

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 041101 (719-729)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 041101 (719-729)

DOI: 10.35414/akufemubid.1142177

Araştırma Makalesi / Research Article

Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer Kampüsü Bina içi Radon Konsantrasyonlarının ve Yıllık Etkin Doz Eşdeğerlerinin Belirlenmesi

Ayla GÜMÜŞ^{1*}, Hüseyin Ali YALIM¹¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Afyonkarahisar.Sorumlu yazar e-posta: sandikci@aku.edu.tr* ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2021-6840>hayalim@aku.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9452-7844>

Geliş Tarihi: 07.07.2022

Kabul Tarihi: 03.08.2022

Öz

İnsanlar genelde zamanlarının %90'dan daha büyük bir kısmını kapalı ortamlarda geçirmektedirler. Kapalı ortamlarda radona maruz kalma sağlık açısından önemli bir problem olabilmektedir. Bu çalışmada Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer Kampüsü'nde 6 fakülte binasında, çalışanların ve öğrencilerin sağlık risklerini değerlendirmek ve yıllık etkin doz eşdeğerlerini hesaplamak için radon konsantrasyonları ölçülmüştür. Ölçümler aktif ölçüm metoduyla ölçüm yapan Genitron marka AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon Detektör Sisteminde gerçekleştirilmiştir. Fakülte binalarının radon konsantrasyonu değerleri 4.48-82.00 Bqm⁻³; ortalama radon konsantrasyonları ise 20.64-30.91 Bqm⁻³ aralığında belirlenmiştir. Tüm binaların ortalama radon konsantrasyonu 24.79 Bqm⁻³ olarak hesaplanmıştır. 6 fakülte binasının yıllık etkin doz eşdeğerleri 0.16-0.24 mSvy⁻¹ aralığında belirlenmiş, ortalama yıllık etkin doz eşdeğeri ise 0.20 mSvy⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonları için Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) ve Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından tavsiye edilen limit değerlerle karşılaştırılmıştır. ANS Kampüsü'ndeki 6 fakülte binasının radon konsantrasyonlarının ölçüm sonuçları ve yıllık etkin doz eşdeğerleri, kuruluşlar tarafından izin verilen limit değerlerinin altında belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler

Kapalı ortam radon konsantrasyonu; AlphaGUARD; Yıllık doz eşdeğeri; İşyerleri; Afyonkarahisar

Determination of Indoor Radon Concentrations and Annual Effective Dose Equivalents at Afyon Kocatepe University Ahmet Necdet Sezer Campus

Abstract

People generally spend more than 90% of their time indoors. Exposure to radon in indoor environments can be a significant health problem. In this study, radon concentrations were measured to evaluate the health risks of employees and students in 6 faculty buildings in Afyon Kocatepe University Ahmet Necdet Sezer Campus and to calculate annual effective dose equivalents. Measurements were carried out in the Genitron AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon Detector System which measures with active measurement method. The radon concentration values of the faculty buildings are 4.48-82.00 Bqm⁻³; mean radon concentrations were determined in the range of 20.64-30.91 Bqm⁻³. The average radon concentration of all buildings was calculated as 24.79 Bqm⁻³. The annual effective dose equivalents of 6 faculty buildings were determined in the range of 0.16-0.24 mSvy⁻¹, and the average annual effective dose equivalent was calculated as 0.20 mSvy⁻¹. The results were compared with the limit values recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the Turkish Atomic Energy Authority (TAEK) for radon gas concentrations in indoor environments. The measurement results of the radon concentrations and annual effective dose equivalents of the 6 faculty buildings on the ANS Campus were determined below the limit values allowed by the institutions.

Keywords

Indoor radon concentration; AlphaGUARD; Annual dose equivalent; Workplaces; Afyonkarahisar

1. Giriş

İnsanlar, evrenin var oluşundan bu yana doğal radyasyon kaynaklarını oluşturan yüksek enerjili kozmik ışınlar ve karasal kaynaklı radyasyonlara maruz kalırlar. Yeryüzünde doğal olarak bulunan uzun ömürlü radyoaktif elementler uranyum-238 (^{238}U), toryum-232 (^{232}Th), potasyum-40 (^{40}K) ve bu elementlerin bozunma ürünleri olan radyum-226 (^{226}Ra) ve radon-222 (^{222}Rn)'dır. Doğal kaynaklardan alınan radyasyon kaçınılmaz olarak canlıların çevresinde mevcuttur. Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR) raporuna göre dünya genelinde doğal kaynaklar nedeniyle yıllık etkin dozun 2.4 mSv olduğu tahmin edilmektedir (UNSCEAR 2000).

