**T.C.**
**SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# BİR RADON İZLEME SİSTEMİNİN TASARIMI VE TEST EDİLMESİ

**Abbas Alpaslan KOÇER**

**Danışman**
**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU**

**DOKTORA TEZİ**
**FİZİK ANABİLİM DALI**
**ISPARTA - 2023**

© 2023 [Abbas Alpaslan KOÇER]

**İÇİNDEKİLER**


| | Sayfa |
|---|---|
| İÇİNDEKİLER | i |
| ÖZET | iii |
| ABSTRACT | vi |
| TEŞEKKÜR | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | x |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xvi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Radon | 3 |
| 1.2. Radon ve Sağlık | 7 |
| 1.3. Sınır Değerler | 8 |
| 1.4. Radon Ölçüm Yöntemleri | 9 |
| 1.5. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Web-Tabanlı Kontrol | 11 |
| 1.6. Motivasyon | 14 |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ | 15 |
| 3. YÖNTEM | 39 |
| 3.1. Çalışma Alanının Tanıtımı | 39 |
| 3.2. Kullanılan Ekipman ve Yazılımların Tanıtımı | 44 |
| 3.2.1. Donanımsal bileşenler | 44 |
| 3.2.1.1. Wave radon dedektörü | 44 |
| 3.2.1.2. Raspberry Pi 3B | 45 |
| 3.2.1.3. SD kart | 47 |
| 3.2.1.4. Modem | 48 |
| 3.2.2. Yazılımsal bileşenler | 48 |
| 3.2.2.1. Python | 50 |
| 3.2.2.2. Raspbian | 51 |
| 3.2.2.3. VNC | 51 |
| 3.2.2.4. ThingSpeak | 53 |
| 3.2.2.5. ASP.NET ve MVC5 | 53 |
| 3.2.2.6. HTML, CSS, Bootstrap ve Javascript | 55 |
| 3.2.2.7. Jquery ve Ajax | 56 |
| 3.2.2.8. ASP.NET Web API | 57 |
| 3.2.2.9. Visual Studio ve C# | 57 |
| 3.2.2.10. MSSQL | 57 |
| 3.2.2.11. TeamViewer | 58 |
| 3.3. IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sistemi Mimarisi | 59 |
| 3.4. Web-Kontrollü Online Radon Takip Ağı Mimarisi | 61 |
| 3.4.1. Visual studionun kurulumu | 63 |
| 3.5. Ölçüm Noktalarının Tanıtımı | 78 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA | 82 |
| 4.1. Ön-Ölçümlere ait Bulgular | 82 |
| 4.2. Test Ölçümlerine ait Bulgular | 88 |
| 4.2.1. D1'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri | 89 |
| 4.2.2. D2'nin bulunduğu birimdeki radon ölçümleri | 95 |
| 4.2.3. D3'ün bulunduğu birimdeki radon ölçümleri | 101 |
| 4.2.4. D4'ün bulunduğu birimdeki radon ölçümleri | 107 |

4.2.5. D5'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 113
4.2.6. D6'nın bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 119
4.2.7. D7'nin bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 125
4.2.8. D8'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 131
4.2.9. D9'un bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 137
4.2.10. D10'un bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 143
4.2.11. D11'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 149
4.2.12. D12'nin bulunduğu birimdeki radon ölçümleri ..... 155
4.2.13. Test ölçümleri için genel değerlendirme ..... 161
5. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 174
KAYNAKLAR ..... 179
EKLER ..... 189
EK A. Çalışma İzin Belgesi ..... 190
EK B. IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sisteminin Kurulumu ..... 191
EK B1. VNC Sistemi ..... 192
EK B2. Sensörlerden Veri Alınması ..... 201
EK B3. Sensörlerden Verilerin Okunması ..... 202
EK B4. Verilerin İnternete Gönderilmesi ve ThingSpeak Üzerinde Grafik Çizimi ..... 204
EK B5. IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sistemi ile Verilerin Aktarılmasında Yaşanan Problemler ve Uygulanan Çözümler ..... 215
EK C. Patent Bülten Yayını ..... 218
EK D. Sistem Kurulumunda Yaşanan Sorunlar ve Uygulanan Çözümler ..... 219
EK E. Wave Radon Dedektörü için 200 Bq/m³'teki Yüzde Ölçüm Hatasının Belirlenmesi ..... 223
EK F. Ön-Ölçümlere ait İstatistiksel Analizler ..... 227
EK G. Test Ölçümlerine ait İstatistiksel Analizler ..... 237
ÖZGEÇMİŞ ..... 239

# ÖZET

## Doktora Tezi

## BİR RADON İZLEME SİSTEMİNİN TASARIMI VE TEST EDİLMESİ

**Abbas Alpaslan KOÇER**

**Süleyman Demirel Üniversitesi**
**Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU**

Radon maruziyeti, halk sağlığını yakından ilgilendiren gerçek bir çevre sorunudur. Radon radyoaktiftir ve A-sınıfı bir kanserojendir. Yaşadığımız her yerde, az veya çok miktarda mutlaka radon mevcuttur. Radon, havadan daha ağırdır ve zamanla kapalı mekânlarda birikebilir. Radon ve bozunma ürünlerinin solunması akciğer kanseri oluşumu ile ilişkilendirildiğinden bina içi radon seviyelerinin belirlenmesi ve bilhassa orta veya yüksek düzeyde doğal radyasyona sahip bölgelerdeki bina içi radon yoğunluklarının takip edilmesi oldukça önemlidir. Radonun varlığı ve miktarı, sadece özel olarak geliştirilmiş cihazlar vasıtasıyla tespit edilebilmektedir.

Bu çalışmada, bina içi atmosferik radon konsantrasyonlarının ölçümü ve monitörlemesi için geliştirilen ve IRL-RMS (Isparta Radon Laboratuvarı-Radon Monitörleme Sistemi) adını verdiğimiz web-kontrollü online bir radon takip ağı tasarımı tanıtılmaktadır. Önerilen sistem mimarisi, yerleştirildiği ölçüm noktalarındaki radon düzeylerini eş-zamanlı ve sürekli (her saatte bir kez) ölçerek bu ölçüm sonuçlarına ait verileri online olarak bir merkeze (kontrol merkezine) gönderen IoT-tabanlı (nesnelerin interneti kapsamında çalışan) tekli radon takip sistemlerini web üzerinden bir arada kontrol edebilen bir takip ağı olarak tasarlanmıştır. Bu tasarım sayesinde, farklı mekânlardan (birbirinden bağımsız tekli radon takip sistemlerinden) gelen veriler, gerçek-zamanlı olarak kontrol merkezinde işlenip, depolanabilmekte ve ölçülen radon düzeyleri, internet erişimine sahip uzaktaki bir bilgisayardan anlık olarak veya belirli bir zaman aralığı için görsel olarak da takip edilebilmektedir. Önerilen tasarım iki adımlı bir çalışma ile hayata geçirilmiştir. İlk adımda, online radon ölçümü için kullanılacak IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi geliştirilerek bu sistemin uzun-dönem radon ölçümleri için veri aktarma performansı bakımından uygunluğu, ön-ölçümlerle ortaya konulmuştur. Sonraki adımda ise, tekli sistemleri bir arada kontrol edebilen web-tabanlı bir kontrol programı hazırlanmış ve fiziki olarak kurulan bir radon takip ağı ile bir yıl boyunca test ölçümleri yapılarak önerilen tasarımın pratikteki kullanımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada öncelikle, ev ve işyerleri için bina içi atmosferik radon seviyelerinin sürekli olarak ölçülüp monitörlenebileceği, uygun maliyetli bir IoT-tabanlı tekli

takip sistemi tasarımına odaklanılmıştır. Bu amaçla, piyasadan temin edilebilen hesaplı bir elektronik radon dedektörü ile bir SBC (tek kartlı bilgisayar) birbirlerine kablosuz olarak bağlanmıştır. SBC içerisinde çalışan ve Python dilinde yazdığımız kod yardımıyla, sistem tarafından alınan radon ölçüm verilerinin tanımlı internet alanına (buluta) aktarılması ve depolanması sağlanmıştır. Buluttaki bu verilere, internete bağlı cihazlarla iletişim kurmayı sağlayan açık kaynaklı bir IoT uygulama programı ile ulaşmak mümkün olduğu için önerilen tasarım, internete bağlı bir PC kullanarak ölçüm verilerinin uzaktan işlenmesini ve görselleştirilmesini mümkün kılmıştır. Bir radon takip sisteminin uzun-dönem ölçümlerine uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle tekli radon takip sistemimizin veri iletim verimliliği, Isparta il merkezinde bulunan bir konutta, 1 Haziran 2020 ile 31 Ocak 2021 tarihleri arasında gerçekleştirilen ön-ölçümlerle araştırılmıştır. 8 ay boyunca toplamda 5848 adet saatlik veri kaydedilerek sistemin %99,5 düzeyinde yüksek bir veri iletim performansına sahip olduğu ve uzun-dönem radon ölçümleri için rahatlıkla kullanılabileceği gösterilmiştir. IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi için yapılan ön-ölçümlerde, atmosferik radon konsantrasyonlarının 2-178 Bq/m$^3$ arasında değiştiği ve evdeki ortalama radon yoğunluğunun 59 Bq/m$^3$ olduğu tespit edilmiştir. Bu düzey, TENMAK'ın (Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu'nun) meskenler için kabul ettiği 400 Bq/m$^3$'lük sınır değerin oldukça altındadır. Ek olarak, ön-ölçümlerden elde edilen verilerin istatistiksel analizi, SPSS 25.0 programı kullanılarak yapılmıştır. Sağa çarpık bir dağılım sergileyen fakat, herhangi bir dağılıma uymayan verilerin analizleri için parametrik olmayan testler uygulanmış ve Kruskal Wallis testlerine göre; hem aylar arasında hem de mevsimler arasında radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir ($p<0,05$).

Çalışmanın ikinci aşamasında 12 adet tekli radon takip sisteminin yer aldığı bir ölçüm ağı kurulmuştur. Ağdaki tekli sistemlere ait ölçümlerin online olarak takip edilebilmesi amacıyla bu tasarımla entegre olarak çalışabilecek web-tabanlı bir kontrol programı hazırlanmıştır. Önerilen web-kontrollü online radon takip ağı sisteminin performansı, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi'nde bulunan 12 ayrı birimde, Mart 2021 tarihinden itibaren bir yıl boyunca kesintisiz olarak gerçekleştirilen test ölçümleriyle incelenmiştir. Sorunsuz olarak çalışan bu sistemle, toplamda 97503 adet saatlik radon ölçüm verisi, yer ve zaman bilgileriyle birlikte önceden belirlenmiş www.irl32.me adresli internet alanına aktarılarak kayıt altına alınmıştır (Isparta özelinde yaşanan yoğun yağışların neden olduğu uzun süreli elektrik ve internet kesintilerinden kaynaklanan veri kaybı %7 civarındadır). Test ölçümlerinden elde edilen bina içi atmosferik radon konsantrasyonlarının 1 Bq/m$^3$ ile 4691 Bq/m$^3$ arasında değiştiği bulunmuştur. Fakülte genelindeki ortalama radon seviyesi ise 415 Bq/m$^3$ olarak belirlenmiştir. Ölçüm yapılan iki birimdeki ortalama radon yoğunluklarının 1970 Bq/m$^3$ ve 1579 Bq/m$^3$ değerleri ile TENMAK'ın işyerleri için belirlediği 1000 Bq/m$^3$'lük sınırı aştığı tespit edilmiştir. Fakülte genelinde, katlara bağlı ortalama radon seviyelerinin; zemin, 1.kat ve 2.kat için sırasıyla 1000 Bq/m$^3$, 135 Bq/m$^3$ ve 101 Bq/m$^3$ düzeyinde olduğu bulunmuş, beklenildiği gibi yükseklik arttıkça radon yoğunluğunun azaldığı gösterilmiştir. Test ölçümlerine ait tüm veriler SPSS 25.0 programıyla istatistiksel olarak analiz edilmiş ve normal dağılıma sahip olmayan radon ölçüm

verilerinin katlara ve mevsimlere bağlı değişimi parametrik olmayan testlerle incelenmiştir. Kruskal Wallis test sonuçlarına göre; radon ölçümleri ile katlar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu ($p<0,05$) tespit edilmiş ve ayrıca radon ölçümleri ile mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu bulunmuştur ($p<0,05$).

Bu çalışmanın limitleri dahilinde, ülkemizdeki ilk web-kontrollü online radon takip ağı sistemlerinden birini kurmak üzere geliştirdiğimiz IRL-RMS tasarımının, test ölçümlerini başarıyla geçtiği ve gerek kısa-dönemli gerekse uzun-dönemli ölçümler için atmosferik radon konsantrasyonlarının uzaktaki bir merkezde monitörlenmesi amacıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Isparta, Bina içi radon, Aktif ölçüm tekniği, Radon takip ağı, IRL-RMS, Radon sensörü, SBC, IoT, Python, Web-tabanlı kontrol.

**2023, 241 sayfa**

**ABSTRACT**

**PhD. Thesis**

**DESIGNING AND TESTING A RADON MONITORING SYSTEM**

**Abbas Alpaslan KOÇER**

**Süleyman Demirel University**
**Graduate School of Natural and Applied Sciences**
**Department of Physics**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU**

Radon exposure is a real environmental problem that closely concerns public health. Radon is radioactive and is a class-A carcinogen. Everywhere we live, there is unquestionably radon, in greater or lesser quantities. Radon is heavier than air and therefore, it can accumulate indoors over time. Since inhalation of radon and its decay products is associated with the formation of lung cancer, it is very important to determine indoor radon levels and to monitor indoor radon concentrations, especially in areas with moderate or high levels of natural radiation. The presence and the amount of radon can only be detected by specially developed devices.

This study introduces a web-controlled online radon monitoring network design, which we named IRL-RMS (Isparta Radon Laboratory-Radon Monitoring System), developed for measuring and monitoring indoor atmospheric radon concentrations. The proposed system architecture consists of a control unit and IoT-based (internet of things-based) individual radon monitoring systems that measure the radon levels continuously (once every hour) at the measurement points where they are placed. Then the measurement data obtained from this network are collected online at the control center. With the aid of this design, data coming from different places (from different individual radon monitoring systems) can be processed and stored in the control center simultaneously. Real-time measurements can be monitored visually from a computer with internet access and a data set for a certain time interval can also be examined by this configuration. The proposed system was designed in two steps. In the first step, an IoT-based individual radon monitoring system was developed for online radon measurement that must fulfil the data transfer efficiency for long-term radon research, which was tested by preliminary measurements. In the second step, a web-based control program was established to control all individual systems together for a real situation. Thus, a radon monitoring network was set up and the practical use of the proposed design was investigated by one-year test measurements.

The study primarily focused on the design of a cost-effective, IoT-based individual monitoring system that can be used in homes and workplaces for

monitoring and measuring atmospheric indoor levels continuously. For this purpose, a commercially available, inexpensive electronic radon detector and an SBC (single board computer) were wirelessly connected to each other. The radon measurement data received by the system is transferred to the defined internet area (cloud) and stored with the help of the code we wrote in Python language, which works in SBC. Since it is possible to access this data in the cloud with an open-source IoT application program that enables communication with internet-connected devices, the proposed design made it possible to remotely process and visualize measurement data using an internet-connected PC. A radon monitoring system must be suitable for long-term measurements. For this reason, the data transmission efficiency of our individual radon monitoring system was investigated with pre-measurements carried out between 1 June 2020 and 31 January 2021 in a residence located in the city center of Isparta. A total of 5848 hourly data were recorded during 8 months, showing that the system has a high data transmission performance of 99.5% and can be conveniently used for long-term radon studies. In the preliminary measurements, it was determined that the atmospheric radon concentrations ranged between 2 and 178 $Bq/m^3$, and the average radon concentration in the house was 59 $Bq/m^3$. This level is well below the reference value of 400 $Bq/m^3$ accepted by TENMAK (Turkish Energy, Nuclear and Mining Research Institute) for homes. In addition, the statistical analyses of the data obtained from the pre-measurements were performed by using SPSS 25.0. It was found that the measurement data, which displayed a right-skewed distribution, did not fit any known distribution. Thus, non-parametric tests were applied for the analyses of the data. According to Kruskal Wallis tests, statistically significant differences were determined between radon concentrations and seasons ($p<0.05$), and also between radon measurements and months ($p<0.05$).

In the second stage of the study, a measurement network, which consists of 12 individual radon monitoring systems, was established. In order to monitor the measurements of the individual systems in the network online, a web-based control program was developed that can work in integration with the design. The performance of the proposed web-controlled online radon monitoring network system has been examined with continuous test measurements carried out for one year since March 2021 in 12 different units located at Süleyman Demirel University, Faculty of Arts & Sciences. This network system worked without any trouble. A total of 97503 hourly radon data were obtained, along with location and time information. All the data were successfully transferred to the predetermined internet area www.irl32.me and recorded The data loss was around 7% (due to long-term electricity and internet interruptions caused by heavy rains in Isparta). The test measurements revealed that the indoor atmospheric radon concentrations varied between 1 $Bq/m^3$ and 4691 $Bq/m^3$. The average radon level in the faculty was determined as 415 $Bq/m^3$. It was found that the average radon concentrations in two units exceeded the reference level of 1000 $Bq/m^3$ determined by TENMAK for workplaces (the average radon concentrations of these units were 1970 $Bq/m^3$ and 1579 $Bq/m^3$). In the faculty building, the average radon levels of the floors were identified as 1000 $Bq/m^3$, 135 $Bq/m^3$ and 101 $Bq/m^3$ for the ground, 1st floor and 2nd floor respectively. As expected, the radon concentration decreased as the height increased. All the data from the test measurements were statistically analyzed by using SPSS 25.0. Since

the variation of radon data did not display a normal distribution, non-parametric tests were used in the analyses. According to Kruskal Wallis test results; it was determined that there was a statistically significant difference between radon measurements and floors ($p<0.05$), and there was also a statistically significant difference between radon measurements and seasons ($p<0.05$).

Within the limits of this study, it can be concluded that the IRL-RMS design, which is one of the first web-controlled online radon monitoring network systems in Türkiye, accomplishes the measurement tasks successfully. Therefore, IRL-RMS can be conveniently used to monitor atmospheric radon concentrations for both short-term and long-term studies.

**Keywords:** Isparta, Indoor radon, Active measurement technique, Radon monitoring network, IRL-RMS, Radon sensor, SBC, IoT, Python, Web-based control.

