

Bina İçi Radon Birikimi Üzerine bir Araştırma

Mehmet Ertan KÜRKCÜOĞLU¹, Özlem ÖNER², Abbas Alpaslan KOÇER³

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye
^{2,3}Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 32260, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 15.05.2024, Kabul / Accepted: 08.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Bina içi radon,
Elektronik radon dedektörü,
Radon birikimi,
Isparta

Özet: Radyoaktif olan radon gazının solunması akciğer kanseri oluşumuyla ilişkilendirilmektedir. Havalandırılması zayıf olan kapalı mekânlarda birikme eğilimi gösteren radon, zemine yakın yerlerde daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmektedir. Bu çalışmada, Süleyman Demirel Üniversitesi Fizik Bölümü'nün zemin katında bulunan Isparta Radon Laboratuvarı'ndaki (IRL birimindeki) bina içi atmosferik radon konsantrasyonlarının dağılımı yüksekliğe bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla IRL'de, Airthings firmasınınca üretilen 3 adet Wave radon dedektörü farklı yüksekliklerdeki ölçüm noktalarına yerleştirilerek 1 Kasım 2021 ile 22 Aralık 2021 tarihleri arasında saatlik radon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm verilerine ait ortalamalar incelendiğinde, laboratuvar zeminindeki radon yoğunluğunun 303 Bq/m³, solunum seviyesindeki radon düzeyinin 220 Bq/m³ ve laboratuvarın tavan seviyesindeki radon konsantrasyonunun 212 Bq/m³ olduğu bulunmuştur. Böylelikle bina içi atmosferik radonunun yükseklik arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Ölçüm süreci boyunca 3507 adet veri kayıt altına alınmıştır. Saatlik radon ölçümlerinin tümü, iş yerleri için kabul edilen 1000 Bq/m³lük ulusal müdahale seviyesinin altında olduğundan IRL birimindeki radon kaynaklı radyolojik riskin kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir. Elde edilen veriler SPSS programıyla istatistiksel olarak analiz edilmiş, Kruskal-Wallis testine göre; alt konumdaki dedektör ölçümlerinin, orta ve üst konumdaki dedektör ölçümlerine göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığa sahip olduğu (p<0,05) saptanmış ve havadan daha ağır olan radonun zeminde biriktiği gösterilmiştir.

A Study on Indoor Radon Accumulation

Keywords

Indoor radon,
Electronic radon detector,
Radon accumulation,
Isparta

Abstract: Exposure to radioactive radon gas through inhalation has been associated with the risk of developing lung cancer. Radon can reach high concentrations and accumulate in poorly ventilated indoor spaces near the ground. In the present study, the distribution of atmospheric radon concentrations in IRL (Isparta Radon Laboratory), located on the ground floor of the Department of Physics at Süleyman Demirel University, was examined depending on altitude. For this purpose, hourly radon measurements were carried out in IRL between 1 November 2021 and 22 December 2021 by placing 3 electronic radon detectors (Wave detectors by Airthings) at measurement points representing different heights. When the averages of the measurements were examined, it was determined that the radon concentration on the laboratory floor was 303 Bq/m³, the radon level at the respiratory level was 220 Bq/m³, and the radon concentration at the ceiling level of the laboratory was 212 Bq/m³. Thus, it was revealed that indoor atmospheric radon concentration increased with a decrease in altitude. During the measurement process, 3507 data were recorded. Since all hourly radon measurements were below the national reference level of 1000 Bq/m³ accepted for workplaces, the radiological risk from radon in the IRL unit can be considered at an acceptable level. The obtained data were analyzed statistically using the SPSS program. According to the Kruskal-Wallis test, it was found that the detector measurements taken in the

lower position displayed a statistically significant difference ($p<0.05$) compared to the detector measurements taken in the middle and upper positions. Therefore it was shown that radon, which is heavier than air, accumulated on the ground.

1. Giriş

Canlıların yaşamları boyunca maruz kaldığı doğal radyasyonun yarısının doğrudan radon (^{222}Rn) kaynaklı olduğu bilinmektedir [1]. Ernest Rutherford 1899 yılında yaptığı bir çalışmada toryum elementinin radyoaktif bir gaz yaydığını bulmuş [2], Pierre ve Marie Curie de aynı yıl içinde radyumdan radyoaktif bir gaz salınımı gözlemlemişlerdir. 1900 yılında ise Friedrich Ernest Dorn Almanya'nın Halle kentinde yaptığı araştırma sırasında radyum ampullerinde bir gaz birikimi olduğunu tespit etmiş [3] ve böylelikle bu gazın radon olduğunu keşfedilmiştir [4]. Günümüzde yaygın bir biçimde radon olarak adlandırılan ^{222}Rn için ilk defa 1900 yılında radyum-226'nın saldıgı gazı ithafen "radyum emanasyonu" tanımlaması kullanılmış ve 1912 yılında yeni bir element olarak kabul edilmiştir. Radonun, uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) ve aktinyum (^{235}U) bozunma serilerinden gelen üç doğal radyoizotopu için 1923 yılında sırasıyla; radon (^{222}Rn , yarı-ömrü 3,82 gün), toron (^{220}Rn , yarı-ömrü 55,6 saniye) ve aktinon (^{219}Rn , yarı-ömrü 3,96 saniye) adlarının kullanılması benimsenmiştir [5,6]. 5,48MeV enerjili bir alfa parçacığı yayınlarken bozulan ^{222}Rn , toron ve aktinon radyoizotoplarına göre yüksek bolluğa sahip olması ve uzun yarı-ömrü nedeniyle daha yoğun biçimde çalışılmaktadır.

Radon normal şartlar altında renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Periyodik cetvelin 8A grubunda bulunan, 86 atom numarasına sahip olan radon elementi en ağır soy gazdır. Radonun atomik yarıçapı $1,3 \times 10^{-10}$ m ve atomik kesitinin alanı $0,72 \times 10^{-10}$ cm^2 'dir. Yoğunluğu 273 K ve 1 atmosfer basınçta 9,73 g/l ve 273 K'deki molar hacmi ise $50,5 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 'dür. Hidrojenden 100 kat daha ağır olan radon, havadan ise yaklaşık yedi buçuk kat daha ağırdır bu yüzden yere yakın yerlerde birikme olasılığı daha yüksektir. Bunun yanında öz ısısı $0,091 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ 'dir. Elektrik iletkenliği neredeyse hiç yoktur ve oldukça düşük ısıl iletkenliğe ($3,64 \times 10^{-5} \text{ W/cm}\cdot\text{K}$) sahiptir [7]. Radon, donma sıcaklığının (-71°C 'nin) altına soğutulduğunda, sıcaklık düşüşüyle orantılı olarak sarılığı artarak parlak bir fosforesans görünümü sergilerken, hava sıcaklığındaki yükselişle portakal rengi-kırmızımsı formda gözlemlenebilmektedir. Elektron ilgisinin az olması ve iyonlaşma enerjisinin yüksek olmasından dolayı radon diğer elementlerle kimyasal bağ yapmaz ancak katratlar ve karışık florimler gibi bazı bileşikler oluşturabilir, özellikle suyla birlikte yarı kararlı bir katrat-hidrat ($\text{Rn}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) oluşturmaktadır [8]. Radon kısmen suda çözülebilir ve gliserin dışındaki organik sıvılar içinde yüksek bir çözünürlüğe sahip olabilir. Odun kömürü ve silikon jelde ise kolayca emilebilmektedir [9].

