

Konut Radonunun Akciğer Kanseri Üzerindeki Etkisi

Halime Erzen Yıldız¹

Özet

Radon, ²³⁸U zincirinde yer alan ve doğal olarak üretilen, mutajenik özelliklere sahip bir gazdır. Radonun kısa ömürlü bozunma ürünleri ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi ve ²¹⁴Po radyoaktif izotoplardır ve inhale edildiğinde solunum sisteminde alfa parçacıkları yayarak akciğer hasarına neden olabilir. Akciğer kanseri radon maruziyetinin en belirgin sağlık etkisidir. Radon genel popülasyon için iyonizan radyasyonun en önemli doğal kaynağı olduğundan küresel epidemiyolojik kaygıyı temsil etmektedir. Bu nedenle konutlarda radon konsantrasyonlarının belirlenmesi ve radyolojik açıdan koruyucu önlemlerin alınması önemlidir. Konut radonu için toprak altından difüzyon en önemli kaynaktır. Mevsimsel değişiklikler, yerel jeoloji, bina iç-dış basınç farkı, binanın tipi, binanın bulunduğu ana kayanın özellikleri, bu kayanın geçirgenliği ve gözenekliliği, binanın toprakla temasta olduğu yüzeyin alanı, binanın yalıtımı, doğal gaz, ev içi havalandırma koşulları ve konut sakinlerinin yaşam tarzı maruz kalma seviyelerini etkileyen faktörlerdir. Bu çalışmanın amacı, konut radonunun Akciğer kanseri üzerindeki etkisi konusunda yapılmış çalışmaların analizi ile geniş bir perspektif sunmaktır.

Maliyete yönelik mevcut yöntemlerin sürekli analizi, alınacak radyolojik önlemler, gelecekte yaşam kalitesinin iyileştirilmesine ve sürdürülmesine yardımcı olacaktır. Akciğer kanseri üzerinde sigara ve diğer çevresel maddelerin güçlü kanserojen etkilerinin olması, epidemiyolojik çalışmalarda konut radonunun akciğer kanseri üzerindeki gerçek riskinin tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır.

1. GİRİŞ

İnsanlar yaşamları boyunca karasal kökenli iyonizan radyasyon ve güneş sisteminden kaynaklanan kozmik ışınlarla (trityum (³H), berilyum (⁷Be),

1 Van Yüzyüncü Yıl Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu
Orcid No:0000-0002-0603-1815

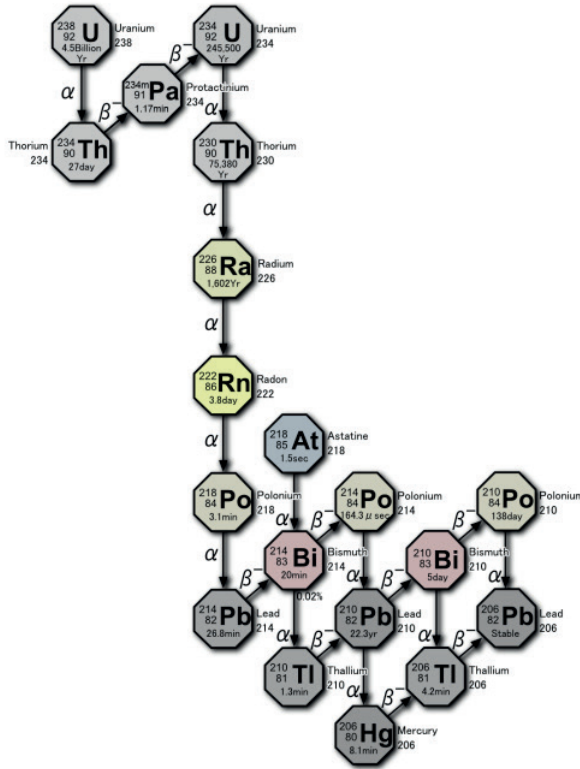
karbon (^{14}C) vb) doğal olarak maruz kalmaktadır. Karasal radyonüklidlerden en önemlileri uranyum (^{238}U), toryum(^{232}Th) serileri ve potasyum (^{40}K) dur. Bunların çevrede dağılımı bölgenin jeolojisi ve coğrafi durumuna bağlı olarak değişmektedir (Otansev, 2021 Can, 2011). UNSCEAR (Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi) raporuna göre doğal radyoaktiviteden dolayı insanların maruz kaldığı yıllık etkin doz 2.4 mSv ' dir ve bunun yaklaşık yarısı radon (^{222}Rn), toron (^{220}Rn) ve bunların kısa ömürlü aktif katı ürünlerine atfedilir (Çelebi vd, 2015, Grzywa-Celińska vd., 2020). ^{222}Rn , yarı ömrü 4.56×10^9 yıl olan ^{238}U 'in bozunma zincirinde yer alan bir soygazdır. Bir bölgedeki radon yoğunluğu; o bölgedeki kaya ve topraktaki uranyum ve radyum içeriği, gözeneklilik, geçirgenlik ve nem içeriği gibi özellikler, meteorolojik ve mevsimsel değişikliklere bağlıdır. Radonun kuru toprakta bozunmadan önceki difüzyon uzunluğu yaklaşık 1.6 olduğundan sağlık açısından tehlikeli bir gazdır (Verma ve Khan, 2014). Topraktaki radon, bina zeminindeki çatlak ve boşluk gibi yapısal kusurlardan dolayı bina içine kolaylıkla nüfuz edebilir. Radon konut gibi kapalı alanlarda birikebildiğinden insanlar iç mekanlarda radona maruz kalır (Kim vd., 2018). Genelde insanlar zamanlarının %90'lık kısmını kapalı ortamlarda geçirdikleri için radona maruz kalmaları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Radon ve onun bozunum ürünleri solduğunda veya yutulduğunda insan vücuduna girebilir. Radon inert bir gazdır ve fiziksel yarı ömrü 3.823 gündür (Grzywa-Celińska vd., 2020). Bu yüzden, bozunmadan önce solunum sürecinde ekshale edilebilir. Radonun kısa ömürlü bozunma ürünleri olan ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po radyoaktif izotoplardır ve kendilerini aerosol partiküllerine bağlarlar (Verma ve Khan, 2014). Bu partiküller inhale edildiğinde solunum sisteminde birikebilir, burada radyoaktif bozunmaya uğrayabilir ve alfa(α) parçacıkları yayarak akciğer hasarına neden olabilir (Choi ve Mazzone, 2014). Akciğer kanseri radon maruziyetinin en belirgin sağlık etkisidir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) sigaradan sonra akciğer kanserinin ikinci önde gelen nedeninin radon olduğunu belirtilmiştir (Jin ve Seo, 2018). Uluslararası Kanser Araştırma Kurumu (IARC), radonu 1.grup kanserojen olarak sınıflandırmıştır. Çok sayıda kohort, vaka kontrol ve deneysel çalışma, radonun kanserojen potansiyelini ortaya koymuştur (Sethi vd., 2012).

Radon genel popülasyon için iyonizan radyasyonun en önemli doğal kaynağıdır ve dünya çapında büyük bir epidemiyolojik kaygıyı temsil etmektedir. Bu nedenle konutlarda radon konsantrasyonlarının belirlenmesi ve radyolojik açıdan koruyucu önlemlerin alınması önemlidir (Reddy vd., 2022). Bu çalışmanın amacı, konut radonunun Akciğer kanseri üzerindeki etkisi konusunda yapılmış çalışmaların analizi ile geniş bir perspektif sunmaktır.