**2023, 241 pages**

**TEŞEKKÜR**

Bu tez çalışmamda büyük bir sabırla yardımlarını gösteren, deneysel çalışmalarımda ve tezin yazımında bir sürü uzun gece ve hafta sonunda bile bana desteğini her zaman gösteren, ne zaman yanına gitsem tavsiyelerini, bilgilerini ve tecrübelerini esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ertan KÜRKÇÜOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

FDK-2021-8430 No`lu Proje ile tezimi kısmi olarak olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tez izleme komitesi üyelerinden Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Başkanı Prof. Dr. Seyfettin ÇAKMAK'a ve Akdeniz Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Mustafa HOŞTUT'a çalışmalarım boyunca gösterdikleri ilgi ve hoşgörüden dolayı ayrı ayrı teşekkür ederim. Tez jüri üyelerinden Prof. Dr. Abdullah KAPLAN'a (SDÜ) ve Gülçin BİLGİCİ CENGİZ'e (KÜ) çalışma konusu ile ilgili yaptıkları değerlendirmelerden dolayı teşekkür ediyorum.

Tezimde verilerin istatistiksel analizinin yapılarak incelenmesinde katkılarını sağlayan Aylin GÖÇOĞLU'na ve Yusuf Can SEVİL'e teşekkür ederim.

Ülkemizin ve tüm dünyanın Covid-19 salgını nedeniyle zor günler geçirdiği 2020 yılının bahar mevsiminde bu çalışmanın ilk adımını gerçekleştirdiğim zamanda bana maddi ve manevi desteklerini gösteren, sabrını ve sevgisini her zaman hissettiğim kardeşlerime teşekkür ederim.

Doktora çalışmamda bana maddi ve manevi olarak destek olan, varlığından her zaman güç aldığım çok değerli babam ve anneme sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasında bana inanıp, güvenen ve bu çalışmayı yapabileceğimden bir an olsun tereddüt etmeyen biricik eşim Gülbin'e teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarımı yaparken gerekli zaman ayıramadığım, beni küçücük yaşında büyük bir anlayışla karşılayan biricik oğlum Alperen'e teşekkür ederim.

Abbas Alpaslan KOÇER
ISPARTA, 2023

## ŞEKİLLER DİZİNİ


| | Sayfa |
|---|---|
| Şekil 3.1. Çalışma alanlarının haritası | 42 |
| Şekil 3.2. Ön-ölçümlerin yapıldığı meskenin 3D görünümü | 43 |
| Şekil 3.3. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi | 44 |
| Şekil 3.4. Wave radon dedektörü | 45 |
| Şekil 3.5. Sistemde kullanılan SBC'nin önden (a) ve arkadan (b) görünüşü. | 46 |
| Şekil 3.6. VNC ile uzaktan SBC'nin kontrolü | 52 |
| Şekil 3.7. ASP.NET temeli | 54 |
| Şekil 3.8. ASP.NET hizmetleri | 54 |
| Şekil 3.9. ASP.NET platformu ile MVC çerçevesi arasındaki ilişki | 55 |
| Şekil 3.10. TeamViewer ile SBC'nin uzaktan kontrolü | 59 |
| Şekil 3.11. IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin mimarisi | 60 |
| Şekil 3.12. ThingSpeak aracılığıyla saatlik radon değişiminin görsel incelemesi | 60 |
| Şekil 3.13. Web-kontrollü online radon takip ağının çalışma mimarisi | 62 |
| Şekil 3.14. Radon ölçerin kutulanmış hali | 63 |
| Şekil 3.15. Kullanılabilir visual studio sürümleri | 64 |
| Şekil 3.16. Visual studionun 2019 versiyonu | 66 |
| Şekil 3.17. Visual studio yükleyicisi | 66 |
| Şekil 3.18. İş yüklerinin seçimi ve ihtiyaç duyulan ek alan | 67 |
| Şekil 3.19. Kurulum seçenekleri | 67 |
| Şekil 3.20. ASP.NET web uygulama penceresi | 68 |
| Şekil 3.21. ASP.NET web uygulaması (.NET Framwork) | 68 |
| Şekil 3.22. Yeni ASP.NET web uygulaması oluştur bölümü | 69 |
| Şekil 3.23. ASP.NET kod yazım alanı | 70 |
| Şekil 3.24. Microsoft SQL visual studio management programı | 71 |
| Şekil 3.25. Web hosting yönetici paneli | 71 |
| Şekil 3.26. FileZilla'nın genel görünümü | 71 |
| Şekil 3.27. Web-kontrol programı ana sayfası | 72 |
| Şekil 3.28. Kontrol paneline erişim sağlayan kullanıcı bilgileri | 72 |
| Şekil 3.29. Kontrol paneli ana sayfası | 73 |
| Şekil 3.30. Radon miktarının değişmesiyle birlikte dedektörün renk değiştirmesi | 73 |
| Şekil 3.31. Tüm parametrelerin bulunduğu grafik alanı | 74 |
| Şekil 3.32. Parametrelere erişim penceresi | 75 |
| Şekil 3.33. Kullanıcı ana paneli | 76 |
| Şekil 3.34. www.irl32.me adresindeki radon, nem ve sıcaklık sonuçlarının aktarıldığı web ortamı | 76 |
| Şekil 3.35. www.irl32.me adresinden elde edilen anlık verilerin değişimini gösteren grafik ekranı | 77 |
| Şekil 3.36. SDÜ Fen-Edebiyat Fakültesi zemin kat planı ve radon takip sistemlerinin (D1, D2, D3, D4) yerleştirildiği ölçüm noktaları | 79 |
| Şekil 3.37. SDÜ Fen-Edebiyat Fakültesi 1.kat planı ve D5, D6, D7, D8 ölçüm sistemlerinin bulunduğu konumlar | 80 |
| Şekil 3.38. D9, D10, D11 ve D12 radon ölçüm sistemlerinin konumlandırıldığı yerleri gösteren Fen-Edebiyat Fakültesi 2.kat planı | 80 |

Şekil 4.1. Ön-ölçümlerden elde edilen tüm veriler ..... 83
Şekil 4.2. Ön-ölçümlerin aylık radon değişimi ..... 85
Şekil 4.3. Konuttaki mevsimsel radon değişimi ..... 86
Şekil 4.4. Gece ve gündüz radon seviyelerinin Ekim ayı için günlük olarak karşılaştırılması ..... 87
Şekil 4.5. IRL'nin giriş kapısından görünümü ..... 89
Şekil 4.6. Online radon ölçüm sistemi D1 ..... 90
Şekil 4.7. D1 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 91
Şekil 4.8. D1 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 92
Şekil 4.9. D1 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 93
Şekil 4.10. D1 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 94
Şekil 4.11. Dekanlık ofisinin genel görünümü ..... 95
Şekil 4.12. Online radon ölçüm sistemi D2 ..... 96
Şekil 4.13. D2 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 97
Şekil 4.14. D2 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 98
Şekil 4.15. D2 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 99
Şekil 4.16. D2 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 100
Şekil 4.17. Arkeoloji bölümü seminer salonunun genel görünümü ..... 101
Şekil 4.18. Online radon ölçüm sistemi D3 ..... 102
Şekil 4.19. D3 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 103
Şekil 4.20. D3 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 104
Şekil 4.21. D3 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 105
Şekil 4.22. D3 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 106
Şekil 4.23. Kimya laboratuvarının genel görünümü ..... 107
Şekil 4.24. Online radon ölçüm sistemi D4 ..... 108
Şekil 4.25. D4 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 109
Şekil 4.26. D4 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 110
Şekil 4.27. D4 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 111
Şekil 4.28. D4 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 112
Şekil 4.29. Fizik bölümü seminer salonunun giriş kapısından görünümü ..... 113
Şekil 4.30. Online radon ölçüm sistemi D5 ..... 114
Şekil 4.31. D5 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 115

Şekil 4.32. D5 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 116
Şekil 4.33. D5 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 117
Şekil 4.34. D5 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 118
Şekil 4.35. Konferans salonunun görünümü ..... 119
Şekil 4.36. Online radon ölçüm sistemi D6 ..... 120
Şekil 4.37. D6 ölçüm sisteminin kontrolü ..... 120
Şekil 4.38. D6 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 121
Şekil 4.39. D6 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 122
Şekil 4.40. D6 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 123
Şekil 4.41. D6 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 124
Şekil 4.42. Türk Dili ve Edebiyatı bölümünde bulunan ofis ..... 125
Şekil 4.43. Online radon ölçüm sistemi D7 ..... 126
Şekil 4.44. D7 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 127
Şekil 4.45. D7 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 128
Şekil 4.46. D7 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 129
Şekil 4.47. D7 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 130
Şekil 4.48. Matematik bölümünde bulunan çalışma ofisi ..... 131
Şekil 4.49. Online radon ölçüm sistemi D8 ..... 132
Şekil 4.50. D8 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 133
Şekil 4.51. D8 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 134
Şekil 4.52. D8 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 135
Şekil 4.53. D8 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 136
Şekil 4.54. Kimya bölümü bilgisayar laboratuvarı ..... 137
Şekil 4.55. Online radon ölçüm sistemi D9 ..... 138
Şekil 4.56. D9 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 139
Şekil 4.57. D9 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 140
Şekil 4.58. D9 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 141
Şekil 4.59. D9 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 142
Şekil 4.60. Biyoloji bölümü seminer salonu ..... 143
Şekil 4.61. Online radon ölçüm sistemi D10 ..... 144

Şekil 4.62. D10 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 145
Şekil 4.63. D10 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 146
Şekil 4.64. D10 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 147
Şekil 4.65. D10 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 148
Şekil 4.66. Felsefe bölümünde bulunan ofis ..... 149
Şekil 4.67. Online radon ölçüm sistemi D11 ..... 150
Şekil 4.68. D11 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 151
Şekil 4.69. D11 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 152
Şekil 4.70. D11 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 153
Şekil 4.71. D11 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 154
Şekil 4.72. Tarih Bölümü'nde ölçüm yapılan birim ..... 155
Şekil 4.73. Online radon ölçüm sistemi D12 ..... 156
Şekil 4.74. D12 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi ..... 157
Şekil 4.75. D12 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi ..... 158
Şekil 4.76. D12 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi ..... 159
Şekil 4.77. D12 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı ..... 160
Şekil 4.78. Test ölçümlerine ait radon verilerinin toplu olarak gösterimi ..... 161
Şekil 4.79. Birimlerdeki yıllık ortalama radon düzeylerinin karşılaştırılması ..... 163
Şekil 4.80. Fakülte genelinde katlara bağlı radon düzeyleri ..... 164
Şekil 4.81. Fakülte binasındaki mevsimsel radon seviyeleri ..... 165
Şekil B.1. Mikro SD kart biçimlendirme programı ..... 191
Şekil B.2. Mikro SD karta imaj dosyası yazmak için kullanılan Win32 Disk Imager programı ..... 192
Şekil B.3. Mikro SD kart mount edilmeden önce sistemin disk durumu ..... 194
Şekil B.4. Mikro SD kart imaj yedeği alma programı ..... 195
Şekil B.5. Raspberry Pi 3B CLI konfigürasyon aracı ..... 195
Şekil B.6. Raspberry Pi 3B disk durumu ..... 196
Şekil B.7. Raspberry Pi 3B için konfigürasyon işlemleri ..... 197
Şekil B.8. SBC'nin VNC ile uzaktan kontrolü ..... 197
Şekil B.9. Raspbian işletim sisteminin güncellenmesi ..... 198
Şekil B.10. Güncellemeler öncesi upgrade pakaetlerinin listelenmesi ..... 198
Şekil B.11. Paketlerin kurulum süreci ..... 199
Şekil B.12. Raspbian işletim sistemi için bölgesel ayarların yapılması ..... 199
Şekil B.13. Raspbian işletim sistemi bilgileri ..... 200
Şekil B.14. Yüklenen paketin kontrolü ..... 200
Şekil B.15. Sistemde yüklü paketlerin belirlenmesi ..... 201

Şekil B.16. Nem, sıcaklık, kısa ve uzun-dönem radon bilgilerinin terminalde görünümü ..... 204
Şekil B.17. ThingSpeak ana ekranı ..... 205
Şekil B.18. ThingSpeak my channels ekranı ..... 205
Şekil B.19. Dört alanın tanımlandığı ThingSpeak new channel ekranı ..... 206
Şekil B.20. ThingSpeak IRL laboratuvar ekranının görünümü ..... 206
Şekil B.21. ThingSpeak Write API Key ekranı ..... 207
Şekil B.22. Zamana bağlı nem miktarı ..... 208
Şekil B.23. Nem değerlerinin saatlik olarak değişim miktarı ..... 209
Şekil B.24. Zamana bağlı sıcaklık değerleri ..... 209
Şekil B.25. Sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi ..... 210
Şekil B.26. Zamana bağlı kısa-dönem radon ölçümleri ..... 211
Şekil B.27. Kısa-dönem radon verilerinin saatlik olarak değişimi ..... 211
Şekil B.28. Zamana bağlı uzun-dönem radon değerleri ..... 212
Şekil B.29. Uzun-dönem radon verilerinin saatlik değişimi ..... 213
Şekil B.30. IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin akış diyagramı ..... 214
Şekil E.1. Yüzde ölçüm hatasının tayininde kullanılan Corentium Pro cihazı (referans cihaz) ve Wave radon dedektörü (test edilen cihaz) ..... 224
Şekil E.2. Corentium Pro cihazı ve Wave radon dedektörü ile 200 $Bq/m^3$ civarında elde edilen eş zamanlı radon ölçümleri ..... 226
Şekil F.1. Ön-ölçümlerin frekans dağılımı ..... 228
Şekil F.2. Yaz mevsimindeki frekans dağılımı ..... 229
Şekil F.3. Sonbahar mevsimindeki frekans dağılımı ..... 230
Şekil F.4. Kış mevsimindeki frekans dağılımı ..... 230
Şekil F.5. Yaz mevsimi için değişkenlik katsayısı değerleri ..... 234
Şekil F.6. Sonbahar mevsimi için değişkenlik katsayısı değerleri ..... 235
Şekil F.7. Kış mevsimi için değişkenlik katsayısı değerleri ..... 236

## ÇİZELGELER DİZİNİ


| | Sayfa |
|---|---|
| Çizelge 1.1. $^{232}$Th, $^{238}$U ve $^{235}$U bozunma serileri | 3 |
| Çizelge 1.2. $^{238}$U bozunma zinciri | 5 |
| Çizelge 1.3. $^{232}$Th bozunma zinciri | 6 |
| Çizelge 1.4. Bina içi atmosferik radon konsantrasyonları için çeşitli organizasyonlar tarafından tavsiye edilen müdahale düzeyleri | 8 |
| Çizelge 2.1. Mevcut IoT-tabanlı radon takip sistemlerinin karşılaştırmalı özeti | 38 |
| Çizelge 3.1. Dedektörün temel özellikleri | 45 |
| Çizelge 3.2. SBC'nin teknik özellikleri | 47 |
| Çizelge 3.3. SD kartların yapısı, türleri ve hızları | 47 |
| Çizelge 3.4. Test ölçümleri için seçilen ölçüm noktalarına ait tanımlayıcı bilgiler | 78 |
| Çizelge 4.1. Tüm ölçüm noktalarının konumları ve alınan radon ölçüm sonuçları | 162 |
| Çizelge 4.2. Mevcut online radon ölçüm sistemleri için sistem bileşenlerinin karşılaştırılması | 167 |
| Çizelge 4.3. Online radon ölçümü için kullanılan bazı radon dedektörlerinin teknik özellikleri | 168 |
| Çizelge B.1. Python 3'ün kurulumu | 201 |
| Çizelge B.2. Radon sensörü için takip kodları | 202 |
| Çizelge B.3. Bluetooth ile radon, sıcaklık ve nem değerlerinin okunduğu modüller | 202 |
| Çizelge B.4. Nem, sıcaklık, kısa-uzun dönem radon değişkenlerinin atanması | 204 |
| Çizelge B.5. Radon dedektöründen verilerin okunmasını sağlayan kod | 204 |
| Çizelge B.6. API Key kullanılarak ThingSpeak üzerine verilerin gönderilmesi | 207 |
| Çizelge E.1. 200 Bq/m$^3$ civarında iki dedektörden alınan radon ölçümleri | 225 |
| Çizelge F.1. Radon ölçümlerinin mevsimlere göre karşılaştırılması | 228 |
| Çizelge F.2. Radon ölçümlerinin aylara göre karşılaştırılması | 231 |
| Çizelge F.3. Değişkenlik katsayısı değerleri için karar kuralı | 232 |
| Çizelge F.4. Değişkenlik katsayılarının frekans değerleri | 233 |
| Çizelge G.1. Radon ölçümlerinin mevsimlere göre karşılaştırılması | 237 |
| Çizelge G.2. Radon ölçümlerinin katlara göre karşılaştırılması | 238 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| A° | Angström |
| Ac | Aktinyum |
| A/D | Analog/Dijital |
| ADSL | Asymmetric Digital Subscriber Line (Asimetrik Sayısal Abone Hattı) |
| API | Application Programming Interface (Uygulanan Programın Arayüzü) |
| ARPANET | Advanced Research Projects Office Network (Gelişmiş Araştırma Projeleri Dairesi Ağı) |
| BEIR | Biological Effects of Ionizing Radiation (Ulusal Bilimler Akademisi İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri Komitesi) |
| Bq | Becquerel |
| Bi | Bizmut |
| Ci | Curie |
| $C_{Rn}$ | Radon Konsantrasyonu |
| CSS | Cascading Style Sheets (Basamaklı Stil Şablonları) |
| C# | C Sharp (Programlama dili) |
| °C | Santigrad derece |
| DMİGM | Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü |
| DKj | Değişkenlik katsayısı |
| DBMS | Database Management System (Veritabanı Yönetim sistemi) |
| EC | European Commission (Avrupa Komisyonu) |
| EPA | Environmental Protection Agency (A.B.D. Çevre Koruma Ajansı) |
| EPS | Expanded Polystyren Foam (Genişletilmiş Polistiren Köpük) |
| FEF | Fen-Edebiyat Fakültesi |
| GPS | Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi) |
| g | gram |
| HTTP | Hyper-Text Transfer Protocol (Hiper-Metin Transfer Protokolü) |
| Hz | Herz |
| ID | Identification (Kimlik) |
| ICRP | International Commission on Radiological Protection (Uluslararası Radyasyondan Korunma Ajansı) |
| IDE | Integrated Development Environment (Entegre geliştirme ortamı) |
| IoT | Internet of Things (Nesnelerin İnterneti) |
| IRL-RMS | Isparta Radon Laboratuvarı-Radon Monitör Sistemi |
| J | Joule |
| K | Kelvin |
| LAN | Local Area Network (Yerel alan ağı) |
| M | Mega ($10^6$) |
| MAC | Media Access Control Address (Medya Erişim Kontrol Adresi) |
| MeV | Mega elektron volt |
| Min | Minimum |
| MQTT | Message Queuing Telemetry Transport (Makineden Makineye Ağ Protokolü) |
| MVC | Model-View-Controller (Model-Görünüm-Denetleyici) |
| n | Nötron |
| N | Ölçüm Sayısı |

| | |
|---|---|
| OSI | The Open System Interconnection (Açık Sistem Bağlantısı) |
| p | İstatistik değer |
| P | Proton |
| PC | Personel Computer (Masaüstü Bilgisayar) |
| ppm | Parts per million (Milyonda bir) |
| Po | Polonyum |
| Pb | Kurşun |
| RFB | Remote Frame Buffer (Uzak Çerçeve Arabelleği) |
| Ra | Radyum |
| Rn | Radon |
| SBC | Single Board Computer (Tek Kartlı Bilgisayar) |
| Sv | Sievert |
| SS | Standart sapma |
| SPSS | Statistical Package for Social Sciences (Sosyal Bilimler için İstatistik Programı) |
| SSD | Solid State Drive (Katı hal sürücüsü) |
| SSH | Güvenli Kabuk |
| TCP/IP | Transmission Control Protocol/Internet Protocol (İnternet protokol takımı) |
| TENMAK | Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu |
| Th | Toryum |
| Tl | Talyum |
| TÜİK | Türkiye İstatistik Kurumu |
| U | Uranyum |
| U* | Mann Whitney U istatistik analizi |
| UNSCEAR | United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Birleşmiş Milletler Atomik Radyasyonun Etkileri Bilimsel Komitesi) |
| USB | Universal Serial Bus (Evrensel seri veriyolu) |
| VNC | Virtual Network Computing (Sanal ağ bilgisayarı) |
| VPN | Virtual Private Network (Sanal özel ağ) |
| $\chi^2$ | Ki-Kare |
| Web | World Wide Web (Dünya Çapında Ağ) |
| WHO | World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü) |
| Wi-Fi | Wireless Fidelity (Kablosuz Bağlantı) |
| μ | Mikro ($10^{-6}$) |
| α | Alfa |
| β | Beta |
| γ | Gama |
| 3D | Three dimension (Üç boyutlu) |