Yaşadığımız her yerde az veya çok miktarda, mutlaka radon mevcuttur. Kimyasal olarak inert olan radon gazı, solunum yoluyla akciğerlere alındığında, solunum sistemindeki dokularla veya havadaki partiküllerle kimyasal bağ yapmadığı için verilen nefesle vücut dışına atılabilir. Fakat radyoaktif olan bu gazın bozunmasıyla ortaya çıkan kısa yarı-ömlü radon ürünleri (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi ve ^{214}Po) statik yüklere sahip ve kimyasal reaksiyona girebilen radyoçekirdeklerdir. Havadaki toz zerreciklerine yapışabilen bu bozunma ürünleri, solunum sistemindeki organlara yerleşerek bozunmaya devam edebilmekte ve bu esnada yayımlanan radyasyon, canlı dokuları iyonize ederek yaşayan hücrelerin DNA yapılarını değiştirebilmekte ve kanser oluşumuna yol açabilmektedir [10,11]. Kanser, insan yaşamını tehdit eden en ciddi sağlık sorunlarından birisidir. Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı, IARC'nin (International Agency Research on Cancer) 2022 yılına ait verileri incelendiğinde; dünya genelinde meydana gelen ölümler içerisinde yaklaşık 9,74 milyon kişinin kanser sebebiyle hayatını kaybettiği ve tahminen 19,9 milyon yeni kanser vakasının meydana geldiği bildirilmektedir. 2022 yılındaki tüm kanser ölümlerinin %18,65'lik kısmının akciğer kanserinden kaynaklandığı görülmektedir. Erkeklerde akciğer kanseri %22,71 ile ilk sırada, kadınlarda ise %13,54 ile ikinci sırada yer almaktadır [12]. Ülkemizdeki kayıt altına alınmış kanser vakalarına ait 2018 yılı verilerine göre akciğer kanseri; erkeklerde %21'lik bir oranla ilk sırada; kadınlarda ise %6'lık bir oranla beşinci sırada yer almaktadır [13]. Günümüze dek yapılmış olan epidemiyolojik çalışmalar radona maruziyet ile akciğer kanseri oluşumu arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir [14]. Dünya Sağlık Örgütü, WHO (World Health Organization) ve A.B.D. Çevre Koruma Ajansı, EPA (Environmental Protection Agency) radon gazını "A-sınıfı kanserojen madde" olarak nitelendirmiştir [15,16]. Üstelik radon solunumu, en tehlikeli kanserojenler arasında tütün kullanımından sonra ikinci sırada yer almaktadır. WHO, tüm akciğer kanserlerinin %14'e varan kısmının radon kaynaklı olduğunu belirtmektedir [17]. Bu nedenle, kapalı mekânlardaki radon seviyelerinin bilinmesi halk sağlığı açısından bir gerekliliktir. Radonun insan sağlığı üzerinde meydana getirebileceği olumsuz etkilerin azaltılabilmesi amacıyla ülkeler ve çeşitli organizasyonlar, genellikle $11\text{-}300 \text{ Bq/m}^3$ aralığında gözlemlendiği rapor edilen bina içi radon gazı konsantrasyonları [7] için bazı sınır değerleri benimsemişlerdir. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu, ICRP (International Commission on Radiological Protection), konutlardaki radon gazı yoğunluğunun 300 Bq/m^3 'ü, iş yerlerindeki radon düzeyinin ise 1000

Bq/m³'ü aştığı durumlarda müdahale edilmesini tavsiye etmektedir [18]. WHO, riskin en aza indirilebilmesi amacıyla kapalı mekânlarda maruz kalınacak radon konsantrasyonunun 100 Bq/m³'ün altında tutulmasını önererek, ülkeye özgü koşullar nedeniyle bu seviyenin sağlanamadığı durumlarda müdahale için referans seviyesinin 300 Bq/m³ alınmasını tavsiye etmektedir [16]. Ülkemizdeki kapalı mekânlarda müsaade edilebilecek radon konsantrasyonu değerleri, Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) tarafından evler için 400 Bq/m³, iş yerleri için ise 1000 Bq/m³ olarak belirlenmiştir [19]. Avrupa Birliği ülkeleri için tavsiye edilen düzeyler, Avrupa Komisyonu, EC (European Commission) tarafından evler için 300 Bq/m³ ve işyerleri için ise 1000 Bq/m³ olarak bildirilmektedir [20]. Dünya genelinde meskenlerdeki atmosferik radon konsantrasyonu ortalaması 39 Bq/m³ [1] iken Türkiye'deki aritmetik ortalama 81 Bq/m³ olarak rapor edilmiştir [21]. Isparta il merkezi özelinde ise bina içi atmosferik radon konsantrasyonlarının, küresel ve ulusal ortalamalardan daha yüksek düzeylerde gözlemlendiği bildirilmektedir [22].

Radonun ana kaynağı yerküredir. Çevremizdeki radonun yaklaşık %70'e yakını toprak ve kayalardan kaynaklanmaktadır. Toprak gazındaki radon konsantrasyonlarının genellikle 18-180 kBq/m³ aralığında değiştiği bilinmektedir [7]. En büyük ikinci katkı yeraltı suları nedeniyle meydana gelmektedir. Doğal süreçler neticesinde kaya katmanları arasında oluşan radon gazı, topraktan çeşitli mekanizmalarla yeryüzüne çıkmakta, binaların zemin ve duvarlarındaki çatlaklardan ayrıca tesisat boşluklarından bina içine girerek kapalı mekânların atmosferine taşınmaktadır. Bina içi radon yoğunluğunu etkileyen pek çok dış etmen mevcuttur. Jeolojik etmenler (kayaç yapısı, toprak özellikleri vb.), meteorolojik parametreler (nem, basınç, sıcaklık, rakım vb.), bina yapımında kullanılan yapı malzemeleri, doğalgaz, su kaynakları, binanın yaşı, binanın yalıtımı ve bina kullanım alışkanlıkları gibi faktörlerin bina içi radon gazı konsantrasyonu üzerinde etkili olduğu bilinmektedir [23-32].

