanik kayaçların metamorf eşlenikleri, bunlardan türemiş sedimanter kayaçlar ve tüm bu kayalardan oluşmuş toprakların U ve Th içerikleri, bunların dışındaki kayaç ve toprakların U ve Th içeriklerinden daha yüksek olacaktır. Bu nedenle granitik kayaçların (granit, siyenit, granodiyorit, kuvarsdiorit, vd (ya da vb) bunların damar kayaçlarının (pegmatit ve aplit gibi) ve volkanik kayaçların (riyolit, andezit, trakit, gibi) bulunduğu bölgelerde radon gazı riski çok daha yüksek olacaktır (Örgün ve diğ.,2008). Bu tip kayalarla kaplı bölgelerde kayaçlar tektonik açıdan örselenmişse, fay zonu veya zonları içeriyorsa, kayaçlar altere olmuşsa (özellikle kimyasal alterasyon) ve bölgede yeraltı su seviyesi de yüksekse, radon gazı riski daha da yükselmektedir (Örgün ve diğ., 2005, 2007). Radyasyon ve radon açısından bir diğer önemli kayaç ve toprak türü de fosfatlı kayaçlardır. Uranyum atomu, fosfat cevherlerinde kalsiyum (Ca) atomunun yerini alarak, uranyum cevherleşmesi oluşturacak kadar zenginleşebildiğinden bu alanlar da radyoaktivite, dolayısıyla da radon açısından dikkat edilmesi gereken alanlardır (Misra, 2000). Bu açıdan bir diğer önemli alan ya da alanlar da asitik kayaçlarla ilişkili olarak bu kayalarda gelişmiş hidrotermal alterasyon zonları (Örgün ve diğ.,2005), maden sahaları ve bu kayaçlarla kontak halindeki karbonatlı kayaçlar ve kumtaşları ile kaplı alanlardır (Şekil 6a ve 6b).

Kayaç ve toprakta ^{226}Ra 'un bozunmasıyla oluşan radon, önce kapalı gözeneklerin içine girer ve buralara tutunur/birikir, sonra toprağın hava dolu gözeneklerine kaçar ve bu gözenekler arasından atmosfere geçmek için hareket eder. Dolayısıyla Radon gazının atmosfere geçebilmesi, toprak ya da kaya zeminin gözenekleri arasında yayılması ile mümkündür. Örneğin, killi birim (ya da birimlerde) radon geçirgenliği düşük iken, radon geçiş oranı silt, çakıl dolgu ve dolgu zeminlere doğru giderek artar (Şekil 7a). Yapılan hesaplamalar göstermiştir ki topraktan gelen radyoaktivitenin yalnızca küçük bir yüzdesi çatlağı olmayan betona sızar, şayet beton tabakada çatlak varsa gelen aktivitenin % 25'i yayılma yolu ile beton tabakaya, oradan da bina içine aktarılmaktadır (UNSCEAR Report, 1982) (Şekil 7b). Sonuç olarak doğal zeminden radon salınımı oranı aşağıdaki etkenlere bağlı olarak değişir.

- Zemini oluşturan kayaç ya da topraktaki radyum (^{226}Ra) miktarı
- Radyum'un bozunma oranı ve radon gazının yayılma gücü
- Toprağın geçirgenliği (porozite, permeabilite, yoğunluk, vb)
- Toprağın durumu (kuruluk, nem içeriği, suya doygun olma, donma, karla örtülü olma durumu, vb)
- Meteorolojik koşullar (toprak ve hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgâr hızı, rüzgarın yönü, vb)
- Bölgenin yüksekliği (rakım)



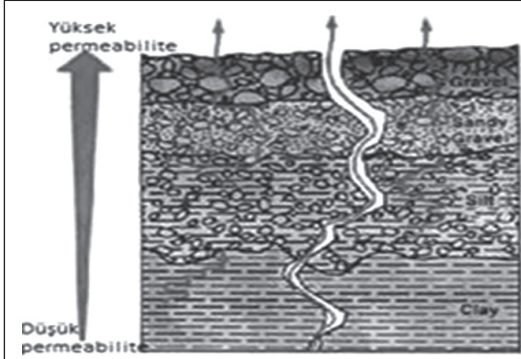
Şekil 6a. Fay zonu boyunca hidrotermal akışkanlar ve buhar emisyonları vasıtasıyla oluşmuş bir hidrotermal alterasyon zonu (kaynak www.indiana.edu)



Şekil 6b. Hidrotermal alterasyon ve ilişkili cevher zonu (kaynak: www.photovolcanica.com)

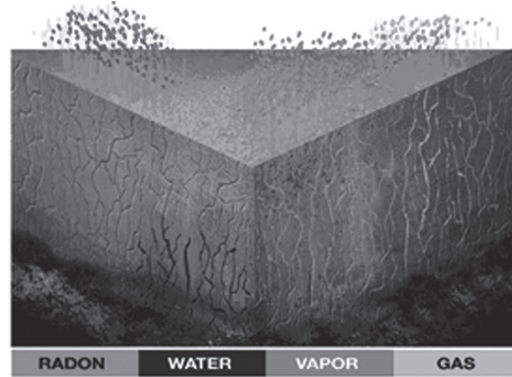
3.2. Su Kaynakları

Başta yeraltı suları olmak üzere bütün sular belirli miktarlarda uranyum içerdiğinden, sulara radon gazı bulunur. Buna ek olarak, suyun temas halinde olduğu toprak ve kayalarda bulunan radon; gözenek ve



Şekil 7a. Kil zemindeki çatlaklar boyunca hareket eden radon gazının silt, kum ve çakıl zemine doğru tane boşlukları içinde göçü ve havaya karışması (kaynak: www.nwbshoshone.com)

mento, tuğla, briket, yer ve duvar karosu gibi yapı malzemeleri, elde edildikleri doğal kaynağın kimyasal ve mineralojik bileşimine bağlı olarak değişen oranlarda uranyum toryum, potasyum ve bunların radonüklidlerini içerebilmektedir. Örneğin yaygın olarak



Şekil 7b. Zeminden betona betondan da ortama radon gazı salınımı (Kaynak:www.radonseal.com)

çatlaklardan sızarak suya karıştığı için suyun radon içeriğini artırabilir. Bu anlamda yeraltı suları daha uzun süre kaya ve toprakla temas ettiği için radon konsantrasyonu yüzey sularından daha yüksektir. Bu durum içme ve temizlik amaçlı kuyu ve kaynak suyu kullanan bölgelerde mutlaka göz önünde tutulmalı ve suların radon içeriği mutlaka ölçülmelidir. Yapılan çalışmalar bina zemininde ve ev içinde kullanılan suyun radon miktarı arttıkça, bina içindeki radon düzeyinin de arttığını göstermiştir. Kapalı mekanlarda ölçülen radon gazının yaklaşık % 0,2'sinin yüzey sularından, % 20'sinin ise yeraltı sularından kaynaklandığı ortaya konulmuştur ya da kaynaklandığı belirlenmiştir (UNSCEAR Report, 2006). Suda bulunan radon, su kullanıldığı zaman ev içine girer ve suyun sıcaklığı arttıkça, ortama verilen radon miktarı da artar; özellikle suyun püskürtülmesi veya çalkalanması büyük miktarda radonun salınmasına neden olur. Avrupa'da kişi başına ortalama 0,2-0,4 m³/gün su kullanıldığı varsayılarak, ev içindeki havaya musluk suyundan radon gazı salınımının % 0.5-0.6 olduğu rapor edilmiştir.

3.3. Yapı malzemeleri

Yapı malzemelerinin esası bilindiği gibi kum, kil, marn, kalker gibi doğal kaynaklardır. Bu nedenle çimento, tuğla, briket, yer ve duvar karosu gibi yapı

kullanılan yapı taşlarından biri olan granitik kayaların ortalama U, Th ve K içerikleri sırasıyla yaklaşık 5 ppm, 15 ppm ve % 4'dür. Kumtaşları için ise bu oranlar 0,45 ppm U, 1,7 ppm Th ve % 1 K'dür; çimento üretiminde kullanılan ana hammadde kaynaklarından bir olan kireçtaşlarının ortalama U içeriği 2,2 ppm, Th 1,7 ppm ve K % 0,25'dir (Mason and Moore, 1982). Bu nedenle yapı malzemeleri kapalı alanlarda radon düzeyini artırıcı etkenlerden biri olmaktadır. Yapılan çalışmalar "Dış solunum" adı verilen mekanizma ile bina duvarlarından ve yapı aksamından sürekli olarak difüzyon yolu ile iç ortama radon gazı salınımı olduğunu ve bina içi ortamda radon miktarını arttırdığını göstermektedir. Ayrıca taş, tuğla veya betondan yapılan evlerde, bölgenin yüzey jeolojisine bağlı olarak dış ortam gama ışınlarının duvarlar tarafından etkili bir şekilde soğurularak ev içine aktarıldığı; bu şekilde de ev içi radon konsantrasyonunun daha da arttığı ortaya konulmuştur.

