

Isparta İl Merkezindeki İş Yerlerinde Atmosferik Radon Ölçümleri

Mehmet Ertan Kürkçüoğlu^{1,*}, Fatih Tozun¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye
*Yazışılan yazar e-posta: ertankurkcuoglu@sdu.edu.tr

Alınış: 17 Mart 2015, Kabul: 04 Mayıs 2015

Özet: Bu çalışmada, Isparta il merkezinde bulunan iş yerlerindeki (kamu binaları hariç) ilk atmosferik radon ölçümleri sunulmaktadır. Kış mevsimine ait ölçümler, 43 günlük bir süre boyunca, CR-39 nükleer iz dedektörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dedektörlerin analizi sonucu, şehir merkezinde bulunan iş yerlerindeki bina içi radon yoğunluğunun 90 Bq/m³ lük bir standart sapma ile 144 Bq/m³ lük bir aritmetik ortalamaya sahip olduğu belirlenmiştir. 30 iş yerinde gerçekleştirilen ölçümlere göre; dedektörlerin %37 sinin 100 Bq/m³ den düşük, %43 ünün 100-200 Bq/m³ arasında ve %17 sinin 200 Bq/m³ den yüksek konsantrasyonlar kayıt ettiği bulunmuştur. Tüm ölçüm sonuçları, TAEK'in (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'nun) limit seviyesinin altındadır. Buna ek olarak, bu iş yerlerinde çalışanların maruz kalabilecekleri yıllık dozlar, günlük 8, 10 ve 12 saat çalışıldığı göz önüne alınarak tahmin edilmiştir. Bu çalışmanın limitleri dahilinde, radona maruz kalınması nedeniyle bu iş yerlerinde alınacak minimum yıllık dozun 0,6 mSv ve alınacak en yüksek dozun 6,5 mSv düzeyinde olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Isparta, iş yeri, radon gazı, nükleer iz dedektörü, yıllık etkin doz eşdeğeri

Atmospheric Radon Measurements in Workplaces at Isparta City Centre

Abstract: In this study, first atmospheric radon measurements have been represented for the workplaces other than public buildings located at Isparta city centre. The measurements were performed by using CR-39 nuclear etched track detectors for a period of 43 days in winter season. The analyses of the detectors revealed that, the arithmetic mean of indoor radon for the workplaces at the city centre is 144 Bq/m³ with a standard deviation of 90 Bq/m³. According to the measurements done for 30 workplaces, 37% of the detectors recorded the radon concentrations lower than 100 Bq/m³ while 43% of them measured between 100 and 200 Bq/m³, and 17% of the measurements were higher than 200 Bq/m³. All measurement results were lower than the limit value of TAEK (Turkish Atomic Energy Authority). Additionally, the annual doses might be taken by the workers in those work places were estimated by considering daily working times of 8, 10 and 12 hours. Within the limitations of this study, it was found that the minimum annual dose received due to radon exposure in those workplaces is 0.6 mSv and the maximum value is 6.5 mSv.

Key words: Isparta, workplace, radon gas, nuclear etch detector, annual effective dose equivalent

1. Giriş

Radon her yerde bulunan radyoaktif bir soy gazdır. Radonun orijini uranyum-238 bozunma zincirindeki radyum-226 elementidir. 3,82 günlük yarı-ömrü sonucunda 5,48 MeV enerjili bir α -parçacığı yayınlayan radon, radyoaktif olan polonyum-218 çekirdeğine bozunur. Dünya genelinde maruz kalınan radyasyonun %85'i doğal kaynaklı olup kişi başı alınan yıllık doz ortalaması 2,4 mSv düzeyindedir. Maruz kalınan doğal radyasyonun yarısından doğrudan radon sorumludur. Yer kabuğunda doğal süreçler sonucunda oluşan radon, toprak ve kaya katmanları arasından sızarak atmosfere karışır. Topraktaki radon gazı, difüzyon süreçleriyle bina içi ve bina dışı atmosfere yayılır [1]. Bina dışındaki atmosferik radon seviyesi bina içine göre daha düşüktür. Havadan daha ağır olan radon gazı, havalandırmanın zayıf olduğu kapalı mekanlarda zamanla

birikebilir. Ürünleri arasında α -parçacığı bulunan radyoaktif elementler solunum ve sindirim yoluyla vücuda alındığında, akciğer ve mide dokularını yüksek dozda radyasyona maruz bırakabilir [2]. Yer altı madenleri ve özellikle uranyum madenleri çok yüksek düzeylerde radon gazı ihtiva eder [3]. Radon gazına maruz kalan madenciler üzerine yapılmış çalışmalar radon ve akciğer kanseri arasındaki ilişkiye dikkat çekmiş ve araştırmalar sonucu radon gazının A sınıfı bir kanserojen olduğu ortaya konmuştur [4]. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi, ICRP'nin 2010 yılında yayınladığı 115 nolu raporda, akciğer kanseri ve radon arasındaki ilişki üzerine yapılmış epidemiyolojik çalışmalar analiz edilerek radon ve bozunma ürünlerinin akciğer kanserine neden olduğu kanıtlanmıştır [5]. Sağlık üzerine olumsuz etkileri nedeniyle, dünya genelinde, madenler haricindeki iş yerlerinde de yoğun olarak radon ölçümleri yürütölmektedir. Bu alışmalar, yer altındaki (metro istasyonları, tüneller, mağaralar, sağlık amaçlı termaller, radon hormesisi için kullanılan spalar ve ziyarete açık olan eski madenler v.b.) ve toprak seviyesinin üstündeki (kamu binaları, okullar, fabrikalar, dükkanlar, ofisler v.b.) iş yerlerini kapsamaktadır. Yer altındaki iş yerleri (mağaralar ve terk edilmiş madenlerdekine benzer mekanizmalar nedeniyle) yüksek seviyelerde radon birikiminin meydana gelebileceği yerlerdir. Birçok ölkedeki farklı tipteki iş yerlerinde yüksek radon seviyeleri tespit edilmiştir. İrlanda'daki turizme açık mağaralarda yapılan bir çalışmada, atmosferik radon düzeylerinin 260 Bq/m^3 ile $19,06 \text{ kBq/m}^3$ arasında değiştiği belirlenmiştir [6]. Macaristan'daki turist mağaralarında yapılan ölçümlerde ise $21,1 \text{ kBq/m}^3$ değerine varan radon seviyeleri gözlemlenmiştir [7]. ek Cumhuriyeti'nde tünellerde yapılan radon ölçümleri, $229\text{-}3.312 \text{ Bq/m}^3$ aralığında bulunmuştur [8]. Finlandiya'daki yer altı demir yollarında yapılan radon ölçümlerinde; istasyonlar için $45\text{-}200 \text{ Bq/m}^3$ arasında konsantrasyonlara rastlanırken ofislerdeki seviyenin $20\text{-}790 \text{ Bq/m}^3$ aralığında olduğu rapor edilmiştir [9]. ABD'de devlet binalarının incelendiği bir çalışmada, alınan 3.901 ölçümün % 22 sinin 150 Bq/m^3 değerinden ve % 0,2 sinin ise 1.000 Bq/m^3 den daha yüksek olduğu bildirilmiştir [10]. İrlanda okullarındaki radon düzeylerinin değerlendirildiği kapsamlı bir araştırmada, 3.444 okulun zemin katlarında, sınıflarında ve ofislerinde yapılan uzun dönem ölçümlerine göre, 898 okuldaki radon seviyesinin 200 Bq/m^3 ün üzerinde olduğu ve 307 okuldaki düzeyin ise limit kabul edilen 400 Bq/m^3 ü aştığı rapor edilmiştir [11]. Norveç'te, ana okullarda gerçekleştirilen radon ölçümlerinin toplu olarak incelendiği bir çalışmada, 5 Bq/m^3 ile 2.800 Bq/m^3 arasında değişen konsantrasyonlar tespit edilmiştir [12]. Finlandiya'daki çeşitli iş yerlerinin birlikte değerlendirildiği bir raporda, 3.050 ölçüm ortalamasının 255 Bq/m^3 olduğu ve ölçümlerin % 37 sinin 300 Bq/m^3 değerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yine aynı raporda, 993 veriyi baz alan diğer bir araştırmada ölçümlerin % 12 sinin 300 Bq/m^3 ün üzerinde olduğu bildirilmektedir [13]. Birleşik Krallık Ulusal Radyolojik Korunma Kurulu, NRPB (National Radiological Protection Board) evler için 200 Bq/m^3 ve iş yerleri için 400 Bq/m^3 limitini öngörmektedir [14]. NRPB, radon ölçümlerinin %1'inin limit düzeyini aştığı yerleri, radondan etkilenmiş alan (radon affected area) olarak değerlendirmektedir [15]. Birleşik Krallık'ta 6.000 iş yerindeki radon ölçümlerinin ele alındığı bir çalışmada, radondan etkilenmiş alanlar incelenmiş ve bölgelere göre % 5 ile %21 arasında değişen oranlarda limit seviyesini aşan ölçümler rapor edilmiştir [14].