# 1. GİRİŞ

Radyoaktivitenin keşfi, 1896 yılında Fransız bilim insanı Henry Becquerel'in karanlık bir odada bulunan fotografik bir levha üzerinde uranyum tuzlarının yaydığı radyasyon İzlerini fark etmesi ile ilişkilendirilmektedir. Ancak Cruie'ler ve Rudherford gibi aynı dönemde yaşayan pek çok bilim insanının da radyasyon çalışmaları yaptığı bilinmektedir. Radyoaktiflik ya da radyoaktivite, kararsız halde bulunan atom çekirdeklerinin kendiliğinden bozunmaya uğrayarak daha kararlı bir yapıya geçtiği sırada çevresine parçacık ve/veya elektromanyetik ışıma formunda enerji (radyasyon) yayması olayıdır. Radyoaktivite, Fransızca'dan dilimize geçmiş bir sözcüktür. Latince ışıldayan anlamına gelen "radiationem" kelimesi ile Fransızca'da aktif anlamına gelen "actif" kelimelerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bozunmaya uğrayan ve radyasyon yayan atom çekirdeklerine radyonüklit (ya da radyoçekirdek) denir. Tarihsel olarak, radyonüklitlerin bozunma sürecinde yayınlanan radyasyon türleri Rudherford tarafından alfa (α), beta (β) ve gama (γ) olarak sınıflandırılmıştır.

Bir çekirdeğin içerisindeki nötron (n) ve proton (p) sayıları arasındaki oran bize bu çekirdeğin kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Genel olarak çekirdekteki n/p oranı 1,5'ten küçük ise bu çekirdek kararlı, büyük ise kararsız olarak kabul edilmektedir. Radyoaktiflik doğal veya yapay kaynaklı olabilir. Doğal radyoaktivite, bir çekirdeğin daha kararlı yapıya ulaşmak için kendiliğinden radyasyon yayması olayıdır. Yapay radyoaktiflik ise kabaca, atom çekirdeğinin dış müdahalelerle radyasyon yayar hale getirilmesi olayı olarak tanımlanabilir.

Alfa radyasyonu parçacık formunda bir radyasyondur ve iki proton ile iki nötrondan oluşan enerjik bir helyum çekirdeği ($^4_2$He) olarak kabul edilmektedir. Doğal kaynaklı α-parçacıklarının genellikle 4-8 MeV aralığında enerjilere sahip olduğu bilinmektedir. 4-10 MeV enerjili alfa-parçacıklarının havadaki menzili 5-11 cm düzeyindedir (Scott, 2014). Bu nedenle doğal alfa radyasyonu ince bir kâğıt, bir alüminyum folyo veya vücudumuzun deri tabakası tarafından durdurulabilir.

Radyoaktif bir maddenin çekirdeğindeki nötron veya proton fazlalığından beta-radyasyonu meydana gelir. β-parçacıkları çekirdek tarafından fırlatılan enerjik eksi veya artı yüklü (pozitron) elektronlar olarak düşünülebilir. Beta radyasyonu, aynı enerjideki alfa-radyasyonuna göre daha düşük iyonizasyon yeteneğine sahip olmasına rağmen doku veya malzemelerin içine daha fazla nüfuz etmektedir (giriciliği daha yüksektir). Doğal kaynaklı beta-radyasyonları vücut derisinin üst kısmından daha ilerisine nüfuz edemezler. Fakat yüksek enerjili doğal beta-radyasyonlarına uzun süre maruz kalma durumunda deri yanıkları oluşabilir. Beta-parçacıklarının havadaki menzili her bir MeV'lik enerji için yaklaşık olarak 4 metre olarak kabul edilebilir (Scott ve Guilmette, 2005). Doğal β-parçacıkları, birkaç milimetre kalınlığında metal levhalar yardımıyla tamamen durdurulabilmektedir.

Atom çekirdeğindeki radyoaktif bozunmalar esnasında oluşan kararsız çekirdek, uyarılmış bir enerji seviyesinde kalabilir ve bu olayı takiben bir foton yayınlayarak ikinci bir bozunma yaparak daha kararlı bir duruma geçebilir. Bu geçiş sırasında yayınlanan fotonlar gama ışını olarak tanımlanmaktadır. Gama-ışınları bilinen en yüksek frekansa sahip elektromanyetik dalgalardır. Doğal kaynaklı bozunma sürecinde ortaya çıkan gama radyasyonu 0,1-10 MeV arasında enerjilere (10-100 Fermi dalga boyuna karşı gelmektedir) sahip olabilir (Akkoyun, 2003). γ-radyasyonu yüksek giriciliğe sahip olup kurşun gibi yüksek yoğunluklu, kalın malzemeler kullanılarak durdurulabilir. Doğrudan gama radyasyonuna maruz kalmanın canlılar üzerinde olumsuz etkileri söz konusudur.

İnsanlar yaşamlarının büyük bir bölümünde hem ev hem de işyerlerinde sürekli olarak doğal kaynaklı radyasyona maruz kalmaktadır. Bunun yanı sıra, tıbbi görüntüleme ve nükleer tıp uygulamaları gibi teşhis ve tedavi amaçlı yapay kaynaklı radyasyonlar da alınmaktadır. Dünya genelinde bir yılda alınan radyasyon dozu 2,8 mSv düzeyindedir (TENMAK, 2022). Maruz kalınan radyasyonun yaklaşık yarısını doğrudan, doğal süreçler sonucunda oluşan radon ve radonun bozunma ürünleri oluşturmaktadır.

## 1.1. Radon

Radon renksiz, kokusuz, tatsız, radyoaktif bir soy gazdır. Periyodik cetvelde 8 A grubunda yer alır. Radonun atomik yarıçapı $1,3\times10^{-10}$ m ve atomik kesitinin alanı $0,72\times10^{-10}$ $cm^2$'dir. Yoğunluğu, 1 atmosfer basınçta 9,73 gr/L ve 273 °K'deki molar hacmi 50,5 $cm^3$/mol'dür. Elektrik iletkenliği hiç yoktur ve ısıl iletkenliği 0,0000364 W/cmK olarak çok düşüktür. Bunun yanında öz ısısı 0,091 J/gK'dir. Radonun bilinen üç doğal izotopu $^{238}U$ (uranyum), $^{232}Th$ (toryum) ve $^{235}U$ (aktinyum) bozunma serilerinin ürünleridir. Bu üç doğal radyoizotop arasında en tehlikelisi olan ve doğada en çok bulunan uranyum-238 serisinin radyoizotopu olan $^{222}Rn$'dir (Sabol, 1997). Çizelge 1.1'de radonun üç doğal radyoizotopunun ortaya çıkmasına neden olan bozunma serileri gösterilmiştir (Olsson ve Tengström, 2004).

Çizelge 1.1. $^{232}Th$, $^{238}U$ ve $^{235}U$ bozunma serileri (Olsson ve Tengström, 2004)

| Bozunma Serisi | Radyoaktif Çekirdek | Yarı-ömür (yıl) | Kararlı Çekirdek | Radyoizotop (Yarı-ömür) |
|---|---|---|---|---|
| Toryum | $^{232}Th$ | $1,4x10^{10}$ | $^{208}Pb$ | $^{220}Rn$ (55,6 s) |
| Uranyum | $^{238}U$ | $4,5x10^{9}$ | $^{206}Pb$ | $^{222}Rn$ (3,82 g) |
| Aktinyum | $^{235}U$ | $7,1x10^{8}$ | $^{207}Pb$ | $^{219}Rn$ (4,0 s) |

Günümüzde radon olarak adlandırılan $^{222}Rn$ radyoizotopu için "radyum emanasyonu" tanımlaması ilk defa 1900 yılında yapılmıştır (George, 2008). $^{222}Rn$ (radon) ve $^{220}Rn$ (toron), doğada genellikle birlikte bulunur. $^{238}U$ ve $^{232}Th$ radyonüklitlerin ana kaynağı yerkabuğunu oluşturan kayalar ve topraktır. Radon, "uranyum-radyum" radyonüklid ailesinin bir parçası olan ve yerkabuğunda eşit olmayan bir şekilde dağılmış olan $^{226}Ra$'nın doğal bozunmasının bir sonucu olarak oluşur. Yerkabuğunda bulunan $^{238}U$ konsantrasyonu yaklaşık olarak 2 ppm düzeyindedir. Yerkabuğundaki uranyum yüzdesi, toryum yüzdesine göre üç kat daha azdır. Çünkü 4,5 milyar yıllık yarı ömrü olan uranyum, sürekli radon kaynağıdır (Herring, 2004). Yarı-ömrü 3,82 gün olan radon 5,48 MeV enerjili alfa parçacığı yayınlayan bir radyoaktif gazdır. $^{222}Rn$ bozunarak kısa yarı ömürlü radon ürünlerini ($^{218}Po$, $^{214}Pb$, $^{214}Bi$ ve $^{214}Po$) oluşturur. Bu ürünler statik yüklere sahip olan katı parçacık şeklindeki kimyasal reaksiyona girebilen ağır metallerdir.

İnsanlar zamanlarının büyük bir bölümünü ev ve işyeri gibi kapalı mekânlarda geçirmektedir. Havadan daha ağır olan radon, zamanla kapalı mekânlarda birikebilir ve bina içi atmosferindeki radon kaynaklı radyasyon maruziyeti önemli hale gelebilir. Radon nedeniyle karşı karşıya kalınan risklerin azaltılabilmesi için bina içi radon düzeylerine yönelik tavsiye edilen referans düzeyleri söz konusudur (Bölüm 1.3). Bu referans seviyeleri, bölgesel düzeylerdeki farklılıklar nedeniyle farklı ülkelerde değişiklik göstermektedir ve referans düzeyi belirtilmeyen yerlerde genellikle 100-300 $Bq/m^3$ aralığındadır (WHO, 2009).

Radon, gaz konveksiyonunun yanı sıra moleküler difüzyon nedeniyle gözenekli ortamlarda (toprak gibi) yoğun bir şekilde göç edebilir. Binalardaki radonun ana kaynağı topraktır. "Topraktaki bozunmadan kaynaklanan radyasyonun yaklaşık olarak yılda 2 milyar Curie ve yeraltı sularındaki potansiyelin yıllık 500 milyon Curie civarında olduğu bildirilmektedir (George, 2008)." Radonun topraktan atmosfere ve buradan da tüm binalara geçişi zamanla önemli ölçüde değişebilir. Bu, jeolojik, iklimsel ve hava koşullarına olduğu kadar bina temelinin inşasına ve binadaki tesisat bağlantılarına da bağlıdır (Marennyy, 2016). Atmosferin aksine radon binanın içinde birikebilir, ancak radonun kapalı ortamlardaki birikimi doğal havalandırmayla veya bir havalandırma sistemi kullanılarak önlenebilir.

Yerkürede yaklaşık 100 ton civarında radon olduğu tahmin edilmektedir (Saç ve Camgöz, 2005). Uranyum konsantrasyonuna bağlı olarak toprakta, sularda, bina içi ve dışındaki atmosferde ve ayrıca binalarda kullanılan yapı malzemelerinde değişik yoğunluklarda radon bulunabilir (ICRP, 2014). Çevremizdeki radonun üçte ikisine yakını topraktan gelmektedir. Bu nedenle toprak üzerine inşa edilen binalardaki radon konsantrasyonlarının bilinmesi gereklidir. Literatürde, radonun etkileri ve tehlikeleri üzerine yapılan pek çok bilimsel çalışma mevcuttur. Çizelge 1.2'de $^{238}U$ bozunma zinciri, Çizelge 1.3'te ise $^{235}U$'in bozunma zinciri verilmiştir (Malling vd., 2013).

Çizelge 1.2. $^{238}U$ bozunma zinciri (Malling vd., 2013)

| **Radyonüklit** | **Simgesi** | **Yarı Ömrü** | **Yayınladığı Radyasyonlar** | **Enerjisi ve Yayınlanma Olasılığı*** | **Bozunma ürünü** |
|---|---|---|---|---|---|
| Uranyum-238 | $^{238}U$ | 4,5×109 yıl | α | 4,2 MeV | $^{234}Th$ |
| Toryum-234 | $^{234}Th$ | 24 gün | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$ | 0,19 MeV<br>63 keV %3,5<br>93 keV, %4 | $^{234}Pa^m$ |
| Protaktinyum-234 m | $^{234}Pa$ m | 1,2 dak | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$ | 2,3 MeV<br>770 keV, %0,3<br>1000 keV, %0,6 | $^{234}U$ |
| Uranyum-234 | $^{234}U$ | $2,5\times10^5$ yıl | α<br>γ | 4,8 MeV<br>53 keV, %0,2 | $^{230}Th$ |
| Toryum-230 | $^{230}Th$ | $7,5\times10^4$ yıl | α<br>γ | 4,7 MeV<br>68 keV, %0,6 | $^{226}Ra$ |
| Radyum-226 | $^{226}Ra$ | $1,6\times10^3$ yıl | α<br>γ | 4,8 MeV<br>190 keV, %4 | $^{222}Rn$ |
| Radon-222 | $^{222}Rn$ | 3,8 gün | α | 5,5 MeV | $^{218}Po$ |
| Polonyum-218 | $^{218}Po$ | 3,1 dak | α | 6,1 MeV | $^{214}Pb$ |
| Kurşun-214 | $^{214}Pb$ | 28,6 dak | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$ | 1,0 MeV<br>295 keV, %19<br>352 keV, %36 | $^{214}Bi$ |
| Bizmut-214 | $^{214}Bi$ | 19,7 dak | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$<br>$\gamma_3$ | 3,2 MeV<br>609 keV, %47<br>1,12 MeV, %17<br>1,76 MeV, %17 | $^{214}Po$ |
| Polonyum-214 | $^{214}Po$ | 160 μs | α | 7,8 MeV | $^{210}Pb$ |
| Kurşun-210 | $^{210}Pb$ | 22 yıl | β<br>γ | 0,017 MeV<br>47 keV, %4 | $^{210}Bi$ |
| Bizmut-210 | $^{210}Bi$ | 5,0 gün | β | 1,2 MeV | $^{210}Po$ |
| Polonyum-210 | $^{210}Po$ | 138 gün | α | 5,3 MeV | $^{206}Pb$ |
| Kurşun-206 | $^{206}Pb$ | | | Kararlı | |

*yayınlanma olasılığı %100 ve %100'e yakın olan ürünlerin olasılıkları gösterilmemiştir.

Çizelge 1.3. $^{232}$Th bozunma zinciri (Malling vd., 2013)

| Radyonüklit | Simgesi | Yarı Ömrü | Yayınladığı Radyasyonlar | Enerjisi ve Yayınlanma Olasılığı* | Bozunma ürünü |
|---|---|---|---|---|---|
| Toryum-232 | $^{232}$Th | $14\times10^{9}$ yıl | α | 4,0 MeV | $^{228}$Ra |
| Radyum-228 | $^{228}$Ra | 5,8 yıl | β | 0,19 MeV | $^{228}$Ac |
| Aktinyum-228 | $^{228}$Ac | 6,1 saat | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$<br>$\gamma_3$ | 2,1 MeV<br>340 keV, %15<br>908 keV, %25<br>960 keV, %20 | $^{228}$Th |
| Toryum-228 | $^{228}$Th | 1,9 yıl | α<br>γ | 5,4 MeV<br>84 keV, %2 | $^{224}$Ra |
| Radyum-224 | $^{224}$Ra | 3,6 gün | α<br>γ | 5,7 MeV<br>241 keV, %4 | $^{220}$Rn |
| Radon-220 | $^{220}$Rn | 55 s | α | 6,3 MeV | $^{216}$Po |
| Polonyum-216 | $^{216}$Po | 0,15 s | α | 6,8 MeV | $^{212}$Pb |
| Kurşun-212 | $^{212}$Pb | 11 saat | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$ | 0,58 MeV<br>239 keV %47<br>300 keV %3,2 | $^{212}$Bi |
| Bizmut-212 | $^{212}$Bi | 1saat %64<br><br><br><br>1saat %36 | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$<br>$\gamma_3$<br>α<br>γ | 2,3 MeV<br>727 keV, %19<br>785 keV, %36<br>1620 keV, %2<br>6,0 MeV<br>40 keV, %1 | $^{212}$Po<br><br><br><br>$^{208}$Tl |
| Polonyum-212 | $^{212}$Po | 300 ns | α | 8,8 MeV | $^{208}$Pb |
| Talyum-208 | $^{208}$Tl | 3,1 dak | β<br>$\gamma_1$<br>$\gamma_2$<br>$\gamma_3$<br>$\gamma_4$ | 1,8 MeV<br>511 keV, %23<br>583 keV, %86<br>860 keV, %12<br>2614 keV,%100 | $^{208}$Pb |
| Kurşun-208 | $^{208}$Pb | | | Kararlı | |

*yayınlanma olasılığı %100 ve %100'e yakın olan ürünlerin olasılıkları gösterilmemiştir.