Bina içi radon seviyesini etkileyen parametrelerden biri de yüksekliktir. Havadan daha ağır olan radonun zeminde birikme eğilimi göstermesi nedeniyle yüksekliğin artması ile birlikte radon gazı yoğunluğunun azalması beklenmektedir. Literatürde, kapalı mekânlarda radon düzeyinin yükseklikle değişimini inceleyen çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Konuyla ilgili araştırmaların çoğunda, yükseklik arttıkça radon konsantrasyonunun azaldığı doğrulanırken [33-47] bazı çalışmalarda bu beklentiyle uyumlu olmayan sonuçlar da rapor edilmiştir [48-50].

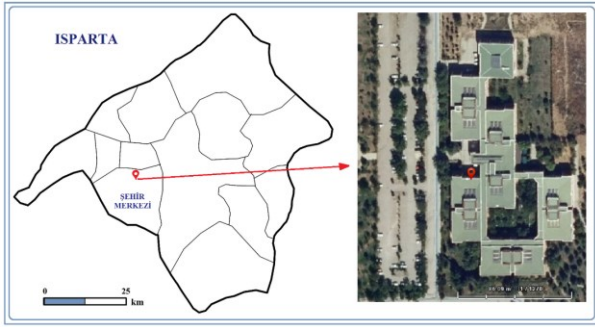
Çalışmamızda, diğer fiziksel koşulların aynı biçimde etkili olduğu kapalı bir mekân için radon yoğunluğunun yüksekliğe bağlı davranışının

incelenmesi ve bu mekânın, tabanında istatistiksel olarak anlamlı bir düzeyde radon gazı birikiminin olup olmadığı belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel aşama, Süleyman Demirel Üniversitesi IRL biriminde farklı yüksekliklere yerleştirilen 3 elektronik dedektörden 52 gün boyunca saatlik radon ölçümleri alınarak gerçekleştirilmiştir. İzleyen kısımda, çalışmanın yapıldığı yer ve ölçümler için kullanılan sistem tanıtılmaktadır. Daha sonra, elde edilen ölçüm verileri istatistiksel olarak değerlendirilmekte ve araştırma koşulları dahilinde ulaşılan sonuçlar sunulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ölçüm alanı

Akdeniz Bölgesi'nin kuzeyinde, Göller Bölgesi'nin merkezi konumunda yer alan Isparta ili, 30°20' ve 31°33' doğu boylamları ile, 37°18' ve 38°30' kuzey enlemleri arasında kurulmuş olup 8933 km²'lik bir yüzölçümüne sahiptir. İlin ortalama rakımı 1050 metredir [51,52]. 2023 yılı sonunda yapılan nüfus sayımına göre Isparta ilinin toplam nüfusu 449.777 olarak tespit edilmiştir. Bu nüfus içerisinde en büyük payı 271.396 kişiyle il merkezi almaktadır [53]. Akdeniz iklimi ile karasal iklim arasındaki geçiş bölgesinde yer aldığından dolayı Isparta sınırları içinde her iki iklim özellikleri de görülmektedir. Yıllık ortalama hava sıcaklığı 12 °C düzeyindedir (en yüksek 38,7 °C ve en düşük -21,0 °C). Yağışların önemli bir bölümü kış ve ilkbahar mevsimlerinde gerçekleşmektedir (%69). İl merkezindeki ortalama yıllık toplam yağış miktarı 508,3 mm'dir. Isparta ilindeki toprakların ana yapısı, genellikle kalkerli formdadır. 8-40 cm arasında derinliğe sahip olan üst toprak killi kalkerli granüler ve dağılıbilir yapıdadır. Üst toprakla aynı yapıya sahip olan alt toprak ise genellikle, daha kaba bünyeli ve killi bir formdadır. Batı Torosların uzantısı olan ve yüksekliği 3000 metreyi bulan oldukça yüksek dağların bulunduğu Isparta ili engebeli bir yapıdadır. İlin %68,4'nü dağlar, %16,8'ni ovalar ve %14,8'ni platolar oluşturmaktadır [51,52]. Atmosferik radon ölçümleri için şehir merkezine 10 km uzaklıktaki Süleyman Demirel Üniversitesi, Fizik Bölümü'nde bulunan Isparta Radon Laboratuvarı seçilmiştir. Fakülte binası, 21300 m²'lik alana sahip 3 katlı bir bina olup, 205 akademik kadro ile hizmet vermektedir. Fakültede 40 derslik, 50 kişilik bilgisayar laboratuvarı, 7 uygulama ve araştırma laboratuvarı, her bölüme ait birer seminer salonu ve 1 öğrenci kafeteryası bulunmaktadır. Toplamda 4882 öğrenci ile gündüz ve gece olmak üzere eğitim ve öğretim faaliyetlerine devam edilmektedir [54]. Çalışmanın yapıldığı birimin konumu Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanının konumunu gösteren harita ve uydu görüntüsü

2.1. Ölçüm için kullanılan sistem

Çalışmamızdaki ölçümler, Airthings firması tarafından üretilen Wave radon dedektörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Söz konusu cihaz bluetooth bağlantısına sahip, düşük maliyetli, ölçüm aralığı, hassaslığı, pil ömrü, veri aktarma yeteneği gibi olumlu özellikleriyle ön plana çıkan taşınabilir bir elektronik dedektördür [55]. Bu kompakt cihaz aynı zamanda ortama ait nem ve sıcaklık ölçümleri yapabilmekte ve ortamdaki son radon düzeyini farklı renkteki led ışıkları ile görsel olarak bildirmektedir. Bunun yanında; hafif, taşınabilir olması, estetik görüntüsü, ücretsiz mobil uygulama imkânı sunması nedeniyle çalışmada tercih edilmiştir.