Ölkemizde ise, iş yerlerinde radon konsantrasyonu ölçümleri üzerine yapılan çalışmalar son zamanlarda popölerlik kazanmıştır. Bu araştırmaların çoğunu, madenlerdeki [16-20] ve termal kaplıcalardaki [21-23] çalışmalar oluşturmaktadır. Mağaralardaki [24-27] ve

okullardaki (veya kamu binalarındaki) [28-31] çalışmalar ise daha azdır. Fabrika ve dükkanların yer aldığı diğer iş yerlerindeki çalışmalar ise çok daha kısıtlıdır [32].

Ülkeler ve çeşitli uluslararası organizasyonlar, (bina içindeki radon kaynaklı radyasyon dozunun neden olabileceği sağlık risklerini azaltmak amacıyla) kapalı mekanlardaki radon düzeyleri için limit değerleri belirlemişlerdir. Kimi kuruluş veya ülkeler tek bir üst limit değerini tavsiye ederken, bazıları da tavsiye edilen limit seviyesi ile birlikte müdahale üst limitini benimsemişlerdir. Ülkemizde, radyasyon güvenliği konusunda yasa ile yetkilendirilen TAEK ve dünya genelinde kabul gören bazı organizasyonların tavsiye ettikleri radon limitleri Tablo 1’de özetlenmektedir. Limit seviyesinin aşıldığı durumlarda, radon yoğunluğunu düşürücü önlemler alınmalıdır.

Tablo 1. Çeşitli organizasyonlar tarafından belirlenmiş bina içi atmosferik radon düzeyi limitleri (Tabloda günümüze dek kullanılmış ve hala kullanılan limitler ile bu limitasyonlardaki son değişiklikler, Bq/m³ cinsinden birlikte sunulmaktadır)

Organizasyon	Önceki veya mevcut limitler (Bq/m ³)		Referans	Tavsiye edilen yeni limitler (Bq/m ³)		Referans
	ev	iş yeri		ev	iş yeri	
ICRP	200-600	500-1.500	[33]	≤300	≤1.000	[37]
WHO	250		[34]	100		[4]
EU	≤400	≤1.000	[35]	≤300	≤1.000	[38]
TAEK	≤400	≤1.000	[36]			

Isparta il merkezinde bulunan meskenlerdeki radon seviyesinin Türkiye ortalamasının üzerinde olduğu bilinmektedir [39-41]. Kamu binaları haricindeki iş yerlerinde yapılan ilk kapsamlı radon ölçümlerinin sunulduğu bu çalışmanın izleyen bölümünde çalışma alanı ve kullanılan yöntem tanıtılmaktadır. Daha sonra, elde edilen bulgular tartışılarak değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Ölçüm alanı

Batı Akdeniz Bölgesi’nde 8.933 km²’lik bir alan üzerinde kurulu olan Isparta, 37° 18’ ve 38° 30’ kuzey enlemleri ile 30° 20’ ve 31° 33’ doğu boylamları arasında yer almaktadır [42]. İldeki ortalama sıcaklık 12 °C civarındadır [43]. Isparta ili 2013 yılı adrese dayalı nüfus kayıt sistemi verilerine göre; 208.146’sı erkek, 209.628’i kadın olmak üzere toplam 417.774 nüfuslu bir ilimizdir. Merkez ilçe nüfusu ise 223.557 kişiden oluşmaktadır [44]. Şehrin kurulu olduğu Isparta ovasındaki jeolojik birimler, otokton ve allokton olmak üzere iki grupta toplanmıştır [45,46]. İl merkezine ait jeolojik birim ise; kil, silt, kum ve çakıllardan oluşan alüvyondur. Bu alüvyon birimde bulunan travertenin kökenlerinin tüfit, pomza, tuf ve volkanik kayalardan oluştuğu bildirilmektedir [45]. Ayrıca, Gölcük volkanitlerine ait andazit birim, çalışma sahasını da içerisine alan geniş bir bölgeye yayılmış durumdadır [47]. Ölçümlerin yapıldığı merkez ilçedeki mahallelere ait harita Şekil 1’de gösterilmektedir. Atmosferik radon ölçümleri için şehir merkezinde belirlenen 30 iş yerinin koordinatları buldukları mahalle bilgileriyle birlikte Tablo 2’de verilmektedir.