Uranyum ve radyum yer kabuğunda, kayalarda ve toprakta bulunmaktadır. Radon izotoplarının hepsi uranyum kökenlidir ve radon için ana kaynak toprak ve kayalardır. Radonun en çok bilinen izotopları ^{222}Rn (emanon), ^{220}Rn (toron), ^{219}Rn (aktinon)'dur. Bunlar sırasıyla ^{238}U , ^{232}Th ve ^{235}U 'in radyoaktif parçalanma ürünüdür. Radon gazı (^{222}Rn), doğal radyoaktif serilerden ^{238}U 'in bozunma zincirinde bulunan kız çekirdeklerden 1600 yıl yarı ömre sahip ^{226}Ra 'nın bozunması ile ortaya çıkar. ^{222}Rn gazı periyodik tablonun asal gazlar grubunda yer alan; kimyasal tepkimeye girmeyen, kokusuz, renksiz ve tatsız bir gazdır. Yeraltındaki radon yukarı doğru hareket eder, çünkü binalardaki basınç topraktaki basınçtan daha düşüktür. Radon, binanın temelindeki boşluklardan ve çatlaklardan, su borusu boşluklarından vb. girerek bina içine sızmakta ve kapalı mekânları doldurmaktadır. Radon, hidrojenden 100 kat ve havadan yedi buçuk kat kadar daha ağırdır (NCRP 1988). Radon gazının havadan daha ağır olması ve yerden genellikle 50 santimetre mesafede kalma eğiliminde olması nedeniyle kapalı alan içerisine sızan radon burada kalma eğilimindedir. Ayrıca enerji tasarrufu yapmak amacıyla bina yalıtımlarının daha iyi yapılması, bina içlerinde radon gazının çok daha fazla hapsedilmesine ve artmasına yol açmaktadır. Havalandırmanın zayıf olduğu kapalı mekanlarda zamanla daha da birikebilir ve tehlikeli düzeylere ulaşabilir.

İnsanlar nefes aldıklarında radon dokulara kimyasal olarak bağlanmaz, çünkü bir soygaz olan radonun kimyasal reaktivitesi zayıftır. Radon dokulara bağlansa bile doku içindeki çözünürlüğü çok azdır. Fakat radonun bozunum ürünlerinin bir kısmı, radon gibi gaz halinde olmayıp katı parçacık formunda oldukları için kimyasal açıdan aktiflerdir. Bu bozunum ürünlerinin bir kısmı havadaki toz zerreciklerine ve diğer parçacıklara çok çabuk yapışıp tutunarak radyoaktif aerosoller oluştururlar. Böylece akciğerler tarafından tutulabilecek parçacıklara dönüşürler. Solunum yoluyla akciğerlere giren bu parçacıklar burada bronşiyal ağacın değişik kademelerine kadar ilerlerler. Bu parçacıklar radyoaktif bozunmayı kararlı hale gelinceye kadar burada da devam ettirirler ve tüm kademelerde radyasyon salımı gerçekleşir. Bozunmanın ve alfa parçacıklarının yayılımının sürmesi ve vücut içerisindeki ışımlar ile varolan enerji; canlı dokuları iyonize ederek yaşayan hücrelerin DNA yapılarını değiştirebilir ve akciğer dokusunda hasara, dolayısıyla zaman içerisinde kansere sebep olabilir (Axelson 1995, UNSCEAR 2000, Field *et al.* 2000, Lázár *et al.* 2003). Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) raporuna göre dünyadaki akciğer kanseri vakalarının %3-%14 arasında değişen oranlarda radon gazından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Aynı raporda radon gazının pek çok ülkede sigaradan sonra akciğer kanserinin ikinci en önemli nedeni olduğu belirtilmiştir (WHO 2009). Kapalı ortamlar insanların yaşadığı konutlar, işyerleri, resmi binalar (okul, hastane vb.) olarak kabul edilmektedirler. Genelde insanlar zamanlarının %90'dan daha büyük bir kısmını kapalı ortamlarda geçirmektedirler. Bu nedenle kapalı ortamlarda radona maruz kalma önemli bir problem olabilmektedir.

Türkiye’de bazı üniversite kampüslerinde radon gazı ölçümleri yapılmıştır (Alkan and Karadeniz 2014, Altınsöz vd. 2016, Zenginerler *et al.* 2016, Büyüksulu *et al.* 2018, Kulalı *et al.* 2019, Uzun Duran ve Küçükömeroğlu 2020). Afyon Kocatepe Üniversitesi Ahmet Necdet Sezer Kampüsünde (ANS) ilk kez radon gazı ölçümleri bu çalışma ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı ANS kampüsünde 6 fakülte binasında radon gazı konsantrasyonu ölçümü ile çalışanlar ve öğrenciler için sağlık risklerini değerlendirmek ve yıllık etkin doz eşdeğerlerini belirlemektir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Çalışma Alanı

Ege Bölgesi'nin İç Batı Anadolu Bölümü'nde yer alan Afyonkarahisar ilindeki Afyon Kocatepe Üniversitesi 1992 yılında kurulmuştur (Şekil 1). Afyon Kocatepe Üniversitesinin şehir merkezinde yer alan ANS kampüsü üniversitenin en büyük kampüsüdür. Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesinin ANS kampüsünde yer alan 6 eğitim binasının giriş katında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü ve ölçüm yapılan fakülte binaları.

Çalışma döneminde öğrenci işleri, fakülte binalarının giriş katlarında yer almaktaydı. Bu nedenle yoğunluk hem çalışan hem de öğrenci sayısı açısından bu katlarda fazlaydı. Ölçümler sadece giriş katlarında ve bu katta öğrenci yoğunluğunun en çok olduğu konum ve saatlerde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1, Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü'ndeki 6 eğitim binasını göstermektedir.