Wave radon dedektörlerinin üretici tarafından periyodik olarak sağlanan kalibrasyon güncellemelerinin geçerliliği, IRL biriminde mevcut olan profesyonel radon ölçüm cihazı Corentium PRO (seri numarası: 2700014103, kalibrasyon sertifika kodu: NRPP 8233) vasıtasıyla rutin olarak kontrol edilmektedir. Wave cihazının kurulumunu takiben ilk radon gazı verileri, yaklaşık 1 saat sonra alınabilmektedir. Bir duman dedektörüne benzeyen bu portatif cihazın başlıca teknik özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

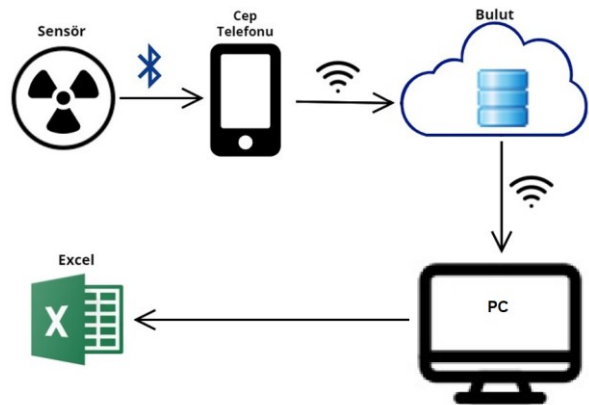
Wave radon dedektörü ile gerçekleştirilen saatlik ölçümlerimize ait verilerin alınması için kullanılan sistem mimarisi Şekil 3'de gösterilmektedir. Sistemin çalışması şu şekildedir: Ölçüm noktasındaki elektronik dedektör, ortamdaki radon konsantrasyonunu her saatte bir ölçer. Akıllı bir cep telefonuna kurulmuş üretici uygulaması (Airthings Wave, Airthings ASA) sayesinde veriler, bluetooth bağlantısıyla cep telefonuna indirilebilir veya internet veri tabanına aktarılarak internet erişimi olan bir bilgisayara kaydedilebilir. Elde edilen verilerin tablolar haline getirilip incelenmesi Excel gibi bir elektronik tablolar programı ile sağlanabilir.



Şekil 2. Wave radon dedektörü ve cep telefonu uygulamasının ekran görüntüsü

Tablo 1. Wave radon dedektörünün temel özellikleri [55]

Radon Örnekleme	Pasif difüzyon odası
Algılama Yöntemi	Alfa spektrometresi
Çalışma Modları	Sürekli radon monitörleme: Uzun dönem/Kısa dönem ekranı
Çalışma Aralığı	0-500 pCi/L /0-20.000 Bq/m ³
Çalışma Prensipleri	Sürekli olarak alfa parçacıklarının elektrostatik toplanması ile İOS ve Android uygulamasıyla radon takibinin yapılabilmesi
Ölçüm Belirsizliği (200 Bq/m ³ için)	1 haftadan sonra < %10 2 aydan sonra < %5
Güç Kaynağı	2 AA alkalin pil: ~1,5 yıl
Bağlantı Çıkışları	Kablosuz veri aktarımı 39°F - 104°F / 4°C - 40°C
Sıcaklık, Nem Aralığı	Bağıl nem: < %85
Ağırlık	7,7 ons / 219 g (pillerle birlikte)
Boyut	4,7×1,4 inç / 120×36 mm (çap×boy)
Bağlantı Şekli	Bluetooth ve Airthings Smartlink ile Kablosuz olarak (Wi-Fi ile) verileri aktarabilme özelliği
Monitörleme	Üzerindeki bluetooth ile radon miktarı cep telefonundan ve bilgisayardan görüntülenmektedir.



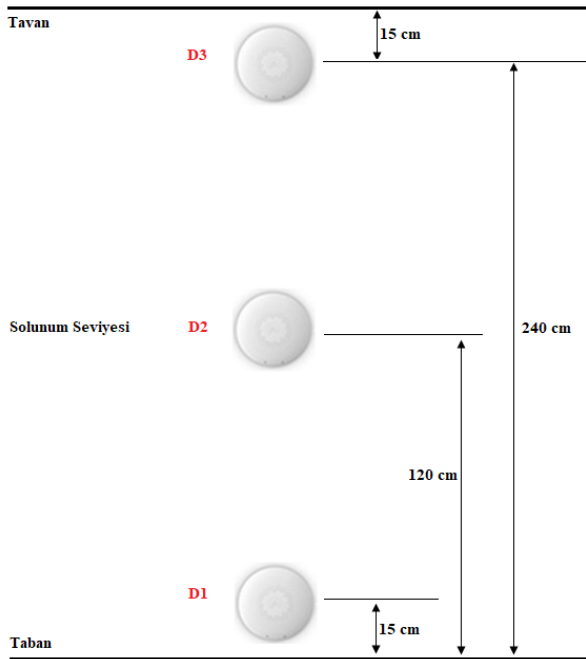
Şekil 3. Radon ölçüm sürecinde veri transferi ve işlenmesi

2.3. Deneysel çalışma

1 Kasım - 22 Aralık 2021 tarihleri arasında yürütülen deneysel ölçümler, Süleyman Demirel Üniversitesi IRL biriminde gerçekleştirilmiştir. Isparta merkez ilçede bulunan kapalı mekânlarda, global ve ulusal

ortalamaların üzerinde radon yoğunluklarına rastlamak mümkündür [22]. 30,53263° doğu boylamı ile 37,83045° kuzey enleminin kesiştiği konumda bulunan IRL birimi de böyle bir mekândır. IRL birimdeki ortalama radon düzeyinin, solunum seviyesinde 300 Bq/m³ civarında olduğu daha önce yapılan bir çalışmayla gösterilmiştir [46]. Ölçüm noktası belirlenirken, kapalı mekânın tabanındaki radon farklılığının daha rahat gözlemlenebilmesi için bina içi atmosferik radon düzeyinin yüksek olduğu bilinen ve zemin katta bulunan bir mekân aranmış ve IRL birimi bu kriterleri sağladığı için çalışma alanı olarak seçilmiştir. Laboratuvarın kullanımının kontrol edilebiliyor olması ve saatlik radon seviyesindeki değişimin kolayca denetlenebilmesi de bu tercihi güçlendirmiştir. 13,7 m²lik bir alana sahip olan IRL biriminde 1 pencere ve 1 kapı bulunmaktadır.