## 1.2. Radon ve Sağlık

Akciğer kanserinin sigaradan sonra ikinci sebebi olarak gösterilen radon ve bozunma ürünleri, üst solunum yolu içinde oldukça tehlike oluşturmaktadır. Bilimsel çalışmalarda, radonun kısa yarı-ömürlü bozunma ürünlerinin radondan daha tehlikeli olduğu belirtilmiştir. Uranyum madenlerinde çalışan işçiler üzerine yapılan epidemiyolojik araştırmalarda, radon ve bozunma ürünlerinin solunması nedeniyle, bu madende çalışan işçilerin en yüksek kanser riskine sahip meslek grubu olduğu ispatlanmıştır (UNSCEAR, 1988). Kapalı madenlerde çalışan 68000 işçi üzerine yapılan epidemiyolojik araştırmalarda, 2700 işçinin radondan kaynaklı mesleki akciğer kanserine yakalandığı BEIR'in (Ulusal Bilimler Akademisi İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri Komitesi'nin) 6 nolu raporunda bildirilmiştir (BEIR, 1999).

Uranyum madenlerinde yapılan araştırmalara ait raporda, akciğer kanseri riskinin sürekli olarak arttığı belirlenmiş ve bu durum radondan kaynaklanan endişelerin oluşmasına neden olmuştur. Deney fareleri üzerine yapılan epidemiyolojik çalışmalarda, akciğer kanseriyle radon arasında doğrudan bir bağlantı kurulmuştur (ICRP, 2010). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve A.B.D. Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından radon gazı, "A sınıfı kanserojen madde" olarak nitelendirilmiştir (EPA, 2005; WHO, 2009). İngiltere'de Ulusal Radyasyondan Korunma Komitesi (NRPB) tarafından yapılan araştırmalarda, toplam 41000 akciğer kanserinden en az 2500'ü radonla ilişkilendirilmektedir. ABD Halk Sağlığı Servisi tarafından yapılan yıllık araştırmada, akciğer kanseri vakalarının sigara içenlerde 15000'inin, sigara içmeyenlerde ise 5000'inin radonla ilişkili olduğu rapor edilmiştir (Lubin, 1994).

Sigara hariç, $^{222}$Rn'nin akciğer kanserinin bir numaralı sebebi olduğu ve tüm akciğer kanseri ölümlerinin %3-14'ünü oluşturduğu rapor edilmektedir (WHO, 2009; ICRP, 2010). Sigara kullanan ve yüksek dozda radona maruz kalmış kişilerde ise akciğer kanserine yakalanma riskinin daha fazla olduğu bildirilmektedir.

## 1.3. Sınır Değerler

Dünya Sağlık Örgütü'nün 2009 yılında yayınlanan raporuna göre, dünya genelinde meskenlerdeki bina içi atmosferik radon ortalaması 39 $Bq/m^3$ olarak bildirilmektedir (WHO, 2009).

Bina içindeki radon kaynaklı radyasyon dozunun neden olabileceği sağlık risklerini azaltmak amacıyla, ülkeler ve çeşitli uluslararası organizasyonlar kapalı mekânlardaki radon düzeyleri için referans değerler belirlemişlerdir. Bazı ülkeler ve kuruluşlar bina içi atmosferik radon düzeyi için tek bir limit tavsiye ederken, kimileri de müdahale edilebilir ve müdahale edilmesi gereken değerleri içeren iki düzeyi tavsiye etmeyi uygun görmüşlerdir.

Dünya genelinde kabul gören bazı kuruluşların ve ülkemizde radyasyon güvenliği konusunda yasa ile yetkilendirilen Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu'nun (TENMAK'ın) tavsiye ettikleri müdahale düzeyleri Çizelge 1.4'te ev ve işyerleri için özetlenmektedir. Bu organizasyonların belirlediği limit seviyesi aşıldığında, radon konsantrasyonunu düşürücü tedbirler alınmalıdır. Atmosferdeki $^{222}Rn$ ve $^{220}Rn$ konsantrasyonlarının 40 $Bq/m^3$'ten yüksek olduğu bölgelerde diğer bazı kriterlerin de sağlanması koşuluyla, ICRP ve UNSCEAR tarafından bu yerlere yüksek seviyeli doğal radyasyon alanı (HLNRA: High Level Natural Radiation Area) tanımlaması getirilmiştir (Durrani ve Ilic, 1997).

Çizelge 1.4. Bina içi atmosferik radon konsantrasyonları için çeşitli organizasyonlar tarafından tavsiye edilen müdahale düzeyleri

| **Organizasyon** | **Tavsiye Edilen Limitler ($Bq/m^3$)** | | **Referans** |
|---|---|---|---|
| | **Ev** | **İş Yeri** | |
| ICRP | ≤300 | ≤1000 | (ICRP, 2014) |
| WHO | ≤100 | - | (WHO, 2009) |
| EC | ≤300 | ≤1000 | (EC, 2011) |
| TENMAK | ≤400 | ≤1000 | (TENMAK, 2004) |

## 1.4. Radon Ölçüm Yöntemleri

Bina içi atmosferik radon düzeyleri, sadece özel olarak geliştirilmiş cihazlar vasıtasıyla belirlenebilmektedir. Radon ölçümleri için aktif ve pasif ölçüm yöntemleri olmak üzere iki farklı teknik geliştirilmiştir (Durrani ve İliç, 1997; Miles, 2004). Çalışmanın amacına bağlı olarak kısa-dönem (2-7 gün arası) veya uzun-dönem radon ölçümleri (3 ay ve üzeri) için bu tekniklerden en uygun olanı tercih edilmektedir. Radon konsantrasyonu doğal ortam şartlarında ölçülüyorsa, yani ortamdaki atmosferik radon gazı iyonizasyon odasına kendiliğinden (difüzyon yoluyla) giriyorsa bu yöntem pasif radon ölçüm tekniği olarak sınıflandırılmıştır. Pasif radon ölçüm tekniğinde genellikle, ölçüm süresi boyunca sadece bir radon sonucu ortalama değer olarak belirlenmektedir. Atmosferik radon seviyesinin ölçümünde elektronik bileşenlerin de yer aldığı bir sensör kullanılıp ölçüm yapılacak hava numunesi dedektör odasına pompalanarak aktarılıyorsa bu yöntem, aktif ölçüm tekniği olarak değerlendirilebilir.

Pasif ölçüm yöntemlerinde kullanılan cihazların difüzyon kaplarında bir radon sensörü bulunmaktadır. Bu yöntemle radon ölçümlerinin yapılabilmesi için difüzyon kaplarına dışarıdan hava girmesini sağlayan açıklıklar mevcuttur. Bazı pasif ölçüm cihazlarında, difüzyon odasına hava girmesini sağlayan açıklıkların önüne filtre düzeneği de yerleştirilir. Dedektörün radon ölçümlerini doğru alabilmesi için bu dedektörün muhafazasını sağlayan düfüzyon kaplarının içerisinde yani ölçüm odasında en az 1-2 cm civarında bir boşluk bulunması gerekmektedir. Uranyum ve toryum miktarına göre radonun, $^{222}Rn$ ve $^{220}Rn$ izotoplarının bağıl oranı değişmektedir. Pasif ölçüm tekniğinde kullanılan ayırıcı bir mekanizma bulunmuyorsa radon ölçüm sonucu teorik olarak her iki izotopun yoğunluğunu oluşturmaktadır (Hambleton Jones ve Smit, 1980). Radon ölçümlerinde kullanılan pasif cihazlara; katı-hal nükleer iz detektörleri, dielektrik dedektörleri, termolüminesans fosforlar, katı-hal elektronik detektörler ve minik elektrometreler örnek verilebilir (Durrani ve Iliç, 1997).

Aktif ölçüm tekniğinde radon gazının kendiliğinden ölçüm yapacak cihaza girmesi gerekmez. Bunun için genellikle cihazın içerisine ölçülecek hava

numunesi pompalanır veya ölçüm yapılacak sıvıdan numune konulur. Aktif teknikte genellikle, radonun dedekte edildiği kısım elektronik bir cihazdır. Aktif ölçüm tekniğinde numune toplama metodundan da yararlanılabilir. Radon düzeyi ölçülecek sıvı veya gaz örnekler ölçüm noktasından özel kaplar içerisine alınarak laboratuvara getirilip ölçüm yapılabilir. Bu ölçüm tekniğinde dikkat edilecek en önemli kriter, toplanan numunelerin bekletilmeden bir an önce laboratuvara getirilmesi ve numunelerin herhangi bir cisimle temas ettirilmemesidir. Çünkü toplanan numunelerin içeriğinin bozulmaması gerekmektedir. Aktif radon ölçüm tekniğinde, radon ve bozunma ürünlerinin belirlenmesini sağlayan elektronik detektörlerdir. Pasif cihazların çoğu bir fan vasıtasıyla aktif bir aygıta dönüştürülebilir (Scheible, 1987).

Bir bölgeye ait kapalı mekânlardaki atmosferik radon düzeylerinin belirlenmesine yönelik aktif veya pasif yöntemler dâhilinde yapılan mevcut saha ölçümleri, pratikte bazı problemler barındırmaktadır. Eş zamanlı radon ölçümü yapılmasındaki aksaklıklar, pasif cihazların belirli süreler için kullanılmasındaki süre sıkıntısı, pasif cihazlar için ölçüm periyotları arasında cihazların yerinden sökülme, analiz edilme ve tekrar yerine takılma gereksinimleri sonucu karşılaşılan iş yoğunluğu, yine pasif cihazlarla yapılan uzun-dönem ölçümlerinde sadece ölçüm dönemine ait tek bir ortalama değerin belirlenebilmesi ancak radon düzeylerindeki anlık değişimlerin tespit edilememesi gibi pek çok zorluk bu problemlere örnek olarak verilebilir. Sürekli ölçüm yapabilen mevcut elektronik radon dedektörlerinin bir kısmında ise ölçümler için insan-makine etkileşimi gerekmektedir. Yani, dedektörün bulunduğu ölçüm noktasına ölçüm süreci boyunca çeşitli aralıklarda gidilerek verilerin USB bellek gibi bir birime aktarılması veya telefonla cihaza bağlantı yapılarak periyodik bir biçimde veri aktarımı yapılması gerekmektedir.

Her iki teknikte de kısa-dönemli ölçümler genellikle hızlı bir değerlendirme gerektiğinde bina içi kullanım için tercih edilir. Uzun-dönemli çalışmalarda, pasif ölçüm tekniği bilimsel olarak sadece ortalama bir değer belirlemek için kullanışlıdır. Bina içi radonun zamansal değişiminin araştırılması durumunda, sürekli ölçüm yapabilen elektronik cihazları içeren aktif tekniğin kullanılması

daha uygundur. Sürekli ölçüm için ticari olarak temin edilebilen birçok radon sensörü vardır. Bu dedektörlerin bir kısmı ölçüm verilerini kendi hafızasında saklar, bir kısmı ise çevrim içi veri aktarımı yapabilir. Aktif ölçüm tekniğinde kullanılan elektronik cihazlardan bazıları şunlardır; RD200M, Safety Siren Pro Series 3, Radon Scout, AER+, Wave, Correntium Pro, AlphaGuard, RTM 2200 Soil Gas, RAD7. Son zamanlarda, bir radon sensörü kullanarak çevrimiçi bir radon ölçüm sistemi geliştirmek amacıyla birçok akademik çalışma yapılmaktadır.

### 1.5. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Web-Tabanlı Kontrol

1969'da ARPANET (Advanced Research Projects Office Network: Gelişmiş Araştırma Projeleri Ajans Ağı), günümüzde internetin teknik temelini oluşturan protokol paketi TCP/IP'yi (İletim Kontrol Protokolü/İnternet Protokolü) kullanarak paket anahtarlamayı uygulayan ilk bilgisayar ağı olmuştur. Paket anahtarlama, bir ağdaki bilgisayardan diğerine veri almak için üç temel adım gerektiren bir veri aktarım yöntemidir (uzak bilgisayar ekranları, dosyalar, e-posta mesajları, web sayfaları). TCP/IP haberleşme protokolleri, bilgisayar üzerinden uzaktan bağlantı sağlamak için kullanılmıştır. Bu haberleşme protokolleri, dosyaları bir bilgisayardan diğerine iletmek için FTP (Dosya Aktarım Protokolü) ve e-posta mesajları göndermek için SMTP (Basit Posta Aktarım Protokolü) içermektedir. Bu protokoller günümüzde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. ARPANET'in çıktığı ilk günden itibaren IoT yani nesnelerin internetinin doğduğu söylenmektedir (Kurniawan, 2016; 2017; 2019).

IoT, benzeri olmayan, adreslenebilir nesnelerin kendi aralarında oluşturduğu dünya çapında yaygın bir ağdır. Aynı zamanda IoT, dünyada yaygın olarak kullanılan ağdaki nesnelerin belirli bir protokol ile birbirleriyle iletişim içinde olmaları olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde bu kavramı kabaca; çeşitli haberleşme protokolleri aracılığıyla birbirleri ile haberleşen ve birbirine bağlanarak, bilgi paylaşarak akıllı bir ağ oluşturmuş entegreli cihazlar sistemi olarak da tanımlamak mümkündür (Kurniawan, 2016; 2017; 2019).

IoT'nin en önemli yönü, sensörler tarafından alınan operasyonel bir sistemin konum ve zaman farkı gözetmeksizin ölçülen değerlerin anlık olarak verileri toplamasıdır. IoT sistemleri, birbiriyle iletişim kurabilen makinelerden gelen verileri bir araya getirerek bu verilerin kullanılmasını sağlamaktadır. IoT'li sistemlerde sensörler ve aktüatörler mevcut olmalı ve ekonomik olarak uygulanabilir olmalıdır. Verilerin taşınması için bağlantının güvenilir ve esnek olması gerekir. IoT'nin kendisi tamamen bağlantılı makinelerle ilgili olsa da, insanların önemi unutulmamalıdır. Bir IoT sisteminin sunduğu hizmetlerin bir kullanıcı arayüzü aracılığıyla insan dünyasına bağlanması gerekir. Makine öğrenimi modellerinin geliştirildiği IoT kartları (Raspberry Pi ve Arduino vb. gibi) ses, video, sıcaklık, titreşim veya diğer sinyal türleri üzerinde düşük gecikme süresiyle karmaşık verileri sınıflandırabilir (Kurniawan, 2016; 2017; 2019).

IoT sistemlerinde, bluetooth, zigbee, wi-fi, 4G ve 5G gibi iletişim protokolleri kullanan cihazlar ile her elektronik cihaz ve uzak sensörler arasında bağlantı sağlanabilir. Nesnelerin interneti için kullanılan Raspberry Pi gibi küçük kartlar, sistemde sınıflandırma algoritmalarını verimli bir şekilde çalıştırabilir ve anormal dalgalanmalar algılarsa alarm gönderebilir (Kurniawan, 2016; 2017; 2019).

Nesnelerin internetinin gelişmesiyle birlikte akıllı sistemler son yıllarda insanların hayatına birçok noktada girmiştir. Bu sayede insanlar, evlerinde veya iş yerlerinde olmadıklarında, bulundukları ortamdan uzaktan bağlantı sağlayarak ev veya işyerlerindeki değişimleri anlık olarak takip edebilmekte ve cihazları uzaktan kontrol edebilmektedirler. Ayrıca ev veya işyerlerindeki sıcaklık, nem, gaz, alev ve su basmaları gibi veriler izlenebilmekte ve bu veriler ile ilgili alarmlar oluşturulup söz konusu alarm durumları meydana geldiğinde kullanıcılara uyarılar gönderilmektedir. Uzaktan verilerin anlık olarak izlenmesi üzerine birçok sistem günlük yaşam içerisinde yerini almış olup teknolojinin ilerlemesine paralel olarak bu tip sistemler sürekli olarak gelişmektedir (Dow, 2018).

Fiziksel olarak farklı konumlarda bulunan sistemlere internet bağlantısı ile erişilmesi ve bu sistemler üzerinde istenilen işlemlerin yapılarak uzaktan görüntülenmesine imkân sunan yazılımlar, kabaca web-tabanlı uygulamalar olarak değerlendirilebilir. Bu işlemlerin bir kontrol birimi tarafından yapılması durumunda ise program, web-tabanlı kontrol programı olarak isimlendirilmektedir. 1989 yılında Tim Berners-Lee tarafından İsviçre'deki Avrupa Nükleer Araştırma Mekrezi'nde (CERN: Center for European Nuclear Research) http protokolü geliştirilerek internet dünyaya tanıtılmıştır. 1991'de http nin ilk resmi sürümünün tanımlanmasıyla, internetin hiper ortam kısmı olan web ortaya çıkmıştır. Daha sonra http, Telnet, FTP ve SMTP gibi haberleşme protokolleri de oluşturularak web tarayıcısı sanal ortamda yayınlanmıştır. Bu tarayıcı, Ocak 1991'de diğer araştırmacıların kullanımına açılmış ve Ağustos 1991'de tüm insanların hizmetine sunulmuştur (Beasley, 2020). Web programları ilk ortaya çıkmaya başladığında yalnızca statik olarak yayınlanmıştı. Bu programlar, zaman ilerledikçe metinsel ve görsel medya ile web üzerinden dosyalar indirilmesine ve ses kayıtlarının oynatılmasına imkân sağlamıştır (Beasley, 2020).

Günümüzde geliştirilen web programları, hem statik hem de dinamik olarak kullanılmaktadır. ASP.NET gibi programlama dilleri sayesinde, dinamik web sayfaları statik web sayfalarından çok daha fazlasını yapabilmekte yani, bir web sayfasında görüntülenen öğelerle etkileşim kurulmasına imkân vermektedir. Ayrıca bir sayfadaki verileri düzenleme, hatalar için verileri kontrol etme ve verileri bir veri tabanına kaydetme gibi durumlar da mümkün hale gelmiştir (Beasley, 2020). Tez çalışmasındaki kontrol programının oluşturulması için kullanılan ASP.NET, modern, gelişmiş web uygulamaları oluşturmak için gerekli tüm sınıfları içeren bir yazılım geliştirme çerçevesidir. C# ise web uygulamaları ve Windows uygulamaları dâhil olmak üzere çeşitli uygulama türleri oluşturmak için genel amaçlı bir programlama dilidir (Beasley, 2020).