2. RADON NEDİR?

1984 yılında Pensilvanya'daki bir nükleer santralde çalışan bir işçi işten her çıktığında radyasyon dedektörü alarm çalıyordu (tesiste nükleer yakıt olmadığına bile). Bir gün tesise vardığında dedektörün yine alarm çalması üzerine kendi evinde radyasyon olabileceğinden şüphelenildi. Evini kontrol etmeleri için tesisin sağlık fizikçilerini ikna etti. Sonuçlar evde özellikle bodrum katında yüksek konsantrasyonda radon olduğunu ortaya çıkardı. Bu olay madenler dışında evlerde de radyoaktif gazların potansiyel olarak tehlikeli olabileceğini göstermiştir (Choi ve Mazzone, 2014).

Radon, ^{238}U zincirinde yer alan ve doğal olarak üretilen, mutajenik özelliklere sahip bir gazdır. Radon, kurşunun stabil izotopu olan ^{206}Pb ' ya kadar bozunur (Şekil 1).



Şekil 1 Uranyum (^{238}U) un bozunum şeması (Tosaka, 2008)

Diğer soy gazlar ile karşılaştırıldığında radon yoğunlukça en ağır, donma noktası, kaynama noktası, erime noktası ve kritik sıcaklığı en yüksek olandır. Soğuk suda çözülebilir. Havadan yaklaşık 7.5 kat daha ağır olan

radon renksiz, kokusuz ve tatsız olduğundan duyu organları ile algılanamaz (Yumurtacı, 2014).

Radonun bilinen 34 radyoaktif izotopu vardır. Doğal olarak oluşan ana izotopları ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (toron) ve ^{219}Rn (aktinon)'dur. Bunlar sırasıyla ilkel radyonüklidler olan ^{238}U , ^{232}Th ve ^{235}U doğal radyoaktif serisinin üyeleri olan radyum izotoplarının (^{226}Ra , ^{224}Ra ve ^{223}Ra) bozunum ürünleridir. ^{222}Rn , ^{220}Rn ve ^{219}Rn izotoplarının yarı ömürleri sırasıyla 3.823 gün, 55.6 sn ve 4 sn'dir (Jin ve Seo, 2018; Kang vd., 2019; Paquet vd., 2017). İzotoplarına kıyasla yarı ömrünün uzun olması ve doğada bulunma oranının %99.27 olması nedeniyle ölçümlerde ^{222}Ra kullanılır. ^{222}Rn gazı kararlı hale geçmek için α ve β partikülleri yayarak kısa yarı ömürlü ve katı olan radyoaktif bozunum ürünlerini ortaya çıkarır. Radonun bozunum ürünleri havadaki partiküllere bağlanma eğilimindedir. Radyoaktif seride radondan sonra gelen ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po kız çekirdekler, α ve β yayımlayan katı elementlerdir. Radonun kısa yarı ömürlü bozunum ürünlerinin (kızlarının) enerjileri ve yarı ömürleri Çizelge 1'de verilmiştir (ICRP, 1987) (Vogiannis ve Nikolopoulos, 2015; Eisenbud, 1987).

Çizelge 1 Radon kızlarının aktivite ve atom başına potansiyel alfa enerjisi

			Potansiyel Alfa Enerjisi		
			Atom başına	Aktivite birimi başına	
^{222}Rn kızları:	$t_{1/2}$	(MeV)	(10^{12} J)	(MeV/Bq)	(10^{-10} J/Bq)
^{218}Po	3.05 dk	13.7	2.19	3.620	5.79
^{214}Pb	26.8 dk	7.69	1.23	17.800	28.6
^{214}Bi	19.7 dk	7.69	1.23	13.100	21.0
^{214}Po	164 μs	7.69	1.23	2×10^{-3}	3×10^{-6}

Radon kimyasal olarak aktif olmamakla beraber oldukça hareketlidir. Bu yüzden hem yer kabuğunda hem de havada göç edebilir. Bir bölgedeki radon potansiyeli o bölgenin jeolojisi, toprak tipi, basınç, rüzgarın yönü ve gücü, nem, kar örtüsü gibi meteorolojik koşullara bağlıdır (Grzywa-Celińska vd., 2020).

Konut havasındaki radon konsantrasyonu mevsimsel ve günlük hava değişimlerine bağlı olarak da değişmektedir. Bu dalgalanmalar nedeniyle, yıllık ortalama konut radon konsantrasyonunun tahmin edilebilmesi için güvenilir ölçümler gereklidir. Radonun kısa ve uzun vadeli ölçümlerini sağlayan farklı yöntemler mevcuttur, ancak WHO tarafından en çok tavsiye

edileni, en az üç aylık bir süre boyunca iz kazanmış alfa dedektörleridir (Riudavets vd., 2022).

2.1. Radon İçin Kullanılan Doz Birimleri

Solumuyla alınan doz havadaki radon ürünlerinin bozunmaları sırasında yayılan α parçacıklarının inhale edilmesinden kaynaklanır. Birim hava hacmindeki kısa ömürlü ürünlerin bozunmasından yayılan toplam α enerjisi PAEC (potansiyel alfa enerji konsantrasyonu) olarak adlandırılmıştır.

PAEC'nun birimi çalışma düzeyi (WL) olarak tanımlanır. 1 WL, 1 litre havada 1.3×10^5 MeV ($1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$) α enerjisi emilimi ile sonuçlanacak kısa ömürlü radon neslinin (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po) konsantrasyonu olarak tanımlanır (Veiga vd., 2004). Aynı zamanda 1 WL, ^{222}Rn 'nin 3700 Bqm^{-3} denge eşdeğer konsantrasyonu (EEC)'na eşittir. EEC, kısa ömürlü ürünleri ile dengede olan radon gazının aktivite konsantrasyonudur (UNSCEAR, 2000). 170 h'lik bir çalışma ayı boyunca 1WL'lik konsantrasyonda bir atmosferin solunmasından kaynaklanan kümülatif maruziyet aylık çalışma düzeyi (WLM) olarak tanımlanır. Bir yıl boyunca 1 Bqm^{-3} radona maruz kalan evlerde 4.4×10^{-3} WLM doz oluşur (ICRP, 2010).

Radon, metreküp hava başına Becquerel (Bqm^{-3}) veya (ABD'de), pikoCurie/litre (pCi/L) cinsinden ölçülür ($1 \text{ pCi/L} = 37 \text{ Bqm}^{-3}$). Birim zamanda bozunan tanecik sayısına Aktivite denir. Eğer saniyede 37×10^9 bozunum gerçekleşiyorsa buna 1 Curie (Ci) denir. Saniyede bir bozunum gerçekleşiyorsa buna da 1 Becquerel (Bq) denir. Buna göre; $1 \text{ Ci} = 37 \times 10^9 \text{ Bq}$ olarak yazılabilir (Vogeltanz ve Schwartz, 2018).

Radyasyona maruziyetin oluşturduğu hasar dozunu belirlemede Eşdeğer ve Etkin doz birimi kullanılır. 1 Röntgen (1 gr havada 88 erg'lik bir iyonlaşma)' lik ışmanın meydana getirdiği hasara eşdeğer doz denir. Eşdeğer doz, radyasyonun türüne, enerjisine ve parçacığın Lineer enerji transferi (LET) değerine bağlıdır. LET, parçacığın geçtiği birim yol uzunluğu başına kaybettiği enerji olarak adlandırılır ve birimi $\text{keV}/\mu\text{m}$ 'dir (Şeker ve Çerezci, 1997). O halde LET değeri yüksek olan parçacıkların biyolojik etkisi de büyük olacaktır. Farklı radyasyonların insan dokusundaki hasar potansiyeli de farklı olacağından, absorbe edilen dozun radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak kalite çarpanı olan ağırlık faktörü (W_R) ile çarpılması eşdeğer doz olarak tanımlanır ve birimi Sievert'dir. α partikülü için W_R değeri 20'dir.