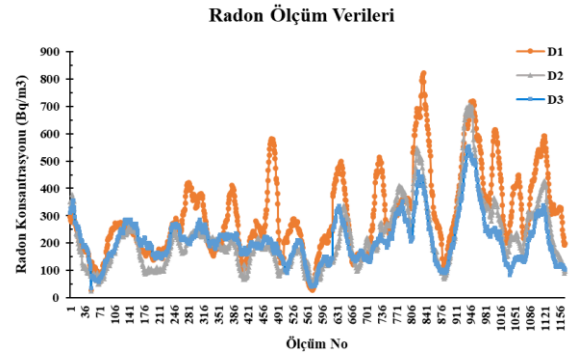
Deneyisel çalışma için Isparta Radon Laboratuvarı'ndaki boş duvara, aynı hizada farklı yüksekliklere 3 elektronik radon dedektörü monte edilmiştir. Daha sağlıklı ölçüm yapılabilmesi amacıyla dedektörlerin, radyatör, elektronik cihazlar, kapı ve pencereden olabildiğince uzağa yerleştirilmesine dikkat edilmiştir. İlk dedektör (D1) oda tabanından yaklaşık 15 cm yukarıya, ikinci dedektör (D2) solunum seviyesine [56] (zeminden yaklaşık 120 cm yükseğe) ve üçüncü dedektör (D3) laboratuvar zemininden yaklaşık 240 cm yükseğe monte edilmiştir (Şekil 4). Elektronik dedektörlerle ölçüm periyodu boyunca saatlik radon ölçümleri alınarak bu kapalı mekândaki radon gazı konsantrasyonunun yüksekliğe bağlı nasıl değiştiği incelenmiştir. Ölçümlere ait veriler, Şekil 3 ile gösterilen sistem mimarisine uygun biçimde kayıt altına alınmış ve taşınabilir bir USB bellekte muhafaza edilmiştir.



Şekil 4. Elektronik dedektörlerin pozisyonlarını gösteren temsili deneysel düzenek

3. Bulgular

IRL biriminde, 3 elektronik dedektörle eş-zamanlı olarak her saatte bir gerçekleştirilen radon ölçümleri için ölçüm süreci boyunca 3744 adet ölçüm verisi toplanması gerekirken internet kesintileri ve sistem güncellemeleri esnasında veri alışverişinin sağlanamaması gibi teknik aksaklıklardan aynı anda etkilenen dedektörlerde, cihaz başına 79 adet veri kaybı olmuş ve bu yüzden 237 adet veri kayıt altına alınamamıştır. Bu kayıplara rağmen kullanılan sistemin veri iletim performansı %93,7 gibi yüksek bir verimlilikle gerçekleşmiştir. Şekil 5'de ölçüm periyodu boyunca dedektörler tarafından belirlenen radon gazı konsantrasyonları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Genel olarak, IRL birimindeki zamana bağlı radon değişiminin 3 dedektör tarafından benzer desenlerle uyumlu bir biçimde takip edildiği, yani birimdeki radon düzeyi düşme eğilimindeyken farklı pozisyonlardaki dedektörlerin okumalarında azalma davranışı ve odadaki radon seviyesi yükselme eğilimine geçtiğinde dedektörlerin kayıt ettiği radon konsantrasyonlarında artma eğilimi gözlemlendiği söylenebilir. Bununla birlikte, taban konumunu temsil eden D1 dedektörünün diğer dedektörlere göre daha yüksek radon konsantrasyonları tespit ettiği açıktır (Şekil 5).



Şekil 5. Farklı yüksekliklerde bulunan dedektörlerin ölçüm süreci boyunca kayıt ettiği radon konsantrasyonlarının karşılaştırılması (x-eksenindeki ölçüm numaraları, eş-zamanlı olarak alınan saatlik ölçümlere karşılık gelmektedir).

Kapalı mekânlardaki radon yoğunluğunun havalandırma ile azalabileceği bilinmektedir [29,46] Ölçüm periyodu, pandemi dönemi içerisinde bulunmasına rağmen deneysel çalışma aşamasında kısıtlamaların olmaması nedeniyle ölçümlerin yürütüldüğü laboratuvar aktif olarak kullanılmış bu yüzden IRL birimi doğal olarak havalandırılmıştır. Dedektörlerden elde edilen ölçümler birlikte değerlendirildiğinde, ölçümlerin büyük bir kısmının 100-300 Bq/m³ aralığında olduğu (2374 adet veri ile ölçümlerin %67,7'sine karşılık gelmektedir) ve 300 Bq/m³'ten daha yüksek 867 adet (tüm ölçümlerin %24,7'si kadar) radon ölçümü alındığı saptanmıştır. Ölçümlerin gerçekleştirildiği 1 Kasım ile 22 Aralık 2021 tarihleri arasında birimdeki ortalama radon

düzeyi 245 Bq/m^3 olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Bu ortalama, aynı birimde 1 Mart 2001 ile 28 Şubat 2022 tarihleri arasında gerçekleştirilen diğer bir çalışmaya ait ölçüm sonuçları ile tutarlıdır. Söz konusu çalışma için elde edilen 8216 adet saatlik radon ölçümü verisinin, 26 Bq/m^3 ile 854 Bq/m^3 arasında değiştiği ve 295 Bq/m^3 değerinde bir aritmetik ortalamaya sahip olduğu bildirilmiştir [46]. IRL birimi için elde ettiğimiz 3507 radon ölçümünden hiçbirinin TENMAK'ın iş yerleri için kabul ettiği 1000 Bq/m^3 lük müdahale limitini [19] aşmadığı görülmektedir (Şekil 5 ve Tablo 2).

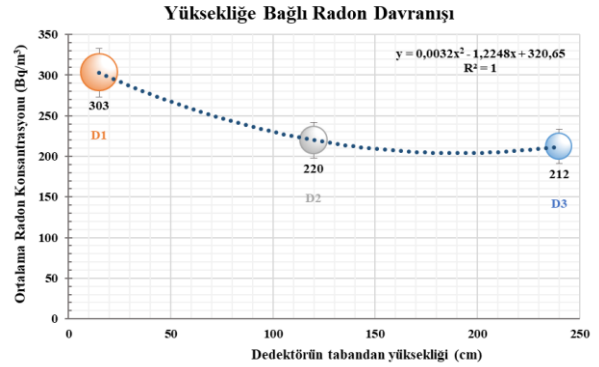
Radon yoğunluğunun yüksekliğe bağlı olarak sergilediği davranışın incelenbilmesi amacıyla, IRL birimindeki taban seviyesi, solunum seviyesi ve tavan seviyesini temsil eden D1, D2 ve D3 gruplarına ait ölçüm verileri, SPSS 29.0 programı [57] kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan elektronik dedektörlerin kodlamaları, seri numaraları, yerden yükseklikleri ve ölçüm grupları için elde edilen verilere ait tanımlayıcı istatistiksel bilgiler (minimum, maksimum ölçümler ve aritmetik ortalamalar) Tablo 2'de toplu halde özetlenmektedir.