Şekil 1. Isparta il merkezinde bulunan 43 mahallenin konumları

Tablo 2. Ölçüm yapılan iş yerlerine ait konum bilgileri (iş yerlerinin koordinatları GPS ile alınmıştır)

Ö.N.	Mahalle	Konum bilgileri		Ö.N.	Mahalle	Konum bilgileri	
		Enlem	Boylam			Enlem	Boylam
1	Anadolu 1	37° 47' 06,33"	30° 33' 13,28"	16	M. Töngce 2	37° 49' 21,99"	30° 30' 38,44"
2	Anadolu 2	37° 47' 04,78"	30° 33' 11,70"	17	Hızırbey 1	37° 45' 38,62"	30° 32' 47,23"
3	Halıkent 1	37° 45' 05,42"	30° 34' 22,56"	18	Hızırbey 2	37° 45' 36,36"	30° 32' 50,51"
4	Halıkent 2	37° 44' 58,69"	30° 34' 49,10"	19	M. Türkeş 1	37° 46' 19,41"	30° 31' 51,76"
5	Binbirevler 1	37° 45' 52,84"	30° 30' 46,35"	20	M. Türkeş 2	37° 46' 26,57"	30° 31' 39,39"
6	Binbirevler 2	37° 45' 51,82"	30° 30' 46,26"	21	Sanayi 1	37° 47' 11,40"	30° 33' 49,09"
7	Davraz 1	37° 46' 14,32"	30° 34' 13,02"	22	Sanayi 2	37° 47' 08,57"	30° 33' 50,07"
8	Davraz 2	37° 46' 07,08"	30° 34' 18,30"	23	Yedişehitler 1	37° 46' 26,55"	30° 32' 21,12"
9	Dere 1	37° 45' 12,32"	30° 32' 13,06"	24	Yedişehitler 2	37° 46' 23,72"	30° 32' 18,03"
10	Dere 2	37° 44' 53,57"	30° 31' 46,86"	25	Yayla 1	37° 45' 44,76"	30° 32' 56,86"
11	Emre 1	37° 45' 11,30"	30° 33' 08,43"	26	Yayla 2	37° 45' 45,06"	30° 32' 57,12"
12	Emre 2	37° 45' 11,65"	30° 33' 09,22"	27	Gülevler 1	37° 45' 34,64"	30° 34' 06,18"
13	Fatih 1	37° 47' 09,71"	30° 32' 06,65"	28	Gülevler 2	37° 45' 37,25"	30° 34' 13,59"
14	Fatih 2	37° 47' 08,46"	30° 32' 09,69"	29	Çünür 1	37° 49' 17,69"	30° 31' 55,51"
15	M. Töngce 1	37° 49' 21,67"	30° 30' 38,79"	30	Çünür 2	37° 49' 08,38"	30° 32' 04,58"

Ö.N.: Ölçüm noktası

2.2 Ölçümde kullanılan sistem

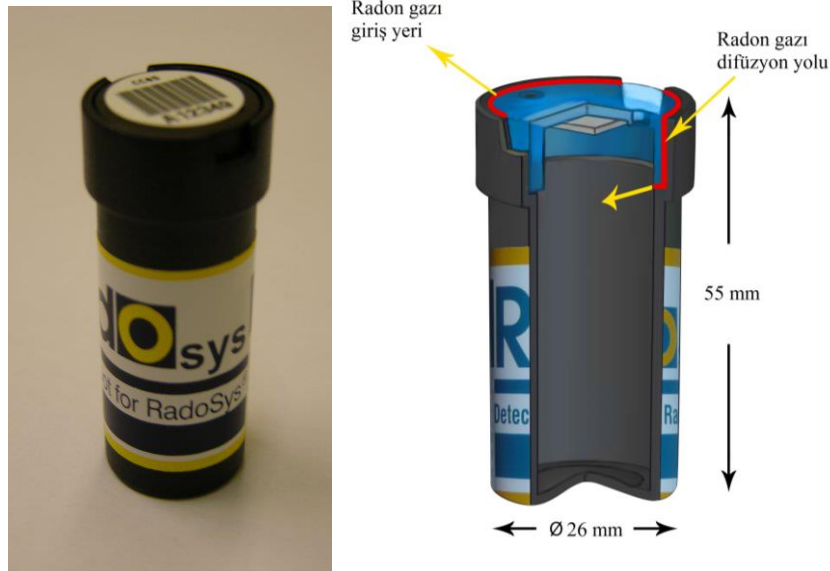
Bina içi radon seviyeleri, aktif veya pasif ölçüm teknikleri kullanılarak anlık olarak yahut belli bir zaman süresince yapılabilir [48]. Bu çalışmada, iş yerlerindeki radon

yoğunluğunu belirlemek için Radosys firmasınca üretilen ve CR-39 olarak bilinen (poli alil diglikol karbonat) pasif katı-hal nükleer iz dedektörleri kullanılmıştır [49,50].

Tercih edilen pasif ölçüm yöntemi, aktif ölçüm tekniğine göre pek çok avantaja sahiptir [51] ve uzun zamanlı ölçümler için daha uygundur. Temel olarak ölçme işlemi, radonun bozunması sırasında ortaya çıkan enerjik alfa parçacıklarının plastik plakalardan yapılmış nükleer iz dedektörü üzerinde bıraktığı izlerin belirginleştirilmesi ve sayılması esasına dayanmaktadır.

Ölçümlerde kullanılan dedektörler, 26 mm çapında ve 55 mm yüksekliğindeki bir difüzyon kabı ve bu kabın kapağının içine yerleştirilmiş RSKS tipi bir CR-39 dedektöründen oluşmaktadır (Şekil 2). Difüzyon kabının kapağı, sadece ölçüm yapılan ortamdaki radon gazının kap içerisine girişine izin veren ve radon bozunma ürünlerini filtreleyen bir şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2’de radon gazının difüzyon kabı içerisine giriş mekanizması gösterilmektedir. Tablo 3’de ise CR-39 dedektörlerinin genel özellikleri verilmektedir.

CR-39 dedektörlerinin bulunduğu difüzyon kapları, sızdırmaz alüminyum folyolu paketlerinden çıkarılarak ölçüm noktalarına takılır. Bu ölçüm noktaları, mümkün olduğunca solunum seviyesinde seçilmelidir. Belirli bir ölçüm süresi boyunca (uzun dönem ölçümler için genellikle 20 ile 60 gün arasında bir süre uygundur) dedektör plakası üzerinde oluşan alfa izlerinin sayısı, ortamdaki radon düzeyi ile orantılıdır. Tablo 2’de konum bilgileri verilen 30 iş yerine yerleştirilen dedektörler, 20.01.2010 ile 05.03.2010 tarihleri arasında bu ortamlardaki radon düzeylerini kayıt etmiştir.



