

LR 115 TİP 2 DEDEKTÖRLERİNDEKİ İZ YOĞUNLUKLARININ FARKLI MİKROSKOP LENSLERİ İLE BELİRLENMESİ

Mutlu İÇHEDEF*¹

Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, 35100, Bornova-İzmir

Özet

LR 115 Katihal nükleer iz kazıma dedektörleri çevresel radon ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan radyasyon dedektörleridir. Bu dedektörler ile gerçekleştirilen radon ölçümlerinde dedektör üzerinde birim alanda oluşan iz sayısı (iz yoğunluğu) optik mikroskop kullanılarak belirlenir. Kullanılan mikroskopların lens özellikleri çalışmadan çalışmaya değişmektedir. Bu çalışmada dedektörlerdeki iz yoğunlukları üç farklı büyütmeye sahip lens (40x, 100x ve 400x) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda kullanılan objektif lens büyüklüğü arttırıldıkça hesaplanan iz yoğunluklarının da arttığı tespit edilmiştir. Kalibrasyon işlemi ile bu farklılık ortadan kalkmaktadır. Bu çalışma kalibrasyon işleminin önemini bir kere daha ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: LR 115, Radon, İz yoğunluğu, Mikroskop

DETERMINATION of TRACK DENSITIES on LR 115 TYPE DETECTORS WITH DIFFERENT MICROSCOPE LENS

Abstract

LR 115 Type 2 solid state nuclear track detectors (SSNTDs) are detectors which are widely used for environmental radon measurements. Radon measurements are performed by using these detectors are generally presented as track $\text{cm}^{-2} \text{day}^{-1}$ (track density) and track densities are determined under optic microscopes. Microscopes used in this type studies have several different type of lens. In this study, track densities on the detectors are studied by using three different microscope lens (40x, 100x and 400x) and obtained results are compared. As a result of calculations it was found that track densities are increased with microscope objective lens rising. The divergent can be eliminate by calibration. This study once again emphasized the importance of calibration.

Keywords: LR 115, Radon, Track density, Microscope

*¹Mutlu İÇHEDEF, icedef@yahoo.com

GİRİŞ

Radyasyon hayatımızda önemli bir yer tutmaktadır ve bu radyasyonun büyük bir kısmını doğal radyasyon teşkil etmektedir. Doğal radyasyon ya da doğal radyoaktiviteyi radyoaktif bozunum serilerinin üyeleri oluşturmaktadırlar. Radon uranyum bozunum serisinde yer alır, radyumun bozunumuyla oluşur ve doğada yaygın olarak bulunur. Yarı ömrü 3,82 gün olan radon alfa bozunumu yaparak bozunum ürünleri olan polonyum ve kurşunu oluşturur. Katıhal nükleer iz kazıma dedektörleri radon ve radon bozunum ürünlerinin konsantrasyonlarının ölçümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. ^{222}Rn 'un radyoaktif bozunumundan yayınlanan alfa parçacığı dedektöre çarptığında dedektör yüzeyinde gizli bir iz oluşur. Bu izler kimyasal iz kazıma işlemi uygulanarak optik mikroskop altında görünür hale getirilir [1, 2, 3]. Kimyasal iz kazıma işlemi sonrasında dedektör yüzeyindeki birim alandaki iz yoğunluğu mikroskop altında sayılarak bulunur. Bu sayım işlemi elle ya da otomatik olarak yapılır. Belirlenen iz yoğunluğu dolaylı olarak radon konsantrasyonu ile orantılıdır.

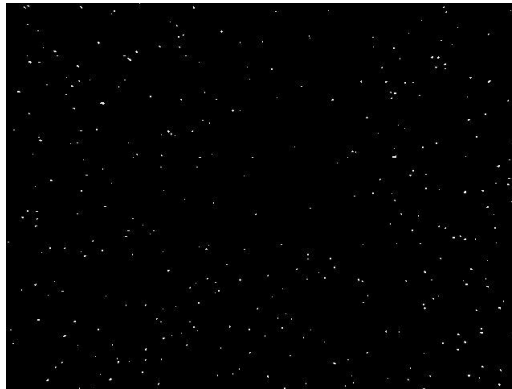
Katıhal nükleer iz kazıma dedektörleri (SSNTDs) basit, dayanıklı, kararlı, yüksek duyarlılığa sahip oldukları, elektronik donanım ihtiyacı duymamaları ve ucuz olmaları sebebiyle diğer dedektörlere göre önemli avantajlara sahiptirler. Genellikle inorganik özellik gösteren mika ve cam ile organik özellik gösteren selüloz asetat, selüloz nitrat, polikarbonat ve polietilen türevi katı materyallerden üretilen bu dedektörler farklı radyasyon türlerinin dedeksiyonunda kullanılabilirler. Bununla birlikte özellikle alfa yayınlı ve yaygın olarak da Radon ve bozunum ürünlerinin konsantrasyonunun tayinin de kullanılmaktadırlar [4, 5, 6].

