

RADON, BETON, BİNA VE İNSAN SAĞLIĞI

H. Alperen Bulut¹, Remzi Şahin²

Özet

Bu derlemede radon-insan sağlığı ilişkisi üzerindeki beton ve binaların rolünün irdelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında son 30 yılda yapılmış birçok araştırmanın sonuçları değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda radyoaktif analizler ile sınır değerlerin üstünde radon içerdiği tespit edilen malzemelerin binalarda kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca betondan olan radon salım hızını, beton bileşenlerinin cinsi ve miktarı ile boşluk yapısının belirlediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, radon potansiyeli düşük bileşenlerden üretilmiş minimum boşluk hacmine sahip betonlardan olan radon salımının limit değerlerin çok altında kalacağı ve insan sağlığı için tehdit oluşturmayacağı söylenebilir. Bina içine hapsolmuş radon gazını azaltmada en pratik ve en etkili yöntem ise kapalı ortamların havalandırılmasıdır.

1. Giriş

Doğal radyoaktif maddelerden yayılan radyasyon ile canlıların tümü etkileşim içerisindedir. Solunum ve sindirim yolu ile vücuda alınan ve zamanla organlarda biriken radyoaktif özelliğe sahip maddeler; toprakta, havada, suda ve hatta besinlerde bulunabilmektedir [1]. Yapıların mevcut boşluk ve çatlaklarından geçerek binalarda biriken radon da radyasyon yayan bir gaz olup yüksek konsantrasyon değerlerine eriştiğinde insan sağlığına zarar verdiği kanıtlanmıştır [2,3]. Öte yandan, üretim sürecinin kolaylığı, istenilen dayanım ve dayanıklılık değerlerini sağlayabilmesi, mimari esnekliğe imkân

Radon, Concrete, Building and Human Health

This review aims to examine the role of concrete and buildings on the radon-human health relationship. Within the scope of the study, the results of many studies conducted in the last 30 years were evaluated. As a result of the evaluations, it was stated that materials found to contain radon above the limit values through radioactive analysis should not be used in buildings. Additionally, it has been determined that the radon release rate from concrete is determined by the type and amount of concrete components and the pore structure. Therefore, it can be said that radon emanation from concrete with minimum void volume produced from components with low radon potential will remain well below the limit values and will not pose a threat to human health. The most practical and effective method to reduce radon gas trapped inside the building is to ventilate indoor environments.

tanıması, çelik ile mükemmel uyumu gibi birtakım üstün özellikler taşıyan [4,5] beton, günümüzde en yaygın kullanılan [6] ve en çok tüketilen (yıllık beton üretimi yaklaşık 1 m³/kişi [7]) yapı malzemesidir. Günümüzde yapılan binaların büyük bir kısmının betonarmeden yapılıyor olması, araştırmacıları betondan geçip (ya da yayılıp) bina içinde biriken radon gazı miktarını araştırmaya yöneltmiştir.

Bu bildiri ile yapılarda biriken radonun ana kaynaklarını tanıtmak, betonun bina içi radon birikimi üzerindeki rolünü açıklığa kavuşturmak ve radon-insan sağlığı ilişkisi üzerinde toplumsal farkındalık oluşturmak amaçlanmıştır. Çalışmada radyoakti-

vite, radyasyon ve radon hakkında bilgiler verildikten sonra beton ve binalar üzerinde dünya genelinde gerçekleştirilmiş olan radon gazı ölçümlerinin sonuçları irdelenmiştir.

2. Radyoaktivite ve Radyoaktif Bozunma

Doğada var olan element atomlarının bazılarının kararlı bazıları ise kararsız çekirdeklere sahip oldukları bilinmektedir [8]. Radyoaktivite terimi, kararsız atomik yapıdaki çekirdeğin elektromanyetik radyasyon veya nükleer parçacıklar yayıp kendiliğinden bozunma işlemini ifade etmek için kullanılmaktadır [9]. Radyoaktivite kontrol edilemeyen, yavaşlatılmayan ve durdurulamayan bir olay olarak tanımlanmakta, üstel bir fonksiyon hâlinde azalarak kendi kendine tükeninceye kadar devam etmektedir [10].

1) Erzincan Binali Yıldırım Üniv., Müh. ve Mim. Fak., İnş. Müh. Böl., Erzincan, TR
habulut@erzincan.edu.tr

2) Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnş. Müh. Böl., Erzurum, TR

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen BETON 2023 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

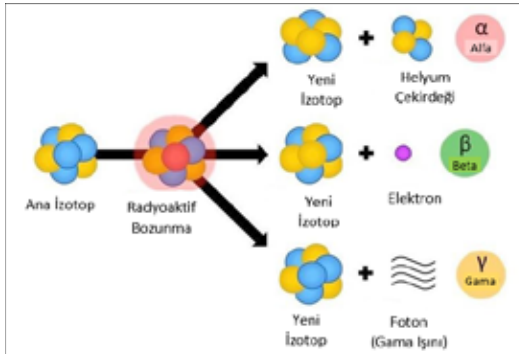
Radyoaktivite, doğal ve yapay olmak üzere iki farklı şekilde oluşur. Kararsız elementler, kararlı bir yapıya geçmek için çabalar, hiçbir şekilde dışarıdan müdahale olmaksızın barındırdıkları fazla enerjilerini mevcut çekirdeklerinden dışarıya doğru salmaktadır. Bu elementler doğal radyoaktif elementler olup bunların gerçekleştirdiği enerji yayma olayına doğal radyoaktivite adı verilmektedir [11]. Kararlı bir yapıya sahip olan izotopların nükleer reaktörlerde veya hızlandırıcılarda yapay yollar ile kararsız hâle getirilmesi sonucu çekirdeğin radyoaktif hâle gelmesi ise yapay radyoaktivite olarak isimlendirilmiştir [12].

Radyoaktif bozunma ise daha kararlı bir atom hâline dönüşebilmek amacıyla kararsız atomların, sahip oldukları fazla enerjilerini verip kendilerini yeniden düzenlemeleri şeklinde tanımlanmaktadır [13]. Bu bozunma, radyoaktif bozunma yasasından hareketle bulunan aşağıdaki denklem ile açıklanmaktadır [14]:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Burada; t zamanı, $N(t)$ t zamanı sonunda arta kalan çekirdek sayısını, N_0 başlangıçtaki ($t=0$) çekirdek sayısını ve λ ise birimi s^{-1} olan radyoaktif numunenin bozunma sabitini ifade etmektedir. Denklemdeki negatif işaret başlangıçtaki N radyoaktif çekirdeğin bozunmalar sonucunda azaldığını göstermektedir.

Bozunma üç farklı şekilde oluşabilmektedir. Işıma şeklinde görülen bu bozunma türleri sırasıyla alfa (α), beta (β) ve gama (γ) bozunması olarak adlandırılmaktadır [9]. Bozunma türlerinin oluşum mekanizmasını gösteren görsel Şekil 1'de verilmiştir.



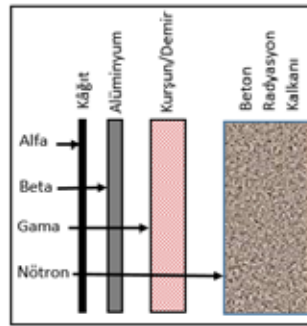
Şekil 1. Radyoaktif bozunma türlerinin oluşum mekanizması [15] Hem proton hem de nötron fazlalığı sebebiyle çekirdek kararsızlığı mevcut ise kararsız durumdaki çekirdekler (ana izotop), bir alfa parçacığı yayımlayarak kararlı duruma (yeni izotop) geçmeye çalışmaktadır. α sembolü ile gösterilen parçacık, iki proton ve iki nötrondan oluşan bir Helyum (${}^4_2\text{He}$) çekirdeğidir [16] ve bu parçacıklarının yayılmasıyla alfa ışınları oluşur [17]. Bu bozunma türü, genellikle doğal radyoaktif izotoplar (radyonüklit) ile büyük atom numarasına sahip radyoizotoplarda görülür. Örneğin radyum (Ra) çekirdeğinin radona (${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$) ya da uranyum (U) izotopunun toryuma (Th) dönüşümünde (${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$) alfa ışınları gözlenir [18].

Beta (β) bozunmasında, bir nötron protona veya bir proton nötrona dönüşerek, kararsız hâle olan çekirdek kararlı hâle geçebilmektedir [3]. β parçacıkları, negatif veya pozitif yüke sahip yüksek enerjili elektronlar olarak da isimlendirilir [11]. Beta bozunmasının üç çeşidi vardır: i-nötron fazlalığından kaynaklanan ve negatif elektron yayılımı ile ifade edilen negatif (β^-) bozunması, ii-proton fazlalığından kaynaklanan ve pozitif elektron yayılımı ile ifade edilen pozitron (β^+) bozunması ve iii- elektron yakalama [19]. Bu bozunma sonucunda kütle numarasında değişim yaşanmaz [20].

γ bozunmasında ise α ve β bozunumuna uğramış kararsız çekirdeğin -ki bu çekirdek çoğu kez uyarılmış durumdadır- kararlı hâle geçmek için bir ya da birden fazla gama ışını (fotonu) yayması görülmektedir [15]. Gama bozunması, hiçbir zaman kendiliğinden meydana gelmeyip mutlaka α veya β bozunmasından sonra oluşmaktadır [21]. Bu bozunma türü elektromanyetik özelliğe sahip olduğu için atom ve kütle numaraları değişmemektedir.

α , β ve γ bozunmasının dışında fisyon olayı olarak da bilinen ve nötron bombardımanı sonucunda ağır bir çekirdeğin ikiye bölünerek birden çok nötron ile büyük bir enerji açığa çıkmasına neden olan nötron parçacıklarının yaydığı ışınım da vardır [16].

Maddelere nüfuz edebilirlik bakımından bozunma türlerinin farklılığı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Radyoaktif bozunma türlerinin nüfuz edebilirlik (giricilik) özellikleri [22]

Şekil 2'den de görüleceği üzere, α parçacıklarının enerjileri yüksek olsa bile kütlelerinin ağır olmasından dolayı, ışınım mesafeleri çok daha kısa olup bir kâğıt tarafından durdurulabilmektedir [23]. β parçacıklarının kütleleri ise α parçacıklarından daha küçük olup durdurulmaları daha zordur [11]. Bu parçacıklar, alüminyum gibi düşük atom numarasına sahip metaller tarafından durdurulabilmektedir [24]. Giricilik özelliği çok yüksek olan γ ışınımını durdurabilmek için kurşun ve demir gibi ağır metaller kalın boyutlarda kullanılmaktadır. Nötronlar ise kütlelerinin büyük olmasına rağmen elektrik yükü taşımadıklarından, oldukça yüksek bir giricilik özelliği ile ağır betonlar (Radyasyon Kalkanı Betonu) tarafından durdurulabilmektedir [22].

Nötron ışımasını durdurabilme bakımından ağır betonlar diğer beton çeşitlerine göre daha avantajlı durumdadırlar. Nötron ışımasına karşı koruyuculuğu yüksek olan betonların üretimine yönelik yapılan çalışmalarda, hematit ve manyetit agregaları kullanılarak üretilen ağır betonların iyi sonuçlar verdiği [25], barit agregası kullanılarak üretilen betonların radyoaktivite değerlerinin düştüğü [26] ve hidrojen içeriği yüksek beton karışımların, nötron ışımasına karşı koruyuculuğunun daha iyi olduğu belirtilmiştir [27]. Mindess et al. [31]'de ise radyasyon kalkan betonlarında nötron için borokalsit ve kolemanit; gama için ise barit, magnetit, ilmenit ve hematit agrega olarak önerilmektedir.

3. Radyasyon (Işıma)

Radyasyon, enerjinin elektromanyetik dalgalar (fotonlar) ya da radyoaktif parçacıklar biçiminde uzayda yayılması olarak tanımlanır [28]. Radyasyonu, bir ortamda yol alabilen enerji paketleri (parçacık, dalga, foton), madde içerisine nüfuz edebilen ışınlar şeklinde de ifade etmek mümkündür [11]. Doğal veya yapay radyoaktif çekirdeklerin, kararlı hâle geçebilmek amacıyla dışarıya yaydıkları hızlı parçacıklar ya da elektromanyetik dalga şeklinde taşınan enerjiler de radyasyon olarak isimlendirilir [29].

Maddeler üzerindeki etkilerine göre radyasyonun sınıflandırılması Şekil 3'te verilmiştir.



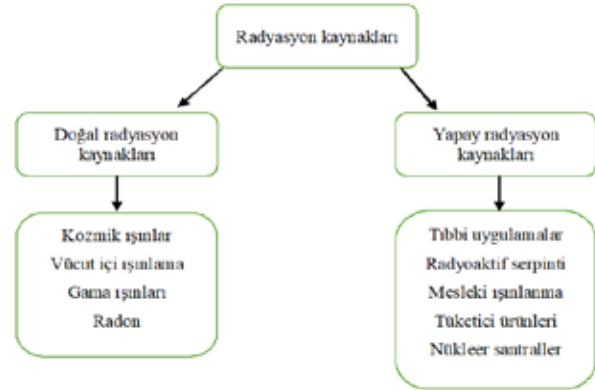
Şekil 3. Radyasyon tiplerinin oluşturduğu etkilere göre sınıflandırılması [30]

İyonlaştırıcı radyasyon, çok yüksek enerjiye sahip madde atomları ile etkileşime girebilecek radyasyonları; iyonlaştırıcı olmayan radyasyon ise yüksek enerjiye sahip olmayan, sadece etkileştiği atomları uyarmakla yetinen radyasyonları ifade etmektedir. İyonlaştırıcı radyasyonu ısı, ses, ışık gibi etkileri olmayan ve hiçbir duyu organı ile de algılanamayan bir tehlike olarak görmek gerekmektedir [10].

3.1. Radyasyon kaynakları

Radyasyon kaynakları, doğal ve yapay olmak üzere iki grupta

toplanır (Şekil 4).

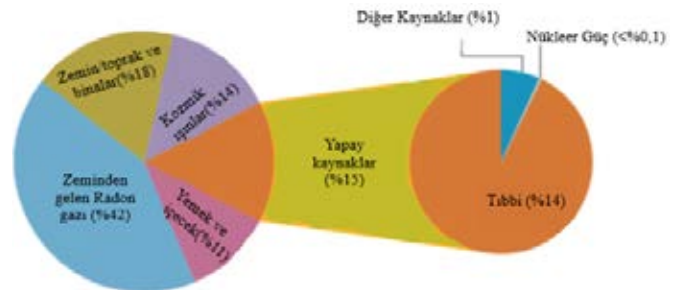


Şekil 4. Radyasyon kaynakları [32]

Doğal radyasyon kaynakları; i- uzaydan atmosfere gelen çok yüksek enerjiye sahip kozmik ışınların parçacıkları, ii- su, hava, toprak, bitkiler ve diğer canlılarda bulunan doğal radyoaktif izotoplar, iii- fosil yakıtlar (özellikle bu yakıtların yakılıp atmosfere yayılması ve daha sonra toprağa karışması) ve iv- yiyecek ve içeceklerdir [10].

Yapay radyasyon kaynakları ise; i- tedavi amaçlı kullanılan radyoterapiler, ii- teşhis amaçlı kullanılan röntgen, tomografi ve sintigrafi çekimleri, iii- endüstride kalite kontrol, gıda alanında ürünlerin raf ömrünü uzatmak için kullanılan sterilizasyon, iv- nükleer reaktörlerde enerji üretmek amacıyla kullanılan radyoaktif maddeler, v- zirai, tıbbi ve endüstriyel amaçlı kullanılan X-ışınları ile yapay radyoaktif maddeler sayılabilir [33].

Doğal ve yapay radyasyon kaynakları Şekil 5'te bir arada gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere radon gazı, %42 oranı ile radyasyon kaynaklarının içerisinde en yüksek orana sahiptir. Yapay radyasyon kaynakları ise büyük bir kısmı tıbbi kaynaklardan (%14) oluşmak üzere toplamda %15 oranındadır. Bu verilerden hareketle, küresel radyasyonu daha çok doğal radyasyon kaynaklarının oluşturduğu, bu kaynaklar içerisinde de en önemli kaynağın radyoaktif bir gaz olan radon olduğu söylenebilir.



Şekil 5. Doğal ve yapay radyasyon kaynaklarının dağılım oranları [34]

3.2. Radyasyon birimleri

Radyasyon miktarını ölçmek amacıyla çeşitli birimler kullanılmaktadır. Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komitesi (ICRU); aktivite, ışınlama, soğurulma dozu ve eş değer doz gibi radyasyon ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan kavramlar için özel birimler tanımlamıştır. 1980'li yıllar sonunda terk edilmeye başlanmış olan bu birimler Tablo 1'de "eski", onların yerine Uluslararası Birimler Sistemi (SI) esas alınarak belirlenen birimler ise aynı tabloda "yeni" olarak verilmiştir.