3.4. Doğal Gaz ve Kömür

Doğal gaz ve kömür en yaygın ve en önemli ısınma kaynaklarıdır. Ülkemizde doğal gaz, özellikle büyük şehirlerde daha yaygın kullanılırken, kömür kasabalar, köyler ve alt yapısı tamamlanmamış şehirlerde

kullanılmaktadır. Doğal gaz ölçülemeyecek kadar düşük seviyeden 50 Bq/m³'e kadar değişen miktarlarda radon içerebilmektedir. Doğal gazın üretimi ve depolanması sürecinde radyoaktif bozunmayla radon konsantrasyonu azalmakla birlikte; evlerde ısıtma ve yemek pişirmede kullanıldığı esnada doğal gazdan radon gazı salınımı olmakta ve ev içi radon miktarını da arttırabilmektedir. Eğer evler yeterince ve uygun şekilde havalandırılırsa yanma ürünleri dışarı atılır ve bu takdirde doğal gaz radon kaynağı olarak ihmal edilebilir.

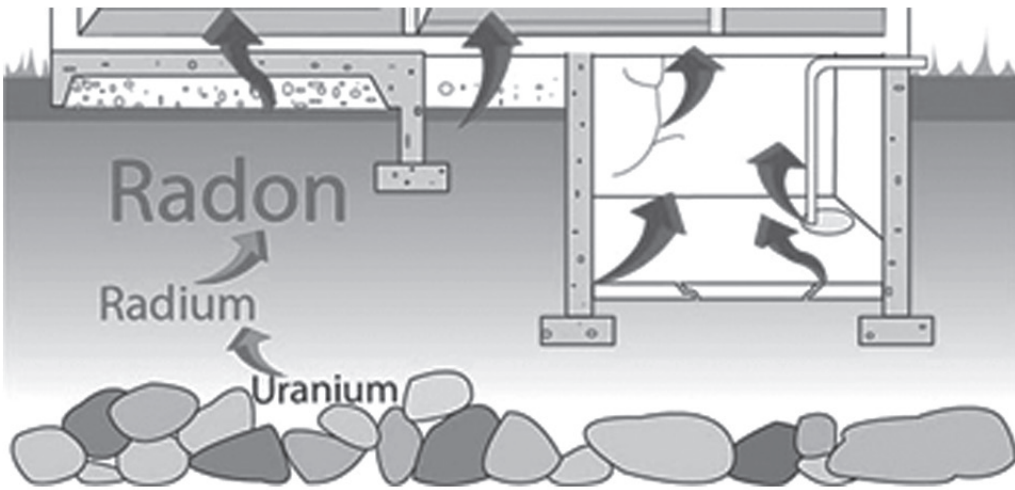
Dünyada olduğu gibi ülkemizde de başta köy ve kasabalar olmak üzere birçok yerleşim biriminde kömür tek yakacak kaynağı olmaya devam ediyor. Sedimenter bir kayaç olarak da tanımlayabileceğimiz kömür, oluşum ortamının litolojik özelliklerine bağlı olarak yüksek oranlarda Uranyum içerebilmektedir. Dünya kömürleri için ortalama U değeri 0,5 mg/kg - 10,0 mg/kg arasında değişmektedir (Swaine and Goodarzi, 1995). Türkiye kömürlerinin U içeriği 0,32 mg/kg-140 mg/kg (ortalama 6,9 mg/kg) arasında değişmektedir (Palmer et al., 2004). Ülkemizin önemli kömür üretim bölgelerinden biri olan Edirne-Keşan bölgesi kömürlerinde U içeriği 5,2 mg/kg -16 mg/kg arasında değişirken (Erarslan ve diğ.,2014), geçmişte İstanbul'un kömür ihtiyacını karşılayan Avcıkoru-Şile bölgesi kömürlerinin U içeriği ise 3,1 mg/kg -20,8 mg/kg arasında değişmektedir (Sungur, 2012). Gö-

rüldüğü gibi kömürün U içeriği, radyoaktif elementlerin en fazla zenginleştiği granitik kayaçların ortalama U içeriğinden yüksektir. Bu değerler, hem yanma hem de depolanma süresince kömürün önemli bir radon kaynağı olduğunu göstermektedir. Ülkemizde gerekli yerli gerekse de yurtdışından ithal edilen kömürlerde yeterli veya hassas radyoaktif inceleme yapılmamaktadır. Oysa ısınma amaçlı satılan kömürlerin mutlaka U, Th, K, ²²⁶Ra ve ²²²Rn içerikleri kontrol edilmeli ve radyoaktif niteliği olan kömürlerin kullanımı yasaklanmalıdır. Bu nedenle kömür ile ısınan evlerde ve binaların bodrum katlarında havalandırmaya özel bir önem verilmeli, bodrum katları düzenli olarak havalandırılmalı ve bu konuda halk bilinçlendirilmelidir.

4. Kapalı Alanlarda Radon Konusunda Yapılan Çalışmalar

4.1. Evlerde radon

Günümüz insanı zamanının önemli bir kısmını kapalı alanlarda geçirdiği için kapalı alanlarda radon ayrı bir önem kazanmaktadır. Evlerdeki radon gazının kaynakları yukarıda genel hatlarıyla tanıtılmıştır. Bu kaynaklardan en önemlisi binaların temelindeki kaya, toprak ve yeraltı sularıdır. Bu kaynaklarda bulunan radyum (²²⁶Ra) izotopunun bozunum ürünü olan radon gazı, zemin ve duvarlardaki çatlaklardan ev içine sızmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Zeminden ve duvarlardan Radon gazının ev içine sızma yolları

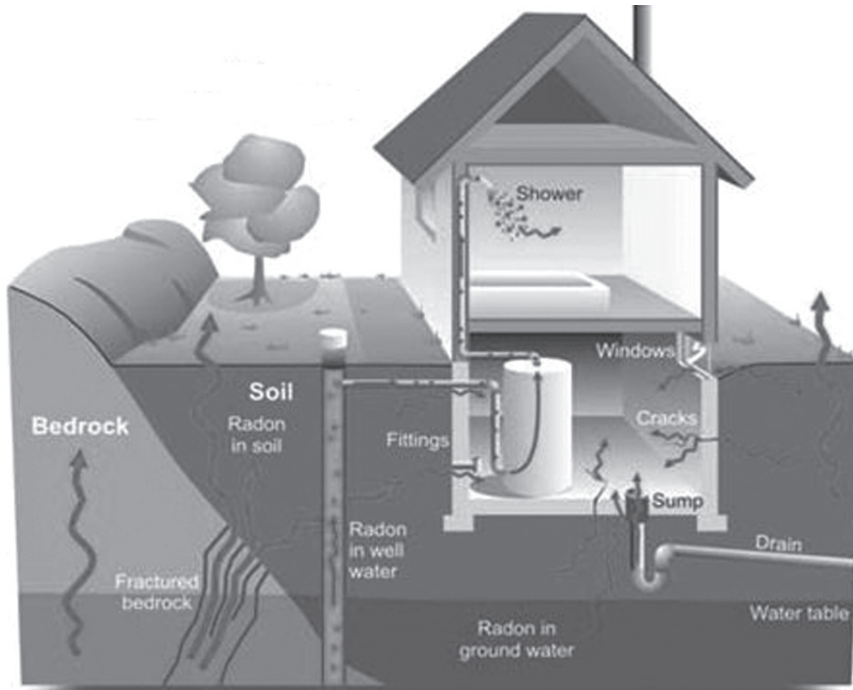
Kayaçların ve toprakların türüne, mineralojik ve kimyasal bileşimine, fiziksel özelliklerine, tektonik olarak örselenme derecesine ve fay zonlarına olan uzaklığa bağlı olarak radon miktarının farklılık gösterdiği bilinmektedir. Bu faktörlere bağlı olarak aynı yerleşim bölgesinde bir evden diğerine ev içi radon miktarında ciddi değişiklikler söz konusudur. Örneğin Ezine ilçesi (Çanakkale) ve köylerinde yapılan çalışmada, granitik ve volkanik kayaçlarla kaplı bölge üzerine yerleşmiş olan 21 yerleşim biriminde ev içi radon konsantrasyonu, 33-208,5 Bq/m³ (ortalama 75,75 Bq/m³) arasında değişirken, ofiyolitik kayaçlar üzerine yerleşim olan 3 köyde 15-42 Bq/m³, sedimanter kayaçlar üzerindeki 2 beldede ise 35,7-44,6 Bq/m³ arasında değiştiği ortaya konmuştur (Örgün ve Diğ., 2008).