Günümüze kadar çok sayıda çalışmada kimyasal iz kazıma işleminin deneysel koşullarının optimizasyonu araştırılmıştır. Bu çalışmalarda uygun sıcaklık, kimyasal çözelti ve iz kazıma süresi gibi birçok faktör ayrı ayrı incelenmiştir. Kimyasal iz kazıma işlemi sonrasında dedektörlerdeki izlerin mikroskop altında sayılması aşamasında farklı büyütme oranlı lenslere sahip mikroskoplarla bu okuma yapılabilmektedir. LR-115 dedektörlerle yapılan çalışmalar incelendiğinde de birçok çalışmada farklı lens büyüklüğü kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda iz sayımları genellikle 40x [7], 100x [3, 8, 9, 10], 150x [11], 160x [12, 13], 200x [14], 400x [15, 16], 500x [17] ve 600x [18] gibi farklı büyütme oranlarına sahip mikroskoplar ile belirlenmiştir. Bununla birlikte literatürde farklı lensler ile iz sayımı işleminin gerçekleştirilerek karşılaştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada mikroskop lensinin büyütme

oranının iz yoğunluklarına etkisi araştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

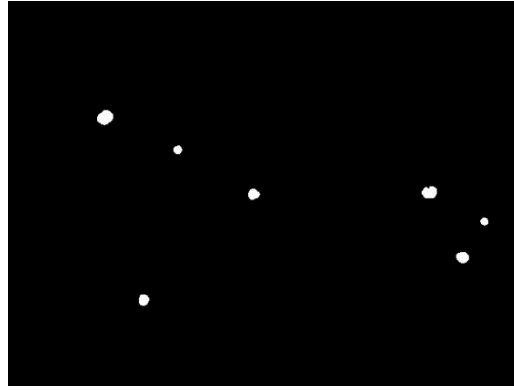
Bu çalışmada radon ölçümleri DOSIRAD, France (LR-115 Film, Tip 2, tek taraflı) film dedektörleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her biri 2 cm x 2 cm boyutunda 30 adet dedektör kullanılmıştır. Dedektörler toprak içerisinde açılan silindirik boşluklara ters kap yöntemine [19, 20] uygun olarak yerleştirilmiş ve 4 hafta süre ile radona maruz bırakılmıştır. Daha sonra dedektörler laboratuvarında %10'luk NaOH çözeltisinde 60°C' de 90 dakika süre ile iz kazıma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrası dedektörler çözeltiden çıkarılmış, saf su ile yıkanmış ve kurumaya bırakılmıştır. İz sayımları Leica DM 500 optik mikroskop, Leica ICC50 (3.2 MP) dijital kamera, Leica Application Suite (LAS EZ) yazılımı ve bilgisayardan oluşan sistem ile yapılmıştır. İz yoğunluğunun belirlenmesi işlemi Arias ve arkadaşları (2005) tarafından detaylı olarak anlatılan yarı otomatik iz sayım metoduyla gerçekleştirilmiştir [21]. Her bir dedektör üzerindeki iz yoğunluğu üç farklı lens (40x, 100x ve 400x) ile ayrı ayrı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan lensler (40x, 100x ve 400x) dedektör üzerinde sırasıyla 8.07, 1.28 ve 0.08 mm² lik alanları görüntülemektedir. Dedektör başına en az 10 adet alan görüntülenmiş [22] ve iz yoğunlukları hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan yarı otomatik sayım metodu üç aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada her bir lens ile bir dedektörde en az 10 farklı alan belirlenir, bu alanların fotoğrafları bilgisayara kaydedilir (Şekil 1, 2, 3).