İstatistiksel analize başlamadan önce ölçüm verilerinin normal dağılıma sahip olup olmadığını belirlemek amacıyla normallik testi uygulanmıştır. Her grupta 1169'ar radon ölçüm verisi bulunmakta olup gruplardaki veri sayıları 50'den büyük olduğu için Kolmogorov-Smirnov testi ile normallik incelemesi yapılmış ve anlamlılık değeri, $p < 0,05$ olarak bulunduğu için grup verilerinin normal dağılıma sahip olmadığı ortaya çıkmıştır. Ek olarak, gruplara ait frekans dağılımları incelendiğinde, üç gruptaki ölçüm verilerinin de sağa-çarpık bir yapı sergilediği tespit edilmiştir.

Ölçüm gruplarına ait veriler normal dağılıma sahip olmadığından ve ayrıca en az bir grup ortalaması diğerlerinden farklı olduğundan istatistiksel analiz için Kruskal-Wallis testi tercih edilmiştir. Kruskal-Wallis testi sonucunda; farklı pozisyonları temsil eden 3 gruba ait ölçüm verileri arasında istatistiksel bakımdan anlamlı bir farklılığın olduğu ($p < 0,05$) bulunmuştur (Tablo 2). Farklılığın hangi gruplar arasında olduğu, Mann-Whitney U testi kullanılarak yapılan ek analizlerle araştırılmıştır. İkili karşılaştırmalar sonucunda; D1 grubuna ait ölçümler ile D2 grubuna ait ölçümler arasındaki anlamlılık değeri $p = 0,001$ olarak bulunmuş ve $p < 0,05$ olduğu için D1 ölçümleri ile D2 ölçümleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu belirlenmiştir. Benzer biçimde, D1 grubu ölçümleri ile D3 grubu ölçümleri arasındaki anlamlılık değeri yine $p = 0,001$ yani $p < 0,05$ olarak elde edilmiş, böylelikle D1 ve D3 grubu ölçümlerinin de istatistiksel bakımdan birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Son olarak D2 ve D3 grupları karşılaştırıldığında, bu gruplara ait veriler arasındaki anlamlılık değeri $0,264$ olarak elde edilmiş ve $p > 0,05$ olduğu için D2 ölçümleri ile D3

ölçümleri arasında istatistiksel bakımdan anlamlı bir farklılık bulunmadığı ortaya çıkarılmıştır. Özetle; laboratuvar tabanındaki radon konsantrasyonlarının, solunum seviyesindeki ve laboratuvar tavanındaki radon düzeylerinden daha farklı yoğunluklarda gözlemlendiği istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.

26 Bq/m^3 ile 822 Bq/m^3 değerleri arasında değişen bina içi atmosferik radon konsantrasyonlarının gözlemlendiği ölçüm sürecinde, IRL birimindeki radon düzeyinin yüksekliğe bağlı olarak azalma eğiliminde olduğu ortaya çıkarılmıştır (Tablo 2). Ortalama radon konsantrasyonlarının yüksekliğe bağlı değişimi Şekil 6'da görsel olarak sunulmaktadır. Laboratuvar tabanı referans seviyesi olarak alındığında, birimdeki radon düzeyinin yüksekliğe bağlı sergilediği bu davranış, Şekil 6' da gösterilen ikinci derece polinom yapısındaki fit kullanılarak başarılı bir şekilde formalize edilebilmektedir ($R^2 = 1$). Artan yüksekliğe bağlı olarak bina içi atmosferik radon düzeyinin azalma davranışı, IRL biriminin bulunduğu binada daha önce yapılan benzer çalışma sonuçları ile de desteklenmektedir [46, 47]. Çalışmamız kapsamında ayrıca, ölçüm noktaları için hafta sonlarında kaydedilen atmosferik radon konsantrasyonlarına kıyasla, hafta içi günlerde (laboratuvarın kullanımına dolayısıyla doğal havalandırma yapılmasına bağlı olarak) bir düşüşün meydana geldiği de gözlemlenmiştir.



Şekil 6. IRL birimindeki ortalama radon düzeylerinin yüksekliğe bağlı değişimi (kodlama Çizelge 2 ile uyumludur).

4. Tartışma ve Sonuç

En tehlikeli kanserojenler arasında yer alan radon, zamanımızın büyük bir kısmını geçirdiğimiz kapalı mekânlarda yüksekliğe bağlı olarak farklı yoğunluklarda gözlemlenebilmektedir. Bu çalışmada bina içi atmosferik radon konsantrasyonunun yüksekliğe bağlı sergilediği davranış, Süleyman Demirel Üniversitesi Fizik Bölümü'nün zemin katında bulunan Isparta Radon Laboratuvarı'nda farklı yüksekliklere yerleştirilmiş 3 adet Wave radon dedektörüyle 1 Kasım 2021 tarihinden itibaren birbirini takip eden 52 gün boyunca eş-zamanlı saatlik radon ölçümleri alınarak incelenmiştir.

Tablo 2. Dedektör bilgileri ve radon ölçümlerine ait tanımlayıcı istatistikler (dedektör kodları, Şekil 4 ve Şekil 5'deki kodlamayla uyumludur)

Dedektörlere ait Bilgiler				Ölçümlere ait Tanımlayıcı Bilgiler			
Kodu	Seri Numarası	Yerden Yükseklik	N	Min (Bq/m ³)	Mak (Bq/m ³)	Ort (Bq/m ³)	p
D1	2950032386	15 cm	1169	28	822	303	0,001
D2	2900262419	120 cm	1169	26	706	220	
D3	2950039463	240 cm	1169	36	554	212	
Genel			3507	26	822	245	

N : ölçüm sayısı, p: Kruskal-Wallis testi sonucunda elde edilen anlamlılık değeri

Kullanılan elektronik dedektörler, ölçüm periyodunda yüksek verimlilikte bir veri iletim performansı (%93,7) göstermiş ve dedektör başına 1169 adet radon ölçüm verisi kayıt altına alınmıştır. Saatlik radon ölçümlerinin 26 Bq/m³ ile 822 Bq/m³ arasında değiştiği, ölçümlerin %67,7'lik kısmının 100-300 Bq/m³ aralığında gerçekleştiği ve birimdeki ortalama radon yoğunluğunun 245 Bq/m³ değerinde olduğu bulunmuştur. TENMAK'ın iş yerleri için belirlemiş olduğu 1000 Bq/m³ lük müdahale düzeyini aşan hiçbir ölçüm verisine rastlanmamıştır.