Ev içi radon miktarını belirleyen bir diğer faktör de iklim koşullarıdır. Sıcak bölgelerde pencereler daha fazla açık tutulduğundan iç ve dış radon miktarı arasında fazla bir fark olmazken, ılıman bölgelerde ev içi radon konsantrasyonunun dış ortama oranla 8 kat fazla, soğuk bölgelerde ise çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir (UNSCEAR Report, 1982).

Binaların temelindeki toprak veya kayalarda oluşan radon gazı, zemin katmanı boyunca yükselerek binanın altında birikir; özellikle soğuk ve ılıman iklim

bölgelerinde bina içindeki havanın dış ortama göre daha sıcak olmasının yarattığı basınç farkıyla radon gazı çatlak ve boşluklardan sızarak bina içlerine girer (Renken & Rosenberg, 1995). Şayet bina taştan (granitik ve/veya volkanik) yapılmış ise ya da tahta zemin altına çakıl ve kırmataş döşenmiş ise malzemenin uranyum içeriğine bağlı olarak duvarlardan ve zeminden daha fazla radon yayılması olacaktır (Rogozen, 2003). Günümüzde ısınma maliyetlerinin artmasıyla binalar daha fazla yalıtılmakta, yalıtım işlemi de söz konusu basınç farkının daha da artmasına neden olmaktadır.

Radon gazının binalara giriş yolları Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilde görüldü gibi zeminden, zemindeki çatlaklardan, su kuyularından, yeraltı suyundan, tesisat bağlantılarından, lağımdan (sump), bodrum kat duvarlarındaki çatlaklardan, yapı bağlantı yerlerinden, duvar çatlaklarından, tesisat boşluklarından, duvar ve asma kat arası boşluklardan, pencerelerden ve musluk ve duşlardan akan sudan evin içine nüfuz etmektedir. Diğer yandan binaların zemin katlarında kömür depolanması yapılıyor ise kömürün uranyum içeriğine bağlı olarak bina içi radon konsantrasyonu daha da artacaktır. Bu konuda halk mutlaka bilgilendirilmelidir.



Şekil 9. Radonun binalara giriş yolları ve kaynakları (kaynak: URL-4).

Radon genellikle yerden 50 cm yukarıda biriktiği için ev içine sızan radon evin içinde kalma eğilimindedir. Bu nedenle binaların üst katlarındaki radon miktarı zemin katlardan daha azdır. Norveç'te yapılan bir araştırmada, ağaçtan kaynaklı radon gazı salınımı olmamasına rağmen, ağaçtan yapılan evlerin genel olarak daha alçak ve toprağa daha yakın olması nedeniyle diğer evlerden daha çok radon gazı içerdiği saptanmıştır. Şüphesiz yaşadığımız bölgenin coğrafi konum, yaşam standardı, evin ısıtılma şekli ve günlük alışkanlıklar ev içi radon miktarının değişimine neden olmakla birlikte iç mekânlarda radon konsantrasyonunu arttıran temel unsurlar aşağıda verilmiştir.

- Zemini oluşturan kaya ve topraktaki radyum miktarı
- Fay zonlarına yakın veya uzak olmak
- Yeraltı suyu seviyesi ve suyun radon içeriği
- Bina zeminindeki nem oranı
- Bina temelinin toprak veya kaya zeminle olan temas yüzeyinin boyutu ve zeminden olan yükseklik

- Evde kullanılan suyun radyum içeriği
- Meteorolojik koşullar, iç -dış hava sıcaklık ve basınç farkı
- Kullanılan yalıtım malzemesinin niteliği ve difüzyon potansiyeli
- Binadaki havalandırma kapasitesi
- Bina zemin ve/veya bodrum katların kömür vb. malzeme için depo olarak kullanılma durumu

Evlerde radon ölçümü ilk kez 1956 yılında İsveç'te yapılmış, daha sonraki yıllarda bu tip çalışmalar yaygınlaşmıştır. Ülkemizde ev içi radon ölçüm çalışmaları ise 1984 yılında Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından başlatılmış, günümüzde çalışmalar Sağlık Bakanlığı tarafından yürütülmektedir. Tablo 2'de ülkemiz ile birlikte bazı ülkelerin ortalama ev içi radon konsantrasyonları verilmiştir. En yüksek ortalama değerler 140 Bq/m³ değeri ile Çek Cumhuriyeti'ne aittir; bunu 120 Bq/m³ değeri ile Arnavutluk, Estonya ve Finlandiya izlemektedir. En düşük değer ise Mısır'a aittir, 9 Bq/m³ (?).

Tablo 2. Farklı ülkelerde ev içi ortalama radon konsantrasyonları (Bq/m³) (UNSCEAR,2000)

| Ülke | Radon | Ülke | Radon | Ülke | Radon |
|------------|-------|-------------|-------|----------------|------------|
| ABD | 46 | Finlandiya | 120 | Macaristan | 107 |
| Almanya | 50 | Fransa | 62 | Malezya | 14 |
| Arjantin | 37 | Hırvatistan | 35 | Mısır | 9 |
| Arnavutluk | 120 | Hindistan | 57 | Norveç | 73 |
| Avustralya | 11 | Hollanda | 23 | Polonya | 41 |
| Belçika | 48 | İngiltere | 20 | Portekiz | 62 |
| Cezayir | 30 | İran | 82 | Romanya | 45 |
| Çek Cum. | 140 | İspanya | 86 | Slovakya | 87 |
| Çin | 24 | İsveç | 108 | Slovenya | 87 |
| Danimarka | 53 | İsviçre | 70 | Suriye | 44 |
| Ermenistan | 104 | İtalya | 75 | Tayland | 23 |
| Estonya | 120 | Japonya | 16 | Türkiye | 81* |
| Endonezya | 12 | Kanada | 34 | Yunanistan | 73 |

*:Çelebi ve diğ., 2014

UNSCEAR (2000) tarafından yayınlanan raporda en yüksek ev içi radon değerin 85.000 Bq/m³ olarak İsveç'te kaydedildiği, ikinci yüksek değerin ise 55.000 Bq/m³ olarak Norveç'te ölçüldüğü görülmektedir. Bu yüksek değerler bu ülkelerde granitik kayaların yaygın olmasıyla örtüşmektedir. Türkiye için ortalama değer 81 Bq/m³ olarak verilmiştir (Çelebi ve diğ., 2014). Türkiye'de radon çalışmaları Bölüm 6'da detaylı olarak ele alınmıştır. Ev içi radon gazı konsantrasyonu Amerika ve Avrupa'da o kadar önemlidir ki Şekil 10'daki gibi "evlerin radon testinin yapıldığını belirten" firma reklamlarına sıkça rastlanmaktadır.



Şekil 10. Amerika'da ev içi radon ölçümü ile ilgili bir reklam

4.2. İşyerlerinde Radon -Hasta Bina Sendromu

İnsanların maruz kaldığı radyasyonun önemli bir kısmı da tıbbi uygulamalardan ve mesleki maruziyetlerden ileri gelmektedir. Uranyum ve toryum madenleri başta olmak üzere kurşun, çinko, kalay, demir, bakır, kömür vb yeraltı maden ocaklarında çalışanlarda, radon gazına bağlı akciğer kanser riskinin yüksek olduğu açıklandıktan sonra, radon kirliliği ile ilgili endişeler artmıştır. Maden ocaklarının dışında metro istasyonları, tüneller, mağaralar, kaplıcalar, alışveriş merkezleri, fabrikalar, okul ve ofisler radon riski taşıyan iş yerleri olarak tanımlanmaktadır.