Şekil 2. CR-39 dedektörünün bulunduğu difüzyon kabının görünüşü, boyutları ve radon gazının giriş mekanizması

Tablo 3. CR-39 dedektörlerinin teknik özellikleri [49,50]

Özellik	Açıklama
Uygulama alanı	Bina içi radon testi
İşyerlerinde kullanım notu	Çalışma saati kontrolü bulunmamaktadır.
Laboratuvar pratiği	Rutin analiz (Laboratuvar akreditasyonu/onayını karşılamak için gerekli)

Tipik radona maruz kalma süresi	özelliklere sahiptir) uzun-dönem ölçümler için 3 ay (6 aya kadar uzatılabilir) kısa-dönem ölçümler için 20gün (kısa dönem ölçümlerinde oluşabilecek belirsizlikleri dikkate almak kaydıyla)
Genel olarak RSFS radon dedektörleri ile yapılan çalışmalardaki belirsizlik	150- 2.000 kBq.h.m ⁻³ lük aralık için ±%15
CR-39 difüzyon kabı	Hava boşluğu filtresi, sıkışmaya karşı dayanıklı, ekstra darbe korumalı
Elektrostatik koruma	Difüzyon kabı iletken plastikten yapılmıştır
PADC/CR-39 plastiğinin boyutu	100 mm ²
Tipik denge zamanı	3 saat
Tipik hassasiyet	2 iz.cm ² .kBq ⁻¹ .h ⁻¹ .m ³
Tipik başlangıç fon seviyesi	0,3 iz.mm ⁻²
Doygunluk (satürasyon) limiti	>12.000 kBq.h.m ⁻³ (RSFV alt grubu için 100.000 kBq.h.m ⁻³)

43 günlük ölçüm süresi sonunda eş zamanlı olacak şekilde toplanan dedektörler, ölçüm haricinde radon girişinin engellenmesi için tekrar alüminyum folyolar içerisine konularak mühürlenmiştir. CR-39 dedektörlerinin kayıt ettiği alfa izlerinin işlenmesi ve sayımı, Ankara Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (SANAEM) Sağlık Fiziği biriminde gerçekleştirilmiştir. İzlerin görünür hale getirilmesi için CR-39 dedektörleri, 4 saat süreyle 90°C sıcaklıktaki %25'lik NaOH bazik çözeltide kimyasal iz kazıma işlemiyle banyo edilmiştir. Sayım işlemi için hazırlanan CR-39 plakaları, 100× büyütme bir kameraya sahip olan RadoMeter görüntü işleme ünitesine yerleştirilerek otomatik olarak taranmıştır. Görüntünün dijital hale çevrilmesinden sonra plakalar üzerindeki iz yoğunlukları, Linux tabanlı Radometer 2000 yazılımı sayesinde analiz edilmiştir. Otomatik sayım işlemi üst üste geçmiş izler için 150 iz/mm²'ye kadar hassaslıkta okunma yapılabilmektedir. Görüntü işleme seti hakkındaki teknik özelliklere, Radosys firmasının web sayfasından [50] ve kullanım kılavuzundan [49] ulaşılabilir.

Elde edilen alfa iz yoğunluklarından hareketle, ölçüm noktasındaki atmosferik radon düzeyi,

$$K_{Rn} = \frac{d \times kf \times 1000}{t} \quad (1)$$

bağıntısı kullanılarak Bq/m³ cinsinden belirlenebilmektedir (Tablo 4). Eşitlik 1'de, d , CR-39 plakası üzerindeki alfa iz yoğunluğunu, t ise saat cinsinden dedektörün radona maruz kaldığı süreyi temsil etmektedir. SANAEM Sağlık Fiziği birimince belirlenen kalibrasyon faktörünün değeri $kf=42,95$ (kBq/m³)/(iz/saat) dir.

Tablo 4. Ölçüm noktalarındaki (Tablo 2) iş yerlerine ait bilgiler, radon ölçüm sonuçları ve maruz kalınan yıllık dozlar (Ölçüm yapılan iş yerlerinin tümü zemin katta bulunmaktadır. CR-39'lar solunum seviyesinde konumlandırılmıştır. Yıllık etkin doz eşdeğerleri, iş yerlerinde günlük olarak 8, 10 ve 12 saat çalışıldığı varsayılarak hesaplanmıştır)

Ölçüm Noktası	Yapım Yılı	Isıtma Sistemi	Kullanım Alanı (m ²)	K_{Rn} (Bq/m ³)	8 saat için YEDE (mS/yıl)	10 saat için YEDE (mS/yıl)	12 saat için YEDE (mS/yıl)
1	1999	Klima	500	128	1,34	1,68	2,02
2	1983	Kalorifer	100	101	1,06	1,33	1,59
3	2005	Soba	36	121	1,27	1,59	1,91
4	1997	Kalorifer	100	251	2,64	3,30	3,96
5	1990	Klima	30	157	1,65	2,06	2,48
6	1990	Klima	60	88	0,92	1,16	1,39
7	2003	Kalorifer	15	61	0,64	0,80	0,96
8	1995	Klima	35	124	1,30	1,63	1,96
9	2000	Kalorifer	20	258	2,71	3,39	4,07
10	1990	Kalorifer	5	168	1,76	2,21	2,65
11	1994	Soba	15	118	1,24	1,55	1,86
12	1923	Soba	9	189	1,98	2,49	2,98
13	1995	Soba	30	414	4,35	5,44	6,53
14	2007	Doğal Gaz	13	82	0,86	1,08	1,29
15	1992	Soba	23,5	76	0,80	1,00	1,20
16	1992	Soba	12	109	1,14	1,43	1,72
17	1995	Klima	35	56	0,59	0,74	0,88
18	2005	Kalorifer	60	87	0,91	1,14	1,37
19	1985	Soba	20	135	1,42	1,78	2,13
20	2005	Soba	80	130	1,37	1,71	2,05
21	2000	Klima	30	174	1,83	2,29	2,74
22	1995	Kalorifer	300	386	4,05	5,08	6,09
23	1990	Soba	40	70	0,74	0,92	1,10
24	2007	Kalorifer	110	63	0,66	0,83	0,99
25	1985	Kalorifer	35	136	1,43	1,79	2,14
26	1985	Kalorifer	15	88	0,92	1,16	1,39
27	1980	Kalorifer	25	245	2,57	3,22	3,86
28	1996	Elekt. Soba	85	97	1,02	1,28	1,53
29	2007	Soba	35	77	0,81	1,01	1,21
30	1990	Klima	50	kayıp	-	-	-
YEDE ortalamaları					1,52	1,90	2,28

