T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DEPREMLERİN KAPALI ORTAM RADON KONSANTRASYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: KAHRAMANMARAŞ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlayda UMUTKAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ARALIK 2024

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DEPREMLERİN KAPALI ORTAM RADON KONSANTRASYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: KAHRAMANMARAŞ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlayda UMUTKAN
(21434993001)
ORCID: 0009-0003-2829-3512X

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Sistemleri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN
ORCID: 0000-0001-8025-2141

ARALIK 2024

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 230Y011 numaralı projesi ve 123F072 numaralı TÜBİTAK-1002b projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: İlayda UMUTKAN

İmzası:

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, yoğun programına rağmen beni her zaman destekleyip yönlendiren, Hem TÜBİTAK 1002 hem de BAP öğrenci projesi ile çalışmamın desteklenmesini sağlayan ve değerli katkılarıyla yolumu aydınlatan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Songül AKBULUT ÖZEN'e çok teşekkür ederim. Tezimin saha çalışmalarında bana destek veren özellikle artçı sarsıntıların çok yoğun ve şiddetli olduğu bir dönemde dedektörlerin dağıtılmasına yardımcı olan başta Fizik Bölümü Lisans öğrencisi Rebab BAŞAR olmak üzere, Doktora öğrencisi Muhammed KONYALIÇETİN ve Arş. Gör. Burhan ENGİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Elbette o karışık süreçte çalışmamızı gerçekleştirmemizi sağlayarak bize en büyük desteği veren isimlerini sayamadığım hane sahiplerine ayrıca çok teşekkür ederim. Tez çalışması kapsamında yapılan haritalamalar için vermiş olduğu destekten dolayı Artvin Çoruh Üniversitesinden Doç. Dr. Cafer Mert YEŞİLKANAT'a en içten teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının ortaya çıkabilmesi, yalnızca akademik destekle değil, aynı zamanda sevgi, sabır ve güvenle çevremdeki insanlardan aldığım güçle mümkün olmuştur. Tez çalışmam boyunca bana en büyük desteği veren, sabırla yanımda duran, beni cesaretlendirip motive eden eşime ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2024

İlayda UMUTKAN
(Enerji Sistemleri
Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **viii**
SEMBOLLER ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **x**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xiiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Genel Bilgiler 2
1.1.1 Radyoaktivite 2
1.1.2 Radyoaktif bozunma çeşitleri 4
1.1.2.1 Alfa bozunması 4
1.1.2.2 Beta bozunması 5
1.1.2.3 β^- bozunumu 6
1.1.2.4 β^+ bozunumu 7
1.1.2.5 Elektron yakalama 7
1.1.2.6 Gama bozunumu 8
1.1.3 Radtoaktif bozunma kanunu 9
1.1.4 Radyoaktif numunenin yarı ömrü ve ortalama ömrü 11
1.1.5 Doğal radyoaktivite ve radon 13
1.1.6 Altı Şubat Kahramanmaraş depremleri 18
1.1.7 Literatür özeti 20
1.1.8 Tarihte gerçekleşen ve büyüklüğü 7'nin üzerinde olan depremler sonrası gerçekleştirilen radon araştırmaları 27
1.1.9 Deprem bölgesinde daha önce yapılan radon araştırmaları 32
2. MATERYAL VE YÖNTEM **36**
2.1 Örnekleme Noktaları ve Dedektörlerin Adreslere Dağıtılması 36
2.2 Radon Dedektörleri ve Dedektörlerin Analizi 39
2.3 Deneysel Sistem ve Ölçüm İşlemleri 40
2.4 Jeo İstatiksel Analiz ve Haritalama 40
3. BULGULAR VE TARTIŞMA **43**
3.1 Birinci Etap Bulguları 43
3.2 İkinci Etap Bulguları 45
3.3 Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri 51
3.4 Örnekleme Periyotları Boyunca Bölgede Gerçekleşen Depremlerin Dağılımı 52
4. SONUÇ VE ÖNERİLER **55**
ÖZGEÇMİŞ **58**
KAYNAKLAR **59**

KISALTMALAR

AFAD	**:** Afet ve Acil Yönetim Başkanlığı
BEIR	**:** Biological Effects of Ionizing Radiation
EPA	**:** Environmental Protection Agency
IAEA	**:** Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (International Atomic Energy Agency)
IARC	**:** International Agency for Research on Cancer
ICRP	**:** International Commission on Radiation Protection
NRP	**:** National Radiological Protection Board
TAEK	**:** TürkiyeAtom Enerjisi Kurumu (İsim değiştirdi)
TENMAK	**:** Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
UNSCEAR	**:** United Nations Scientific Committee for the Effects of the Atomic Radiation
WHO	**:** World Health Organization
WLM	**:** Working Level Month

SEMBOLLER

$T_{1/2}$	**:** Yarı ömür
Sv	**:** Sievert
A	**:** Aktiflik
Bq	**:** Becquerel
Ci	**:** Curie
D	**:** Soğurulan doz
Gy	**:** Gray
λ	**:** Bozunma sabiti
τ	**:** Ortalama ömür

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Ağır elementlerin bozunma serilerinin bazı özellikleri.. ..... **14**
Çizelge 1.2 : Bölgede 6 Şubat ve sonrasında gerçekleşen büyük depremlere ait bilgiler. **19**
Çizelge 1.3 : Tarihte gerçekleşen ve büyüklüğü 7'nin üzerinde alan depremler sonrası gerçekleştirilen radon araştırmaları. **30**
Çizelge 1.4 : Dünyada meydana gelen 7 ve üzeri büyüklükteki depremler. **31**
Çizelge 1.5 : Proje kapsamında dedektör bırakılan illerde TAEK tarafından deprem öncesinde 2014 yılında yapılan radon konsantrasyonu sonuçları. **32**
Çizelge 3.1 : Birinci etap'ta bölgeye dağıtılan dedektörlerin analiz sonuçları.. ..... **43**
Çizelge 3.2 : İkinci etap'ta bölgeye dağıtılan dedektörlerin analiz sonuçları **46**
Çizelge 3.3 : Gaziantep'te aynı adreslerde iki etapta da yapılan örnekleme sonucu elde edilen radon konsantrasyonları.. ..... **49**
Çizelge 3.4 : Yıllık etkin doz eşdeğerleri.. ..... **52**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 **:** Çekirdeklerdeki proton sayılarının nötron sayılarına göre değişim grafiği. **3**
Şekil 1.2 **:** Radyoaktif bir numunenin miktarının zamanla değişimi. **10**
Şekil 1.3 **:** Aktifliğin zamana göre değişimi. **12**
Şekil 1.4 **:** Doğal radyoaktif ^{238}U serisi..... **16**
Şekil 1.5 **:** Radonun evlere giriş yolları. **18**
Şekil 1.6 **:** Web of science tabanlı radon-deprem ilişkisi çalışmalarının yıllara göre dağılımı. **22**
Şekil 2.1 **:** Birinci etapta bölgede dedektörlerin dağılımı. **37**
Şekil 2.2 **:** İkinci etapta dedektörlerin dağılımı..... **38**
Şekil 2.3 **:** (a) RSKS tipi CR-39 pasif radon dedektörü, (b) RSKS tipi CR-39 dedektörüne ait difüzyon kabı ve dedektör çipi, (c) Radosys ölçüm sistemi ve alfa izleri.. ..... **39**
Şekil 2.4 **:** Radosys ölçüm sistemi ve alfa izlerinin görüntüsü. **40**
Şekil 3.1 **:** Birinci etap kapalı ortam radon dağılımı haritası. **44**
Şekil 3.2 **:** İkinci etap kapalı ortam radon dağılımı haritası. **46**
Şekil 3.3 **:** Ev sayısına göre radon konsantrasyonu dağılımı. **47**
Şekil 3.4 **:** Örnekleme periyotları boyunca ve depremin hemen ardından gerçekleşen artçı sarsıntılar haritası **53**
Şekil 3.5 **:** Örnekleme periyotları ve depremden hemen sonraki 20 günde gerçekleşen depremlerin illere göre dağılımı..... **54**

DEPREMLERİN KAPALI ORTAM RADON KONSANTRASYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: KAHRAMANMARAŞ ÖRNEĞİ

ÖZET

6 Şubat 2023 tarihinde, Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde büyük bir sismik hareketlilik gözlemlenmiştir. Kahramanmaraş il sınırlarında yer alan Pazarcık ve Elbistan ilçeleri, sırasıyla 7,7 ve 7,6 büyüklüğünde iki güçlü depremle etkilenmiştir. Bu büyük depremler, artçı sarsıntılarla birlikte süregeldi. 20 Şubat 2023 tarihinde, Hatay ilinin Yayladağı ilçesinde, 6,4 büyüklüğünde başka bir deprem daha meydana gelmiştir. Bu çalışmada, Kahramanmaraş'da meydana gelen depremler sonrasındaki artçı sarsıntıların, kapalı ortamlarda radon gazı konsantrasyonları üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Radon gazı, depremler sonrası yer kabuğunda oluşabilecek yapısal değişiklikler nedeniyle yer yüzeyine salınımını artırabilir ve bu durum halk sağlığı için önemli bir çevresel risk oluşturabilir. Çalışma kapsamında, 25 Şubat 2023 ile 9 Temmuz 2023 ve 1 Ağustos 2023 ile 19 Aralık 2023 tarihleri arasındaki iki dönemde, kapalı alanlarda CR-39 radon dedektörleri kullanılarak pasif radon gazı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İlk etapta yapılan ölçümler sonucunda, Hatay ilinde ortalama 139 Bq/m³, Adana ilinde 61 Bq/m³ ve Gaziantep ilinde 89 Bq/m³ değerlerinde radon konsantrasyonlarına rastlanmıştır. İkinci etapta yapılan ölçümler sonucunda ise, Şanlıurfa, Malatya, Adıyaman, Kahramanmaraş ve Gaziantep illerinde sırasıyla 60, 51, 33, 38 ve 39 Bq/m³ ortalama radon seviyeleri ölçülmüştür. İki ölçüm dönemi arasındaki verilerin ortalaması alındığında, bölgedeki ortalama radon konsantrasyonu 64 Bq/m³ olarak belirlenmiştir. Bu radon seviyesi dikkate alındığında, yıllık etkin doz eşdeğeri 1,61 mSv olarak hesaplanmıştır. Gaziantep dışında, diğer illerde aynı adreslerde iki etapta da örnekleme yapılamadığı için bu illerdeki radon konsantrasyonlarına depremin etkisini değerlendirmek güçtür. Ancak Gaziantep özelinde yapılan değerlendirmede, ilk etapta ölçülen 89 Bq/m³ değerinin ikinci etapta 39 Bq/m³'e düşmesi dikkat çekicidir. İlk etapta, Gaziantep'teki 9 farklı adreste radon konsantrasyonları 100-301 Bq/m³ aralığında ölçülmüş, bir adreste ise 1023 Bq/m³ değerine ulaşılmıştır. Bu değerler, 2014 yılında TAEK'in Gaziantep için belirlediği 50 Bq/m³'lük ortalamanın üzerinde olup, depremin Gaziantep'te kapalı ortam radon konsantrasyonuna azda olsa artırıcı etkisi olduğuna atfedilebilir. Benzer şekilde, Hatay ilinde ilk etapta bir adreste ölçülen 437 Bq/m³ değeri, TAEK'in Hatay için belirlediği 50 Bq/m³'lük ortalama değeri çok aşarken, ikinci etapta Malatya ilinde 239 Bq/m³ değerinin TAEK'in Malatya için belirlediği 48 Bq/m³ değerinden önemli ölçüde yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Deprem, Radon, 6 Şubat, Kapalı Ortam, Kahramanmaraş.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF EARTHQUAKES ON INDOOR RADON CONCENTRATION: THE CASE OF KAHRAMANMARAŞ

SUMMARY

On February 6, 2023, a major seismic activity was observed on the East Anatolian Fault Line. The Pazarcık and Elbistan districts located within the borders of Kahramanmaraş province were affected by two powerful earthquakes with magnitudes of 7.7 and 7.6, respectively. These major earthquakes continued with aftershocks. On February 20, 2023, another earthquake with a magnitude of 6.4 occurred in the Yayladağı district of Hatay province. This study aimed to investigate how radon gas concentrations in indoor environments change with earthquakes and subsequent aftershocks. Radon gas may increase its release to the ground surface due to structural changes that may occur in the earth's crust after earthquakes, and this situation may pose a significant environmental risk to public health. Within the scope of the study, passive radon gas measurements were carried out in indoor areas using CR-39 radon detectors in two periods between February 25, 2023 and July 9, 2023 and August 1, 2023 and December 19, 2023. As a result of the measurements made in the first stage, average radon concentrations of 139 Bq/m³ were found in Hatay province, 61 Bq/m³ in Adana province and 89 Bq/m³ in Gaziantep province. As a result of the measurements made in the second stage, average radon levels of 60, 51, 33, 38 and 39 Bq/m³ were measured in Şanlıurfa, Malatya, Adıyaman, Kahramanmaraş and Gaziantep provinces, respectively. When the measurement results between the two stages were averaged, the average radon concentration in the region was found to be 64 Bq/m³. Based on this radon level, the annual effective dose equivalent was calculated as 1.61 mSv. Since sampling could not be done at the same addresses in both stages in other provinces except Gaziantep, it is difficult to evaluate the effect of the earthquake on radon concentrations in these provinces. However, in the evaluation made specifically for Gaziantep, it is noteworthy that the value of 89 Bq/m³ measured in the first stage decreased to 39 Bq/m³ in the second stage. In the first stage, radon concentrations were measured in the range of 100-301 Bq/m³ at 9 different addresses in Gaziantep, and a value of 1023 Bq/m³ was reached at one address. These values are above the average of 50 Bq/m³ determined by TAEK for Gaziantep in 2014, and can be attributed to the earthquake's slightly increasing effect on the indoor radon concentration in Gaziantep. Similarly, the value of 437 Bq/m³ measured at an address in the first stage in Hatay province was observed to be significantly higher than the average value of 50 Bq/m³ determined by TAEK for Hatay, while the value of 239 Bq/m³ in Malatya province in the second stage was observed to be significantly higher than the value of 48 Bq/m³ determined by TAEK for Malatya.

Keywords: Earthquake, Radon, February 6, Indoor, Kahramanmaraş.

1. GİRİŞ

Radon gazı, renksiz, kokusuz ve tatsız bir radyoaktif gaz olup, yer kabuğunda doğal olarak bulunan uranyum ve toryum izotoplarının bozunması sonucu atmosfere salınmaktadır. Yeryüzünde radonun en fazla bulunduğu yerler, kayaçlar ve topraklar olup, bu gaz zaman içinde yer altından yüzeye doğru hareket eder ve kapalı alanlarda, özellikle binalarda birikerek tehlike oluşturabilir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre, radon maruziyeti, sigaradan sonra akciğer kanseri için ikinci en önemli risk faktörüdür [1]. Radon gazının yüksek konsantrasyonlara ulaşması, sağlık açısından ciddi tehditler oluşturabilmektedir; bu nedenle, radon düzeylerinin izlenmesi ve kontrol edilmesi, halk sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır.

Türkiye, aktif deprem kuşağında yer alan bir ülke olup, özellikle Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde yoğun bir tektonik hareketlilik gözlemlenmektedir. Depremler, yer kabuğundaki yapısal değişikliklere yol açarak, zemin özelliklerini ve dolayısıyla yeraltı gazlarının dinamiklerini etkileyebilir. Deprem sonrası, yer altındaki fay hatlarında meydana gelen kırılmalar, toprak yapısındaki değişiklikler ve yer altı su seviyelerindeki dalgalanmalar, radon gazının hareketini ve birikmesini etkilemektedir. Deprem sonrası kapalı alanlardaki radon konsantrasyonunun artması, bölgedeki halk sağlığı için bir tehdit oluşturmaktadır.

Kahramanmaraş, Türkiye'nin en aktif deprem kuşaklarından biri olan Doğu Anadolu Fay Hattı üzerine kurulmuş bir şehir olup, sık sık sismik aktiviteler yaşanmaktadır. Son yıllarda, özellikle 2023'te gerçekleşen büyük Kahramanmaraş merkezli depremler, bölgedeki altyapı ve çevresel koşullar üzerinde büyük etkilere yol açmış, dolayısıyla bu bölgedeki radon gazı seviyelerinin izlenmesi ve analiz edilmesi, hem yerel halkın sağlığı hem de çevresel risklerin değerlendirilmesi açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Kahramanmaraş örneği, hem bölgenin deprem geçmişi hem de coğrafi ve jeolojik yapısı nedeniyle bu tür bir çalışmanın yapılabilmesi için uygun bir saha alanı sunmaktadır.

Bu çalışmada, Kahramanmaraş'ta meydana gelen depremler sonrası kapalı alanlardaki radon seviyelerindeki değişim incelenecek ve bu değişim, bölgedeki yer kabuğu hareketleriyle ilişkilendirilecektir.

Bu tez çalışması hem Türkiye'deki hem de dünya genelindeki radon araştırmalarına katkı sağlamayı hedeflemektedir. Literatürdeki boşluğu dolduracak nitelikte bir çalışma olarak, özellikle deprem riski taşıyan bölgelerde halk sağlığı risklerinin değerlendirilmesine yönelik daha kapsamlı önlemler alınmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, Kahramanmaraş ve benzeri deprem kuşağındaki bölgelerde yapılacak olan radon ölçümleri, potansiyel sağlık risklerini minimize etmek ve uygun müdahale stratejileri geliştirmek için bir temel oluşturacaktır.

1.1 Genel Bilgiler

1.1.1 Radyoaktivite

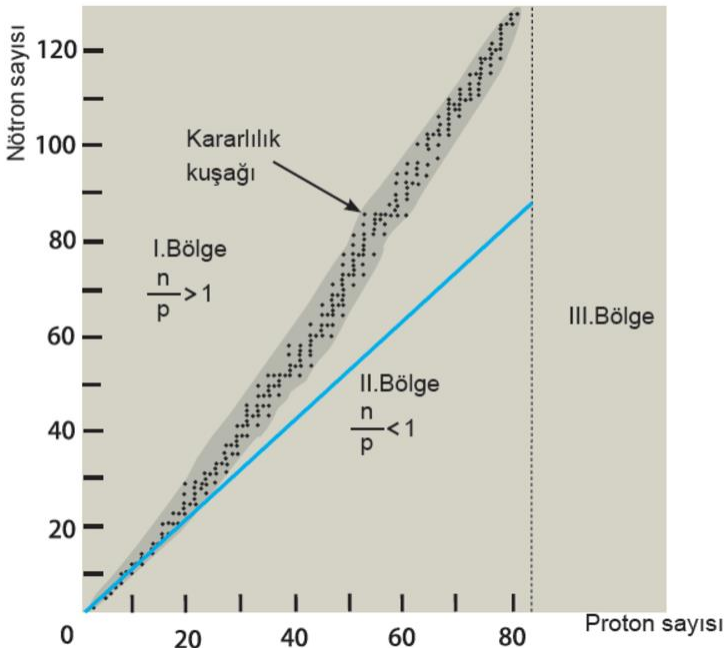
Radyoaktiflik, X-ışınlarını 1895 yılında keşfeden Wilhelm Röntgen'in çalışmalarının ardından, 1986 yılında Henry Becquerel'in uranyum tuzlarının doğal olarak ışınlar yaydığını keşfetmesiyle daha da netleşmiştir. Becquerel, bu ışınların kağıt ve cam gibi maddelerden geçerek fotoğraf filmi üzerinde etki yarattığını gözlemlemiştir. Radyoaktiflik, atom çekirdeklerinin, α ve β parçacıkları ve elektromanyetik radyasyonlar yayılarak kendiliğinden bozulduğu bir süreçtir. Bu bozunma, çekirdek kararlı bir hale gelene kadar devam eder.

Hidrojen haricindeki tüm atom çekirdekleri, temel elektrik yükü olan +e yüküne sahip protonlar (p) ve nötronlar (n) adı verilen yüksüz parçacıklardan oluşur. Bu nükleonlar, çekirdek içinde Coulomb kuvveti ve nükleer etkileşimler aracılığıyla bir arada tutulur. Coulomb kuvvetleri göz ardı edildiğinde, bir çekirdeğin en yüksek kararlılığa ulaşabilmesi için proton ve nötron sayılarının birbirine yakın olması gerektiği görülür. Hafif çekirdeklerde, Coulomb itme kuvvetleri, kısa menzilli nükleer kuvvetlere kıyasla genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak, atom numarası 20'nin üzerine çıktıkça Coulomb kuvvetlerinin etkisi giderek artar. Çekirdek içerisindeki bu itme kuvvetlerindeki artış, çekirdek kararlılığını olumsuz yönde etkiler. Atom numarasının yükselmesiyle, çekirdeğin kararlı kalabilmesi için nötron sayısının proton sayısından fazla olması gerekmektedir. Eğer bir maddenin atom çekirdeğinde nötron sayısı protonlardan fazla ise, bu durum o maddenin kararsız olduğunu gösterir. Kararsız

çekirdekler, radyonüklit olarak adlandırılır ve bu çekirdekler, aşırı enerjiye sahip oldukları için bozunarak ışınlar yayarlar.

Periyodik tablodaki elementlerde, nötron sayısının (N) proton sayısına (Z) oranı (N/Z oranı) yaklaşık olarak 1'e yakın olduğunda, bu elementler kararlı kabul edilir. Atom numarası 20'nin üzerine çıktıkça, kararlılığı sağlamak için gereken N/Z oranı giderek artar ve atom numarası 83'e ulaştığında bu oran 1,5 değerine ulaşır. Atom numarası 83'ün üzerindeki periyodik tablodaki çekirdekler kararsızdır, yani N/Z oranı 1,5'ten büyük olan tüm çekirdekler bozunmaya uğrar. Kararsız bir element, fazla enerji nedeniyle parçacıklar veya elektromanyetik radyasyon salarak bozunur ve bu süreç, çekirdek kararlı bir duruma ulaşana kadar devam eder. Radyoaktivite, tüm çekirdeklerin kararsız olmadığı göz önünde bulundurulduğunda, özgün bir fiziksel özellik olarak değerlendirilir.

Şekil 1.1'de, bilinen çekirdeklerin proton ve nötron sayılarının dağılımı yer almaktadır. Burada, proton ve nötron sayılarının eşit olduğu (N=Z) hafif çekirdekler, kararlılık eğrisinin etrafında dar bir kararlılık bölgesiyle temsil edilirken, daha ağır çekirdekler N/Z oranı 1'den büyük olan bölgelerde yer alır. Atom numarasının artmasıyla elementler, kararlılık bölgesinden uzaklaşır. En ağır kararlı çekirdekler için N/Z oranı yaklaşık 1,5 civarındadır, bu da N/Z > 1,5 olan tüm çekirdeklerin kararsız olacağı anlamına gelir.



Şekil 1.1: Çekirdeklerdeki proton sayılarının nötron sayılarına göre değişim grafiği [2].

1.1.2 Radyoaktif bozunma şekilleri

Radyoaktif bozunma, kararsız bir atom çekirdeğinin daha stabil bir hale gelmek amacıyla enerjisini radyasyon şeklinde dışarıya yaydığı bir süreçtir. Bu, çekirdeğin dengeye ulaşabilmesi için geçirdiği doğal bir dönüşüm sürecidir. Çekirdekler, kararlılık kazanmak amacıyla alfa parçacıkları (helyum çekirdekleri), beta parçacıkları ve gamma ışınları yayıp enerji kaybederler. Genellikle, bu ışınlar ve parçacıklar bir arada salınarak çekirdeğin daha stabil bir duruma gelmesini sağlar. Özellikle gamma ışınları, çoğu zaman beta parçacıklarıyla ya da nadiren alfa parçacıklarıyla birlikte yayılır, bu da bozunma sürecinin karmaşık ve çok aşamalı olabileceğini gösterir.

1.1.2.1 Alfa bozunması

Alfa parçacıkları ($^{4}_{2}He_{2}$), iki proton ve iki nötronun birleşerek oluşturduğu bir helyum çekirdeği olarak tanımlanabilir. Bu parçacıklar, radyoaktif bozunma sırasında çekirdekten koparak çevreye yayılan oldukça ağır ve enerji yüklü bir tür parçacıklardır. α – parçacığının yayınlanma reaksiyoonu aşağıdaki gibidir.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He_{2} \tag{1.1}$$

Denlem 1.1'de, A kütle numarasını, Z ise atom numarasını temsil eder. X, başlangıçtaki kararsız çekirdeği, Y ise bozunma sonucu oluşan yeni çekirdeği ifade eder. Alfa (α) bozunması, bir çekirdeğin iki proton ve iki nötron içeren bir alfa parçacığı yayarak daha kararlı bir hale gelmesini sağlar. α bozunmasına bir örnek:

$$^{226}_{88}Ra_{138} \rightarrow ^{222}_{86}Rn_{136} + \alpha \tag{1.2}$$

E_i ve E_f sistemin bozunma öncesi ve sonrası toplam enerjilerini temsil etmektedir. Enerjinin korunumu yasasından,

$$E_i = E_f \tag{1.3}$$

olmalıdır. Bu durumdan hareketle, sistemin bozunma enerjisi (Q),

$$Q = [M(A,Z) - MY(A-4, Z-2) - M(4,2)]c^2 \tag{1.4}$$

bağıntısı ile verilir. Burada M(A, Z) bozunan, MY(A-4, Z-2) ürün çekirdeğin, Mα (4, 2) ise α parçacığının kütlesidir. Kendiliğinden bozunmanın olabilmesi için Q > 0

olması gereklidir. Ayrıca Q değeri kinetik enerjideki artışa da eşit olduğundan 3 ifadesi,

$$Q = K_{Ü} + K_{\alpha} \tag{1.5}$$

şeklinde olup sırasıyla $K_{Ü}$ ve $K\alpha$ ürün çekirdeği ile α-parçacığının kinetik enerjilerini temsil etmektedir. Enerji ve momentum korunum yasalarına dayanarak, A ana çekirdeğin ve A-4 ürün çekirdeğin kütle numaralarını ifade eder. Bu bağlamda, α-parçacıklarının kinetik enerjileri hesaplanabilir.

$$K\alpha = \frac{M}{M+m}Q \tag{1.6}$$

Büyük A'larda $\frac{A-4}{A}$ ifadesi 1'e yakın olacağından α -parçacığı Q bozunma enerjisinin büyük bir kısmını alacaktır.