İş ve/veya eğlence amaçlı olarak kapalı alanlarda giderek daha uzun süre kalma eğiliminde olan günümüz insanı, gün boyunca zamanının % 80'inden fazlasını kapalı alanlarda geçirmektedir. Konuyla ilgili epidemiyolojik çalışmalar, kapalı mekânlarda yüksek seviyede radon ve radonun bozunum ürünleri dolaşısıyla radyasyona maruz kalmış bireylerde akciğer

kanseri oranlarının yüksek olduğunu açıklamıştır. Sigara dumanı ve radonun aynı ortamda birlikte bulunması durumunda ise bu oran daha da artmaktadır (UNSCEAR, 2000; WHO, 2009; URL-4; URL-5, URI-6; URL-7). Gün boyunca uzun süre kapalı mekânlarda kalan insanlarda sıklıkla görülen ve kişisel sıkıntılar olarak ifade edilebilecek sorunların giderek artması "**hasta bina sendromu**" tanısını ortaya çıkartmıştır. Hasta bina sendromunun en yaygın semptomları baş ağrısı, tıkalı burun, boğaz ağrısı, gözlerde kaşıntı ya da sulanma, uyuşukluk, boyun ağrısı, kuru gözler ve kuru cilt olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3'de Uluslararası Atom Enerjisi Kurumu (IAEA) tarafından bazı ülkelerde değişik yeraltı işletmelerinde ölçülmüş radon konsantrasyonları yayınlanmıştır. Görüldüğü gibi özellikle büyük şehirlerde ulaşımda yaygın olarak kullanılan metro istasyonlarında ve tünellerde radon konsantrasyonları oldukça yüksektir ve iç ortam radon konsantrasyon limit değerlerini aşmaktadır (bakınız bölüm 4.3). Tablo 3'de turistik mağaralarda ölçülen üst değerlerin tüm limit değerlerin birkaç katı üstünde olduğu görülmektedir; bu nedenle

Tablo 3. Yeraltı yapılarında ölçülen radon konsantrasyonu (IAEA,2003)

| İşyeri | Ülke | Radon konsantrasyonu aralığı (Bq/m ³) |
|--------------------|-----------------|---|
| Turistik Mağaralar | Almanya | 400-11180 |
| | Macaristan | 130-21100 |
| | İrlanda | 260-19060 |
| | Slovenya | 20-10000 |
| | ABD | 48-1850 |
| Tüneller | Çek Cumhuriyeti | 229-3312 |
| | Finlandiya | 500-7000 |
| | Norveç | 250 (ortalama) |
| Metro | Finlandiya | 45-200 (İstasyon) 20-790 (ofisler) |
| | Yunanistan | 9-22 (istasyon) |
| Kömür madeni | Türkiye | 253-1470 (Zonguldak taşkömürü havzası)* |

*:Fişne ve diğ., 2004

mağaralarda ve kaplıcalarda kalma süreleri uzmanlar tarafından belirlenmeli ve uygulaması sıkı şekilde denetlenmelidir. Ülkemizde Tablo 3’de verilen kapsamda radon ölçümü yapıldığı bilgisine ulaşılmamıştır ancak ülkemizde bazı kömür havzalarında radon ölçümü yapılmış olup, Zonguldak taşkömürü havzasında ölçülen değerler 253-1470 Bq/m³ arasında değişmektedir (Fişne ve diğ. 2004).

4.3. Bina İçi Radon Konsantrasyon Sınır Değerleri

Günümüz insanının her gün ortalama 19.2 saatini (zamanın yaklaşık %80’i) kapalı alanlarda geçirdiği varsayılarak, kapalı ortamlarda radon gazı miktarının kontrolüne yönelik çalışmalar yapılmakta ve sınırlamalar getirilmektedir. ICRP (2009) tarafından ev içi ortamda maksimum bulunması gereken radon gazı miktarını 2007 yılına kadar 200 Bq/m³ - 600 Bq/m³ olarak belirlemiştir; ancak bu değeri 2007 yılında 200

Bq/m³ - 300 Bq/m³ olarak revize etmiştir. ICRP ve WHO ülkelerin konutlarda izin verilen radon üst limit değerlerinde güncel düzenlemelere gidilmesi yaklaşımını benimsemiştir. *Avrupa Birliği daha da ileri giderek ev inşaatından önce radon gazı ile ilgili risk değerlendirmesi yapılmasını ve özel kapalı ortam koşullarında bölgedeki radon emisyonunun mevsimsel ve hatta gece ve gündüz farklılıklarını da gösterecek şekilde ölçülmesini istemektedir.*

Yerkabuğundaki uranyum miktarı homojen dağılmamakta; granitik ve volkanik kayaçların varlığına bağlı olarak kısa ya da uzak mesafelerde çok ciddi farklar göstermektedir. Bu nedenle Tablo 4’de görüldüğü gibi kapalı mekânlarda izin verilen radon limit değerler de ülkeler arasında değişiklikler göstermekte; örneğin Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK, 2012) limit değeri olarak 400 Bq/m³ kabul ederken, İsveç’te sınır değeri 200 Bq/m³ dır.

Tablo 4. Bazı ülkeler, Avrupa Birliği (AB) ve uluslararası kuruluşlar (ICAP ve WHO) tarafından evlerde izin verilen radon gazı limit değerleri (Bq/m³)(TAEK, 2012)

| Ülke | Rn-limiti | Ülke | Rn-limiti | Ülke | Rn-limiti |
|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|
| ABD | 150 | Hindistan | 150 | Lüksemburg | 250 |
| Almanya | 250 | İngiltere | 200 | Norveç | 200 |
| Avustralya | 200 | İrlanda | 200 | Polonya | 400 |
| Çek Cum. | 200 | İsrail | 200 | Rusya | 200 |
| Çin | 200 | İsveç | 200 | Türkiye | 400 (1000*) |
| Danimarka | 400 | İsviçre | 400 | AB | 400 (200**) |
| Fransa | 400 | Kanada | 800 | ICAP | 400 |
| Fillandiya | 400 | Litvanya | 100 | WHO | 100 |

*:İşyerlerinde radon miktarı üst seviyesi

** :Yeni binalar için kabul edilmiş limit değeri (Protection Against Radon-222 at home and at work, ICR Publication, 2009)

Bu limit değerlerin aşılması halinde, radon konsantrasyonunu azaltmaya yönelik tedbirlerin alınması tavsiye edilmektedir. Örneğin, İngiltere’de Ulusal Radyoloji Koruma Kurulu (NRPB) radon miktarını evlerde 200 Bq/m³ seviyesine çıkması durumunda müdahale edilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

5. Radon Gazının Sağlık Üzerindeki Etkileri

Geçtiğimiz yüz yılın ortalarına kadar radonlu sularda banyo yapmak sağlık açısından yararlı bir uygulama olarak kabul edildiği, hatta ekme, diş macunu, çiko-

latalı şekerleme gibi yiyeceklere radyum katıldığı bilinmektedir (Güler ve Çobanoğlu,1997). Ancak 1960’lı yılların ortalarından itibaren uranyum madenleri başta olmak üzere maden ocaklarında rutin radon ölçümleri ve yapılan epidemiyolojik çalışmalar radona bağlı akciğer kanser riskinin yüksek olduğunu göstermiş, Dünya Sağlık Örgütü (WHO)’de 1988 yılında radonun yarattığı tehlikeyi kabul etmiştir. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi, (ICRP,2009;URL:1) akciğer kanserinin sigaradan sonra en önemli nedeni olarak radon maruziyeti olduğunu açıklamıştır.

Nefes alıp-verme süresiyle kıyaslandığında, daha uzun bir yarı ömre sahip olan ^{222}Rn (3,82 gün) dik-kate değer ölçüde vücut tarafından tutulmaz; akciğer-lerde yarı ömrünü tamamlayamadan yine nefes yolu ile dışarı atılır (Bakınız Şekil 5). Bir soygaz olan ^{222}Rn kimyasal reaktivitesi yoktur; nefes yolu ile vücuda alındığında kimyasal olarak dokulara bağlanmaz. Bir kısım radon dokulara bağlansa bile dokulardaki çö-zünürlüğü çok düşüktür; ancak çok küçük bir miktar ^{222}Rn gazı vücut sıvılarında çözünerek kan dolaşımı-na girmektedir. Kan dolaşımına giren radonun vücut içindeki bozunmasıyla oluşan radon ürünlerinin işi-masının iç organlar üzerindeki etkisi ise ihmal edile-bilecek düzeydedir.