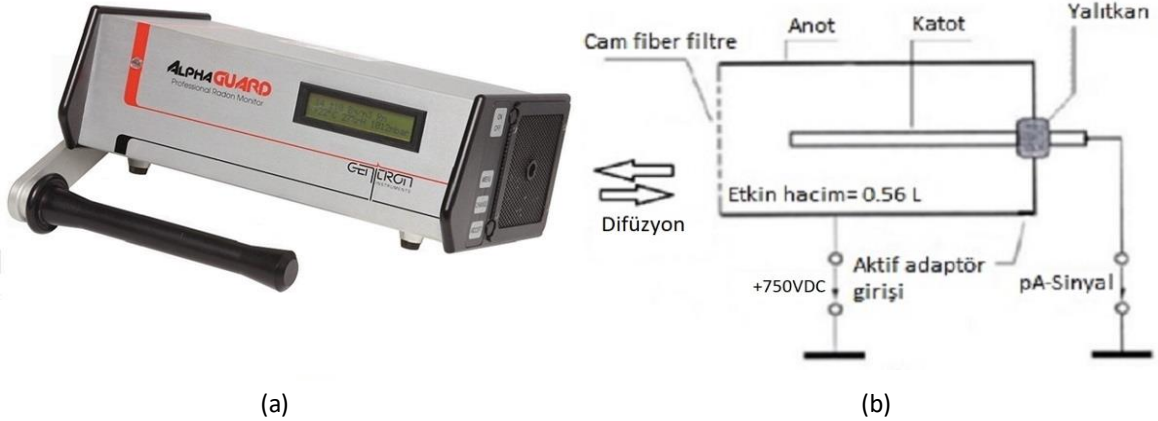
Çalışmada ölçüm noktaları öğrenci işlerinin önünde ve giriş ana kapısına en uzak noktalarda seçilmesine özellikle dikkat edilmesine rağmen ölçüm zamanının mayıs ayı olması nedeniyle bazı bina girişlerinde ana

dış kapının belirli sürelerde açık kalabildiği gözlenmiştir. Bu nedenle de bu etkiyi azaltabilmek için AlphaGUARD radon detektörü hafta içi her gün aynı saatte (saat 13.30) aynı konuma götürülerek 18 kez ölçüm gerçekleştirilmiştir.

2.2 Radon Gazı Ölçümleri

Radon; rengi, tadı ve kokusu olmayan radyoaktif bir gaz olması nedeniyle insanlar tarafından görülmesi, kokusunun ve tadının alınması imkansızdır. Radon gazının ölçümü, radon gazından çıkan α parçacıklarının sayımına dayanmaktadır. Radon ve bozunum ürünlerinin ölçülmesi aktif (kısa süreli) ve pasif (uzun süreli) ölçümler olmak üzere iki temel ölçüm tekniği ile yapılabilir. Kısa süreli ölçümler radon gazının bozunumuyla yayılan alfa parçacığının deteksiyonuna dayanmaktadır. Pasif ölçüm tekniğinde ise, nükleer iz detektörleri kullanılarak uzun süreli radon ölçümleri yapılmaktadır. Bu tip ölçümler α parçacıklarının polimerik plastikler gibi uygun maddelerden yapılmış film tabakaları üzerine oluşturduğu izlerin sayılması ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada bina içi radon konsantrasyonu ölçümleri aktif olarak ölçüm yapan Genitron marka (Frankfurt/Almanya) AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon Detektör cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2). Bu detektör sistemi temel olarak radon (^{222}Rn), toron (^{220}Rn) ve radon bozunum ürünlerine ait radyasyon yoğunlukları ile γ doz oranı ölçmekte kullanılan

portatif bir radyasyon detektörüdür. Cihaz gelişmiş bir atma (puls) iyonlaşma çemberi veya α spektroskopisi yöntemi ile çalışmaktadır. Silindirik atma (puls) iyonlaşma çemberine sahip olan detektörün hacmi 0.56 litredir. AlphaGUARD, $2 \cdot 10^6$ Bqm⁻³ aralığında ölçüm yapabilmektedir ve hassasiyeti 20 Bqm⁻³'te 1 CPM (counts per minute = dakikadaki sayım) ya da 100 Bqm⁻³'te 4.5 CPM olarak verilmektedir. Yüksek radon ölçüm hassasiyetine sahiptir ve yoğunluk gradientleri ile küçük yoğunluk dalgalanmalarını algılayabilecek derecede hassas elektronik yapıya sahiptir. Taşınabilir ve yerinde ölçümler yapabilen AlphaGUARD cihazında bulunan iyon odası (alfa spektroskopi puls sayımı) vasıtası ile ortamın o anki radon değeri ile birlikte hava sıcaklığı, hava basıncı ve havanın nemi gibi diğer parametreler de ölçülebilmektedir. AlphaGUARD bilgisayara bağlanarak verileri aktarabilir ve bu verileri saklayabilir. Alınan verilerin grafiksel olarak işlenmesi, geliştirilmesi, görüntülenmesi ve arşivlenmesi için, AlphaGUARD için geliştirilmiş DataEXPERT yazılım paketi kullanılmıştır.