Alfa parçacıklarının yayılması, genellikle atom numarası yüksek izotoplarda gözlemlenen bir bozunma türüdür. Bu parçacıklar, madde içerisinde ilerlerken taşıdıkları elektriksel yükler nedeniyle iyonlaşmaya yol açar, bu da enerjilerinin hızla düşmesine neden olur. Alfa parçacıkları, radyoaktif bozunma sırasında yaklaşık 1,6 x 10^7 m/sn hızla fırlatıldıkları için başlangıçta yüksek enerjilere sahiptirler. Ancak, kütlelerinin diğer parçacıklara göre daha büyük olması nedeniyle, etkileşimleri daha sık olur ve bu da onların daha kısa mesafelerde etkili olmalarına neden olur. Bu nedenle, alfa parçacıkları havada veya madde içinde genellikle kısa mesafelerde yol alabilirler. Doğal radyoaktif maddelerden yayılan alfa parçacıkları, genellikle 9 MeV'den düşük enerjiye sahiptir. Dalga boyları son derece kısa olduğundan, bu parçacıkları engellemek için yalnızca ince bir madde tabakası yeterli olmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, alfa parçacıkları dışarıdan bakıldığında ciddi bir radyasyon tehlikesi oluşturmazlar. Ancak, alfa parçacıkları vücuda solunum, sindirim veya diğer yollarla girdiğinde, vücut içinde yaratacakları iyonizasyon ciddi bir iç radyasyon tehlikesine yol açabilir. Bu nedenle, dışarıdan alfa parçacıkları zararlı olmasa da, vücuda alınmaları durumunda riskli hale gelirler [3].

1.1.2.2 Beta bozunması

Çekirdek, fazla proton veya nötronlardan kurtulmak amacıyla protonları nötrona veya nötronları protona dönüştürebilir. Bu dönüşüm, üç farklı mekanizma ile gerçekleşir ve

elektrik yükünün korunabilmesi için başka bir yüklü parçacık gereklidir (bu yüklü parçacık, başlangıçta beta parçacığı olarak bilinse de, sonradan elektronla özdeş olduğu anlaşılmıştır). Beta parçacıkları, madde ile etkileşerek iyonlaşmaya neden olurlar. Alfa parçacıklarına göre daha hafif olan beta parçacıkları, daha derinlere nüfuz etme yeteneğine sahip olup, oluşturdukları iyonizasyon daha azdır. Beta parçacıkları, enerjilerine ve etkileştikleri maddenin özelliklerine göre değişen bir giriciliğe sahiptir ve havada uzun mesafeler katedebilirler. Beta parçacıkları salan radyoizotoplar, dışarıdan ve vücuda alındığında iç radyasyon riski oluşturabilir.

1.1.2.3 β^- bozunumu

β^- ışıması, kararsız bir çekirdeğin elektron yayarak bozunmasıdır. Bu süreç, negatif beta bozunumu ya da negatron bozunumu olarak adlandırılır ve burada bir elektron üretilip yayılır. Atom çekirdeğinde doğal olarak elektron bulunmamakla birlikte, β^- bozunumu sırasında elektrik yükünün korunabilmesi için kararsız çekirdekteki fazla nötron, bir proton ve elektrona dönüşür; bu da atom numarasının bir birim artmasına yol açar. β^- bozunumunda, proton çekirdekte kalırken bir elektron dışarı yayılır. Bu süreç, atom numarasının artmasına neden olurken, kütle numarasını değiştirmez. Bu nedenle, β^- ışınları elektronlardan oluşur ve negatif yüklü oldukları için elektrik ve manyetik alanlarda sapmalar gösterirler. Bozunma denklemi,

$$n \rightarrow p + e^- + v^- \tag{1.7}$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + {}_{-1}^{0}e(\beta^-) \tag{1.8}$$

şeklindedir. Bu ifade, nötronun bozunması sırasında bir proton, bir elektron ve bir antinötrino parçacığının ortaya çıktığını açıklamaktadır. Elektriksel yük taşımayan bir parçacık olan antinötrino, varlığı itibariyle bozunmanın diğer ürünlerinin özelliklerini etkilemez. Bu, nötron bozunmasının temel bileşenlerinin kimliklerini belirlerken, nötr bir parçacığın ortaya çıkmasının önemli bir etkisi olmadığını gösterir [4]. Bozunma enerjisi,

$$Q_{\beta^-} = [[M(A,Z) - MY(A,Z+1)]\, c^2 \tag{1.9}$$

şeklinde yazılır.

β^- bozunumuna bir örnek verilecek olur ise,

$$^{131}_{53}I_{78} \rightarrow {}^{131}_{54}Xe_{77} \quad t_{1/2} = 8{,}0 \text{ dakika}'dır. \tag{1.10}$$

1.1.2.4 β^+ bozunumu

Bu süreç, pozitif beta bozunumu veya positron bozunumu olarak adlandırılır ve burada pozitif yüklü bir elektron (positron) salınır. β^+ bozunumu, bir protonun nötrona dönüşmesiyle gerçekleşir. Eğer çekirdek fazla proton içeriyorsa, bu protonlardan biri nötrona dönüşür, aynı zamanda bir positron ve bir nötrino parçacığı da salınır. Pozitron dışarıya doğru yayılırken, nötron çekirdek içinde kalır. Bu dönüşüm sonucunda, çekirdeğin atom numarası bir azalır. Bu süreç, proton ve nötron arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla gerçekleşir ve çekirdeğin daha kararlı hale gelmesini sağlar. Bozunma denklemi ise şu şekildedir,

$$p \rightarrow n + e^- + v^- \tag{1.11}$$

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + {}^{0}_{1}e(\beta^+) \tag{1.12}$$

Bozunma enerjisi detaylı olarak verilecek olursa,

$$\mathrm{Q}_{\beta^+} = [M(A,Z) - MY(A,Z-1)]\, c^2 = 2mec^2 + Ko \tag{1.13}$$

Bir bozunmanın gerçekleşebilmesi için, Q değerinin pozitif (Q > 0) olması gereklidir. Bu koşul, yalnızca ana çekirdek ile ürün çekirdeği arasındaki durgun kütle farkının, iki elektronun durgun kütlesinin toplamından büyük olduğu durumlarda geçerlidir. Yani, bozunmanın enerjik olarak mümkün olabilmesi için, ürün çekirdeğin daha fazla enerjiye sahip olması gerekir. β+ bozunumuna bir örnek ise,

$$^{25}_{13}Al_{12} \rightarrow {}^{25}_{12}Mg_{13} \; t_{1/2} = 7{,}2\; sn'dir. \tag{1.14}$$

1.1.2.5 Elektron yakalama

Proton sayısının nötron sayısından fazla olduğu (n/p < 1) çekirdeklerde, çekirdeğe en yakın yörüngedeki (1S) bir elektron, çekirdek tarafından yakalanır. Bu süreçte, bir proton nötrona dönüşür. Bu olay, pozitrondan farklı olarak gerçekleşir. Atom numarası

bir azalırken, kütle numarası aynı kalır. Sonuç olarak, bu süreçle elementin izobarı ortaya çıkar. Bahsedilen bozunma denklemi,

$$p \rightarrow e^{-} + n + v \tag{1.15}$$

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + \mathrm{v} + \gamma \tag{1.16}$$

Şeklindedir. Bu durumda bozunma enerjisine ait denklem ise,

$$Q = [M(A,Z) - M(A,Z-1)]\ \mathrm{c}^2 = \mathrm{K_o} \tag{1.17}$$

şeklindedir.

Burada *M (A, Z-1),* yeni oluşan çekirdeğin kütlesini, K_{v} ve $K\gamma$ ise yayılan nötrino ve gama ışınlarının kinetik enerjilerini temsil eder. Elektron yakalama sürecinin gerçekleşebilmesi için, Q değeri de pozitif olmalıdır (Q > *0).*

1.1.2.6 Gama bozunması

Radyoaktif gama ışını yayılması, optik veya X-ışını geçişlerine benzer şekilde atomik düzeyde gerçekleşen bir radyasyon yayılma sürecidir. Bir çekirdek alfa veya beta parçacığı yaydığında, bu genellikle çekirdeği uyarılmış bir enerji seviyesine yükseltir. Uyarılmış çekirdek, daha düşük bir enerji seviyesine veya temel duruma geçerken, nükleer enerji seviyeleri arasındaki fark kadar bir gama ışını yayar. Ancak, yayılan gama ışını, çekirdeğin geri tepme enerjisini dikkate alarak biraz eksik olur. Gama ışını salındıktan sonra, atom yapısal olarak değişmez; sadece çekirdek düzeyindeki enerji değişir. Bahsedilen parçalanmaya ait bozunmanın denklemi ise,

$${}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \tag{1.18}$$

şeklindedir. Gama ışınları, kısa dalga boyuna sahip elektromanyetik radyasyonlardır ve fotonlardan oluşurlar. Bu ışınlar, elektriksel yük taşımadıkları için Coulomb kuvvetlerinden etkilenmezler, bu da onları yüklü parçacıklardan farklı kılar. Ancak, bu durum, gama ışınlarının maddeyle etkileşimde bulunmadığı anlamına gelmez. Gama ışınları doğrudan iyonlaştırıcı olmasalar da, elektromanyetik kuvvet taşıyıcıları oldukları için maddeyle etkileşimde bulunarak iyonlaşmaya neden olabilir veya ortamda enerji biriktirebilirler. Yüklü parçacıkların davranışlarıyla

karşılaştırıldığında, gama ışınlarının madde üzerindeki etkisi oldukça farklıdır. Özellikle, atomun elektronlarıyla etkileşime girdiğinde, gama ışınları enerjilerinin büyük bir kısmını kaybedebilir. Alfa ve beta ışınlarının aksine, gama ışınları daha yüksek bir giriciliğe sahiptir, çünkü yüksüzdürler ve bu nedenle elektriksel ve manyetik alanlardan etkilenmezler. Bununla birlikte, gama ışınlarının menzil kavramı, yüklü parçacıklara göre çok daha farklıdır. Yüksek enerjilere sahip olmalarına rağmen, iyonlaşma süreçleri genellikle daha dolaylıdır ve etkileşim süreçleri daha karmaşıktır.

1.1.3 Radyoaktif bozunma kanunu

Bir atom çekirdeğinin, bir alfa parçacığı, beta parçacığı, gama ışını veya başka herhangi bir parçacık yayması, ya da çekirdek etrafındaki elektron kabuğundan bir elektron yakalaması, radyoaktif bozunma olarak tanımlanır. Bu süreç, çekirdeğin kararsızlık durumunu düzeltme amacıyla enerjisini dengelemeye çalışması olarak görülür. Radyoaktif bozunma, çekirdeğin enerji seviyelerinin istikrara kavuşması için çeşitli parçacıklar ve radyasyon yaymasıyla gerçekleşir. Atom çekirdeği bu süreçte, zamanla daha kararlı hale gelmeye çalışırken, bozunma sırasında ortaya çıkan enerji, atomun çevresiyle etkileşim içine girer ve çeşitli radyasyon formlarına yol açar.

Radyoaktif bozunma, bir atomun ne zaman bozunacağı açısından kesin olarak tahmin edilemez. Bu süreç, zamanla rastgele ve gelişigüzel bir şekilde meydana gelir. Ancak, istatistiksel ve olasılık teorileri çerçevesinde, radyoaktif bozunmanın bazı temel özellikleri belirlenebilir. Bu bağlamda, her bir çekirdeği tek tek incelemek yerine, bir radyoaktif çekirdeğin belirli bir zaman diliminde bozunma olasılığını ele almak daha anlamlıdır. Bu olasılık, bozunma sabiti (λ) ile ifade edilir ve birim zamanda bozunma olayının gerçekleşme ihtimalini yansıtır. Radyoaktif bozunma yasalarına göre, radyoaktif çekirdeklerin yaşından bağımsız olarak bu olasılık sabittir. Bu durum, radyoaktif bozunmanın bir istatistiksel süreç olduğunu ve zamanla değişmediğini gösterir.

Bir radyoaktif çekirdekte, belirli bir zaman diliminde meydana gelen bozunma olaylarının sayısı, çekirdeğin *bozunma hızı* ya da *aktivite değeri* olarak tanımlanır.

Bir t anındaki N sayıda radyoaktif çekirdek mevcutsa ve numuneye yeni çekirdekler eklenmiyorsa, dt süresi içinde bozunan dN çekirdek sayısı, N ile doğru orantılıdır.

$$\lambda = \frac{(dN/dt)}{N} \tag{1.19}$$

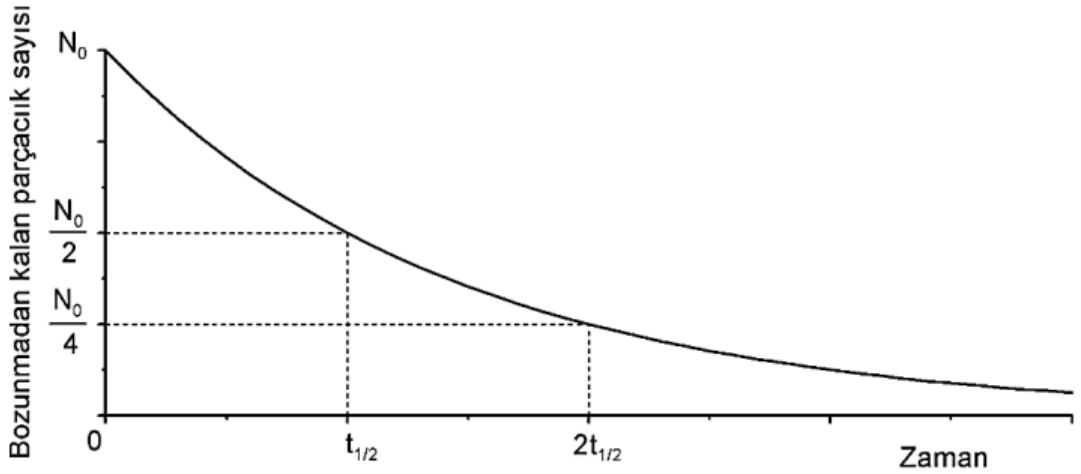
Denklem 1.19'un sağ tarafı, bir atomun belirli bir zaman diliminde bozunma olasılığını ifade eder. Bu olasılık, atomun yaşına bağlı olarak değişmez ve radyoaktif bozunmanın istatistiksel modelinin temel varsayımlarından birini oluşturur. Başka bir deyişle, her çekirdeğin bozunma olasılığı zamanla sabit kalır, bu da radyoaktivitenin rastlantısal doğasını anlamamıza yardımcı olur. Denklem 1.19'un integrali alınırsa,

$$\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \mathrm{N(t)} \qquad \int \frac{dN(t)}{N(t)} = -\int \lambda \mathrm{dt} \tag{1.20}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{1.21}$$

üstel radyoaktif bozunma kanunu elde edilir. Burada, N0, t =0'da henüz bozunmamış, N(t) ise t süresi içinde bozunmadan kalan çekirdeklerin sayısıdır [4]. Şekil 1.2'de radyoaktif bir numunenin miktarının zamanla değişimi gösterilmektedir.

Radyoaktifliğin keşfedildiği 1896 yılını takip eden 3 yılda, saf bir radyoaktif numunenin zamanla bozunma hızının üstel kanuna uyduğu gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Radyoaktif bir numunenin miktarının zamanla değişimi [5].

Radyoaktivitenin, tüm örnek üzerinde değil, bireysel atomlar düzeyinde değişim gösterdiğinin anlaşılması için uzun bir süre geçmesi gerekmiştir. Nükleer rezonans saçılması, bir çekirdeğin, iki nükleer enerji seviyesi arasındaki farkla aynı enerjiyi taşıyan bir foton tarafından uyarılmasıyla gerçekleşir.

1.1.4 Radyoaktif numunenin yarı ömrü ve ortalama ömrü

Denklem 1.21, radyoaktif bozunma yasasına dayalı olarak, herhangi bir t zamanında bozunmaya uğramayan çekirdek sayısını ifade eder. Radyoaktif izotopların yarı ömürleri oldukça geniş bir aralıkta değişir. En uzun yarı ömre sahip çekirdek, 10^{17} yıl ile kurşun(^{196}Pb) izotopudur. Bu geniş yarı ömür aralığı, radyoaktif bozunmanın her element için farklı hızlarla gerçekleştiğini ve bazı çekirdeklerin oldukça uzun süreler boyunca kararlı kalabileceğini ortaya koyar.

Radyoaktivitenin doğası gereği, bir radyoaktif atomun ömrü tamamen rastlantısaldır ve sıfır ile sonsuz arasında herhangi bir değeri alabilir. Bu yüzden, tek bir atomun ne kadar süreyle var olacağı kesin bir şekilde tahmin edilemez. Ancak, büyük bir atom grubunun bozunma davranışları incelendiğinde, bu grubun ortalama ömrü hesaplanabilir. Bu ortalama ömür, belirli bir radyoaktif izotopun bozunma hızını anlamamıza olanak tanır; ancak her bir atomun ömrü, bağımsız ve belirsizdir.

Teorik olarak, bir numunedeki tüm radyoaktif çekirdeklerin tamamen bozunabilmesi için sonsuz bir zaman diliminin geçmesi gerektiği öngörülmektedir. Yani, zaman sonsuza yaklaşırken $t\rightarrow\infty$ çekirdeklerin sayısı sıfıra ulaşır ($N(t)$=0). Bu noktada, radyoaktif maddelerin önemli bir özelliği olan yarı ömür kavramı devreye girer. Yarı ömür, bir radyoaktif izotopun çekirdek sayısının başlangıçtaki değerin yarısına düşmesi için gereken süreyi ifade eder. Bu süre, $t_{1/2}$ ile gösterilir. Yarı ömrü hesaplamak için, denklem 1.21'de $N = \frac{No}{2}$ koşulunu kullanarak bu değeri bulmak mümkündür. Yarı ömür, radyoaktif maddelerin bozunma hızını anlamamıza yardımcı olan temel bir parametredir ve her radyoaktif element için kendine özgüdür ve Denklem 1.22 ile gösterilir.

$$t_{1/2} = N_0 e^{-\lambda t} \tag{1.22}$$

Ortalama ömür (τ), bir radyoaktif çekirdeğin bozunmadan önce geçirdiği ortalama süreyi ifade eder. Belirli bir t zaman diliminde bozunmadan kalan çekirdeklerin sayısı N(t) olarak tanımlanır. t ile t + dt arasındaki küçük zaman diliminde bozunan çekirdeklerin sayısı ise |dN/dt| dt ile temsil edilir. Bu bağlamda, ortalama ömür, bir çekirdeğin bozunma olasılığı ile bağlantılı olarak, radyoaktif bozunmanın hızını anlamada önemli bir parametreyi oluşturur. Ortalama ömür, bir çekirdeğin bozunma

süresi ile ilgili genel bir tahmin sağlar ve radyoaktif bozunmanın istatistiksel doğasını yansıtır. Bu durumda ortalama ömür,

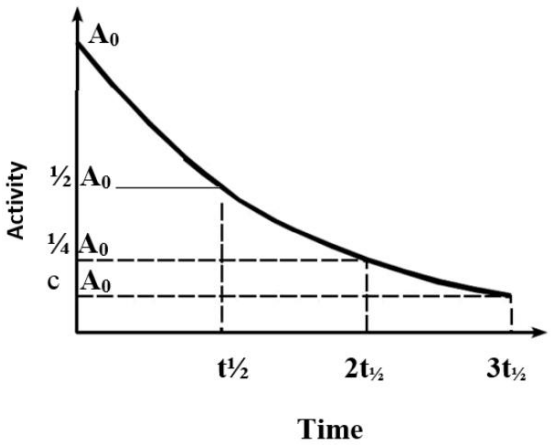
$$\tau = \frac{\int_0^\infty t|dN/dt|dt}{\int_0^\infty |dN/dt|dt} \tag{1.23}$$

dır. Paydada yer alan terim, radyoaktif çekirdeklerin toplam bozunma sayısını ifade eder. Bu sayı, belirli bir süre zarfında gerçekleşen tüm bozunma olaylarının toplamını temsil eder ve bozunma oranının hesaplanmasında kritik bir rol oynar. Bu terim, radyoaktif materyalin ne kadar hızlı bozulduğunu ve bu süreçteki değişimlerin istatistiksel olarak nasıl bir dağılım gösterdiğini anlamamıza yardımcı olur. İntegral alınırsa,

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \tag{1.24}$$

bulunur. Ortalama ömür, bozunma sabitinin tersine eşdeğerdir.

Radyoaktif bir örneğin aktivitesi, numunede birim zamanda meydana gelen bozunma olaylarının sayısını ifade eder ve genellikle bozunma/sn gibi birimlerle ölçülür. Bu kavram, yalnızca belirli bir zaman diliminde kaç bozunma meydana geldiğini gösterirken, yayılan radyasyonun türü veya enerjisi hakkında herhangi bir bilgi vermez. Başka bir deyişle, aktiflik yalnızca bozunma hızını belirtirken, bu bozunmaların türleri ve bunların oluşturduğu etkiler hakkında daha derinlemesine bilgi edinmek için farklı ölçümler gerekir. Şekil 1.3, aktifliğin zaman içinde nasıl değiştiğini görsel olarak sunar.



Şekil 1.3: Aktifliğin zamana göre değişimi [6].

Denklem 1.24, aktifliğin zamanla üssel bir şekilde azaldığını ortaya koymaktadır. Bu durumda, küçük zaman dilimlerinde bozunmaları ardışık olarak sayarak aktifliği zamanla ilişkilendirebiliriz. Verileri yarı logaritmik bir şekilde (yani t'ye göre ln A) grafik üzerinde gösterdiğimizde, eğim -λ olan doğrusal bir ilişki elde ederiz. Şekil 1.3 bu durumu göstermektedir ve bu şekil kullanılarak bir radyoaktif bozunmanın yarı-ömrü belirlenebilir.

Bu ölçüm tekniği, yalnızca belirli yarı-ömrü olan radyoaktif izotoplar için uygundur; çok kısa ya da çok uzun yarı-ömrü olanlar için geçerli değildir. Yarı-ömrün, numunedeki bozunumun gözlemlenebilecek kadar kısa bir süre içinde gerçekleşmesi gerekmektedir. İnsan ömründen daha uzun yarı-ömrü olan radyoaktif maddelerde, zaman içinde önemli bir aktivite azalması gözlenmez. Bu tür durumlarda, bozunum hızını gösteren dN/dt değeri ölçülerek ve numunenin atom sayısını belirlemek için kimyasal bileşeni bilinen bir madde tartılarak doğrudan bir analiz yapılabilir.

Çok kısa yarı-ömrü olan durumlarda (1'e göre çok daha kısa), ardışık bozunum hızlarını gözlemlemek verimli olmayacaktır. Çünkü bu kadar kısa bir sürede aktiflik hemen sıfıra iner, bu da sayım sisteminin yalnızca açılıp kapanmasına yol açar.

1.1.5 Doğal radyoaktivite ve radon

Büyük Patlama'dan sonra, Güneş Sistemi'nin evrimi sırasında yaklaşık 10 milyar yıl boyunca hidrojen ve helyum, yıldızlar, novalar ve süpernovalar gibi kozmik olaylar aracılığıyla daha ağır elementlere dönüşmüştür. Bu süreçte meydana gelen elementlerin büyük bir kısmı radyoaktif özellik gösterir. Ancak, bu radyoaktif çekirdeklerin birçoğu, o zamandan beri bozunarak daha kararlı hallere geçmiştir. Yine de, bazı radyoaktif elementlerin yarı ömürleri Dünya'nın yaşına kıyasla son derece uzun olup, bugün hala bu elementlerin radyoaktiflikleri gözlemlenebilmektedir. Bu olgu, doğal radyoaktiflik olarak tanımlanır. Proton sayısı 83'ten büyük olan tüm elementler radyoaktiftir ve doğada bilinen yaklaşık 340 radyoaktif çekirdek türü bulunmaktadır.

Bugün gözlemlenen doğal radyoaktif elementlerin çoğunluğu, ağır çekirdeklerden oluşur ve bu elementlerin kararlı izotopları bulunmaz. Bu çekirdekler, daha kararlı ve daha hafif bir yapıya ulaşana kadar alfa (α) ve beta (β) bozunumları gerçekleştirirler; bu süreçte proton (Z) ve kütle numarası (A) değerlerinde azalmalar meydana gelir. Alfa bozunumu, çekirdeğin kütle numarasını dört birim azaltırken, beta bozunumu

yalnızca proton sayısında değişim yaratır, böylece kütle numarası (A) sabit kalır. Bu süreç sonucunda, kütle numaraları 4n, 4n+1, 4n+2 ve 4n+3 olan dört bağımsız bozunma serisi ortaya çıkar. Bozunum zincirindeki her çekirdek, genellikle en uzun ömre sahip olan son ürüne doğru bir evrim süreci izler ve eğer bu son çekirdeğin ömrü, Dünya'nın yaşına benzer bir süreyle kıyaslanabiliyorsa, bugün hâlâ bu çekirdeğin radyoaktifliği gözlemlenebilir. Çizelge 1.1'de bahsedilen dört seri gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Ağır elementlerin bozunma serilerinin temel özellikleri.