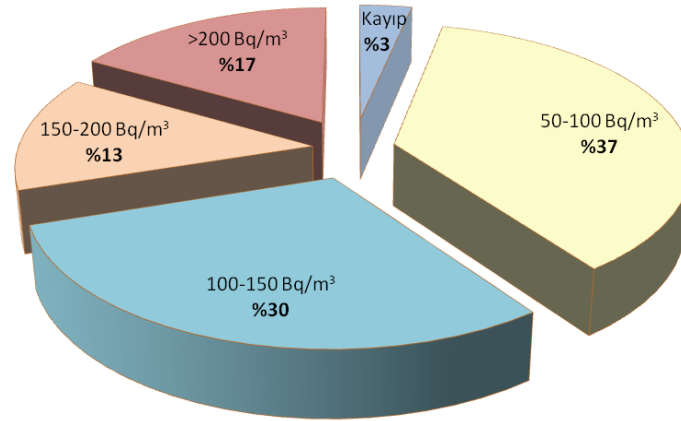
Ölçüm yapılan iş yerlerinde çalışanların radon nedeniyle maruz kalacakları radyasyon dozları, mekanın günün hangi saatinde, yılın hangi mevsiminde, nasıl ve ne kadar süreyle kullandığına bağlı olarak değişebilmektedir [15]. Bununla birlikte, radon ve radonun bozunma ürünlerinden dolayı alınacak yıllık etkin doz eşdeğeri (YEDE), bu mekanlar için tespit edilen atmosferik radon konsantrasyonlarının UNSCEAR raporlarında [52] verilen modelde kullanılmasıyla tahmin edilebilir;

$$YEDE = K_{Rn} \times F \times EEC \times BMF \times 8760 \quad (\text{saat / yıl}). \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki K_{Rn} , Bq/m^3 cinsinden ölçülen radon konsantrasyonunu, F ise radon ile bozunma ürünleri arasındaki denge faktörünü göstermektedir ve bina içi ölçümler için genellikle 0,4 olarak alınır [53]. EEC faktörü (denge eşdeğer konsantrasyonu çarpanı) $9,0 \times 10^{-9}$ (Sv/saat)/(Bq/m³) değerindedir [52] ve BMF (bina içi meşguliyet faktörü) mekanın kullanılma miktarının bir ölçüsüdür. Tablo 4'te, ölçümler sonucu elde edilen radon düzeyleri ile bu mekanları kullananların bir yılda maruz kalacakları dozlara ait tahmini hesaplama sonuçları birlikte verilmektedir.

3. Bulgular

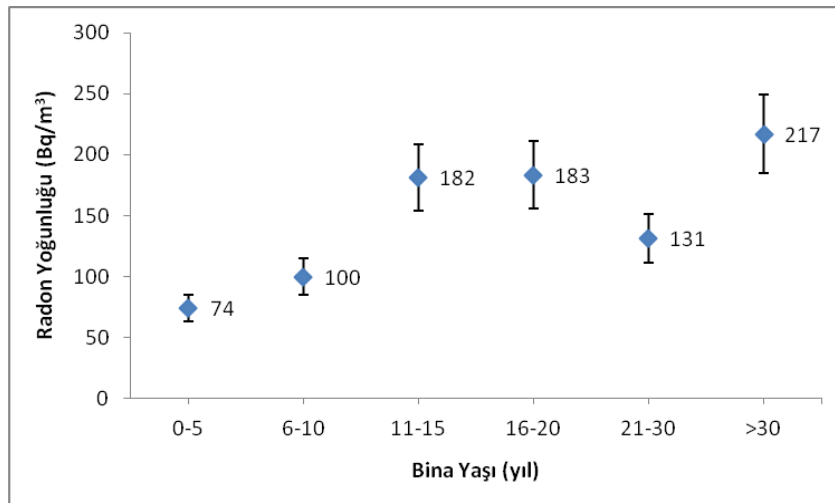
Isparta il merkezindeki 30 iş yerinde, 2010 yılı kış mevsiminde yaklaşık 6 hafta boyunca radona maruz bırakılan CR-39 dedektörleriyle atmosferik radon konsantrasyonlarının ölçüldüğü bu çalışmada, iş yerlerindeki radon düzeylerinin 56 Bq/m³ ile 414 Bq/m³ arasında değiştiği saptanmıştır (Tablo 4). Ölçümlerin %17 sinin 200 Bq/m³ değerinin üstünde olması (Şekil 3) ilgi çekicidir.



Şekil 3. Radon ölçümlerinin yüzde dağılımı

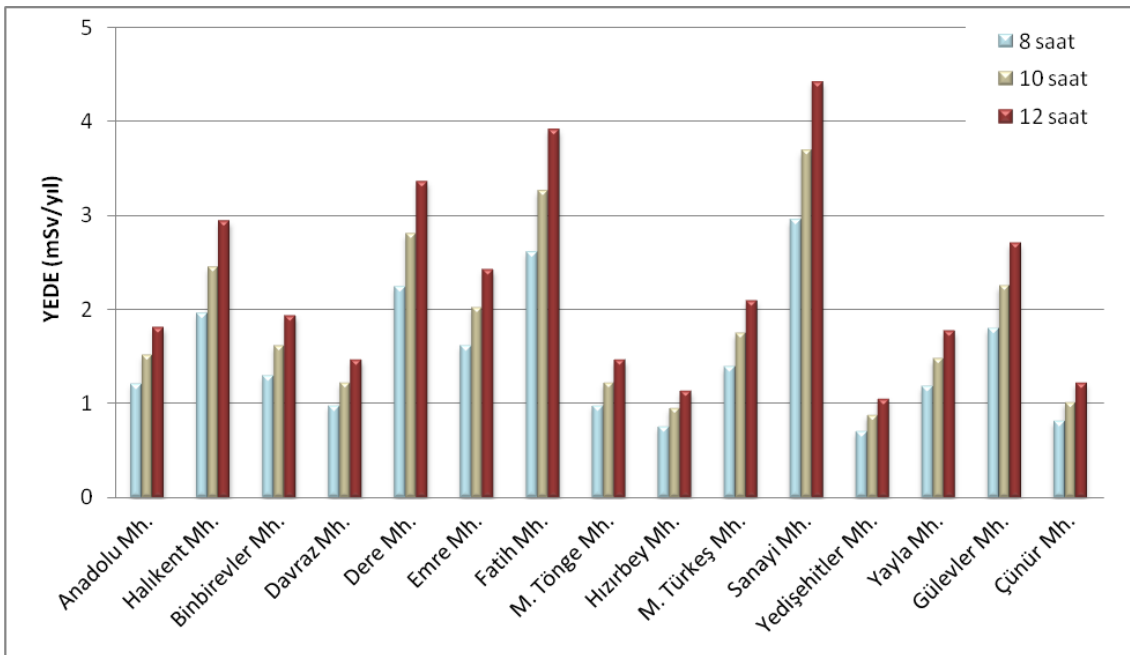
İş yerlerinde radon gazının yoğunluğu, jeolojik yapıya bağlı olarak bina altında bulunan toprağın içerdiği uranyum miktarıyla ilişkilidir. Yüksek seviyede radon yoğunluğu bulunan binalarda radon gazının bina içine başlıca giriş mekanizması, temel altındaki toprak ile bina arasındaki sıcaklık ve basınç farklılıkları nedeniyle oluşan ve zemindeki çatlaklar ile boşluklardan bina içine gerçekleşen gaz akışı biçimindedir. Bunun yanı sıra, kapalı mekanlardaki radon konsantrasyonlarını etkileyen başka mekanizmalar da söz konusu olabilir. Binalardaki havalandırma koşullarının ortamdaki radon yoğunluğu üzerinde etkili olduğu bilinmektedir [39]. Bina yapımında kullanılan malzemelerinin çoğu da radon üretmektedir. Özellikle (alüminli şist kullanılarak yapılan hafif betonlarda olduğu gibi) belli bazı malzemeler, bina içi radonun ana kaynağı gibi etkili olabilmektedir. Ayrıca belli bir değerden (200 Bq/m³'den) daha yüksek seviyede radon içeren kapalı mekanlarda radonun günlük olarak değiştiği ve genellikle geceleri gündüzden daha yüksek olduğu ayrıca kış mevsiminde yaz mevsimine göre daha fazla radon yoğunluğu gözlemlendiği de bildirilmektedir [15].