1 kg maddenin 1 Joule (J)'lük enerjiye karşılık gelen iyonize radyasyonu soğurmasına absorbe doz denir ve birimi Gray (Gy)'dir. Havada 1 R'lik ışınlama dozu 88×10^{-4} Gy'lik absorbe doz oluşturur (Bora, 2001).

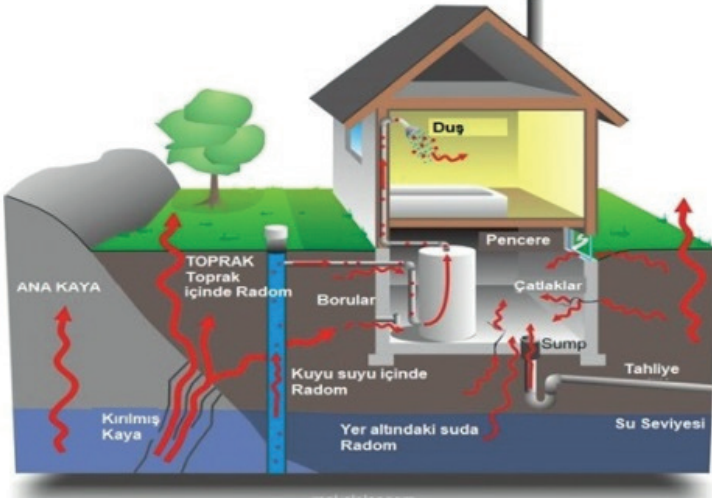
İnsan vücudundaki farklı organ ve dokunun iyonize radyasyona karşı duyarlılıkları da farklıdır. Bu nedenle ağırlıklı eşdeğer dozların toplamı olan “efektif doz (E_{eff})” kavramı kullanılmaktadır. Örneğin 1 Gy absorbe doz, vücudun bütün dokularında aynı etkiyi göstermez. Etkif dozu belirlemede çeşitli organ için tespit edilen doku ağırlık faktörleri (W_T) kullanılır. Akciğer için W_T değeri 0.12’dir (Eckerman vd., 2012). Böylece E_{eff} radyasyonun enerjisi, tipi, doku ve organ hassasiyetlerinin birlikte hesaplanmasının bir ölçüsüdür.

2.2. Radon Kaynakları ve Konuta Girişi

Radon, halkın doğal radyasyona maruz kalmasının önemli bir kaynağıdır ve bazı durumlarda ana unsurdur. Mevsimsel değişiklikler, yerel jeoloji, bina iç-dış basınç farkı, binanın tipi, binanın bulunduğu ana kayanın özellikleri, bu kayanın geçirgenliği ve gözenekliliği, binanın toprakla temasta olduğu yüzeyin alanı, binanın yalıtımı, doğal gaz, ev içi havalandırma koşulları ve konut sakinlerinin yaşam tarzı maruz kalma seviyelerini etkileyen faktörlerdir (Clement vd., 2010; Otansev. 2021). Türkiye’nin Rize ilinde yapılan bir çalışmada akciğer kanserli hastaların yaşadığı konutlarda yaz ve kış mevsimi iç mekan radon konsantrasyonları ölçülmüş ve kış mevsimi için hesaplanan ortalama etkin doz eşdeğerlerinin UNSCEAR’ın belirlediği standart değerden yüksek olduğu gözlenmiştir. (Dursun, 2016). Bina ile temas halindeki toprak, özellikle müstakil evlerde yüksek iç mekan radonunun birincil kaynağı olarak kabul edilmektedir (Reimer ve Gundersen, 1989).

Konut radonu için toprak altından difüzyon en önemli kaynaktır. Radon, altta bulunan kayalardaki uranyum ve toryumdan üretiliyor. Özellikle uranyum cevherleri, granit, fosfat kayaları ve metamorfik kayalarda 10.000 Bqm⁻³’e ulaştığı kanıtlanmıştır. Ana kaya ve temellerdeki çatlaklar ve yarıklar radonun binalara sızmasına neden olur. Bir binanın yapısı içinde, yeraltına yakınlık nedeniyle radon konsantrasyonları bodrum katında en yüksektir. Özellikle kış mevsiminde evsel ısıtma, bodrum ve zemin iç mekanlarında negatif basınca neden olur (baca etkisi). Bu, radonun içeri akışını artırırken, azaltılmış havalandırma ve enerji tasarrufu nedeniyle bina yalıtım sistemlerinin daha iyi hale getirilmesi, radonun iç mekan havasında yoğunlaşmasına neden olur. Birleşik Krallık’ta yapılan araştırmaya göre; radon konsantrasyonu ile sosyoekonomik durum arasında güçlü bir korelasyon olduğu, daha az varlıklı insanların evlerinde daha düşük düzeyde radon tespit edilmiştir. Bunun sebebinin bu tür evlerde yetersiz yalıtım ve daha düşük sıcaklığın mevcut olması olduğu belirtilmiştir. Uranyum madenlerinin yakınında yaşayan insanlar daha yüksek radon maruziyetine sahiptir. Polonya’da granitoid masiflerin ve yüksek uranyum ve toryum içeriğine sahip metamorfik kayaların

bulunduğu Sudetes ve Sudeten Dağlarında yüksek oranda radon mevcuttur (Riudavets cd., 2022; Hassfjell vd., 2017; Sethi vd., 2012; Grzywa-Celińska vd., 2020). Şekil 2’de radonun evlere giriş yolları görülmektedir.



Şekil 2 Radonun konuta giriş yolları (Aslan, 2022)

Topraktaki çatlaklar normal taşıma süreçlerini değiştirebilir ve büyük mesafelere konvektif akış için bir kanal sağlayabilir. Örneğin, kuru killi toprak çatlayabilir ve radon gazını çok geçirgen olan çakıl veya kumdan daha fazla taşıyabilir. Fay hatları, toprağın derinliklerinden yüzeye radon akışına sebep olabilir. Mosley (1992) yaptığı çalışmada, su hatları, kanalizasyon, elektrik kablolarının geçtiği yeraltı kanallarının, bu kanalları çevreleyen toprağın düşük geçirgenliğe sahip olduğu durumlarda uzun mesafelerde radon taşınması için bir yol sağladığını belirtmiştir.

Radon, düşük konsantrasyonlarda olsa da yapı malzemelerinde (briket, tuğla, seramik vb.) de bulunur. Doğal olarak oluşan radyoaktif potasyum (^{40}K), toryum (^{232}Th), radyum (^{226}Ra) izotopları yapı malzemelerinde bulunur ve bina sakinleri için hem iç hem de dış maruziyet kaynaklarından biridir (Hussein vd., 2013). Chen vd. (2010) yaptıkları çalışmada, arduvaz ve granitin diğer dekoratif malzemelerden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Radonun suda çözünebilme yeteneği diğer soy gazlardan daha yüksektir. Radon topraktaki porlardan ve çatlaklardan sızarak yeraltı sularına taşınabilmektedir. Topraktan radon salınımı; toprağın permeabilitesi (dansite, porozite, granülometrik özellikleri), toprağın durumu (kuruluk, suyla tıkanmış olma, donma, karla örtülü olma), meteorolojik koşullar

(toprak ve hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgar hızı ve yönü), bölgenin yüksekliği ile ilişkilidir. Yapılan bir çalışmada radon konsantrasyonları için medyan değerler yüzey sularında 2.2 kBqm^{-3} , kuyu sularında ise 10.4 kBqm^{-3} , kaynak sularında 15.1 kBqm^{-3} olarak elde edilmiştir. Ayrıca okyanuslar sınırlı da olsa radon salınımı yapabilmektedir (Güler ve Çobanoğlu, 1997, Cosma vd., 2009). Radonun sudaki difüzyonu, havadakinden altı kat daha yavaştır (Stowe, 1994). Musluk suyundaki radon, içme suyunun yutulmasından ve su kullanıldığında havaya yayılan radonun solunmasından kaynaklanan maruziyetlere yol açabilir. Suyun sıcaklığı arttıkça konut atmosferindeki radon miktarı da artar (UNSCEAR, 1994; 2000).