## 1.6. Motivasyon

Daha önceden yapılan ölçümler, Isparta için tespit edilen bina içi atmosferik radon düzeylerinin Türkiye ve dünya ortalamalarının üzerinde olduğunu göstermektedir (Uluğ vd., 2004; Kürkçüoğlu ve Bayraktar, 2012; Kürkçüoğlu ve Tozun, 2015; Çine, 2017; Kürkçüoğlu, 2018). Isparta gibi yüksek radon seviyelerinin gözlemlendiği yerleşim birimlerinde, radon davranışının detaylı bir biçimde incelenebilmesi için farklı ölçüm noktalarında eş-zamanlı olarak sürekli ölçümlerin yapılması ve gerekli durumlarda gecikmeksizin önlem alınabilmesi için gerçek-zamanlı ölçüm verilerinin bir kontrol merkezine aktarılarak bu birimde monitörlenmesi, yani pratik bir radon takip ağı sisteminin kurulması gerekmektedir. Bu ihtiyaçtan hareketle, yerleştirildiği kapalı mekândaki radon düzeylerini sürekli ölçerek bu ölçüm sonuçlarını online olarak bir merkeze gönderen IoT-tabanlı tekli radon takip sistemlerini web üzerinden bir arada kontrol edebilen bir radon ölçüm ağının kurulmasına yönelik bir mimarinin tasarlanması ve önerilen bu sistemin test edilmesi, burada sunulan doktora çalışmasının temel motivasyonunu oluşturmuştur. Önerilen sistem, farklı yerlerdeki ölçüm noktalarına yerleştirilen birbirinden bağımsız tekli radon takip sistemlerinden gelen verilerin eş-zamanlı olarak kontrol merkezinde işlenip, depolanabildiği ve ölçülen radon düzeylerinin anlık olarak veya belirli bir zaman aralığı için görsel olarak takip edilebildiği bir radon ölçüm ağı olarak tasarlanmıştır. Ülkemizdeki ilk kablosuz, online ve sürekli radon takip ağının kurulması amacıyla geliştirilen bu sistemin; yüksek radon seviyesine sahip olan yerleşim birimlerinin yanı sıra radyasyon uygulamalarının yapıldığı araştırma merkezleri ile toplu kullanıma sahip okul, hastane, alış-veriş merkezi vb. gibi kamusal mekânlarda kullanılmasının büyük kolaylık ve faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Radon ölçümü için manuel ya da dijital formda çalışan birçok cihaz mevcuttur. Aktif ölçüm tekniği kapsamında kullanılan elektronik dedektörler, en son geliştirilen kablolu ve kablosuz veri aktarım yöntemleriyle birlikte, online olarak radon seviyesini takip imkânı sunmaktadır. Radon ölçümlerini bir merkezde toplayabilen dedektörlerin yanı sıra kendi yazılımıyla birlikte bireysel olarak radon miktarının takip edilebileceği cihazlar da bulunmaktadır. İzleyen kısımda, radon özelinde radyasyon düzeylerinin belirlenmesinde kullanılmış; sürekli radon ölçümü, online radon takibi, nesnelerin interneti ile online radon takip ağı kurulumu, yapay zekâ ile radon ölçümlerinin bir merkezden kontrolü ve otomasyonu gibi konularda günümüze kadar yapılan çalışmalardan bazıları, tarihsel sürece uyumlu bir şekilde özetlenerek sunulmaktadır.

1996 yılında başlatılan KAMIOKA nötrino dedeksiyonu deneyi (Kamiokande), Japonya'nın Kamioka kasabasındaki Gifu bölgesinin Mozumi madeninde (yaklaşık 1000 m yeraltında) güneşten gelen nötrinoları gözlemek için kurulmuş 4500 ton saf su içeren bir Cherenkov dedektörünün yer aldığı bir düzenektir (Takeuchi vd., 1999). Araştırmacıların sağlıklı ölçümler yapabilmeleri için saflaştırılmış sudaki radon yoğunluğunu hassas bir düzeyde belirlemeleri gerekmiş, bunun için de atmosferik radon konsantrasyonunu algılama limiti 5 mBq/$m^3$'ten daha düşük olan bir dedektöre ihtiyaç duyulmuştur. İstenilen hassasiyette ticari bir radon dedektörü bulunmadığından Takeuchi vd. (1999), havadaki ve sudaki radon konsantrasyonlarını sürekli olarak ölçmek amacıyla yüksek hassasiyetli radon detektörleri tasarlamışlardır. Bu dedektörlerin çalışma prensibi; $^{222}Rn$ radyoizotopunun kız çekirdeklerinin elektrostatik yöntemle toplanması ve bir PIN fotodiyot kullanılarak alfa bozunmasının enerji ölçümlerine dayanmaktadır. Yüksek hassaslıktaki radon dedektörleri için kalibrasyon sistemlerinin de oluşturulduğu bu çalışmada; radon konsantrasyonunun neme bağlı olarak değiştiği gözlenmekle birlikte, sudaki radonu ölçmek için geliştirilen yüksek hassasiyetli radon dedektörünün algılama limitinin, havadaki radonu ölçmek için geliştirilen radon dedektörününkine benzediği tespit edilmiştir (Takeuchi vd., 1999). Zamanla bu Cherenkov

dedektörü geliştirilmiş, ölçüm aralığı genişletilerek 50000 tonluk yüksek derecede saflaştırılmış su kapasiteli Süper-Kamiokande (SK) dedektörüne dönüştürülmüştür (Mitsuda vd., 2003). Yüksek derecede saflaştırılmış sudan radon gazının uzaklaştırılabilmesi için kurulan sistemde, radon konsantrasyonunun gerçek-zamanlı takibinin yapılabilmesi amacıyla daha hassas bir radon dedektörü ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar, hava ve sudaki ölçümler için daha önce tasarladıkları dedektörlerin kapasitesini arttırarak, yüksek elektrostatik toplama gerilimi kullanarak ve yüksek-kalite elektronik malzemelerle geliştirdikleri elektronik donanımlarla süper-yüksek hassasiyetli radon dedektörlerini hayata geçirmişlerdir. Önceki dedektörle karşılaştırıldığında, su için geliştirilen dedektörün hassasiyetinin ~5 kat arttırıldığı ve radon algılama limitinin de ~6 kat düşürüldüğü (gazdan arındırılmış SK suyu için bir-günlük bir ölçümde 0,7 mBq/$m^3$ lük bir algılama limitine ulaşıldığı) bildirilmiştir (Mitsuda vd., 2003). Hosokawa ve arkadaşları, havadaki radon konsantrasyonunun tayini için kullanılan 70 litre kapasiteli dedektörü geliştirerek saflaştırılmış gazlar için yüksek hassaslığa sahip 80 litrelik yeni bir radon dedektörü inşa etmişler ve bu yeni dedektörün performansını incelemişlerdir (Hosokawa vd., 2013). Takeuchi ve arkadaşları 2017 yılında, Kamioka'daki radon analiz sistemi (radon assay system) ve radyoaktivite veritabanı hakkında ulaştıkları yeri özetleyen bir çalışma yayınlamışlardır. Malzemelerin radon geçirgenliğini test etmek için kullanılacak sistem için önceki çalışmalarda geliştirdikleri radon dedektörünün üzerine yerleştirdikleri elektrik devreleri ve data toplayıcıları (Raspberry Pi 3B+, ADC Kartı, Rn Monitörü vb.) ile birlikte radon ölçümlerinin elektronik olarak takibini yapmayı başarmışlardır. Veri tabanı sistemi olarak JSON yazılım dilini kullanmışlardır. CSV dosyalarının işlenmesi için bir kaynak kodu modifikasyonu yapıldığını ve Eylül 2016'da geçici bir radyoaktivite veritabanı sunucusunun faaliyete geçirildiğini bildirmişlerdir (Takeuchi vd., 2017). 2020 yılında, Kamioka Gözlemevi'nin bulunduğu madendeki Atotsu tünelinde Nisan 2016-Eylül 2019 tarihleri arasında gerçekleştirilen atmosferik radon ölçümleri Pronost (2020) tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışma için daha önceki çalışmalarda geliştirilen 1 litrelik 29 adet radon detektörü kullanılmış, bu dedektörlerin 26'sı Raspberry Pi tabanlı data toplama sistemine entegre edilerek sürekli radon monitörlenmesi

gerçekleştirilmiştir. Tüneldeki radon konsantrasyonlarının davranışları 3 yıllık ölçümler üzerinden günlük ve mevsimsel olarak değerlendirilmiş, radon yoğunluğunun ilkbahar ve yaz aylarında 2000 Bq/m$^3$'ün üzerinde, sonbahar ve kış aylarında ise 200 Bq/m$^3$ civarında olduğu bildirilmiştir (Pronost, 2020).

Streil vd. (2002) yaptıkları çalışmalarında alfa spektroskopisine entegreli bir yarı iletken detektörde radon bozunma ürünlerinin toplanması esasına dayanan bir elektronik radon dozimetresi geliştirmişlerdir. Ölçümler kızılötesi bağlantıyla kişisel bir bilgisayara aktarılmıştır. Böylelikle ölçüm esnasında alınacak doz ve radon konsantrasyonu bilgileri anlık olarak hesaplanıp takip edilebilmekte ve önceden belirlenmiş doz limitleri aşıldığında sesli ve görsel uyarılar devreye girmektedir. Çalışmada dedektör olarak 2 adet SARAD DOSEman monitörü kullanılmıştır. Test ölçümleri için bir ofiste 2 gün boyunca atmosferik radon ölçümleri (3 saatte bir alınan ölçümler) değerlendirilmiş ofisin açık olduğu saatlerde 50 Bq/m$^3$ civarında ve kapalı olduğu saatlerde ~200 Bq/m$^3$'lük düzeyde radon konsantrasyonları tespit edilmiştir. Böylelikle geliştirilen cihazın bina içi atmosferik radon ölçümleri için uygun olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bu sistemin yüksek radon ölçümleri için uygunluğu, Brezilya uranyum madeni yakınlarında radon anomalilerinin gözlemlendiği bir bölgedeki 4 ölçüm noktasında, 2 adet SARAD DOSEman kullanılarak toprak gazı radon ölçümleriyle test edilmiştir (Streil vd., 2002).

Freyer vd. (2003) yaptıkları çalışmalarında, yaklaşık 1 dakikalık zaman çözünürlüğüne sahip, akışkan suda radon ölçebilen online bir cihaz geliştirmişlerdir. Suda radon ölçümleri için GroEpösna/Leipzig'in şebeke suyu kaynağında hassasiyet ve zamansal çözünürlük testleri yapmışlar, online ölçüm yapan sistemlerinin sonuçlarının çevrim dışı ölçüm sonuçlarına göre düzeltilebileceğini belirtmişlerdir (çevrim dışı ölçümler su numunelerinin laboratuvar ortamına getirilip sıvı sintilasyon sayımı tekniğiyle ölçümü gerçekleştirilmiştir). Sonuç olarak, önerilen bu sistemle akışkan sudaki radon düzeylerinin 1Bq/L düzeyine kadar online olarak ölçülebileceği bildirilmiştir (Freyer vd., 2003).

Tez çalışmamız kapsamında sürekli olarak online radon ölçümü yapan elektronik detektörlerle, bir ölçüm ağı oluşturularak bu sistemin uzaktan erişimli bir kontrol merkezi tarafından denetlenmesi amaçlanmıştır. Bu tür bir kontrol sisteminin çalışma mantığı, uzaktan kontrol edilebilen laboratuvar uygulamalarıyla benzerlik taşımaktadır (Aydoğmuş ve Aydoğmuş, 2009; Durdu, 2010).

Aydoğmuş ve Aydoğmuş (2009), SCADA (supervisory control and data acquistion) kontrolü kullanarak web tabanlı uzaktan erişimli, gerçek-zamanlı bir laboratuvar uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu uzaktan erişimli laboratuvarın etkinliğini göstermek için bir indüksiyon motorunun kontrolü sağlanmıştır. Sistemin çalışmasını kontrol etmek için bir PLC (programlanabilir lojik kontrolör) programlanmış, sürecin izlenmesi ve kontrolü için bir SCADA sistemi kurulmuştur. Web arayüzünü, Visual Studio ile ASP.NET kullanarak tasarlamışlardır (Aydoğmuş ve Aydoğmuş, 2009). Diğer bir çalışmada, web-tabanlı uzaktan kontrol edilebilen bir mikrodenetleyici laboratuvarı tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında sistemin uzaktan kontrolünü sağlamak üzere Atmel ve Microchip mikrodenetleyicilerini içeren geliştirme kartları tercih edilmiştir. Web-tabanlı uzaktan kontrollü mikrodenetleyici laboratuvarı yazılımının web sitesi için yine ASP.NET, veri tabanı sunucusu yazılımında da Microsoft SQL Server kullanılmıştır (Durdu, 2010).

Gaware ve arkadaşları Hindistan'ın Turamdih bölgesindeki yaptıkları çalışmalarında, mesleki ve genel ortamlarda radon konsantrasyonlarının online olarak izlenebilmesi amacıyla geliştirdikleri sistemleri 2011 yılında tanıtmışlardır (Gaware vd., 2011). Geleneksel olarak bir numunedeki radonun belirlenmesi için yapılan ölçümlerde, Lucas sintilasyon hücresi ile sayım 3 saatlik bir gecikmenin ardından alınabilmektedir (bozunma ürünlerinin radon ile radyoaktif dengeye ulaşması için beklenmektedir). Araştırmacılar, aynı Lucas hücresinin (her bir numune alma aralığında radon konsantrasyonunu hesaplayan bir algoritma yardımıyla) sürekli radon ölçümleri için kullanılabileceği fikrinden hareketle iki farklı radon monitörü geliştirmişlerdir. Seyyar olan dedektöre SRM (Scintillation Radon Monitor) adını vermişlerdir. Bu dedektör, radon ve bozunma ürünlerinden kaynaklanan alfa radyasyonunun

ZnS:Ag tabanlı bir sintilasyon hücresi tarafından ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Diğer versiyon ECAS (Electrostatic Collection and Alpha Scintillation) dedektörü olarak adlandırılmıştır. ECAS, radonun yüklü bozunma ürünlerinin ZnS:Ag yüzeyinde toplanması için bir elektrostatik oda kullanılarak geliştirilmiştir (Gaware vd., 2011). Her iki cihazın performansları, AlphaGUARD dedektörünün ölçümleri baz alınarak test edilmiştir. ECAS, SRM ve AlphaGUARD dedektörleri arasında iyi bir uyum gözlemlendiği bildirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca ECAS ve SRM'nin uzun-dönem ölçümleri için uygunluğu, 2 hafta boyunca bir odaya yerleştirilen bu monitörlerle sürekli radon ölçümleri alınarak araştırılmıştır. Daha sonra ECAS dedektörü ile topraktan radon emisyon hızının ölçümü, çimento numunelerinden radon emisyonu ölçümü gibi uygulamalara yer verilmiştir. Son olarak bir grup ECAS dedektörü (14 veya daha az dedektör) ile Turamdih uranyum madenindeki farklı noktalarda sürekli radon takibi yapacak bir ölçüm ağı (network) kurmuşlar ve dedektörlerin kaydettiği ölçüm verilerini, RS485 endüstriyel haberleşme protokolü ile bir PC'ye (verilerin kayıt edilip monitörlendiği ana bilgisayara) aktarmışlardır. Araştırmacılar, geliştirdikleri dedektörlerin performanslarının hem laboratuvar hem de saha koşullarında başarıyla test edildiğini bildirmişlerdir (Gaware vd., 2011).

Spiezia ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmalarında, LHC (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı) için geliştirilen radyasyon takip sistemi RadMon'u tanıtmışlardır. İsviçre'nin CERN araştırma merkezinde bulunan LHC, farklı enerjilerde farklı parçacıkların oluşabildiği kompleks bir radyasyon ortamıdır. RadMon, LHC tünelinde ve bu tünele bitişik olan zırhlı alanlarda radyasyon seviyelerinin monitörlenmesi için tasarlanmış bir takip sistemdir. RadMon sistemi, bahsedilen alanlarda bulunan elektronik ekipmanlar için anlık arızaların tespiti ve olası cihaz bozulmalarının tahmini amacıyla yani radyasyonun elektronik ekipmanlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi için kullanılmaktadır. İlk olarak 2003 yılında tasarlanan bu sistem, zamanla gerçekleştirilen farklı deneylerle birlikte CERN mühendisliği departmanı (CERN EN) tarafından geliştirilmiştir. RadMon sistemleri, hassas elektronik bileşenlerin bulunduğu alanları kapsayacak şekilde, 27 kilometrelik LHC tüneli boyunca konumlandırılmıştır. RadMon kontrol ünitesi, yeraltı tünelinde bulunan

radyasyon takip cihazlarıyla bir endüstriyel haberleşme protokolü olan WorldFIP fieldbus üzerinden iletişim kurmaktadır. Maksimum 32 monitör kapasiteli 24 fieldbus segmenti sistem mimarisinin temelini oluşturmaktadır. Sistem için geliştirilen kodlamalar, C/C++ programlama dilleri kullanılarak oluşturulmuştur. Ölçüm sırasında monitörlerden gelen veriler, "Ölçümler veritabanı" adı verilen bir veritabanında çevrimiçi olarak bir haftalık bir süre boyunca saklanmaktadır. Aynı zamanda veri tabanından gelen ölçüm sonuçlarının bir alt kümesi, "Logging veri tabanı" olarak adlandırılan sistem ile uzun vadeli olarak depolanmaktadır (Spiezia vd., 2011).