Tablo 1. Radyasyon birimleri ve dönüşüm katsayıları [35]

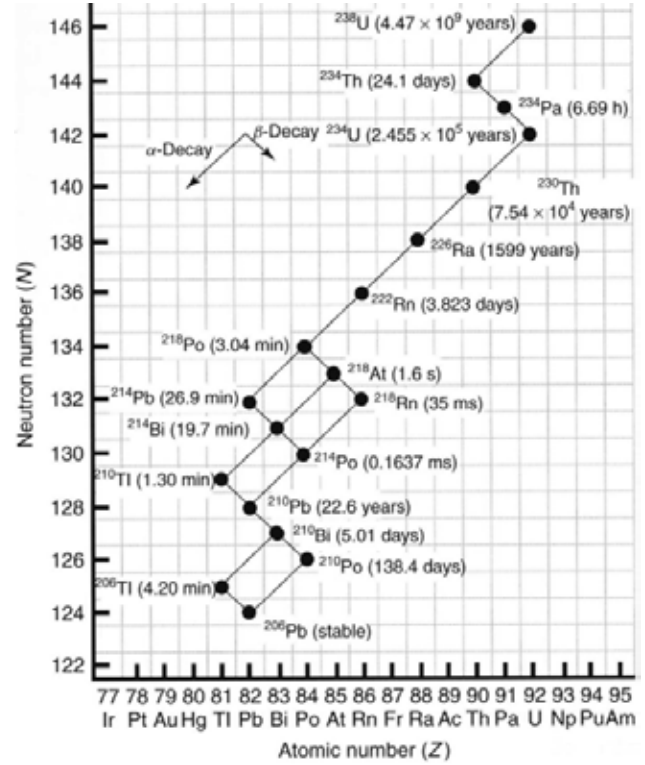
Terim	Birim		Dönüşüm
	Eski	Yeni	
Aktivite	Curie (Ci)	Becquerel (Bq)	1 Ci = 3,7x10 ¹⁰ Bq
Işınlama	Röntgen	Coulomb/kilogram (C/kg)	1 C/kg = 3876 R
Soğurulma Dozu	rad	Gray (Gy)	1 Gy = 100 rad
Eş değer Doz	rem	Sievert (Sv)	1 Sv = 100 rem

Tablo 1'deki aktivite: saniyede bir bozunma meydana getiren herhangi bir radyoaktif madde miktarı, ışınlama: X-ışınları ile gama ışınlarının havayı iyonlaştırmasının bir ölçüsü, soğurulma dozu: radyasyonla ışınlanan bir maddenin birim miktarındaki soğurulan radyasyon enerjisi, eş değer doz ise soğurulan dozun yani bir dokuya aktarılan enerjinin o dokuda meydana getirdiği zararlı biyolojik etkilerin bir ölçüsüdür [36].

4. RADON

Parlak, beyazımsı gümüş rengine sahip ve radyoaktif bir maden olan [37] radyum elementinin adı Latince ışın anlamını taşıyan "Radius" kelimesinden, simgesi (Ra) ise Mısır'ın güneş tanrısı olan Ra'dan gelmektedir [13]. 1898 yılında Fransız fizikçiler Pierre ve Marie Curie tarafından bulunan [38] bu elementin; atom ağırlığı 226, erime/kaynama noktası 700°C/1737°C, yoğunluğu 5,5 g/cm³ ve yarılanma süresi 1602 yıldır [10]. Radyumun, dördü (²²³Ra, ²²⁴Ra, ²²⁶Ra ve ²²⁸Ra) doğal olarak meydana gelen, 34 adet bilinen izotopu vardır [39]. Ra elementinin izotoplarının tümü radyoaktif nitelik taşımakta olup kararlı izotopu yoktur ve çok nadir bulunabilen bir elementtir [40]. Devamlı bir şekilde sahip olduğu atom yapısında bozunma gösteren bir madde olan Ra, bu olay sırasında hem ışın yaymakta hem de helyum ve radon gazı açığa çıkarmaktadır [41]. Bu tepkime sonucunda çok fazla enerji oluşumu gerçekleşmektedir [42]. Doğada görece bol miktarda bulduklarından dolayı radyumun ²²⁶Ra ve ²²⁸Ra izotopları en önemlileri kabul edilmektedir [43].

Radon ise renksiz, kokusuz, tatsız, kimyasal olarak tepkimeye girmeyen ve doğada kendiliğinden görülen bir radyoaktif gazdır [44]. Radon, U bozunma zincirinde yer alan Ra'dan üretilmektedir. Radonun oluşumunu da içeren ve U'nun en yaygın biçimi olan ²³⁸U'nin bozunma zinciri Şekil 6'da, radonun özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 6. Uranyum-238'in bozunma serisi (4n+2 serisi) [45]

Tablo 2. Radonun özellikleri [46]

Sembol	Rn
Atom Numarası	86
Atom Ağırlığı	222
Erime Noktası	-71.0 °C
Kaynama Noktası	-61.8 °C
Proton ve Elektron Sayısı	86
Nötron Sayısı	136
Sınıfı	8A grubu (Soygaz)
Kristal Yapısı	Kübik
Yoğunluk	9,73 g/cm ³
Yarılanma Süresi	3,82 gün

Radon, havadan yaklaşık 7,5 kat daha ağırdır. Dolayısıyla plastik, deri, kâğıt, boya ve yapı malzemeleri gibi maddelere kolaylıkla etki edebilmektedir [47].

4.1. Radon gazının kaynakları ve taşıyıcıları

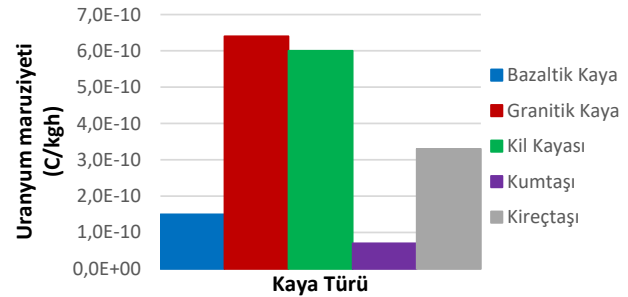
Radonun (^{222}Rn) artan konsantrasyonlarda olduğu ortamlar, radon eğilimli alanlar veya radon potansiyeli yüksek alanlar olarak anılmaktadır. Bir ortamda ^{222}Rn aktivite konsantrasyonunun ortalamasının üzerinde değerlerinin oluşması büyük ölçüde bölgenin jeolojik yapısıyla ilgilidir. Belirli bir alanın radon potansiyeli; litolojiye, kayaların petrografik tipine, mineral ve kimyasal bileşimlerine, litosferdeki kaya tabakalarının düzenine, bunların yer altı suları ve atmosferik, tektonik ve termal faktörler tarafından değiştirilme derecesine, bölgenin sismik ve magmatik aktivitesi ve insanın jeomühendislik (özellikle madencilik) faaliyetlerine bağlıdır [45]. Aşağıdaki paragraflarda önemli radon kaynakları ve taşıyıcıları ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

4.1.1. Toprak ve kayalardan gelen radon

Radon gazının en önemli kaynağı kayalar ve kayalardan türeyen topraktır. Radon gazı, oluşumuna neden olan Ra, U ve Th bakımından zengin içeriğe sahip olan toprak ve kayalardaki çatlaklardan sızma suretiyle atmosfere doğru kaçış eğilimi sergiler [48,49]. Radon miktarını U miktarı doğrudan etkilemekte olup topraktaki U konsantrasyonu değişkenlik gösterdiği için radon konsantrasyonu da değişkendir [50]. Şekil 7'de farklı kaya tiplerinde bulunan U konsantrasyonları verilmiştir.

Örgün ve Çelebi'ye göre [51] "kayalar, U ve 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). Bu asitik granitik ve volkanik kayaçların metamorfik 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, kuvars diyorit, vd), bunların damar kayaçlarının (pegmatit ve aplit gibi) ve volkanik kayaçların (riyolit, andezit, trakit gibi) bulunduğu bölgelerde radon gazı riski çok daha yüksek olacaktır. Bu tip kayalarla kaplı bölgelerde kayaçlar tektonik açıdan örselenmişse, fay zonu veya zonları içeriyorsa, kayaçlar altere olmuşsa (özellikle kimyasal alterasyon) ve bölgede yer altı su seviyesi de yüksekse, radon gazı riski daha da yükselmektedir. Radyasyon ve radon açısından bir diğer önemli kayaç ve toprak türü ise fosfatlı kayaçlardır. U 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. Bu açıdan diğer önemli alanlar ise asitik kayaçlarla ilişkili olarak bu kayalarda gelişmiş hidrotermal alterasyon zonları, maden sahaları ve bu kayaçlarla kontak hâlindeki karbonatlı kayaçlar ve kum taşları ile kaplı alanlardır".



Şekil 7. Farklı kaya tiplerinin uranyum maruziyetleri [59]

Farklı ülkelerde yapılan araştırmalarda Şekil 7'de verilen sonuçlara benzer bulgular elde edilmiştir. Macaristan'da en yüksek radon konsantrasyonu değeri, granitik kayaçların başkalaşması sonucu oluşan gnays kayasında belirlenmiştir [52]. Çek Cumhuriyeti [53] ve Portekiz'de [54] yapılan çalışmalarda ise en yüksek radon gazı konsantrasyonu granit kayaçlarında görülmüştür. Özellikle magmatik kayaçlarla ilgili olarak, U oluşumunun granit gibi kristalin kaya türlerinde daha yaygın görüldüğü belirtilmiştir [55]. İspanya'nın kuzeybatısında bulunan Galiçya'nın, yer altı tabakasının granitik yapısı nedeniyle tüm İspanya'da en yüksek kapalı alan radon konsantrasyonuna sebebiyet verdiği bildirilmiştir [56]. Kentucky'de (ABD) yapılan çalışmada ise en yüksek radon seviyesine sahip jeolojik oluşum türünün, kireç taşı olduğu tespit edilmiştir [57]. Ayrıca karbonatlı kayalar gibi bazı tortul kayaçların da radon gazı göçünü artırdığı ifade edilmiştir [58].

Radon gazının yayılımı üzerinde; toprağın sahip olduğu gözenek büyüklüğü, geçirimsizliği, nem oranı, sıcaklığı, U içeriği gibi faktörler etkili olmaktadır [9,60]. Geçirimsizliği yüksek topraklarda, radon gazı kolaylıkla yüzeye çıkabilmektedir. Toprak ve kayanın yüksek geçirimsizliği ile karakterize edilen aktif tektonik fayların, artan radon gazı yayılımının en önemli jeolojik kaynağı olduğu da vurgulanmıştır [61]. Konu üzerinde yapılan çalışmalarda [62], depremler oluşmadan birkaç saat ile birkaç haftaya kadar değişen bir sürede, fay zonlarında radon seviyesinin arttığı bildirilmiştir. Oh and Kim [63], Japonya'da radon seviyesinde yaşanan anormalliklerin, depremlerin öncüllerini belirlemek için yararlı bir araç olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir.

4.1.2. Sulardan gelen radon

Birçok ülkede içme suyu, kuyular ya da sondaj delikleri gibi yer altı suyu kaynaklarından elde edilmektedir. Bu bu kaynakları normalde rezervuarlardan, nehirlerden veya göllerden gelen

yüzey suyundan daha yüksek konsantrasyonlarda radon içerme-
mektedir [65]. Yer altı suları, akiferlerden elde edilmekte ve
temas ettikleri veya içinden geçtikleri Ra bakımından zengin
toprak ve kayalardan dolayı radon konsantrasyonları da yük-
sek olabilmektedir [66]. Buna karşın, yüzey suyundaki radon
konsantrasyonu, granit, kum ve çökeltilerin bulunduğu yer altı
suyuna kıyasla havaya salımı nedeniyle genellikle düşüktür
[67]. Suyun sıcaklığı arttıkça, ortama verilen radon gazı mikta-
rı da artmaktadır [68]. İçme suyundaki yüksek radon konsant-
rasyonları ile ilişkili sağlık tehlikesi, çoğunlukla bina içi hava-
sında musluk suyundan boşaltılan radonun solunmasından ve
daha az ölçüde doğrudan yutulmasından kaynaklanmaktadır.
ABD’de yapılan bir çalışmada [69], kamunun kullandığı büyük
su kaynaklarına göre, küçük ve özel amaçlı kuyu kaynaklarında
daha yüksek oranda radon gazı görülmüştür. Bunun nedeni-
nin, küçük ve özel amaçlı kuyu kaynaklarının genelde U barın-
dıran granit, metamorfik kayalar veya fay zonlarının bulun-
duğu düşük kapasiteli akiferlerde olması, kamunun kullandığı
büyük su kaynaklarının ise genellikle daha düşük düzeyde U
içeriğine sahip çakıl ile kum akiferlerini kullanma eğilimini taşı-
ması olduğu bildirilmiştir.

4.1.3. Havadan gelen radon

Topraktan gelen Ra, havada bulunan radon gazının asıl kay-
nağını oluşturmaktadır [70]. Havadaki radon konsantrasyo-
nu, topraktaki Ra miktarına bağlı olmakla birlikte binalardaki
yapı malzemelerinden ve suda çözünmüş hâlde bulunan ra-
don gazının havaya karışmasından da etkilenmektedir [16].
Sudaki yayınıma kıyasla radonun havadaki yayınıma daha
yüksektir [11]. Ayrıca evlerde ısıtma veya yemek pişirme
amacıyla kullanılan doğal gazda bulunan radon gazı da ay-
rışıp havaya karışarak, havadaki radon konsantrasyonunu
artırabilmektedir [68].

4.1.4. Yapı malzemelerinden gelen radon

Doğal kaynaklı, yapay olarak üretilmiş veya yan ürün şeklin-
de kullanılan yapı malzemeleri, değişken miktarlarda doğal

olarak oluşan ²³⁸U ve ²³²Th bozunma zincirlerine ait radyo-
nüklitler içermektedir. Bu radyonüklitler arasındaki gama
ışınları, bina sakinleri için dış maruziyetleri oluştururken
(bina dışı radyasyon kaynağı), serbest kalması sonucunda
solunum yoluyla vücuda girebilen radon ve bozunma ürün-
lerinden açığa çıkan alfa ışınları da iç maruziyetleri (bina içi
radyasyon kaynağı) oluşturmaktadır [71]. Özellikle bina içi
radon konsantrasyonları üzerinde binaların inşa edildikleri
zeminlerin (toprakların) niteliklerine ek olarak yapı malzeme-
leri ve yapım yöntemleri de önemli etkiye sahiptir [72]. Yapı
malzemelerinin radon geçirimsizliği, bina içi radon seviyesini
belirleyen hayati bir etken olarak görülüp, radon gazının zem-
in ve temeldeki çatlaklardan odalara girdikten sonra içeri-
de hapsoldüğüne dikkat çekilmiştir [73]. Yapı malzemelerin-
den gelen radon gazının düzeyini ²³⁸U ve/veya ²²⁶Ra içeriği,
meteorolojik ve iklimsel parametreler, havalandırma oranı
gibi pek çok özellik etkilemektedir [74].

Bina içi radon konsantrasyonuna yapı malzemelerinin katkısı-
nın 10 Bqm⁻³ olduğu belirtilmektedir [70]. Dünyada yıllık orta-
lama radon konsantrasyonunun yaklaşık 40 Bqm⁻³ seviyesinde
gerçekleştiği göz önüne alındığında [75], yapı malzemelerinin
kapalı ortam radon konsantrasyonuna katkısının %25 merte-
besinde çıktığı görülmektedir [76]. AB ülkelerinde ise bu kat-
kının 10-20 Bqm⁻³ arasında olduğu tahmin edilmektedir [77].

Radon gazı yayınıma neden olan malzemeler; alüminli şeyl,
granitik kayalar, porfir, tüf, puzolan, lav, uçucu kül, fosfojips,
fosfor cürufu, kalay cürufu, bakır cürufu, alüminyum ve çelik
üretimi atıkları şeklinde sıralanmaktadır [76]. Bu malzemeler
ile birlikte beton, çimento, tuğla, agregalar gibi çok kullanılan
yapı malzemelerinin radon gazı içeriği ve yayınıma üzerinde
de çalışmalar yapılmaktadır [78-82].

Bazı yapı malzemelerinin ²²⁶Ra konsantrasyon değerleri Tab-
lo 3’te verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, alçı taşı ve granit,
diğerlerine göre daha yüksek ²²⁶Ra kons. sahiptir.

Tablo 3. Çeşitli ülkelerdeki bazı yapı malzemelerinin ²²⁶Ra konsantrasyonları [68]

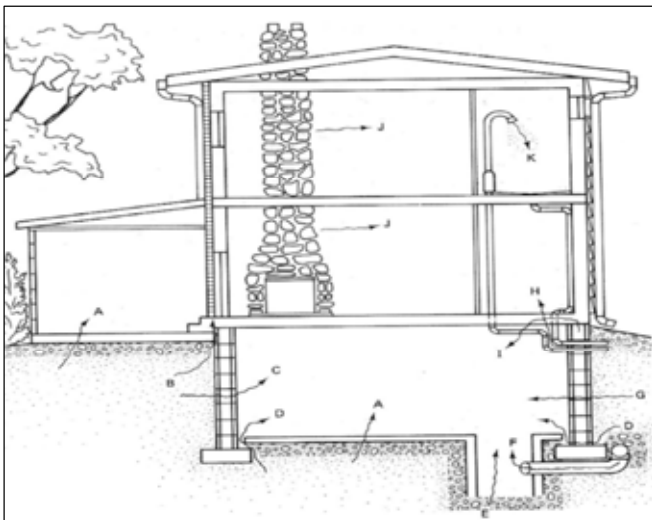
Malzeme Adı	²²⁶ Ra Kons. (Bqm ⁻³)	Ülke	Malzeme Adı	²²⁶ Ra Kons. (Bqm ⁻³)	Ülke
Beton	26 66,6	Norveç Almanya	İnce agregası	23,3	Rusya
Çimento	44,4 55,5 44,4	Rusya İngiltere İsveç	İri agregası	102 48,1 51,8	Finlandiya İsveç İngiltere
Tuğla	51,8 18 55,4 96,3 96,2 104	İngiltere Polonya Rusya İsveç Almanya Norveç	Granit	96,2 111 88	Almanya Rusya İngiltere
			Alçı taşı	1480 580-740 777 15,5-54,5	ABD Polonya İngiltere Almanya

Uranyum içeriği zengin olan yapı malzemeleri bina içi için potansiyel radon gazı yayıcıları olarak nitelendirilmektedir [83].