Seri Adı	Türü	Son Çekirdek (Kararlı)	En Uzun Ömürlü Çekirdek Yarı Ömrü
Toryum	4n	^{208}Pb	$^{232}Th \rightarrow 1{,}4 \times 10^{10}$
Neptinyum	4n + 1	^{209}Bi	$^{237}Np \rightarrow 2{,}1 \times 10^{6}$
Uranyum	4n + 2	^{206}Pb	$^{238}U \rightarrow 4{,}47 \times 10^{9}$
Aktinyum	4n + 3	^{207}Pb	$^{235}U \rightarrow 7{,}04 \times 10^{8}$

İnsanların maruz kaldığı radyasyon ışınlamalarının büyük bir kısmı, doğal radyoaktif elementlerden kaynaklanmaktadır. Doğal radyoaktiflik, çevremizdeki çeşitli ortamlar, toprak, hava, su ve bitkilerde yaygın olarak mevcuttur. Bu radyoaktif elementler, genel olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir: kara kökenli ve uzay kökenli elementler.

Kara kökenli radyoaktif çekirdekler arasında, ^{238}U, $2^{35}U$, $2^{32}Th$, ^{237}Np ve bu elementlerin bozunma ürünleri ile tek izotoplu radyoaktif çekirdek olan ^{40}K bulunmaktadır.

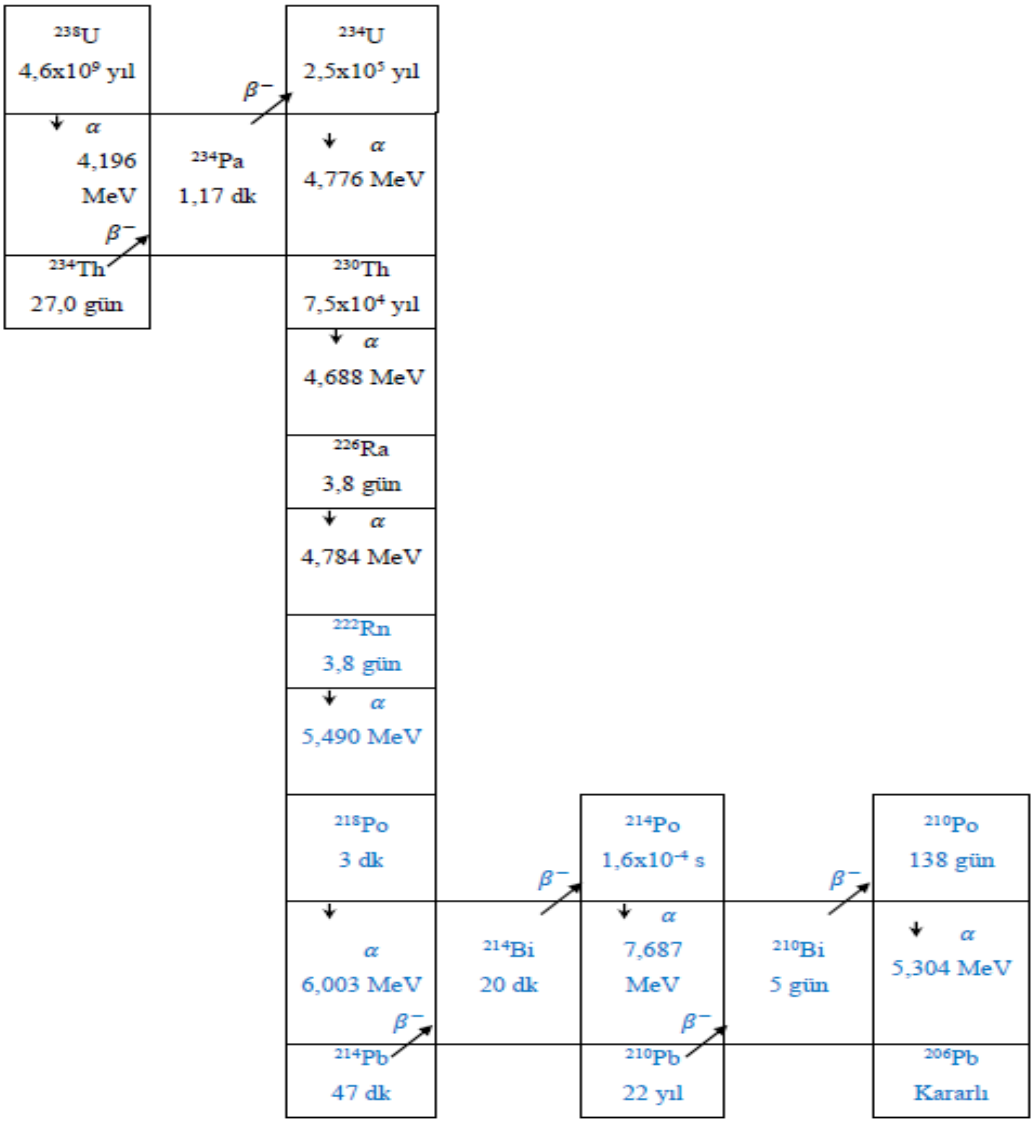
Toprakta bulunan ^{238}U, ^{232}Th ve ^{40}K gibi çok uzun yarı-ömrü olan doğal radyonüklitler, toprağın radyoaktif özellik göstermesine neden olmaktadır. Bu radyonüklitlerin radyoaktiviteye katkısı, ^{238}U bozunma zincirinde en fazla ^{214}Pb ve ^{214}Bi tarafından sağlanırken, ^{232}Th zincirinde ise ^{228}Ac ve ^{208}Tl önemli rol oynamaktadır. Doğal radyonüklitlerin, özellikle granit yapılarının ufalanarak toprağa karışması, topraktaki doğal radyoaktivitenin artmasına yol açar. Bir bölgenin doğal radyoaktivite düzeyi, o bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Şekil 1.4'te projemiz kapsamında incelenen ve Radon (^{222}Rn) gazının ana kaynağı olan Uranyum (^{238}U) serisine ait yarı ömürler, bozunma türleri ve maksimum bozunma enerjileri yer almaktadır. Dünya'nın yapısına bakıldığında, belirli kalınlıktaki toprak tabakasının altında kaya yataklarının bulunduğu gözlemlenmektedir [7].

Granit, Bazalt, Kireçtaşı ve topraktaki ^{238}U miktarı sırasıyla; 35, 12, 25 ve 35 Bq/kg, ^{232}Th miktarı; 70, 15, 8 ve 30 Bq/kg iken ^{40}K miktarı ise 1200, 230, 70 ve 400 Bq/kg olarak ölçülmüştür [8]. Toprakların radyoaktivite seviyeleri, fosfat, volkanik ve tuzlu kayalar gibi bazı kayaç türlerinde daha yüksek konsantrasyonlarda gözlemlenmektedir [9].

Sudaki doğal radyonüklitlerin yoğunluğu, büyük ölçüde ana kayaç türüne bağlı olarak değişir. Granit yapısındaki kayalarda, doğal radyonüklitlerin radyoaktivite seviyeleri diğer kayaç türlerine göre daha yüksektir. Bu doğal radyoaktivite, yağmur suları aracılığıyla topraktan çözünerek ırmaklara ve denizlere taşınmakta, aynı zamanda içme suyu kaynaklarına da karışabilmektedir. Doğal radyasyon dozlarına insanların maruz kalmasında önemli bir rol oynayan radyoaktif maddelerden biri, su ve gıda yoluyla vücuda alınan radyumdur. Doğal su kaynaklarında bulunan başlıca radyum izotopları ise ^{223}Ra, ^{224}Ra, ^{226}Ra ve ^{228}Ra'dir. Bunlar arasında ^{226}Ra ve ^{228}Ra, doğada en yaygın bulunan izotoplar olup, radyoaktivite seviyeleri ve sağlık üzerindeki potansiyel etkileri açısından en büyük öneme sahiptir. Radyum-226, radyum izotopları arasında öne çıkan ve uranyum bozunum serisinin önemli bir bileşeni olarak dikkat çeker. Alfa bozunumu ile ^{222}Rn'ye dönüşen bu izotop, su kaynaklarında bulunan radyumun insan vücudundaki içsel kontaminasyon üzerindeki etkisini artırmaktadır. Radyum-226, ^{222}Rn ve kısa ömürlü radon ürünlerine dönüşerek vücudu önemli derecede radyasyona maruz bırakabilir [10]. İlk başta sadece kaplıca sularındaki mineralleri belirlemeye yönelik yapılan çalışmalar, ilerleyen yıllarda içme sularının da bazı doğal radyonüklitleri içerdiğini ortaya koymuştur. Yeraltı suları, yüzey sularına göre daha yüksek radyoaktiviteye sahip olabilir çünkü yeraltı suları, temas ettikleri radyoaktif materyaller veya minerallerden bu radyoaktiviteyi alır.

Doğal radyasyon düzeyini artıran faktörlerden biri, ^{226}Ra'nın bozunmasıyla salınan radon gazıdır. Bu bozunum süreciyle ortaya çıkan diğer radyoaktif maddeler toprakta kalırken, radon gazı yer yüzeyine doğru yükselir. Eğer bu gaz atmosferde dağılırsa, genellikle bir tehlike oluşturmaz.



Şekil 1.4: Doğal radyoaktif ^{238}U serisi.

Ancak, radon gazının yayıldığı ortamlarda, özellikle konutlarda yeterli havalandırma sisteminin bulunması oldukça önemlidir. Yetersiz havalandırma durumunda, evdeki radon gazı dış ortamdan çok daha yüksek seviyelere ulaşabilir, hatta dışarıdaki konsantrasyonun yüz katı veya bin katına kadar çıkabilir. Bu gaz, solunduğunda akciğerlerde birikerek dokuların radyasyona maruz kalmasına neden olabilir.

Radon gazına maruz kalınan yıllık ortalama doz, dünya genelinde yaklaşık 1.3 mSv civarındadır. Renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olan radon, periyodik cetvelin soy gazlar grubuna ait olup, atom numarası 86'dır. Bu kimyasal elementin toplamda 28 izotopu bulunur, bunlar arasında ^{119}Rn ile ^{226}Rn yer alır. ^{222}Rn, ^{238}U'nun radyoaktif bozunmasıyla, kaya, toprak ve su gibi farklı ortamlarda bulunan bir izotop olarak ortaya çıkar. ^{222}Rn, bir dizi ardışık bozunma süreci sonucunda radyoaktif kısa ömürlü

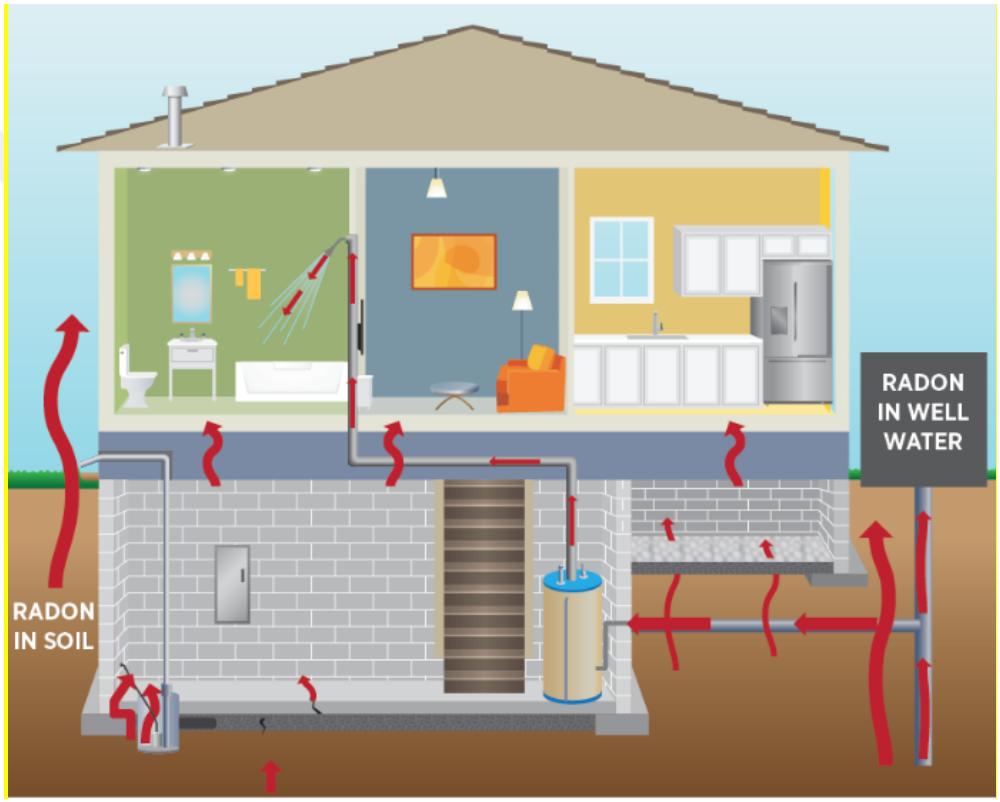
bozunma ürünleri meydana getirir. Bu radon ve türevleri, doğal kaynaklardan alınan radyasyon dozunun yaklaşık %55'ini oluşturur [3]. ^{222}Rn ve bozunma ürünlerinin solunması ya da sindirim yoluyla alınması ciddi sağlık riskleri taşımaktadır. Bu bozunma ürünleri (^{218}Po, ^{214}Bi, ^{214}Po ve ^{214}Pb radyoizotopları), gaz formunda olmayıp havada bulunan toz parçacıkları ve su damlacıklarıyla birleşerek radyoaktif aerosoller oluşturur. Bu aerosoller, solunum yoluyla akciğerlere ulaşabilir ve ^{222}Rn ile bozunma ürünleri içeren suların içilmesiyle sindirim sistemine geçebilir. Bu aerosollerin, kararlı hale gelene kadar bozunmaları, bireylerin sürekli olarak radyasyona maruz kalmasına neden olur. Uzun süreli maruz kalma, akciğer dokusunda hasar oluşturabilir ve zamanla kansere yol açabilir. ^{222}Rn ve bozunma ürünlerinin solunması, akciğer kanseri gelişiminde sigara kullanımından sonra gelen en büyük ikinci risk faktörü olarak kabul edilmektedir [11].

Bu bozunma sürecinin temel atomları, doğal olarak bulunan tüm maddelerde mevcuttur. Bu nedenle, radon gazı, yer kabuğundaki kayaçlar, toprak ve yapı malzemeleri gibi yüzeylerden atmosfere salınır. Radyoaktif özelliğe sahip olan radon gazının yarı ömrü yaklaşık 3.8 gündür. Şekil 1.4'te, uranyumun bozunma serisinin mavi renkle işaretlenen kısmından itibaren ^{222}Rn'nin bozunma zinciri gösterilmektedir.

Radonun insan sağlığı ile bağlantısı, özellikle ev yapımında kullanılan taş, toprak ve çimento gibi malzemelerde doğal olarak bulunması ve sürekli olarak çevreye salınmasıdır. Bu gaz, hava yoluyla akciğerlerimize ulaşarak ciddi sağlık risklerine neden olabilir. Radon, akciğer kanseri riskini artırabilir ve var olan riskleri de daha tehlikeli hale getirebilir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA), her yıl radon gazının etkisiyle yaklaşık 20.000 akciğer kanseri vakasının görüldüğünü bildirmektedir [11].

Radon gazının atmosferdeki yoğunluğu, farklı bölgelerde ve ülkelerde değişkenlik gösterebilir. Özellikle soğuk iklimlere sahip bölgelerde kış aylarında evlerin ısıtılması nedeniyle iç mekan basıncı düşerken dışarıdaki basınç artar; bu da ev içinde radon seviyelerinin yükselmesine neden olur. Benzer şekilde, rüzgarlı hava koşullarında da iç mekanlardaki radon oranı artış gösterir. Ancak yaz aylarında, iyi havalandırılan evler ve iş yerlerinde dışarıdaki hava ile basınç farkı olmadığı için, radon seviyesi genellikle daha düşük olur [12].

Binalarda radon gazının ana kaynağı, genellikle yapının temeline yakın toprak ve kayalardır. Radon, bu toprak ve kayalardan binalara doğru sızar. Gazlar, toprak içerisinde yükselerek binanın alt kısmında birikir. Biriken gazlar, iç basınca yol açar. Ev içindeki hava basıncı, genellikle toprak altındaki basınçtan daha düşük seviyelerde olmaktadır. Bu fark, radon gazının bina temeli, zemin çatlakları, yapı bağlantıları, duvarlardaki yarıklar, asma kat boşlukları, tesisat boru hatları ve duvarlar arasındaki boşluklar gibi çeşitli yollarla iç mekâna sızmasına neden olabilir (Şekil 1.5). Ayrıca, depremler ve diğer sismik aktiviteler sonucu radon gazı, topraktan daha kolay bir şekilde evlere sızabilmektedir.



Şekil 1.5: Radonun evlere giriş yolları [13].

1.1.6 Altı Şubat Kahramanmaraş depremleri

Yer kabuğunda meydana gelen kırılmalar sonucunda aniden oluşan titreşimlerin, dalga şeklinde yayılması ve yeryüzünü sarsması durumu deprem olarak tanımlanır. Depremler, bazen o kadar güçlü olabilir ki, toprak üzerindeki yapıları tahrip ederek can kayıplarına yol açabilir. Dünyada gerçekleşen depremlerin şiddeti genellikle Richter ölçeğiyle ölçülür. Bu ölçek, 1935 yılında Kaliforniya Üniversitesi'nden Charles Richter tarafından tasarlanmıştır.

Türkiye’nin büyük bölümü aktif deprem bölgesidir. Depremlerin özelliklerine göre, Türkiye'de üç ana deprem bölgesi bulunmaktadır: Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay Hattı ve Ege açılma rejimi. Buradaki sismik aktiviteler Türkiye’nin içerisinde ve çevresinde bulunan levha hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Kahramanmaraş, Arabistan ve Anadolu levhalarının birleşim noktasında yer almaktadır. 6 Şubat 2023 tarihinde, Türkiye saatiyle 04:17 ve 13:24'te, merkez üssü Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan ilçeleri olan iki büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremler sırasıyla Mw: 7.7 ve Mw: 7.6 büyüklüğünde kaydedilmiştir. 7.7 büyüklüğündeki ilk deprem, yerin 8.6 km derinliğinde gerçekleşmişken, 7.6 büyüklüğündeki ikinci deprem ise 7 km derinlikte meydana gelmiştir. Bu iki büyük sarsıntıyı takiben artçı hareketler devam etmekteyken, 20 Şubat 2023 tarihinde Hatay ilinin Yayladağı ilçesinde Mw: 6.4 büyüklüğünde 'tetiklenmiş' bir başka deprem kaydedilmiştir. Söz konusu depremler, Kahramanmaraş, Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa ve Elazığ illerinde büyük yıkıma ve önemli can kayıplarına yol açmıştır. Özellikle Kahramanmaraş’ın da dahil olduğu bu illerde, Hatay, Gaziantep, Malatya, Diyarbakır, Kilis, Şanlıurfa, Adıyaman, Osmaniye ve Adana illerinin ardından Elâzığ da olağanüstü hâl ilan edilen iller arasına katılmıştır. Ardından, Bingöl, Kayseri, Mardin, Tunceli, Niğde ve Batman illeri de afet bölgesi olarak ilan edilmiştir. Depremlere dair ayrıntılı bilgiler ise Çizelge 1.2’de sunulmaktadır.

Çizelge 1.2: Bölgede 6 Şubat ve sonrasında gerçekleşen büyük depremlere ait bilgiler.

Deprem	Enlem	Boylam	Derinlik
06.02.2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Depremi Mw:7.7	37.288	37.043	8.60 km
06.02.2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Depremi Mw:7.6	38.089	37.239	7 km
20.02.2023 Yayladağı (Hatay) Depremi Mw:6.4	36.037	36.021	21.73 km

Ülkemiz, bulunduğu tektonik yapı nedeniyle tarihsel olarak doğa kaynaklı afetler arasında en büyük can ve mal kaybına yol açan afet türü olarak 'deprem' ile sıkça karşılaşmaktadır. Bu durum, depremi afet ve acil durum yönetimi açısından her zaman öncelikli bir konu haline getirmiştir. AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı, Avrupa'nın

ikinci büyük deprem gözlem ağına sahip olup, 2023 itibarıyla Türkiye ve çevresinde bulunan 1.145 deprem izleme istasyonu aracılığıyla yılda ortalama 22.000 deprem kaydetmektedir. İstatistiksel verilere göre, her yıl büyüklüğü 6.0 ve üzerinde olan bir deprem, 5.0-6.0 arasında 25 deprem ve 4.0-5.0 arasında ise 200 deprem meydana gelirken, 6 Şubat 2023'teki büyük depremin ardından yalnızca 9 ay içinde yaklaşık 80.000 deprem kaydedilmiştir.

Ülkemiz, hem tarihsel hem de modern dönemde birçok büyük deprem yaşamıştır. Bu depremlerden biri, 1866 yılında Doğu Anadolu Bölgesi'nde, Kuzey ve Doğu Anadolu Faylarının kesişim noktasında meydana gelen 7.0 büyüklüğündeki depremdir. Bu olay, o döneme kadar kaydedilen son büyük deprem olarak kayıtlara geçmiştir. O günden bu yana, Doğu Anadolu Fayı zaman zaman 6.0 ile 7.0 büyüklüğünde depremler üretmiş olsa da, 6 Şubat 2023'teki depremler kadar büyük bir sarsıntı yaşanmamıştır. Resmi verilere göre, 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen depremler sonucunda 50.783 kişi yaşamını yitirmiş, 115.353 kişi ise yaralanmıştır. Ayrıca, 37.984 bina tamamen yıkılmıştır. Bu kayıplar, daha önceki büyük depremlerle kıyaslandığında, 1939 Erzincan Depremi (Mw: 7.9) ve 1999 Kocaeli Depremi'ndeki (Mw: 7.6) kayıplardan daha büyük bir ölçekte gerçekleşmiştir [14].

1.1.7 Literatür özeti

Son yıllarda evler başta olmak üzere kapalı ortamlarda radon ölçümleri oldukça yaygın bir şekilde yapılmıştır. Ülkemizde de bu anlamda hemen hemen her ilde yapılmış bilimsel çalışmalar mevcut olmakla birlikte önceki adıyla TAEK şimdiki adıyla TENMAK'ın 2014 yılında yapmış olduğu Türkiye radon haritası mevcuttur. Bu araştırmada, Türkiye genelinde 81 ilde yer alan 153 yerleşim biriminde toplam 7293 konutta radon konsantrasyonu ölçümleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerle Türkiye'ye ait bir radon haritası oluşturulmuştur [15]. Ev içindeki radon konsantrasyonu, farklı ülkeler ve hatta aynı ülkenin çeşitli bölgeleri arasında belirgin farklılıklar gösterebilmektedir. Bu farklılıklar, yer altı yapılarının jeolojik özellikleri, iklimsel koşullar ve bina inşa yöntemleri gibi faktörlere bağlı olarak şekillenmektedir.

Radon, radyoaktif bir element olup soygaz özellikleri taşıdığı için kimyasal bileşikler oluşturmaz. Bu özellik, radon seviyelerindeki değişimlerin fay hatlarındaki deprem hareketleriyle ilişkilendirilmesine ve bu gazın deprem gözlemleri için bir gösterge olarak kullanılmasına neden olmuştur [16]. Radon gazı konsantrasyonundaki

değişikliklerin sismik aktivitelerle ilişkisini inceleyen ilk çalışma, 1956 yılında Okobe tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalar, günlük radon ölçümleri ile sismik hareketler arasında pozitif bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir [17]. Sismik hareketler, radon seviyelerinin artmasına veya azalmasına neden olarak anomali yaratabilir. Radon göçü, difüzyon, moleküler taşınım ve konveksiyon olmak üzere üç temel mekanizma aracılığıyla gerçekleşir. Difüzyon yoluyla radonun yayılma mesafesi, kısa yarılanma ömrü nedeniyle yalnızca birkaç metreyle sınırlıdır. Ancak, 3.85 günlük yarılanma ömrü nedeniyle radon, taşıyıcı gazlar (CO_2, CH_4, N_2 gibi) aracılığıyla uzun mesafeler kat edebilir [18-19].