Şekil 2. (a) AlphaGUARD PQ2000 PRO Radon Detektörü (b) AlphaGUARD dedektörünün iyonizasyon odasının şematik çizimi (Saphymo GmbH 1998).

3. Bulgular

Her fakülte binasında ölçüm için cihaz 10 dk. difüzyon modunda çalıştırılmış ve aynı noktada ölçüm 3 kez tekrar edilmiştir. Böylece AlphaGUARD radon detektörü ile bir binada 30 dk. boyunca ölçüm yapılmıştır.

Bu 3 ölçümün ortalaması alınmıştır. Ayrıca ölçümler 18 gün boyunca aynı saatte (13.30) tekrar edilmiştir ve bu sonuçların da ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ve 18 gün ölçülen radon konsantrasyonu ortalama değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. ANS kampüsündeki fakülte binalarının radon konsantrasyonları (Bqm^{-3}).

Ölçüm sayısı	Eğitim Fakültesi	Fen-Edebiyat Fakültesi	İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi	Turizm Fakültesi	Mühendislik Fakültesi	Veterinerlik Fakültesi
	Rn (Bqm^{-3})	Rn (Bqm^{-3})	Rn (Bqm^{-3})	Rn (Bqm^{-3})	Rn (Bqm^{-3})	Rn (Bqm^{-3})
1. ölçüm	31.88	21.63	22.81	41.50	33.59	24.19
2. ölçüm	8.06	12.19	15.84	36.00	30.56	7.05
3. ölçüm	22.38	17.75	7.16	21.00	24.94	36.25
4. ölçüm	20.00	14.67	31.38	31.56	21.09	19.47
5. ölçüm	7.48	22.19	31.00	30.50	31.63	43.38
6. ölçüm	33.13	39.38	44.25	39.38	21.50	15.03
7. ölçüm	25.19	19.69	30.13	35.08	19.41	19.44
8. ölçüm	25.94	20.32	82.00	62.00	24.06	20.25
9. ölçüm	27.13	19.09	40.31	9.38	48.13	16.13
10. ölçüm	22.81	24.25	18.66	23.95	25.81	30.44
11. ölçüm	11.06	22.38	21.06	31.13	35.69	17.13
12. ölçüm	16.37	21.17	29.49	30.89	22.81	31.13
13. ölçüm	10.25	21.75	25.44	34.13	21.31	17.19
14. ölçüm	15.44	13.72	23.88	30.19	19.00	15.97
15. ölçüm	19.00	14.59	30.13	18.81	4.48	9.38
16. ölçüm	25.69	30.19	30.88	26.19	14.34	23.88
17. ölçüm	26.69	16.06	18.38	30.38	24.00	23.75
18. ölçüm	32.25	20.41	28.81	24.31	19.41	25.25
Ortalama	21.15	20.64	29.53	30.91	24.54	21.96

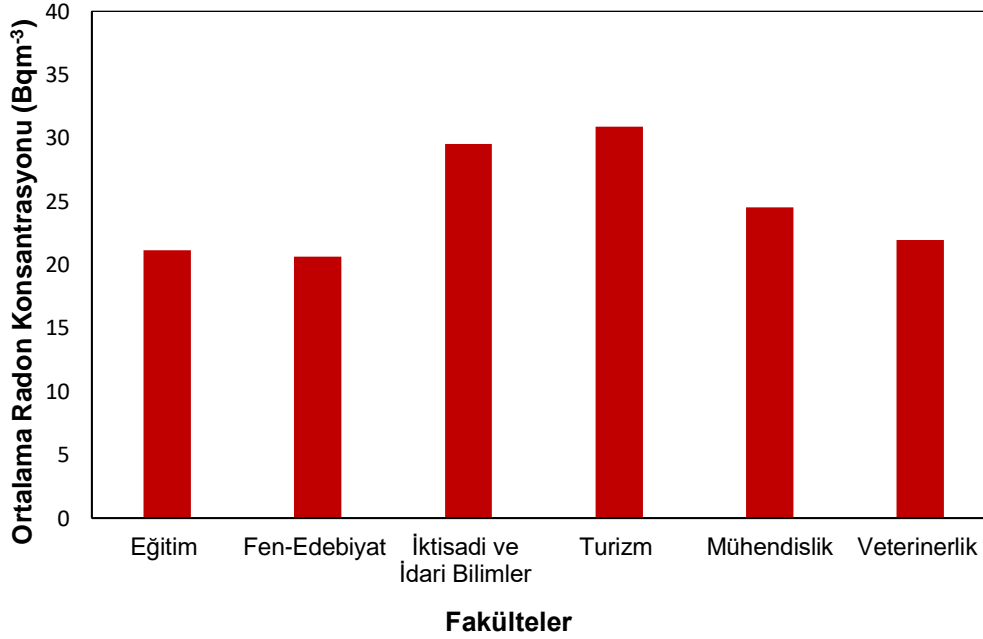
Çizelge 1 incelendiğinde, en düşük radon konsantrasyonu değeri $4.48 Bqm^{-3}$ ile Mühendislik Fakültesi binasında, en yüksek radon konsantrasyonu değeri $82.00 Bqm^{-3}$ ile İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesinde ölçülmüştür. Her bir fakültenin ortalama radon konsantrasyonu (Bqm^{-3}) Şekil 3'den de görülebileceği gibi en düşük $20.64 Bqm^{-3}$ ile Fen-Edebiyat Fakültesinde, en yüksek $30.91 Bqm^{-3}$ ile Turizm Fakültesi binasında elde edilmiştir. Genel olarak 6 eğitim binasının ortalama radon konsantrasyonu değerleri birbirlerine yakın sonuçlarda belirlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Ahmet Necdet Sezer Kampüsü'nde 6 fakülte binasının ortalama radon konsantrasyonu değeri $24.79 Bqm^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Radon gazı konsantrasyonlarının sağlık üzerine etkisi nedeniyle uluslararası ve ulusal kuruluşlar tarafından limit değerler tavsiye edilmektedir. Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyon (ICRP) radon gazı için evlerde $200-600 Bqm^{-3}$ ve işyerleri için ise $500-1500 Bqm^{-3}$ değerlerini limit değer olarak belirlemiştir (ICRP 1993).