Doğal gaz ölçülemeyecek kadar düşük seviyeden 50 Bqm^{-3} 'e kadar değişen miktarlarda radon içerebilmektedir (Örgün ve Çelebi, 2015). Yapılan bir çalışmada; doğal gaz kullanılan kapalı ortamlarda ortalama radon konsantrasyonları $111.51\text{-}236.98 \text{ Bqm}^{-3}$ arasında iken doğal gaz kullanılmayan binalarda ise $67.63\text{-}69.68 \text{ Bqm}^{-3}$ arasında olduğu tespit edilmiştir (Sac, 2009). Kömür uranyum ve toryum serisinin yanı sıra ^{40}K radyonüklidlerini içerdiği için radon kaynağıdır. Zonguldak taşkömürü havzasında ölçülen radon gazı değerleri $253\text{-}1470 \text{ Bqm}^{-3}$ olarak saptanmıştır (Aydoğmuş, 2019).

3. AKCİĞER KANSERİ VE RADONUN HASAR MEKANİZMASI

Akciğer neoplazmaları çok faktörlü etiyojolojiye sahip heterojen bir hastalık grubudur. Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC) 2020 dünya kanser istatistiklerine göre; dünya çapında tahmini 19.3 milyon yeni kanser vakasından akciğer kanseri %11.4 oranla meme kanserinden sonra ikinci sırada, tahmini 1.8 milyon ölümlü (%18) de kanser ölümlerinin önde gelen nedeni olmaya devam etmektedir (DSÖ, 2020). Türkiye'de ise 2020 yılında yapılan istatistiklere göre 233.834 kanser vakasından 41.264 (%17.6) ile akciğer kanseri birinci sırada yer almaktadır. Erkeklerde ilk sırada kadınlarda ise dördüncü sıradadır (Özdoğan, 2020) ve 5 yıllık sağkalım oranı %13-17'dir (Ruano-Ravina vd., 2020). Akciğer kanseri, kanser tarama programları içinde değerlendirilemeyen bir tür olduğundan başlangıç evresinde tespit edilmesi enderdir ve erken tanı ihtimali %15 civarındadır (Memorial, 2021; Akdemir ve Aydos., 2018).

Akciğer kanserinin küçük hücreli (SCLC) ve küçük hücreli olmayan akciğer kanserleri (NSCLC) olmak üzere iki ana alt tipi vardır. SCLC zayıf şekilde farklılaşmış nöroendokrin hücrelerden kaynaklanır ve hızlı metastaz, tedaviye zayıf yanıt ve kötü prognoza sahiptir. Skuamöz hücreli (SCC) ve

küçük hücreli kanserlerin merkezi yerleşimli olma ve özellikle erkeklerde sigara içme öyküsüyle ilişkili olma olasılığı daha yüksektir. Tüm akciğer kanseri vakalarının %15-25'i hiç sigara içmeyenlerde ortaya çıkar. Adenokarsinomun kadınlarda ve sigara içme öyküsü olmayanlarda ortaya çıkma olasılığı ve genel sağkalımı yüksektir. Çok merkezli bir vaka kontrol çalışmasında konut radonuna maruz kalmanın genel popülasyonda SCLC riski üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve ortalama konut radon konsantrasyonunun kontrollere kıyasla SCLC vakalarında daha yüksek olduğu belirtilmiştir (152.5 Bqm⁻³e karşılık 142 Bqm⁻³). Rodríguez-Martínez vd., 2022; Torres-Durán vd., 2014; Thandra vd., 2021).

Akciğer kanserinin primer sebebi sigara olduğundan sigarayı bırakma konusundaki ilerlemeler vaka ve ölüm oranlarında azalmayla sonuçlanmıştır. Batı dünyasında sigara tüketimi azalırken, dünya çapında ve Çin gibi gelişmekte olan birçok ülkede sigara kullanımı artmaktadır. İspanya'da yapılan bir vaka-kontrol çalışmasında; iç mekan radonunun akciğer kanseri için bir risk faktörü olduğu, hatta resmi kılavuz seviyelerinin çok altındaki konsantrasyonlarda bile, radonun akciğer kanseri riskinde 2.5 kat artışa neden olabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, sigara içme ve radon arasında sinerjik etki olduğu da belirtilmiştir (Barros-Dios vd., 2002).

Akciğer kanseri için ikinci en büyük risk faktörü radon ve onun bozunum ürünleridir. Radon vakaların tahmini %10'undan, sigara içmeyenlerde ise %30'undan sorumludur. Ortalama 15 Bqm⁻³ (EEC) iç mekan seviyesine maruz kalan tipik bir referans popülasyon için, gözlemlenen akciğer kanseri sıklığının yaklaşık %5'inin bu radyasyona maruz kalma ile ilişkili olabileceği beklenmelidir. Nüfusun sigara içmeyen kısmı için bu oran yaklaşık %10 civarındadır (Jacobi, 1984). Transilvanya (Romanya)'da 406 konutta iç mekan radon konsantrasyonu ortalama 82.5 Bqm⁻³ olarak hesaplanmıştır. Aynı çalışmada, 10⁻⁴/100 Bqm³y⁻¹ bir kanser risk katsayısı varsayıldığında, Transilvanya popülasyonu için yılda yaklaşık 600 akciğer kanserinin radona atfedilebildiği belirtilmiştir (Cosma vd., 2008). Diğer risk faktörleri arasında; pasif içicilik, asbest, hava kirliliği, arsenik, HIV (Human Immunodeficiency Virus) ve TB (Tüberküloz) yer alırken, esrar, e-sigara ve COVID-19'un riski artırdığı öne sürülüyor. Bunla beraber imkanları kısıtlı olan nüfus, sağlık hizmetlerine daha düşük erişim, akciğer kanseri riskini arttırmakta ve sağkalımı azaltmaktadır (Thandra vd., 2021).

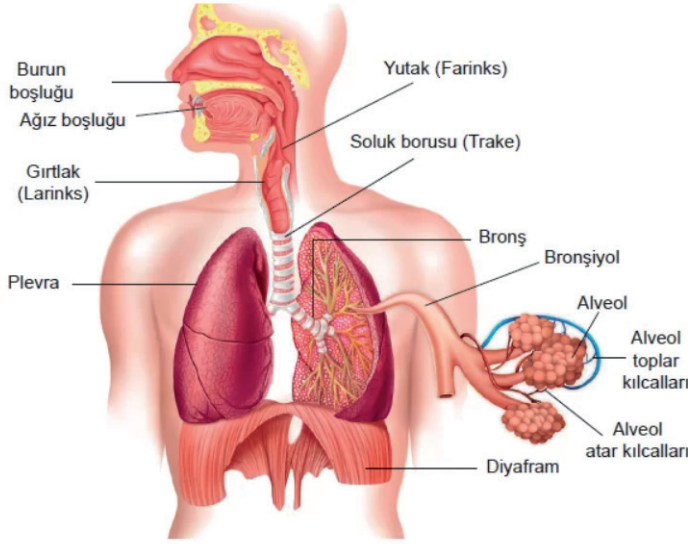
UNSCEAR 2019 raporunda, solunan radon ve onun ürünlerinin akciğer için kanserojen olduğu belirtilmiştir. Akciğer kanseri riski, havadaki radon soyunun solunması sonucunda akciğere salınan α radyasyonundan kaynaklanır. Radyoaktif tozun inhale edilmesi ile akciğerlerin farklı bölümleri