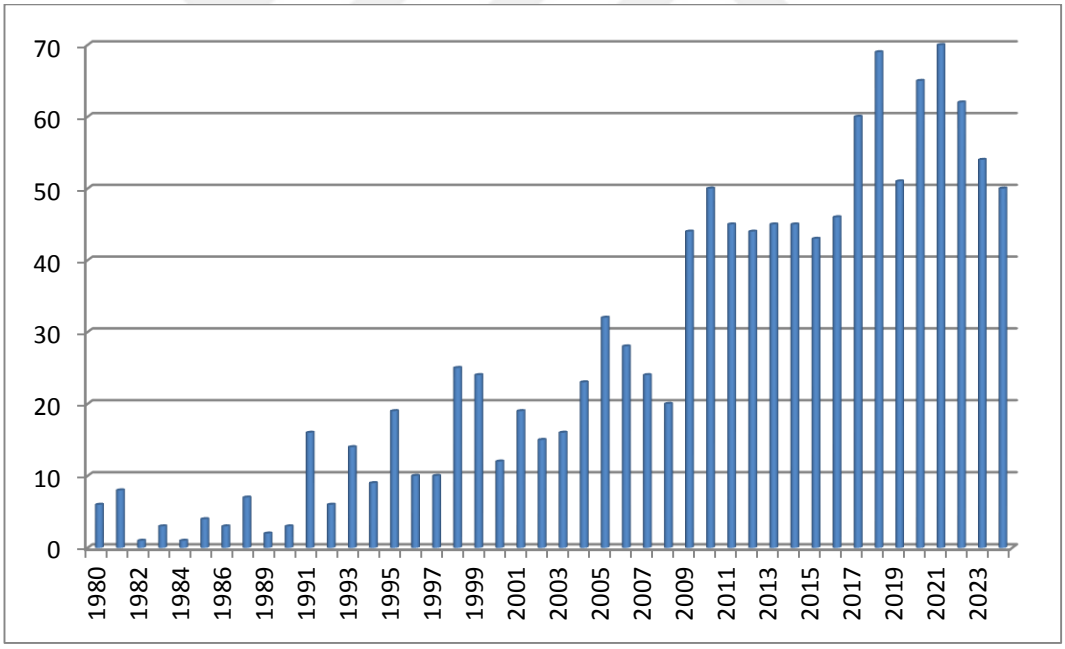
Radon salınımı, yer altı süreçlerinin jeofiziksel göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Japonya ve Çin'de gerçekleştirilen araştırmalar, radon gazı ile sismik faaliyetler arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur [20]. Radon salınımının, aktif fay hatları üzerinde daha yoğun olduğu ve atmosferik koşullar ile sismik hareketlerin etkisiyle zaman içinde değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Yerkabuğundaki gerilmeler nedeniyle kayalardan yeraltı su sistemlerine radon geçişi artar. Bu süreç, sismik aktivite başlamadan önce çevredeki kuyularda ve kaynak sularında radon seviyelerinin yükselmesine yol açar. Deprem öncesinde radon konsantrasyonları zirveye ulaşırken, deprem gerçekleştiğinde bu seviyeler doğal haline geri döner [21].

Deprem tahmini ile ilgili bazı çalışmalarda, sismik bölgedeki bazı toprak gazı emisyonun, depremden önce anomali gösterdiği raporlanmıştır [22-24].

Toprak içerisindeki radon hareketi difüzyon veya konveksiyon yoluyla olmaktadır [25]. Radyumun bozunmasıyla oluşan radon ve alfa parçacığı momentumun korunum prensibine göre birbirlerine zıt yönlerde hareket eder. Radonun bu hareketi sebebiyle üç durum meydana gelebilir. Radon atomu bulunduğu tanecik içerisinde kalabilir, bitişik taneciğin içerisine girebilir ya da radon gazı taneciklerin arasında serbest olarak kalabilir. Bu üç olay sonuncusunda radon gazı toprak içerisinde serbest olarak hareket edebilir, toprağın yüzeyine çıkabilir ve atmosfere ulaşabilir. Radon gazının bu hareketinin hızı, toprağın veya kayaçların geçirgenliğine bağlıdır. Radonun kayaçlardan başlayarak uzun mesafelere kadar rahatlıkla hareket etme kabiliyeti olduğu için, yer bilimlerinde, hidrolojide, jeotermal bölgelerde, aktif faylarda, volkanik olaylarda ve sismotektonik durumlarda kullanılmaktadır.

Faylar hatları ve civarında radon konsantrasyonlarındaki değişim, atmosferik basınç, yağış, sıcaklık değişiklikleri ve kristal taneciklerin boyutuna bağlı olarak değişmektedir [26-27]. Radonun gömülü faylar boyunca difüzyon yoluyla olan göçü, arka plan (background) radon seviyelerinden daha yüksek konsantrasyonlara sahip anomaliler meydana getirebilir. Bu anomaliler, kırılma bölgesinin konumu ile fay zonu içerisindeki geçirgenliği hakkında bazı bilgileri sağlayabilmektedir [28-30]. Çünkü aktif fay zonları kırıklı malzemelerden oluştuğu için zayıf bölgelerdir. Bu zayıf bölgelerdeki, toprağın geçirgenliğinin fazla olması sebebiyle radon gaz sızıntısı da fazladır [29].

Radon gazı ile ilgili yapılan çalışmalar genellikle, gazın yer altındaki salınımını, atmosfere yayılma hızını ve kapalı ortamlardaki birikim süreçlerini incelemektedir. Radon gazının deprem ve kapalı ortamlarla olan ilişkisine dair yapılan araştırmalar, Web of Science veritabanında incelendiğinde, Şekil 1.6'de gösterildiği üzere bu alandaki çalışmaların zaman içinde önemli bir artış gösterdiği dikkati çekmektedir [31]



Şekil 1.6: Web of science tabanlı radon-deprem ilişkisi çalışmalarının yıllara göre dağılımı [31].

Wattananikorn ve arkadaşları 1998 de radon anomalileri ile depremler arasındaki ilişkiyi radon anomalilerini oluşturan depremin büyüklüğü ile depremin merkez üssü arasındaki mesafe incelenmiştir [32]. Walia ve arkadaşları 2003'teki çalışmalarında, deprem büyüklüğü 2,1 ile 6,8 arasında değişen sismik aktivitelerden dolayı radon gaz yoğunluğunda değişimler ortaya çıktığını bildirilmişlerdir [33].

Ghosh ve arkadaşları (2009) çalışmasında, yer altındaki radon gazı emisyonlarındaki anormalliklerin depremler için erken uyarı sinyalleri olabileceğini incelemişlerdir. Radon seviyeleri, yer altı suyu ve hava örneklerinden sürekli veya periyodik olarak ölçülmüş ve anormal artışlar tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek radon emisyonlarının depremlerle ilişkisi araştırılmıştır. Çalışmada, radon ölçümleri, yer altı suyu ve havada yapılmıştır. Radon gazının anormal artışlarını belirlemek amacıyla, bu örnekler sürekli veya periyodik olarak toplanıp ölçülmüştür. Ölçümler, radon gazının seviyelerini izlemek ve olası değişiklikleri tespit etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, radon gazının yer altındaki hareketleri ve emisyonları için fiziksel modeller geliştirilmiştir. Çalışma, depremler öncesinde radon seviyelerindeki artışların yeraltı sularındaki değişiklikler ve kırılma süreçleriyle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, radon emisyonlarının deprem tahminlerinde ve erken uyarı sistemlerinde önemli bir gösterge olabileceğini göstermektedir. [34].

Saç ve arkadaşları 2005 ve 2011 yılında yaptıkları çalışmada, İzmir ve civarındaki çeşitli faylarda yaptıkları çalışmalarda, sularda ve toprak gazında radon gaz konsantrasyonları değişimleri ile sismik aktiviteler arasında pozitif bir korelasyon olduğunu bulmuşlardır [35-36].

Uzeir tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada, Bosna-Hersek'teki sismik aktiviteler ve bunların ilişkili olduğu sismotektonik fay hatları incelenmiştir. Çalışma, bölgedeki tarihsel ve güncel deprem verilerini analiz ederek, fay hatlarının yapısını, aktivitesini ve potansiyel tehlikelerini ortaya koymuştur. Yerel jeolojik özelliklerin deprem davranışlarına etkisi de ele alınmış, sismik ağlardan elde edilen verilerle deprem yoğunluğu ve dağılımı haritalandırılmıştır. Çalışmada, radon gazı konsantrasyonları, sismik ağlardan elde edilen verilerle paralel olarak toplanmış ve analiz edilmiştir. Ayrıca, sismotektonik süreçlerin ve radon gazı emisyonlarının yer altındaki dinamiklerle ilişkisi modelleme teknikleriyle incelenmiştir. Radon gazı konsantrasyonunun belirli fay hatları ve sismik aktivitelerle ilişkili olduğu, özellikle depremlerden önce radon konsantrasyonunda artışlar tespit edildiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, radon gazının sismik risklerin değerlendirilmesinde önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Çalışma, Bosna-Hersek'in en yüksek deprem sıklığının Hersek ve Banja Luka bölgelerinde olduğunu, en aktif fay hatlarının ise Vrbas, Treskavica ve

Stolac bölgelerinde yer aldığını belirtmiştir. Sonuçlar, benzer sismik aktivitenin gelecekte de devam edebileceğini göstermiştir [37].

Wang, J. H. (2014) tarafından yapılan çalışmada, radon gazının deprem tahmininde bir öncü gösterge olarak potansiyelini inceleyen kapsamlı bir derleme çalışması yapılmıştır. Çalışmada, radon gazının yeraltındaki hareketleri ve emisyonlarındaki anormalliklerin, büyük depremlerden önce gözlemlenen önemli bir gösterge olduğu vurgulanmıştır. Radon gazı, yeraltı gerilim değişimlerinin bir sonucu olarak salınabilir ve bu salınımlar, özellikle aktif fay hatlarının yakınlarında belirginleşebilir. Çeşitli sismik bölgelerde yapılan ölçümler ve gözlemler, radon seviyelerindeki artışların depremlerden birkaç gün ila birkaç hafta önce meydana geldiğini göstermiştir. Çalışma, radon gazı izlemelerinin, deprem tahmini için bir öncü parametre olarak kullanılabileceğini ve bu tür izlemelerin deprem öncesi erken uyarı sistemlerine katkı sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Ancak, radon gazı seviyelerindeki değişimlerin her zaman bir depremle ilişkilendirilemeyeceği ve daha fazla veri ve uzun süreli gözlem yapılması gerektiği belirilmiştir [38].

Woith, H. tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada, radon gazının depremler öncesinde bir öncü belirteç olma potansiyeli incelenmiştir. Çalışma, 100'den fazla yayını analiz ederek, anomali sayısı ile yayınlanan zaman serilerinin uzunluğu arasında negatif bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Zaman serilerinin yaklaşık %50'sinin, gözlem süresinden bağımsız olarak radon anomalisine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, toprak havasındaki radon anomalilerinin, yer altı suyundaki radonlardan yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir. Çalışma, radon seviyelerindeki artışların yaklaşan depremlerle korelasyonlu olduğunu ve zemin sıcaklığı ile nem gibi çevresel faktörlerin radon emisyonunu etkilediğini vurgulamıştır. Sonuç olarak, radon gazının sismik aktivitelerle ilişkisi gösterilmiş, ancak depremlerin tahmininde kullanılabilmesi için daha fazla veri ve uzun dönemli gözlemler gerektiği ifade edilmiştir [39].

Simfors ve arkadaşlarının 2019 yılında yayınladıkları çalışmada radon gazının sismik ve volkanik faaliyetlerin öncüsü olarak kullanılması konusundaki son gelişmeleri incelemişlerdir. Çalışmada radon gazının izlenmesi ile bu olaylar arasındaki ilişki, kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar ele alınarak, bu alandaki mevcut bilgiler ve gelecekteki araştırma yönelimleri kritik bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Araştırma, radon gazının yer altındaki hareketler ve gerilim değişimleriyle ilişkili

olarak, depremler ve volkanik patlamalar öncesinde gösterdiği anormalliklerin bilimsel literatürdeki gelişmelerini incelemiştir. Çalışmada, radon izleme yöntemlerinin doğruluğu, güvenilirliği ve uygulama alanları üzerinde durulmakta; ayrıca, radon gazı konsantrasyonundaki değişimlerin depremlerin önceden tahmin edilmesinde nasıl bir rol oynayabileceği ele alınmıştır. Çalışmada, radon izleme sistemleri kullanılmış ve bu sistemlerle yeraltındaki radon gazı konsantrasyonları sürekli olarak izlenmiştir. Radon gazı ölçümleri, yer yüzeyindeki toprak havasından ve yer altı suyu örneklerinden alınan verilerle yapılmış, ayrıca radon salınımlarındaki anormallikler tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, radon tabanlı izleme sistemlerinin, hem sismik hem de volkanik olayların erken uyarı sistemlerinde önemli bir araç olabileceğini göstermiştir [40].

Wang (2021) çalışmasında, Tayvan'daki depremlerin öncesinde meydana gelen değişimlerin tahmin edilebilirliğini incelemek amacıyla literatürdeki benzer çalışmaları gözden geçirmiştir. Elde edilen bulgulara göre, büyük depremler öncesinde küçük depremlerin sıklığı artmakta, sismik dalgaların frekansları değişmekte ve yeraltı su seviyelerinde ani yükselme veya düşüşler gözlemlenmiştir. Radon gazı ölçümleri, özellikle aktif fay hatlarının yakınlarında yapılmış ve yeraltı su seviyesindeki değişikliklerle birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmada, büyük depremlerden önce radon konsantrasyonlarının arttığı ve bu artışların genellikle depremlerden birkaç gün ila birkaç hafta önce meydana geldiği bulunmuştur. Radon gazındaki bu artışlar, sismik aktiviteyle ilişkilendirilmiş ve özellikle aktif fay hatları yakınında belirginleşmiştir. Rn değişimleri ve γ-ışını emisyonları için T (öngörücü zaman) ile ML (deprem büyüklüğü) arasında pozitif bir korelasyon saptanmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular, radon gazının depremlerin öncesinde bir uyarı işareti olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir [41].

Toader ve arkadaşlarının 2021 yılında yayınladıkları çalışmada, radon izleme ağlarının sismik bölgelerde nasıl kurulabileceği ve deprem tahminine katkıları ele alınmıştır. Çalışmada, radon gazının sismik aktiviteleri gösterebilme potansiyeli vurgulanmıştır. Çalışmada, radon ölçümleri, Romanya'nın Vrancea bölgesinde kurulan çok disiplinli bir gerçek zamanlı izleme ağı aracılığıyla yapılmıştır. Bu ağ, radon gazı konsantrasyonlarını sürekli olarak izlemek için özel olarak tasarlanmış sensörler ve dedektörler kullanmıştır. Ekipman, verileri uzun süre depolayabilmekte ve daha sonra manuel olarak indirilebilecek şekilde tasarlanmış olsa da, şu anda gerçek zamanlı veri

toplama yapabilen bir sistem olarak çalışmıştır. Çalışmada, büyük depremlerden birkaç gün ila birkaç hafta önce radon konsantrasyonlarında artışlar gözlemlenmiş ve bu değişimlerin, yeraltı su seviyesindeki dalgalanmalarla ve özellikle aktif fay hatları yakınındaki bölgelerle korelasyonlu olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, radon gazının depremler öncesinde potansiyel bir öncü gösterge olarak kullanılabileceği ve bu izlemelerin deprem tahminine katkı sağlayabileceği önerilmiştir [42].

Huang ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, radon gazının depremler öncesindeki değişimlerinin belirleyici etkenleri incelenmiştir. Çalışma, radon konsantrasyonlarının yeraltı gerilim değişimlerinden, fay hareketlerinden, yer altı su seviyelerindeki dalgalanmalardan ve çevresel koşullardan nasıl etkilendiğini analiz etmiştir. Radon emisyonları, yer altındaki gerilim değişimleri ve fay hareketleriyle ilişkilendirilerek gözlemlenmiştir. Radon ölçümleri, yeraltı radon gazı dedektörleri ve sensörleriyle yapılmış, bu sensörler sürekli olarak radon konsantrasyonlarını izleyip kaydetmiştir. Ölçümler özellikle aktif fay hatlarının yakınlarında yoğunlaşmış ve radon salınımındaki değişikliklerin yeraltı su seviyesindeki dalgalanmalarla ilişkilendirildiği gözlemlenmiştir. Meteorolojik faktörler, toprak nemi ve sıcaklık gibi çevresel parametrelerin de radon emisyonlarını etkileyebileceği belirtilmiştir. Çalışmada, radon konsantrasyonlarındaki artışların büyük depremlerden birkaç gün ila birkaç hafta önce meydana geldiği bulunmuştur. Bu bulgular, radon gazının depremler öncesinde potansiyel bir öncü gösterge olarak kullanılabileceğini ve izlemelerin deprem tahminine katkı sağlayabileceğini göstermiştir [43].

Stoulos ve arkadaşlarının 2024 yılında yaptığı çalışmada, radon gazının yer altındaki kırılma bölgeleri ve fay hatlarındaki değişimlerinin, depremler öncesinde potansiyel göstergeler olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. İlk aşamada radon verileri, katı hal iz dedektörleriyle toplanmış, daha sonra sürekli izleme cihazları kullanılmıştır. Deprem ve radon gazı verileri seri analizi yöntemiyle incelenmiş, meteorolojik etkiler zaman serisi analiziyle ortadan kaldırılmıştır. Radon gazı ile büyüklüğü 3.5 – 6.5 arasında olan depremler arasında korelasyonlar bulunmuştur. Ayrıca, radon gazı akışının ve salınımının jeolojik yapı ve koşullarla ilişkisini modellemek için matematiksel ve fiziksel teknikler kullanılmıştır. Çalışma, bazı depremlerden önce radon gazı salınımlarında belirgin bir artış gözlemlense de, bu artışın her durumda kesin bir gösterge oluşturmadığını ve radon gazı seviyelerindeki değişimlerin yerel jeolojik yapılar ve çevresel koşullarla ilişkili olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, radon

gazının deprem tahmininde bir gösterge olabileceğini, ancak daha fazla araştırma ve entegrasyon gerektiğini ortaya koymuştur [44].

Chowdhury ve arkadaşlarının 2024 yılında yayınladıkları çalışmada, son yirmi yılda toprak gazındaki radon konsantrasyonu ve atmosferik toplam elektron içeriği (TEC) gibi iki potansiyel deprem öncülü üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Çalışma, özellikle radon gazı salınımındaki değişikliklerin yer yüzeyindeki sismik aktivitelerle ilişkisini araştırmıştır. Radon konsantrasyonları, çeşitli sismik bölgelerde yeraltı gaz ölçüm cihazlarıyla izlenmiş ve depremlerden önce radon seviyelerindeki anormal artışlar tespit edilmiştir. Ayrıca, iyonosferdeki TEC verileri uydu ve yer istasyonları aracılığıyla toplanmış ve deprem öncesi anomalilerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, hem radon gazı hem de TEC değişikliklerinin büyük depremlerden önce önemli öncü göstergeler olabileceği ve bu iki parametrenin birlikte izlenmesinin deprem tahminine daha güvenilir bir yaklaşım sunduğu vurgulanmıştır [45].

Literatürde deprem-radon gazı ilişkisi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde kapalı ortamlarda (özellikle evlerde) yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. 6 Şubat depremleri sonrası meydana gelen artçı deprem sayısı oldukça fazladır. Dolayısıyla bu sismik faaliyetler nedeniyle yukarıda literatüre atıf yapıldığı üzere sismik aktivitelerle birlikte radon salınımının devam edeceği ön görüldüğünden bu durumun ev ortamlarında biriken radon konsantrasyonunu nasıl etkilediği sorusunun cevabını bulabilmek için böyle bir çalışmaya ihtiyaç duyulmuştur ve bu çalışmada pasif örnekleyiciler kullanılarak deprem bölgesindeki everde radon ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar depremden önce bölgede yapılan çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Bu aşamadan sonra literatür taramasına tarihte gerçekleşen büyük depremlerin ardından gerçekleştirilen radon çalışmalarının değerlendirilmesi ve çalışmamıza konu olan deprem bölgesinde depremden önce gerçekleştirilen radon çalışmalarının özeti ile devam edilecektir.

1.1.8 Tarihte gerçekleşen ve büyüklüğü 7'nin üzerinde olan depremler sonrası gerçekleştirilen radon çalışmaları

Orbe ve arkadaşları 2016 yılında Ekvator'un kıyı kenti olan Muisne'de meydana gelen 7,8 büyüklüğündeki deprem sonrasında Ekvatoru'un And Dağları bölgesinde belirlenen beş jeolojik birimde radon ölçümleri yapmıştır. Araştırma kapsamında yer altı (50 adet) ve yer üstü (3 adet) kökenli toplam 53 noktadan alınan su numunelerinde

^{222}Rn konsantrasyonu araştırmıştır. Numune alınan yerlerden bazıları 10 şehir içme suyunun da kaynağıdır. Araştırmada RAD7 radon dedektörü kullanılmıştır. Numelerin değerlendirilmesi sonucunda; yeraltı suyunda ölçülen ^{222}Rn seviyeleri ortalama 14,78 Bq/L arasında değişirken, yüzey sularında radon konsantrasyonuna rastlanmamıştır. Elde edilen bu bulgular Avrupa Atom Enerji Topluluğunun belirlediği sınır değer olan 150 Bq/L değerinin altında tespit edilmiştir. Radonun yutulması ve solunması nedeniyle maksimum yıllık etkili dozlar sırasıyla 0,010 ila 0,108 mSv iken numune değerleri 0,008 ila 0,091 mSv arasında değişmiştir. Dolayısıyla bu sular halkın sağlığı açısından risk teşkil etmediği tespit edilmiştir [46].

Paz ve çalışma arkadaşları, 2016 yılında Ekvador'da gerçekleşen 7,8 büyüklüğündeki depremin ardından gerçekleştirdikleri araştırmada, radon gazı konsantrasyon düzeylerini ölçerek, bu gazın miktarını belirlemiş ve depremle ilişkili kritik bölgeleri tespit etmek amacıyla çalışmalar yapmıştır. Ölçümler 2017 yılının temmuz ayından Ekim ayına kadar mağara içindeki üç farklı izleme noktasında gerçekleştirilmiştir. İzleme 2017 yılının kurak mevsimi (Temmuz-Ağustos) ve yağışlı mevsimi (Eylül-Ekim) boyunca mağaranın 3 farklı noktasında, aktif algılama aracı olarak difüzyon kamerası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mağaranın farklı bölgelerindeki turist akışına göre izleme noktaları belirlenmiştir. Dört ay süren çalışma boyunca aktif örnekleme yöntemiyle radon konsantrasyonlarının izlenmesi sonucunda, havalandırma nedeniyle en yüksek ortalama radon konsantrasyonunun mağara girişindeki ilk izleme noktasında 1381 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir. Bu arada en yüksek radon konsantrasyonu sıcaklıkların düşmesi nedeniyle yağışlı mevsimde mağaranın derinliklerindeki izleme noktasında 4100 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir. Bölgede böyle bir çalışma daha önce yapılmadığı için önceki çalışmalar ile kıyaslanamamıştır. Bulgular tüm bölgede yüksek seviyelerde radon bulunduğunu ortaya koymuştur [47].

Rijal ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları bu çalışma kapsamında 2015 yılında Nepal'in Katmandu vadisinde meydana gelen 7.8 büyüklüğündeki deprem ile radon konsantrasyonu ilişkisini araştırmıştır. Katmandu vadisinin Gorkha ve Sindhupalchowk bölgelerinde depremden etkilenen konutlarda iç mekân radon konsantrasyonu için araştırma yapılmıştır. Çalışmada "Katı Hal Nükleer İz Dedektörü (SSNTD)" olan pasif radon dozimetresi LR-115 kullanılmıştır. Katmandu vadisindeki konutlardaki radon konsantrasyonu ortalama değeri 67,63 Bq/m^3 olarak tespit

edilmiştir. Gorkha bölgesi için ortalama 104,64Bq/m^3 ile 363±65 Bq/m^3 arasında değişirken, Sindhupalchowk için ortalama radon konsantrasyonu 78,46 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir [48].

Kayakökü ve arkadaşları 2011 yılında Van'da 7,2 şiddetinde meydana gelen deprem sonrasında deprem bölgesi ve çevresinde araştırma yapmıştır. 2020 yılında yaptıkları bu çalışmada Van Gölü yüzey suyundan örnekler alarak radon konsantrasyonu ölçümleri yapmışlardır. Aktif fay hattı bulunan Tatvan'dan Erciş'e kadar olan kıyı şeridi boyunca ilkbahar ve sonbahar aylarında alınan yüzey suyu örneklerinde radon konsantrasyonu incelenmiştir. Ölçümler CR-39 katıhal nükleer iz dedektörleri ve RadoSYS radon ölçüm sistemi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen verilerle radon ölçüm parametrelerini (C_{Rn}, E_s, E_m ve E_{CRa}) hesaplanmışlardır. Çalışma sonucunda sonbaharda alınan su örneklerinin minimum, maksimum ve ortalama radon konsantrasyon değerleri; 28.28±2.61, 171.17±15.80 ve 64.94±5.99 Bq/L iken ilkbaharda yapılan ölçümlerde minimum, maksimum ve ortalama radon konsantrasyon değerleri; 10.00±0.92, 80.85±7.45 ve 40.43±3.73 Bq/L olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada Van Gölü'nün 24 farklı noktasından ilkbahar ve sonbahar aylarında alınan yüzey suyu örneklerinde hesaplanan radon konsantrasyonu değerleri, Avrupa Komisyonu ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından içme suyu için önerilen 100 Bq/L (100x10^3 Bq/m^3) değerinin altında çıkmıştır. Bu çalışmada su numunelerinde elde edilen sonuçların yukarıda yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlardan ve su için verilen sınır değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür [49].

Karatepe ve arkadaşları (2021), Van'da 7.2 büyüklüğündeki deprem sonrasında, Van Gölü kıyısındaki Tatvan, Ahlat ve Adilcevaz bölgelerindeki sahil kumlarında radon gazı aktivite seviyelerini ölçmüşlerdir. Nemrut ve Süphan volkanik alanları etrafındaki 15 farklı noktadan alınan sahil kumu örnekleri, CR-39 pasif katıhal iz detektörü (SSNTD) ile analiz edilmiştir. Elde edilen verilerle radon konsantrasyonları belirlenmiş ve en yüksek değer 459.42 ± 7.41 Bq/m³, en düşük değer ise 105.34 ± 3.09 Bq/m³ olarak bulunmuştur. Ortalama radon aktivitesi 193.30 Bq/m³ olarak hesaplanmış ve Tatvan bölgesinde en yüksek, Adilcevaz'da ise en düşük seviyeler tespit edilmiştir. Kriging yöntemiyle yapılan kontur haritası, en yüksek radon aktivitesinin Nemrut yanardağı eteklerinde yoğunlaştığını göstermiştir. Bu bulgular, daha önceki çalışmalarla tutarlıdır [50].