Ülkemizde ise Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) radon gazı için izin verilen konsantrasyon seviyelerini yıllık ortalama olarak evlerde 400 Bqm^{-3} , işyerlerinde 1000 Bqm^{-3} olarak belirlemiştir (TAEK 2012). Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü'nde 6 eğitim binasında gerçekleştirilen bu

çalışmada elde edilen ortalama radon konsantrasyonu değerleri, işyerlerinin radon konsantrasyonu için TAEK tarafından önerilen 1000 Bqm^{-3} ve ICRP tarafından işyerleri için önerilen $500\text{-}1500 \text{ Bqm}^{-3}$ limit değerlerinin altında olduğu görülmüştür.



Şekil 3. ANS kampüsündeki fakülte binalarının ortalama radon konsantrasyonları (Bqm^{-3}).

$$YEDE = C_{Rn} \times D \times F \times H \times T \quad (1)$$

Etkin doz, doku veya organların aldığı dozun tüm vücut için yüklediği riski ifade etmek için kullanılan bir kavramdır (Gökharman vd. 2016). Yıllık etkin doz eşdeğeri ise, insanların farklı radyasyon kaynaklarından yayımlanan ışınlara maruz kalmak suretiyle bir yıl süresince alacağı radyasyon dozu olarak tanımlanmaktadır (Karakılıç vd. 2009). Yıllık etkin doz eşdeğeri denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

Burada C_{Rn} radon konsantrasyonu (Bqm^{-3}), D doz dönüşüm faktörü ($9 \text{ nSv h}^{-1} / \text{Bq m}^{-3}$), F radon ile bozunma ürünleri arasındaki denge faktörü (0.4), H bina içi meşguliyet faktörü (çalışanlar için yıllık ortalama 2000 saat olarak tahmini 0.25 alınmıştır), T saat cinsinden yıllık süredir (8760 saat) (Yu et al. 2000).

Çizelge 1'deki ölçüm değerleri denklem (1)'de kullanılarak her bir fakülte binasının yıllık etkin doz eşdeğerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Fakülte binalarının ortalama radon konsantrasyonları (Bqm^{-3}) ve yıllık etkin doz eşdeğerleri ($mSvy^{-1}$).

Fakülteler	Ortalama Radon Konsantrasyonu C_{Rn} (Bqm^{-3})	YEDE ($mSvy^{-1}$)
Eğitim Fakültesi	21.15	0.17
Fen-Edebiyat Fakültesi	20.64	0.16
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi	29.53	0.23
Turizm Fakültesi	30.91	0.24
Mühendislik Fakültesi	24.54	0.19
Veterinerlik Fakültesi	21.96	0.17
Ortalama	24.79	0.20

Çizelge 2 incelendiğinde, Ahmet Necdet Sezer Kampüsü'ndeki 6 eğitim binasında yıllık etkin doz eşdeğerleri $0.16-0.24 mSvy^{-1}$ aralığında belirlenmiştir. En yüksek yıllık etkin doz eşdeğeri $0.24 mSvy^{-1}$ değeri ile Turizm Fakültesi'nde; en düşük ise $0.16 mSvy^{-1}$ ile Fen-Edebiyat Fakültesi'nde elde edilmiştir. 6 fakülte binasının ortalama yıllık etkin doz eşdeğeri ise $0.20 mSvy^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. ICRP yıllık etkin doz eşdeğeri için limit sınırını $3-10 mSvy^{-1}$; UNSCEAR ise $1.0 mSvy^{-1}$ olarak belirlemiştir (ICRP 1993, UNSCEAR 2000). Tüm binalarda elde edilen yıllık etkin doz eşdeğerleri ICRP ve UNSCEAR tarafından önerilen limit değerlerin altındadır. Ülkemizde ve diğer ülkelerde evlerde, iş yerlerinde ve kampüslerde insanların maruz kaldığı radon konsantrasyonları (Bqm^{-3}) ve yıllık etkin doz eşdeğerlerinin ($mSvy^{-1}$) belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Özellikle insanların yaşam alanı olan evlerle ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışma ANS Kampüsü'nde gerçekleştirildiği için genel olarak kampüste ve işyerlerinde yapılan diğer çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve Çizelge 3'de verilmiştir.