Çalışmamızda incelenen iş yerlerinin tümü betonarme yapıda olmakla birlikte, bu mekanların yapım yılları, ısıtma sistemleri, havalandırma koşulları ve en önemlisi de iş yerlerinin altındaki toprağın yapısı ve özellikleri birbirinden farklılıklar göstermektedir. Tablo 4’de ölçüm yapılan iş yerlerinin kullanım alanları, ısıtma sistemleri ve yapım yılı bilgileri özetlenmiştir. Isparta’daki iş yerlerinde havalandırma genellikle, doğal yollardan sağlanmaktadır. İş yerlerindeki kapı ve pencerelere ait doğramaların özellikleri hakkındaki bilgiler (ahşap, PVC, tek cam, çift cam vb) alınmış fakat bu bilgilerin birbiri ile kıyaslanmasında sağlıklı bir ölçeklendirme yapılması mümkün olmadığı için burada verilmemiştir. İş yerlerinde tercih edilen ısıtma sistemleri; doğalgaz, elektrikli soba, klima, kömür sobası ve kalorifer şeklindedir. Radon ölçümleri, ısıtma sistemlerinin aktif olduğu kış mevsiminde yapıldığından elde edilen radon yoğunlukları ile ısıtma sistemleri arasındaki ilişki karşılaştırılmıştır. Genel olarak, kömürün kullanıldığı soba ve kalorifer sistemine sahip iş yerlerindeki radon seviyelerinin diğer ısıtma sistemlerini kullanan iş yerlerine göre daha yüksek olduğu söylenebilir (Tablo 4). Ayrıca, bina yaşı ile radon yoğunluğu arasındaki ilişki Tablo 4’deki veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bina yaşı arttıkça radon seviyesinin yükseldiği gözlemlenmiştir (Şekil 4). Isparta il merkezi, Eğirdir ve Yalvaç ilçelerindeki evlerde daha önce yapılan ölçümlere göre, yeni binalardaki radon yoğunluğunun daha yüksek olduğu, bina yaşı arttıkça radon seviyesinin yavaşça azaldığı rapor edilmiştir [39]. Bu durum, yeni binaların eski binalara göre daha yüksek radyonükleid içeren betonların yapı malzemesi olarak kullanıldığı varsayımıyla açıklanmıştır [39]. Yeni binalar, yalıtım açısından eski yapılara göre daha üstün olduğu için yetersiz havalandırma durumlarında, yapı malzemelerinden kaynaklanan radonu bina içinde biriktirebilir. Ancak, evlerdeki ve iş yerlerindeki havalandırma koşulları birbiriyle aynı değildir. Bununla birlikte, iki çalışma için seçilen ölçüm noktalarının farklı oluşu ve incelenen iş yerlerinin tamamının zemin katta bulunmasına rağmen meskenler için farklı katlarda ölçüm yapılmış olması da çalışmaların sonuçlarını etkilemiş olabilir. İş yerleri açısından genel bir değerlendirme yapıldığında, binalardaki yaş faktörüne bağlı olarak yapısal kusurların artması nedeniyle radonun bina içine daha kolay sızdığı ve radonun eski yapılarda daha fazla birikme eğilimi gösterdiği söylenebilir (Şekil 4).



Şekil 4. Bina yaşına göre radon yoğunluklarının dağılımı

Son olarak, ölçüm yapılan iş yerlerinde çalışanların radon nedeniyle maruz kalabilecekleri yıllık dozlar, Eşitlik 2 ile verilen bağıntıyla, farklı çalışma saatleri için hesaplanmıştır (Tablo 4). Elde edilen sonuçlar, ICRP'nin iş yerleri için öngördüğü 1-20 mSv bandı içerisinde kalmakla beraber, şehir merkezindeki iş yerlerinde çalışanlar ile (uranyum madenlerinde çalışan işçiler de dahil olmak üzere) maden işçilerini de içine alan bir değerlendirmenin ne derece uygun olacağı ayrı bir tartışma konusudur. Tablo 4'deki yıllık dozlara ait hesaplamalar, mahalleler bazında değerlendirilerek bu muhitlerde bulunan iş yerlerinde maruz kalınabilecek yıllık etkin doz eşdeğerleri üzerine (günde 8, 10 ve 12 saatlik çalışma senaryolarına göre) tahmini bir yaklaşımda bulunulmuştur (Şekil 5). İl merkezindeki iş yerlerinde çalışanların radon nedeniyle karşı karşıya oldukları risk, farklı bir bakış açısıyla sonuç bölümünde değerlendirilmektedir.