Iqbal ve arkadaşları (2012), 2005 yılında Pakistan'ın Azad Keşmir bölgesinde meydana gelen 7.6 büyüklüğündeki deprem sonrası kapalı alanlardaki radon seviyelerini değerlendirmişlerdir. Radon ölçümleri, Kodak CN-85 Katı Hal Nükleer İz Dedektörleri ile pasif zaman entegre yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde, dozimetreler yaz aylarında evlerin yatak odaları, çizim odaları ve mutfaklarına 60 gün süreyle yerleştirilmiştir. Pucka ve Kucha konutlarında yapılan ölçümler analiz edildiğinde ortalama radon konsantrasyonları 71 ± 15 Bq/m^3 ve 75 ± 16 Bq/m^3 olarak belirlenmiştir. Çalışma bölgesinin genel ortalama radon konsantrasyonu ise 72.93 ± 15 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bodrum katları betondan yapılmış ve havalandırması iyi olan evlerin radon seviyelerinin, toprak bodrum katları olan ve havalandırması zayıf olan Kucha evlerine göre daha düşük olduğu da araştırma bulgularında yer almaktadır. Radon konsantrasyonlarının ABD EPA'nın eylem sınırı olan 148 Bq/m^3'ten daha yüksek olduğu ve bazı belirli yerlerde uygun önlemlerin alınması gerektiği sonucuna varılmıştır [51].

Çizelge 1.3: Tarihte gerçekleşen ve büyüklüğü 7'nin üzerinde alan depremler sonrası gerçekleştirilen radon araştırmaları

Deprem Üssü	Deprem Yılı	Deprem Şiddeti	Radon Çalışması		
			Toprakta(Bq/m^3)	Havada(Bq/m^3)	Suda (Bq/L)
Ekvator, Muisne	2016	7,8	-	-	14,78
Ekvator, Muisne	2016	7,8	-	1381	-
Katmandu, Nepal	2015	7,8	-	67,63	-
Van, Türkiye	2011	7,2	-	-	40,43 (ilkbahar)
Van, Türkiye	2011	7,2	240,96 (Tatvan)	-	-
Azad Keşmir,Pakistan	2005	7,6	-	72,93	-
İzmit, Türkiye	1999	7,4	105 (1. Periyot)	-	-

Depremler sonrası radon araştırmalarının yapıldığı ve yukarıda özetlediğimiz çalışmaların özeti Çizelge 1.3'de, dünyada meydana gelen 7 ve üzeri depremlerin listesi ise Çizelge 1.4'de, verilmiştir.

Çizelge 1.4: Dünyada meydana gelen 7 ve üzeri büyüklükteki depremler [53-54].

Sıra	Yıl	Konum	Şiddet	Etki	Referans
1	1811	New Madrid, ABD	7,5	Etki düzeyi düşük.	Britannica
2	1835	Caracas, Venezuela	7,7	26.000	Wikipedia
3	1886	Concepoion, Şili	8,5	35	
4	1906	South Carolina, ABD	7,3	60	
5	1908	California, ABD	7,9	700	
6	1920	Messina, İtalya	7,5	110.000	

7	1923	Gansu, Çin	8,5	200.000	
8	1931	Tokyo, Japonya	7,9	142.800	
9	1935	Hawke Bay, Yeni Zelanda	7,9	256	
10	1948	Quetta, Pakistan	7,5	20.000	
11	1950	Aşkabat, Türkmenistan	7,3	176.000	
12	960	Assam, Hindistan	8,7	574	
13	1964	Valdiva,Şili	9,5	1655	
14	1970	Alaska, ABD	9,2	131	
15	1976	Chimbote, Peru	7,9	70.000	
16	1976	Guatemala	7,5	23.000	
17	1979	Tangshan, Çin	7,5	242.000	
18	1985	Tumaco, Kolombiya	7,7	600	Britannica
19	1989	Meksika	8,1	10.000	
20	1999	Loma, ABD	7,1	62	
21	1999	İzmit, Türkiye	7,4	17.000	
22	2001	Nan-tou, Tayvan	7,7	2.400	
23	2004	Bhuj, Hindistan	8,0	20.000	
24	2005	Sumatra, Endonezya	9,1	200.000	
25	2008	Azad Keşmir, Pakistan	7,6	80.000	
26	2010	Sichuan, Çin	7,9	69.000	
27	2010	Port-au, Haiti	7,0	316.000	
28	2011	Maule, Şili	8,8	521	
29	2011	Christchurch, Yeni Zelanda	7,0	180	
30	2011	Honshu, Japonya	9,0	20.000	
31	2011	Van, Türkiye	7,2	600	
32	2015	Kathmandu,Nepal	7,8	9.000	
33	2016	Muisne, Ekvator	7,8	500	
34	**2023**	**K.Maraş, Türkiye**	**7,7 ve 7,6**	**50.000**	

Mohammed ve arkadaşları (2022), Türkiye'nin aktif fay hatlarından Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde toprak Radon-222 gazı, İyonosferik Toplam Elektron İçeriği (TEİ) ve bazı meteorolojik değişkenlerin depremle ilişkisini incelemiştir. İzmit bölgesinde 1999'da gerçekleşen 7.4 büyüklüğündeki deprem, radon ve deprem çalışmalarına olan ilgiyi artırmıştır. Çalışma kapsamında 1 yıl boyunca elde edilen radon verileri 4'er aylık 3 peryoda ayrılmıştır. 1. Peryot:16 Aralık 2008'den 31 Mart 2009'a kadar, 2. peryot: 1 Nisan 2009'dan 31 Ağustos 2009'a kadar, 3. peryot: 1 Eylül 2009- 31 Aralık 2009 tarihlerini kapsamaktadır ve her peryot 4 aylık verileri içermektedir. Çalışma kapsamında toprak radon gazı ölçümlerinin takibi online olarak gerçekleştirilmiştir. Radon gazı ölçümlerinde Alpha Meter 611 dedektörü kullanılmıştır. Toprak radon gazı her 15 dakikada bir alpha meter dedektörü ile ölçülmüştür. Çapraz korelasyon yöntemi ile elde edilen bulgular analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında mikrodepremlerin radon ve sismo-iyonosferik eşleşme çalışmaları incelenmiştir. İnceleme sonuçlarına göre; 1. peryot için ortalama radon konsantrasyonu 105 Bq/m^3, İkinci periyot için ortalama radon konsantrasyonu 165 Bq/m^3, üçüncü periyot için ise 45 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda; mikro depremlerin etkisi altında iyonosferik toplam elektron içeriği ve radon arasında anlamlı bir korelasyon bulunamamıştır. Depremin

merkez üssü uzaklığı ve odak derinliği radon gazı konsantrasyonuyla ters orantılı bulunmuştur. Meteorolojik veriler, özellikle hava atmosfer basıncı, TEC-Rn anomalileri üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak daha net socuçlar alınması için daha fazla çalışma yapılması gerektiği düşünülmektedir [52].

1.1.9 Deprem bölgesinde daha önce yapılan radon araştırmaları

Önceki adıyla TAEK şimdiki adıyla TENMAK tarafından 2014 yılında tamamlanan çalışma ile Türkiye radon haritası çıkartılmıştır [55]. Bu çalışmada 81 ilde 153 yerleşim biriminde toplam 7293 evde radon konsantrasyon ölçümleri yapılmıştır. Bu rapordan aşağıda Çizelge 1.5'de verildiği üzere projemiz kapsamında dedektör dağıtılan illere ait radon konsantrasyonu istatistikleri alınarak listelenmiştir.

Gümbür 2022 yılında yapılmış olan tez çalışmasında "Doğu Anadolu Fay Zonu Uzanımında Bulunan Gölbaşı (Adıyaman)-Türkoğlu (Kahramanmaraş) Segmenti üzerinde radon gazı değişimlerinin deprem ile ilişkisi ve doğal radyoaktivitenin belirlenmesi üzerine araştırma yapmıştır.

Çizelge 1.5: Proje kapsamında dedektör bırakılan illerde TAEK tarafından deprem öncesinde 2014 yılında yapılan radon konsantrasyonu sonuçları [56].

İl Adı	İlçe Adı	Ölçüm Yılı	Ev Sayısı	Min.	Max.	Art. Ort.	Ger. Ort.	Geo. Std. Sapma
Adana	Merkez	1991-2005	83	6	109	40	34	1.8
Adıyaman	Merkez	1994	43	7	95	16	14	1.5
Hatay	Merkez	2009	73	3	174	50	37	2.4
Malatya	Merkez	2000	27	20	79	48	46	1.3
K.Maraş	Merkez	1994	45	9	45	25	23	1.4
Ş.Urfa	Merkez	2011	24	44	138	74	70	1.4
Gaziantep	Merkez	1997	27	18	109	50	46	1.5

Çalışma kapsamında 4 (dört) farklı istasyon belirlenmiş, belirlenen bu istasyonlardan yaz ve kış mevsimleri için 4 (dört)'er adet olmak üzere toplam 8 (sekiz) adet toprak örneği alınmıştır. Alınan toprak önekleri Durridge Rad7 aktif radon dedektörü kullanılarak analiz edilmiştir. Bunlara ilaveten, ayda bir kez olmak üzere, Aralık 2019 ile Kasım 2020 tarihleri arasında, belirlenen her bir istasyonda Durridge Rad7 aktif radon dedektörü kullanılarak topraktaki radon gazı aktivite konsantrasyonları ölçülmüştür. Topraktaki radon gazı aktivite konsatrasyonlarının ölçüldüğü tarihlerde istasyonların yakın çevrelerindeki kuyu sularından da örnekler alınmış olup; bu sularda radon gazı aktivite konsatrasyonları Durridge Rad7 dedektörü kullanılarak ölçülmüştür. Bu kuyu sularının radon aktivite konstantrasyonları, uluslararası

kuruluşların belirlediği içme sularında limit değerler ile karşılaştırılmıştır. İstasyonlardan alınan örnekler incelendiğinde; sudaki ortalama radon aktivite konsantrasyonları Çiğli'de 80 kBq/m^3, Kapıçam 'da 62,67 kBq/m^3, Öksüzlerde 77,17 kBq/m^3 ve Kuyumculardа ise, 72,17 kBq/m^3; topraktaki ortalama radon aktivite konsantrasyonlarına bakıldığında, Çiğli'de 96,83 kBq/m^3, Kapıçam 'da 77,92 kBq/m^3, Öksüzler 'de 91,42 kBq/m^3 ve Kuyumcular 'da ise, 90 kBq/m^3 olarak tespit edilmiştir. Suda elde edilen ortalama radon değerleri, USEPA'nın 1991 de tavsiye ettiği 11 Bq/L ve UNSCEAR'ın 2008 de önerdiği 4-40 Bq/L'nin üzerindedir. Topraktan elde edilen ortalama radon aktivite değerleri ise, TENMAK tarafından önerilen değerlerin çok üstündedir. Dört istasyondaki Aralık 2019-Kasım 2020 tarihlerini kapsayan bir yıllık topraktaki ve sudaki radon gazı ölçümleri ile kayıtlı depremlerin listesini birlikte veren grafikler incelendiğinde; aylık olarak ölçülen radon gazı ölçümlerinde bir önceki aya göre ani düşüş veya artışların meydana geldiği tarihlerde, genel olarak depremlerin de oluştuğu tespit edilmiştir. Daha net sonuçlara ulaşmak için daha fazla araştırma yapılması gerektiği vurgulanmıştır [57].

Küçükönder ve arkadaşları 2022 yılında yayınlamış oldukları yayında Kahramanmaraş ilinde sebze ve meyve örneklerinde radon konsantrasyonu, soluma hızı, etkin radyum içeriği ve yıllık etkin dozun belirlenmesi amacı ile bir çalışma yapmıştır. Çalışma kapsamında 10 farklı yerden toplam 17 sebze ve meyve örneği toplanmıştır. Ölçüm için CR-39 pasif iz radon dedektörü kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları analiz edilerek meyve ve sebze örneklerinde radon konsantrasyonu 94.31 ± 7.74 ila 341.29 ± 37.20 Bq/m^3 aralığında bulunmuştur [58].

Küçükönder ve arkadaşı, 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada Kahramanmaraş ilinin şehir merkezini besleyen merkezi su dağıtım şebekesinin bulunduğu Karasu ve Pınarbaşı'ndan bulunan doğal kaynak sularından ve şebeke sularından toplam 42 su örneği alınarak radon konsantrasyonu ve radon soluma oranı analizi yapılmıştır. Ölçümlerde CR-39 pasif iz dedektörü kullanılmıştır. Doğal kaynak suyu örneklerinde radon konsantrasyonu 174,7 ±18,7 Bq/m^3 ile 211,7± 30,7 Bq/m^3 arasında, Şebeke suyu örneklerinde ise radon konsantrasyonları 80,6 ± 3,9 Bq/m^3 ile 303,0 ± 21,8 Bq/m^3 arasında değiştiği rapor edilmiştir. Bu değerler, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA), Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi (UNSCEAR), Avrupa Birliği (AB) Komisyonu ve Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) içme suyu güvenli sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma

sonucunda; elde edilen araştırma sonuçlarının içme suyu için önerilen güvenli sınır değerlerin çok altında olduğu belirlenmiştir [59].

Küçükönder 2021 yılında yapmış olduğu çalışmasında, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi (KSÜ), Avşar Yerleşkesi'nde bulunan tüm binalarda bina içi, mevsimsel olarak radon gazı aktivitesi DURRIDGE Rad7 elektronik radon dedektörü kullanarak ölçmüştür. Bina içi kışlık radon konsantrasyon değerleri 8,52 ±3,24 ile 53,12±16,46 Bq /m^3 arasında, Yazın ise radon konsantrasyon değerleri 4,74±1,34 ile 22,79±9,28 Bq/m^3 arasında tayin edilmişidir [60].

Canbazoğlu ve arkadaşları 2020 yılında yayınladıkları çalışmada Kilis ilinde içme sularındaki radon konsantrasyonunun halk sağlığı açısından tehdit oluşturup oluşturmadığı incelenmiştir. Bu amaçla Kilis ilinden toplam 49 adet içme suyu örneği alınmıştır. Ölçümlerde CR-39 pasif nükleer iz dedektörü kullanılmıştır. İçme sularındaki radon konsantrasyonu değerleri 0,69 ile 6,39 Bq/L arasında değişirken ortalama radon değeri ise 1,86 Bq/L'dir. Elde edilen radon konsantrasyon bulguları, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından önerilen 11,1 Bq/L'nin altında çıkmıştır. Yutma, soluma, mide ve akciğer için ortalama etkin doz değerleri; 4,75 μSv/y, 4,69 μSv/y, 0,57 μSv/y ve 0,56 μSv/y olarak tespit edilmiştir. Bu değerler Dünya Sağlık Örgütü tarafından kabul edilen 0,1 mSv/y değerinin oldukça altında tespit edilmiştir [61].

Kayakökü ve arkadaşı 2022 yılında yaptıkları çalışmada Malatya'nın Hekimhan ve Kuluncak ilçelerinde maden yataklarına yakın lokasyonlarda topladıkları toprak örneklerinde radon konsantrasyonlarını araştırmıştır. Radon ölçümleri için CR-39 pasif nükleer iz dedektörleri kullanılarak kapalı kutu tekniğiyle belirlenmiştir. Radon konsantrasyonları 1226,73 ± 24,28 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir. Radon konsantrasyonlarının uluslararası kabul edilebilir limitlerin üzerinde olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmadaki radon konsantrasyonunun izin verilen sınır değerlerinin oldukça üzerinde olması, bölgenin radonun ana kaynağı olan uranyum açısından da zengin olabileceğini göstermektedir. Çalışma alanı zengin maden yataklarına (mangan, demir cevheri, krom, alçıtaşı, vermikülit, dolomit, florit, linyit, tras, mermer, çimento, flok) sahip olup, bölgede yapılan bazı çalışmalar bölgenin uranyum açısından zengin olduğunu göstermektedir. Çalışma alanı 2. Derece deprem bölgesi olup yoğun magmatik ve tektonik yapılar içerdiği tespit edilmiştir. Radon konsantrasyonunun

yüksek olmasının bir nedeni de tektonik yapıların yoğunlukta olması olarak düşünülmektedir [62].

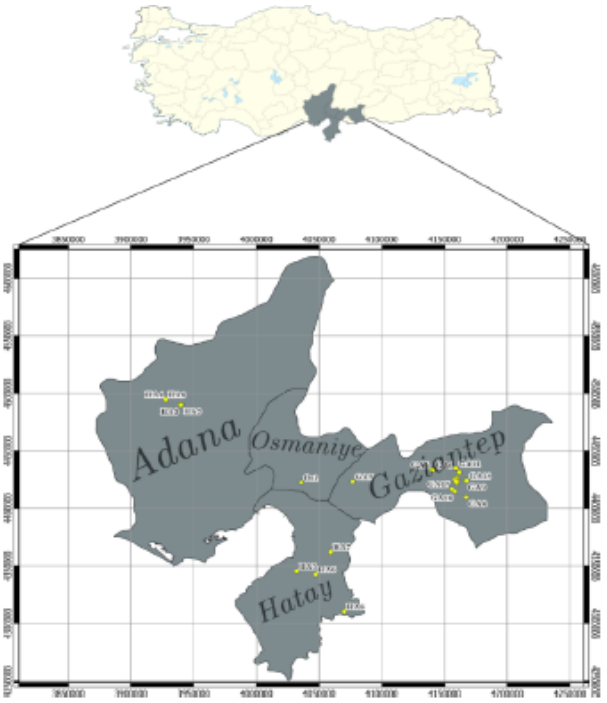
Kutlu 2016 yılında yayınladığı yüksek lisans tez çalışmasında Hatay ilinde belirlenen turistik ve tarihi mekanlarda radon gazı ölçümü yaparak radon gazının insanlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma Hatay ili sınırlarındaki cami, kilise, müze, farklı ibadethanelerde yürütülmüştür. Çalışma kapsamında binalara CR-39 radon dedektörü yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu dedektörler 2 ay süre muhafaza edilmiştir. Detektörlerde bulunan filmlerin üzerinde Radon'un bozunma ürünlerinin yaptığı alfa ışımaları sonucu izler oluştuğu gözlenmiştir. Ölçüm sonuçları analiz edildiğinde toplam 45 noktadan alınan örneklerdeki radon konsantrasyon değerleri en düşük Mahremiye Camiinde 24 Bq/m^3 ile St. Pierre Kilisesi'nde ise 202 Bq/m^3 arasında değişmektedir. Antakya, Belen, Samandağ ve İskenderun ilçelerinde toplanan dedektörlerden elde edilmiş olan radon yoğunluklarının ortalamasına bakıldığında en yüksek değerler Samandağ ilçesinde 84,5 Bq/m^3 ve Antakya ilçesinde ise 64,8 Bq/m^3 olarak belirlenmiştir. Bölgenin jeolojik yapısı incelendiğinde çoğunlukla kalkler, taş ve oyukların çoğunlukta olduğu için radon gazının bu bölgelerde yoğunlaşması normal olarak değerlendirilmiştir [63].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Örnekleme Noktaları ve Dedektörlerin Adreslere Dağıtılması

6 Şubat 2023'te, Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde, Türkiye saati ile 04:17 ve 13:24'te, merkez üssü Pazarcık ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw: 7.7 ve Mw: 7.6 büyüklüğünde iki büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin ardından artçı şoklar devam ederken, 20 Şubat 2023'te Hatay ilinin Yayladağı ilçesinde Mw: 6.4 büyüklüğünde 'tetiklenmiş' bir deprem daha kaydedilmiştir. Depremler, Kahramanmaraş, Hatay, Adıyaman, Gaziantep, Malatya, Kilis, Diyarbakır, Adana, Osmaniye, Şanlıurfa ve Elazığ illerinde yoğun şekilde hissedilmiş ve büyük can kayıpları ile ağır yapısal hasarlara yol açmıştır. Depremin ardından gerçekleşen sismik aktivitelerin sıklığı nedeniyle açığa çıkan radon gazının yüksek olacağı bilgisinden hareketle, bu çalışma ile açığa çıkan radon gazının kapalı ortamlarda birikmesiyle ilgili olarak bir araştırma gereçekleştirilmek istenmiştir. İlk etapta depremin ardından elimizde mevcut olan 50 adet radon dedektörü zaman kaybetmeden sahaya ulaştırılarak, sürecinde karmaşasıyla, mümkün mertebe dağıtıma uygun adreslere bırakılmıştır. Dedektörler yoğunlukla Hatay ve Gaziantep olmak üzere birkaç dedektör Adana-Aladağ ve Osmaniye de kapalı alanlara bırakılmıştır (Şekil 2.1). İlk etap dedektörlerin bölgede adreslere dağıtımı ve geri alınması süreci 25.02.2023 ile 09.07.2023 tarihleri arasını kapsamaktadır.

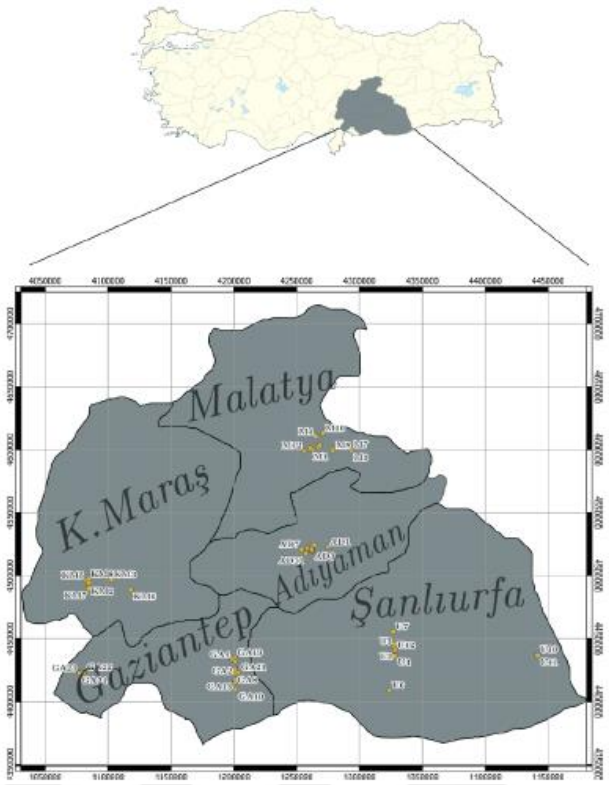
Dedektörler kapalı ortamlarada yaklaşık 2,5-4 ay süreyle bekletilerek adreslerden geri alınmıştır. Radon dedektörleri yerden en az bir metre yüksekte bina içinde uygun yerlere bırakılmaya özen gösterilmiştir. Her bir dedektörün bırakıldığı yerin koordinat bilgileri ve bırakıldığı tarih not edilmiştir. Maruziyet sürecinin ardından dedektörler TENMAK'taki radon izleme laboratuvarına gönderilerek analizleri tamamlanmıştır.



Şekil 2.1: Birinci etapta bölgede dedektörlerin dağılımı.

İlk etapta dağıtılan dedektörlerin bırakıldığı alanlar şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Bölgede yaşanılanlar uzaktan tahayyül bile edilemeyecek boyutlarda olduğundan, radon dedektörleri nispeten daha güvenli olduğu düşünülen ortamlara bırakılmaya çalışılmıştır. Bölge insanımızın müsaadesini almak ve adres tespiti yapabilmek için bölgede yaşayan öğrenciler ve tanıdıklardan destek alınmıştır. Daha öncesinde TÜBİTAK'ın desteğiyle Rize İli'nde akciğer kanserli hastaların evlerinde yürütülen projeden tecrübe ile (Proje No: 112S652) insanımızın hassas oldukları bir dönemde bu tip çalışmaları yürütmek ve insanımızı bu işi yürütmek için ikna etmek oldukça zor olmuştur [64]. Hele hele 50 binin üzerinde insanımızı kaybettiğimiz, yerle bir olmuş binaların olduğu ve her gün beşik gibi sallanan bir bölgede kapalı ortamlarda bu tip bir çalışmanın yürütülmesi daha da zordur. Bu hususta riskli durumlar, hassasiyetler ve zorlukların farkında olarak hareket edilmiştir. Bölgenin karışık durumu (yıkılmış binalar, yıkım kararı çıkmış ağır hasarlı ve orta hasarlı binalar, artçıların ve yeni depremlerin devam etmesi nedeniyle bir dakika sonra nasıl bir durumla karşılaşılacağının kestirilememesi, bölge halkının şehirleri terk etmesi, enkaz kaldırma çalışmalarının yapılıyor olması, insanımızın tarifsiz acılar içerisinde olması vb.) dikkate alınarak radon dedektörleri dağıtılmıştır. Dedektörler,1. derece yakınını (çocuk, anne, baba, kardeş, eş) kaybetmeyen hane sahiplerinin evlerine bırakılmıştır.



Şekil 2.2: İkinci etapta dedektörlerin dağılımı.