Ölçümlerden elde edilen ortalamalar incelendiğinde; laboratuvarın taban seviyesindeki D1 dedektörüyle belirlenen radon düzeyinin 303 Bq/m³, solunum seviyesine yerleştirilen D2 dedektörüyle tespit edilen ortalama radon konsantrasyonunun 220 Bq/m³ ve tavan seviyesinde konumlu D3 dedektörüne ait ortalama radon düzeyinin 212 Bq/m³ olduğu bulunmuştur. Bu durum, IRL birimindeki radon seviyesinin artan yüksekliğe bağlı olarak azalma eğilimi gösterdiğine işaret etmektedir. Ölçüm verileri ayrıca, SPSS programıyla istatistiksel olarak analiz edilmiş, yapılan testler sonucunda D1 ölçümleri ile diğer iki dedektörün ölçümleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığın olduğu (p<0,05) tespit edilirken, D2 ve D3 dedektörlerinin ölçümleri arasında anlamlı bir farklılığın olmadığı bulunmuştur (p>0,05).

Bu çalışmanın koşulları dahilinde, radon gazının kapalı mekânların zemininde birikme eğilimi gösterdiği ve bu yüzden odanın tabanında daha yüksek konsantrasyonlara ulaştığı istatistiksel olarak ortaya çıkarılmıştır. Radon kaynaklı sağlık riskinin en aza indirilebilmesi için ölçüm yapılan birimde duvar ve zemin yalıtımlarının gözden geçirilerek, havalandırma koşullarının iyileştirilmesi ve bina genelinde yürütülecek daha kapsamlı ölçümlerle riskli diğer birimlerin belirlenmesi tavsiye edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma 1919B012106382 proje numarası ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na (BİDEB'e) teşekkür eder.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Exposures from Natural Radiation Sources Annex B, 117-118, New York, USA.
- [2] Rutherford, E. 1900. I. A Radio-Active Substance Emitted From Thorium Compounds. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 49(296), 1-14.
- [3] Dorn, E., 1900. Die Von Radioaktiven Substanzen Ausgesandte Emanation. Abhandlungen Der Naturforschenden Gesellschaft (Halle), 23, 1-15.
- [4] Partington, J. R. 1957. Discovery of Radon. Nature, 179 (4566), 912-912.
- [5] George, A. C. 2008. World History of Radon Research and Measurement From The Early 1900's to Today. AIP Conference Proceedings, 26-27 Ağustos, US, 20-33.
- [6] Mc Laughlin, J. 2012. Radon: Past, Present and Future. Paper presented at the First East European Radon Symposium FERAS, 2-5 Eylül, Romania, 5-13s.
- [7] NCRP, 1988. Report Measurements of Radon and Radon Daughters in Air, No..97, p.174.
- [8] Martinelli, G. 1993. Radon Geochemistry and Geophysics in Deep Fluids in Italy. Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental and Earth Sciences. World Scientific C, 435-453.
- [9] Cigna, A.A. 2005. Radon in Caves. International Journal of Speleology, 34(1-2). 1-18.
- [10] UNSCEAR, 1988. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations, Report No: E.88.IX.7, 647p. New York.

- [11] Al-Zoughool, M., & Krewski, D. 2009. Health Effects of Radon: A Review of The Literature. *International Journal of Radiation Biology*, 85(1), 57-69.
- [12] IARC, 2022. Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı. <https://gco.iarc.fr/today/en> (Erişim tarihi:25.09.2023).
- [13] T.C. Sağlık Bakanlığı Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü, 2022. https://hsgmdestek.saglik.gov.tr/depo/birimler/kanser-db/istatistik/Kanser_Rapor_2018.pdf (Erişim tarihi:25.06.2023).
- [14] ICRP, 2010. International Commission on Radiological Protection. Lung Cancer Risk From Radon and Progeny, ICRP 4843-4564-6599 1, 20-23.
- [15] EPA, 2005. Environmental Protection Agency. Citizen's Guide to Radon. U.S. EPA 402-K02-006, 11-16.
- [16] WHO, 2009. World Health Organization. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, 94p.
- [17] WHO, 2005. Radon and Cancer. World Health Organization Fact Sheet, No:91.
- [18] ICRP, 2014. International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection Against Radon Exposure, ICRP Publication 126. Annual, 43(3), 5-73.
- [19] Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti. (24.03.2000 Tarih ve 23999 Sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan S.I.No. 37, Resmî Gazete'de Yayınlanan ve 25598 Sayılı Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik), 2004. <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=5272&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeli&mevzuatTertip=5> (Erişim Tarihi: 14.05.2024).
- [20] EC, 2011. European Commission. Laying Down Basic Safety Standards for Protection Against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation. E.C. 0254 NLE, 593p.
- [21] Celebi, N., Ataksor, B., Taskın, H., Bingoldag, N. A. 2015. Indoor Radon Measurements in Turkey Dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, 167(4), 626-632.
- [22] Kürkcüoğlu M. E. 2018. Indoor Radon in Isparta. 4th Int. Conf. on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology, 20-22 Nisan, Antalya, 32.
- [23] Porstendorfer, J., Butterweck, G., Reineking, A., 1994. Daily Variation of The Radon Concentration Indoors and Outdoors and The Influence of Meteorological Parameters. *Health Phys.* 67(3), 283-287.
- [24] Ramola, R.C.; Kandari, M.S.; Negi, M.S.; Choubey, V.M. 2000. A Study of Diurnal Variation of Indoor Radon Concentrations. *Jpn. J. Heal. Phys.*, 35, 211-216.
- [25] Baeza, A., Navarro, E., Roldan, C., Ferrero, J.L., Juanes, D., Corbacho, J.A., Guillen, F.J. 2003. Indoor Radon Levels in Buildings in the Autonomous Community of Extremadura (Spain). *Radiation Protection Dosimetry*, 103(3), 263-268.
- [26] Müllerova, M., Holý, K., 2010. Study of Relation Between Indoor Radon in Multi-Storey Building and Outdoor Factors. Fifth International Summer School on Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine. AIP Conf. Proc., 6-15 Temmuz, Slovakia, 161-162.
- [27] Rafique, M., Rahman, S.U., Mahmood, T., Rahman, S., Matiullah, 2011. Assessment of Seasonal Variation of Indoor Radon Level in Dwellings of Some Districts of Azad Kashmir, Pakistan. *Indoor Built Environ.* 20(3), 354-361.
- [28] Kropat, G., Bochud, F., Jaboyedoff, M., Laedermann, J.-P., Murith, C., Palacios, M., Baechler, S., 2014. Major Influencing Factors of Indoor Radon Concentrations in Switzerland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 129, 7-22.
- [29] Kürkcüoğlu, M. E., Koçer, A. A., Akyürek, A. 2021. A Study on The Effect of Natural Ventilation on Indoor Atmospheric Radon Concentration. Turkish Physical Society 37th International Physical Congress (TPS-37), 1-5 Eylül, Muğla,
- [30] Yarmoshenko, I. V., Onishchenko, A. D., Malinovsky, G. P., Vasilyev, A. V., & Zhukovsky, M. V. 2022. Modeling and Justification of Indoor Radon Prevention and Remediation Measures in Multi-Storey Apartment Buildings. *Results in Engineering*, 16, 100754.
- [31] Mancini, S., Guida, M. 2024. Development of a Pre-Diagnosis Procedure for the Evaluation of Indoor Radon Potential in Buildings. *Wseas Transactions on Environment and Development*, 20, 1-7.
- [32] Elmehdi, H. M., Ramachandran, K., Gaidi, M., & Daoudi, K. 2024. Diurnal and Seasonal Influence on The Indoor Radon Levels in Dwellings of Sharjah Emirate As Well Its Estimation of Annual Effective Dose. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 100663.
- [33] Pavlenko, T. A., Los, I. P., Goritsky, A. V., Aksenov, N. V. 1997. Exposure Doses Due to Indoor ²²²Rn in The Ukraine and Basic Directions For Their Decrease. *Radiation Measurements*, 28(1-6), 733-738.