Depremlerin önceden tahmin edilebilmesi için radon-deprem arası ilişkinin araştırılması konusunda çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda sürekli ölçüm yapabilen radon monitörleri ön plana çıkmaktadır. Ekin tarafından 2013 yılında, İzmir Urla ve çevresindeki sismik aktivite ile toprak gazındaki radon düzeylerinin değerlendirildiği yüksek lisans tezi de bu konuda yapılan çalışmalardan birisidir. Radon ölçümleri için iki farklı ölçüm yöntemi ele alınmıştır. Bunlar, pasif ölçüm tekniği kapsamındaki katı hal nükleer iz dedektörleri ve aktif ölçüm tekniği kapsamındaki elektronik radon dedektörü Alphameter 611 ile gerçekleştirilen sürekli ölçümlerdir (Ekin, 2013). Söz konusu çalışmada, LR-115 Tip-2 nükleer iz dedektörleri kullanılarak 27 ölçüm noktasından 1 aylık periyotlarla, 1 yıl boyunca (Ekim 2011 ile Ekim 2012 tarihi arasında) ölçüm yapılmış ve LR-115 filmleri laboratuvarda analiz edilmiştir. Ayrıca Saç ve arkadaşları tarafından sürekli radon ölçümü için Urla'ya kurulan online sistemle (Muslim Murat vd., 2011) aynı tarih aralığında 15 dakikada bir ölçüm alınarak elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu sistem, Alphameter 611 dedektörü, güç ünitesi, GSM modemi ve veri kaydediciden oluşmaktadır (Ekin, 2013). Dedektör, toprak seviyesinden 80 cm derinliğe gömülmüş ve ölçüm sonuçları veri kaydedici tarafından alındıktan sonra GSM hattı üzerinden sunucuya gönderilmiştir. Ölçüm verilerine http://www.ydbae.mam.gov.tr/izmir_ege_univ/ internet adresi üzerinden erişilebileceği bildirilmişse de an itibarı ile erişim imkânı bulunmamaktadır.

Erdener Yumurtacı Ege Üniversitesindeki doktora çalışması için toprak gazındaki radon yoğunluğunu takip amacıyla U-CAM-450 silikon yüzey engelli alfa sayım detektörünü geliştirmiştir (Yumurtacı, 2014). Bu dedektörün içerisinde 105E-L sıcaklık sensörü, AT-210 nem sensörü, EZ-864 model 900 MHz alıcı-verici modülü ve veri kayıt kartı bulunmaktadır. PIC uygulamaları için 128 kB'lık belleği, haberleşme için RS-232 ara yüzü bulunmaktadır. Dedektör ölçümünden elde edilen radon, sıcaklık ve nem verilerini (24 Eylül-16 Aralık 2011 tarihleri arasında), önce veri kayıt birimine, sonra da GSM modülü ile verilerin depo edildiği sunucuya aktarmıştır. Sunucu üzerinde her üç veri de depo edilmiştir. Aynı zamanda bu veriler grafiksel ve resim formatında eş zamanlı olarak gözlemlenmiştir. Tasarlanan web sayfası yardımıyla sistemin sunucuya bağlanma periyodu ve veri kayıt etme periyodu istenen sürelerde olacak şekilde ayarlanabilmiştir. Ayrıca saklanan veriler excel dosya yapısına da dönüştürülebilmiştir. Verilere http://85.98.93.176:1010/radon/ internet adresinden istenilen herhangi bir zamanda ulaşılmıştır. İzmir Urla'daki ölçüm istasyonuna yerleştirilen bu sistemin verdiği radon sayımlarının, Ekin (2013) tarafından geliştirilen Alphameter-611 detektör sisteminin verdiği sayımlar ile uyumlu olduğu bildirilmiştir. U-CAM-450 ve Alphameter-611 dedektörlerinin aktif yüzey alanları farklı olduğundan dolayı ölçüm sonuçlarında %20'lik bir farklılık gözlemlendiği rapor edilmiştir. Geliştirilen bu sistemin, diğer sistemlere göre daha ekonomik olduğu ve deprem çalışmalarındaki toprak gazı radon ölçümleri için kullanılabileceği bildirilmiştir (Yumurtacı, 2014).

Türkiye'de ilk defa, aktif ölçüm tekniğine dayalı olarak sıfırdan üretilen bir radon monitörü 2012 yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde hazırlanan bir tezle bilim camiasına duyurulmuştur (Bayrak, 2012). Düşük maliyetli bir radon ölçüm sistemi geliştirdiklerini iddia eden araştırmacıların tasarımında, yüksek çözünürlüklü yarı-iletken malzemeden yapılan bir dedektör (silikon PIN fotodiyot temelli bir dedektör) kullanıldığı bildirilmiştir. Cihaz için PS100-7-CER-2 PIN fotodiyot alfa sensörü, LM35 sıcaklık sensörü, HSU-07C1-NMC3A nem sensörü ve MPX200A mutlak basınç sensörü uygun sinyal koşullandırma devreleri ile birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen bu dedektör ile deprem öncesinde $^{222}Rn$ aktivitesinin, 1200 km uzunluğundaki Kuzey Anadolu fay hattında

izlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için 2012 yılında 9 adet dedektörü kampüs binalarına yerleştirmişlerdir. Üniversitenin Maden Fakültesi'nin bodrum katında 4 dedektör ile 152 günlük bir ön çalışma gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda Fen-Edebiyat Fakültesi'nin bodrum katına 5 radon monitörü yerleştirerek 12 günlük ölçüm sonuçlarının birbiriyle uyumlu olup olmadığını gözlemlemişlerdir. Dedektör tarafından algılanan alfa parçacıklarının sayısını ve atmosferik parametreleri (nem, basınç ve sıcaklık) bir SD karta depolamak için PIC yani NE555 entegresini (Programlanabilir Arayüz Denetleyici) programlamışlardır. SD kartta toplanan veriler GSM operatörüne aktarılmış ve bu verilerin görüntülenmesi sağlanmıştır. Radon verilerinin GSM operatörüne aktarılmasında SIEMENS-TC35 endüstriyel haberleşme protokolü kullanılmıştır. Bu ölçüm sisteminin, binaların bodrum katlarında, mağaralarda, tünellerde, maden ocaklarında ve metro istasyonlarında radonun izlenmesi için kullanılabileceğini söylemişlerdir (Bayrak vd., 2013).

Radon gazının anti-nötrino dedektörlerinin içerisine sızabilme ihtimali söz konusu olduğundan dedektör etrafındaki radon düzeyinin takip edilmesi ve bu deney istasyonlarındaki radon düzeyinin çeşitli yöntemler kullanılarak uzaklaştırılması veya azaltılması önemlidir (Fark edilemeyen sızıntılar veya radon geçirgen materyaller nedeniyle dedektör içerisine giren radon anti-nötrino dedektörünün sıvı sintilatöründe bozunabilir. Radon ve özellikle bozunma ürünleri nedeniyle salınan radyasyon anti-nötrino sinyalleri ile karışabilmektedir). Chu vd. (2016), Çin'in Hong Kong bölgesi yakınlarında yer alan Daya Bay Reaktörü Nötrino Deneyi'nin yeraltı deney istasyonlarında radon takibi için oldukça hassas, güvenilir ve taşınabilir bir otomatik sistem geliştirdiklerini bildirmişlerdir. $H^3$ adı verilen radon takip sistemi Kasım 2013 tarihinden itibaren (8 anti-nötrino dedektörünün konumlandırıldığı) üç yeraltı deney istasyonunda çalıştırılarak hava ve su örneklerindeki radon yoğunluklarının monitörlenmesinde kullanılmıştır. Sistem ölçüm noktalarında tespit edilen radon düzeylerini ağ üzerinden online olarak sunma özelliğine sahiptir. Sistemin çalışmasını kontrol etmek ve takip için LabVIEW (mühendislerin otomatik araştırma, doğrulama ve üretim test sistemleri geliştirmek için kullandıkları bir grafik programlama ortamı olan Laboratory

Virtual Instrument Engineering Workbench) programı kullanılmıştır. $H^3$ dedektöründen alınan radon ölçümleri RS-232 haberleşme portu üzerinden sisteme aktarılmıştır. Araştırmacılar, $H^3$ dedektörü ile ölçüm noktalarında en düşük 50 $Bq/m^3$ düzeyinde konsantrasyonlar tespit etmiş ve bu seviyelerdeki saatlik ölçümler için radon konsantrasyonunun %10'dan daha düşük bir istatistiksel hatayla ölçebildiğini bildirmişlerdir. Hava ölçümleri için kullanılan radon sensörü açıkça belirtilmemekle birlikte su ölçümleri için RAD-Aqua dedektöründen faydalanılmıştır. Elde edilen veriler bir sabit diskte saklanmakta ve aynı zamanda verilerin bir kopyası, tüm çevresel parametreler ile birlikte uzaktan erişilebilen dedektör kontrol sisteminin (DCS'nin) veritabanına kopyalanmaktadır (Chu vd., 2016).

Nükleer uygulamaların yürütüldüğü tesislerdeki radyasyon düzeylerinin belirlenmesi ve takibi için alan monitörlemesi yapılması elzemdir. Monitörlemede kullanılan dedektör ve diğer bileşenlerin periyodik olarak testi, kalibrasyonu ve kontrol edilmesi gerekir. Reddy vd. (2017) Hindistan'daki Indira Gandhi Atom Araştırmaları Merkezi'nde çalışan araştırmacılar, bir gama radyasyon alan monitörü (AGRM) sisteminin elektronik bileşenlerinin ve Geiger-Müller (GM) tüpünün testlerini kontrol odası biriminden online olarak gerçekleştirmişlerdir. Bu sistem sayesinde tesisteki görevli radyasyon çalışanlarının maruz kalacağı radyasyon dozunun azaltılması ve ilgili ekipman için minimum arıza süresi ile hızlı bir şekilde test işleminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, radyasyon ölçüm cihazının ne derece doğru ölçtüğü (accuracy değeri), bu sistemle gerçekleştirilecek online testler sayesinde belirlenebilmektedir. AGRM içerisinde; LCD, alarm seti tuş takımı, görsel ve sesli alarm, dedektör probu, RS-485 iletişim portu ve mikrodenetleyici tabanlı olan Zigbee (SBC) bulunmaktadır. Biri AGRM elektronik testi ve diğeri AGRM dedektör testi için iki elektronik devre geliştirilmiştir. OPC (Open Platform Communications: Açık Platform İletişimi) sunucusu ve ZigBee (SBC)'de SCADA yazılımı kullanılarak özel bir radyasyon veri toplama sistemi (RADAS) geliştirilmiştir. Ayrıca Zigbee'ye modüller (AGRM & Zigbee & PC) arasındaki kablosuz iletişim ve sinyal gücünü artırmak için X-CTU (X-Configuration & Test Utility) yazılımı da yüklenmiştir. AGRM, PC için RS-485 ve Zigbee için Modbus

haberleşme protokolü kullanılarak OPC sunucusuna bağlanmıştır. Radyasyon dedektörlerinden kablosuz ağ kullanılarak ölçüm alınmasına bir örnek teşkil edebilecek olan bu konfigürasyon sayesinde saptanan doz seviyesinin önceden ayarlanmış alarm seviyesini geçmesi durumunda, görsel ve sesli alarmlar etkinleşerek kullanıcıları uyarabilmektedir (Reddy vd., 2017).

Blanco-Novoa vd. (2018), mevcut ticari radon dedektörlerinin ya pahalı ya da kısıtlı monitörleme kabiliyetlerinin olmasından yola çıkarak kapalı mekânlardaki radonun uzaktan takip edilebilmesi amacıyla güvenilir ve ucuz bir IoT ölçüm sistemi geliştirdiklerini bildirmişlerdir. Bu sistemin tasarımında, elektronik radon dedektörü olarak Safety Siren Pro Series 3 cihazı ve IoT modülü olarak ESP8266 entegreli WeMos mini D1 kartı kullanılmıştır. Bu sistemdeki radon dedektörü herhangi bir haberleşme arayüzüne sahip olmadığından dedektörde tespit edilen veriler cihazın LCD ekran bacaklarına bir çoğaltıcı (16-to-one mux) bağlantısı yapılarak WeMos mini D1 kartına aktarılmıştır. Geliştirilen sisteminden elde edilen radon değerlerinin kablosuz olarak modem aracılığıyla web ortamına aktararak grafiksel ve rakamsal biçimde gözlemlenebildiği bildirilmiştir. Söz konusu tasarımın tehlikeli seviyeler tespit edildiğinde e-posta, Telegram veya SMS vasıtasıyla kullanıcıları uyarabileceği ve radon konsantrasyonunu azaltmak üzere ventilasyon için kullanılacak mitigasyon cihazlarını etkinleştirebileceği belirtilmiştir. Sistemin deneysel olarak test edilmesi için İspanya'nın Galiçya bölgesinde konumlu 3 farklı kapalı mekân seçilmiştir. Bunlar; kentsel yerleşimde bulunan bir ev, kırsaldaki bir ev ve bir araştırma laboratuvarıdır. Saatte bir alınan sensör verileri sistem tarafından toplanarak depolanmıştır. Radon değişiminin (doğal radon dalgalanmasının) orijinalliğini bozmamak adına radon ölçümlerinin önceden belirlenen müdahale sınırını aşmasına izin verilmiş, yani bu test ölçümlerinde sistemin mitigasyon özelliğinin etkinleştirilmediği bildirilmiştir. İlk ölçüm yeri Coruña şehrindeki bir binanın 4. katında bulunan bir dairedeki havalandırması zayıf-orta düzeyde olan bir odadır. Burada 9 gün boyunca radonun takibi yapılmıştır. Ölçüm sonuçları 40-60 $Bq/m^3$ aralığında bulunmuştur. İkinci ölçüm yeri Galiçya'daki kırsal bir binada, 3 katlı bir evin bodrum katı olup yine 9 gün boyunca radon ölçümünü yapılmıştır. Sonuçlar 60-175 $Bq/m^3$ aralığında tespit edilmiştir. Üçüncü ölçüm

yeri ise Coruña Üniversitesinin 2. katında bulunan bir laboratuvardır. Burada birbirini takip eden 26 gün boyunca saatlik radon ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sonuçların 202 Bq/$m^3$ civarında bir ortalamaya sahip olduğu ve genelde 150-250 Bq/$m^3$ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, geliştirdikleri radon ölçüm sisteminin, evlerde yaşanan radon maruziyetleri hakkında bilgi vermesi açısından iyi bir olanak sağladığını ve yüksek radon maruziyetlerini azaltmada havalandırma sisteminin faydalı olabileceğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca, radon dedektörü yanında, harici donanım için kullanılan elektronik bileşenlerin radon dedektörünün ölçümlerine etki edip etmediği incelenmiş ve herhangi bir etkilenme belirtisi olmadığı bildirilmiştir (Blanco-Novoa vd., 2018).

Elektronik ölçüm cihazlarının internet ortamına bağlanması ve kontrolü çeşitli IoT cihazları (mikrodenetleyiciler veya SBC (Single Board Computer) olarak adlandırılan tek-kartlı mini bilgisayarlar gibi cihazlar) üzerinden yapılabilmektedir. Raspberry Pi ve Arduino, SBC kategorisinde yer alan IoT cihazlarındandır. Avcu (2018) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tez çalışmasında, Raspberry Pi 3 ve Arduino kullanılarak güneş enerjisinden maksimum düzeyde verim elde etmek amacıyla uzaktan kontrollü bir takip sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemin temel çalışma prensibi, bir güneş panelinin dört tarafına yerleştirilen LDR (Light Dependent Resistor, ışığa duyarlı direnç) sensörler sayesinde alınan verilerin işlenmesi ve 2 servo motor sayesinde panel yüzeyinin güneşe dik konuma getirilmesi esasına dayanmaktadır. Arduino, LDR sensörlerinden gelen anolog verinin algılanmasında kullanılmıştır. Güneş takip sisteminin çalışması, kontrolü ve uzak bağlantısı ise Raspberry Pi 3 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin kontrolü için Teamviewer programından yararlanarak uzaktan bağlantı yapılmış ve sisteme erişim için Python kodlarından faydalanılmıştır. 6 Volt'luk bir güneş paneliyle prototipi yapılan sistem, uzaktan erişim sağlanarak çalıştırılmış ve sistemin sorunsuz çalıştığı, panele bağlı olan voltmetre yardımıyla sistem çalıştığı sürece panelin kapasitesinin en yüksek seviyede enerji ürettiği belirtilmiştir. Düşük maliyete sahip olan bu online sistem ile güneş panellerinden elde edilen enerjinin %30-%37 oranında arttırılabileceği bildirilmiştir (Avcu, 2018).

Lopes vd. (2018) yılında yaptıkları çalışmalarında, bina içi radon gazı konsantrasyonunun online olarak takip edilebilmesi ve aktif havalandırma sistemi ile ortamdaki radon düzeyinin azaltılabilmesi (mitigasyonu) amacıyla önerdikleri bir siber fiziksel sisteme (HITL CPS; Human-in-the-Loop Cyber-Physical System) ait bir tasarım metodolojisini tanıtmışlardır. Radon, $CO_2$, nem, sıcaklık ve basınç sensörlerinin yer aldığı donanımın periyodik olarak (saatte bir kez veya daha küçük zaman aralıklarında) ölçüm yapabildiğini ve bir mikrodenetleyiciye bağlı olan bu sensörlerden elde edilen verilerin bulut ortamına aktarılarak internete bağlı bir cihaz ile takip edilebildiğini, gerekli durumlarda bina içi radon düzeyini azaltmak için otomatik veya manuel müdahalenin yapılabileceğini belirtmişlerdir. Çeşitli senaryolar için veri alış-verişi ile sistemin işleyişinin aktarıldığı bu çalışmada, radon dedektörü veya sensörü hakkında bir bilgi verilmemiş, kullanılan mikrodenetleyicinin ne olduğu belirtilmemiş ve evler dışındaki granit kamu binaları için geliştirildiğini iddia ettikleri bu sisteme ait herhangi bir ölçüm sonucu sunulmamıştır (Lopes vd., 2018).