Depremin etkilediği alan çok büyük olduğu için bölgeyi daha çok veriyle tespit edebilmek ve sahaya dağıtılan dedektörlerin analizlerini gerçekleştirebilmek amacıyla TÜBİTAK 1002b programına başvuru yapılmıştır. TÜBİTAK'tan gelen destekle birlikte 2. Etap çalışması için 50 adet yeni dedektörün temini sağlanmış ve 2. Etap çalışması başlatılmıştır. 2. Etap çalışması 01.08.2023 ve 19.12.2023 tarihleri arasını kapsamaktadır. 2. Etap çalışmaları gerçekleştirirken ilk etap saha çalışmasından sonra geçen sürede bölgede artçı sarsıntıların şiddetinin nispeten azaldığı ve iklim parametrelerinin radon dağılımını doğrudan etkilediği bilgisinden hareketle ilk etapta dedektör dağıtılan bazı noktalara tekrar dedektör dağıtma ihtiyacı hissedilmiştir. Bu nedenle ek bütçe talebi, fasil aktarımı ve üniversitemiz BAP biriminde desteği ile sağlanan bütçeyle yeniden dedektör satın alınmış ve böylece bölgede 2. etapta sahaya dağıtılan dedektör sayısı 50 den 89'a çıkartılmıştır. Dedektörlerin sahaya dağılımı Şekil 2.2'de verilmiştir. İkinci etapta dağıtılan dedektörlerin illere göre dağılımı; Gaziantep (16 adet), Kahramanmaraş (25 adet), Malatya (15 adet), Adıyaman (20 adet) ve Şanlıurfa (13 adet) şeklindedir. İkinci etabın ardından sahadan alınan dedektörlerin Analizleri tekrar TENMAK'a gönderilerek tamamlanmıştır.

2.2 Radon Dedektörleri ve Dedektörlerin Analizi

Bu araştırmada, radon izlerini tespit etmek için RadoSys firması tarafından üretilen CR-39 pasif iz dedektörleri kullanılmıştır (Şekil 2.3.a, Şekil 2.3.b ve Şekil 2.3.c). Bu iz dedektörleri, 35 x 55 mm boyutlarında silindirik bir şekle sahip olup, dedektör çipi plastik bir kutunun alt kısmında yer alır. Çipin yüzey alanı 10x10 mm ve kalınlığı 1 mm'dir. İz dedektörlerinin yüzeyi polipropilen malzeme ile kaplanmıştır. Radonun bozunması sırasında meydana gelen alfa parçacıkları, dedektör çipinin yüzeyine izler bırakır. Bu izler, otomatik bir iz sayım sistemiyle sayılır. Sistem, bilgisayara bağlı gelişmiş bir optik mikroskop, banyo ünitesi ve radon dedektörlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.3). Radon gazına maruz kalan CR–39 dedektör cipleri üzerinde oluşan alfa izlerinin görünür hale getirilmesi için kimyasal iz kazıma yöntemi kullanılmaktadır. Daha sonra sayım işlemi yapılmaktadır. CR-39 dedektör çipindeki alfa izlerinin yoğunluğu, cm^2 başına sayılarak, 200x büyütme yapan bir optik mikroskopla incelenir. Her bir iz dedektörünün kapalı bir alanda yerleştirildiği ve toplandığı tarihler, bilgisayara kaydedilen veriler aracılığıyla girilir. Bu kayıtlar sayesinde, radon aktiviteleri Bq/m^3 cinsinden hesaplanır.



Şekil 2.3: (a) RSKS tipi CR-39 pasif radon dedektörü, **(b)** RSKS tipi CR-39 dedektörüne ait difüzyon kabı ve dedektör çipi, **(c)** Radosys ölçüm sistemi ve alfa izleri.

İz dedektörlerinin yüzeyi, alfa parçacıklarına duyarlı olan ve ^{220}Rn (Toron) ile toz partiküllerinin girişini engelleyen polipropilen ile kaplanmıştır. Sadece radon gazı, difüzyon yoluyla bu dedektörlere girebilmektedir. Radonun bozunması sonucu ortaya çıkan alfa parçacıkları, dedektör çipinin yüzeyinde izler bırakır. CR-39 radon iz dedektörleri kullanılarak, aynı anda birden fazla evde radon konsantrasyonu ölçülebilir.

Üç ay süreyle radon gazına maruz bırakılan dedektörler, TENMAK'ta RadoSys otomatik iz sayım sistemiyle analiz edilmiştir. Bu sistem, bilgisayara bağlı gelişmiş bir optik mikroskop, bir banyo ünitesi ve radon dedektörlerinden oluşmaktadır. Dedektör çipleri, plastik kutularından dikkatlice çıkarıldıktan sonra, her biri Şekil 2.3.b'de gösterildiği şekilde slaytlara yerleştirilmiştir. Her slayt, 12 dedektör çipi almaktadır. Radon gazına maruz kalan CR-39 dedektör çiplerinde oluşan alfa izlerinin görünür hale gelmesi için kimyasal kazıma tekniği uygulanmıştır. Kazıma cihazına 36 slayt yerleştirilebilmektedir, bu da aynı anda 432 dedektör çipinin kazınmasını mümkün kılmaktadır.

2.3 Deneysel Sistem ve Ölçüm İşlemleri

Analizlerde kullanılan bilgisayar, Linux işletim sistemiyle çalışmaktadır. Her bir slayt, sayım ünitesine yerleştirilerek tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. CR-39 dedektör çipindeki alfa izlerinin yoğunluğu, cm^2 başına, 200x büyütme yapan bir optik mikroskopla sayılmıştır. Şekil 2.4'te, ölçüm sistemi ve alfa izlerinin dedektör çipinde bıraktığı izler gösterilmektedir. Ardından, her bir dedektörün dağıtıldığı ve toplandığı tarihler bilgisayara kaydedilmiş ve bu verilerle radon aktiviteleri Bq/m^3 cinsinden hesaplanmıştır.



Şekil 2.4: Radosys ölçüm sistemi ve alfa izlerinin görüntüsü.

2.4 Jeo İstatistiksel Analiz ve Haritalama

Saha çalışması sonucu toplanacak dedektörler analiz edildikten sonra elde edilecek veriler jeoistatistik analiz ve haritalandırma yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu proje

çalışmasında ticari olmayan ve genel kamu lisansına sahip (GNU), açık kaynak kodlu programlar ve veri analiz araçları kullanılmıştır. Kriging analizi, ara değer hesaplamaları, grafiksel gösterim ve istatistiksel hesaplar R programlama [65-66]. ortamı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçların haritalanması için Kuantum Coğrafi Bilgi Sistemleri (QGIS) [67] programı ve R yazılımında yer alan gstat ve sp kütüphane dosyaları kullanılmıştır. Verilerin görselleştirilmesi ve düzenlenmesi için inkscape programı kullanılmıştır [68].

Jeoistatistik, örnekler arası ilişkiyi örneklerin alındıkları koordinatları da hesaba katarak ele alan bir istatistiksel hesaplama metodudur. Bu hesaplama yönteminin, en önemli avantajı yapılan hata miktarının olası güven düzeylerinde belirlenebilmesidir [69]. Belirli bir bölgeden alınan ölçüm sonuçları yalnızca örneklenmiş noktalarda bilinir. Ancak bir dağılım haritası oluşturulabilmesi için örneklenmemiş noktalardaki bilinmeyen değerlerin de tahmin edilmesi gerekir. Literatürde bu tahmin işlemine kestirim (ara değer tahmini) adı verilmektedir [70]. Jeoistatistiksel yöntemlerle, gözlemlerin yapıldığı noktaların konumları ve gözlemler arası korelasyon dikkate alınarak yansız ve minimum varyanslı kestirimler yapılabilmektedir [71]. Kestirim probleminde bölgesel değerlerin uzaklığa bağlı değişimleri basit bir fonksiyonel modelle ifade edilemeyecek kadar düzensizdir [70]. Bölgesel değişkenlerin uzaklığa bağlı değişimleri durağan rastlantı fonksiyonlarının olasılık çatısı altında modellenmesi ile belirlenebilir [72]. Jeoistatistik'te, bölgesel değişkenlerin uzaklığa bağlı değişimleri variogram fonksiyonu ile belirlenir ve bu fonksiyon birbirinden h kadar uzaktaki iki değişken arasındaki farkın varyansı olarak ifade edilir. Değişkenler arasındaki uzaklığın artması ile değişkenlerin değerleri arasında gözlenen farklılıklar artacak, dolayısı ile varyans (veya yarı-varyans) da artacaktır. Varyansın artması, mekânsal değişkenlerin aralarındaki ilişkinin azalması şeklinde yorumlanabilir [73] Ölçüm yapılan tüm uzay için yarı-varyans değeri belirlenmektedir [74]. Yarı-varyans örneklemler arasındaki konumsal bağımlılık derecesinin bir ölçütüdür. Başka bir deyişle uzaklık azaldıkça değerlerin birbirine benzemesi, arttıkça benzerliğin azalması beklenir [75-76]. Bu çalışmada jeoistatistiğin temel yöntemi olan Kriging yöntemi kullanılması planlanmıştır. Bu yöntem, matematiksel olarak, bilinen en iyi lineer yansız hesaplayıcı (BLUE [best linear unbiased estimator]) olarak tanımlanır [77]. Jeoistatistik analizde dağılımın normal olmaması variogramın yapısını bozarak Kriging ağırlıklarının yanlış hesaplanmasına yol açar. Bu yüzden sık sık log-normal

olan deneysel veriler, normal dağılıma uymasını sağlamak için veri dönüşümleri de uygulanmaktadır [78-80]. Son yıllarda çevresel radyasyon değişkenlerinin dağılımların belirlenmesinde ve haritalandırılmasında bu yöntem oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [81-89].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Birinci Etap Bulguları

Araştırmanın birinci etabında örnekleme depremden yaklaşık 20 gün sonra başlatılarak 25.02.2023-09.07.2023 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Sahaya 50 adet dedektör gönderilmiş olup, 25 adet dedektör Hatay ve Adana bölgesine, 25 adedi de Gaziantep bölgesinde ulaştırılmıştır. İlk etapta depremin acısı taze ve bölgede çok fazla kargaşa olduğu için insanları böyle bir çalışmaya ikna etmek oldukça zor olmuştur. Ayrıca dedektörlerin bırakılacağı binaları seçmek bile oldukça zor olduğundan Hatay'da yedi dedektörümüzün dağıtımı gerçekleştirilememiştir. Dedektörler mümkün mertebe depremden az zarar gören adreslere dağıtılmıştır. Örnekleme periyodunun ardından Gaziantepte 3 adet, Hatay da ise 6 adet dedektör geri alınamamıştır. Dedektörlerin geri alınamama nedenleri arasında en önemlileri, dedektör bırakılan binanın yıkılması, bina için yıkım kararının çıkması, enkaz çalışmaları ve adres sahiplerinin şehir değiştirmesidir. Sonuç olarak ilk etapta bölgede toplam 43 adet dedektör dağıtılabilmiş, 32 adedi geri alınarak analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi Çizelge 3.1'de özetlendiği şekildedir.

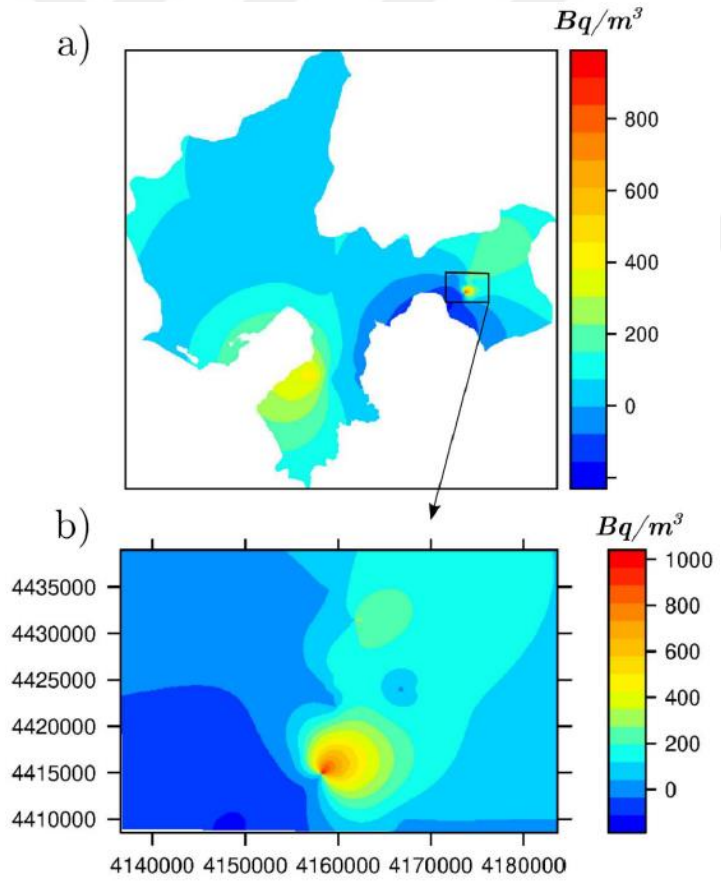
Dedektörler yoğunlukla Hatay ve Gaziantep olmak üzere birkaç dedektör Adana-Aladağ ve Osmaniye de kapalı alanlara bırakılmıştır. İlk etap dedektörlerin bölgede adreslere dağıtımı ve geri alınması süreci 25.02.2023 ile 09.07.2023 tarihleri arasını kapsamaktadır.

Çizelge 3.1: Birinci etap'ta bölgeye dağıtılan dedektörlerin analiz sonuçları.

İl	Ev Sayısı	Ortalama (Bq/m³)	Std.	Geo Ort.	Geo Std.	Min	Ortanca	Max.
Hatay	4	139	199	72	3,34	36	41	437
Adana - Aladağ	6	61	12	60	1,23	43	59	79
G.Antep	21	89	72	68	2,07	26	50	301

Birinci etap analiz sonuçlarında istatistik belirlenirken Gaziantepte yüksek çıkan 1023 Bq/m^3 değeri dahil edilmemiştir.

Hatayda 437 Bq/m^3 değerine Belen Atik mahallesinde bir binanın 1. katında bulunan çocuk odasında rastlanmıştır. Gaziantepte 1023 Bq/m^3 değerine Karataş mahallesinde binanın giriş katındaki yine bir çocuk odasında rastlanırken, 301 Bq/m^3 değerine Yukarıbeylerbeyi mahallesinde giriş katta bulunan bir yatak odasında rastlanmıştır. Hatay ve Gaziantep'te radon konsantrasyonu Türkiye ortalaması olan 81 Bq/m^3 değerinin üzerinde iken Adana'da bu değerin altında bulunmuştur. Gaziantep'te analizi yapılan 22 adet dedektörden 8 adedi Dünya Sağlık Örgütünün baz aldığı 100 Bq/m^3 değerini aşmıştır (103, 118, 137, 174, 181, 194, 301 ve 1023 Bq/m^3). Adana-Aladağ'da yapılan 6 örneklemenin ortalaması 61 Bq/m^3 olmak üzere hem Türkiye ortalaması olan 81 Bq/m^3 hem de WHO'nun limit değeri olan 100 Bq/m^3'ün altında kalmıştır. Hatayda bir noktada ölçülen değer 437 Bq/m^3 iken diğer noktalardaki sonuçlar Türkiye ortalaması ve WHO'nun önerdiği limit değerinin altında kalmıştır. Şekil 3.1'de 1. etap için radon konsantrasyonu dağılımı haritalandırılmıştır.



Şekil 3.1: Birinci etap kapalı ortam radon dağılımı haritası.

3.2 İkinci Etap Bulguları

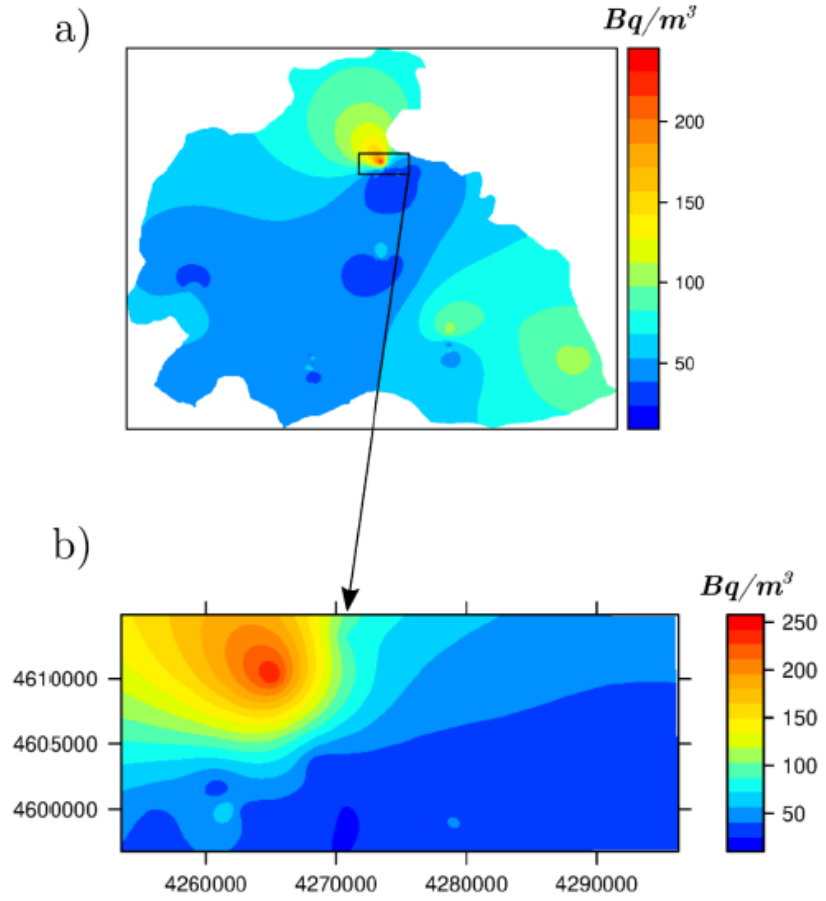
İkinci etap örnekleme peryodu 01.08.2023-19.12.2023 tarihleri arasını kapsamaktadır. Gerçekleşen depremlerden yaklaşık altı ay sonra Kahramanmaraş (15 adet), Adıyaman (15 adet), Şanlıurfa (10 adet) ve Malatya'da (10 adet) olmak üzere 50 adet dedektöre daha ihtiyaç duyularak TÜBİTAK 1002b desteğine ve üniversitemiz BAP birimine başvuru yapılmıştır. İlk etap çalışmanın ardından planlanan ikinci etap çalışması planlanandan biraz fazla sarkmıştır. Bu durumun nedeni ise projenin kabul edilmesi, bütçe transferi ve dedektörlerin temin edilmesi süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca projenin ikinci etap çalışmaları devam ederken birinci etaptan sonra aradan geçen süreçte mevsimsel değişikliklerin belirginleşmesi nedeni ile ilk etapta dedektör bırakılan adreslere yeniden dedektör bırakılmasının anlamlı olacağı öngörülmüştür. Bu nedenle fasıl aktarımı ve ek bütçe talebi ile ek 50 adet dedektör daha temin edilmiştir. Dedektör temin süreci ve örnekleme süreci dahil ikinci etap örnekleme süreci toplamda 4,5 ay kadar sürmüştür. Nihai olarak Kahramanmaraş'ta 14 adet, Urfa'da 13 adet, Malatya'da 14 adet, Adıyaman'da 20 adet dedektöre ilave olarak 1. etap örneklemenin yürütüldüğü Gaziantep'te ise tekrardan 25 adet olmak üzere 2.etapta toplam 86 dedektör daha sahada adreslere dağıtılabilmiştir. Dağıtımı tamamlanan dedektörlerden Malatya'da 1, Kahramamaraş'ta 4, Urfa'da 1, Adıyaman'da 2 ve Gaziantep'te 2 olmak üzere toplam 10 adet dedektör ya kaybolmuş veya sahadan sağlıklı bir şekilde geri alınamamıştır. İkinci etap örneklemenin ardından analizleri tamamlanan dedektörlerin illere göre istatistiksel değerlendirmeleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2: İkinci etapta bölgeye dağıtılan dedektörlerin analiz sonuçları.

İl	Ev Sayısı	Ortalama (Bq/m³)	Std.	Geo Ort.	Geo Std.	Min	Ortanca	Max.
Ş. Urfa	12	60	27	55	1.59	36	41	437
Malatya	13	51	58	39	1.90	43	59	79
Adıyaman	18	33	13	31	1,42	26	50	301
K. Maraş	10	38	12	37	1,31	26	50	301
G. Antep	23	39	16	36	1,45	26	50	301

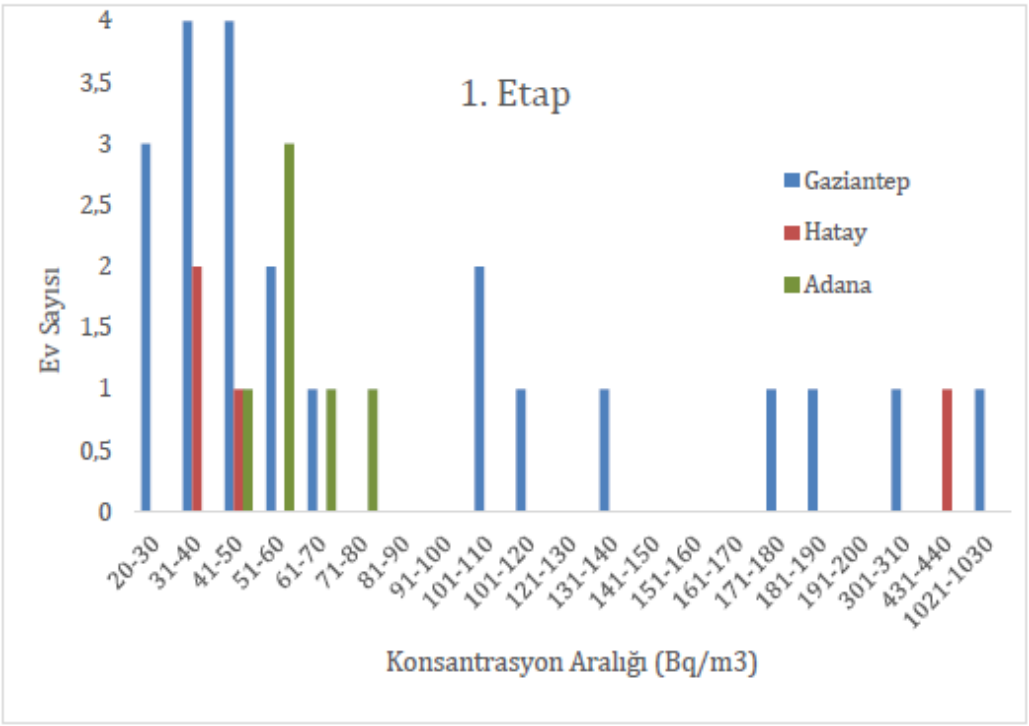
İkinci etapta analizleri sağlıklı bir şekilde tamamlanan 76 adet dedektöre ait radon konsantrasyonları tek tek incelendiğinde, Şanlıurfa'da Harran Üniversitesi kampüsü içerisindeki birinci katta bulunan bir ofiste 105 Bq/m^3 değeri WHO'nun 100 Bq/m^3 olan limit değerini aşmıştır. Öte yandan yine aynı kampüs içerisindeki giriş katta

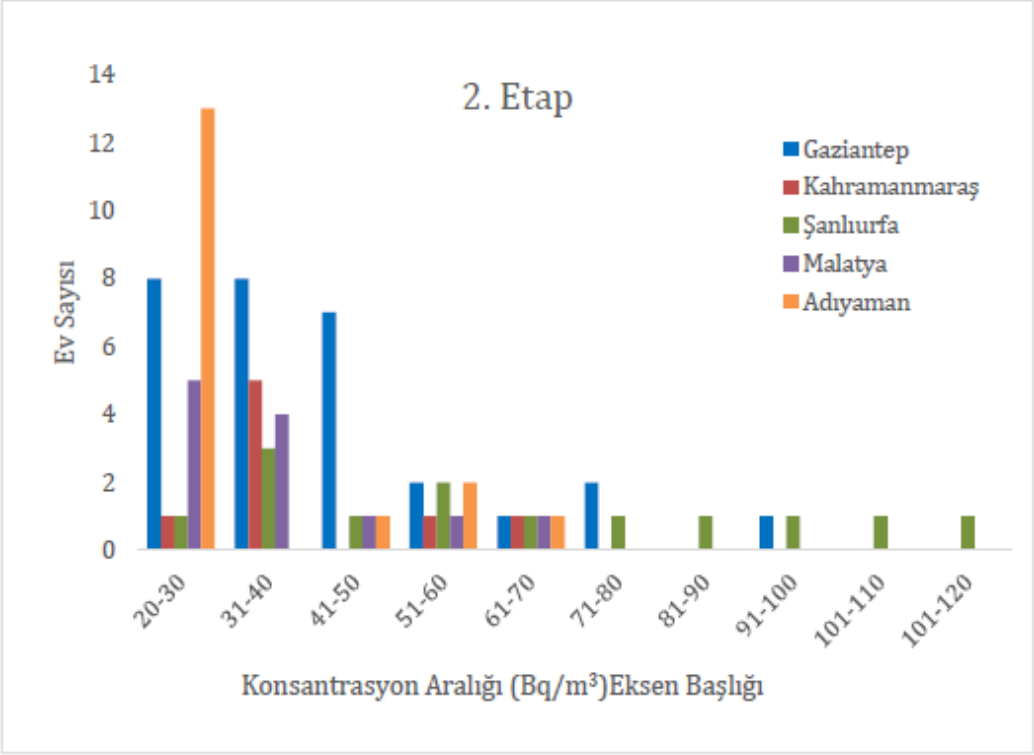
bulunan başka bir ofiste elde edilen radon konsantrasyonu değeri (87 Bq/m^3) dünya ortalaması olan 81 Bq/m^3'ün üzerinde bulunmuştur. Malatya Battalgazi'de bulunan bir binanın birinci katında bulunan bir oturma odasında ölçülen 239 Bq/m^3 değerinin WHO'nun limit değerini hayli aştığı görülmektedir. Malatya'da kaydedilen bu radon konsantrasyonu değeri ikinci etap örnekleme sürerken Malatya'da sıklaşan depremlere atfedilebilmektedir. Gaziantep'te Yukarıbeylerbeyi mahallesinde Türkiye ortalamasını aşan 86 Bq/m^3 değerine rastlanırken Adıyaman ve Kahramanmaraşta ölçülen değerler nispeten düşük kalmıştır. İkinci etapta 5 il arasında en yüksek ortalama radon konsantrasyonu değeri Şanlıurfa'da bulunmuştur. Şekil 3.2'de 2. etap için radon dağılımı haritası verilmiştir.