Yukarı ki bölümlerde belirtildiği gibi topraktan ve ka-yaçlardan moleküler difüzyonla sızarak hareket eden ^{222}Rn 'un bir kısmı yeraltında kalarak yeraltı sularına karışmakta bir kısmı da sızarak atmosfere ulaşmakta ve bozunarak kısa yarı ömürlü, katı radyoaktif parça-cıklar üretmektedir. Radonun insan sağlığı üzerinde meydana getirdiği asıl olumsuz etki de, radonun kısa ömürlü bu katı radyoaktif bozunum ürünlerinin yayın-ladığı alfa parçacıklarından kaynaklanmaktadır.

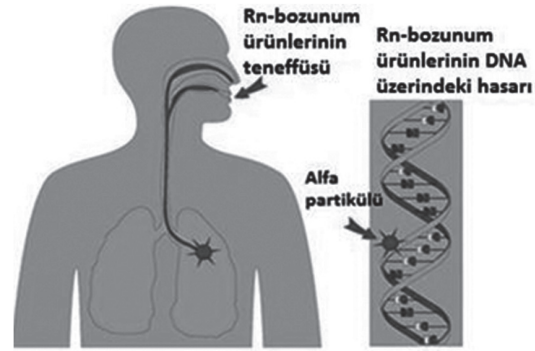
Radonun bozunum ürünlerinin bir kısmı hava içindeki toz ve diğer parçacıklara yapışıp tutunarak radyoak-tif aerosoller oluşturur, bazıları ise serbest radyoaktif atomlar olarak kalma eğilimindedir. Serbest olarak kalma eğiliminde olan radyoaktif atomları taşıyan bu hava solunum yoluyla bronşiyal ağacın değişik ka-demelerine taşınmaktadır. Yapışma eğiliminde olan radyoaktif aerosoller ise akciğerlerin derinliklerinde tutulma eğilimi gösterirler ve ciğerlerin normal temizleme mekanizmasından önce bozunmaya başlar. Yüksek dozda maruz kalınması halinde de bronko-jenik kansere neden olabilmektedir (URL-4, URI-5, URL-6, URL-7).

Radon gazının teneffüs edilmesi, solunum yetmezli-ği, baş ağrısı, öksürük gibi akut etkilere neden olmaz. Vücuda giren bozunum ürünleri kararlı hale gelinceye kadar alfa ışınları yayarak bozunmaya devam eder. Hücrelere nüfuz ederek atomlar arasında düzenli enerji birikimine neden olan radyoaktif parçacıkların en önemli hedefi DNA yapısıdır. DNA sarmalına ya-pışan radyonüklid, serbest radikaller ve hidrojen pe-roksit gibi toksik materyaller meydana getirerek DNA

yapısında biyolojik harabiyete neden olabilmektedir; bunun en belirgin gecikmiş somatik etkisini karsino-genesiz oluşturmaktadır. Aşağıda sıralanan etkenlere bağlı olarak, radon gazına maruz kalan bireylerde kanser meydana gelebilmektedir (Güler ve Çobanoğ-lu, 1997; WHO, 2009; URL-6).

- Radyasyon dozu ve yayılımı
- Etkilendiği sırada etkilenen kişinin yaşı
- Dokunun etkilenebilme derecesi
- Cinsiyet ve genetik özellikler
- Sigara içme durumu
- Beslenme alışkanlıkları
- Birlikte kimyasal etkilenim olup olmaması

Örneğin; radonun bozunum ürünü olan Polonyum-218'in (^{218}Po) akciğerlerde birikimi sonucu meydana gelen alfa parçacıkları bir veya iki DNA sarmalını ko-parmakta ve bu mutasyon başlamış olan kanserojen etkilerin hızlanmasına veya yeni bir sürecin başlama-sına neden olmaktadır (Şekil 11). Yapılan epidomi-yolojik çalışmalar radon gazına bağlı olarak akciğer kanserinin yanı sıra üst solunum yolu kanserlerinin de geliştiğini ortaya koymuş ve son yıllarda yapılan bu çalışmalardan birinde, radonun bozunma ürünle-rine bağlı olarak üst dudak ve idrar yolu tümörlerinin geliştiğinden söz edilmiştir (URL-7). Tüm araştırma-lar, radon ve bozunum ürünlerinin çocuklar üzerinde daha yıkıcı etkiye sahip olacağını ileri sürmektedir ya da sahip olacağını öngörmektedir.



Şekil 11. Radon bozunum ürünlerinin akciğerde birikimi sonucu oluşan ışınlanma ve DNA sarmalında meydana gelen harabiyet (www.homeandlifeprotect.be)

Sigara içen ve bunun yanı sıra yüksek dozda radona maruz kalmış kişilerde kansere yakalanma riski daha

da yüksektir; çünkü tütün ve tütün ürünleri belirli miktarda radon ve bozunum ürünleri içermektedir. İngiltere Ulusal Radyasyondan Korunma Komitesi (NRPB), İngiltere'deki yıllık toplam 41.000 akciğer kanserinden en az 2.500'ünü radon gazına bağlamaktadır. ABD Halk Sağlığı Servisi ise yıllık akciğer kanseri vakalarının sigara içmeyenlerde 5.000, sigara içenlerden ise 15.000'inini radona bağlamaktadır; bütün kanser ölümlerinin %10-12'si evsel radon etkileşimine bağlanmaktadır (Lubin and Steindorf, 1995). Uluslararası Radyolojik Koruma Kurulu (ICPR) ise toplam akciğer kanserlerinin yaklaşık %20'sini, kapalı alanın havasındaki radyoaktif ^{222}Rn gazı ve bunun bozunum ürünlerinin solunumu sonucu akciğer bronşlarının aldığı doza bağlamaktadır (URL-7). WHO ise, akciğer kanseri vakalarında radon ile ilişkilendirilen vaka oranını, oranın hesaplanma yöntemine ve ülkedeki ortalama radon konsantrasyonuna bağlı olarak, %3-14 arasında değiştiğini belirtmektedir (URL-4, URL-5, URL-6, URL-7).

6. Kapalı Alanlarda Radon Seviyesinin Azaltılması İçin Alınabilecek Önlemler

Kapalı ortamlarda radon seviyesini düşürmek için alınabilecek en kolay ve en etkin önlem havalandırma. Havalandırma hem kapalı ortamda radon kirliliğinin azaltılması hem de konut hijyeni açısından son derece önemlidir. Evin ısıtılması, evin içinde zemine göre negatif basınç yaratarak binanın içerisine radonun girmesi kolaylaştırdığı için evin ısıtılması ile evin havalandırılması arasında bir denge oluşturulmalı. Bina içi radon gazı konsantrasyonunun azaltılması için alınabilecek tedbirler şöyle sıralanabilir:

- 1- *Yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve doz değerlendirmeleri mutlaka yapılmalı; analiz sonuçları, sınır değerlerin üzerinde olması durumunda malzemelerin bina yapımında (özellikle iç mekânlarda) kullanılması yasal olarak önlenmelidir.*
- 2- *Başta granitik kayalar olmak üzere doğal taşların kapalı mekanlarda (evler, okullar, hastaneler, AVM'ler, vb) ve özellikle yeraltı yapılarında (metro istasyonları, tüneller, otoparklar vb) kullanılması önlenmelidir; kullanılması zorunlu ise uluslararası standartlara göre ^{238}U , ^{226}Ra ve ^{222}Rn ölçümleri mutlaka yaptırılmalıdır.*