Şekil 1. 40x lens ile alınan görüntü



Şekil 2. 100x lens ile alınan görüntü

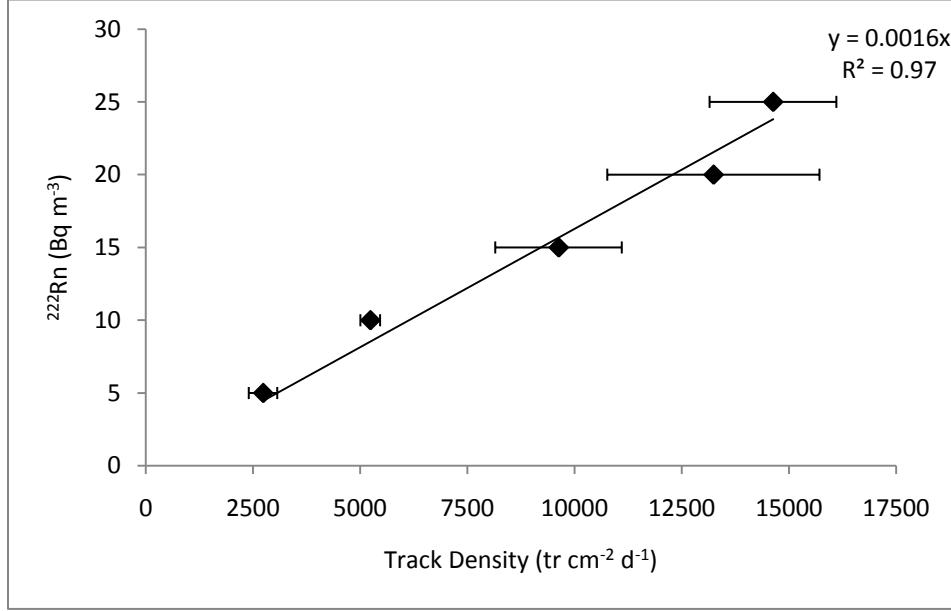


Şekil 3. 400x lens ile alınan görüntü

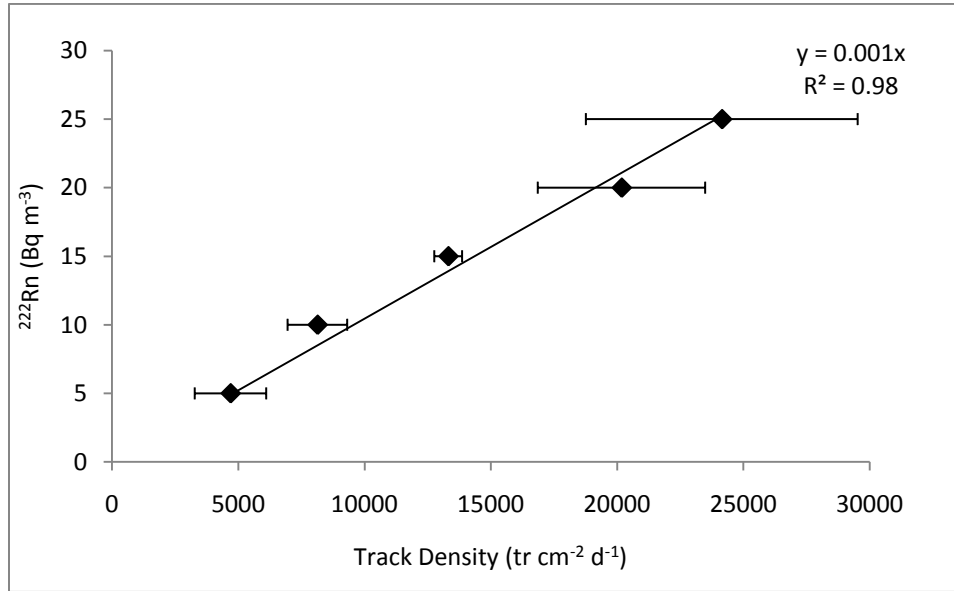
İkinci aşamada kaydedilen görüntüler üzerindeki beyaz izlerin (alfaların çarpması sonucu oluşan) belirginleştirilmesi için uygun bir görüntü işleme yazılımı ile rötuş yapılır. Bu aşamada öncelikle görüntünün parlaklığı ayarlanmış ve daha sonra ise görüntü siyah beyaza dönüştürülerek yeni bir dosya olarak kaydedilmiştir. Üçüncü aşamada ise kaydedilen siyah beyaz görüntü üzerindeki izler SCION yazılımı programı kullanılarak sayılmıştır. SCION yazılımı hücre kültüründe bakterilerin sayımı için hazırlanmış bir yazılım olmakla birlikte dedektör üzerindeki iz yoğunluğunun belirlenmesinde de kullanılmaya başlanmıştır [21].