Şekil 3.2: İkinci etap kapalı ortam radon dağılımı haritası.

Birinci ve İkinci etapta radon konsantrasyonu aralığı ile ev sayıları dağılımını gösteren grafikler Şekil 3.3'de verilmiştir.





Şekil 3.3: Ev sayısına göre radon konsantrasyonu dağılımı.

Şekilde depremden yaklaşık 6 ay sonra başlatılan 2.etap araştırma sonuçlarından radon konsantrasyonu değerlerinin daha düşük olan aralıkta toplandığı açıkça görülmektedir. Radon gazı konsantrasyonu bölgenin jeolojik yapısına, bina tipine, havalandırma ve ev halkının yaşam alışkanlıklarına bağlı olduğu kadar mevsimsel parametrelere de

sıkıca bağlı olarak değişmektedir. Birinci etap sonuçları ile ikinci etap sonuçları karşılaştırıldığında farklılıkların sebebi özellikle örnekleme periyodu bakımından mevsimsel parametrelere ve gerçekleşen artçı depremlerin sıklığına bağlı olarak ortaya çıkma ihtimali de vardır. İki örnekleme periyodu arasındaki farkın kaynağında depremin etkisinin olup olmadığını söyleyebilmek için bu bölgelerde daha önce yürütülmüş radon araştırmaları ile karşılaştırmalar yapmak yerinde olacaktır. Birinci bölümde Çizelge 1.5'te verilen ve projemize konu olan illerde daha önceki yıllarda yapılmış ortalama konsantrasyon değerleri ile bu proje kapsamında elde edilen bulgular kaşılaştırıldığında Kahramanmaraş'ta önceki yıllarda 25 Bq/m^3 olan ortalama radon konsantrasyonu değeri bu araştırma kapsamında 38 Bq/m^3 olarak bulunmuştur. Adıyaman'da 16 Bq/m^3 olan değer bu çalışmada 33 Bq/m^3 iken, Adana'da 40 Bq/m^3 olan ortalama radon değeri bu çalışmada 61 Bq/m^3 olarak bulunmuştur. Gaziantep'te yüksek çıkan bir adres çıkartılarak yapılan istatistik sonucu iki örnekleme periyodunun ortalaması bu çalışmada 64 Bq/m^3 bulunmuşken önceki yıllarda ortalamanın 50 Bq/m^3 olduğu görülmektedir. Malatya'da önceki yıllarda ölçülen ortalama değer 48 Bq/m^3 iken, bu proje kapsamında 51 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. Önceki yıllarda Şanlıurfa'da ölçülen radon konsantrasyonu 74 Bq/m^3 iken bu çalışmada 60 Bq/m^3 olarak tayin edilmiştir. Hatay'da önceki yıllarda 50 Bq/m^3 olarak ölçülen ortalama radon konsantrasyonu bu çalışmada 139 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir. Şanlıurfa'da elde edilen ortalama radon konsantrasyonu değeri diğer 6 ilden farklı olarak önceki yıllarda yapılan çalışmalardan düşük çıkmıştır. Genel olarak değerlendirdiğimizde sahaya iki etapta toplam 129 adet dedektör dağıtılmış olup, 108 adet dedektör üzerinden konsantrasyon hesabı yapılabilmiştir. 108 adet dedektör üzerinden hesaplanan ortalama radon konsantrasyonu değeri, ortalamayı etkileyecek yüksek değer hariç tutularak, 64 Bq/m^3'tür. Sonuçlar, bölgedeki radon gazı konsantrasyonlarının, sadece mevsimsel parametreler ve jeolojik faktörlere bağlı olarak değil, aynı zamanda yerel sismik etkinliklerin de etkisi altında olabileceğini düşündürmektedir. Özellikle depremlerin ardından artçı sarsıntıların sıklığının artması, yer altı yapılarındaki değişimlere yol açabilir ve bu da radon gazı seviyelerinde geçici değişimlere sebep olabilir.

Her iki örnekleme döneminde de dedektörlerin aynı adreslerde aynı noktalara dağıtıldığı Gaziantep ili için iki etabın radon konsantrasyonu değerleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Gaziantep'te aynı adreslerde iki etapta da yapılan örnekleme sonucu elde edilen radon konsantrasyonları

	Enlem	Boylam	1. Etap Dedektör No	1. Etap Radon Kons. (Bq/m³)	2. Etap Dedektör No	2. Etap Radon Kons. (Bq/m³)	İki etabın ortalaması(Bq/m³)
1	37,080756	37,369589	367777	**174**	EU2613	**35**	105
2	37,062780	37,369320	367787	**137**	EU2666	**65**	101
3	37,091612	37,366342	367792	**194**	EU2670	**29**	112
4	37,146200	37,186990	362072	28	EU2642	21	25
5	37,145075	37,199100	362282	40	EU2617	37	39
6	37,065932	36,254377	367762	50	EU2608	43	47
7	37,071713	36,622197	367790	49	EU2688	36	43
8	36,973280	37,435340	362036	29	EU2621	32	31
9	37,076250	37,431860	361993	26	EU2620	25	26
10	37,154960	37,362070	362083	63	EU2649	33	48
11	37,129960	37,386900	367751	**301**	EU2663	**86**	194
12	37,129890	37,386150	367759	**104**	EU2643	**29**	67
13	37,086256	37,361721	362098	**50**	EU2690	**34**	42
14	37,010850	37,354590	367780	1023	EU2629	23	523
15	37,010430	37,354200	367752	**60**	EU2659	**26**	43
16	37,024900	37,332480	362288	**103**	EU2604	**27**	65
17	37,076680	37,439530	361990	**119**	EU2638	**46**	83
18	37,083600	37,353410	362106	46	EU2619	32	39
19	37,063210	37,368250	362109	36	EU2662	64	50
	Ortalama (1023 Bq/m³ değeri dahil edilmemiştir.)						63

Çizelge 3.3'de mavi renkle gösterilen değerlerin dönemsel farklılıkları görülmektedir. Çizelgedeki kırmızı renkle gösterilen değerler hariç diğerleri arasındaki fark mevsimsel farklılıklara atfedilebilmektedir. Kırmızı renkle işaretlenen 14. sıradaki

sonuçlar beklenenden oldukça farklı olup 44,48 katlık bir fark oluşturmuştur. Bu durumun sebebini anlamak için hane sahibi ile tekrar iletişime geçilmiş ve iki örnekleme periyodu boyunca evde veya dedektörün bulunduğu konumla ilgili olarak nasıl bir değişiklik olduğu sorgulanmıştır. Birinci farklılık ilk etapta ısınma sistemi olarak doğal gazın çalışıyor olması ki, bu diğer adresler içinde geçerli bir durumdur.

İkinci farklılık ise, ikinci etabın önemli bir kısmı yaz aylarına denk geldiği için kapı pencerenin daha açık olduğu bir döneme denk gelmiştir. Aynı şekilde bu durum diğer adresler için de geçerlidir. Oransal olarak bakıldığında 44,48 katlık bir fark oldukça büyüktür. Bu durumu açıklayabilmek için 2014 yılında yine TÜBİTAK 1002 projesi kapsamında (Proje No: 112S652) çalışılan bölgedeki durum incelenmiştir. Rize bölgesindeki 86 adet adres için yaz ve kış aylarına ait değerlerin oranı minimum 1.02, maksimum 26.61 iken ortalama 2.5'tir. Maksimum oran dikkate alındığında bile Çizelge 3.3.'te 14. Sıradaki değerler arasındaki fark Rize'deki maksimum değerin neredeyse iki katı kadardır. Radon dağılımı bölgesel, mevsimsel ve hane sahiplerinin alışkanlıklarına bağlı olarak ciddi farklılıklar göstermektedir fakat bu kadar büyük bir fark özellikle açıklanmaya muhtaçtır. Bu nedenle bu adrese iki dedektör daha bırakılarak (dedektörlerin biri önceki dedektör bırakılan noktaya diğeri ise binanın bodrum katındaki depoya) durumun netlik kazanması için araştırılmıştır. Son süreçte bu iki dedektör 18.02.2024-28.06.2024 tarihleri arasında yaklaşık 4,5 aylık bir süreçte adreste kalmıştır. Alınan sonuçlara göre geçen bu süreçte depodaki radon konsantrasyonu 47 Bq/m^3 iken önceki süreçte örneklemenin yapıldığı çocuk odasında ise 32 Bq/m^3 değerinde tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, evin ve odanın kullanım koşullarının aynı rutinde devam etmekte olduğu bilgisi ile, ilk etapta aynı adreste çocuk odasında tespit edilen 1023 Bq/m^3 değeri depremin etkisine atfedilebilmektedir. Aynı zamanda zeminden iki toprak örneği alınarak HpGe dedektörü ile gama analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucu ^{238}U aktivite konsantrasyonu iki örneğin ortalaması 130 Bq/kg olarak tespit edilmiştir. Bu değer dünya ortalamasından (35 Bq/kg) oldukça yüksektir. Zemindeki radon kaynağı olan ^{238}U'nun yüksekliği de dikkate alınınca depremden yaklaşık 20 gün sonra gerçekleştirilen ve oldukça yüksek bulunan bu sonuç depreme ve akabindeki artçı sarsıntılara atfedilebilmektedir.

3.3 Yıllık Etkin Doz Eşdeğerleri

Kapalı alanlarda radon ve radon bozunma ürünlerine uzun süre maruz kalmanın, sigaradan sonra akciğer kanserinin en önemli ikinci nedeni olduğu ve bu durumun kanser riskini artırabileceği, Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP) ile Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından yayımlanan raporlarda belirtilmiştir [90-91]. Yapılan epidemiyolojik araştırmalar, evlerdeki radon seviyeleri düşük olsa bile, ev içindeki radon gazının akciğer kanseri ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Kapalı alanlardaki radon seviyelerinden kaynaklanan yıllık etkin doz eşdeğerini hesaplamak için Denklem 1.25 kullanılmıştır [92-94].

$$AEDE\ (\frac{mSv}{y}) = A\ x\ E\ x\ F\ x\ T\ x\ D \tag{1.25}$$

Bu denklemde, A radonun aktivite konsantrasyonunu (Bq/m³), E ev içi denge faktörünü (0.4), F ise meşguliyet faktörünü (0.8, insanların kapalı alanlarda geçirdiği süreyi) temsil etmektedir. Ayrıca, T bir yılın süresini (8760 s/y) ve D doz dönüşüm faktörünü ($9x10^{-6}$ mSv $(Bq/m^3.s)^{-1}$) ifade etmektedir.

Yıllık etkin doz eşdeğerleri iki etapta da yeterli örneklemenin yapılmış olması nedeniyle Gaziantep için ve illerin ortalama konsantrayonları üzerinden hesaplanmış ve Çizelge 3.4'de verilmiştir.

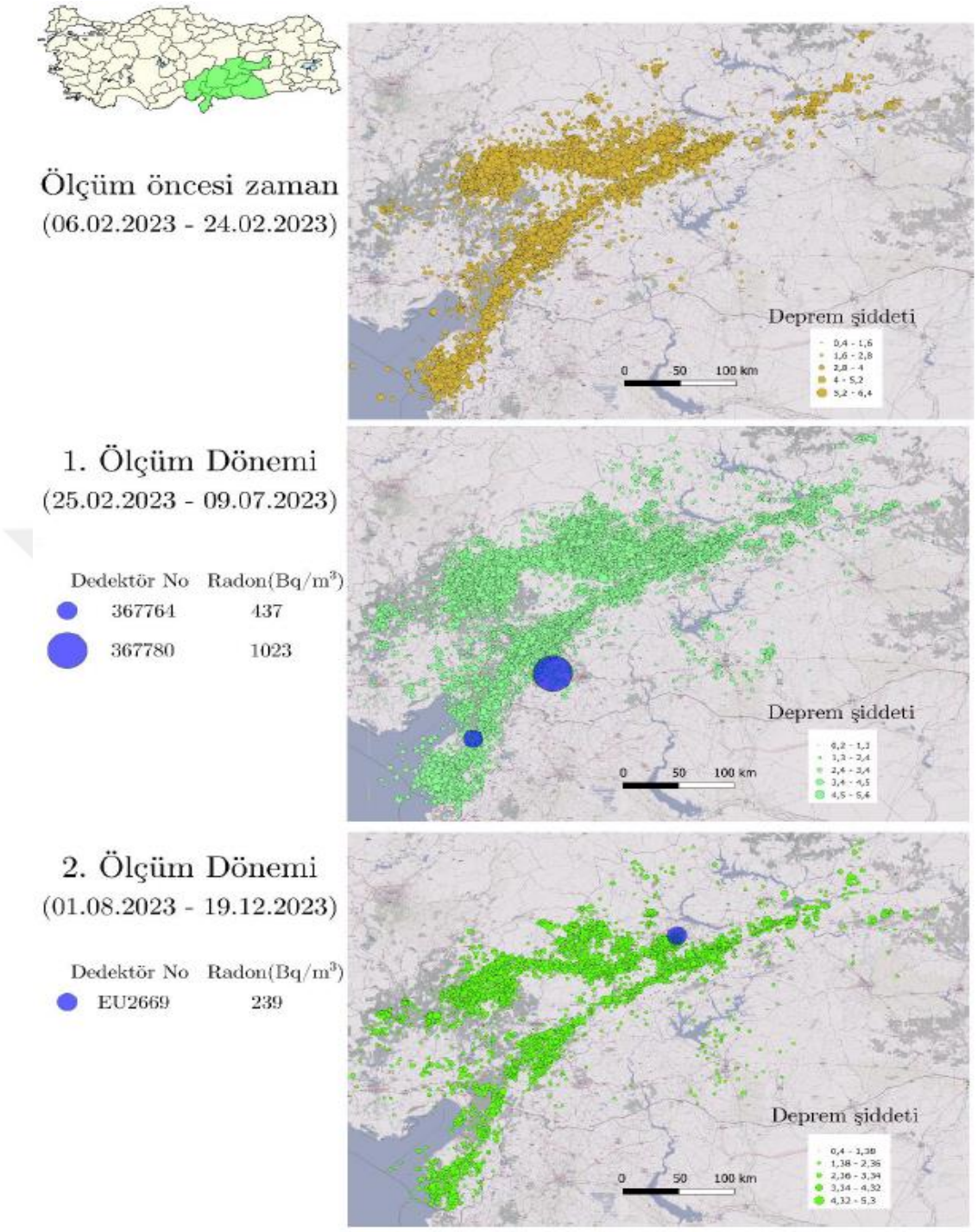
UNSCEAR 2000 raporlarına göre, radon gazına maruz kalmanın yıllık doz ortalaması yaklaşık olarak 1,3 mSv olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.4'deki sonuçlara bakıldığında Gaziantep'te 8 adreste bu değerin aşıldığı, illerin ortalama değerlerine bakıldığında ise 2. Etap Adıyaman, Kaahramanmaraş ve Gaziantep hariç diğer 4 ilde aşıldığı görülmektedir. Çizelge 3.4'de kırmızı renkle gösterilen değer hariç tutulduğunda bölge için ortalama etkin doz eşdeğri 1,6 mSv/y'dir. Radon gazının akciğer kanserinin sigaradan sonraki ikinci nedeni olduğu bilgisi dikkate alınınca 1,3 mSv/y değerinin iki katından daha fazla aşılmış olması dikkat çekmektedir.

Çizelge 3.4: Yıllık etkin doz eşdeğerleri.

			Radon Kon.(Bq/m³)	Etkin Doz (mSv/y)
	Hatay-1. Etap		139	3,51
	Adana-1. Etap		61	1,54
	Gaziantep-1. Etap		89	2,25
İL	Şanlıurfa-2. Etap		60	1,51
	Malatya-2. Etap		51	1,29
ORTALAMASI	Adıyaman-2.Etap		33	0,83
	Kahramanmaraş-2.Etap		38	0,96
	Gaziantep-2.Etap		39	0,98
	37,06276	37,36959	105	2,65
	37,06278	37,36932	101	2,55
	37,09161	37,36634	112	2,83
	37,14620	37,18699	25	0,63
	37,14507	37,19910	39	0,98
	37,06593	36,25437	47	1,19
	37,07171	36,62219	43	1,08
	36,97328	37,43534	31	0,78
	37,07625	37,43186	26	0,66
	37,15496	37,36207	48	1,21
GAZİANTEP	37,12996	37,38690	194	4,89
	37,12989	37,38615	67	1,69
	37,08625	37,36172	42	1,06
	37,01085	37,35459	**523**	13,19
	37,01043	37,35420	43	1,08
	37,02490	37,33248	65	1,64
	37,07668	37,43953	83	2,09
	37,08360	37,35341	39	0,98
	37,06321	37,36825	50	1,26
Bölge Ort.	İki etabın ortalaması		64	1,61

3.4 Örnekleme Periyotları Boyunca Bölgede Gerçekleşen Depremlerin Dağılımı

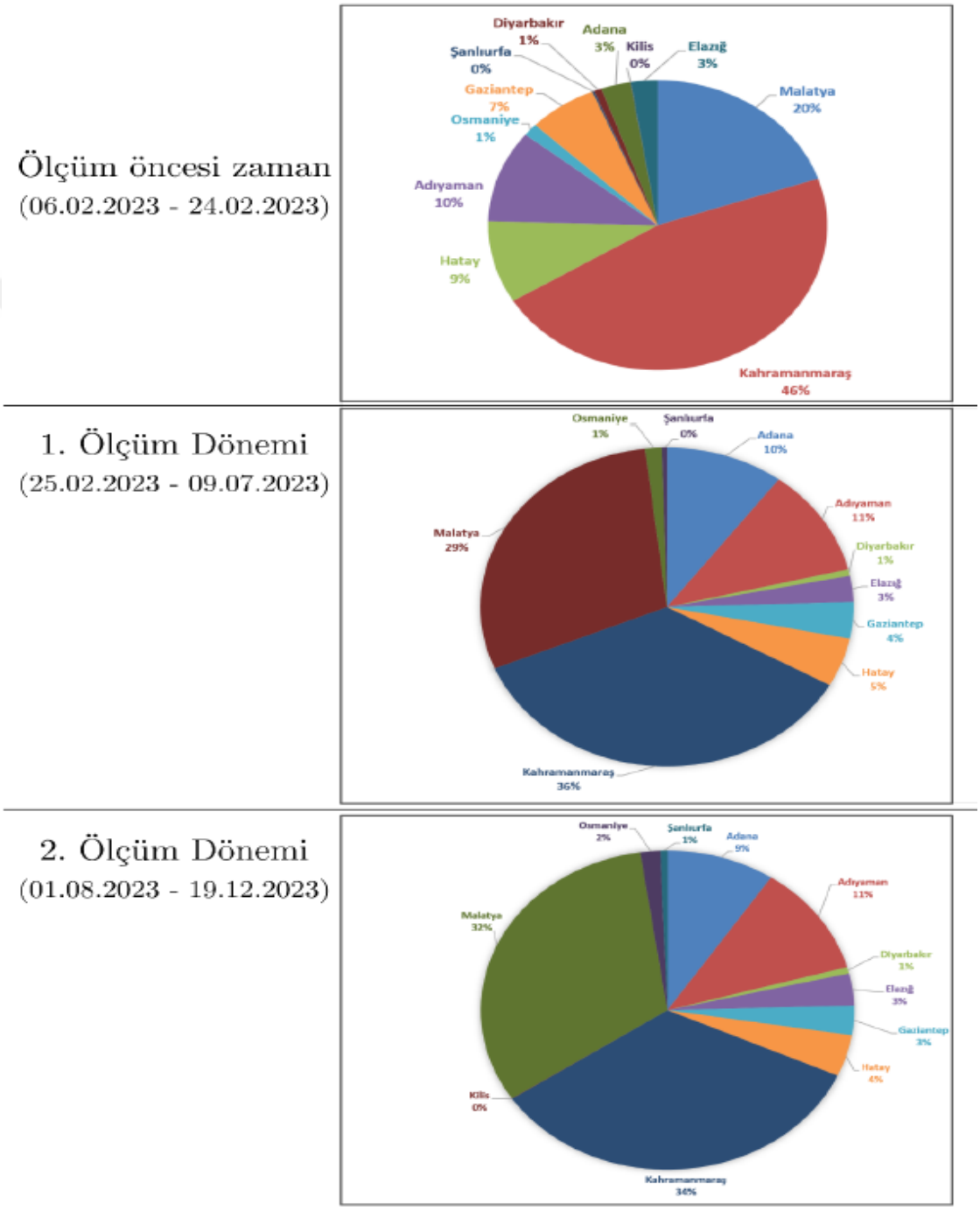
Afet ve Acil Durumlar Yönetimi Başkanlığından (AFAD) alınan 51.926 deprem verisi, örnekleme peryotlarına göre sınıflandırılarak Şekil 3.4.'teki haritalarda görselleştirilmiştir. Bu harita üzerinde, yüksek ölçülen üç konsantrasyon değeri mavi renkle gösterilmiş olup, bu renk değişimi, bölgedeki sismik hareketlerin yoğunluğunu yansıtmaktadır. Depremlerin gerçekleştiği noktaların koordinatları ile çizilen haritalar, fay hattının şeklini doğrudan ortaya koymuş, bölgedeki yer hareketlerinin coğrafi dağılımını net bir şekilde gözler önüne sermiştir. Gerçekleşen depremlerin merkez üstlerine göre yapılan sınıflandırmalar, Şekil 3.5'teki daire grafiklerinde gösterilmiştir. Bu grafiklerde zamanla depremlerin merkez üstlerindeki yüzdelik payların değiştiği gözlemlenmiş, bu durum sismik aktivitenin bölgesel dağılımındaki olası değişimleri işaret etmektedir.



Şekil 3.4: Örnekleme periyotları boyunca ve depremin hemen ardından gerçekleşen artçı sarsıntılar haritası.

Sonuçlarda olağanüstü bir faklılık olmadığı için depremin etkisini net olarak söylemek mümkün değildir. Bu çalışmadan net olarak çıkartılacak sonuç; yerin yaklaşık 7-8 km altında gerçekleşen 7,7 ve 7,6 büyüklüğünde Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan depremleri ve yerin yaklaşık 21 km altında gerçekleşen ve büyüklüğü 6,4 oan Yayladağı Hatay depremin ardından AFAD verilerine göre bölgede gerçekleşen ve

3824'ünün büyüklüğü 3'ün üzerinde olan 51926 artçı sarsıntının gerçekleştiği bölgede depremden yaklaşık 20 gün sonra ve altı ay sonra yürütülen iki etap çalışma sonuçları göstermiştir ki kapalı ortamlarda biriken radon gazı konsantrasyonu daha öncesinde depremle ilişkisi olmadan bölgede yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçlardan (ilk etapta üç adres, ikinci etapta bir adres hariç) çok farklı sonuçlar vermemiştir.



Şekil 3.5: Örnekleme periyotları ve depremden hemen sonraki 20 günde gerçekleşen depremlerin illere göre dağılımı.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu proje kapsamında 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen depremler sonrasında, meydana gelen yoğun artçı sarsıntılarla birlikte kapalı ortamlarda biriken radon konsantrasyonları ölçülmüş ve elde edilen bulgular gerçekleşen depremlerle karşılaştırılmak istenmiştir. Çalışma kapsamında CR-39 pasif radon dedektörleri kullanılarak 2 etapta örneklemeler gerçekleştirilmiştir.

Araştırmanın birinci etabında örnekleme depremden yaklaşık 20 gün sonra başlatılarak 25.02.2023-09.07.2023 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1'de de verildiği üzere Hatay'da 139 Bq/m^3, Adana-Aladağ'da 61 Bq/m^3 ve Gaziantep'te ise 89 Bq/m^3 değerinde ortalama radon düzeylerine rastlanmıştır. İlk etapta üç adreste ölçülen radon konsantrasyonlarının oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir. (301, 437 ve 1023 Bq/m^3).

Araştırmamızın ikinci etabında örnekleme depremden yaklaşık 6 ay sonra başlatılarak 01.08.2023-19.012.2023 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. İkinci etapta gerçekleştirilen örnekleme sonucu ortalama radon konsantrasyonları Çizelge 3.2'de de verildiği üzere Şanlıurfa, Malatya, Adıyaman, Kahramanmaraş ve Gaziantep için sırasıyla, 60, 51, 33, 38 ve 39 Bq/m^3 olarak tespit edilmiştir.