- 3- *Binaların, özellikle bodrum katlarının zemin izolasyonu iyi yapılmalıdır. Bu amaçla toprak ile temas eden yüzeyler sızıntıya imkân vermeyecek şekilde beton ile izole edilmeli; bodrum katların ve zemin katların tabanına şap, beton vb. dökülmelidir.*
- 4- *Yaşı 20 yıl ve daha eski olan binalarda, radon düzeyi yüksek olabileceğinden taban ve duvarlardaki çatlaklar kapatılmalı, izolasyon kontrol edilmeli ve periyodik bakımı yapılmalıdır.*
- 5- *Yerden ve duvarlardan bina içine sızan radon gazı bina dışına çıkamaz ise bina içindeki konsantrasyon artacaktır; bu nedenle kapalı ortamların havalandırılmasına özen gösterilmelidir.*
- 6- *Kömür ile ısınan evlerde ve binaların bodrum katlarında havalandırmaya özel bir önem verilmeli, bodrum katları düzenli olarak havalandırılmalı ve bu konuda halk bilinçlendirilmelidir.*
- 7- *Binalarda doğal havalandırma sistemlerine ağırlık verilmeli, pencereler zemine yakın yapılmalı ve havalandırma alt pencerelerden sağlanmalıdır.*
- 8- *Bodrum katlara, özellikle yakacakların depolanması amaçlı kullanılıyorsa, mutlaka pasif havalandırıcı sistemler takılmalıdır.*
- 9- *Evlerde kapı ve pencerelerde izolasyon yapıldıysa havalandırma süresi arttırılmalıdır.*
- 10- *Radon kanser riskini arttırdığından, kapalı ortamlarda sigara içilmemelidir.*

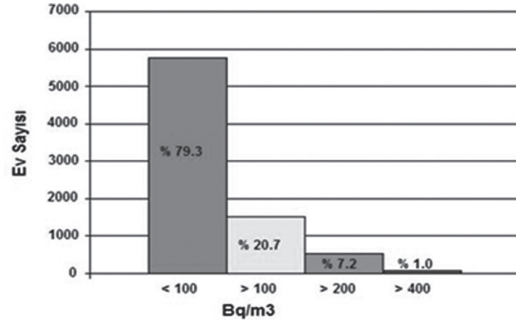
7. Türkiye'de Radyoaktivite ve Radon

Ülkemizin jeoloji haritası incelendiğinde, yüzey alanının yaklaşık %30'unun volkanik ve granitik kayalarla kaplı olduğu görülür. Oluştukları magmanın kimyasal bileşimi ve magmanın geçirdiği ayrışma süreçlerinin sonucu olarak SiO_2 içeriği %66'dan fazla olan granitik ve volkanik kayaların Uranyum (U) ve Toryum (Th) içeriklerinin bu kayalar için verilen ortalama değerlerden yüksek olduğu yukarıdaki bölümlerde belirtilmiştir. Ülkemizin bu litolojik özelliği, başta Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Doğu Anadolu Fayı (DAF), Trakya-Eskişehir fayı, Ege Graben sistemi gibi tektonik unsurlar, yaygın jeotermal sahalar ve maden sahaları (metalik madenler ve kömür yatakları) ile bir-

likte değerlendirildiğinde, ülkemizde pek çok yerleşim biriminin radyoaktivite ve dolayısıyla radon riski altında olduğunu söyleyebiliriz.

İç mekân (indoor) hava kalitesi üzerinde yapılan bir Avrupa grup çalışması sonucu Dünya Sağlık Örgütü ilk kez 1974 yılında, konutlarda radon maruziyetinin sağlık üzerindeki olumsuz etkisine dikkat çekmiştir. Bu tarihten itibaren birçok ülkede, ulusal ya da bölgesel ölçekte konutlarda radon oranlarını değerlendirmek amacıyla çalışmalar başlatılmıştır.

Ülkemizde konutlarda ülke çapında radon aktivasyon ölçümleri Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (ÇNAEM) tarafından 1984 yılında başlatılmış, çalışmalar 2005 ile 2013 yılları arasında hızlanmış ve 2013 yılında tamamlanmıştır. Çalışmanın sonuçları Çelebi ve arkadaşları tarafından 2014 yılında Türkiye Radon haritasını da içerecek şekilde makale olarak yayınlanmıştır (Çelebi ve diğ.; 2014). Bu makalenin genel bir özeti aşağıda verilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında 81 ilde 153 yerleşim biriminde toplam 7293 konutta ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerde CR-39 radon detektörü kullanılmıştır. Detektörler ölçüm yapılan evlerde oturma odasına ve yatak odasına ayrı ayrı kapaklı plastik kaplar içine tutturulmuş olarak yerleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları değerlendirilmiş ve Mapinfo Professional 10.0 software programı kullanılarak "Türkiye'nin radon haritası hazırlanmıştır". Bu ölçüm sonuçlarına göre Türkiye genelinde iç mekan radon konsantrasyon dağılımı 1 Bq/m³ (Kilis) ile 1406 Bq/m³ (Yozgat) arasında değişmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre Türkiye'nin iç mekân yıllık radon gazı konsantrasyonunun aritmetik ortalaması 81 Bq/m³, geometrik ortalaması ise 57 Bq/m³ olarak hesaplanmıştır; ancak 7293 evin Türkiye geneli temsil etmesi şüphesiz mümkün değildir. Yapılan değerlendirmede ölçüm yapılan evlerin %79,3'ünde radon miktarının 100Bq/m³ den küçük, %20,7'sinde 100 Bq/m³ den büyük, %7,2 sinde 200 Bq/m³ den küçük ve %1'inin ise 400 Bq/m³ den büyük olduğu görülmüştür (Şekil 12).

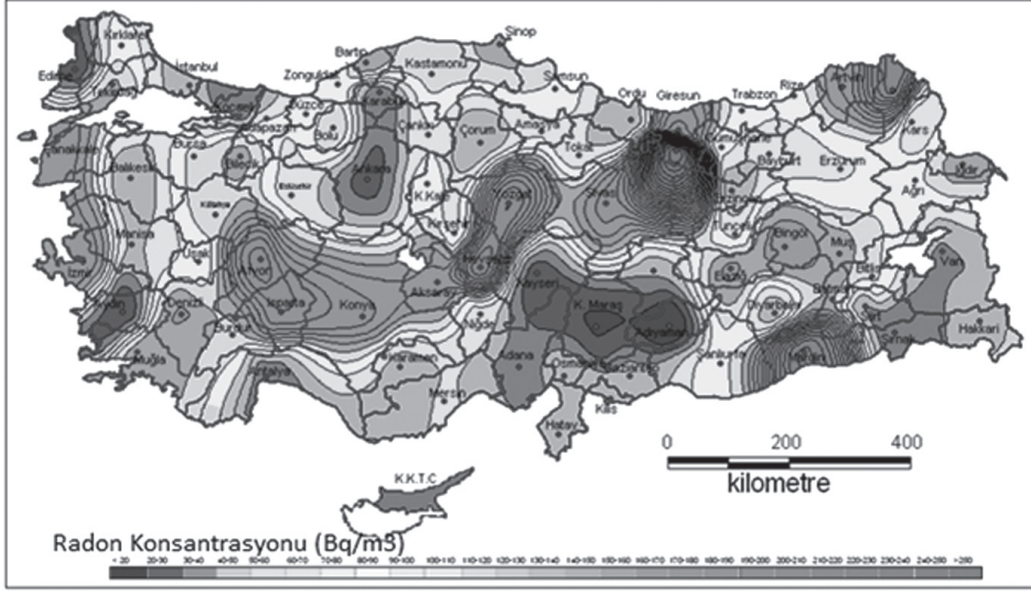


Şekil 12. Türkiye Radon Konsantrasyon Düzeylerinin Yüzde Dağılımı (Çelebi ve Diğ., 2015)

Tablo 5'de bazı illerin ortalama değerleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde en yüksek ortalama değer 312Bq/m³ ile Giresun-Şebinkarahisar'a, en düşük ortalama değer ise Adıyaman'a (16 Bq/m³) ait olduğu görülecektir. İl bazında hesaplanan geometrik ortalama radon gazı konsantrasyon değerleri kullanılarak hazırlanan Türkiye'nin radon haritası (Şekil 13) incelendiğinde Giresun, Artvin, Ardahan, Sivas, Gümüşhane, Mardin, Yozgat, Nevşehir, Isparta, Afyon, Çanakkale ve İzmir illerinin yüksek değerleriyle ön plana çıktığı görülmektedir. Şekil 13'de verilen haritada koyu mavi ile gösterilen alanlarda yeterli sayıda ölçüm yapılmadığını belirtmek gerekir. Uluslararası Radyolojik Koruma Kurulu (ICRP, 2009), ev ve işyerlerinde ²²²Rn'a karşı radyolojik koruma için tavsiyede bulunmuş ve maruz kalınan yıllık iç mekan radon gazı miktarını 200 ila 300 Bq/m³ değerleriyle sınırlandırmıştır. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu evlerde radon konsantrasyonunun yıllık ortalama referans seviyesini 400 Bq/m³ olarak belirlemiştir.