Dedektörlerin kalibrasyonu özel hazırlanmış kalibrasyon haznelerinde gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon haznesi olarak 2 litre hacminde hava geçirmeyen cam kavanozlar kullanılmıştır. Çalışmada kalibrasyon için 5 adet kalibrasyon haznesine sırasıyla 10, 20, 30, 40, 50 Becquerel (Bq) aktivitede radyum standartı ve LR 115 dedektörler yerleştirilmiştir. Daha sonra bu dedektörler yukarıda anlatılan sürece uygun olarak işleme tabi tutulmuştur. Mikroskop altında

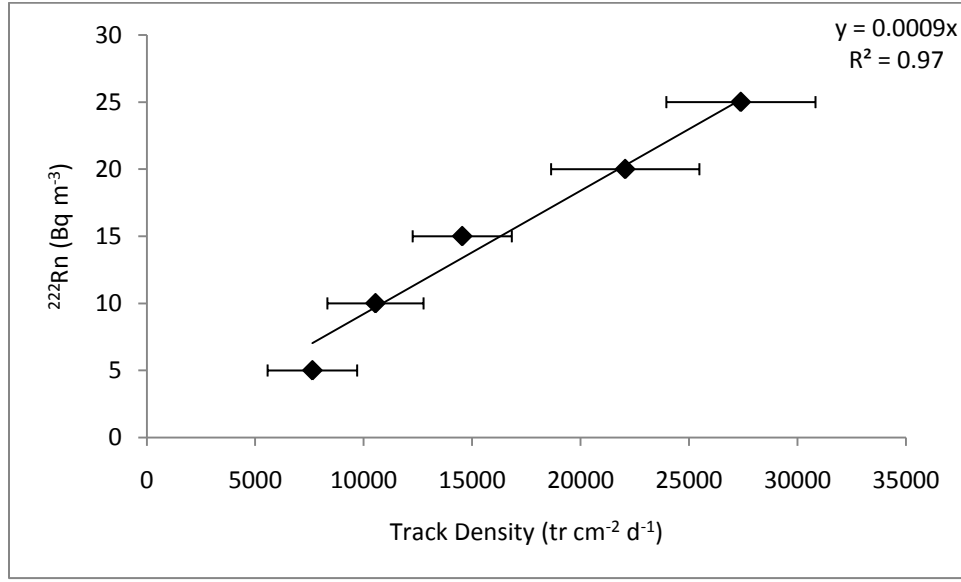
okuma işlemleri sonrasında iz yoğunlukları $\text{iz cm}^{-2} \text{gün}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Kalibrasyon faktörleri her bir lens büyütme oranı için (40x, 100x, 400x) sırasıyla 0.0016 ± 0.0002 , 0.0010 ± 0.0001 ve 0.0009 ± 0.0001 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 40x lens için yapılan kalibrasyon eğrisi



Şekil 5. 100x lens için yapılan kalibrasyon eğrisi



Şekil 6. 400x lens için yapılan kalibrasyon eğrisi

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada aynı dedektör için farklı mikroskop lensleri kullanılarak hesaplanan iz yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Çalışmada 30 dedektör ile toprak gazı radon ölçümleri alınmış ve bu dedektörler üzerinde yaklaşık 1000 adet görüntüdeki iz yoğunlukları hesaplanmıştır. Farklı büyüklükteki mikroskop lensleri kullanılarak aynı dedektör için hesaplanan iz yoğunluklarının arasında anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar iz cm⁻² gün⁻¹ birimi ve kalibrasyon sonucu Bq m⁻³ birimi olarak Tablo 1’de verilmiştir. Seçilen bir dedektörde 40x, 100x ve 400x lens için hesaplanan iz yoğunlukları sırasıyla 15156, 26133 ve 29696 iz cm⁻² gün⁻¹ şeklindedir (Tablo 1).