Lopes vd. (2019), WebGIS-tabanlı (Web: İnternet üzerinde yayınlanan birbirleriyle bağlantılı hiper-metin dökümanlarından oluşan bilgi sistem, ağı, GIS: Geographical Information Systems; Coğrafi Bilgi Sistemi) bir radon risk yönetim sistemi kurduklarını bildirmişlerdir. Bu sistemde kullanılan IoT'li ölçüm cihazlarının radon, $CO_2$, nem ve basınç sensörlerinin yer aldığı cihazlar olduğu söylenmiş ancak radon ölçümü için hangi dedektörün kullanıldığı belirtilmemiştir. Geliştirilen WebGIS-tabanlı radon risk yönetim sistemi, beş bileşenden oluşan bir mimariyle sahiptir. Bu bileşenler; RnMonitör, veri işleme birimi, gerçek zamanlı sunucu, ters Proxy sunucusu (bilgisayar ağlarında bir veya daha fazla sunucudan istemci adına kaynakları alan sunucudur) ve dış hizmet sunucusudur (radon ölçümünün yapıldığı konum için kullanılan coğrafi sunucudur). Araştırmacılar, Portekiz'in Viana do Castelo yerleşim birimi civarında 3 adet baz istasyonu (GW0, GW1, GW2) üzerinden, LoRaWAN iletişim ağını kullanarak (düşük güçlü geniş alan IoT ağları için küresel bir standart olarak kullanılan bu haberleşme protokolü, çok düşük güç tüketimi ile uzun menzilli iletişim sunan bir ağdır) farklı binalardan elde ettikleri radon ve diğer

parametrelerin takibini www.cloudrf.com adresi üzerinden yaptıklarını belirtmekle birlikte herhangi bir ölçüm sonucu sunmamışlardır. Önerilen sistemle elde edilecek radon ölçümleri önceden tayin edilmiş olan sınır değerin üzerine çıktığında, bina yöneticisine bir alarm bildirimi gönderilebileceği ve aktif bir havalandırma sistemi devrede olmadığından bina yöneticisi tarafından manuel olarak havalandırma gerçekleştirilebileceği bildirilmektedir. Radon seviyelerinin görsel olarak sınıflandırılabilmesi için web ortamında kullandıkları renk kodları; düşük risk için yeşil, orta risk için sarı, önemli risk için turuncu ve yüksek risk için kırmızı renk şeklindedir. Ayrıca, radon ölçümleri için ne kadar süreyle ölçüm yapıldığı belirtilmemekle beraber ölçümlerin; çok kısa-dönem (24 saatlik), kısa-dönem (1 haftadan 3 aya kadar) ve uzun-dönem (3 aydan 1 yıla kadar) olacak biçimde üç farklı şekilde web ortamında görselleştirilebileceği bildirilmiştir (Lopes vd., 2019; Martins vd., 2020).

Amato ve arkadaşları İtalya'nın Maruggio yerleşim biriminde yürüttükleri RADON araştırma projesi kapsamında, özellikle okullar ve diğer kamu binalarındaki radon yoğunluğunun gerçek zamanlı olarak takip edebilmesi için yenilikçi bir sensör ağı tasarlamışlar ve bu çalışmaya ait ön bulgularını 2019 yılında sunmuşlardır (Amato vd, 2019). Ölçüm mimarisinde; radonun dedeksiyonu için bir radon sensörü (opsiyonel olarak sıcaklık ve nem sensörleri gibi diğer sensörler de radon sensörü ile birlikte kullanılabilir), işlem birimi olarak bir SBC (tek kartlı bir bilgisayar) ve iletişim birimi için kablosuz bağlantı sağlayan Wi-Fi ya da 4G ağı kullanılması önerilmiştir. Bu sistemden alınan veriler (radon konsantrasyonu, sıcaklık ve nem) gerçek zamanlı olarak TCP/IP haberleşme protokolü üzerinden bir modeme 4G bağlantısıyla kablosuz olarak aktarılmaktadır. Aynı zamanda bu veriler bulutta (yüksek kapasiteli bir internet alanında) depolanmaktadır. Buluttan alınan veriler web ortamında CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) bilgileriyle birlikte gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmektedir. Bu sistem üç güne kadar bağlantı olmadan çalışacak şekilde tasarlanmıştır (elektrik kesintileri düşünülerek bu sistemde, radon ölçüm sistemine 96 saat boyunca enerji sağlayabilecek şarj edilebilir bir pil kullanılmıştır). Radon konusu hakkında öğrencilerin ve halkın bilgilendirilmesini de kapsayan bu proje ile

önerilen sistemin geliştirilebileceğini, böylelikle deprem tahmini yapabilecek bir radon takip ağının da kurulabileceği belirtilmiştir (Amato vd, 2019).

Amato vd. 2019 yılında yaptıkları tasarımı geliştirerek kamu binalarındaki radon konsantrasyonunu takip ve kontrol etmek için 2020 yılında açık erişimli bir Siber Fiziksel Sistem (open CPS) önermişlerdir. Yeni tasarımın bileşenleri; bir radon sensörü, bir SBC, bir röle (havalandırma sistemi için fan ve pencerenin açılmasını sağlayan tetikleyici) ve android uygulamasının kurulu olduğu bir cep telefonundan oluşmaktadır. SBC ile iletişim kurabilen röle sayesinde (radon için önceden belirlenen sınır değer aşıldığında) havalandırma sistemi tetiklenerek aktif hale gelmektedir. Aynı zamanda sistemde kullanılan akıllı cep telefonu için bir uygulama geliştirilmiştir. Bu telefonu kullanan kişinin günlük konumuna ait geçmiş bilgisi akıllı telefondaki GPS kayıtlarından elde edilerek bulunduğu bölgedeki radon ağından elde edilen radon konsantrasyonu ölçümleri ile eşleştirilmekte ve uygulama ekranında kullanıcıyı temsil eden insan figüründe vücuda ne kadarlık doz alındığı renk değişimiyle görselleştirilmektedir. İnsanların radon farkındalıklarını arttırmak amacıyla yola çıkılan bu çalışmada farklı kullanıcı profilleri için farklı arayüzlerin tasarlanabileceği bildirilmiş ve önerdikleri bu sistem için yeni bir deneysel PIN diyotlu radon sensörü kullanılmıştır. Tasarımın geliştirilmesi yönünde deneysel çalışmaların devam ettiği belirtilmiş ancak herhangi bir radon ölçüm sonucu sunulmamıştır (Amato vd., 2020).

Alvarellos vd. (2020) Radon gazı konsantrasyon seviyelerini düşürmeye yardımcı olacak düşük maliyetli online radon gazı takip sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarını bina içi radon seviyesinin 400 Bq/m$^3$'üzerinde olabileceği İspanyanın Galiçya bölgesinde gerçekleştirmişlerdir. Radon gazının tahmini maruziyeti hakkında ilgili tarafı bu gazın varlığından haberdar etmek için bir uyarı sistemi uygulamayı amaçlamışlardır. Geliştirilen sistemle, radon gazı tehlikeli bir seviyeye ulaşmadan önce, ilgili kişinin bulunduğu ortamdaki radon gazı seviyesinin yükselmesini önlemek için tedbirler alınması sağlanmıştır. Ayrıca yüksek radon gazına maruz kalınan yerlerde radonun düşürülmesini amaçlamışlardır. Radon ölçüm sisteminde donanımsal olarak; Radon sensörü

(RD200M), Arduino (IoT) modülü, BME280: Nem, sıcaklık ve basınç sensörü, CCS811: AQI (bina içi hava kalitesi) sensörü kullanılmıştır. Radon ölçüm sisteminde yazılımsal olarak da; Pfsense (Yönlendiriciler ve güvenlik duvarları için ücretsiz ve açık kaynaklı bir işletim sistemidir), HAProxy (HAProxy, TCP, HTTP ve HTTPS tabanlı uygulamalar için yüksek kullanılabilirlik, yük dengeleme ve proxy oluşturma sunan ücretsiz, çok hızlı ve güvenilir bir açık kaynak sunucusudur) ve Node-RED (Donanım cihazlarını, API'leri ve çevrimiçi hizmetleri yaratıcı ve kolay bir şekilde bağlamak için açık kaynaklı bir programlama aracıdır) kullanılmıştır. Haberleşme protokolü olarak ACME (Automated Certificate Management Environment, sertifikaların verilmesini ve yenilenmesini insan etkileşimi olmadan otomatikleştirmeyi mümkün kılan bir protokoldür), MQTT (Message Queuing Telemetry Transport; kısıtlı düşük bant genişliğine sahip ağlar ve son derece yüksek gecikme süreli IoT cihazları için bir mesajlaşma protokolüdür) ve http kullanılmıştır. Ayrıca sertifika yetkisi için Let's Encrypt yani web sunucusu ile kullanıcıların arasındaki iletişimi şifrelemek için sertifika programını kullanmışlardır. Let's Encrypt, herhangi bir uyumlu istemciye ücretsiz TLS/SSL sertifikaları sağlamak için ACME protokolünü kullanan açık ve otomatik bir sertifika yetkilisidir. Geliştirilen sistem iki bölümden oluşturulmuştur. Bunlar cihazlar (sensörler) ve sunucular (sigfox ve web)'dır. Sistemin haberleşmesi için iki farklı iletişim teknolojisi kullanılmıştır. Bunlar; WiFi ve Sigfox'dur. WiFi cihazları, ağın mevcut olduğu yerlerde kullanılmıştır. SigFox (868 MHz frekansa sahip), uzak sensörler, aktüatörler ve diğer M2M (Makineden makineye) ve IoT cihazları gibi cihazlar için kablosuz bağlantı sağlamak üzere geliştirilmiş hücresel tarzda, uzun menzilli, düşük güçlü, düşük veri hızlı bir kablosuz iletişim biçimidir. Verileri iletim hızı ve maksimum veri alış-verişi LPWAN'lardan düşük olsa da Sigfox ağı daha geniş kapsama alanı sağlar. Ölçüm sistemindeki sensörlerden (radon, nem, sıcaklık ve basınç) periyodik olarak sunucuya veri gönderilmiştir. Ölçüm sisteminde veriler saklanmış ve her cihaz için radon seviyesinin tahmini yapılmıştır. Bu online ölçüm sisteminde, nem, sıcaklık ve basınç sensörü her 5 saniyede bir, radon sensörü her 10 dakikada bir örnekleme yapmıştır. Radon ölçüm sonuçlarını grafiksel olarak; son 6 saatlik, son 24 saatlik ve son bir haftalık şekilde görselleştirmişlerdir. Grafiksel ekrandaki sonuçlara göre 0-800 $Bq/m^3$'lük radon

seviyelerini gözlemlemişlerdir. Belirli bir cihaz için yüksek bir radon konsantrasyonu tahmin edilirse (300 Bq/m$^3$), kişinin radon gazı seviyesinin yükselmesini önlemek için MQTT, e-posta ve görsel uyarılar ile önlemler almasını sağlamıştır. Radon konsantrasyonu seviyesi eşiğin (300 Bq/m$^3$) altına düştüğünde, sunucuya seviyelerin normale döndüğünü belirten bir mesaj gönderilmiştir (MQTT, e-posta ve görsel uyarılar). Bu çalışmanın sonuçları, düşük maliyetli, ancak güvenli bir radon takip sisteminin geliştirilmesinin mümkün olduğunu ve yüksek radon konsantrasyonlarının oluşturduğu sağlık tehlikelerini azaltmaya yardımcı olabilecek bir sensör ağının kurulabileceği gösterilmiştir. Alvarellos vd. (2020) Gelecekte daha fazla iletişim teknolojisi kullanacaklarını söylemişlerdir (Alvarellos vd., 2020; 2021).

Ferreira tarafından 2020 yılında yapılan doktora çalışmasında, radon gazının tespiti, azaltılması ve tahmini için IoT'li bir ölçüm sistemi tanıtılmıştır. Önerilen sistemin donanımsal bileşenleri; bir RD200M radon sensörü, bir Geekcreit® UNOR3 ATmega328P geliştirme kartı, bir SparkFun Wi-Fi Shield-ESP8266 internet modülü, bir BME280 atmosferik basınç sensörü, tek kanallı 5 voltluk bir röle, bir Arduino Stackable Header Kit-R3, bir fan (Girdap lineo 100 VO), bir UART dönüştürücü ve 9V'luk bir güç kaynağı olarak bildirilmiştir. RD200M sensörü UART dönüştürücü ile Arduino'ya ve SparkFun Wi-Fi Shield-ESP8266'ya bağlanmıştır. ESP8266 modülü ise röle vasıtasıyla fana bağlanmıştır. Yazılım olarak, Microsoft SQL veritabanı, Java, Netbeans, Glassfish, Soapui, Json, HTML, PHP, CSS ve Bootsrap kullanılmıştır. Deneysel çalışma için Portekiz'in Guarda bölgesindeki Trancoso belediyesine ait Rebleiro mahallesinde bulunan kırsal bir konut seçilmiştir. Bu ölçüm noktasının, daha önce kullanılan ama günümüzde kullanılmayan uranyum madenlerine yakınlığı nedeniyle seçildiği belirtilmiştir. Radon ölçümleri 8 Nisan-6 Mayıs 2020 tarihleri ile 6 Mayıs-19 Haziran 2020 tarihleri arasında 10'ar dakikalık periyotlarla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler geliştirilen web uygulaması ile online olarak takip edilmiştir. Önerilen sistem, radonun günlük, haftalık, aylık, yıllık ortalamaları ile minimum ve maksimum değerlerini Web uygulamasında görselleştirebilmektedir. Bu uygulama için ayrıca, önceden belirlenen referans değerlerine göre renkli bir uyarı sistemi geliştirilmiştir (WHO'nun belirlediği 100 Bq/m$^3$'ün altı ise yeşil, 100-300 Bq/m$^3$

ise turuncu, Portekiz yasal limit değeri olan 300 Bq/m$^3$'ün üzerinde ise kırmızı). Elde edilen radonun ölçüm sonuçlarının doğruluğunu test etmek için Airthings Corentium Home radon dedektörü referans cihaz olarak kullanılmıştır. Daha önceden yapılan bir çalışmada, yüksek radon yoğunluğunu azaltmak için bir havalandırma sisteminin kullanılabileceği belirtilmektedir (Blanco-Rodríguez vd., 2017). 2020 yılında gerçekleştirilen bu çalışmada havalandırma sistemiyle radon yoğunluğunu azaltmak için iki farklı mitigasyon yöntemi denenmiştir. Bunlar; havalandırma sisteminden emme ile temiz havanın odaya alınması diğeri ise evin içerisindeki havanın dışarı atılmasıdır. Yapılan test ölçümleri, evin içerisindeki havanın dışarı atılmasının mitigasyon için daha iyi bir yaklaşım olduğunu göstermiştir (radon konsantrasyonu %93'e kadar düşürülmüştür). Çalışmanın bir hedefi de makine öğrenmesini kullanarak radon konsantrasyonlarının tahmin edilmesine yönelik olsa da nem, basınç ve sıcaklık gibi verileri toplamak için kullanılan sensör sisteminin arızalanması yüzünden radon konsantrasyonlarını tahmin etmek için geliştirilen öğrenme algoritmasının uygulanamaz hale geldiği ve Covid-19 kısıtlaması nedeniyle bu sensörlerin temin edilemediği belirtilmiştir. Sistemin test edildiği konutta tespit edilen yüksek düzeydeki radon konsantrasyonları (~3000 Bq/m$^3$) nedeniyle bölge halkı bilgilendirilmiş ve bir eylem planı önerilmiştir (Ferreira, 2020).

Medina-Pérez vd. (2021), insanların zamanlarının büyük bir kısmını geçirdikleri ev ve işyeri gibi kapalı mekânlardaki atmosferik radon düzeylerini gerçek zamanlı olarak takip edebilmek ve web ortamında görüntüleyebilmek için MQTT ve Node-RED tabanlı bir IoT sistemi geliştirmişlerdir. Bu tasarım için pahalı bir elektronik radon dedektörü (Radon Scout), bir SBC (Raspberry Pi 3B), MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protokolü, Node-RED (Nesnelerin internetinin bir parçası olarak donanım aygıtlarını, API'leri ve çevrimiçi hizmetleri birbirine bağlamak için kullanılan görsel programlama için akış tabanlı bir geliştirme aracıdır), veri tabanı ve bir web sitesinden yararlanılmıştır. İlk olarak ölçüm cihazından alınan veriler üretici tarafından sağlanan Radon Vision yazılımı ile bir PC'ye (bir masaüstü bilgisayara) seri bağlantı portundan kablo bağlantısıyla aktarılmıştır. Birkaç gün boyunca yapılan saatlik radon ölçümleri ile ölçüm cihazının iç çalışma mekanizması incelenmiş ve Radon Scout

cihazının kendi sistemine kaydettiği veriler ile önerilen sistemden alınan veriler arasındaki uyum karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Önerilen tasarımın kurulumu için radon dedektörüne RS232 bağlantısı ile bağlanan ve IoT modülü olarak işlev gören SBC içerisine Python programlama dilinde yazılan bir kod sayesinde dedektörden gelen tüm ölçüm verileri (radon, nem ve sıcaklık) alınıp Node-RED'e iletilmiştir. PHP (web tabanlı ve nesne yönelimli bir programlama dilidir) kullanılarak oluşturulan web sitesi için Bootstrap (bazı kodlardan oluşan, açık kaynaklı web uygulaması geliştirme aracıdır), Leaflet (web haritalama uygulamaları oluşturmak için kullanılan açık kaynaklı bir JavaScript kitaplığıdır), json (yapılandırılmış verileri seri hale getirmek ve bir ağ üzerinden aktarmak için kullanılır), javascript (betik dilidir; kodları interpreter tarafından yorumlanarak çalıştırılır), HTML (metin işaretleme dilidir) ve MySQL (veri tabanı) kullanılmıştır. Kullanıcılar tarafından radon ölçümlerinin takip edilebilmesi için bu web sitesine erişim, tanımlı olan bir mail adresi ve şifre ile giriş yapılarak sağlanmaktadır. Daha sonra istenilen zaman dilimlerine göre tarih aralığı seçilerek radonun geçmiş zamandaki sonuçlarına ulaşılabilmektedir. Radon, nem ve sıcaklık bilgileri yer işaretleriyle birlikte birkaç gün süreyle saatlik olarak bir harita üzerinde görselleştirilebilmekte ve harita üzerinden tüm ölçümleri içeren bir Çizelgeye erişim sağlanmaktadır. Araştırma ekibi tarafından yapılan test çalışması için radon ölçümlerine ait sayısal değerler verilmemekle beraber, sadece bir haftalık ölçüm sonuçlarına ait bir grafik paylaşılmış ve oradan okunan değerin 0-110 $Bq/m^3$ aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Önerilen online radon ölçüm sisteminin deneysel ölçümlerle başarılı bir şekilde test edildiğini belirten ekip, bir sonraki adımda tasarımlarına otomatik havalandırma sisteminin dahil edilmesini planladıklarını bildirmişlerdir (Medina-Pérez vd., 2021).