Afyon Kocatepe Üniversitesi'nde ANS Kampüsü'nde 6 eğitim binasında gerçekleştirilen bu çalışmanın sonuçları farklı ülkelerdeki Üniversitelerin kampüslerinde ve işyerlerinde yapılmış benzer çalışmalarla kıyaslandığında ortak bulgular gözlenmektedir. Çizelge 3'den de görülebileceği gibi Afyonkarahisar'da kamu binalarında 2018 yılında da işyerlerinde radon konsantrasyonu ölçümü gerçekleştirilmiştir. 28 kamu binasında gerçekleştirilen Yalım vd. (2018) çalışmasında ortalama radon konsantrasyonları ölçümleri, bu çalışmadaki ortalama radon konsantrasyonu değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir. Aynı şehirde gerçekleştirilen iki çalışmada şehrin bölge olarak farklı kısımlarında ve farklı metotla (biri aktif biri pasif ölçüm metodu) ölçüm yapılmıştır.

Çizelge 3. Ülkemizdeki ve farklı ülkelerdeki üniversite kampüslerindeki ve işyerlerindeki ortalama radon konsantrasyonları ($Bq\ m^{-3}$) ve yıllık etkin doz eşdeğerlerinin ($mSv\ y^{-1}$) bu çalışma sonuçları ile karşılaştırılması.

Çalışma alanı	Rn ($Bq\ m^{-3}$)	YEDE ($mSv\ y^{-1}$)	Konum	Referans
Fatima Jinnah Women Üniversitesi	31-213 (eski binalar) 27-143 (yeni binalar)	0.16-232	Rawalpindi, Pakistan	(Khan et al. 2005)
İş yerleri	1.4-182	0.42-0.52	Japonya	(Oikawa et al. 2006)
İbadan Üniversitesi	157-495	0.99-3.12	Ibadan, Nijerya	(Obed et al. 2010)
İş yerleri	12-293	Ort: 0.61 ± 0.30	İslamabad, Pakistan	(Rahman et al. 2010)
Ladoko Akintola Teknoloji Üniversitesi	20.0-30.3	0.11-0.18	Nigeria	(Oni et al. 2012)
Okul	31-157	0.06-1.40	Trabzon, Türkiye	(Çevik et al. 2013)
Dokuz Eylül Üniversitesi	40-335	0.79-4.27	İzmir, Türkiye	(Alkan and Karadeniz 2014)
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Kampüsü	59-252	Ort:3.398	Eskişehir, Türkiye	(Altınsöz vd. 2016)
Sakarya Üniversitesi	0.20-94.1	0.18-2.00	Sakarya, Türkiye	(Zenginler et al. 2016)
Giresun Üniversitesi	76-504	0.97-14.84	Giresun, Türkiye	(Büyükkuslu et al. 2018)
İş yerleri (kamu)	13-1932	Ort:1.25±0.10	Afyonkarahisar, Türkiye	(Yalım vd. 2018)
Üsküdar ve Okan Üniversitesi	7-177	0.024-0.61	İstanbul, Türkiye	(Kulalı et al. 2019)
Karadeniz Teknik Üniversitesi Kanuni Kampüsü	12-234	0.08-1.5	Trabzon, Türkiye	(Uzun Duran ve Küçükömeroğlu 2020)
Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü	20.64-30.91	0,16-0.24 Ort: 0.20	Afyonkarahisar, Türkiye	Bu çalışma

Kapalı ortamlarda radon konsantrasyonu pek çok faktörden etkilenir. Bu faktörler zeminin altındaki ana kaya ve topraktaki radyum ve dolayısıyla radon miktarı, bina temelini kaya ve toprakla olan temas yüzeyin büyüklüğü, zeminden olan yükseklik, fay hattına yakınlık, yeraltındaki suyun seviyesi ve radon konsantrasyonu, bina zeminindeki depo-kiler olup olmadığı, ortamdaki iç-dış hava, sıcaklık ve basınç farkı, bina yapım malzemelerinin cinsi, bina yalıtımının özelliği, binanın havalandırma sıklığı gibi sıralanabilir (Uludağ 2010, Örgün ve Çelebi 2016, Al-Khateeb *et al.* 2017). İklim koşulları da binadaki radon konsantrasyonu etkileyen bir faktördür. Sıcak bölgelerde pencerelerin çok açılması ve

havalandırma yapılması içerideki ve dışardaki radon konsantrasyonu farkını düşürür. Soğuk bölgelerde pencerelerin açılmaması ve havalandırmanın nispeten daha az olması nedeniyle iç ortamdaki radon konsantrasyonu miktarının çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir (UNSCEAR 1982).