Tablo 1. İz yoğunluğu ve aktivite olarak sonuçların karşılaştırılması

| Dedektör | İz yoğunluğu (iz cm ⁻² gün ⁻¹) | | | Aktivite (Bq m ⁻³) | | |
|----------|---|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|
| | 40X | 100X | 400X | 40X | 100X | 400X |
| C1 | 5341 | 9207 | 10545 | 9.08 | 9.20 | 9.49 |
| C4 | 15156 | 26133 | 29696 | 25.76 | 26.13 | 26.72 |
| C5 | 7908 | 12587 | 14545 | 13.44 | 12.58 | 13.09 |
| C21 | 6885 | 10980 | 13575 | 11.70 | 10.98 | 12.21 |
| C37 | 46785 | 78812 | 87030 | 79.53 | 78.81 | 78.32 |
| C42 | 32645 | 54930 | 60969 | 55.49 | 54.93 | 54.87 |
| C45 | 8618 | 14215 | 15515 | 14.65 | 14.21 | 13.96 |
| I23 | 1178 | 2274 | 2545 | 2.00 | 2.27 | 2.29 |
| I28 | 2901 | 4642 | 5090 | 4.93 | 4.64 | 4.58 |
| I29 | 55078 | 93947 | 104000 | 93.63 | 93.95 | 93.60 |
| K9 | 6883 | 10900 | 11456 | 11.00 | 10.90 | 10.31 |
| K18 | 3037 | 5024 | 5818 | 5.16 | 5.03 | 5.20 |
| K20 | 3054 | 5234 | 6060 | 5.19 | 5.23 | 5.54 |
| L11 | 2658 | 4868 | 5090 | 4.52 | 4.87 | 4.58 |
| L20 | 1052 | 1846 | 2118 | 1.79 | 1.85 | 1.96 |
| L34 | 1397 | 2523 | 2424 | 2.37 | 2.52 | 2.18 |
| L35 | 1359 | 2656 | 2666 | 2.30 | 2.66 | 2.40 |
| L38 | 33612 | 57524 | 64484 | 57.14 | 57.54 | 58.00 |
| L41 | 6884 | 11980 | 13454 | 11.70 | 11.98 | 12.10 |
| P21 | 1353 | 2243 | 2545 | 2.30 | 2.24 | 2.29 |
| S2 | 974 | 1433 | 2060 | 1.66 | 1.43 | 1.85 |
| S3 | 1808 | 2999 | 3272 | 3.07 | 2.99 | 2.94 |
| S8 | 56049 | 95061 | 105818 | 95.28 | 95.06 | 95.23 |
| S11 | 592 | 1114 | 1333 | 1.00 | 1.11 | 1.20 |
| S18 | 52943 | 89032 | 100121 | 90.00 | 89.00 | 90.10 |
| S26 | 591 | 1013 | 1212 | 1.00 | 1.01 | 1.00 |
| S28 | 1174 | 1955 | 2181 | 1.99 | 1.95 | 1.96 |
| S35 | 1412 | 2134 | 2424 | 2.40 | 2.13 | 2.18 |
| S36 | 1291 | 2290 | 2909 | 2.19 | 2.29 | 2.60 |
| S44 | 86114 | 146876 | 162666 | 146.39 | 146.87 | 146.40 |

Tablo 1’den görüldüğü üzere farklı büyütme oranlı lensler ile yapılan ölçümlerin sonuçları $\text{iz cm}^{-2} \text{ gün}^{-1}$ biriminde verildiğinde birbirinden çok farklı sonuçlar elde edilmektedir. Kalibrasyon işlemi ile Bq m^{-3} biriminde hesaplanan sonuçlar ise farklı lensler kullanılmasına rağmen birbiri ile uyum içerisindedir. Bu durum sonuçlarını iz yoğunluğu olarak sunun çalışmaların birbirleri ile karşılaştırılmasını imkânsız kılmaktadır. Konuyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde kalibrasyon yapılmadan sonuçların iz yoğunluğu olarak sunulması oldukça sık karşılaşılan bir durumdur. Ekvator’ da yapılan bir çalışmada Katihal iz kazıma dedektörleri kullanılarak toprak gazı radon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 1986 ve 1987 yılları arasında meydana gelen 4 büyük deprem öncesi radon konsantrasyonlarının önemli değişimler gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar iz cm^{-2} olarak sunulmuştur [23]. Balducci ve arkadaşları tarafından İtalya’ da LR 115 dedektörler ile toprak gazı radon seviyelerinin belirlendiği bir başka çalışmada da sonuçlar $\text{iz cm}^{-2} \text{ gün}^{-1}$ biriminde verilmiştir [24]. Hindistan’ da yapılan bir çalışmada ise Mat fayı boyunca meydana gelen sismik olaylar ile radon anomalileri arasındaki ilişkilerin incelenmesi amacıyla LR 115 Tip 2 dedektörlerle toprak gazı radon ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada dedektörler 15 gün sürelerle toprak içerisinde tutulmuş ve elde edilen sonuçlar iz cm^{-2} (15 günlük dönem için) olarak verilmiştir [25]. Özellikle depremler ile ilişkili olarak yapılan ve uzun süreli radon ölçümlerinin alındığı çalışmalarda sonuçların iz cm^{-2} ya da $\text{iz cm}^{-2} \text{ gün}^{-1}$ olarak sunulması çok sık görülmektedir. Burada amaç radonun deprem öncesi nasıl bir değişim gösterdiğini bulmak ve bir ilişki elde etmek olduğu için araştırmacılar çoğu zaman sonuçları kalibre etme gereği duymamaktadırlar. Ghosh ve arkadaşları tarafından Hindistan’ da yapılan bir başka çalışmada da CR-39 dedektörler üzerindeki iz yoğunlukları 100x lensli mikroskop ile belirlenmiştir. Çalışmada iz yoğunluklarının depremlerle ilişkili olarak oldukça geniş bir aralıkta 300 ile 900 $\text{iz m}^{-2} (48 \text{ saat})^{-1}$ arasında değiştiği gösterilmiştir [26].