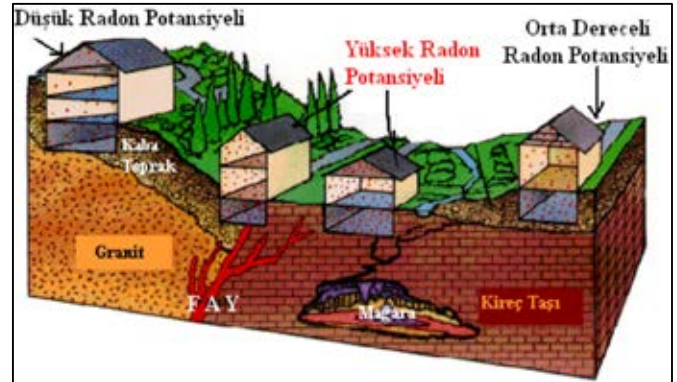
4.2. Radon gazının binalara girişi

Yukarıda açıklanan kaynaklardan gelen ve havadan daha ağır olan radon gazı ile bu gazın bozunma ürünleri binaların içerisinde birikme eğilimi göstermektedir [84]. Binalar, her ne kadar dış ortamdan gelen radyasyonun bir kısmının yapı içerisine girmesini engellese de yapı malzemelerinde ve yapının bulunduğu zeminde var olan radyonüklitler nedeniyle bina içi radyasyon düzeyi, dış ortama oranla çok daha yüksek düzeyde gerçekleşebilmektedir [7]. Toprakta gelen radon gazı, yapının temelinde var olan boşluk ve çatlaklardan bina içerisine sızabilmektedir [85]. Ayrıca malzemelerin içerdiği Ra miktarı, binanın yüksekliği ve yapının oturduğu zeminlerin geçirimsizliği gibi parametreler de bina içi radon gazı düzeyini etkileyen faktörlerdendir [86]. Radon gazının bina içerisine giriş mekanizmaları Şekil 8'de verilmiştir.

Diğer taraftan, bölgedeki toprağın geçirimsizliği, yapısı, kayaların U içeriği, toprağın kurak mevsimlerde derin çatlaklar oluşturması, toprak tabakasının sıklığı ve hemen altındaki tabakanın kayalık olması, bölgenin eğimli veya tepelik bir yerde olması, kireç taşı mağaralar içermesi, zemindeki kayaların kırık olması, havadaki radon konsantrasyonunun yüksek oranda olması gibi faktörler radon potansiyelini etkilemektedir [16]. Bu faktörlerin bina içi radon potansiyelini etkilemesi Şekil 9'da şematik olarak gösterilmiştir.



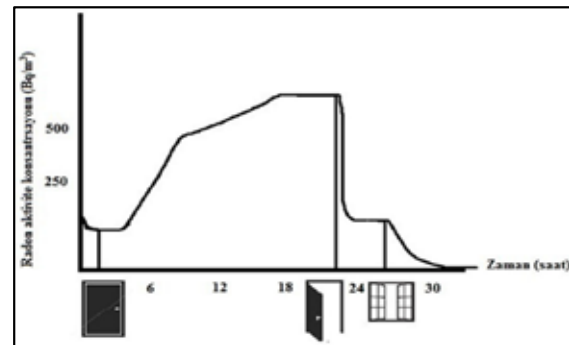
Şekil 8. Radon gazının bina içerisine giriş mekanizmaları; A, beton plaklardaki çatlaklar; B, içi boş blok temel üzerine oturan tuğla kaplama duvarların arkasındaki boşluklar; C, beton bloklardaki gözenekler ve çatlaklar; D, Taban-duvar birleşim yerleri; E, çukur gibi açıkta kalan toprak; F, künlü drenaj; G, harç derzleri; J, bazı kayalar gibi yapı malzemeleri; K, bazı kuyulardan gelen su [87]



Şekil 9. Radon potansiyelini etkileyen faktörler [16]

4.3. Bina içi radon gazı konsantrasyonuna havalandırmanın etkisi

Radonun, iç mekân hava kirliliği üzerine etki eden başlıca etmenlerden biri olduğu kabul edilmektedir [88]. İç mekân radon konsantrasyonu üzerinde havalandırmanın önemli bir rol oynadığı [89], radona maruz kalma riskini azaltmak için binalara havalandırma yapılarak doğru havalandırma sistemlerinin kullanılması gerektiği [90], iyi havalandırılmayan binalarda radon gazının çok daha fazla miktarda birikebildiği [91] belirtilmiştir. Şekil 10'da kapı ve pencerelerden yapılan havalandırma işlemleri sonucu bina içindeki radon gazı konsantrasyonunun değişimi grafize edilmiştir.



Şekil 10. Radon gazı ve havalandırma arasındaki ilişki [92]

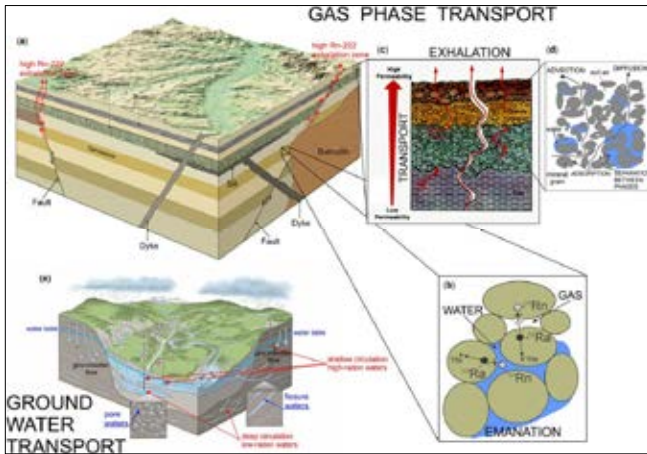
Norveç'te verimli bir havalandırma sistemi kullanılarak, evlerde iç mekân radon konsantrasyon düzeyleri 200 Bqm⁻³'ün altına düşürülmüştür [93]. Irak'ta kapalı ortamlarda gerçekleştirilen radon konsantrasyonu ölçümlerinde, havalandırma yapılmayan odalarda radon gazının birikerek ortalama 440 Bqm⁻³ seviyesine ulaştığı, havalandırma yapılmış odalarda ise ortalama radon konsantrasyonu değerinin 17 Bqm⁻³'e kadar düştüğü bildirilmiştir [94]. Xie et al. [95]'ün yaptığı çalışmada ise kapalı bir ortamda ilk 2 saat içerisinde radon konsantrasyonu artışının doğrusal olduğu, ortam 8 saat kapalı tutulduğunda 434 Bqm⁻³ değerinde dinamik denge durumunda bir radon konsantrasyonuna ulaşıldığı, iç mekânın üst ve orta

kısının alt ve çevredeki alana göre daha az radon konsantrasyonuna sahip olduğu, eğer ortam 20 dk havalandırılırsa (stabilizasyon süresi) radon konsantrasyonunun 150 Bqm⁻³e düşeceği belirtilmiştir.

Yüksek binalarda iç mekân radon konsantrasyonunu etkileyen faktörleri araştırmak için 14 oda ve ofiste uzun vadeli radon zaman serilerinin analiz edildiği bir çalışmada [96], düşük insan aktivitesi olan odalar için, radon konsantrasyonu dinamiklerini etkileyen ana faktörün, dış ve iç hava arasındaki sıcaklık farkı olduğu belirlenmiştir. Normal insan aktivitesine sahip odalarda ise hem radon konsantrasyonunun hem de bu değerin değişim katsayılarının, günün belirli saatlerinde evde yaşayanların aktivitesine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Çoğu durumda, önemli ve sürekli bir radon azaltımı elde etmede aktif havalandırma tekniğinin; sızdırmazlık, membran, basit havalandırma veya filtrasyon gibi pasif yöntemlerden daha etkili olduğu belirtilmiştir [97].

4.4. Radon gazı taşınım mekanizması

Ana ²²⁶Ra'nın nükleer dönüşümünün bir sonucu olarak oluşan radonun (²²²Rn); taneler, kristaller veya kayaç oluşturan minerallerdeki oluşum yerlerinden gözenek boşlukları ve/veya kaya çatlaklarına yayılması ya da difüzyon, adveksiyon veya yer altı suları ile litosferin yüzeyine doğru göç etmesi durumunda yüksek radon potansiyeline sahip alanlar oluşur [45]. Radon taşınımının şematik gösterimi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. ²²²Rn'nin litosferden atmosfere salım sürecinin gösterimi. (a): Radonun taşınımında fay zonlarının rolünün ve bu gazın atmosfere daha fazla yayıldığı bölgelerin gösterimi. (b): Yayılma sürecinin gösterimi (yani ²²²Rn atomlarının, ²²⁶Ra çekirdeklerinin alfa bozunması sonucu oluştukları mineral tanelerinden salımı). (c)&(d): Difüzyon, adveksiyon (konveksiyon) ve CO₂ ve CH₄ gibi diğer jeojenik gazların akışı sonucunda ²²²Rn'nin gözenek boşluğundan ve kaya çatlaklarından atmosfere taşınması. (e): Çatlak sularını biriktiren kristalin kayalardan ve boşluk suyu rezervuarları görevi gören tortul

kayalardan oluşan jeolojik yapılarda radon içeren yeraltı sularının oluşması [45].

Radon gazının atmosfere geçebilmesi, toprak ya da kaya zeminin gözenekleri arasında yayılması ile mümkündür. Örneğin, killi birimlerde radon geçirgenliği düşük iken, radon geçiş oranı silt, çakıl dolgu ve dolgu zeminlere doğru giderek artar. Yapılan hesaplamalar göstermiştir ki topraktan gelen radyoaktifitenin yalnızca küçük bir yüzdesi çatlaksız betona sızar. Şayet beton tabakada çatlak varsa gelen aktivitenin %25'i yayılma yolu ile beton tabakaya, oradan da bina içine aktarılmaktadır. Doğal zeminden radon salımı oranı; i) zemini oluşturan kayaç ya da topraktaki ²²⁶Ra miktarı, ii) radyumun bozunma oranı ve radon gazının yayılma gücü, iii) toprağın geçirgenliği (porozite, permeabilite, yoğunluk, vb), iv) toprağın durumu (kuruluk, nem içeriği, suya doymun olma, donma, karla örtülü olma durumu, vb), v) meteorolojik koşullar (toprak ve hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgâr hızı, rüzgârın yönü, vb) ve vi) bölgenin yüksekliği (rakım) etkenlerine bağlı olarak değişir [51].

Yayımlama prosesi ile radon gözenekli malzeme içerisine girdikten sonra, üretilen radon atomlarının bir kısmı bir akışkan tarafından taşınabilmektedir. Yapı malzemelerinde radon taşınması, üç süreci içeren genel bir süreklilik denklemiyle tanımlanır: moleküler radon difüzyonu, radon bozunması ve radon üretimi. Moleküler difüzyon, radon atomlarının salım (eksalasyon) işlemiyle atmosfere ulaşmasını sağlar. Bu tür malzemede düşük basınç değişimi nedeniyle adveksiyon süreci ihmal edilebilir. O hâlde zamana bağlı kısmi diferansiyel denklem aşağıdaki biçimde yazılabilir [145]:

$$\beta \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) - \beta \lambda C + S \quad (2)$$

Burada; β bölünmeyle düzeltilmiş porozite, C gözenekler içindeki radon konsantrasyonu (Bqm⁻³), D yığın difüzyon katsayısı (m²h⁻¹), S birim hacim başına radon üretim hızı (Bq m⁻³h⁻¹) ve λ radonun bozunma sabitidir (h⁻¹ başına).

Gözenek S havasındaki radon üretim hızının uzay ve zamanda sabit olduğu varsayılır. Bu durumda radon üretim hızı için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$S = \lambda C_{Ra} \rho_{mat} \eta \quad (3)$$

Burada ise; C_{Ra} malzemenin birim kütlesi başına ²²⁶Ra konsantrasyonu (Bqkg⁻¹), ρ_{mat} malzemenin yığın yoğunluğu (kgm⁻³) ve η radon yayılma katsayısıdır.

Collins [98] da gözenekli ortamda radonun taşınımını Fick difüzyon yasası ile açıklamaya çalışmıştır.

4.4. Radon konsantrasyon limitleri

Radon gazının kapalı ortamlardaki ölçümüne yönelik çalışmalar 1956'da İsveç'te başlatılmıştır [99]. Ancak bazı lokasyon-

larda çok yüksek konsantrasyon değerleri elde edilmesine rağmen, ölçüm bölgesine özel bir durum olduğu düşünülerek konu üzerinde çok fazla durulmamıştır [100]. 1980'li yıllar ile birlikte tüm dünya genelinde radon gazı yayılımı ve ölçüm yöntemlerine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Hem ülkeler bazında hem de uluslararası kuruluşlar tarafından kapalı ortamlarda radon gazının konsantrasyonunun kontrol edilmesi amacıyla sınır değerler belirlenmeye çalışılmış ve bu değerlerin aşılması durumunda radon gazı konsantrasyonunu düşürebilmek için önlem alınması tavsiye edilmiştir. Uluslararası kuruluşlar ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından belirlenen radon konsantrasyon limit değerleri Tablo 4'te özetlenmiştir. Tablodaki veriler 2019 yılına ait olup yeni araştırma sonuçlarına göre güncellenebilmektedir.

Tablo 4. Çeşitli kuruluşlar tarafından kabul edilen radon kons. limitleri [32,13,77]

Kuruluş	Tavsiye Edilen Limitler (Bqm ⁻³)	
	Ev	İşyeri
WHO	<100*	-
EC, ICRP	<300	<1000
IAEA	200-600	-
TAEK	<400	<1000

*Bu değere mevcut ülke koşulları altında ulaşamıyorsa limit değerinin 300 Bqm⁻³'ü aşmaması istenmektedir [184].

WHO: Dünya Sağlık Örgütü, EC: Avrupa Komisyonu, ICRP: Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu, IAEA: Uluslararası Atom Enerji Ajansı Temel Güvenlik Standartları, TAEK: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (2000'de Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK)'a bağlandı).

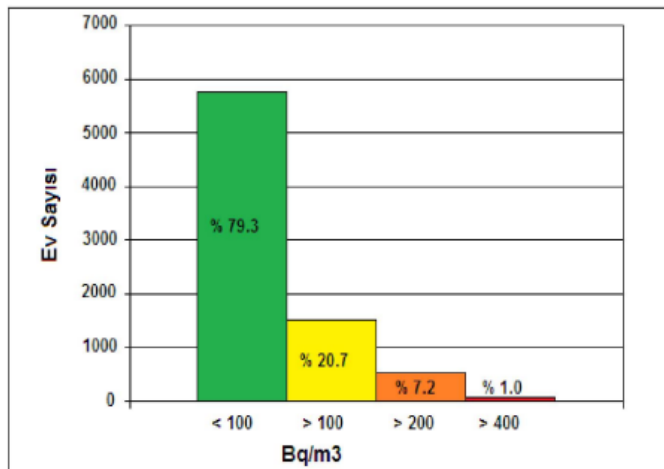
Radon gazı limit değerleri ülkeden ülkeye de değişiklik göstermektedir (Tablo 5). Tablo 5'de verilen değerlerden bir takım ülkeler (Hollanda, Norveç, Danimarka, İsveç ve Kanada) ev ve işyerleri için düşük konsantrasyon değerleri (150±50 Bqm⁻³) belirlemişken bir çok ülkenin 300 Bqm⁻³ değerini limit olarak belirlediği görülmektedir.

Tablo 5. Ülkeler tarafından kabul edilen radon konsantrasyonu limitleri [101]

Ülke	Limit Değerler (Bqm ⁻³)		Ülke	Limit Değerler (Bqm ⁻³)	
	Ev	İşyeri		Ev	İşyeri
Hollanda	<100	<100	İspanya	<300	<300
Norveç	<100	<100	Portekiz	<300	<300
Danimarka	<100	<100	Bulgaristan	<300	<300
İsveç	<200	<200	Bahreyn	<300	<300

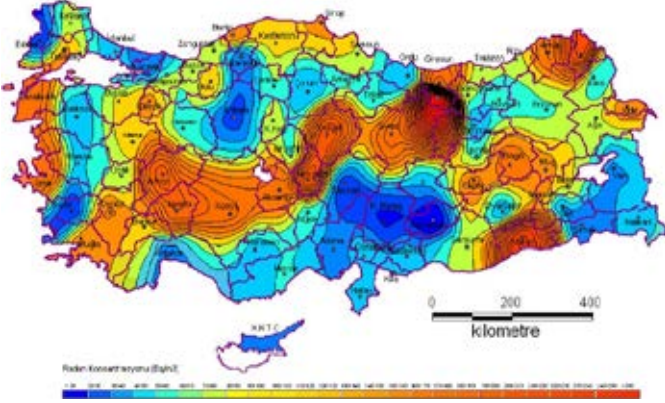
Ülke	Limit Değerler (Bqm ⁻³)		Ülke	Limit Değerler (Bqm ⁻³)	
	Ev	İşyeri		Ev	İşyeri
Kanada	<200	<200	Avustralya	<200	<1000
Birleşik Krallık	<200	<300	Belarus	<200	<1000
Letonya	<200	<400	Gürcistan	<200	<1000
Avusturya	<300	<300	Brezilya	<300	<1000
Belçika	<300	<300	Türkiye	<400	<1000
Çek Cum.	<300	<300	Sırbistan	<400	<1000
Finlandiya	<300	<300	Arjantin	<300	-
Fransa	<300	<300	Çin	<300	-
Almanya	<300	<300	ABD	<148	<3700
Yunanistan	<300	<300			

2014 yılı TAEK-Teknik Raporu'nda [102] 81 ilde 153 yerleşim biriminde toplam 7293 konutta yapılan radon konsantrasyon ölçümleri sonuçlarına göre Türkiye radon konsantrasyonu aritmetik ortalaması 81 Bqm⁻³tür. Yaz ortalamasının 65 Bqm⁻³, kış ortalamasının 93 Bqm⁻³ olarak belirlendiği çalışmada az da olsa (%1) üst limiti (400 Bqm⁻³) aşan evlere de rastlanılmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Radon konsantrasyonu düzeylerinin yüzde düzeyleri [102]

Adı geçen Teknik Rapor'da ülke genelinde radon konsantrasyonu dağılım haritası da verilmiştir. Şekil 13'te verilen bu haritadan da görülebileceği gibi, radon konsantrasyonu bakımından şehirlerimiz birbirinden farklılık arz etmektedir.