Şekil 5. İş yerlerinin buldukları mahallelerdeki ortalama radon düzeylerine göre alınacak yıllık etkin doz eşdeğerleri

4. Sonuç ve Yorum

İnsanlar, kapalı mekanlardaki yüksek radon yoğunlukları nedeniyle, akciğer kanseri başta olmak üzere çeşitli sağlık riskleriyle karşı karşıya kalabilir. Ülkemizde erkek ve kadınlarda görülen kanser vakaları arasında, akciğer kanserinden kaynaklanan ölümler en üst sıralarda yer almaktadır. Bu nedenle Türkiye'de yüksek radon yoğunluğu gözlenen illerden birisi olan Isparta'da bina içi atmosferik radon seviyelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir.

İl merkezinde bulunan 30 iş yerinde, CR-39 dedektörleriyle gerçekleştirilen bu çalışmada, ortalama radon seviyesinin 144 Bq/m^3 olduğu bulunmuştur. Bu değer, Isparta için daha önce yapılmış az sayıdaki radyolojik ölçümle uyumlu olup dünya ve ülkemiz için bildirilen bina içi ortalama radon düzeylerinin üzerindedir. Yaklaşık her 6 iş yerinin 1 tanesinde, 200 Bq/m^3 değerinden daha yüksek radon yoğunluğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 144 Bq/m^3 lük bu ortalama, TAEK'in iş yerleri için kabul

ettiği 1.000 Bq/m³ limitinin altındadır. Betonarme tarzda inşa edilmiş iş yerlerinin havalandırma sistemleri ve pencere doğramaları birbirinden farklılıklar göstermekle beraber, genel olarak değerlendirildiğinde, radon yoğunluğunun bina yaşına bağlı olarak artma eğiliminde olduğu bulunmuştur. İş yerlerinde yapılan ölçüm sonuçları konumlarına göre değerlendirildiğinde; en yüksek radon seviyesine sahip iş yerlerinin Sanayi, Dere ve Fatih mahallelerinde olduğu, en düşük radon seviyelerine ise Hızırbey ve Yedişehitler mahallelerinde rastlandığı görülmektedir.

Çalışmamızda, radon ölçümlerinden hareketle mahalleler bazında iş yerlerinde maruz kalınacak yıllık etkin doz eşdeğerleri de hesaplanmıştır. TAEK, hızlandırıcılar ve nükleer santraller gibi yapay radyasyon üreten tesislerde, yılda 6 mSv değerinden daha fazla doza maruz kalabilme olasılığı bulunan radyasyon alanlarını “denetimli alanlar” olarak nitelemektedir. 13 ve 22 nolu ölçüm noktalarındaki iş yerlerinde, günde 12 saat çalışılmasıyla, radon kaynaklı alınacak yıllık dozun 6 mSv’lik bu değer üzerinde olması dikkat çekicidir. Bu çalışmanın limitleri dahilinde, bina içi meşguliyet faktörünün günde 8, 10 ve 12 saat üzerinden alınmasıyla yapılan tahminlere göre; il merkezi genelindeki iş yerlerinde çalışanların (radon nedeniyle) sırasıyla 1,5 mSv/y, 1,9 mSv/y ve 2,3 mSv/y düzeyindeki ortalama yıllık dozlara maruz kaldıkları söylenebilir.

Akciğer kanseri riskinin azaltılabilmesi bakımından yüksek radon seviyelerine sahip iş yerlerinde radon gazının zamanla birikimini engellemek ve yoğunluğunun düşürülmesi amacıyla, bu mekanların doğal yollardan veya uygun kapasiteli bir sistem ile düzenli bir biçimde havalandırılması, iş yeri zeminin şap veya beton dökülerek topraktan yalıtılması ve ayrıca duvarlarda bulunan çatlakların kapatılması tavsiye edilebilir.

Kaynaklar

- [1] Rahman S.U., Rafique M., Matiullah A.J., 2009. Radon measurement studies in workplace buildings of the Rawalpindi region and Islamabad capital area, Pakistan, *Building and Environment*, 45(2): 421-426.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA), 2004. Radiation, people and the environment, Austria, <https://www.iaea.org/sites/default/files/radiation0204.pdf> (Erişim Tarihi: 12.02.2015).
- [3] Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR), 1999. Health effects of exposure to radon, National Research Council, BEIR VI Report.
- [4] World Health Organization (WHO), 2009. Handbook on indoor radon. A public health perspective. (Eds.: By Zeeb H. & Shannoun F.), WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.
- [5] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon, Publication report 115.
- [6] Madden J. S., 1997. Personal monitoring of tour guides in Irish show caves, In: Proceedings of European Conference on Protection against Radon at Home and at Work, Part II, Prague, pp. 123-128.
- [7] Szerbin P., 1996. Radon and exposure levels in Hungarian caves, *Health Physics*, 71 (3): 362-369.
- [8] Sabol A., Berka Z., Vognar M., 1997. Study of radon concentration behaviour in tunnel complex under Vitkov hill in Prague, In: Proceedings of European Conference on Protection against Radon at Home and at Work, Part II, pp. 203-207.
- [9] Annanmaki M., Oksanen E., 1992. Radon in the Helsinki metro, *Radiation Protection Dosimetry*. 45: 1709-1781.
- [10] Geotech 1990. Results of the U.S. Department of Energy indoor radon study, Rep. US Department of Energy Grand Junction Projects Office, Grand Junction, DOE/ID/12584-75 Vol. 1 (CNG/GJ-TP-1).
- [11] Synnott H., Fennell S., Pollard D., Colgan P.A., Hanley O., O’Colmáin M., Maloney L., 2004. Radon in Irish primary and post-primary schools, the results of a national survey,