Diğer tarafta bir çok çalışmada kalibrasyon deneyleri de yapılmış ve elde edilen kalibrasyon katsayısı kullanılarak sonuçlar birim hacimdeki aktivite olarak sunulmuştur. Yunanistan’ da yapılan bir çalışmada 1986’ dan 2000 yılına kadar toprak gazı radon ölçümleri LR 115 dedektörlerle yapılmıştır. Toprak gazı radon konsantrasyonlarının 4365 ile 54415 Bq m^{-3} arasında değiştiği bildirilmiştir [20]. İtalya’nın Sicilya Adası’ndaki Etna Yanardağı çevresinde yapılan ölçümlerde CR-39 Katihal iz kazıma dedektörleri kullanılmış ve sonuçlar Bq m^{-3} olarak

sunulmuştur [27].

Yukarıda verilen örneklerde görüldüğü gibi literatürde Katıhal iz kazıma dedektörleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda sonuçlar iz yoğunluğu veya aktivite olarak verilebilmektedir. Özellikle depreme yönelik ve uzun süreli radon değişiminin incelendiği çalışmalarda kalibrasyona ihtiyaç duyulmaksızın sonuçlar iz yoğunluğu olarak sunulmaktadır. Bununla birlikte her çalışmada kullanılan lens büyüklüğü farklıdır ve bu farklılık sonuçların diğer çalışmalara karşılaştırmasını imkânsız kılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Ng, F.M.F., Yip, C.W.Y., Ho, J.P.Y., Nikezic, D., Yu, K.N., "Non-destructive measurement of active-layer thickness of LR-115 SSNTD" *Radiation Measurement*, 38, 1-3, 2004.
- [2] Sac, M.M., Harmansah, C., Camgoz, B., Sozbılır, H. "Radon monitoring as the earthquake precursor in fault line in western Turkey". *Ekoloji*, 20, 93-98, 2011.
- [3] Şen G.Y., İçhedef, M., Saç, M.M., Yener, G. "Effect of natural gas usage on indoor radon levels". *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 295, 277-282, 2013.
- [4] Bondarenko, O.A., Korneev, A.A., Onishchuk, Yu. N., Berezhnoy, A.V., Aryasov, P.B., Antonyuk, D. and Dmitrienko, A.V. "Application of SSNTD for maintenance of radiation and nuclear safety of the Sarcophagus". *Radiation Measurements*, 30 (6), 709-714, 1999.
- [5] Leung, S.Y.Y., Nikezic, D. and Yu, K.N. "Derivation of V function for LR-115 SSNTD from its partial sensitivity to ^{222}Rn and its short-lived progeny". *Journal of Environmental Radioactivity*, 92 (1), 55-61, 2007,
- [6] İçhedef, M. "Radon Difüzyon Hızının Farklı Büyük Toprak Gruplarına Göre Değişiminin İncelenmesi", Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2011.
- [7] Misdaq, M.A. and Essaouif, Z., "Study of the weekly irrigation cycle of a cultivated field in a semi-arid area (Marrakech region, Morocco) by using CR-39 and LR-115 II track dedektors and radon as a natural tracer". *Radiation Measurement*, 42, 431-440, 2007.
- [8] Jönsson, G. "Experience from using plastic film in radon measurement". *Radiation Measurement*, 31, 265-270, 1999.
- [9] Khan, S.M., Naqvi, A.H., Azam, A. "Study of indoor radon and its progeny levels in rural areas of North India using LR-115 plastic track dedektors". *Radiation Measurement*, 43, 385-388,

2008.