Şekil 13. Türkiye'de şehir bazlı radon konsantrasyon dağılım haritası [102]

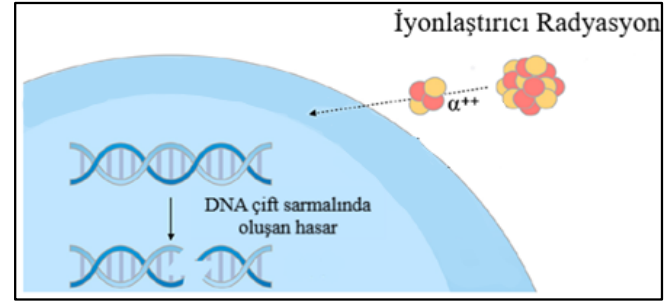
4.5. Radon gazının sağlık üzerine etkileri

Yeryüzündeki canlı ve cansız varlıkların tamamı su, hava, toprak hatta kendi vücutları içindeki doğal radyasyon kaynakları ile insanlar tarafından üretilen yapay radyasyon kaynaklarının tehdidi altındadır [48]. 19. yüzyılın sonlarına kadar radyasyona maruziyet doğal kaynaklardan dolayı gerçekleşmişken, son 120 yılda artan bir hızla bu durum değişmiş ve bazı ülkelerde yapay kaynaklardan alınan radyasyon, doğal kaynaklardan alınan radyasyonu aşmıştır [84].

Radon gazı, yer kabuğundan kolaylıkla sızarak radon ürünleri adlı kısa ömürlü parçacıklara bozunmaktadır. Kısa ömre sahip olan bu parçacıklar, 5,48 MeV enerjili alfa ışını yaymaktadır [103]. Bu ışınlar elektriksel olarak yüklü olup özellikle kapalı ortamdaki toz parçacıklarına tutunabilmekte ve solunum yoluyla vücuda girip akciğere yapışabilmektedir [104]. Diğer taraftan, radon gazının atmosfere dağılmasıyla birlikte katı radon ürünleri suda ve toprakta depolanmakta ve yiyecek zincirine dâhil olmaktadır [105].

Kaynağıdan gelen radon gazı, bina içindeki çatlaklar/boşluklar boyunca sürekli bir şekilde göç etmektedir [106]. Nihayetinde, malzeme yüzeyinden 3.82 günlük yarılanma ömrü ile radon (^{222}Rn) gazı ortamdaki havaya salınımıyla, belli bir süre iç ve dış havada kalmaktadır [107]. Dış ortamda radon gazı, insan sağlığını etkilemeyecek şekilde hızla seyrelmektedir [42]. Ancak ev, okul binaları gibi kapalı alanlara radon gazı girdiğinde, insan sağlığını etkileyecek düzeye ulaşabilmektedir [108]. WHO rehberinde [109] radon gazının solunum

vasıtasıyla akciğerlere ulaştığında radonun kısa ömürlü bozunma ürünleri (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) tarafından oluşan iyonlaştırıcı alfa ışınlarının biyolojik doku ile etkileşime geçip DNA'nın tahrip olmasına yol açtığı belirtilmiştir. Bu da kansere giden olaylar zincirinin ilk halkasını oluşturmaktadır [110]. Radyasyonun en belirgin etkisi hücre ölümü veya mutasyonla sonuçlanan kromozomal kırılmalar oluşturmaktadır. Şekil 14'te radon kaynaklı iyonlaştırıcı radyasyon parçacığı olan alfa (α) ışınının, DNA çift sarmalında yaptığı hasar gösterilmiştir.



Şekil 14. Radon kaynaklı alfa (α) ışınının DNA çift sarmalında yaptığı hasar [111]

Radon gazı, hiç sigara içmemiş kişiler arasında akciğer kanserinden sorumlu ana faktör olarak görülmektedir [112]. Görünmez katil (invisible killer) ifadesiyle de tanımlanan radon gazı akciğer kanserinin sigaradan sonra ikinci en önemli sebebi olarak kabul edilmektedir [86,109]. WHO rehberinde [109], radondan kaynaklanan akciğer kanseri vakalarına sigara kullanan bireyler arasında da rastlandığı, bu durumun nedeninin radon ile sigara kullanımı arasındaki karşılıklı etkileşimden kaynaklandığı belirtilmiştir. Radon nedeniyle sigara içenlerin, sigara içmeyenlere göre 25 kat daha fazla risk altında olduğu tahmin edilmektedir.

Akciğer kanseri, dünya çapında en yaygın ve agresif kanserlerden biri olup [113] kansere bağlı ölümlerin önde gelen nedeni olarak bilinmektedir [114]. Ayrıca akciğer kanserinin dünyada erkeklerde birinci, kadınlarda da üçüncü en sık görülen kanser türü olduğu açıklanmıştır [115]. Radon maruziyeti ile akciğer kanseri riski arasındaki ilişki, ilk önce 1924 yılında hazırlanan bir otopsi raporuyla bir madencinin ölüm nedeni olduğunun belirlenmesiyle ortaya çıkmıştır [116]. İlerleyen yıllarda yapılan bilimsel çalışmalardan elde edilen bulgular, kapalı mekânlarda yüksek bir radon gazı konsantrasyonunun akciğer kanseri [117] ve tümör mutasyon yükü [118] ile ilişkili olabileceğini doğrulamıştır. Nyhan et al. [119], radon kaynaklı parçacık radyoaktivitesinin, kan basıncı ve kalp damar hastalıkları ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Loiseau et al.

[120], uzun süreli radon maruziyetinin genleri etkileyip, insan bronşiyal epitel hücrelerinde (vücudun iç ve dış yüzeyini örten hücreler) kötü huylu dönüşümü tetiklediğini bildirmiştir. Walczak et al. [121], periferik (çevresel) lenfositlerdeki DNA hasarının, kapalı alanlarda radon konsantrasyonunun yükselmesine paralel olarak arttığını ifade etmiştir. Papatheodorou et al. [122], radon maruziyeti sonucunda özellikle genç yaş gebeliklerde, hipertansif gebelik bozukluklarının oluştuğunu bildirmiştir. WHO [123]'ye göre, radon gazı dünyadaki akciğer kanseri vakalarının %3-14'ünden sorumlu olup uzun süreli ortalama radon konsantrasyonundaki her 100 Bqm⁻³ artış için akciğer kanseri riski de yaklaşık %16 artmaktadır. 2019 yılında dünya genelinde kapalı mekân radon gazının neden olduğu akciğer kanserinden dolayı 84.000 ölüm gerçekleşmiştir [124]. Avrupa Birliği genelinde, her yıl yaklaşık 20.000 akciğer kanseri ölümünden kapalı mekânlardaki radon gazının sorumlu olduğu ve İrlanda'da tüm akciğer kanseri vakalarının %14'ünün de radondan kaynaklandığı açıklanmıştır [125]. Radonun, ABD'de yılda 20.000 ölüme, Norveç'te ise yılda yaklaşık 300 ölüme sebebiyet verdiği rapor edilmiştir [112].

Diğer taraftan, iyonizan radyasyonun mutajenik etkileri 1920'li yıllardan beri bilinmekle birlikte, düşük doz radyasyonun tıpta terapötik (tedavi edici) işlemlerde kullanılabilirliğine dair bir takım kanıtlar ortaya koyan araştırmacılar da vardır. İki taraf da teorilere yaslanmaktadır. Bir taraf 1959'da International Commission on Radiological Protection (ICRP) tarafından geliştirilen lineer eşiksiz model'i (linear no-threshold model, LNT) diğer taraf ise Yunanca "uyarmak" anlamındaki "hormon" kelimesinden türetilmiş olan "hormesis" kelimesini içeren radyasyon hormesis teorisi'ni kendisine dayanak edinmektedir. LNT modeli, küçük de olsa her radyasyon dozunun her zaman kansere neden olma ve genetik etkiler yaratma olasılığının bulunduğu ileri sürerken; radyasyon hormesis teorisi, iyonizan radyasyonun düşük dozları ile oluşturulabilen uyarıcı ya da faydalı etkiler olabileceğini iddia etmektedir. Buradan, radonun insan organizması üzerindeki yararlı veya zararlı etkisi de hâlâ çözümlenememiş bir tartışma konusu olduğu söylenebilir [45, 126]. Bununla birlikte, radonun radyoaktif karakteri ve alfa-radyoaktif bozunmasının diğer radyonüklitlerin kaynağı olması nedeniyle, tedavi amaçlı kullanımının ciddi şüpheler doğurduğunu ve yukarıdaki paragraflarda belirtildiği gibi yüksek radon konsantrasyonunun kanserojen etkisinin kanıtlandığını belirtmek gerekir.

Radondan kaynaklanan risk ve tehlikeleri azaltmaya yönelik alınabilecek önlemler için birçok çalışmada [örneğin

10,51,105,109,127] öneride bulunulmuştur.

4.7. Radon gazı aktivite konsantrasyonu ölçüm yöntemleri

Radon ölçüm teknikleri ile ilgili birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlar; aktif kömür ile ölçüm, iyonizasyon odası, kolektör yöntemi, Lucas hücresi, elektrostatik toplama, katı hal iz kazıma dedektörleri, elektret iyon odaları, sürekli radon monitörleri yöntemleridir [13,128]. Bu yöntemlerin büyük çoğunluğunun temel prensibi, radonun bozunma ürünlerinden ortaya çıkan alfa parçacıklarının sayımına dayanmaktadır. Radon gazı tatsız, kokusuz, renksiz ve radyoaktif bir gaz olduğundan dolayı duyu organlarıyla hiçbir şekilde tespit edilememekte yalnızca geliştirilmiş özel tekniklerle ölçümler yapılmaktadır [129].

Radon gazı aktivite konsantrasyonu ölçüm yöntemlerini ise aktif ve pasif olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür [70]. Bu yöntemler ile ilgili aşağıda bilgiler verilmiştir.

4.7.1. Aktif ölçüm yöntemi

Kapalı ortamdaki radon konsantrasyonunu ölçmede kullanılan en pratik yöntem olan aktif ölçüm tekniği ile anlık radon ölçümleri yapmaktır [130]. Ölçülecek ortamdan hava numunesi alınıp bu numune içerisinde var olan radyasyon miktarı bir radyasyon sayacı ile sayılarak hesaplama yapılmaktadır. Bu ölçüm yönteminde kullanılan aletlere; sintilasyon hücresi, elektrostatik toplayıcılar ve filtreler örnek verilebilir. Bu aletlerin özelliği, toprakta, suda, havada ve yapı malzemelerindeki ölçüm için ekipman (su için kit, toprak için prop) desteği verebilmesidir [131]. Genellikle kısa süreli ölçümler ve numune almaya yönelik çalışmalarda kullanılan bu yöntem, binaların içerisindeki atmosferik radon yoğunluklarının ölçülmesinde çok tercih edilmemektedir. Çünkü sıcaklık, nem, basınç gibi öğelerden çok etkilenebilen radon gazı konsantrasyonu kısa süreler içerisinde önemli değişimler gösterebilmektedir [132].

4.7.2. Pasif ölçüm yöntemi

Bu yöntemde ise ölçümü yapılacak ortamlara konulan nükleer iz dedektörleri ile uzun süreli (günlük, aylık, mevsimlik veya yıllık) radon gazı konsantrasyonu ölçülmektedir [133]. Pasif ölçüm yöntemi sonucunda radon gazı için ortalama bir değer elde edilir [134]. Yöntemde kullanılan nükleer iz dedektörleri genellikle polikarbonat, selüloz asetat, alil diglikol karbonat gibi plastik kökenli film tabakalarından meydana gelmektedir [135]. Ölçüm işlemi, bu plastik tabakalara çarpan alfa parçacıklarının bırakmış olduğu gözle görülemeyen izlerin, kimyasal iz kazıma (etching) yöntemi ile netleştirile-

rek bir mikroskop aracılığıyla sayılması esasına dayanmaktadır [136]. Bina içi ortamlarda, madenlerde, yer altı metro istasyonlarında, mağaralarda radon gazı konsantrasyonunun belirlenmesi için bu yöntem kullanılabilir [8]. Pasif ölçüm yönteminde sıklıkla katı hâl nükleer iz dedektörleri (selüloz nitrat (LR-115), alil diğlikol karbonat (CR-39)) tercih edilmektedir [68].

Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) üye ülkelerce en çok tercih edilen radon gazı ölçüm cihazları ile ilgili bilgiler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Radon gazı ölçüm cihazları ve uygulanan yöntemlerin özellikleri [109]

Dedektör Tipi	Yöntem Adı	Belirsizlik* Aralığı (%)	Tipik Örneklem Periyodu	Maliyet
Alfa İz Dedektörü	Pasif	10-25	1-12 ay	Düşük
Aktif Kömür Dedektörü	Pasif	10-30	2-7 gün	Düşük
Elektret İyon Odası	Pasif	8-15	5 gün-1 yıl	Orta
Elektronik Entegre Cihazı	Aktif	~25	2 gün-birkaç yıl	Orta
Sürekli Radon Monitörü	Aktif	~10	1 saat-birkaç yıl	Yüksek

*Belirsizlik Aralığı (%), yaklaşık 200 Bqm⁻³ kadar maruziyet ile optimum maruz kalma süreleri içindir.

Düşük maliyeti ve örneklem periyodunun 12 aya kadar çıkabilme özellikleri nedeniyle alfa iz dedektörü çokça tercih edilen dedektör tipidir. Bununla birlikte, aktif ve pasif yöntemlerin karşılaştırılmasının yapıldığı bir çalışmada [137], önemli olanın ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, çalışmanın akılcı bir şekilde tasarlanması ve değerlerin raporlanmasında sıkı önlemlerin alınması olduğu bildirilmiştir.

5. Beton ve Binalarda Radon Gazı Ölçümü

Beton ve binalardaki radon gazı ölçümleri üzerine yapılan çalışmalar iki grupta toplanabilir: Radon salım hızı ve bina içi radon konsantrasyonu. Aşağıda literatürden elde edilen her iki yöntemle ilgili sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

5.1. Radon salım hızı (RSH)

Salım (eksalasyon), toprak biliminde, radyoaktif tuzların bozunması sonucu oluştukları toprağın veya gevşek kayaların yüzey katmanlarından radyoaktif gazların kaçması süreci olarak tanımlanmaktadır [138]. RSH ise sürekli radon gazı

monitörü kullanılarak aktif yöntemlerle ölçülen ve "radon akışı" olarak da ifade edilen bir değerdir [139]. Bu hız, hermetik kapaklı bir kap içindeki numunede zamanın bir fonksiyonu olarak gerçekleşen radon aktivitesinin ölçümü sonucu Bqm⁻²h⁻¹ veya Bqm⁻²s⁻¹ cinsinden belirlenir [140]. Örnek toz hâlinde ise salım hızı, Bqkg⁻¹h⁻¹ birimi ile verilir [141].