Çizelge 3'de üniversite kampüslerinde yapılan radon konsantrasyonu ölçüm sonuçlarının, bu çalışmadaki değerlerden genel olarak daha yüksek ölçüldüğü görülmektedir. Bunun çeşitli nedenleri olabilir. Ölçümler, fakülte binalarının giriş katlarında kapıdan oldukça uzak bir noktada gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, giriş kapılarının düzensiz bir şekilde açık olması nedeniyle yine de havalandırmanın etkili

olduğu düşünülmektedir. Yine çalışma alanının jeolojisinin de radon konsantrasyonu sonuçları üzerindeki etkisi kaçınılmazdır. ANS Kampüsü jeolojik olarak alüvyonal bir düzlük üzerindedir (Başaran 2019). Bu nedenle de kampüs gevşek zeminli bir alanda konumlanmıştır. Radon gazının oluşumu ve taşınmasında en önemli ana faktör jeolojik yapıdır. Binalardaki radon konsantrasyonlarının alansal değişiminde jeolojinin çok önemli olduğunu gösteren güçlü istatistiksel kanıtlar içeren çalışmalar vardır (Schumann and Gundersen 1996, Apte ve ark., 1998; Zhu *et al.* 2001, Ielsch *et al.* 2002, Popit and Vaupotič 2002, Sundal *et al.* 2004, Shi *et al.* 2006, Kemski *et al.* 2009, Dai *et al.* 2019, Kellenbenz and Shakya 2021). Düz ovalar ve dere yatakları boyunca görülen alüvyon yapı üzerinde olan ANS Kampüsü'nde de yer altı ana kaynağına bağlı olarak jeolojik unsurlar, radon konsantrasyonları seviyelerinde etkili olmuş olabilir.

Elde edilen hem radon konsantrasyonu sonuçları hem de yıllık etkin doz eşdeğerleri, ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen limit değerlerin altındadır. Bu nedenle Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü'ndeki 6 fakülte binasında radon gazı konsantrasyonlarının çalışanlar ve öğrenciler için sağlık riski oluşturmadığı söylenebilir. Radon gazı ölçümlerinin periyodik aralıklarla yapılması son derece önemlidir. Bu nedenle zamanlarının çoğunu kampüs binalarında kapalı ortamda geçiren çalışanlar ve öğrenciler için Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü'nde daha fazla eğitim binasında uzun süreli radon gazı ölçümünün yararlı olacağı düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- Alkan, T., Karadeniz, Ö., 2014. Indoor 222Rn levels and effective dose estimation of academic staff in Izmir-Turkey. *Biomedical and Environmental Sciences*, **27**, 259–267. <https://doi.org/10.3967/bes2014.049>
- Al-Khateeb, H.M., Aljarrah, K.M., Alzoubi, F.Y., Alqadi, M.K., Ahmad, A.A., 2017. The correlation between indoor and In soil radon concentrations in a desert climate. *Radiation Physics and Chemistry*, **130**, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.08.00>

- Altinsöz, M., Algın, E., Aşıcı, C., Soğukpınar, H., 2016. Radon concentration measurements at a University Campus In Turkey. *Turkish Journal of Physics*, **40**, 69–75. <https://doi.org/10.3906/fiz-1510-1>
- Apte, M.G., Price, P.N., Nero, A. v, Revzan, K.L., 1998. Predicting new hampshire indoor radon concentrations from Geologic information and other covariates. Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory University of California Berkeley, CA 94720. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc836039/m2/1/high_res_d/1009823.pdf, (19.06.2022)
- Axelson, O., 1995. Cancer Risks from Exposure to Radon in Homes. *Environmental Health Perspectives*, **103**, 37–43.
- Başaran, C., 2019. Afyon Kocatepe Üniversitesi-ANS Kampüsü (Afyonkarahisar) yeraltısularının hidrojeokimyası ve kullanılabilirlik özelliklerinin belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, **7**, 431–440. <https://doi.org/10.21923/jesd.510026>
- Büyükuslu, H., Özdemir, F.B., Öge, T.Ö., Gökce, H., 2018. Indoor and tap water radon (222Rn) concentration measurements at Giresun University Campus areas. *Applied Radiation and Isotopes*, **139**, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.05.027>
- Cevik, U., Celik, A., Celik, N., Ozkalayci, F., Akbulute, S., 2013. Assessment of radiological levels at schools in Trabzon, Turkey. *Indoor and Built Environment*, **22**, 376–383. <https://doi.org/10.1177/1420326X11426590>
- Field, R.W., Steck, D.J., Smith, B.J., Brus, C.P., Fisher, E.L., Neuberger, J.S., Piatz, 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**, No:11.
- Gökharman, F.D., Aydın, S., Koşar, P.N., 2016. Radyasyon Güvenliğinde Mesleki Olarak Bilmemiz Gerekenler. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **7-2**, 35–40.
- ICRP, 1993. The International Commission on Radiological Protection, Protection against radon-222 at home and at work, Annals of the ICRP.
- Ielsch, G., Ferry, C., Tymen, G., Rob, M.C., 2002. Study of a Predictive Methodology for Quantification and Mapping of the Radon-222 Exhalation Rate. *Journal of Environmental Radioactivity*, **63**, 15–33.