[10] Karadeniz, Ö., Yaprak, G., Akal, C., Emen, İ. "Indoor radon measurements in the granodiorite area of Bergama (Pergamon)-Kozak, Turkey". Radiation Protection Dosimetry, 149 (2): 147-154, 2012.

[11] Dwivedi, K.K., Ghosh, S., Singh, S., Limatenjen, J., Satyanarayana, Murthy, G.S., Prasad, J., Srivastava, A. "Indoor radon measurements in some Indian cities". Radiation Measurement, 28, 647-649, 1997.

[12] Plannic, J., Radolic, V., Vukovic, B. "Radon as an earthquake precursor". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 530, 568-574, 2004.

[13] Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., Planinic, J. "Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor". Applied Radiation Isotopes, 66, 1459-1466, 2008.

[14] Leung, S.Y.Y., Nikezic, D., Yu, K.N. "Passive monitoring of the equilibrium factor inside a radon exposure chamber using bare LR 115 SSNTDs." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 564, 319-323, 2006.

[15] Singh, S., Malhotra, R., Kumar, J., Singh, L. "Indoor radon measurements in dwellings of Kulu area, Himachal Pradesh, using solid state nuclear track detectors". Radiation Measurement, 34, 505-508, 2001.

[16] Baykara, O. and Doğru, M. "Measurements of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian Active Fault Systems (Turkey)". Radiation Measurement, 41, 362-367, 2006.

[17] Da Silva, A.A.R. and Yoshimura, E. M., "Calibration of LR-115 for ^{222}Rn monitoring taking into account the plateout effect". Radiation Protection Dosimetry, 103, 367-370, 2003.

[18] Chauhan, R.P. and Chakarvarti, S.K. "Radon diffusion through soil and fly ash: effect of compaction". Radiation Measurement, 35, 143-146, 2002.

[19] Vulkan, U., Steinitz, G., Zafrir, H. "Long-distance (+100m) transport of radon in syenitic rocks at Makhtesh Ramon, Israel". Nuclear Geophysics, 6, 261-271, 1992.

[20] Papastefanu, C. "Measuring radon in soil gas and groundwaters: a review". Annals of Geophysics 50, 569-578, 2007.

- [21] Arias, H., Palacios, D., Sajo-Bohusa, L. and Vilorio, T. "Alternative procedure for LR-115 chemical etching and alpha tracks counting". *Radiation Measurements*, 40, 357-362, 2005.
- [22] Papachristodoulou, C., Ioannides, K., Spathis, S. "The effect of moisture content on radon diffusion through soil: assessment in laboratory and field experiments". *Health Physics*, 92, 257-264, 2007.
- [23] Humanante, B.F., Giroletti, E., Idrovo, J., Monnin, M., Pasinetti, R. and Siedel, J.L. "Radon Signals Related to Seismic Activity in Ecuador, March 1987". *Pageoph* 132, 506-520, 1990.
- [24] Balducci, O., Bigazzi, G., Cioni, R., Leonardi, M., Meletti, C., Norelli, P., Pesca, A., and Taddeucci, G. "Monitoring ²²²Rn in soil gas of Garfagnana (Tuscany) aimed at earthquake prediction". *Annali di Geofisica* 37, 861-881, 1994.
- [25] Jaishia, H.P., Singh, S., Tiwari, R.P., Tiwari, R.C. "Correlation of radon anomalies with seismic events along Mat fault in Serchhip District, Mizoram, India" *Applied Radiation and Isotopes*, 86, 79-84, 2014.
- [26] Ghosh, D., Deba, A., Sengupta, R., Patra, K.K., Bera, S. "Pronounced soil-radon anomaly- Precursor of recent earthquakes in India". *Radiation Measurements* 42, 466-471, 2007.
- [27] Giammanco, S., Imme, G., Mangano, G., Morelli, D., Neri, M. "Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: The case of the Pernicana fault system, Mt. Etna (Italy)". *Applied Radiation Isotopes*, 67, 178-185, 2009.