tarafından alınan doz; solunan havadaki radyonüklidlerin konsantrasyonuna, solunum hızına, radyonüklidin fiziksel özelliklerine, tozun biriktiği akciğer bölgesine, bireyler arasındaki fizyolojik ve morfolojik faktörlere, tozun uzaklaştırılma hızına, partikül boyutuna ve yoğunluğuna bağlıdır. (Eisenbud, 1987). α radyasyonu, yüksek LET değerine sahip olduğundan penetrasyon yeteneği düşük fakat hedefe aktardığı enerji yüksektir. Dolayısıyla iyonizasyon yeteneği yüksektir ve daha ciddi hücre hasarına yol açar (Sethi vd., 2012). Dozimetrik yaklaşımın kullanıldığı bir çalışmada; farklı yaş gruplarındaki farklı vücut organlarına radon neslinin inhalasyon dozları yaşa bağlı biyokinetik model kullanılarak hesaplanmıştır. ^{222}Rn ve ^{220}Rn soy konsantrasyonlarının yıllık ortalama değerleri, ICRP tarafından önerilen referans seviyeleri arasında olduğu belirtilmiştir. Aynı çalışmada, bir bebeğin eşdeğer doz değerinin yüksek olduğu, ağızdan solunuma bağlı inhalasyon dozunun, nazal solunumdan iki kat daha fazla olduğu, bağlanma oranı ile aerosol konsantrasyonu arasında pozitif ilişki olduğu da ifade edilmiştir (Sharma vd., 2018).

Atmosferdeki radon projeni aerosolü iki adımda oluşturulur. Radon gazının bozunmasından sonra oluşan ürünler eser gazlar ve buharlarla hızla (<1 s) reaksiyona girer ve küme oluşumuyla büyüyerek 1nm boyutunda “bağlanmamış parçacıklar” oluşturur. Bu parçacıklar atmosferdeki mevcut aerosol parçacıklarına 1-100 saniye içinde bağlanarak “bağlı parçacıklar”ı oluşturabilir. Bağlı parçacıklar, üç lognormal dağılımın toplamı ile tanımlanabilecek üç modlu bir aktivite boyutu dağılımına sahip olabilir. Bunlar, aktivite medyan aerodinamik çapı (AMAD) 10-100 nm olan çekirdeklenme modu, 100-400 nm AMAD’ye sahip birikim modu ve AMAD $>\mu\text{m}$ olan kaba modu içerir. Genel olarak en büyük aktivite fraksiyonu, birikim modundadır. Radon hasarı için önemli olan akciğerin bronşiyal ve bronşiyol bölgelerindeki hedef hücrelere uygulanan dozdur. Karşılaştırıldığında alveoler bölgeye uygulanan doz önemli ölçüde daha düşüktür (Clement vd., 2010).

Radon maruziyetinde kanser riskini artırabileceği olası biyolojik mekanizmalar arasında baz mutasyonları, kromozomal kırılmalar, reaktif oksijen türlerinin oluşumu, sitokinlerin yukarı veya aşağı düzenlenmesi ve hücre döngüsü düzenlemesiyle ilişkili proteinlerin üretimi yer alır (Choi ve Mazzone., 2014) α radyasyonu DNA’nın çift sarmallı yapısını bozarak genetik materyale doğrudan zarar verdiği gibi, reaktif oksijen türleri üreten suyun radyolizi sonucu dolaylı olarak da zarar verir (Ruano-Ravina vd., 2014).

Radon nesline maruziyette birim başına akciğerlere verilecek eşdeğer dozun hesaplanmasındaki ana değişkenler arasında; radon nesil aerosolünün aktivite büyüklüğü dağılımı, radon soyununun akciğerlerden kana emilmesi, hedef hücrelerin bronşiyal ve bronşiyol epiteli içindeki konumları, farklı hücre tiplerinin radyasyona karşı göreceli duyarlılığı, akciğerin radyasyon duyarlılığındaki bölgesel farklılıklar yer almaktadır (Chen vd., 2010) (Şekil 3).



Şekil 3 İnsan solunum sistemi (Bilgial, 2019)

Radon ile akciğer kanseri arasındaki nedensellik ilişkisini destekleyen güçlü epidemiyolojik kanıtlar mevcuttur. İlk kanıtlar birçok yeraltı madencisinin akciğer kanserinden öldüğü gözlemine dayanmaktadır. Bu madenci çalışmalarından elde edilen veriler, iç mekan radonuna maruz kalmayla ilişkili risklere ilgi duyulmasına yol açmış ve konutlarda radona maruz kalmayı değerlendiren vaka-kontrol çalışmalarını tetiklemiştir. Amerika'nın Iowa şehrinde yapılan vaka kontrollü epidemiyolojik bir çalışmada; aynı adreste 20 yıl oturan konut sakinlerinde, konut radonu ile akciğer kanseri arasındaki ilişki incelenmiş ve kümülatif doz ve akciğer kanseri arasında pozitif bir ilişki olduğu gösterilmiştir (Field vd., 2000).

Radonun daha merkezi bronşiyal karınaya maksimum radyasyon dozunu iletmesi nedeniyle küçük hücreli alt tipinin baskınlığı öne sürülmektedir. Bununla birlikte, skuamöz hücreli karsinom ve adenokarsinom da dahil

olmak üzere tüm histolojik alt tiplerin radon ile ilişkili olduğunu kabul etmek önemlidir (Choi ve Mazzone., 2014). Vaka-kontrol çalışmalarının değerlendirildiği bir makalede; konut radonu ve akciğer kanseri arasında istatistik olarak anlamlı bir ilişki olduğu, hatta radona eğilimli alanlarda daha pozitif bir ilişki olduğu ifade edilmiştir. Histolojik değerlendirmede ise SCLC ve SCC ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğu belirtilmiştir (Sheen vd., 2016). Ek olarak, bazı proteinlerin radonun neden olduğu iltihaplanma, ibrozis ve karsinogeneze aracılık ettiğine dair kanıtlar vardır. Bu proteinlerden RAGE ve S100A6'nın radona maruz kalmaya yanıt olarak yukarı doğru düzenlendiği bulunmuştur ve bu proteinler Radonun neden olduğu hasarın potansiyel biyobelirteçleri olarak önerilmiştir (Sethi vd., 2012).

Radon kanıtlanmış bir insan kanserojeni olduğundan radon maruziyetinin bir halk sağlığı sorunu olarak ele alınması, hem mesleki hem de iç mekan radon maruziyetine bağlı akciğer kanseri riskinin tahmin edilmesi açısından önemlidir. ²²²Rn karsinojen etkisinin yanında hasar etkisi göz önüne alınarak gerçekleştirilen bir çalışmada; ileri evre rektal karsinomlu bir hastaya günde 3 kez 15 dak süreyle radon gazı verilmiştir. Sakrum ağrısı nedeniyle günlük yaşam aktivitesini sınırlanan hastada ayrıca akciğer ve karaciğer metastazı da tanımlıdır. Hastaya uygulanan tedavi sonunda tümör belirteçlerinde önemli ölçüde düşüş ve sakrum ağrısında azalma sağlanmıştır (Takatori vd., 2013). 2006 yılında Zdrojewicz ve Strzelczyk tarafından hazırlanan bir rapor, radona maruz kalmanın çok düşük dozlarda, belki de onarım mekanizmalarını uyatarak faydalı olabileceği ihtimali konusunda tıp camiasını, açık fikirli olmaya çağırmıştır. Hormesis olarak adlandırılan bu kavram, kanser riskinin herhangi bir minimum eşik seviyesi olmadan doğrusal olarak arttığı yönündeki ana görüşten farklıdır (Choi ve Mazzone., 2014).