Beton yüzeylerden gerçekleşen RSH'nin ölçülmesi bazı çalışmalara konu edilmiştir. Üretildikten sonra 6-8 yıl boyunca periyodik olarak ölçümlerin yapıldığı bir çalışmada [142], RSH'nin betonun yaşına bağlı olduğu, hızın ilk 6-12 ayda 1,5 kat ile artış ile en yüksek değerine ulaştığı, bir yıldan sonra ise salım hızındaki değişimin düştüğü rapor edilmiştir. Ayrıca düşük nem koşullarının, betonun RSH'sini önemli ölçüde azalttığı vurgulanmıştır. Başka bir çalışmada [143] ise, betonda RSH'nin, %50-%60 nem içeriğine kadar neredeyse doğrusal olarak arttığı, %70-%80'de maksimuma çıktığı, daha yüksek nem içeriklerinde ise hızlı bir şekilde düştüğü belirtilmiştir. Döse and Silfwerbrand [144] ise bağıl nemin %80-85'in altında olduğu durumda UK katkılı beton numunelerin RSH'sinde yaklaşık %30-35'lik bir azalma olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Fournier et al. [145] gözenekli malzemelerde radon taşınımının suyun varlığından büyük ölçüde etkilendiğini deneysel ve nümerik olarak kanıtlamışlardır. Araştırmacılar, beton veya granit gibi düşük poroziteye ($\epsilon < 0.2$) sahip ortamlar için hem RSH hem de radon konsantrasyonunun hacimsel su içeriği %30'un üzerine çıkana kadar suyla keskin bir şekilde arttığını belirlemişlerdir. Bu noktada radon yayılımı, moleküler difüzyon sürecine kıyasla daha önemli rol oynamaktadır. Orta düzeyde ($0.3 < \epsilon < 0.45$) poroziteye sahip malzemeler için (ör. kireç taşı, tuğla, çimento) konsantrasyonun yaklaşık %10'luk hacimsel su içeriğine kadar arttığı ve daha sonra azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu durumda ise malzemedeki gözenek miktarının artması nedeniyle moleküler difüzyonun etkisinin daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Tüm bu sonuçlar, bir malzemedeki suyun varlığının etkilerinin büyük ölçüde malzemenin porozitesine bağlı olduğunu, su içeriğindeki artışın, küçük gözenekli ortamlar için radon atomlarının büyük miktarda solunmasına yol açabileceğini göstermektedir. Wang et al. [146] ise %0 su içeriğine sahip betonda, beton ile iç ortam havası arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle oluşan ısının, RSH'yı 2,6 kat artırabileceğini, su içeriğinin %10'a çıkarılması durumunda ise bu artışın 3,4 kata çıktığını belirtmişlerdir. De Jong et al. [147] da RSH üzerinde betonların boşluk yapısının etkisi olduğunu belirtmiş, buharlaşma hızı ve su/çimento oranının artması ile salım hızının da arttığını, buna karşın, basınç dayanımının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir.

Diğer taraftan, RSH'nin beton örneklerin yaşı ile birlikte azaldığı, örneklerin suya daldırıldıktan sonra ise arttığı gözlemlenmiştir [148]. De Jong et al. [149] tarafından yapılan başka bir çalışmada ise tüm karışımlarda, salınan radon miktarına ana katkıyı çimento miktarının yaptığı bulunmuştur. Bu çalışmada ayrıca hava sürükleyici katkı eklenmesi veya nehir çakılının geri dönüştürülmüş agregalarla değiştirilmesinin radon salımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı da belirlenmiştir. Kumar ve Chauhan [150] da kılcal porozitenin, radon salımında belirleyici bir rol oynadığı, porozitenin azalması ve nem içeriğinin artmasıyla betondaki RSH'nin azaldığı, ancak, bu hızın betonun yaşına göre değiştiğini ileri sürmüşlerdir. Georgescu [151] ise betonun radon difüzyon katsayısının, yoğunluğunun artışı ve su/çimento oranının azalışıyla düştüğünü bildirmiştir.

Kür süresi, uçucu kül (UK) ikamesi ve yaşın beton yüzeylerden radon salımına etkisinin incelendiği bir çalışmada [152] salım hızının, betonun yüzey ve iç gözenekleri ile bağlantılı olduğu, 28 günlük kür süresi sonucunda arttığı, UK'nin radon yayılma hızı üzerindeki etkisinin ise net olarak belirlenmediği ifade edilmiştir. Buna karşın, benzer nitelikteki bir diğer çalışmada [153] RSH'nin UK sayesinde azaldığı, optimum kül yüzdesinin ise %15 olduğu bildirilmiştir. Kovler et al. [154] ise malzeme nispeten yoğunsa, çimento hamurundaki UK dozajının RSH üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu rapor etmiştir.

Leonardi et al. [155], mineral katkı olarak kömür taban külü, iri agrega olarak ise kömür madeni çökeltme havuzlarından elde edilen taban çökeltilerini kullanılarak ürettiği beton numunelerde RSH ölçüm sonuçlarının numunelerin şekil ve boyutlarından bağımsız olduğunu ancak numunelerin yüzeyi ile kapalı odanın hacmi arasındaki oranın önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada RSH değerlerinin, 1.6-13.0 Bqm²h⁻¹ arasında değiştiğini, bu değerlerin ise birçok Avrupa ülkesinde ölçülen mineral katkılı beton sonuçları ile uyum gösterdiği ifade edilmiştir.

Chauhan and Kumar [156], daha düşük bir difüzyon katsayısı ve salım hızı elde etmek için çimentoya %30'a kadar silis dumanı (SD) eklenmesini önermişlerdir. Aynı araştırmacılar bir başka çalışmalarında [157] ise pirinç kabuğu külü ikameli betonların RSH'lerinin kontrol betonundan daha düşük çıktığını, difüzyonunu azaltmak için bu külün de %30'a kadar çimento ile ikame edilebileceğini belirtmişlerdir. Hatungimana et al. [158] ise SD ilavesinin yüzey RSH'yı %23-%43 arasında azaltırken, UK'nin %15'e kadar artırdığını bildirmişlerdir.

Yunanistan'da yaygın olarak kullanılan bir dizi yapı malzemesi üzerinde ölçülen radon salım hızlarının dünya genelinde

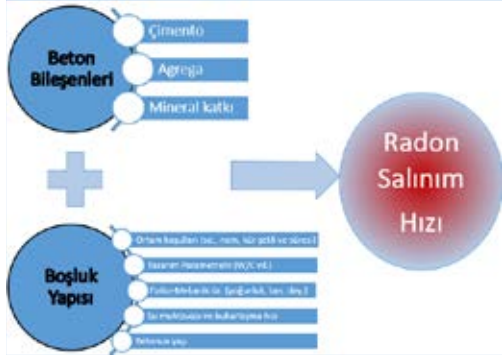
kabul edilen değerler arasında değiştiği ve granitten sonra en yüksek hızın betondan (0.037±0.022 Bqkg⁻¹.h⁻¹) elde edildiği belirtilmiştir [159]. İtalyan konutlarında kullanılan betondaki RSH değeri ise çok düşük düzeyde (0.0089 ± 0.0007 Bqkg⁻¹.h⁻¹) elde edilmiştir [160]. Mısır'da, betonun RSH'ı 14.33 Bqh⁻¹ elde edilerek diğer yapı malzemelerine nispeten daha düşük bir değere sahip olduğu [161] belirtilmiştir. İran'da ise betonun RSH değeri 0.23±0.03 Bqm²h⁻¹ olarak bulunmuş ve sağlık açısından tehlike oluşturacak bir sonucun elde edilmediği bildirilmiştir [162]. Ekvador'da [163], betonun RSH'ı 0-7.83 Bqm²h⁻¹ arasında çıkmıştır. Bu ülkede en yüksek yüzey RSH'ı granit örneklerinde, en düşük kil tuğlalarda ölçülmüş iken beton örnekler 1.148 Bqm²h⁻¹ değeri ile düşük seviyede kalmıştır. Türkiye'de (Elâzığ) çalışmaya konu edinilen bir dizi yapı malzemesi arasında gaz beton, hem RSH (0.082 Bqm²h⁻¹) hem de radon konsantrasyonu (297.06 Bqm⁻³) bakımından diğer yapı malzemelerinden daha düşük seviyede radon yaydığı tespit edilmiştir. Bu sonuca gaz betonun üretim sürecinde oluşan aşırı hava kabarcıklarının yol açtığı ifade edilmiştir [164]. Trevisi et al. [165] tarafından Avrupa'daki yapı malzemelerinde doğal radyoaktiviteye ilişkin güncellenmiş veri tabanının sunulduğu bir çalışmada, beton için ortalama RSH değeri olarak 17 Bqkg⁻¹h⁻¹ verilmiştir.

Yukarıda özetlenen referanslarla sınırlı olmak kaydıyla, betonun RSH'ı üzerinde etkili olan parametreler Şekil 15'teki gibi görselleştirilebilir.

5.2. Bina içi radon konsantrasyonu (BİRK)

Binalarda biriken radon gazı, çeşitli cihazlar ile iç mekânlardan ölçülen radon konsantrasyonu ile de belirlenebilmektedir.

Yu et al. [166] tarafından yapılan çalışmada normal beton yerine hafif beton kullanıldığında, radon konsantrasyonunda 15 Bqm⁻³'ten daha fazla düşüş olduğunun belirlenmiş olması üzerine binalardaki BİRK değerlerini azaltmada hafif betonun basit ve ekonomik bir çözüm olduğu ileri sürülmüştür. Karadağ'daki konutlar üzerinde yapılan araştırmada BİRK ortalaması; en yüksek tuğladan yapılmış müstakil evlerde, en düşük ise sıvalı, beton ve tuğladan yapılmış apartman dairelerinde görülmüştür [167]. İsviçre'de yapılan çalışmada [168] da müstakil evlerin BİRK değerleri apartman dairelerinden yüksek çıkmıştır. Bu çalışmada, ayrıca, beton temelli binaların en düşük radon konsantrasyonuna sahip olduğu bildirilmiştir. Mireles et al. [169] ise BİRK yıllık ortalaması ile yapı malzemelerinden gerçekleşen yayılım arasında güçlü bir korelasyonun gözlemlendiğini ve beton tavanlar ile beton zeminlerin daha yüksek BİRK değerlerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 15. Betonun radon salım hızını etkileyen parametreler

Yunanistan'daki işyerlerinde yapılan bir çalışma [170] sonucunda yaz ve kış ölçümleri karşılaştırıldığında, istatistiksel olarak anlamlı bir mevsimsel değişiklik saptanmamıştır. Ancak bu çalışmada, Nijerya'daki okullarda yapılan çalışmayı [171] destekler şekilde, bodrum ve zemin kattaki konsantrasyon değerlerinin, birinci ve üst katlarda ölçülenlerden önemli ölçüde yüksek çıktığı belirtilmiştir. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi binalarında yapılan ölçüm sonuçları ise, sınırdaki radon konsantrasyonunun genellikle ofislerden daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmış ve BİRK değerlerinin zemin ve üst katlar arasında farklı olduğunu göstermiştir [172].

Alharbi and Akber [173] tarafından Avustralya'da yapılan araştırmada iş yeri bodrum katları ile kapalı alanlarında okunan radon konsantrasyonu değerlerinin diğer lokasyonlara göre önemli ölçüde yüksek çıktığı ve kötü havalandırmanın, bu yerlerde radon seviyesinin artmasının en olası nedeni olduğu ifade edilmiştir. Stockholm'da (İsveç) müstakil bir ev üzerinde yapılan ölçümlerde [174] ise hava değişim hızı, iç ortam sıcaklığı ve nemin, BİRK üzerinde önemli etkileri olduğu, artan hava değişim hızının radon seviyesini düşürdüğü, radon seviyelerini en aza indiren sıcaklık aralığının 20-22 °C, bağıl nemin ise %50-%60 olduğu belirtilmiştir.

Xie et al. [175] ABD'de iki katlı bir binadan bir yıl boyunca yaptıkları saatlik kayıtlar sonucunda, Hindistan'da yapılan çalışmaları [176,177] doğrular biçimde, bodrum ve zemin katlarındaki BİRK seviyelerinin sonbahar-kış döneminde maksimum, ilkbahar-yaz döneminde ise minimum olduğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmada havalandırılmayan bodrum katında, çok az mevsimsel değişikliklerle birlikte, ortalama aylık BİRK değeri $1083 \pm 6 \text{ Bqm}^{-3}$ ile çok yüksek seviyelerde ölçüldüğü belirtilmiştir. Suudi Arabistan'da [178] ve Çin'de [179] yapılan araştırmalarda ise zemin katlardaki radon konsantrasyonunun birinci ve ikinci kattan daha yüksek olduğu, kışın en yüksek yazın en düşük konsantrasyon sonuçlarına ulaşarak bariz mevsimsel değişim sergilendiği ifade edilmiştir. Tchorz-Trzeciakiewicz

and Olszewski [180] tarafından ölçümü yapılan binalarda da BİRK değerlerinin en yüksek kış, en düşük ise yaz aylarında verildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada aynı tip binalarda, aynı toprak tiplerinde veya aynı katlarda bulunan konutlarda bile BİRK ölçümlerinin 4 ila 6 kat arasında farklılık gösterdiği ifade edilmiştir. Bu yüzden BİRK ölçümlerinin yıllık olarak yapılmasının gerektiği vurgulanmıştır. Trabzon'daki binalar üzerinde yapılan okumalarda ise ortalama kış/yaz radon aktivite konsantrasyon oranı 3,62 olarak belirlenmiştir [181].

Fransa'da granit veya diğer taşlarla inşa edilmiş, beton zemin ve herhangi bir havalandırma sistemi olmayan eski evlerde yüksek BİRK değerlerinin elde edildiği bildirilmiştir [182]. Suudi Arabistan'daki eski konutlarda da ortalama BİRK değerleri yeni binalara göre yaklaşık iki kat daha yüksek çıkmıştır [183]. Buna karşın, Çin'de yapılan çalışmada [179] 2010'dan sonra inşa edilen binalarda 1980, 1990 ve 2000'lerde inşa edilen binalara kıyasla daha yüksek radon konsantrasyonu elde edildiği ileri sürülmüştür. Bulgaristan'da okul binalarından alınan ölçümler sonucunda ise binaların yaşının, okullar arasındaki BİRK farkı üzerinde en önemli etkiye sahip olan parametre olduğu ifade edilmiştir [184].

Homoki et al. [185] cüruf içeren taşıyıcı elemanlara sahip olan evlerde cüruf içermeyen binalara göre daha yüksek radyasyon tespit etmiş ve kısa süreli radon ölçümü için önerilen minimum sürenin, kapalı koşullarda yapılsa bile, en az üç gün olması gerektiğini bildirmişlerdir. Betonlu oluşturan bileşenler içerisinde çimento ile endüstriyel yan ürün olarak elde edilen mineral katkıların radon gazı yayılımı üzerinde büyük rol oynadığı belirtilmiştir [186,187]. Öyle ki Kovler [188] uçucu külün Doğal Olarak Oluşan Radyoaktif Malzemelerin (Naturally Occurring Radioactive Materials-NORM) artırılmış konsantrasyonuna sahip olduğunu, Turhan et al. [189] ise işleme sonucu elde edilen cüruf, boksit, uçucu kül ve fosfojips gibi endüstriyel yan ürünlerin, ham maddeden daha yüksek spesifik aktiviteye (radyoaktivite) sahip olduğunu ve bunlara teknolojik olarak geliştirilmiş NORM denilebileceğini ifade etmişlerdir. Bulut and Şahin [136] ise radon ölçüm amacıyla çalışmalarına özel olarak üretilen kapalı cam ortamlar içerisinde CR-39 nükleer iz dedektörleri ile farklı mineral katkı (UK, SD ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖYFC)) ve oranlarına (%5,%12,5 ve %20) sahip kendiliğinden yerleşen betonların 7-14-21-28-56-90 ve 120 gün sonundaki radon gazı konsantrasyonları ölçülmüşlerdir. Sonuç olarak betonların radon gazı konsantrasyon değerleri SD oranının artmasıyla azalmış, buna karşın, UK oranının artmasıyla artmıştır. %5 oranında ÖYFC içeren betonlarda radon gazı yayılımı azalırken, %12,5 ve %20 oranında katılmış olan betondan olan radon yayımları artmıştır.

Tablo 7'de güncel sonuçları içermesi bakımında önemsenen ve son çeyrek asırda dünya genelinde gerçekleştirilmiş olan BİRK ölçümüne yönelik çalışmaların birçoğu özetlenmiştir.

Tablo 7. BİRK ölçüm sonuçları, kullanılan cihazlar, ölçüm yapılan yerler ve sayısı

Şehir/Ülke adı	BİRK (Bqm ⁻³)	Ölçüm cihazı	Ölçüm yeri ve sayısı	Ref. No
Hong Kong	45	Kömür kutuları ve gama spektrometre	Konut-39 adet	166
Podgorica/Karadağ	26.4	Pasif zaman entegreli radon dozimetresi	Konut-110 adet	167
Barselona/İspanya	35	LR 115 Nük. İz Ded.	Konut-4 adet (Her konutta 6 oda)	190
Białystok/Polonya	38.4 ± 36.7	CR-39 İz Ded.	Hastane-3 adet (Her birinin 3 farklı katı)	191
Zacatecas/Meksika	55.6 ± 4.9	LR 115 Nük. İz Ded.	Konut-202 adet	169
Yunanistan	95 ± 51	S tipi E-PERM Ded.	İşyeri-42 adet	170
Nijerya	45 ± 27	CR-39 İz Ded.	Okul-35 adet	171
Romanya	160	CR-39 İz Ded.	Konut-25 (Enerji tasarruflu binaların 50 farklı odası)	192
Brisbane/Avustralya	10.5 ± 11.3	RAD-7	İşyeri-29 adet	173
Fransa	147	EasyRad pasif dozimetre	Konut-3233 adet	182
Ürdün	29.6	CR-39 İz Ded.	Çölde Köy-13 adet	193
Güney Kore	52	RSV-8 Alfa İz. Ded.	Kreş-230 adet	194
Macaristan	108	CR-39 İz Ded.	Konut-415 adet	185
Kuveyt	24.9	Radon monitörü (AlphaGUARD)	Okul-46 adet	195
Filibe/Bulgaristan	160 ± 175	CR-39 İz Ded.	Okul-16 adet (331 adet oda)	184
Kamerun	42	RADTRAK Ded.	Konut-140 adet	196
Pekin / Çin	42 ± 13.7	CR-39 İz Ded.	Konut-800 adet	179
Suudi Arabistan				
Batı ve güneybatı	32	S tipi E-PERM Ded.	Konut-1119 adet	197
Dammam	20.4	RAD-7	Konut-16 adet	183
El-Harc	19.23 ± 8.13	RAD-7	Konut-84 adet	178
Hindistan				
Ülke Geneli	4.6-147.3	Nük. İz Ded.(SSNTD)	Konut-1500 adet	198
Palakkad	25.52	LR 115 Nük. İz Ded.	Konut-25 adet	199
Haryana	37 ± 18-80 ± 28	LR 115 Nük. İz Ded.	Köy evi-13 adet	176
Türkiye				
Giresun	193.7	CR-39 İz Ded.	Üniv. Binası-19 adet	200
Bitlis/Ahlat	259.86	CR-39 İz Ded.	Konut-50 adet	201
Trabzon	8-583	CR-39 İz Ded.	Konut-97 adet	181
İzmir	161	LR 115 Nük. İz Ded.	Üniv. Binası- 1adet (4 farklı oda)	172

Binalar üzerinde yapılan BİRK okumaları, yapının bulunduğu bölgenin jeolojik yapısı, binada kullanılan malzeme türü, kullanıcısı alışkanlıkları gibi faktörlerden etkilendiği için binadan binaya değişiklik gösterir. Bu nedenle Tablo 7'de verilen değerler, ortalama BİRK değerleridir.