Tablo 5. Bazı illerin yıllık ortalama iç mekan radon gaz konsantrasyon değerleri (Çelebi ve Diğ.,2014)

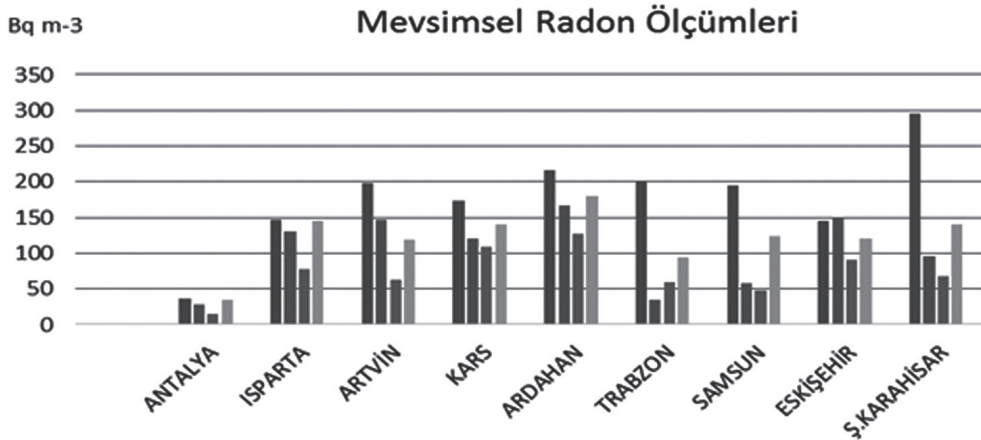
| il | Rn (Bq/m ³) | il | Rn (Bq/m ³) |
|-------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| İstanbul | 49 | İzmir-Dikili | 114 |
| Erzurum | 65 | Çanakkale-Kestanbol | 167 |
| Isparta | 164 | Çanakkale-Ayvacic | 190 |
| Antalya | 33 | Çanakkale-Ezine | 67,9 |
| Adana | 40 | Kilis | 36 |
| Afyon-Dinar | 186 | Nevşehir | 174 |
| Ardahan | 282 | Mardin | 208 |
| Aksaray | 110 | Giresun-Şebinkarahisar | 312 |
| Bilecik | 171 | Adıyaman | 16 |
| Denizli | 96 | | |



Şekil 13. Türkiye Radon haritası (Çelebi ve Diğ, 2014 ve 2015'den alınmıştır)

ÇNAEM tarafından yapılan ölçümler Çelebi ve diğ. (2014), tarafından mevsim bazında da değerlendirilmiş ve Şekil 14'de verilen sonuç elde edilmiş. Şekilden görüleceği gibi yazın ve ilkbaharda ev içi radon değerleri sonbahar ve kış değerlerine göre belirgin derecede düşüktür. Bu şüphesiz sıcak havalarda pencerelerin açık olması ve evlerin daha fazla havalandırılmasıyla ilişkilidir. Bu açıdan Şekil 14 incelendiğinde tüm yıl sıcak olan Antalya ve tüm yıl soğuk olan Ardahan ve Kars'ı temsil eden değerler ilgi çekicidir.

Bu da ev içi radon konsantrasyonunun düşürülmesinde havalandırmanın önemini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Her ne kadar 7293 ev ülkemizi temsil etmekte yetersiz kalsa da, Şekil 13 ve Tablo 5'de verilen değerler, Türkiye'nin jeolojik özellikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, radon gazı ortalama değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde, geniş alanların volkanik ve granitik kayalarla kaplı olduğu görülecektir; örneğin Giresun, Yozgat, Aksaray, Afyon, Çanakkale, Ardahan gibi. Bir diğer ilginç sonuç, yüksek radon değerleri



Şekil 14. Bazı illerde ev içi radon miktarının mevsimlere göre değişimi

ölçülen bu illerin aynı zamanda Ülkemizin önemli jeotermal sahaları, fay hatları ve maden yataklarını içeriyor olmalarıdır (Şekil 15). Örneğin Mardin ili için hesaplanan 208 Bq/m³ yıllık ortalama radon değerinin oluşmasında, kayaç ve toprak türü ve evlerin yüksek duvarlarla çevrili olması kadar Mazıdağı fosfat yatakları da etkili olmuş olabilir. Bölüm 3.4’de belirtilen nedenlerden dolayı yapılacak daha kapsamlı ve sistemli çalışmalarda ülkemizin kömür sahalarının bulunduğu bölgelerin de yüksek radon değerleriyle öne çıkma olasılığı yüksektir.

7293 konutta yapılan ölçümün Türkiye genelini temsil edemeyeceği gerçeğinden hareketle bu tip çalışmalarda ölçüm noktalarının seçiminin hayati derecede önemli olduğunu belirtmek gerekir. Bu tip çalışmalar, mutlaka içinde yapısal jeoloji, mineraloji ve jeokimya konusunda uzman jeoloji mühendislerinin de bulunduğu çok disiplinli ekipler tarafından, illerin en az 1/25.000 ölçekli jeoloji haritalarının rehberliğinde, köyler dahil tüm yerleşim birimlerini temsil edecek yeterlilikte örnekleme noktasına göre planlanmalıdır. Ölçüm noktaları, ilgili alandaki kayaç ve toprak türünü, varsa fay zonlarını, maden yataklarını ve alterasyon zonlarını da temsil edecek şekilde seçilmelidir. Elde edilen ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ve yorumlanmasında mutlaka radyoaktivite konusunda uzman jeoloji mühendisleri de görev almalıdır.

Sonuç Ve Öneriler

Çevresel etkenlerin sağlık üzerindeki etkilerine yönelik yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular ve bu bulguları destekleyen hastalık tanıları, radon gazı da dahil olmak üzere, yaşadığımız çevrenin jeolojik unsurlarının çok iyi belirlenmesi ve buna göre stratejiler geliştirilmesinin, **toplumların sağlamlığı** üzerindeki önemini ortaya koymuştur. Ortalama yaşam süresinin artmasıyla birlikte, sağlık harcamalarının ülke ekonomileri üzerindeki baskısı her geçen yıl artmaktadır. Sağlık harcamalarını düşürmenin en önemli yolunun/yönteminin hastalık yapıcı doğal/jeolojik unsurların tanımlanıp önlem alınması olduğunu bilincinde olan ABD, Kanada, Avustralya, Rusya, AB ve Kuzey Avrupa ülkeleri hızla “Tıbbi Jeoloji Haritalarını” hazırlayarak, ülkelerinin sağlık politikalarını bu haritalar bazında planlayıp/geliştirmektedirler. Bahsedilen ülkeler başta olmak üzere gelişmiş ülkeler Radon, Arsenik, Flor, lüsi mineraller (başta Asbest ve Eriyonit olmak üzere) ve diğer jeolojik unsurlara dayalı Tıbbi jeoloji haritalarını tamamlamışlar ve halk sağlığı uzmanları ve aile hekimlerini Tıbbi Jeoloji konusunda sistemli olarak eğitmektedirler. Dünya’da bu gelişmeler olurken Ülkemizde de ilgili bakanlıklar, kamu kurumları ve üniversiteler işbirliğinde Tıbbi Jeoloji Haritalarının hazırlanması için çalışmalar bir an önce başlatılmalıdır.



Şekil 15. Türkiye'nin jeotermal kaynakları, volkanik alanları ve ana fay hatları (MTA web sayfasından)

Radon gazı konusunda ise aşağıda belirtilen hususlar kapsamında hızla harekete geçilmesi gerektiği düşüncesindedir.