4. RADONU AZALTMA STRATEJİLERİ

Yıllık akciğer kanseri vakalarının yalnızca üçte biri radona atfedilebilir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) konut radonu için maksimum 2.7 pCi/L (100 Bqm⁻³) olarak belirlemiştir. Çevre Koruma Ajansı (EPA)'nın iç mekan radonu için belirlediği limit değer 4pCi/L (148 Bqm⁻³)' dir (Sethi vd., 2012). ICRP 65, konutlar için sırasıyla 200-600 Bqm⁻³ aralıklarını önermiş, fakat daha sonra referans seviyesinin üst değerini 600 Bqm⁻³den 300 Bqm⁻³e revize etmiştir. Bu değerler doğrultusunda yıllık etkin doz için eylem seviyesi yaklaşık 3-10 mSv aralığı ile sınırlıdır (ICRP, 1993). Dünya iç mekan radon ortalaması 40 Bqm⁻³dür (Kumar vd., 2014). Türkiye'de müsaade edilebilir iç mekan radon konsantrasyonu 400, ortalama değer ise 81 Bqm⁻³ olarak belirlenmiştir (Çelebi vd., 2015). Çeşitli ülkeler ve

uluslararası kuruluşlar tarafından benimsenen konutlarda müsaade edilebilir radon konsantrasyonları Çizelge 2’de verilmiştir (TAEK, 2012).

Çizelge 2. Radon konsantrasyon limitleri (Bqm⁻³)

A.B.D	150	Hindistan	150	Lüksemburg	250
Almanya	250	İngiltere	200	Norveç	200
Avustralya	200	İrlanda	200	Polonya	400
Çek Cum.	200	İsrail	200	Rusya	200
Çin	200	İsveç	200	Türkiye	400
Danimarka	400	İsviçre	400	AB	400*
Fransa	400	Kanada	800	ICRP	400
Finlandiya	200	Litvanya	100	WHO	100

**yeni binalar için 200 Bqm⁻³*

Radon azaltıma protokolleri binalardaki radon konsantrasyonunun ölçülmesiyle başlar. Üçüncü katın altındaki tüm yaşam alanlarının radon ölçümüne tabi tutulması tavsiye edilir. Eylem seviyesi sınırını aşan radon değerine sahip alanlar azaltma tedbirlerini gerektirir. EPA ayrıca, konut radon seviyeleri 2 ile 4 pCi/L arasında olduğunda insanların evlerini iyileştirmeyi düşüncelerini öneriyor. Radon testine yönelik 2 genel yaklaşım vardır: Birincisi kısa süreli testler, genellikle “kapalı ortam” koşullarında 2 ila 7 gün sürer. İkincisi ise en az 90 gün süren uzun vadeli testlerdir (Lantz vd., 2013). Méndez ve ark. BEIR VI risk modelini kullanarak Amerika Birleşik Devletleri’nde tüm hanelerin hükümet tavsiyelerine (4 pCi/L düzeylerinde hafifletme eylemleri) uyması durumunda 2100 yılına kadar radona bağlı yıllık akciğer kanseri ölüm oranında %21’lik bir azalma olacağını tahmin etmiştir (Choi ve Mazzone., 2014).

İç mekan radon konsantrasyonunun değerlendirilmesi ve azaltılması, Avrupa Kanseri Mücadele Yasasının 12 tavsiyesinden biridir. Bu listenin dokuzuncu maddesinde; “Evinizde doğal olarak yüksek radon seviyesinden radyasyona maruz kalıp kalmadığınızı öğrenin, Yüksek radon seviyelerini azaltmak için harekete geçin” ilkesi yer almaktadır (Riudavets vd., 2022).

Radona karşı koruma, referans seviyelerinin uygulanması ve optimizasyon ile sağlanır. Kore’de yerel bir şirketin, ²²²Rn ve ²²⁰Rn içeren bir monazit olan radyoaktif madde içerikli yataklar sattığı bildirilmiştir. Bu da optimizasyon ilkesiyle bağdaşmamakla birlikte yatakları kullanan kişilerde sağlık sorunları sosyal bir sorun haline gelmektedir (Jin ve Seo., 2018).

Bilimsel literatür, bir radon kontrol stratejisi tasarlarırken göz önünde bulundurulması gereken birbiriyle ilişkili 3 konu için kanıt sunmaktadır: Bunlardan ilki sigara içmek ve radona maruz kalmak arasında güçlü bir sinerji vardır; öyle ki, radonun neden olduğu akciğer kanseri yükünün büyük çoğunluğunu sigara içenler taşımaktadır. İkincisi halk genel olarak bu artan riskin farkında değildir; sigara içenlerin aslında test yapma ve tedavi olma olasılıkları daha düşüktür. Üçüncüsü ise konutlarda radon kontrolü çabaları, daha yüksek risk altındakilerin (sigara içenler gibi) test ve iyileştirme çalışmalarına katılması durumunda maliyet etkinliği eşik değerlerine yaklaşabilir (Lantz vd., 2013). Sigarayı bırakmak istemeyen veya bırakamayan bireyler için konut radonunun azaltılması, akciğer kanseri riskini azaltmak için en önemli önlem olabilir. Radona bağlı ölümlerin bir kısmını azaltmak için sigaranın önlenmesi ve bırakılmasına odaklanmak hem halk sağlığı kazanımları hem de ekonomik verimlilik açısından radon kaynaklı akciğer kanseri yükünü azaltmak için en uygun stratejidir (Sethi vd., 2012).

Genel olarak radon azaltma tedbirleri arasında iç mekana radonun girişinin önlenmesi ve iç mekan atmosferine girmiş olan radonun ortadan kaldırılmasına yardımcı olan teknikleri kapsar. İç mekan radon seviyesinin %50'den fazla azaltılması etkili bir önlemdir. Azaltma tekniklerinin bir kombinasyonu, radon seviyelerinin %90'a kadar düşüşünde etkili olabilir

Amerika Birleşik Devletleri'nde en yaygın kullanılan ve EPA tarafından en etkili radon azaltma tekniği aktif toprak basıncının düşürülmesi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca herhangi bir önlemin etkinliği, uygulandığı binanın bireysel özelliklerine de bağlıdır. EPA'nın radonun azaltılmasına yönelik yönergeleri arasında, mevcut konutlarda testlerin ve azaltım önlemlerinin kullanılması ve radona dayanıklı yeni konutların inşası, radon farkındalığının teşvik edilmesi yer almaktadır.

Bina yapılırken kullanılacak yapı malzemelerinin radyoaktivite açısından araştırılması ve yapının inşa edileceği bölgenin radon haritasının çıkarılması da son derece önemlidir. Özellikle bodrum katlarının izolasyonu iyi yapılmalı, eski evlerde duvar çatlakları kapatılmalıdır. Bununla birlikte evlerde kötü havalandırma koşulları radona maruz kalmayı önemli ölçüde artırmaktadır (Otansev, 2021).