6. SONUÇLAR

1. Doğada kendiliğinden oluşan bir radyoaktif gaz olan radonun en temel kaynağı kayalar ve kayalardan türeyen topraktır. Özellikle granitik kayaların, bunların damar kayalarının ve volkanik kayaların bulunduğu alanlarda radon gazı riski yüksektir.
2. Doğal, yapay veya yan ürün olarak elde edilen yapı malzemelerinden uranyum içeriği zengin olanlar bina içi radyasyon kaynağı oluşturabilir. Bu nedenle, yapı malzemelerinin radyoaktivite analizleri ve doz değerlendirmeleri yapılarak sınır değerlerin üstünde radon içerenlerin binalarda (ev, okul, hastane, hapisane, vb.) kullanılması önlenmelidir. Özellikle beton ve çimento endüstrisinde kullanılacak olan uçucu küller ve çürümanın radyoaktivite analizleri yapıldıktan sonra kullanılması önerilir.
3. Betonun radon salım hızını belirleyen başlıca etmenler beton bileşenleri (çimento, agrega ve mineral katkı maddelerinin türü ve miktarı) ve boşluk yapısıdır. Radyum ya da radon bileşenler vasıtası ile beton bünyesine girmekte, boşluk yapısı ise radon gazının difüzyonunun gerçekleşmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, radon potansiyeli düşük bileşenlerden üretilmiş kompakt betonlardan olan radon salımın limit değerlerin çok altında kalacağı ve insan sağlığı için bir tehdit oluşturmayacağı söylenebilir.
4. Yapı malzemelerinin radon salım hızı ölçümlerinin standartlaştırılması gerekir.
5. Bina içi radon konsantrasyonu bakımından binaların, sırasıyla, bodrum, zemin ve zemine yakın katları daha risklidir.
6. Bina içine hapsolmuş radon gazını azaltmada en pratik ve etkili yöntem, kapalı ortamların havalandırılmasıdır.
7. Doğal ve yapay radyasyon kaynakları arasında %42 ile ilk sırada gelen radon gazının akciğer kanserine yol açtığı kanıtlanmış durumdadır. Bu nedenle radon gazının taşıdığı riskler konusunda toplumsal farkındalık oluşturulmalı ve bu riskin azaltılmasına yönelik programlar geliştirilmelidir.

Kaynaklar

1. Gupta, M., Saini, M., Chauhan, R.P., "Measurement of Alpha Radioactivity in Some Building Construction Materials", Asian Journal of Chemistry, No. 21 (10), pp. 052-055, 2009.

2. Damla, N., Determination of natural radioactivity levels and mass attenuation coefficients in some building materials in Turkey, Ph.D. Thesis, Karadeniz Technical University, Turkey, 2009.
3. Kürkçüoğlu, M.E., Bayraktar, G., "Determination of Indoor Radon Concentrations at Süleyman Demirel University By Using Nuclear Track Detectors", Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, No. 16 (2), pp. 167-183, 2012.
4. S, E.A., "A Huge Number of Artificial Waste Material Can Be Supplementary Cementitious Material (SCM) For Concrete Production - A Review Part II", Journal of Cleaner Production, No. 142 (Part 4), pp. 4178-4194, 2017.
5. Hazır Beton Teknik Notu, Geçmişten Geleceğe Vazgeçilmez Yapı Malzemesi: Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, Türkiye, 2019.
6. Reyes, A.M.M., Suarez-Navarro, J.A., Alonso, M., Gascó-Leonarte, C., Sobrados, I., Puertas, F., "Hybrid Cements: Mechanical Properties, Microstructure and Radiological Behavior", Molecules, No. 27 (2), pp. 498, 2022.
7. Kovler, K., "The National Survey of Natural Radioactivity in Concrete Produced in Israel", Journal of Environmental Radioactivity, No. 168, pp. 46-53, 2017.
8. Kutlu, N., Radon gas measurement in the province of Hatay in mosques which open to tourism, churches, different churches, museums and some tourism attractions. MS Thesis, Hatay Mustafa Kemal University, Turkey, 2016.
9. Arab, M.K., On determination of soil radon-222 gas, meteorological parameters, atmospheric total electron content and possible relationships between earthquakes: a monte carlo forecasting simulation application. MS Thesis, Firat University, Turkey, 2020.
10. Gelgün, S., Measurement of radon gas concentration in closed placed in Kütahya city, MS Thesis, Dumlupınar University, Turkey, 2010.
11. Bingöldağ, N., Determination of natural radioactivity and heavy metals in soil, water and agricultural products of Nevşehir province, PhD Thesis, İstanbul University Institute of Science, Turkey, 2017.
12. Guillaumont, R., "Completion and Extension of The Periodic Table of Elements Beyond Uranium", Comptes Rendus Physique, No. 20 (7-8), pp. 617-630, 2019.
13. Davutoğlu, H., Methods of radon gas measurement, MS Thesis, Dumlupınar University, Turkey, 2008.
14. Abubakar, M.S., "An Introduction to The Concept of Radioactive Decay and Radioactivity in Nuclear Chemistry", Essay Study on Radioactive Decay, pp. 1-8, 2019.
15. Özden, S., Determining the level of radioactivity in Kırklareli and its surrounding and evaluation of human health and environmental pollution. PhD Thesis, Kırklareli University, Turkey, 2020.
16. Albayrak, N., Determination of natural radiation sources and assessment of gamma dose rates in Kırıkkale (Turkey), MS Thesis, İstanbul University Institute of Science, Turkey, 2011.
17. Dişçi, T., Natural radioactivity measurements in building materials produced and used in Samsun, MS Thesis, Ondokuz Mayıs University, Turkey, 2012.

18. Almasoud, F.I., Ababneh, Z.Q., Alanazi, Y.J., Khandaker, M.U., Sayyed, M.I., "Assessment of Radioactivity Contents in Bedrock Groundwater Samples From The Northern Region of Saudi Arabia", *Chemosphere*, No. 242, pp. 125181, 2020.
19. Khandaker, M.U., Heffny, N.G., Amin, Y.M., Bradley, D.A., "Elevated Concentration of Radioactive Potassium in Edible Algae Cultivated in Malaysian Seas and Estimation of Ingestion Dose to Humans", *Algal Research*, No. 38, pp. 101386, 2019.
20. Bellini, G., Ianni, A., Ranucci, G., "Science and Technology in Very Low Energy Neutrino Physics With Borexino", *Physics Reports*, No. 906, pp. 1-64, 2021.
21. Leonard, D.S., Hahn, K.I., Kang, W.G., Kazalov, V., Kim, G.W., Kim, Y.D., Lee, E.K., Lee, M.H., Park, S.Y., Sala, E., "Development of An Array of Fourteen Hpge Detectors Having 70% Relative Efficiency Each", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 989, pp. 164954, 2021.
22. Tyagi, G., Singhal, A., Routroy, S., Bhunia, D., Lahoti, M., "Radiation Shielding Concrete With Alternate Constituents: An Approach to Address Multiple Hazards", *Journal of Hazardous Materials*, No. 404 (B), pp. 124201, 2021.
23. Araz, A., New, lightweight, composite materials for radiation shielding. PhD Thesis, Atatürk University, Turkey, 2020.
24. Yurttaş N., Development of radiation shielding software for radioisotopes used in nuclear medicine. MS Thesis, Hacettepe University, Turkey, 2020.
25. Mutlu, A., Effect of aggregate type on the radiation shielding properties of cement based composites, MS Thesis, Yozgat Bozok University, Turkey, 2020.
26. Gökçe, H.S., Öztürk, B.C., Çam, N.F., Andiç-Çakır, Ö., "Natural Radioactivity of Barite Concrete Shields Containing Commonly Used Supplementary Materials", *Construction and Building Materials*, No. 236, pp. 117569, 2020.
27. Malkapur, S.M., Narasimhan, M.C., "Chapters 10: Virgin and Waste Polymer Incorporated Concrete Mixes for Enhanced Neutron Radiation Shielding Characteristics. Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete", Cambridge, pp. 215-247, 2019.
28. Türkçe Bilim Terimleri Sözlüğü, Mühendislik Terimleri Sözlüğü, <http://www.tubaterim.gov.tr/>, (Son erişim: Ekim 2023).
29. Dulkadir, S., The effect of radiation on the current-voltage (i-v) characteristics of $au/bi4ti3o12/sio2/n-si$ (mfis) structures. MS Thesis, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Turkey, 2020.
30. Kaya, M., Radiation management in the emergency department of patients with internal radiation treatment and raising awareness of health workers, MS Thesis, Gaziosmanpaşa University, Turkey, 2021.
31. Mindess S., Young, J.F., Darwin, D., *Concrete*. Prentice Hall, Pearson Education Inc. NJ, USA, 2003 .
32. Doğan, B., Determination of ^{222}Rn activity concentration of indoor environments in Iğdır province with Cr-39 nuclear trace detectors and statistical evaluation of measurements, MS Thesis, Atatürk University, Turkey, 2011.
33. Mavi, B., Determination of natural radioactivity in some building materials in Isparta, PhD Thesis, Süleyman Demirel University, Turkey, 2010.
34. Doğan, T., Synthesis of poly(imide) siloxane block copolymer, structural characterization and comparison of irradiation effect in radiation shielding properties for flexible sheet and pelletized form, PhD Thesis, Istanbul Technical University, Turkey, 2020.
35. Zanzonico, P., "Principles of Nuclear Medicine Imaging: Planar, SPECT, PET, Multi-Modality and Autoradiography Systems", *Radiation Research*, No. 177 (4), pp. 349-364, 2012.
36. Güneş, B.E., Measuring of natural radioactivity levels in some building concretes, MS Thesis, Recep Tayyip Erdogan University, Turkey, 2014.
37. Hadei, M., Shahsavani, A., Hopke, P.K., Naseri, S., Yazdanbakhsh, A., Sadani, M., Mesdaghinia, A., Yarahmadi, M., Rahmatinia, M., Fallah, S., Emam, B., Kermani, M., Jaafarzadeh, N., Alipour, M., Hassanzadeh, V., Bazzazpour, B., Nazari, S.S.H., "A Systematic Review and Meta-Analysis of Human Biomonitoring Studies on Exposure to Environmental Pollutants in Iran", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, No. 212, pp. 111986, 2021.
38. Goldsmith, S.J., "Targeted Radionuclide Therapy: A Historical and Personal Review", *Seminars in Nuclear Medicine*, No. 50 (1), pp. 87-97, 2020.
39. Thakur, P., Ward, A.L., González-Delgado, A.M., "Optimal Methods For Preparation, Separation, and Determination of Radium Isotopes in Environmental and Biological Samples", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 228, pp. 106522, 2021.
40. Liao, F., Wang, G., Yi, L., Shi, Z., Cheng, G., Kong, Q., Mu, W., Guo, L., Cheng, K., Dong, N., Liu, C., "Applying Radium Isotopes to Estimate Groundwater Discharge Into Poyang Lake, The Largest Freshwater Lake in China", *Journal of Hydrology*, No. 585, pp. 124782, 2020.
41. Fry, C., Thoennessen, M., "Discovery of The Astatine, Radon, Francium, and Radium Isotopes", *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, No. 99 (5), pp. 497-519, 2013.
42. Park, S.Y., Choi, Y.S., Park, S.Y., Kim, C.G., "A Case Study on The Correlation Between Radon and Multiple Geophysicochemical Properties of Soils in G Island, Korea, and Effects on The Bacterial Metabolic Behaviors", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 222, pp. 106336, 2020.
43. Tikkanen, O., Radium behaviour in geologic media: Application to nuclear waste deposition. MS Thesis, University of Helsinki, Finland, 2020.
44. Ambrosino, F., Thinová, L., Briestenský, M., Sabbarese, C., "Analysis of Radon Time Series Recorded in Slovak and Czech Caves For The Detection of Anomalies Due to Seismic Phenomena", *Radiation Protection Dosimetry*, No. 186 (2-3), pp. 428-432, 2019.
45. Przylibski, T. A., *Radon: a radioactive therapeutic element*. Radon, Health and Natural Hazards (Editörler: Gillmore, G. K., Perrier, F. E. & Crockett, R. G. M.). Geological Society, London, Special Publications, 451, 2016.
46. Sas, Z., Szántó, J., Kovács, J., Somlai, J., Kovács, T., "Influencing Effect of Heat-Treatment on Radon Emanation and Exhalation Characteristic of Red Mud", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 148, pp. 27-32, 2015.

47. Nguyen, P.T.H., Nguyen, V.T., Vu, N.B., Nguyen, V.D., Cong, H.L., "Soil Radon Gas in Some Soil Types in The Rainy Season in Ho Chi Minh City, Vietnam", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 193-194, pp. 27-35, 2018.
48. Aydar, E., Diker, C., "Carcinogen Soil Radon Enrichment in A Geothermal Area: Case of Güzelçamlı-Davutlar District of Aydın City, Western Turkey", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, No. 208, pp. 111466, 2021.
49. Alonso, H., Rubiano, J.G., Guerra, J.G., Arnedo, M.A., Tejera, A., Martel, P., "Assessment of Radon Risk Areas in The Eastern Canary Islands Using Soil Radon Gas Concentration and Gas Permeability of Soils", *Science of The Total Environment*, No. 664, pp. 449-460, 2019.
50. Mugahed, M.A., Bentayeb, F., "Studying of Radon Gas Concentrations in Soil Qaa Al- Hakel Agricultural Area, Ibb, Yemen", *Materials Today: Proceedings*, No. 13 (3), pp. 525-529, 2019.
51. Örgün Y, Çelebi N., "Radyasyon, Radon (Rn) ve Toplum Sağlığı", *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, Tıbbi Jeoloji ve İnsan Sağlığı Özel Sayısı*, vol.1, no.1, pp.11-27, 2016.
52. Freiler, A., Horváth, A., Török, K., Földes, T., "Origin of Radon Concentration of Csalóka Spring in The Sopron Mountains (West Hungary)", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 151 (1), pp. 174-184, 2016.
53. Timkova, J., Fojtikova, I., Pacherova, P., "Bagged Neural Network Model For Prediction of The Mean Indoor Radon Concentration in The Municipalities in Czech Republic", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 166 (Part 2), pp. 398-402, 2017.
54. Pereira, A., Lamas, R., Miranda, M., Domingos, F., Neves, L., Ferreira, N., Costa, L., "Estimation of The Radon Production Rate in Granite Rocks and Evaluation of The Implications For Geogenic Radon Potential Maps: A Case Study in Central Portugal", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 166 (Part 2), pp. 270-277, 2017.
55. Dentoni, V., Pelo, S.D., Aghdam, M.M., Randaccio, P., Loi, A., Carreddu, N., Bernardini, A., "Natural Radioactivity and Radon Exhalation Rate of Sardinian Dimension Stones", *Construction and Building Materials*, No. 247, pp. 118377, 2020.
56. Remon, J., Reguart, N., García-Campelo, R., Conde, E., Lucena, C., Persiva, O., Navarro- Martín, A., Rami-Porta, R., "Lung Cancer in Spain", *Journal of Thoracic Oncology*, No. 16 (2), pp. 197-204, 2021.
57. Hahn, E.J., Gokun, Y., Jr., W.M.A., Overfield, B.L., Robertson, H., Wiggins, A., Rayens, M.K., "Radon Potential, Geologic Formations, and Lung Cancer Risk", *Preventive Medicine Reports*, No. 2, pp. 342-346, 2015.
58. Dai, D., Neal, F.B., Diem, J., Deocampo, D.M., Stauber, C., Dignam, T., "Consequent Impact of Housing and Geology on Indoor Radon Concentrations in Atlanta, Georgia, United States", *Science of The Total Environment*, No. 668, pp. 500-511, 2019.
59. Jassim, M.A., Isaifan, R., "A Review on The Sources and Impacts of Radon Indoor Air Pollution", *Journal of Environmental and Toxicological Studies*, No. 2 (1), pp. 2576-6430, 2018.
60. Fuente, M., Rábago, D., Goggins, J., Fuente, I., Sainz, C., Foley, M., "Radon Mitigation By Soil Depressurisation Case Study: Radon Concentration and Pressure Field Extension Monitoring in A Pilot House in Spain", *Science of The Total Environment*, No. 695, pp. 133746, 2019.
61. Moreno, V., Bach, J., Zarroca, M., Font, L., Roqué, C., Linares, R., "Characterization of Radon Levels in Soil and Groundwater in The North Maladeta Fault Area (Central Pyrenees) and Their Effects on Indoor Radon Concentration in A Thermal Spa", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 189, pp. 1-13, 2018.
62. Baykut, S., Akgül, T., İnan, S., Seyis, C., "Observation and Removal of Daily Quasi- Periodic Components in Soil Radon Data", *Radiation Measurements*, No. 45 (7), pp. 872-879, 2010.
63. Oh, Y.H., Kim, G., "A Radon-Thoron Isotope Pair As A Reliable Earthquake Precursor", *Scientific Reports*, No. 5, pp. 13084, 2015.
65. WHO, World Health Organization, *Radon and Health, Radon in Drinking Water*, 2023.
66. Shu'aibu, H.K., Khandaker, M.U., Baballe, A., Tata, S., Adamu, M.A., "Determination of Radon Concentration in Groundwater of Gadau, Bauchi State, Nigeria and Estimation of Effective Dose", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 178, pp. 108934, 2021.
67. Alomari, A.H., Saleh, M.A., Hashim, S., Alsayaheen, A., Abdeldin, I., "Activity Concentrations of ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²²Rn and Their Health Impact in The Groundwater of Jordan", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, No. 322, pp. 305-318, 2019.
68. Yaşar, Y.E., Determination of radon exhalation rates and effective radium contents in soil samples around Orhaneli, Keleş and Osmangazi districts of Bursa. MS Thesis, Sakarya University, Turkey, 2020.
69. Kaptan, O., Investigation of radon concentration in groundwater in Sakarya. MS Thesis, Sakarya University, Turkey, 2020.
70. Yıldırım, E., Calculation of radon activity concentration and dosage admixture in structure material. MS Thesis, Ege University, Turkey, 2020.
71. Al-Hubail, J., Al-Azmi, D., "Radiological Assessment of Indoor Radon Concentrations and Gamma Dose Rates in Secondary School Buildings in Kuwait", *Construction and Building Materials*, No. 183, pp. 1-6, 2018.
72. Kovler, K., "Radiological Constraints of Using Building Materials and Industrial By-Products in Construction", *Construction and Building Materials*, No. 23 (1), pp. 246-253, 2009.
73. Soniya, S.R., Abraham, S., Khandaker, M.U., Jojo, P.J., "Investigation of Diffusive Transport of Radon Through Bricks", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 178, pp. 108955, 2021.
74. Ambrosino, F., Sabbarese, C., Roca, V., Giudicepietro, F., Cesare, W.D., "Connection Between ²²²Rn Emission and Geophysical-Geochemical Parameters Recorded During The Volcanic Unrest at Campi Flegrei Caldera (2011-2017)", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 166, pp. 109385, 2020.
75. Sandoval-Garzón, M.A., Ávila-Abril, L.A., Garcia-Rodriguez, A.M., Bermúdez, M.A., Martínez-Ovalle, S.A., Sajo-Bohus, L., "A New Graph of Soil Rn-Gas Transport: Radon-Rose Plot", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 169, pp. 109521, 2021.
76. TAEK Kılavuz, *Kapalı Ortamlarda Radon ve Yapı Malzemelerindeki Radyoaktiviteye İlişkin Kılavuz (RSGD-KLV-013)*. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara, 2017.