- [34] Papaefthymiou, H., Mavroudis, A. ve Kritidis, P. 2003. Indoor Radon Levels and Influencing Factors in Houses of Patras, Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 66(3), 247-260.
- [35] Kürkçüoğlu M., Haner, B., Yılmaz, A., & Toroğlu, İ. 2009. Karaelmas Yerleşkesi Merkez Kütüphanesi Radon Ölçümleri. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 4(2), 177-188.
- [36] Kürkçüoğlu, M. ve Bayraktar, G. 2012. Süleyman Demirel Üniversitesi'nde Bina İçi Radon Konsantrasyonlarının Nükleer İz Dedektörleri Kullanılarak Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(2), 167-183.
- [37] Afolabi, O. T., Esan, D. T., Banjoko, B., Fajewonyomi, B. A., Tobih, J. E., & Olubodun, B. B. 2015. Radon Level in a Nigerian University Campus. *BMC research notes*, 8, 1-6.
- [38] Kurt, A. 2015. İstanbul İli Fatih İlçesi İlköğretim Okullarında İç Hava Radon Konsantrasyonlarının Belirlenmesi. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 142s, İstanbul.
- [39] Altınsöz, M., Algın, E., Aşıcı, C. ve Soğukpınar, H. 2016. Radon Concentration Measurements at a University Campus in Turkey. *Turkish Journal of Physics*, 40(1), 69-75.
- [40] Aldemir, K. 2018. Batman'da Bulunan İlkokul Binalarında Radon Düzeyinin Ölçülmesi. *Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 72s, Batman.
- [41] Çıtlak, K. 2018. Sakarya Üniversitesi Kampüs Bölgesinde Bina İçi Radon Konsantrasyonunun Belirlenmesi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 82s, Sakarya.
- [42] Gül, B. T. 2019. Binalarda Radon Gazı Konsantrasyonunun Ölçümü. *Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 71s, Ankara.
- [43] Erdoğan, M., Abaka, M., Manisa, K., Bircan, H., Kuş, C., Zedef, V. 2020. Indoor Radon Activity Concentration and Effective Dose Rates at Schools and Thermal Spas of Iğın. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 35(4), 339-346.
- [44] Küçükönder, E. 2021. Kahramanmaraş İlinde Bina İçi Mevsimsel Radon Gazı Aktivitesi Ölçümü. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 891-901.
- [45] Büyüksaraç, A., Kuluöztürk, M. F. 2022. Measurement of Indoor Seasonal and Regional Radon (^{222}Rn) Gas Activity in Çanakkale (Turkey). *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 911-921.
- [46] Koçer, A. A. 2023. Bir Radon İzleme Sisteminin Tasarımı ve Test Edilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 257s, Isparta.
- [47] Kürkçüoğlu, M. E., Öner, Ö. 2023. Investigation of Height Dependence for Indoor Atmospheric Radon Concentration. *Research on Environmental Radioactivity*, 33.
- [48] Bahtijari, M., Stegnar, P., Shemsidini, Z., Ajazaj, H., Halimi, Y., Vaupotič, J., & Kobal, I. 2007. Seasonal Variation of Indoor Air Radon Concentration in Schools in Kosovo. *Radiation Measurements*, 42(2), 286-289.
- [49] Bayraktar, G., Karakılıç, V., Karadem, A., Kürkçüoğlu, M. E. 2009. S.D.Ü. Sabancı Öğrenci Yurdunda CR-39 Dedektörleri Kullanarak Radon Ölçümleri. *X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi*, 6-9 Ekim, Muğla, 245-252.
- [50] Tamir Darcan, M. 2020. Kırklareli Üniversitesi Kayalı Kampüsünde Bina İçi Radon Gazı Ölçümü. *Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 68s, Kırklareli.
- [51] Isparta İl Kültür Turizm Müdürlüğü, 2023. <https://isparta.ktb.gov.tr/TR-71016/isparta.html> (Erişim tarihi:15.03.2023).
- [52] Türkiye Cumhuriyeti Isparta Valiliği, 2023. <http://www.isparta.gov.tr/isparta> (Erişim tarihi:15.03.2023).
- [53] Türkiye İstatistik Kurumu, 2024. https://www.tuik.gov.tr/media/announcements/Favori_Tablolar.xlsx (Erişim tarihi: 08.03.2024).
- [54] Süleyman Demirel Üniversitesi, 2023. <https://aday.sdu.edu.tr/bolum/fen-edebiyat-fakultesi> (Erişim Tarihi:15.03.2023).
- [55] Airthings; Wave Radon, 2023. <https://www.airthings.com/wave-radon> (Erişim tarihi:15.03.2023).
- [56] Health Canada. (2008). *Guide for Radon Measurements in Residential Dwellings (Homes)*. http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/radiation/radon_homes-maisons/radon_homes-maisons-eng.pdf (Erişim Tarihi:11.06.2024).
- [57] Süleyman Demirel Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, 2023. <https://bidb.sdu.edu.tr/tr/kolay-ulasim/lisansli-yazilimlar-14640s.html> (Erişim Tarihi:18.10.2023).