İki etapta da örneklemenin aynı adreslerde gerçekleştirildiği Gaziantep'te iki etabın ortalaması 63 Bq/m^3 olarak hesaplanmıştır. 1023 Bq/m^3 değeri ortalamaya dahil edilmemiştir. Gaziantep'te 8 adreste ilk etap örnekleme ile ikinci etap örnekleme periyotları sonucu elde edilen bulgular arasında 2 ile 7 oranında değişen farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılığın birinci sebebi mevsimsel farklılıklar iken, örnekleme periyodu boyunca gerçekleşen artçı sarsıntılara da atfedilebilmektedir. Özellikle Gaziantep özelinde durum ele alındığında ilk etap örnekleme sonucu 89 Bq/m^3 iken ikinci etap analiz sonucu 39 Bq/m^3 olarak saptanmıştır. İlk etapta Gaziantep'te 9 adreste radon konsantrasyonları 100-301 Bq/m^3'ün arasında sonuçlar vermiştir. Bir adreste ise 1023 Bq/m^3 olarak ölçülmüştür. Bu değerler 2014 yılında TAEK'in Gaziantep için elde ettiği 50 Bq/m^3 değerinden yüksek olduğu için özellikle ilk etapta azda olsa Gaziantep'te depremin etkisinin olduğu söylenebilmektedir. Benzer şekilde ilk etapta Hatay'da bir adreste 437 Bq/m^3 değeri TAEK'in Hatay ortalamasından (50 Bq/m^3) oldukça yüksek iken ikinci etapta Malatya'da 239 Bq/m^3 değeri de TAEK'in Malatya ortalamasından (48 Bq/m^3) oldukça farklıdır. Gaziantep dışındaki diğer altı ilde aynı adreste iki etapta da örnekleme yapılamadığı için bu iller için mevsimsel

parametrelere sıkı bağlı olan radon konsantrasyonuna depremin etkisinden bahsetmek zordur.

Genel olarak değerlendirdiğimizde sahaya iki etapta toplam 129 adet dedektör dağıtılmış olup, 108 adet dedektör üzerinden konsantrasyon hesabı yapılabilmiştir. 108 adet dedektör üzerinden hesaplanan ortalama radon konsantrasyonu değeri, ortalamayı etkileyecek bir adreste rastlanan yüksek değer hariç tutularak, 64 Bq/m^3'tür.

Yıllık etkin doz eşdeğerleri il ortalamaları ve Gaziantep ili için her iki periyodun ortalaması alınarak elde edilen radon konsantrasyonları kullanılarak kapalı ortamlar için hesaplanmıştır (Çizelge 3.4). Çizelge 3.4'deki sonuçlara bakıldığında Gaziantep'te 8 adreste bu değerin UNSCEAR'ın belirttiği yıllık ortalama değer olan 1,3 mSv değerini hayli aştığı, illerin ortalama değerlerine bakıldığında ise Adıyaman, Kahramanmaraş ve Gaziantep hariç diğer 4 ilde 1,3 mSv/y değeri aşıldığı görülmektedir. Çizelge 3.4'de kırmızı renkle gösterilen değer hariç tutulduğunda bölge için ortalama etkin doz eşdeğeri 1,6 mSv/y'dir. Radon gazının akciğer kanserinin sigaradan sonraki ikinci nedeni olduğu bilgisi dikkate alınınca 1,3 mSv/y değerinin iki katından daha fazla aşılmış olması dikkat çekmektedir.

Örnekleme periyotları boyunca meydana gelen deprem verileri AFAD'ın resmî sitesinden alınarak gerçekleştirilen artçı sarsıntıların haritası çıkartılmıştır. Çizilen harita bölgedeki fay hattını vermiştir. Gerçekleşen depremler illere göre sınıflandırıldığında ise depremden hemen sonra Kahramanmaraş merkezli olan artçı depremlerin üstü zamanla Malatya ve Adıyaman'a doğru kaymıştır. İkinci etapta Malatya'da gözlenen 239 Bq/m^3 değeri zamanla ilin deprem üstü haline gelmiş olmasına da atfedilebilmektedir. Radon salınımı ile depremler arasında doğrudan bir ilişki kurumak pek mümkün olmamıştır.

İlk etap araştırma sonucunda yüksek çıkan bazı noktaların ve genel olarak ortalamaların daha yüksek bulunmuş olması mevsimsel farkın olmasına atfedilebileceği gibi artçıların ilk etapta daha sık gerçekleşmiş olmasına da atfedilebilmektedir. Depremin etkisi hakkında çok daha emin konuşabilmek için örnekleme sayısının en az 500-1000'in aralığında olması gerekmektedir. Özellikle son zamanlarda artan dedektör ve analiz ücretlerinin fazla olması örnekleme sayısının az olmasının en büyük nedenidir. Bölgede adreslere dağıtılan ve bir şekilde analizleri yapılamayan (kayıp, hasar, hane sahiplerine ulaşılamaması, binaya yıkım kararı çıkması, hane sahiplerinin şehri terk etmesi, hane sahiplerinin dedektörü atmış olmaları vb.) 21 adet dedektörün analizi de şayet sağlıklı bir şekilde tamamlanmış

olsaydı bazı noktalar için özellikle ilk etap açısından daha net konuşulabilecekti. Bu açıdan bakılınca her ne kadar tedbir alınmaya çalışılsa da bölgedeki şartların getirmiş olduğu karışıklık %16,28 veri kaybı ile çalışmamız sonuçlarına olumsuz bir şekilde yansımıştır. Yine de asrın felaketi olarak adlandırılan ve 11 ilde çok ciddi yıkıma neden olan depremlerden sonra bölgedeki her türlü olumsuz koşula ve imkansızlıklara rağmen böyle bir çalışmanın yürütülmüş olması oldukça değerlidir. Bu çalışma, Kahramanmaraş merkezli depremler sonrası bölgedeki artçı sarsıntıların ve mevsimsel değişimlerin radon konsantrasyonları üzerindeki etkilerini gösterirken, veri eksiklikleri ve örnekleme zorlukları göz önünde bulundurulduğunda, daha geniş çaplı araştırmalarla daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabileceğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

[1] **World Health Organization.** (2009). WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, *World Health Statistics*. (Rapor No: 213). Global Report World Helath Organization.

[2] **Url-1** < *https://www.webofscence.com*>, erişim tarihi 02.07.2024.

[3] **Beir V.** (1999). Health Effects of Exposure to Radon. Washington (DC): Board on Radiation Effects Research, *National Academy Pres*, Vol.12 pp.23.

[4] **Krane, S. K. (Edit: Şarer, B.)** (2001), *Nükleer Fizik* (B. Şarer, Çev.). Ankara: Palme Yayın Dağıtım.

[5] **Url-2** < *https:// lisans.cozum.info.tr/radyoaktif_parçalanma.html* >, erişim tarihi 05.07.2024.

[6] **Url-3** < *https:// evrimagaci.org/nukleer-fizik-yarı-omur-12329*>, erişim tarihi 05.07.2024.

[7] **Karahan, G., Bayulken, A.** (2000), Assesment of gamma dose rates around Istanbul (Turkey). *Journal of Environmental Radioactivity*, 47, 213-221.

[8] **Canbazoğlu, S., Bozkır, O.** (2004). Analysis of pressure distribution of turbulent asymmetric flow in a flat duct symmetric sudden expansion with small aspect ratio, *Fluid Dyn. Res*, 35 (1) 341-12.

[9] **United Nations Scientific Committee.** (2000). (Report No: 182). Report to the General Assembly.

[10] **The United Nations Scientific Committee.** (1993). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report No: A/48/46).General Assembly

[11] **Url-4** < *https:// www.epa.vic.gov.au/about-epa/publications/1992*>, erişim tarihi 18.05.2024.

[12] **Papaethymiou, H., Mavroudis, A. ve Kritidis, P.** (2003). Indoor Radon Levels and Influencing Factors in Houses of Patras. *Journal of Environmental Radioactivity*. 66, 247-260.

[13] **Türk Atom Enerjisi Kurumu**. (2009). *Radyasyon, İnsan ve Çevre: İyonlastırıcı radyasyon, etkileri ve kullanım alanları, güvenli kullanımı için uygulamada olan tedbirler.* Ankara:Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.

[14] **AFAD**. (2023). *06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (Mw: 7.7 – Mw: 7.6) Depremleri Raporu* (Rapor No:145). Ankara:Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü Deprem Dairesi Başkanlığı.

[15] **Çelebi, N., Ataksor, B., Albayrak B. N.** (2014). Indoor Radon Measurements In Turkey Dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 167, Issue 4, December 2015, Pag. 626–632.

[16] **Ciotoli, G., Etiope, G., Guerra, M., and Lombardi, S.** (1999). The Detection of Concealed Faults in the Ofanto Basin Using the Correlation Between Soil-gas Fracture Surveys. *Tectonophysics*, 301(3-4), 321-332.

[17] **Yüce, G., D'Alessandro, W., Italiano F., Bellomo S., and Gülbay A. H.** (2015). Present-day Serpantinisation Processes in the Kizildag Ophiolitic Body (Turkey): Insight from Gas Geohemistry. *ICGG13 International Conference on Gas Geochemistry*, Chengdu, China.

[18] **Durrance, E. M., and Gregory, R. G.** (1990), Helium and radon transport mechanisms in hydrothermal circulation systems of Southwest England. *Geochemistry of Gaseous Elements and Compounds*, 30(1), 337-352.

[19] **Yüce, G., Fu, C.C., D'Alessandro, W., Gulbay, A.H., Lai, C.W., Bellomo, S., Yang, T.F., Italiano, F., and Walia, V.** (2017). Geochemical Characteristics of Soil Radon and Carbon Dioxide within the Dead Sea Fault and Karasu Fault in the Amik Basin (Hatay), Turkey. *Chemical Geology*. 469 (10), 129-146.

[20] **Khan, H. A., and Qureshi, A. A.** (1994). Solid State Nuclear Track Detection: A Useful Geological/Geophysical Tool. *Nuclear Geophysics*, 8(1), 1-37.

[21] **Yasin, D.** (2020). Toprak İçi Radon ve Karbondioksit Gaz Konsantrasyonlarının Değişiminin Depremler ile İlişkisinin İncelenmesi: Karabayır (Eskişehir) Örneği. *AKU J. Sci. Eng*. 20, 518-527.

[22] **Duddridge, G., Grainger P.** (1998). Temporal Variation in Soil Gas Composition in Relation to Seismicity in South-west England. *Proceedings-Ussher Society*. Vol. 9, 224-230.

[23] **Chiodini, G., Tassi, F., Caliro, S., Vaselli, O.** (2011). Evidence at Lake Albano (Italy) of a CO^2 Pulse Related to Seismic Activity. *Bulletin of Volcanology*. 74, 861-871.

[24] **Cicerone, R. D., Ebel, J.E., Britton, J.** (2009). A Systematic Compilation of Earthquake Precursors. *Tectonophysics*, 476(3-4), 371-396.

[25] **Riggio, A., Santulin, M.** (2015). Earthquake Forecasting: A Review of Radon as Seismic Precursor. *Bollettino Di Geofisica Teorica e Applicata*, 56(2), 95-114.

[26] **Koike, K., Yoshinaga, T., Asaue, H.** (2009). Radon concentrations in soil gas, considering radioactive equilibrium conditions with application to estimating fault-zone geometry. *Environmental Geology*, 56, 1533-1549.

[27] **Mollo, S., Tuccimei, P., Heap, M., Vinciguerra, S., Soligo, M., Castelluccio, M., Scarlato, P., Dingwell, D.B.** (2011). Increase in Radon Emission Due to Rock Failure: An Experimental Study. *Geophysical Research Letters*, 38(14).

[28] **Annunziatellis, A., Beaubien, S., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M., Lombardi, S.** (2008). Gas Migration Along Fault Systems and Through the Vadose Zone in the Latera Caldera (Central Italy): Implications for CO^2

Geological Storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2(3), 353-372.

[29] **Baubron, J.C., Rigo, A., Toutain, J.P.** (2002). Soil Gas Profiles as a Tool to Characterise Active Tectonic Areas: The Jaut Pass Example (Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1-2), 69-81.

[30] **King, C.Y., King, B.S., Evans, W.C., Zhang, W.** (1996). Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, 11(4), 497-510.

[31] **Url-5** < *https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/*>, erişim tarihi 06.05.2024.

[32] **Wattananikorn, K., Kanaree, M., Wiboolsake, S.** (1998). Soil Gas Radon as an Earthquake Precursor: Some Considerations on Data Improvement. *Radiation Measurements*, 29(6), 593-598.

[33] **Walia, V., Virk, H., Bajwa, B., Sharma, N.** (2003). Relationships Between Radon Anomalies and Seismic Parameters in NW Himalaya, India. *Radiation Measurements*, 36(1-6), 393-396.

[34] **Ghosh, D., Deb, A., Sengupta, R**. (2009). Anomalous Radon Emission as Precursor of Earthquake. *Journal of Applied Geophysics*, 69-67–81.

[35] **Saç, M.M., Camgöz, B.** (2005). İzmir'de Sismik Aktiviteler ile Radon konsantrasyonları Arasindaki Korelasyonun İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(3), 47-54.

[36] **Saç, M., Harmansah, C., Camgöz, B., Sozbilir, H.** (2011). Radon Monitoring as the Earthquake Precursor in Fault line in Western Turkey. *Ekoloji*, 20(79), 93-98.

[37] **Uzeir, S.** (2013). Seismic Activities and Seismotetonic Faults In Bosnia and Herzegovina. *Arhives for Technical Sciences*, 8(1), 17-24.

[38] **Wang, J. H.** (2014). Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 56, n. 2, pp. 95-114.

[39] **Woith, H.** (2015). Radon earthquake precursor: A short review. Eur. Phys. J. Special Topics 224, 611–627.

[40] **Morales-Simfors, N., A. Wyss, R., Bundschuh, J.** (2019). Recent progress in radon-based monitoring as seismic and volcanic precursor: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 148-78.

[41] **Wang, J.H.** (2021). A compilation of precursor times of earthquakes in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 32, No. 4, 411-441.

[42] **Toader, V.E., Mihai, A., Moldovan, I., Ionescu, C., Marmureanu, A., Lingvay, I.** (2021). Implementation of a Radon Monitoring Network in a Seismic Area. *Atmosphere 2021*, 12, 1041.

[43] **Huang, P., Lv, W., Huang, R., Luo, Q., Yang, Y.** (2024). Earthquake precursors: A review of key factors influencing radon concentration. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 271, 107310.

[44] **Stoulos, S., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Kouroukla, C., Atac–Nyberg, A., Wyss, R., Bäck, T., Tallini, M., DeLuca, G.** (2024). Radon signals in soil gas associated with earthquake occurrence in Greece: review and perspective. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 13-2024, 49-7.

[45] **Chowdhury, S., Bose, A.G., Das, A., Deb, A.** (2024). A study of some research work on soil radon concentration and ionospheric total electron content as earthquake precursors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 333, pp.1633–1659, USA.

[46] **Orbe, J., Robalino, J., Callay, G., Ilbay, J., Leon, S., Bacusoy, a., Veintimilla, A., Toulkeridis, T.** (2023). An Evaluation of Radon in Drinking Water Supplies in Major Cities of the Province of Chimborazo, Central Andes of Ecuador, Section Water Quality and Contamination. *Water 2023*, 15(12), 2255.

[47] **Paz, F., Romero, Y., Zalakeviciute, R**. (2019). Radon (222Rn) concentrations in the touristic Jumandy cave in the Amazon region of Ecuador. *Journal of Radiation Research,* 60(6). 759–767.

[48] **Rijal, B.** (2021). Radon Study Around Earthquake Affected Areas of Nepal. *Journal of Physical Sciences*, Vol. 18, 2382-5340.

[49] **Kayakökü, H., Doğru, M.** (2020). Radon Concentration Measurements in Surface Water Samples from Van Lake, Turkey Using CR-39 Detectors. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 10(1) (2020), 35–42.

[50] **Karatepe Ç., Ş., Kuluöztürk, M., Doğru, M.** (2021). Tatvan, Ahlat ve Adilcevaz Bölgelerinde Sahil Kumlarında Radon Aktivite Konsantrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. No: 21, S. 90-94.

[51] **Iqbal, A.** (2012). Indoor Radon Concentration Levels, Gamma Dose Rates and Impact of Geology – A Case Study in Kotli, State of Azad Jammu and Kashmir, Sub-Himalayas in Pakistan. *Radioprotection*, Vol. 47, No: 2, pp. 253-270.

[52] **Mohammed, D., Külahcı, F., Alalı, A.** (2023). Evaluation of the Effects of Earthquakes on Radon and Total Electron Content Values and Meteorological Changes on the North Anatolian Fault Zone, Türkiye. *Turkish Journal of Science & Technology*. No: 18(1), 75-85.

[53] **Url-6** < *https://www.britannica.com* >, erişim tarihi 05.03.2024.

[54] **Url-7** < *https:// en.wikipedia.org* >, erişim tarihi 05.03.2024.

[55] **Türkiye Atom Enerjisi Kurumu**. (2009). *Radyasyon, İnsan ve Çevre: İyonlastırıcı Radyasyon, Etkileri ve Kullanım Alanları, Güvenli Kullanımı İçin Uygulamada Olan Tedbirler Raporu.* Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. Ankara.

[56] **Türkiye Atom Enerjisi Kurumu**. (2014). *Türkiye Atom Enerjisi Kurumu 2014 Yılı Teknik Raporu*. TR-2014-2, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu. Ankara.

[57] **Gümbür, S.** (2022). *Doğu Anadolu Fay onu Uzanımında Bulunan Gölbaşı (Adıyaman)-Türkoğlu (Kahramanmaraş) Segmenti Üzerinde Radon Gazı Değişimlerinin Deprem ile İlişkisi ve Doğal Radyoaktivitenin Belirlenmesi.* Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[58] **Küçükönder, E., Gümbür, S., Alıç, H.** (2023). Radon Gas Measurement in Vegetable and Fruit Samples Taken from Kahramanmaras Province of Turkey. *Environment Development and Sustainability*, Vol. 25:14607–14621.

[59] **Küçükönder, E., Gümbür, S.** (2022). Radon Gas Measurement in Water Samples in Kahramanmaras Province of Turkey. *Water Air Soil Pollut,* 233: 175.

[60] **Küçükönder, E.** (2021). Kahramanmaraş İlinde Bina İçi Mevsimsel Radon Gazı Aktivitesi Ölçümü. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, Vol. 10 (3), 891-901.

[61] **Canbazoğlu, C., Gundoğan, A., Bal, S., Doğru, M.** (2020). A preliminary Study On Radon Concentrations and Health Risk Assessment Of Drinking Water Samples In Kilis Province, TURKEY. *Fresenius Environmental Bulletin,* Volume 29- No. 05/2020. Pgs. 3370/3379.

[62] **Kayakökü, H., Kuluöztürk, M.** (2022). Radon Risk Assessment and Dose Rates in Hekimhan and Kuluncak (Malatya, Turkey) *Soil Samples. Water Air Soil Pollut*, Vol. 234:95.

[63] **Kutlu, N.** (2016). *Hatay İlinde Açık Camii, Kilise, Farklı İbadethaneler, Müze ve Bazı Turistik Yerlerde Radon Gazı.* (Yüksek lisans tezi) Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

[64] **Akbulut Özen, S., Çelik, N., Dursun E., and Taşkın H.** (2018). Indoor and Outdoor Radon Measurements at Lung Cancer Patients' Homes in the Dwellings of Rize Province in Turkey. *Environ Geochem Health*, Vol. 40,1111–1125.

[65] **Ihaka, R., Gentleman, R.** (1996). R: A Language for Data Analysis and Graphics. *J. Comput. Graph. Stat*. 5, 299–314.

[66] **Url-8** < *http://www.r-project.org* >, erişim tarihi 10.12.2023.

[67] **Flenniken, M., J., Stuglik, S., Iannone, V. B.** (2020). Quantum GIS (QGIS): An Introduction to a Free Alternative to More Costly GIS Platforms. *IFAS Extension*, Vol. 2020(2):7.

[68] **Url-9** < *https:// physics.nist.gov* >, erişim tarihi 05.04.2024.

[69] **Clark, I.** (1979). Practical Geostatistics. *Elsevier. ed. Elsevier*, London. U.K.

[70] **Çetin, M.** (1996). *Jeoistatistiksel Yöntem ile Nokta ve Alansal Yağışların Saptanması ve Stokastik Olarak Modellenmesi, Örnek Havza Uygulamaları.* (Yüksek lisans tezi) Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

[71] **Olea, R.A.** (1982). Optimization of the High Plains Aquifer Observation Network. *Kansas Geolojical Survey Groundwater Series Report*. Kansas, USA.

[72] **Saraç, C., Tercan, A.E.** (1997). Grade and Reserve Estimation of the Tulovasi Borate Deposit by Block Kriging. *İnternational Geol.,* Rev. 38, 832–837.

[73] **Diggle, P., Riberio, P. J.** (2007). Model-Based Geostatistics. *Springer.* ed. Springer, London, U.K.

[74] **İnal, C., Yiğit, C.Ö.** (2003). Jeodezik Uygulamalarda Kriging Enterpolasyon Yönteminin Kullanılabilirliği. *Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı*, Konya, pp. 177–185.

[75] **Özçakal, E.** (2008). *Gümüldür Yöresi Yeraltı Sularına Ait Bazı Sulama Suyu Kalite Parametrelerinin Jeoistatistiksel Analizi*. (Yüksek lisans tezi) Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

[76] **Tercan, A.E., Saraç, C.** (1998). Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeoistatistiksel Yöntemler. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, Ankara.

[77] **McGrath, D., Zhang, C., Carton, O.T.** (2004). Geostatistical Analyses and Hazard Assessment on Soil Lead in Silvermines Area. *Ireland Environment Pollution*, 127, 239–248.

[78] **Krige, D.G.** (1966). Two-Dimensional Weighted Moving Average Trend Surfaces for Ore-evaluation. *J. South Afr. Inst. Min. Met*, Vol. 66, 13–38.

[79] **Li, C., Lu, Z., Ma, T., Zhu, X.** (2009). A Simple Kriging Method Incorporating Multiscale Measurements in Geochemical Survey. J. *Geochemical Explor*, Vol. 101, 147–154.

[80] **Yeşilkanat, C.M., Kobya, Y., Taşkin, H., Çevik, U.** (2014). Interpolated Modelling and Mapping of Gross Alpha and Gross Beta for Natural Spring Water in Artvin, Turkey. *Cumhur. Sci*, Vol. J. 35, pp.11–35.

[81] **Cafaro, C., Bossew, P., Giovani, C., Garavaglia, M.** (2014). Definition of Radon Prone Areas in Friuli Venezia Giulia Region, Italy, Using Geostatistical Tools. J. *Environ. Radioac*, Vol. 138, pp. 208–219.

[82] **Damla, N., Kara, A., Tel, E., Yesilkanat, C.M.** (2017). Mapping of Indoor Radon Survey and Dose Estimations in Health Centres in Turkey. *Indoor Built Environment*, Vol.26.

[83] **Kobya, Y., Taşkın, H., Yeşilkanat, C.M., Çevik, U., Karahan, G., Çakır, B.** (2015). Radioactivity Survey and Risk Assessment Study for Drinking Water in the Artvin Province, Turkey. *Water Air Soil Pollut*,vol. 226, pp. 49.

[84] **Pasculli, A., Palermi, S., Sarra, A., Piacentini, T., Miccadei, E.** (2014). A Modelling Methodology for the Analysis of Radon Potential Based on Environmental Geology and Geographically Weighted Regression. *Environ. Model. Softw*. Vol. 54, pp. 165–181.

[85] **Sanusi, M.S.M., Ramli, A.T., Gabdo, H.T., Garba, N.N., Heryanshah, A., Wagiran, H., Said, M.N.** (2014). Isodose Mapping of Terrestrial Gamma Radiation Dose Rate of Selangor State, Kuala Lumpur and Putrajaya , Malaysia. J. *Environ. Radioact,*Vol. 135, pp. 67–74.

[86] **Türkekul, İ., Yeşilkanat, C.M., Ciriş, A., Kölemen, U.** (2017). Interpolated Mapping and Investigation of Environmental Radioactivity Levels in Soils and Mushrooms in the Middle Black Sea Region of Turkey Radioactivity Levels in Soils and Mushrooms in the Middle Black. *Physical Sciences Journals*, Vol. 6016 pp. 12.

[87] **Warnery, E., Ielsch, G., Lajaunie, C., Cale, E., Wackernagel, H., Debayle, C., Guillevic, J.** (2015). Indoor Terrestrial Gamma Dose Rate Mapping in France: A Case Study Using Two Different Geostatistical Models. *J. Environ. Radioact*. Vol.139, pp. 140–148.

[88] **Yeşilkanat, C.M., Akbulut Özen, S.** (2019). Estimation of Radon Flux Spatial Distribution in Rize, Turkey by the Artificial Neural Networks *Method. Appl. Radiat. Isot*. Vol. 151, pp. 207–216.

[89] **Yeşilkanat, C.M., Kobya, Y., Taşkin, H., Çevik, U.** (2015). Dose Rate Estimates and Spatial Interpolation Maps of Outdoor Gamma Dose Rate with Geostatistical Methods; A Case Study from Artvin, Turkey. *J. Environ. Radioact, Vol.* 150, pp. 132–144.

[90] **ICRP.** (2011). Radiological Protection Against Radon Exposure (Rapor No: 48299671-6554). ICRP Corporate Report.

[91] **WHO.** (2009). WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. Geneva: WHO Press Raport.

[92] **United Nations Scientific Committee** (2000). Effects and Risks of Ionizing Radiations (Report No: 2000a). UN, New York: UNSCEAR Report.

[93] **United Nations Scientific Committee** (2000). Exposure and Effects of the Chernobyl Accident (Report No: 2000b). UN, New York: UNSCEAR Report.

[94] **United Nations Scientific Committee.** (2000). Exposures from Natural Radiation Sources (Report No: 2000c). UN, New York: UNSCEAR Report.