77. IAEA, International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3, Vienna.
78. Coletti, C., Brattich, E., Cinelli, G., Cultrone, G., Maritan, L., Mazzoli, C., Mostacci, D., Tositti, L., Sassi, R., "Radionuclide Concentration and Radon Exhalation in New Mix Design of Bricks Produced Reusing NORM By-Products: The Influence of Mineralogy and Texture", *Construction and Building Materials*, No. 260, pp. 119820, 2020.
79. Hofmann, M., Richter, M., Jann, O., "Robustness Validation of A Test Procedure For The Determination of The Radon-222 Exhalation Rate From Construction Products in VOC Emission Test Chambers", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 166, pp. 109372, 2020.
80. Nuccetelli, C., Leonardi, F., Trevisi, R., "Building Material Radon Emanation and Exhalation Rate: Need of A Shared Measurement Protocol From The European Database Analysis", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 225, pp. 106438, 2020.
81. Syuryavin, A.C., Park, S., Nirwono, M.M., Lee, S.H., "Indoor Radon and Thoron From Building Materials: Analysis of Humidity, Air Exchange Rate, and Dose Assessment", *Nuclear Engineering and Technology*, No. 52 (10), pp. 2370-2378, 2020.
82. Aladeniyi, K., Arogunjo, A.M., Pereira, A.J.S.C., Khandaker, M.U., Bradley, D.A., Sulieman, A., "Evaluation of Radiometric Standards of Major Building Materials Used in Dwellings of South-Western Nigeria", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 178, pp. 109021, 2021.
83. Al-Azmi, D., Okeyode, I.C., Alatise, O.O., Mustapha, A.O., "Setup and Procedure For Routine Measurements of Radon Exhalation Rates of Building Materials", *Radiation Measurements*, No. 112, pp. 6-10, 2018.
84. Ruano-Ravina, A., Wakeford, R., "The Increasing Exposure of The Global Population to Ionizing Radiation", *Epidemiology*, No. 31 (2), pp. 155-159, 2020.
85. Muñoz, E., Frutos, B., Olaya, M., Sánchez, J., "A Finite Element Model Development For Simulation of The Impact of Slab Thickness, Joints, and Membranes on Indoor Radon Concentration", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 177, pp. 280-289, 2017.
86. Fuente, M., Long, S., Fenton, D., Hung, L.C., Goggins, J., Foley, M., "Review of Recent Radon Research in Ireland, OPTI-SDS Project and Its Impact on The National Radon Control Strategy", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 163, pp. 109210, 2020.
87. Vogianis, E.G., Nikolopoulos, D., "Radon Sources and Associated Risk in Terms of Exposure and Dose", *Frontiers in Public Health*, No. 2, pp. 1-10, 2015.
88. Boudier, F., Perko, T., Lofstedt, R., Renn, O., Rossmann, C., Hevey, D., Siegrist, M., Ringer, W., Pözl-Viol, C., Dowdall, A., Fojtíková, I., Barazza, F., Hoffmann, B., Lutz, A., Hurst, S., Reifenhäusern, C., "The Potsdam Radon Communication Manifesto", *Journal of Risk Research*, No. 24 (7), pp. 909-912, 2021.
89. Pillai, G.S., Hameed, P.S., Chandrasekaran, S., Sivasubramanian, K., Baskaran, R., Venkatraman, B., "Indoor Radon (^{222}Rn) And Thoron (^{220}Rn) Measurements and Assessment of Human Risk in The Dwellings of Tiruchirappalli City (Tamil Nadu, India)", *Chemical Data Collections*, No. 9-10, pp. 197-207, 2017.
90. Collignan, B., Powaga, E., "Impact of Ventilation Systems and Energy Savings in A Building on The Mechanisms Governing The Indoor Radon Activity Concentration", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 196, pp. 268-273, 2019.
91. Denman, A.R., Groves-Kirkby, C.J., Crockett, R.G.M., "Cost-effectiveness of Radon Remediation Programmes in The UK in The 2020s", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 222, pp. 106351, 2020.
92. Pişkin, A., Determination of radon gas exposure for office workers using nuclear track detector method and health effects. Thesis for Occupational Health and Safety Expertise, Ministry of the Labor and Social Security, Directorate General of Occupational Health and Safety, Ankara, 2016.
93. Finne, I.E., Kolstad, T., Larsson, M., Olsen, B., Prendergast, J., Rudjord, A.L., "Significant Reduction in Indoor Radon in Newly Built Houses", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 196, pp. 259-263, 2019.
94. Salim, D.A., Ebrahiem, S.A., "Measurement of Radon Concentration in College of Education, Ibn Al-Haitham Buildings Using Rad-7 and CR-39 Detector", *Energy Procedia*, No. 157, pp. 918-925, 2019.
95. Xie, D., Wu, Y., Wang, C., Yu, C.W., Tian, L., Wang, H., "A Study on The Three-Dimensional Unsteady State of Indoor Radon Diffusion Under Different Ventilation Conditions", *Sustainable Cities and Society*, No. 66, pp. 102599, 2021.
96. Yarmoshenko, I., Zhukovsky, M., Onishchenko, A., Vasilyev, A., Malinovsky, G., "Factors Influencing Temporal Variations of Radon Concentration In High-Rise Buildings", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 232, pp. 106575, 2021.
97. Khan, S.M., Gomes, J., Krewski, D.R., "Radon Interventions Around The Globe: A Systematic Review", *Heliyon*, No. 5 (5), pp. e01737, 2019.
98. Collins S.N. Radionuclide Content of Sand Used for Construction in Kakamega County and Associated Indoor radon Diffusion Doses. Master thesis, Kenyatta University, 2013, Kenya.
99. Hultqvist, B., "Studies on Naturally Occurring Ionising Radiation, With Special Reference to Radiation Doses in Swedish Houses of Various Types", *Kungl. Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, No. 4, pp. 6, 1956.
100. Pantelić, G., Čeliković, I., Živanović, M., Vukanac, I., Nikolić, J.K., Cinelli, G., Gruber, V., "Qualitative Overview of Indoor Radon Surveys in Europe", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 204, pp. 163-174, 2019.
101. WHO, World Health Organization, Radon Database, National Radon Reference Levels Data By Country, Geneva.
102. TAEK Teknik Rapor, Konutlarda Radon Gazı. Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2014, Ankara.
103. Esan, D.T., Sridhar, M.K.C., Obed, R., Ajiboye, Y., Afolabi, O., Oluobodun, B., Oni, O.M., "Determination of Residential Soil Gas Radon Risk Indices Over The Lithological Units of A Southwestern Nigeria University", *Scientific Reports*, No. 10, pp. 7368, 2020.
104. Abdalla, A.M., Ali, A.M., Al-Jarallah, M., Okada, G., Kawaguchi, N., Yanagida, T., "Radon Detection Using Alpha Scintillation KACST Cell", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 922, pp. 84-90, 2019.

105. Aykamaş, A.Ş., Determination of radioactivity levels in Turkish stones used as building materials and investigation of their radioactivity relations with mineralogic and chemical compositions. PhD Thesis, Çukurova University, Turkey, 2008.
106. Chung, L.K., Mata, L.A., Carmona, M.A., Shubayr, N.A.M., Zhou, Q., Ye, Y., Kearfott, K.J., "Radon Kinetics in A Natural Indoor Radon Chamber", *Science of The Total Environment*, No. 734, pp. 139167, 2020.
107. Mirsch, J., Hintz, L., Maier, A., Fournier, C., Löbrich, M., "An Assessment of Radiation Doses From Radon Exposures Using A Mouse Model System", *International Journal of Radiation Oncology*Biolog*Physics*, No. 108 (3), pp. 770-778, 2020.
108. Chen, J., Ford, K.L., "A Study on The Correlation Between Soil Radon Potential and Average Indoor Radon Potential in Canadian Cities", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 166 (Part 1), pp. 152-156, 2017.
109. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, World Health Organization, France, 2009.
110. Stanley, F.K.T., Irvine, J.L., Jacques, W.R., Salgia, S.R., Innes, D.G., Winquist, B.D., Torr, D., Brenner, D.R., Goodarzi, A.A., "Radon Exposure is Rising Steadily Within The Modern North American Residential Environment, and is Increasingly Uniform Across Seasons", *Scientific Reports*, No. 9, pp. 18472, 2019.
111. Campos, A., Pereira, R., Vaz, A., Caetano, T., Malta, M., Oliveira, J., Carvalho, F.P., Mendo, S., Lourenço, J., "Metals and Low Dose IR: Molecular Effects of Combined Exposures Using Hepg2 Cells As A Biological Model", *Journal of Hazardous Materials*, No. 396, pp. 122634, 2020.
112. EPA, United States Environmental Protection Agency, Health Risk of Radon, USA, 2023.
113. Lin, Z., Liu, Z., Tan, X., Li, C., "SH3GL3 Functions As A Potent Tumor Suppressor in Lung Cancer in A SH3 Domain Dependent Manner", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, No. 534, pp. 787-794, 2021.
114. Lorenzo-González, M., Ruano-Ravina, A., Torres-Durán, M., Kelsey, K.T., Provencio, M., Parente-Lamelas, I., Leiro-Fernández, V., Vidal-García, I., Castro-Añón, O., Martínez, C., Golpe-Gómez, A., Zapata-Cachafeiro, M., Piñeiro-Lamas, M., Pérez-Ríos, M., Abal-Arca, J., Montero-Martínez, C., Fernández-Villar, A., Barros-Dios, J.M., "Lung Cancer and Residential Radon in Never-Smokers: A Pooling Study in The Northwest of Spain", *Environmental Research*, No. 172, pp. 713-718, 2019.
115. Lung Cancer Statistics, World Cancer Research Fund, American Institute for Cancer Research, 2021.
116. Corrales, L., Rosell, R., Cardona, A.F., Martín, C., Zatarain-Barrón, Z.L., Arrieta, O., "Lung Cancer in Never Smokers: The Role of Different Risk Factors Other Than Tobacco Smoking", *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, No. 148, pp. 102895, 2020.
117. Al-arydah, M., "Population Attributable Risk Associated With Lung Cancer Induced By Residential Radon in Canada: Sensitivity to Relative Risk Model and Radon Probability Density Function Choices: In Memory of Professor Jan M. Zielinski", *Science of The Total Environment*, No. 596-597, pp. 331-341, 2017.
118. Lim, S.M., Choi, J.W., Hong, M.H., Jung, D., Lee, C.Y., Park, S.Y., Shim, H.S., Sheen, S., Kwak, K.I., Kang, D.R., Cho, B.C., Kim, H.R., "Indoor Radon Exposure Increases Tumor Mutation Burden in Never-Smoker Patients With Lung Adenocarcinoma", *Lung Cancer*, No. 131, pp. 139-146, 2019.
119. Nyhan, M.M., Coull, B.A., Blomberg, A.J., Vieira, C.L.Z., Garschick, E., Aba, A., Vokonas, P., Gold, D.R., Schwartz, J., Koutrakis, P., "Associations Between Ambient Particle Radioactivity and Blood Pressure: The NAS (Normative Aging Study)", *Journal of the American Heart Association*, No. 7 (6), pp. e008245, 2018.
120. Loïselle, J.J., Knee, J.M., Sutherland, L.C., "Human Lung Epithelial Cells Cultured in The Presence of Radon-Emitting Rock Experience Gene Expression Changes Similar to Those Associated With Tobacco Smoke Exposure", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 196, pp. 64-81, 2019.
121. Walczak, K., Olszewski, J., Politański, P., Domeradzka-Gajda, K., Kowalczyk, K., Zmyślony, M., Brodecki, M., Stępnik, M., "Residential Exposure to Radon and Levels of Histone γ H2AX and DNA Damage in Peripheral Blood Lymphocytes of Residents of Kowary City Region (Poland)", *Chemosphere*, No. 247, pp. 125748, 2020.
122. Papatheodorou, S., Yao, W., Vieira, C.L.Z., Li, L., Wylie, B.J., Schwartz, J., Koutrakis, P., "Residential Radon Exposure and Hypertensive Disorders of Pregnancy in Massachusetts, USA: A Cohort Study", *Environment International*, No. 146, pp. 106285, 2021.
123. WHO, World Health Organization, Radon and Health, Key Facts, 2021.
124. WHO, World Health Organization, Health Topics, Radiation, 2021.
125. NRCS, National Radon Control Strategy, National Radon Control Strategy Year 4 Report Dublin, Ireland, 2019.
126. Erdoğan, S., "İyonizan Radyasyon İnsan Sağlığına Yararlı mı?" *Türkiye Klinikleri J Med Sci.*, 26(5): 555-8, 2006.
127. Groves-Kirkby, C.J., Denman, A.R., Phillips, P.S., Tornberg, R., Woolridge, A.C., Crockett, R.G.M., "Domestic Radon Remediation of U.K. Dwellings By Sub-Slab Depressurisation: Evidence For A Baseline Contribution From Constructional Materials", *Environment International*, No. 34 (3), pp. 428-436, 2008.
128. Tung, T.C.W., Niu, J.L., Burnett, J., Lau, J.O.W., "Methodology For Determination of Radon-222 Production Rate of Residential Building and Experimental Verification", *Radiation Measurements*, No. 40 (1), pp. 110-117, 2005.
129. Chao, C.Y., Tung, T.C., "Radon Emanation of Building Material--Impact of Back Diffusion and Difference Between One-Dimensional and Three-Dimensional Tests", *Health Physics*, No. 76 (6), pp. 675-681, 1999.
130. Carmona, M.A., Kearfott, K.J., "Intercomparison of Commercially Available Active Radon Measurement Devices in a Discovered Radon Chamber", *Health Physics*, No. 116 (6), pp. 852-861, 2019.
131. Shahrokhi, A., Vigh, T., Németh, C., Csordás, A., Kovács, T., "Radon Measurements and Dose Estimate of Workers in A Manganese Ore Mine", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 124, pp. 32-37, 2017.