- Karakılıç, V., Bayraktar, G., Kürkçüoğlu, M.E., Haner, B., Yılmaz, A., 2009. Radon Measurements at S.D.U. Information Center. Süleyman Demirel University, Journal of Natural and Applied Sciences, **13-3**, 201-207.
- Kemski, J., Klingel, R., Siehl, A., Valdivia-Manchego, M., 2009. From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany. *Environmental Geology*, **56**, 1269–1279. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1226-z>
- Khan, S.A., Ali, S., Tufail, M., Qureshi, A.A., 2005. Radon concentration levels in Fatima Jinnah Women University Pakistan. *Radioprotection*, **40**, 11–27. <https://doi.org/10.1051/radiopro:2004019>
- Kulali, F., Günay, O., Aközcan, S., 2019. Determination of indoor radon levels at campuses of Üsküdar and Okan Universities. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **16**, 5281–5284. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02369-5>
- Lázár, I., Tóth, E., Marx, G., Czigler, I., Köteles, G.J., 2003. Effects of residential radon on cancer incidence. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **258**, 519–524.
- NCRP 1988, n.d. NCRP RPT 97: Measurement of radon and radon daughters in air. https://global.ihp.com/doc_detail.cfm?document_name=NCRP%20RPT%2097&item_s_key=00292245 (09.06.2022)
- Obed, R.I., Lateef, H.T., Ademola, A.K., 2010. Indoor radon survey in a University Campus of Nigeria. *Journal of Medical Physics*, **35**, 242–246. <https://doi.org/10.4103/0971-6203.71760>
- Oikawa, S., Kanno, N., Sanada, T., Abukawa, J., Higuchi, H., 2006. A survey of indoor workplace radon concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, **87**, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.12.001>
- Oni, O.M., Isola, G.A., Oladapo, O.O., Oni, E.A., 2012. Estimation of lifetime fatality risk from indoor radon in some offices in a Nigerian University. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, **4**, 131–133.
- Örgün, Y., Çelebi, N., 2016. Radyasyon, radon (Rn) ve toplum sağlığı. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Tıbbi Jeoloji ve İnsan Sağlığı, Haber Bülteni*, Ocak-Haziran 11–27.
- Popit, A., Vaupotič, J., 2002. Indoor radon concentrations in relation to geology in Slovenia. *Environmental Geology*, **42**, 330–337. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0526-y>
- Rahman, S.U., Rafique, M., Matiullah, Anwar, J., 2010. Radon measurement studies in workplace buildings of the Rawalpindi region and Islamabad Capital Area, Pakistan. *Building and Environment*, **45**, 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.019>
- Saphymo GmbH, 1998. AlphaGUARD User manual portable radon monitor, Heerstrasse 149 D-60488.
- Schumann, R.R., Gundersen, L.C.S., 1996. Geologic and climatic controls on the radon emanation coefficient. *Environment International*, **22**, 439–446.
- Shi, X., Hoftiezer, D.J., Duell, E.J., Onega, T.L., 2006. Spatial association between residential radon concentration and bedrock types in New Hampshire. *Environmental Geology*, **51**, 65–71. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0304-3>
- Sundal, A. v., Henriksen, H., Soldal, O., Strand, T., 2004. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Science of the Total Environment*, **328**, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.02.011>
- TAEK, 2012. Kapalı Ortamlarda Radon Gazı. Teknik Rapor 2012/3, Ankara.
- Uludağ, H.İ., 2010. Radon Kirliliği ve Halk Sağlığı İlişkisi. Bitirme tezi, T.C. Ege Üniversitesi, Tıp Fakültesi, İzmir, 44.
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes Volume I: Sources United Nations.
- UNSCEAR, 1982. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1982 Report to the General Assembly, with annexes UNITED NATIONS.
- Uzun Duran, S., Küçükömeroğlu, B., 2020. Karadeniz Teknik Üniversitesi Kanuni Kampüsü'nde bazı ofislerde radon gazı ölçümü ve çevrelerindeki topraklarda radyonüklid seviyeleri. *BEU Journal of Science*, **9**, 68–77.
- WHO, 2009. The World Health Organization, Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. World Health Organization.
- Yalım, H.A., Gümüş, A., Ünal, R., 2018. Determination of Indoor Radon Concentration and Effective Dose Equivalent at Workplaces of Afyonkarahisar Province. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, **13**, 29–35.

<https://doi.org/10.29233/sdufeffd.442298>

Yu, K.N., Lau, B.M.F., Guan, Z.J., Lo, T.Y., Young, E.C.M., 2000. Survey of the Rn dose conversion factor for offices. *Journal of Environmental Radioactivity*, **51**, 379–385.

Zenginler, Z., Ertugral, F., Yakut, H., Tabar, E., Demirci, N., Gunermelikoglu, K., 2016. Measurement of Seasonal Indoor Radon Concentration in Sakarya University, Turkey. *Acta Physica Polonica A*, **130**, 450–452.

<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.450>

Zhu, H.C., Charlet, J.M., Poffijn, A., 2001. Radon Risk Mapping in Southern Belgium: an Application of Geostatistical and GIS Techniques. *The Science of the Total Environment*, **272**, 203–210.