5. SONUÇ

Yıllar boyunca radonun neden olduğu hasar mekanizmalarının anlaşılmasında çok ilerleme kaydedilmiştir ve bu, gelecekteki araştırmalar için bir alan olmaya devam edecektir. EPA tarafından radon kontrolüne

ilişkin önerilen ABD kamu politikası, radon farkındalığının, tespiti ve azaltılmasına yönelik önlemleri kapsamaktadır. Mevcut önlemleri kullanarak konut radonunu azaltmaya yönelik sistematik bir yaklaşım, daha evrensel bir uygulamayı sağlayacak uygun maliyetli önlemlere yönelik sürekli araştırmalarla güçlendirilebilir. Ayrıca maliyete yönelik mevcut yöntemlerin sürekli analizi, alınacak radyolojik önlemler, gelecekte yaşam kalitesinin iyileştirilmesine ve sürdürülmesine yardımcı olacaktır. Akciğer kanserinin dünya çapında hem insidansının hem de mortalitesinin yüksek olduğu göz önüne alındığında, konut radonunun azaltılmasına yönelik çabaların sigarayı bırakma stratejileri ile birlikte sürdürülmesi gerekmektedir.

Radona maruz kalmanın halk sağlığı üzerindeki etkisini azaltma şansını arttırmak ve akciğer kanserinin daha etkili bir şekilde önlenmesine katkıda bulunabilmek için sorunun daha iyi anlaşılması için popülasyon bilinçlendirilmelidir. İç mekan radonu riski farkındalığına odaklanmak, göğüs hastalıkları uzmanlarını, epidemiyologları, onkologları, mimarları, endüstriyel hijyenistleri ve diğerlerini içeren multidisipliner bir yaklaşım kullanılarak en etkili şekilde ele alınması ile mümkündür.

Mevcut binalardaki radon konsantrasyonları, genellikle orta düzeyde bir maliyetle, örneğin zemin altı havalandırma, toprak basınçlandırma sistemlerinin artırılması, radon kuyuları ile azaltılabilir.

Radonla ilişkili hastalık yükünü azaltmak amacıyla, ulusal otoritelerin radona maruz kalmayı önlemeye yönelik yöntem ve araçları kullanması ve yüksek iç mekan radon konsantrasyonlarına maruz kalan popülasyonları belirlemesi ve bilimsel çalışmaların bu popülasyonlar üzerinde gerçekleştirilmesi önemlidir. Radon maruziyeti ve akciğer kanseri riski arasındaki doz-yanıt ilişkisini daha doğru bir şekilde değerlendirmek için, çalışma alanı düşük radon maruziyetine sahip bir alan yerine radona eğilimli bir alan olmalıdır. Hem vaka ve kontrol grupları arasındaki farkların tespit edilmesi hem de radonun akciğer kanseri riski üzerindeki etkisinin kesin tahminlerini mümkün kılmak için büyük numuneler içeren çalışmalara ihtiyaç vardır.

Akciğer kanseri üzerinde sigara ve diğer çevresel faktörlerin güçlü kanserojen etkilerinin olması, epidemiyolojik çalışmalarda konut radonunun akciğer kanseri üzerindeki gerçek riskinin tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır.

KAYNAKÇA

- Akdemir, Ü.Ö., Aydos, U. (2018). Akciğer kanserinde tanı ve evrelemede florodeoksiglikoz pozitron emisyon tomografisi/bilgisayarlı tomografi görün-tülemenin yeri. *Nucl Med Semin*, 4, 6-17.
- Aslan S. (2022). Evlerimizdeki Sinsi Tehlike Radon Gazı.Yangın ve Güvenlik Dergisi, 233,16-17. https://www.yanginguvenlik.com.tr/yayin/1092/evlerimizdeki-sinsi-tehlike-radon-gazi_30806.htm.
- Aydoğmuş, A. (2019). Konutlarda yerkabuğu kaynaklı radyasyon radon gazı. *geoCED*, 4, 28-38.
- Barros-Dios, J. M., Barreiro, M. A., Ruano-Ravina, A., Figueiras, A. (2002). Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study. *American Journal of Epidemiology*, 156(6), 548-555.
- Bilgial, (2019). Solunum sistemi organları ve görevleri nelerdir? Erişim Tarihi: 24.10.2022.
Erişim adresi: <https://www.bilgial.com/solunum-sistemi-organlari-ve-gorevleri-nelerdir/>
- Bora, H. (2001). Radyasyon güvenliği. *Ankara Sağlık Hizmetleri Dergisi*, 2(1), 91-98.
- Can, B., (2011). *Kilis ilindeki evlerde radon gazı ölçümü*, Yüksek lisans tezi. Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis, Türkiye.
- Chen, J., Rahman, N. M., Atiya, I. A. (2010). Radon exhalation from building materials for decorative use. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(4), 317-322.
- Choi, H., Mazzone, P. (2014). Radon and lung cancer: assessing and mitigating the risk. *Cleve Clin J Med*, 81(9), 567-75.
- Clement, C. H., Tirmarche, M., Harrison, J. D., Laurier, D., Paquet, F., Blanchardon, E., Marsh, J. W. (2010). Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. *Annals of the ICRP*, 40(1), 1-64.
- Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, T., Kovacs, T. (2008). Radon in water from Transylvania (Romania). *Radiation Measurements*, 43(8), 1423-1428.
- Cosma, C., Szacsvai, K., Dinu, A., Ciorba, D., Dicu, T., Suciuc, L. (2009). Preliminary integrated indoor radon measurements in Transylvania (Romania). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 45(3), 259-268.
- Çelebi N., Ataksor B., Taşkın H., Albayrak N. (2015). Indoor radon measurements in Turkey Dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, 167(4), 626-632.
- Dursun, E. (2016). *Rize ilinde akciğer kanserli bireylerin evlerinde radon gazı ölçümleri ve akciğer kanseri radon ilişkisi*, Yüksek lisans tezi. RTEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye.

- Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) Kanser Verileri (2020). <https://www.losante.com.tr/Content/brosur/DS%C3%96%20Kanser%20Verileri%20Tablo%20%C3%87evirisi.pdf>
- Eckerman, K., Harrison, J., Menzel, H. G., Clement, C. H. (2012). ICRP publication 119: compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60. *Annals of the ICRP*, 41, 1-130.
- Eisenbud, M. (1987). *Environmental radioactivity*. Academic Press, INC, London LTD, New York, 486. ISBN 0-12-235153-3
- Field R.W., Steck D.J., Smith B.J, Brus C.P, Fisher E.L., Neuberger J.S., Platz C.E., Robinson R.A., Woolson R.F, Lynch C.F. (2000). Residential radon gas exposure and lung cancer: the Iowa radon lung cancer study. *American Journal of Epidemiology*, 151(11), 1091-1102.
- Grzywa-Celińska, A., Krusiński, A., Mazur, J., Szewczyk, K., Kozak, K. (2020). Radon the element of risk. The impact of radon exposure on human health. *Toxics*, 8(4), 120.
- Güler, Ç., Çobanoğlu, Z. (1997). Radon kirliliği. *Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi*, 1.Baskı, Ankara, (44), 9-11.
- Hassfjell, C. S., Grimsrud, T. K., Standring, W. J., Tretli, S. (2017). Lung cancer incidence associated with radon exposure in Norwegian homes. *Tidsskrift for Den norske legeforening.*,137,1038-1042
- Hussein, Z. A., Jaafar, S. M., Ismail, H. A., Battawy, A. A. (2013). Radon exhalation rate from building materials using passive technique nuclear track detectors. *Int J Scientific Eng Res*, 4(7), 1276-1282.
- ICRP (1987). *Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. appendix: special quantities and units*. annals of the ICRP 17, Publication 50, Pergamon Press. 1-60.
- ICRP (1993). *Protection against Rn-222 at home and at work*. Annals of the ICRP 23, Publication 65, 2.
- ICRP (2010). *Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon*. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1). <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20115>
- Jacobi, W. (1984). Possible lung cancer risk from indoor exposure to radon daughters. *Radiation Protection Dosimetry*, 7(1-4), 395-401.
- Jin, Y. W., Seo, S. (2018). Radon and lung cancer: disease burden and high-risk populations in Korea. *Journal of Korean Medical Science*, 33(29).
- Kang, J. K., Seo, S., Jin, Y. W. (2019). Health effects of radon exposure. *Yonsei medical journal*, 60(7), 597-603.
- Kim, S. H., Koh, S. B., Lee, C. M., Kim, C., Kang, D. R. (2018). Indoor radon and lung cancer: estimation of attributable risk, disease burden, and effects of mitigation. *Yonsei medical journal*, 59(9), 1123.