132. Cosma, C., Dancea, F., Jurcut, T., Ristoiu, D., "Determination of ^{222}Rn Emanation Fraction and Diffusion Coefficient in Concrete Using Accumulation Chambers and The Influence of Humidity and Radium Distribution", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 54 (3), pp. 467-473, 2001.
133. Ćurguz, Z., Stojanovska, Z., Žunić, Z.S., Kolarž, P., Ischikawa, T., Omori, Y., Mishra, R., Sapra, B.K., Vaupotič, J., Ujić, P., Bossew, P., "Long-term Measurements of Radon, Thoron and Their Airborne Progeny in 25 Schools in Republic of Srpska", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 148, pp. 163-169, 2015.
134. Kovler, K., Perevalov, A., Steiner, V., Rabkin, E., "Determination of The Radon Diffusion Length in Building Materials Using Electrets and Activated Carbon", *Health Physics*, No. 86 (5), pp. 505-516, 2004.
135. Pérez, B., López, M.E., Palacios, D., "Theoretical and Experimental Study of The LR-115 Detector Response in A Non-Commercial Radon Monitör", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 160, pp. 109112, 2020.
136. Bulut, H.A., Şahin, R., "Activity Concentration and Annual Effective Dose Assessments of Radon in Scs With Different Mineral Additives", *Construction and Building Materials*, No. 364, pp. 130004, 2023.
137. Vaupotič, J., Smrekar, N., Žunić, Z.S., "Comparison of Radon Doses Based on Different Radon Monitoring Approaches", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 169-170, pp. 19-26, 2017.
138. AMS, American Meteorological Society, Glossary of Meteorology, Exhalation, 2023.
139. Kovler, K., Perevalov, A., Steiner, V., Metzger, L.A., "Radon Exhalation of Cementitious Materials Made With Coal Fly Ash: Part 1- Scientific Background and Testing of The Cement and Fly Ash Emanation", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 82, pp. 321-334, 2005.
140. Mahur, A.K., Kumar, R., Sengupta, D., Prasad, R., "Estimation of Radon Exhalation Rate, Natural Radioactivity and Radiation Doses in Fly Ash Samples From Durgapur Thermal Power Plant, West Bengal, India", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 99 (8), pp. 1289-1293, 2008.
141. López, F.A., Gázquez, M., Alguacil, F.J., Bolívar, J.P., García-Díaz, I., López-Coto, I., "Microencapsulation of Phosphogypsum into A Sulfur Polymer Matrix: Physico-Chemical and Radiological Characterization", *Journal of Hazardous Materials*, No. 192 (1), pp. 234-245, 2011.
142. Roelofs, L.M., Scholten, L.C., "The Effect of Aging, Humidity, and Fly-Ash Additive on The Radon Exhalation From Concrete", *Health Physics*, No. 67 (3), pp. 266-271, 1994.
143. Cozmuta, I., van der Graaf, E.R., de Meijer, R.J., "Moisture Dependence of Radon Transport in Concrete: Measurements and Modeling", *Health Physics*, No. 85 (4), pp. 438-456, 2003.
144. Döse, M., Silfwerbrand, J., "Reduction of Radon Gas in Concrete Using Admixtures and Additives", *Nordic Concrete Research*, No. 58 (1), pp. 17-34, 2018.
145. Fournier, F., Groetz, J.E., Jacob, F., Crolet, J.M., Lettner, H., "Simulation of Radon Transport through Building Materials: Influence of the Water Content on Radon Exhalation Rate", *Transport in Porous Media*, No. 59, pp. 197-214, 2005.
146. Wang, C., Xie, D., Yang, X., Wang, H., Yu, C.W., "Quantification of The Effect of Temperature Difference Between Concrete and Indoor Air, and Water Content in Concrete on Radon Exhalation", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, No. 328, pp. 39-47, 2021.
147. De Jong, P., Van Dijk, W., Van Hulst, J.G.A., Van Heijningen, R.J.J., "The Effect of The Composition and Production Process of Concrete on The ^{222}Rn Exhalation Rate", *Environment International*, No. 22 (1), pp. 287-293, 1996.
148. Yu, K.N., Young, E.C.M., Chan, T.F., Lo, T., Balendran, R.V., "The Variation of Radon Exhalation Rates From Concrete Surfaces of Different Ages", *Building and Environment*, No. 31 (3), pp. 255-257, 1996.
149. de Jong, P., van Dijk, W., de Rooij, M., "Influence of The Porosity on The ^{222}Rn Exhalation Rate of Concrete", *Health Physics*, No. 100 (2), pp. 127-137, 2011.
150. Kumar, A., Chauhan, R.P., "Effect of Moisture and Additive on Radon Exhalation Rate From Concrete", *Romanian Journal of Physics*, No. 60, pp. 1589-1597, 2015.
151. Georgescu, D.P., "Influence of Concrete Characteristics on Radon Transport", *Romanian Journal of Physics*, No. 58, pp. 148-155, 2013.
152. Yu, K.N., Young, E.C.M., Stokes, M.J., Kwan, M.K., Balendran, R.V., "Radon Emanation From Concrete Surfaces and The Effect of The Curing Period, Pulverized Fuel Ash (PFA) Substitution and Age", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 48 (7), pp. 1003-1007, 1997.
153. Man, C.K., Yeung, H.S., "The Effects of Using Pulverized Fuel Ash As Partial Substitute For Cement in Concrete", *Science of The Total Environment*, No. 196 (2), pp. 171-176, 1997.
154. Kovler, K., Perevalov, A., Levit, A., Steiner, V., Metzger, L.A., "Radon Exhalation of Cementitious Materials Made With Coal Fly Ash: Part 2-Testing Hardened Cement-Fly Ash Pastes", *Journal of Environmental Radioactivity*, 82 (3), 335-350, 2005.
155. Leonardi, F., Bonczyk, M., Nuccetelli, C., Wysocka, M., Michalik, B., Ampollini, M., Tonnarini, S., Rubin, J., Niedbalska, K., Trevisi, R., "A Study on Natural Radioactivity and Radon Exhalation Rate in Building Materials Containing Norm Residues: Preliminary Results", *Construction and Building Materials*, No. 173, pp. 172-179, 2018.
156. Chauhan, R.P., Kumar, A., "Study of Radon Transport Through Concrete Modified With Silica Fume", *Radiation Measurements*, No. 59, pp. 59-65, 2013.
157. Chauhan, R.P., Kumar, A., "Radon Resistant Potential of Concrete Manufactured Using Ordinary Portland Cement Blended With Rice Husk Ash", *Atmospheric Environment*, No. 81, pp. 413-420, 2013.
158. Hatungimana, D., Taşköprü, C., İçhedef, M., Saç, M.M., Yazıcı, Ş., "Compressive Strength, Water Absorption, Water Sorptivity and Surface Radon Exhalation Rate of Silica Fume And Fly Ash Based Mortar", *Journal of Building Engineering*, No. 23, pp. 369-376, 2019.
159. Stoulos, S., Manolopoulou, M., Papastefanou, C., "Assessment of Natural Radiation Exposure and Radon Exhalation From Building Materials in Greece", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 69 (3), pp. 225-240, 2003.

160. Righi, S., Bruzzi, L., "Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Building Materials Used in Italian Dwellings", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 88 (2), pp. 158-170, 2006.
161. Moharram, B.M., Suliman, M.N., Zahran, N.F., Shennawy, S.E., El Sayed, A.R., "²³⁸U, ²³²Th Content and Radon Exhalation Rate in Some Egyptian Building Materials", *Annals of Nuclear Energy*, No. 45, pp. 138-143, 2012.
162. Bavarnegin, E., Fathabadi, N., Moghaddam, M.V., Farahani, M.V., Moradi, M., Babakhni, A., "Radon Exhalation Rate and Natural Radionuclide Content in Building Materials of High Background Areas of Ramsar, Iran", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 117, pp. 36-40, 2013.
163. Tene, T., Gomez, C.V., Usca, G.T., Suquillo, B., Bellucci, S., "Measurement of Radon Exhalation Rate From Building Materials: The Case of Highland Region of Ecuador", *Construction and Building Materials*, No. 293, pp. 123282, 2021.
164. Baykara, O., Karatepe, Ş., Doğru, M., "Assessments of Natural Radioactivity and Radiological Hazards in Construction Materials Used in Elazig, Turkey", *Radiation Measurements*, No. 46, pp. 153-158, 2011.
165. Trevisi, R., Leonardi, F., Risica, S., Nuccetelli, C., "Updated Database on Natural Radioactivity in Building Materials in Europe", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 187, pp. 90-105, 2018.
166. Yu, K.N., Cheung, T., Koo, S.Y., "Effects of Using Light-Weight Concrete on Indoor Radon Concentration in High-Rise Buildings Get Access Arrow", *Radiation Protection Dosimetry*, No. 86 (2), pp. 147-152, 1999.
167. Vukotić, P., Dapčević, S., Saveljić, N., Uvarov, V.V., Kulakov, V.M., "Indoor Radon Concentrations in The Town of Podgorica-Montenegro", *Radiation Measurements*, No. 28 (1-6), pp. 755-758, 1997.
168. Kropat, G., Bochud, F., Jaboyedoff, M., Laedermann, J., Murith, C., Palacios, M., Baechler, S., "Major Influencing Factors of Indoor Radon Concentrations in Switzerland", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 129, pp. 7-22, 2014.
169. Mireles, F., García, M.L., Quirino, L.L., Dávila, J.I., Pinedo, J.L., Ríos, C., Montero, M.E., Colmenero, L., Villalba, L., "Radon Survey Related to Construction Materials and Soils in Zacatecas, México Using LR-115", *Radiation Measurements*, No. 42 (8), pp. 1397-1403, 2007.
170. Papachristodoulou, C.A., Patiris, D.L., Ioannides, K.G., "Exposure to Indoor Radon and Natural Gamma Radiation in Public Workplaces in North-Western Greece", *Radiation Measurements*, No. 45 (7), pp. 865-871, 2010.
171. Obed, R.I., Ademola, A.K., Vascotto, M., Giannini, G., "Radon Measurements By Nuclear Track Detectors in Secondary Schools in Oke-Ogun Region, Nigeria", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 102 (11), pp. 1012-1017, 2011.
172. Alkan, T., Karadeniz, Ö., "Indoor ²²²Rn Levels and Effective Dose Estimation of Academic Staff in İzmir-Turkey", *Biomedical and Environmental Sciences*, No. 27 (4), pp. 259-267, 2014.
173. Alharbi, S.H., Akber, R.A., "Radon and Thoron Concentrations in Public Workplaces in Brisbane, Australia", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 144, pp. 69-76, 2015.
174. Akbari, K., Mahmoudi, J., Ghanbari, M., "Influence of Indoor Air Conditions on Radon Concentration in A Detached House", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 116, pp. 166-173, 2013.
175. Xie, D., Liao, M., Kearfott, K.J., "Influence of Environmental Factors on Indoor Radon Concentration Levels in The Basement and Ground Floor of A Building - A Case Study", *Radiation Measurements*, No. 82, pp. 52-58, 2015.
176. Singh, P., Singh, P., Singh, S., Sahoo, B.K., Sapra, B.K., Bajwa, B.S., "A Study of indoor Radon, Thoron and Their Progeny Measurement in Tosham Region Haryana, India", *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, No. 8 (2), pp. 226-233, 2015.
177. Jamir, S., Sahoo, B.K., Mishra, R., Sinha, D., "A Case Study on Seasonal and Annual Average Indoor Radon, Thoron, and Their Progeny Level in Kohima District, Nagaland, India", *Isotopes in Environmental and Health Studies*, No. 59 (1), pp. 100-111, 2023.
178. Yousef, A.M.M., Zimami, K., "Indoor Radon Levels, Influencing Factors and Annual Effective Doses in Dwellings of Al-Kharj City, Saudi Arabia", *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, No. 12 (1), pp. 460-467, 2019.
179. Wang, H., Zhang, L., Gao, P., Guo, Q., "A Pilot Survey on Indoor Radon Concentration in Beijing", *Radiation Medicine and Protection*, No. 3 (1), pp. 22-25, 2022.
180. Tchorz-Trzeciakiewicz, D.E., Olszewski, S.R., "Radiation in Different Types of Building, Human Health", *Science of The Total Environment*, No. 667, pp. 511-521, 2019.
181. Kurnaz, A., Küçükömerođlu, B., Çevik, U., Çelebi, N., "Radon Level and Indoor Gamma Doses in Dwellings of Trabzon, Turkey", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 69 (10), pp. 1554-1559, 2011.
182. Collignan, B., Ponner, E.L., Mandin, C., "Relationships Between Indoor Radon Concentrations, Thermal Retrofit and Dwelling Characteristics", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 165, pp. 124-130, 2016.
183. Abuelhia, E., "Evaluation of Annual Effective Dose From Indoor Radon Concentration in Eastern Province, Dammam, Saudi Arabia", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 140, pp. 137-140, 2017.
184. Ivanova, K., Stojanovska, Z., Djunakova, D., Djounova, J., "Analysis of The Spatial Distribution of The Indoor Radon Concentration in School's Buildings in Plovdiv Province, Bulgaria", *Building and Environment*, No. 204, pp. 108122, 2021.
185. Homoki, Z., Rell, P., Déri, Z., Kocsy, G., "Experiences of Radiological Examinations of Buildings in Hungary", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 171, pp. 148-159, 2017.
186. Jang, H., Lee, M., Lee, M., So, S., "Monitoring Radon Concentration of Cement Mortar Containing Gbfs By Diffused Junction Photodiode Sensor", *International Journal of Software Engineering and its Applications*, No. 8 (2), pp. 277-286, 2014.
187. Yang, R., "Source Radon Control of Cement-Based Materials and Application Prospect of Polymer Delayed Plugging Strategy", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, No. 331, pp. 4417-4424, 2022.
188. Kovler, K., "Legislative Aspects of Radiation Hazards From Both Gamma Emitters and Radon Exhalation of Concrete Containing Coal Fly Ash", *Construction and Building Materials*, No. 25 (8), pp. 3404-3409, 2011.

189. Turhan, Ş., Arıkan, İ.H., Yücel, B., Varinlioğlu, A., Köse, A., "Evaluation of The Radiological Safety Aspects of Utilization of Turkish Coal Combustion Fly Ash in Concrete Production", *Fuel*, No. 89, pp. 2528-2535, 2010.
190. Font, L.L., Baixeras, C., Domingo, C., Fernandez, F., "Experimental and Theoretical Study of Radon Levels and Entry Mechanisms in A Mediterranean Climate House", *Radiation Measurements*, No. 31 (1-6), pp. 106438, 2020.
191. Mnich, Z., Karpińska, M., Kapała, J., Kozak, K., Mazur, J., Birula, A., Antonowicz, K., "Radon Concentration in Hospital Buildings Erected During The Last 40 Years in Białystok, Poland", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 75 (2), pp. 225-232, 2004.
192. Cucos, A., Dicu, T., Cosma, C., "Indoor Radon Exposure in Energy-Efficient Houses From Romania", *Romanian Journal of Physics*, No. 60 (9), pp. 1574-1580, 2015.
193. Al-Khateeb, H.M., Aljarrah, K.M., Alzoubi, F.Y., Alqadi, M.K., Ahmad, A.A., "The Correlation Between Indoor And in Soil Radon Concentrations in A Desert Climate", *Radiation Physics and Chemistry*, No. 130, pp. 142-147, 2017.
194. Lee, C., Kwon, M., Kang, D., Park, T., Park, S., Kwak, J., "Distribution of Radon Concentrations in Child-Care Facilities in South Korea", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 167, pp. 80-85, 2017.
195. Al-Hubail, J., Al-Azmi, D., "Radiological Assessment of Indoor Radon Concentrations and Gamma Dose Rates in Secondary School Buildings in Kuwait", *Construction and Building Materials*, No. 183, pp. 1-6, 2018.
196. Nkoulou, J.E.N., Manga, A., Saïdou, German, O., Sainz-Fernandez, C., Njock, M.G.K., "Natural Radioactivity in Building Materials, Indoor Radon Measurements, and Assessment of The Associated Risk Indicators in Some Localities of The Centre Region, Cameroon", *Environmental Science and Pollution Research*, No. 29, pp. 54842-54854, 2022.
197. Alghamdi, A.S., Aleissa, K.A., Al-Hamarneh, I.F., "Gamma Radiation and Indoor Radon Concentrations in The Western and Southwestern Regions of Saudi Arabia", *Heliyon*, No. 5 (1), pp. e01133, 2019.
198. Ramachandan, T.V., Sathish, L.A., "Nationwide Indoor ^{222}Rn and ^{220}Rn Map For India: A Review", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 102 (11), pp. 975-986, 2011.
199. Ramsiya, M., Joseph, A., Jojo, P.J., "Estimation of Indoor Radon and Thoron in Dwellings of Palakkad, Kerala, India Using Solid State Nuclear Track Detectors", *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, No. 10 (3), pp. 269-272, 2017.
200. Büyükkuslu, H., Özdemir, F.B., Öge, T.Ö., Gökce, H., "Indoor and Tap Water Radon (^{222}Rn) Concentration Measurements at Giresun University Campus Areas", *Applied Radiation and Isotopes*, No. 139, pp. 285-291, 2018.
201. Kuluöztürk, M.F., Büyüksaraç, A., Özbey, F., Yalçın, S., Doğru, M., "Determination of Indoor Radon Gas Levels in Some Buildings Constructed With Ahlat Stone in Ahlat/Bitlis", *International Journal of Environmental Science and Technology*, No. 16 (9), pp. 5033-5038, 2019.
202. Morishita, Y., "Development of A Portable Alpha-Beta-Gamma Radioactive Material Continuous Air-Monitoring System", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, No. 1027, pp. 166258, 2022.
203. Nuccetelli, C., Leonardi, F., Trevisi, R., "Building Material Radon Emanation and Exhalation Rate: Need of A Shared Measurement Protocol From The European Database Analysis", *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 225, pp. 106438, 2020.