- https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_Radon_Schools_Report_2004.pdf (Erişim Tarihi: 22.02.2015).
- [12] Birovljev A., 1998. Radon concentrations in Norwegian kindergartens, Proceedings of the 2nd Yugoslav Nuclear Society International Conference, Belgrade, Vinca Institute of Nuclear Sciences, pp 629-634.
- [13] Radiation and Nuclear Safety Authority of Finland (STUK), 1998. Report on radon in above ground workplaces, Proceedings of the International Workshop, Radiation Protection at Workplaces with Increased Levels of Natural Radiation Exposure, Berlin.
- [14] Dixon D.W., Gooding T.D., 1996. Evaluation and significance of radon exposures in British workplace buildings, *Environment International*, 22 (1): 1079-1082.
- [15] Denman, A.R., Parkinson, S., Johnstone, M., Crockett, R.G.M., and Phillips, P.S., 2004. Radon in the workplace: implications of studies of post-remediation monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*, 111 (1): 51-54.
- [16] Fişne A., Ökten G., Çelebi N., 2004. Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) yeraltı maden ocaklarında radon gazı yayılımının incelenmesi, Türkiye 14 Kömür Kongresi, Zonguldak, Türkiye, Bildiri Kitabı, s 193-202.
- [17] Baldık R., Aytekin H., Çelebi N., Ataksor B., Taşdelen M., 2006. Radon concentration measurements in the Amasra coal mine, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 118 (1): 122-125.
- [18] Baldık R., Aytekin H., Çelebi N., 2009. Radon fluctuations in the Armutçuk coal mine, Turkey, *Fresenius Environmental Bulletin*, 18 (1): 87-91.
- [19] Yılmaz A., Kürkçüoğlu M. E., Haner B., 2009. Nükleer iz dedektörlerinin konularının radon konsantrasyonu ölçümleri üzerine etkisi, X. Ulusal Nükleer Bilimler ve Teknolojileri Kongresi, Muğla, Türkiye, Bildiri Kitabı, s 256-262.
- [20] Uzbey S., Tel E., Aytekin H., Albayrak N., 2013. Çorum ili yeraltı kömür ocaklarında radon yoğunluğu ölçümü, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3 (1): 1-5.
- [21] Durak S., 2010. Kütahya ili kaplıca sularında radon-radyum konsantrasyonlarının ve kaplıcalardaki kapalı ortam radon konsantrasyonunun belirlenmesi, Yüksek Lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 85s.
- [22] Kılıç N., 2011. Kükürtlü Kaplıcaları Atatürk Rehabilitasyon Merkezi'ndeki radon konsantrasyonunun belirlenmesi, Yüksek Lisans tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 94s.
- [23] Akkuş İ., 2014. Afyonkarahisar merkezdeki kaplıcalarda radon konsantrasyonu ve yıllık etkin doz oranlarının belirlenmesi, Yüksek Lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 83s.
- [24] Aytekin H., Baldık R., Çelebi N., Ataksor B., Taşdelen M., Kopuz G., 2006. Radon measurements in the caves of Zonguldak (Turkey), *Radiation Protection Dosimetry*, 118 (1): 117-121.
- [25] Haner B., Yılmaz A., Kürkçüoğlu M. E., Karadem A., 2010. Mencilis (Bulak) mağarasında radon seviyesi ölçümleri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14 (3): 218-224.
- [26] Karadem A., 2011. CR-39 dedektörleri ile mağaralarda radon konsantrasyonu ölçümleri, Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 97s.
- [27] Çevik U., Kara A., Çelik N., Karabıdık M., Çelik A., 2011. Radon survey and exposure assessment in Karaca and Çal caves, Turkey, *Water Air & Soil Pollution*, 214: 461-469.
- [28] Karakılıç V., Bayraktar G., Kürkçüoğlu M.E., Haner B., Yılmaz A., 2009. S.D.Ü. Bilgi Merkezi'nde radon ölçümleri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13 (3): 201-207.
- [29] Kürkçüoğlu M. E., Bayraktar G., 2012. Süleyman Demirel Üniversitesi'nde bina içi radon konsantrasyonlarının nükleer iz dedektörleri kullanılarak belirlenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (2): 167-183.
- [30] Çevik U., Çelik A., Çelik N., Özkalaycı F., Akbulut S., 2011. Assessment of radiological levels at schools in Trabzon, Turkey, *Indoor and Built Environment*, 22 (2): 376-383.
- [31] Atik S., Yetis H., Denizli H., Evrendilek F., 2013. How do different locations, floors and aspects influence indoor radon concentrations? An empirical study using neural networks for a university campus in northwestern Turkey, *Indoor and Built Environment*, 22 (4): 650-658.
- [32] Kapdan E., Altınsoy N., 2014. Indoor radon levels in workplaces of Adapazarı, north-western Turkey, *Journal of Earth System Science*, 123 (1): 213-217.
- [33] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1993. Annual report of the international commission on radiological protection, Report No:65.

- [34] World Health Organization/Regional Office for Europe, 2001. Air quality guidelines for Europe, 2nd edn. WHO Regional Publications, European Series No. 91.
- [35] European Commission (EC), 1990. Commission recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. Official European Journal of Communication, 90/143/Euratom, 26-28.
- [36] Resmi Gazete, 2004. (24.03.2000 tarihli ve 23999 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinin, 29 Eylül 2004 tarih ve 25598 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile değişik 37. maddesi).
- [37] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2014. Radiological Protection against Radon Exposure, ICRP Publication 126 Annual, 43 (3).
- [38] European Commission (EC), 2011. Laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, Brussels, 593.
- [39] Uluğ A., Karabulut M. T., Çelebi N. 2004. Radon measurement with CR-39 track detectors at specific locations in Turkey, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 19 (1): 46-49.
- [40] Akyıldırım H., 2005. Isparta ilinde radon yoğunluğunun ölçülmesi ve haritalandırılması, Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 53s.
- [41] Kürkçüoğlu M. E., Tozun F., Cof G., Karakılıç V., 2014. Isparta meskenlerinde yaz dönemi atmosferik radon yoğunluğu ölçümleri, ADIM Fizik Günleri-III, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, Bildiri Özetleri Kitabı, 117.
- [42] Akten M., 2008. Isparta ovasının optimal alan kullanım planlaması üzerine bir araştırma, Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 260s.
- [43] <http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISPARTA> (Erişim Tarihi: 25/02/2015).
- [44] www.tuik.gov.tr/IcerikGetir.do?istab_id=139 (Erişim Tarihi: 22/01/2015).
- [45] Irlayıcı A., 1993. Isparta ovası hidrojeolojisi ve yer altı suları ile ilgili çevre sorunları. Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 93s.
- [46] Demer S., 2008. Isparta ve yakın çevresi yer altı sularının hidrojeolojik hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal incelenmesi ve içme suyu kalitesinin izlenmesi. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 182s.
- [47] Kalyoncuoğlu Ü. Y., Anadolu N. C., Baykul A., Erek Y., 2010. Isparta şehir merkezi yüzey toprağındaki radyoaktivite düzeyi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14 (1): 111-119.
- [48] Papastefanou C., 2002. An overview of instrumentation for measuring radon in soil gas and groundwaters, *Journal of Environmental Radioactivity*, 63: 271-283.
- [49] Radosys 2008. User's Manual (Revised at 3/16/2008).
- [50] <http://www.radosys.com/> (Erişim Tarihi: 05/03/2015).
- [51] Kürkçüoğlu I., Karakılıç V., Kürkçüoğlu M. E., 2010. Isparta ilinde yüksek florlu su kaynaklarını kullanan iki bölgede atmosferik radon düzeylerinin incelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2 (1): 49-61.
- [52] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 1993. Effects and risks of ionizing radiations, New York, UNSCEAR 1993 Report.
- [53] Değerlier M., Çelebi N., 2008. Indoor radon concentrations in Adana, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 131(2): 259-264.

Fatih Tozun e-posta: fatihtozun@gmail.com