- Kumar, M., Agrawal, A., Kumar, R. (2014). Radiation dose due to radon, thoron and their decay products in indoor environment of Khurja City, UP, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300(1), 39-44.
- Lantz, P. M., Mendez, D., Philbert, M. A. (2013). Radon, smoking, and lung cancer: the need to refocus radon control policy. *American journal of public health*, 103(3), 443-447.
- Memorial. (2021). Akciğer kanseri belirtileri, yaşam süresi ve tedavisi. Erişim tarihi: 31.08.2021. Erişim adresi: <https://www.memorial.com.tr/hastaliklar/akciger-kanseri>.
- Mosley, R. B. (1992). A mathematical model describing radon entry aided by an easy path of migration along underground channels. In *The 1992 International Symposium on Radon and Radon Reduction Technology: Additional Papers*. Minnesota /Minneapolis, U.S.A.
- Otansev, P. (2021). Ev içi radon aktivite konsantrasyonu ve kanser riski. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (3), 683-691.
- Örgün, Y., Çelebi, N. (2015). Radyasyon, radon (rn) ve toplum sağlığı. *TM-MOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni*, 11-24. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/03f20a42de5f061_ek.pdf?dergi=HABER%20B%DCLTEN%DD
- Özdoğan, M. (2020). Türkiye kanser istatistikleri 2020. Erişim tarihi: 20.10.2022. Erişim adresi: <https://www.drozdogan.com/turkiye-kanser-istatistikleri-2020/>.
- Paquet, F., Bailey, MR, Leggett, RW, Lipsztein, J., Marsh, J., Fell, TP, Smith, T., Nosske, D., Eckerman, K.F, Berkovski, V., Blanchardon, E., Gregoratto, D., Harrison, J.D., (2017). CRP publication 137: occupational intakes of radionuclides: part 3. *Annals of the ICRP*, 46(3-4), 1-486.
- Reddy, A., Conde, C., Peterson, C., Nugent, K. (2022). Residential radon exposure and cancer. *Oncology Reviews*, 16(1).
- Reimer, G. M., Gundersen, L. C. S. (1989). A direct correlation among indoor Rn, soil gas Rn and geology in the reading prong near Boyertown, Pennsylvania. *Health Physics*, 57(1), 155-160.
- Riudavets, M., Garcia de Herrerros, M., Besse, B., Mezquita, L. (2022). Radon and lung cancer: current trends and future perspectives. *Cancers*, 14(13), 3142.
- Rodríguez-Martínez, Á., Ruano-Ravina, A., Torres-Durán, M., Provencio, M., Parente-Lamelas, I., Vidal-García, I., ... & Perez-Rios, M. (2022). Residential radon and small cell lung cancer. Final results of the small cell study. *Archivos de bronconeumología*, 58(7), 542-546.
- Ruano-Ravina, A., Pereyra, M. F., Castro, M. T., Pérez-Ríos, M., Abal-Arca, J., Barros-Dios, J. M. (2014). Genetic susceptibility, residential radon,

- and lung cancer in a radon prone area. *Journal of Thoracic Oncology*, 9(8), 1073-1080.
- Sethi, T. K., El-Ghamry, M. N., Kloecker, G. H. (2012). Radon and lung cancer. *Clin Adv Hematol Oncol*, 10(3), 157-164.
- Sharma, S., Kumar, A., Mehra, R. (2018). Age-dependent inhalation dose due to exposure of short lived progeny of radon and thoron for different age groups in Jammu & Kashmir, Himalayas. *Radiation Protection Dosimetry*, 182(4), 427-437.
- Sheen, S., Lee, K. S., Chung, W. Y., Nam, S., Kang, D. R. (2016). An updated review of case-control studies of lung cancer and indoor radon-Is indoor radon the risk factor for lung cancer? *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 28(1), 1-9
- Stowe, M. H. (1994). *Predicting indoor radon-222 concentration*, Doctoral dissertation. Yale University New Haven, United States of America.
- Şeker, S. S., Cerezci, O. (1997). Cevremizdeki Radyasyon ve Korunma Yöntemleri, *Bogazici Universitesi Yayinlari, Istanbul*.
- TAEK. (2012). *Kapalı ortamlarda radon gazı teknik raporu (TR-2012-3)*, Ankara. <https://kurumsalarsiv.tenmak.gov.tr/bitstream/20.500.12878/316/4/10003.pdf>
- Takatori, M., Yagi, M., Hattori, S. (2013). Potential solutions in radiation hormesis. *Journal of Cancer Research Updates*, 2(2), 95-98.
- Thandra, K. C., Barsouk, A., Saginala, K., Aluru, J. S., Barsouk, A. (2021). Epidemiology of lung cancer. *Contemporary Oncology/Współczesna Onkologia*, 25(1), 45-52.
- Torres-Durán, M., Ruano-Ravina, A., Parente-Lamelas, I., Leiro-Fernández, V., Abal-Arca, J., Montero-Martínez, C., ... & Barros-Dios, J. M. (2014). Lung cancer in never-smokers: a case-control study in a radon-prone area (Galicia, Spain). *European Respiratory Journal*, 44(4), 994-1001.
- Tosaka. (2008). Decay chain (4n+1, Neptunium series). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain_\(4n%2B1,_Neptunium_series\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain_(4n%2B1,_Neptunium_series).PNG)
- UNSCEAR (1994). *Sources and effects of ionizing radiation, Annex A. United Nations*, New York. 167.
- UNSCEAR (2000). *Sources, effects of ionizing radiation. raport to the general assembly, with scientific annexes. Annex B: Exposures from natural radiation sources*. United Nations, New York. 84-141.
- UNSCEAR (2019) *Sources, effects and risks of ionizing radiation report to the general assembly, with scientific annexes. Annex B: Lung cancer from exposure to radon*. United Nations, New York. 261-275. <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2019.html>

- Veiga, L. H. S., Melo, V., Koifman, S., Amaral, E. C. S. (2004). High radon exposure in a Brazilian underground coal mine. *Journal of Radiological Protection*, 24(3), 295-305.
- Verma, D., Khan, M. S. (2014). Assessement of indoor radon, thoron and their progeny in dwellings of bareilly city of northern india using track etch detectors. *Rom. Journ. Phys*, 59(1-2), 172-182.
- Vogeltanz-Holm, N., Schwartz, G. G. (2018). Radon and lung cancer: What does the public really know? *Journal of environmental radioactivity*, 192, 26-31.
- Vogiannis, E. G., Nikolopoulos, D. (2015). Radon sources and associated risk in terms of exposure and dose. *Frontiers in Public Health*, 2, 207.
- Yumurtaçı, E. (2014). *Toprakta sürekli radon gazı ölçümleri için eş zamanlı izleme sisteminin geliştirilmesi ve İzmir Urla bölgesinde uygulanması*, Doktora tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.