- 1- Sağlık Bakanlığı, TAEK, yerel yönetimler ve üniversitelerin iş birliğinde hazırlanacak bir eylem planı kapsamında ülke genelinde evlerde, okullarda, hastanelerde, AVM'lerde, metro istasyonlarında, tünellerde, yeraltı otoparklarında, madenlerde ve diğer her türlü işyerinde yaz ve kış döneminde olmak üzere en az yılda iki kez radon ölçümü yapılmalı.
- 2- Yeni yapılacak binaların zeminlerin ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ve ^{40}K aktivasyon değerleri ve ^{222}Rn ölçümü yapılmalı; bu analiz ve ölçümlerin zorunlu olarak yapılması yasa ve yönetmeliklerle düzenlenmelidir.
- 3- Yirmi yıl ve daha yaşlı binaların bodrum kat ve giriş katlarını zemin ve duvarları kontrol edilmeli, varsa çatlaklar kapatılmalıdır.
- 4- Bütün olarak şehirlerin, kasabaların ve köylerin radon haritaları hazırlanmalıdır.
- 5- Ülke çapında dış ortam gama doz ölçümleri yapılmalı, ölçüm sonuçları harita halinde sunulmalıdır.
- 6- Bu haritalar en az 5 yılda bir periyodik olarak güncellenmeli.
- 7- Eğer doğal radyoaktivitesi yüksek bölgede ikamet ediliyor ise halk bilgilendirilmeli ve ev içi radon ölçümleri düzenli olarak yapılmalıdır (şahıslar veya devlet tarafından).
- 8- Radon riskinin yüksek olduğu bölgelerde tek katlı veya az katlı binalar toprak zemin üzerine yapılacak ise, özellikle köylerde, zemine jeomebran serildikten sonra bunun üzerine beton dökülmesi yararlı bir yöntem olabilir.
- 9- Radon riski yüksek bölgelerde inşa edilecek çok katlı binalarda ise, alınacak en etkili yöntemlerden birisi bina temeline küçük bir çukur açmak ve düşük güçlü elektrik motoru ile bu çukurun havasının düzenli olarak boşaltılması olabilir.
- 10- Avrupa Birliği daha da ileri giderek ev inşaatından önce radon gazı ile ilgili risk değerlendirmesi

yapılmasını ve özel kapalı ortam koşullarında bölgedeki radon emisyonunun mevsimsel ve hatta gece ve gündüz farklılıklarını da gösterecek şekilde ölçülmesini istemektedir.

Yararlanılan Kaynaklar

- Çelebi, N., 1995; Çevresel Örneklerde Uranyum, Radyum, Radon Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi.
- Doktora tezi. İ.Ü. Fen ve Mühendislik Fakültesi, Fizik Bölümü, Eylül 1995.
- Çelebi N., Ataksoy B., Taşkın H. and Albayrak Bingoldağ N., 2014, Indoor radon measurements in Turkey dwellings, Radiation Protection Dosimetry, November 11, pp.1-7.
- Çelebi, N., Örgün, Y., Taşkın, H., Özçınar, B., Albayrak, N., 2015; Türkiye'nin jeolojik yapısı açısından radon (^{222}Rn) dağılımı ve halk sağlığı açısından değerlendirilmesi, Uluslararası Katılımlı 2. Tıbbi Jeoloji Sempozyumu Bildiriler Kitabı, sf. 21-22, 12-15 Kasım 2015, Konya.
- Çetin, E., Altınsoy, N., Örgün, Y. (2012). Natural Radioactivity Levels of Granites Used in Turkey" Radiation Protection Dosimetry, (2012), Vol. 151, No. 2, pp. 299–305
- Erarşlan, C, Örgün, Y., Bozkurtoğlu, E. (2014). Geochemistry of trace elements in the Keşan coal and its effect on the physicochemical features of ground- and surface waters in the coal fields, Edirne, Thrace Region, Turkey, International Journal of Coal Geology, vol.133 (2014), 1-12
- Fişne, A., Ökten, G., Çelebi, N., 2004; Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) yeraltı maden ocaklarında radon gazı yayılımının incelenmesi; Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, s.193-202.
- Güler, Ç ve Çobanoğlu, Z., 1997; Radon Kirliliği, Sağlık Bakanlığı, Çevre sağlığı temel kaynak dizisi No:44
- IAEA, 2003, International Atomic Energy Agency, Safety Reports Series No.33, Radiation protection against radon in workplaces other than mines, Vienna, 2003.
- ICRP, 2009, International Commission on Radiological Protection ref 00/902/09), Statement on Radon, (ICRP Ref 00/902/09).
- Lubin, JH., Steindorf, K., 1995; Cigarette use and the estimation of lung cancer attributable to radon in

- The United States. *Rediat. Res.* 1995 Jan. 141 (1), pp.79-85.
- Misra, K.C.,2000; Maden Yataklarını Anlamak "Unders-tanding Mineral Deposits" kitabın Türkçe çevirisi, Bölüm 14; TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Çeviri Serisi NO:3,
- Mason, B., Moore, C.B., 1982. *Principles of Geoche-mistry*, fourth edition. Wiley, New York.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Gültekin, A.H., Karahan, G., Çe-lebi, N. (2005), Natural Radioactivity Levels in Granitic Plutons and Groundwaters in Southeast Part of Eskisehir, Turkey, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 63, pp. 267-275.
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Şahin, S.Y., Güngör, Y., Gültekin, A.H., G. Karahan, Karacık, Z.,2007, Natural and anthropogenic radionuclides in rocks and beach sands from Ezine region (Çanakkale), Western Anatolia, Turkey. *Applied radiation Isotope*, Vol. 65, pp. 739-747
- Örgün, Y., Altınsoy, N., Şahin, S.Y., Ataksor, B., N. Çe-lebi, N., 2008, A Study Of Indoor Radon Levels In Rural Dwellings Of Ezine (Çanakkale, Turkey) Using Solid-State Nuclear Track Detectors, *Radiat Prot Dosimetry* 2008, 131: 379 -384; doi:10.1093/rpd/ncn190
- Palmer, C.A., Tuncalı, E., Kristen O. Dennen, K.O., Co-burn, T.C., Robert B. Finkelman, 2004., Charac-terization of Turkish coals: a nationwide perspec-tive., *International Journal of Coal Geology* 60, 85-115.
- Renken, K.J., & Rosenberg T., 1995, Laboratory me-asurment of the transport of radon gas through concerte samples, *Health Phys.* 1995, June 68(6), p.800-810.
- Rogozen, M.B.,2003; Dynamic simulation of radon da-ughter concentration in apartments usung solar rockbed heat storage. *Environmental International* 2003, 8, p.89-96.
- Sungur, M,2012, Avcıkoru (İstanbul) bölgesi kömür ve kil sahalarındaki yeraltı ve yüzey sularının hidroje-okimyasal özellikleri ve çevresel etkilerinin değer-lendirilmesi, İTÜ Fen Bilimleri Ens. Yüksek Lisan Tezi.
- Swaine, D.J., Goodarzi, F. (Eds.), 1995. *Environmental aspect of trace elements in coal*. Kluwer Acade-mic Publishers, the Netherlands.312 pp.
- TAEK, 2012; Teknik Rapor: Kapalı ortamlarda radon gazı.
- Tzortzis, M., Tsertos, H., 2004, Determination of thori-um, uranium, and potassium elementa concentra-tions in surface soils in Cyprus. *J. Environ. Radio-activity* 77, 325–338.
- UNSCEAR Report 1982, Expossure from natural so-urces of radiation; Report of the United Nations Scientific Committee on the effects of atomic ra-diation, Annex B.
- UNSCEAR Report 1988, ²²²Rn and its shored-lived de-cay products: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Annex A.
- UNSCEAR Report 2000, Sources,Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scienti-fic Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York.
- UNSCEAR Report 2006, Report to the General As-sembly, Vol 1: Effects of ionizing radiation with scientific annexes A and B
- WHO 2009; Handbook on Indoor Radon – A Public He-alth Perspective, edited by Hajo Zeeb and Ferid Shannoun, WHO Library Cataloguing.
- URL-1: www.nationalradondefense.com
- URL-2: <http://www.radon.com/>
- URL-3: www.athomeradon.com
- URL-4: <http://www.pcchu.ca/2014/11/04/q-whats-invisible-causes-cancer-and-could-potentially-be-in-your-home/>
- URL-5: http://www.radon.com/radon/cancer_and_ra-don.html
- URL-6: <http://ehs.umn.edu/hazards/hazardssite/ra-don/radonmolaction>
- URL-7: <http://www.icrp.org/publications.asp>