Terray vd. (2020), İtalya'nın Sicilya bölgesinde bulunan Etna yanardağında radon monitörlemesi yapmak amacıyla bir dış mekân online radon ölçüm ağı tasarlamışlardır. Yanardağın güney bölgesinin iki kanadına (Frumento ve Barbagallo dağlarında) ~3000 metre yüksekliğe iki ölçüm sistemi kurmuşlardır. Üçüncü bir istasyon da (iletimin kalitesini değerlendirebilmek için) Montagnola Zirvesi'ndeki bir kaya engelinin arkasına, bağımsız bir konfigürasyon olarak kurulmuştur. Bu üç ölçüm istasyonunun internet bağlantısı Montagnola'nın

zirvesine kurulan bir baz istasyonu (LoRaWAN) ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistem tasarımında; AER+ radon dedektörü, IoT modülü, LoRa Gateway kiti, LR20 Lityum batarya (3,6 Volt), iki adet hava girişi (ana kutunun yan tarafında ve alt kısmında birer adet) olan polisitren kutu ve UART kartı kullanılmıştır. Online ölçüm sisteminde; UART protokolü sayesinde alınan veriler (Universal Asynchronous Receiver Transmitter, Evrensel Asenkron Alıcı-Verici anlamına gelir. UART protokolü, bilgisayar ile mikro kontroller veya mikro kontroller ile çevre birimler arasında haberleşmeyi sağlayan protokoldür ve asenkron olarak çalıştığı için herhangi bir saat sinyaline ihtiyaç duymaz), LoRa modülüne M12 konnektörü ile iletilmektedir (M12 konnektörü, esas olarak aktüatörler, sensörler, endüstriyel ethernet ve Fieldbus için fabrika otomasyon uygulamalarında kullanılan 12 mm kilitleme dişine sahip dairesel bir konnektördür). Daha sonra bu veriler, IoT&M2M SİM kartı 3G bağlantısı ile LoRaWAN ağına ve buradan da buluttaki bir sunucuya aktarılmaktadır (internete bağlı uzaktaki PC, tablet, akıllı telefon vb. gibi bir cihaz ile ölçüm verilerine ulaşım mümkün hale gelmektedir). Barbagallo ve Frumento dağında bulunan istasyonlardan her 15 dakikada bir veri alınırken, Montagnola'daki istasyondan saatte bir veri alındığı bildirilmiştir. İtalya'daki ölçüm noktalarından alınan veriler, Fransa Clermont-Ferrand Üniversitesi'ndeki veri merkezinde toplanarak, depolanmış ve işlenmiştir. Önerilen tasarım için test ölçümleri, yanardağ civarına kurulan dış mekân ölçüm sistemleri ile gerçekleştirildiğinden bazı zorluklarla karşılaşılmıştır (sensörden veriler alındığı andaki sinyal kalitesi, internet erişimi, batarya kapasitesinin planlanandan daha çabuk düşmesi ve meteorolojik koşullar). Ölçüm istasyonlarındaki sıcaklığın -14 ile 20 °C arasında değiştiği 31 Aralık 2019'da kontrol sırasında tespit edilmiştir. Aynı zamanda burada radon ölçüm sisteminin muhafaza edildiği kutu etrafında kalın bir buz tabakası olduğu da görülmüştür. Volkanik patlamalardan dolayı, ölçüm sistemi asidik tozların etkisi altında kalmış fakat kutu içerisindeki mekanik bileşenlerde herhangi bir arıza durumu olmadığı bildirilmiştir. Kablosuz veri iletimi için performans değerlendirmesi, Ekim-Aralık 2019 dönemi radon ölçümleri incelenerek yapılmıştır. Veri kaybı oranı Barbagallo dağındaki istasyon için %2,7, Monte Frumento dağındaki istasyon için %1 ve Montagnola dağındaki istasyon için %37 olarak bulunmuştur. Tüm ölçümlerin %94'ünün bir saat içinde sunucuya

iletildiği bildirilmektedir. Barbagallo dağındaki radon konsantrasyonu, 83±0,4 Bq/$m^3$'lük bir ortalama değer etrafında değişirken, Frumento dağındaki düzeyin 63±0,3 Bq/$m^3$ olduğu rapor edilmiştir. Araştırmacılar, geliştirdikleri bu sistemle aktif volkanları kapsayacak çalışmaların sürdürüleceğini belirtmişlerdir (Terray vd., 2020).

Forsström vd. (2020) Geliştirdikleri yeni IoT platformunda online olarak radon ölçümünü amaçlamışlardır. Geliştirilen sistemde donanımsal olarak, MidDec radon sensörü, Raspberry Pi 3A+, ESP32 sensör programlayıcı kart ve Raspberry Pi 4 bulunmaktadır. Yazılımsal olarak, MQTT ve PostgreSQL (veri tabanı) kullanılmıştır. Bilgisayar ağı üzerinden güvenli haberleşmeyi sağlamak için tasarlanmış; PSK (şifreleme yöntemi), TLS (taşıma katmanı güvenliği) ve Open SSL gibi kriptolama protokolleri kullanılmıştır. Raspberry Pi 3A+ ile radon dedektöründen aldıkları verileri (radon, nem ve sıcaklık) sürekli olarak SD karta depolamışlardır. Aynı zamanda radon değerleri Raspberry Pi 3A+'dan Raspberry Pi 4'e aktarılarak www.smeiot.se sitesinde veriler görselleştirilmiştir. Radon ölçümü sırasında sıcaklık arttığında ESP32 sistemine bağlı havalandırma birimi otomatik olarak çalıştırılarak ortam sıcaklığı düşürülmüştür. Geliştirilen sisteme yeni cihazlar eklenerek 15 dakika sonra radon örneklemesi izlenebilmiştir. Fakat radon ölçüm sonuçlarını rapor etmemişlerdir. Gelecekte IoT platformunu kolaylaştırarak daha fazla örnekler oluşturacaklarını söylemişlerdir (Forsström vd., 2020).

Pereira vd. (2020) Portekiz'in kuzey bölgesinde bulunan (Viana do Castelo) kamu binalarındaki bina içi radon gazını kontrol etmek için RnMonitör adını verdikleri IoT'li ölçüm sistemini geliştirmişlerdir. Bu sistemde, RD200M radon sensörü, mikrodenetleyici ile iletişim kuran UART modülü, MQ-135 $CO_2$ sensörü, DHT11 sıcaklık ve nem sensörü, MPL3115A2 basınç sensörü, I2C dijital çıkış arayüzü, LoRa ile iletişim sağlayan RN2483 mikrochip kullanılmıştır. Ayrıca bu sensörlerin entegrasyonunu sağlayan ESP8266 (SBC), PCB baskı devre kartı, LoRa anteni, LoRa radyo modülü ve diğer bileşenler kullanılmıştır. Viana do Castelo Politeknik Enstitüsü Teknolojisi ve Yönetim Okulu'nun iki ayrı laboratuvarında L1.11 nolu zemin katta ve L3.5 nolu 3.katta ölçümler alınmıştır. Bu laboratuvarlarda,

01.10.2019-31.10.2019 ile 01.11.2019-30.11.2019 tarihleri arasında RnMonitor platformu ile LoRaWAN ve Wi-Fi ağı kullanılarak radon, $CO_2$, atmosferik basınç, sıcaklık ve nem değerleri izlenmiştir. Radon ve diğer parametreler için "Radon Risk Göstergesi (RRI) haritası" oluşturulmuştur. Ölçüm yerleri için haritada belirli bir nokta (sensör) veya bölme seçildiğinde, son 30 güne karşılık gelen zaman serisi verileriyle otomatik olarak üç grafikli bir gösterge panosu oluşturulmuştur. İlk grafikte, radon konsantrasyonu (kırmızı) ve atmosferik basınç (koyu mavi) sunulmuş olup, yatay kırmızı düz çizgi 300 $Bq/m^3$ eylem seviyesini temsil etmiştir. İkinci grafikte, iç ortam hava sıcaklığı koyu yeşil renkle, buna karşılık gelen bağıl nem de açık mavi renkle gösterilmiştir. Ölçülen radon değeri belirlenen sınır değerini aştığında bina yöneticisine alarm bildirimi gönderilerek manuel havalandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Pereira vd. (2020) radon ölçümleri ile ilgili ilk çalışmalarında ortalama 397 $Bq/m^3$, ikinci çalışmalarında ise ortalama 59 $Bq/m^3$'lük sonuç elde etmişlerdir. Burada yapılan RRI değerlendirmesinde ölçüm yapılan laboratuvarların dolu olduğu yani kullanıldığı zaman dilimine göre hesaplama yapılmıştır (09:00-17:00). Radonun bir aylık ölçüm grafiği incelendiğinde L1.11 nolu zemin katta 0-1200 $Bq/m^3$'lük radon değişiminin olduğu, L3.5 nolu 3.katta ise 0-175 $Bq/m^3$'lük radon değişiminin olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilen bu ölçüm sistemine daha sonraki çalışmalarında havalandırma sistemini dâhil edeceklerini söylemişlerdir (Pereira vd., 2020).

Wang vd. (2020), yüksek radon konsantrasyonuna sahip riskli ortamlar için sürekli olarak radyoaktif aerosollerdeki bazı radyoçekirdeklerin konsantrasyon monitörlemesini yapabilen ve uzaktan gerçek zamanlı kontrol imkânı sunan bir sistem geliştirmişlerdir. İnternet üzerinden veri alışverişine imkân tanıyan bu sistemde, ölçülen veriler gerçek-zamanlı olarak bir merkezde toplanabilmekte ve cihaz uzaktan kontrol edebilmektedir. Aerosol takip cihazı; PIPS dedektörü, hava pompası, filtre, manometre, vakum pompası, konum sensörü, hareket sensörü, motor (2 adet), yükseltici, A/D (Analog/Dijital) dönüştürücü, çok kanallı analizör, eternet girişi, geri besleme birimi (RS485 haberleşme protokolü üzerinden), kontrol bilgisayarı, sonuç gösterge ekranı, verileri depolama birimi, veri iletimi ve komut alıcı birimlerinden oluşturulmuştur. Sistemdeki tüm kontrol komutları

Windows XP/7 işletim sisteminde, C++ yazılım kodlarıyla gerçekleştirilmiştir. Radyoaktif aerosol takip ağı mimarisinde kullanılacak ölçüm cihazlarının, merkezi sunucu (kontrol birimi) ile bağlantılarının 3 farklı biçimde (sim kart üzerinden 3G bağlantısı, Wi-Fi ya da kablolu ağ üzerinden internet bağlantısı ile) yapılabileceği belirtilmektedir. Ölçüm ve kontrol birimi, radyoaktif izotopların ölçümünden, motorun (havayı cihaza pompalayan birim) çalıştırılmasından ve tüm mekanik bileşenlerin kontrolünden sorumlu olmuştur. PIPS dedektörü, filtreden salınan alfa parçacıklarını ölçmüş ve sinyal ön işleme birimine eternet üzerinden kontrol bilgisayarına bir analog sinyal iletmiştir. Ayrıca debimetre ve manometre değerleri ile konum sinyali bir seri protokol (RS485) üzerinden kontrol bilgisayarına iletilmiştir. Motor ve pompa için kontrol sinyali de, motoru sürmek ve pompayı çalıştırmak için seri protokol aracılığıyla iletilmiştir. Eternet aracılığıyla radon dedektöründen ölçümler alındıktan sonra kontrol bilgisayarı tarafından üç görev gerçekleştirilmiştir. İlk görevde, radonun grafiksel pik noktalarının tespiti yapılmıştır. Daha sonra ortamdaki radon verileri tahmin edilerek çevresel radyoaktif izotop içerikleri hesaplanmış ve analiz edilmiştir. İkinci görevde, verilerin kontrol bilgisayarı tarafından hesaplanan çevresel radyoaktif izotop içeriklerin ve ölçüm işlemi sırasında alınan verilerin depolanması ve görüntülenmesi sağlanmıştır. Üçüncü görevde, kontrol sunucusuyla internet üzerinden iletişim kurulmuştur. Ölçümler ve sonuçlar kontrol sunucusuna iletilmiş ve sunucudan gelen komutlar kontrol bilgisayarı tarafından alınmıştır. Veri iletimi ve monitörleme ağı arasındaki haberleşme, internet ve TCP-IP protokolü kullanılarak sağlanmıştır. Sürekli aerosol takip cihazının performansının ve uygulanabilirliğinin test edilmesi için, yüksek düzeyde radon ihtiva eden bir laboratuvarda iki adet aerosol takip cihazı kurulmuştur (radon konsantrasyonu yaklaşık 3000 $Bq/m^3$'tür). Cihazlardan biri internete Wi-Fi ile diğeri ise kablolu bir ağ üzerinden bağlanmıştır. Veriler her iki saatte bir alınmıştır. Toplamda 15 gün boyunca aerosol monitörleme ağı sistemi ile $^{239}Pu$, uranyum ve beta radyasyonu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin, yüksek radon konsantrasyonlu bir ortamda radon bozunma ürünleri ve toryum arasındaki girişimin üstesinden gelebildiği belirtilmiş ve bu sistemle ortamdaki radyoaktif aerosollerin konsantrasyonlarının doğru bir şekilde ölçülebildiği bildirilmiştir. Ölçüm sonuçlarının yöneticinin bulunduğu uzaktaki

bir merkeze iletilmesiyle, sistemin uzaktan kontrol edilebileceği ve radyasyon bakımından tehlikeli olabilecek yerlerde güvenli bir biçimde kullanılabileceği vurgulanmıştır (Wang vd., 2020).

Bina içi atmosferik radon ölçümleri için veri aktarım kabiliyetine sahip elektronik dedektörlerin kullanıldığı online takip sistemlerinin geliştirilmesi konusu haricinde literatürde; deprem tahmini için toprak gazında sürekli radon takibi (Studnička vd., 2019; Wang vd., 2022; Galiana-Merino vd., 2022) ile ilgili çalışmalardan sularda sürekli radon ölçümü yapabilen online sistemlerin (He vd. 2022) geliştirilmesine, diğer ölçüm tekniklerinin kullanıldığı araştırmalardan radon ölçümlerine yönelik simülasyon çalışmalarına (Rinaldi vd., 2022; Rizzo vd., 2022) kadar geniş bir yelpazede, çok sayıda farklı araştırmaya rastlamak mümkündür.

Atmosferik radon konsantrasyonlarının sürekli olarak ölçülmesi konusundaki çalışmaların incelendiği bu bölümde son olarak, literatürde önerilen IoT-tabanlı radon takip sistemlerinden bazıları (tez çalışmamız kapsamında geliştirdiğimiz sistemle en ilgili olan tasarımlar) Çizelge 2.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. Mevcut IoT-tabanlı radon takip sistemlerinin karşılaştırmalı özeti

| **Özellik** | **Kaynak** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Blanco-Novoa (2018) | Pereira (2020), Lopes(2018,2019), Martins (2020), Alvarellos (2020) | Alvarellos (2021) | Terray (2020) | Amato (2020) | Medina-Perez (2021) | Forsstrom (2020) | Ferreira (2020) |
| Radon Monitörleme | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Higrometrik değişkenlerin ölçümü (nem, sıcaklık, basınç) | - | + | + | + | + | - | + | + |
| AQI-Hava kalite indeksi ($CO_2$, TVOC, CO, vb.) | - | + | + | - | - | - | - | - |
| Radon seviyesine göre alarm bildirimi | + | + | + | + | - | - | - | + |
| Radon tahmin algoritması (Makine öğrenmesi) | - | - | + | - | - | - | - | - |
| Diğer ölçülen değişkenlerle birlikte tahmin modeli/algoritması: enerji verimliliği termal konfor, gürültü kirliliği vb. | - | - | - | - | - | - | - | - |
| İnsan tarafından alınan önlemler (manuel havalandırma vb.) | + | + | - | + | + | + | + | - |
| Havalandırma birimini aktif eden röle kartı | - | - | + | - | + | - | + | + |
| Otonom hava akımı kontrol sistemi (havalandırma sistemi, motorlu pencere vb.) | - | - | + | - | - | - | - | + |
| Radon ölçüm ağı | - | + | + | + | + | - | - | - |

# 3. YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmek istenen online radon takip ağı tasarımı iki adımda geliştirilmiştir. Öncelikle, söz konusu ölçüm ağının bir parçası olan IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi mimarisi oluşturulmuş ve bu sistemin uzun-dönem radon ölçümleri için performansı Isparta'daki bir meskende test edilmiştir. Yüksek veri iletim verimliliğine sahip olduğu görülen tekli sistemin, radon takip ağı ile yapılmak istenilen sürekli ölçümler için uygun olduğu tespit edilmiştir. Bunun ardından, tekli radon takip sistemlerini eş-zamanlı olarak web üzerinden bir arada kontrol edebilen bir kontrol programı hazırlanarak tekli sistemlerle oluşturulan ölçüm ağı kontrol birimi ile entegre edilmiştir. Birbirinden farklı mekânlardaki radon konsantrasyonlarını tekli sistemler vasıtasıyla sürekli olarak ölçüp elde edilen verileri online olarak uzaktaki web-tabanlı kontrol merkezine gerçek zamanlı olarak gönderen ve bu ölçüm verilerine ait sonuçların kontrol merkezinde kayıt altına alınıp depolanabildiği, istenildiğinde ölçümlerin anlık olarak veya belirli bir zaman aralığı için görsel olarak incelenebildiği radon takip ağı tasarımı, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi binasında yer alan ofis, sınıf, konferans salonu gibi farklı 12 birime tekli radon takip sistemlerinin kurulmasıyla bir yıl boyunca test edilmiştir.

Bu bölümün izleyen kısımlarında, ölçüm noktalarının konumlandığı çalışma alanı hakkında bilgi sunulmakta, tekli radon ölçüm sistemi ve radon ölçüm ağında kullanılan cihazlar ile yazılımlar tanıtılarak önerilen iki sisteme ait tasarım mimarileri verilmekte ve son olarak deneysel çalışma için uygulanan ölçüm stratejisi tanıtılmaktadır

## 3.1. Çalışma Alanının Tanıtımı

Akdeniz Bölgesi'nin batısında 8933 $km^2$'lik bir alan üzerinde kurulu olan Isparta, 37°18′ ve 38°30′ kuzey enlemleri ile 30°20′ ve 31°33′ doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Göller bölgesinde yer alan ilde, Eğirdir, Gölcük, Kovada göllerinin yanında birçok irili ufaklı baraj gölleri bulunmaktadır. Deniz seviyesinden

yüksekliği 1035 m olan Isparta'nın etrafı dağlarla çevrelenmiştir. Isparta'da Torosların uzantıları olan dağlar, bu ilde çok fazla alan kaplamakta ve engebeli yeryüzü şekillerinin oluşmasına sebep olmaktadır. İlde Gelendost, Yalvaç, Senirkent, Şarkikaraağaç ve Atabey ovaları bulunmaktadır (T.C. Isparta Valiliği, 2022). Isparta ovasındaki jeolojik birimler, otokton ve allokton olmak üzere iki grupta toplanmıştır. Isparta'ya ait jeolojik birimler; kil, silt, kum ve çakıllardan oluşan alüvyondur (Irlayıcı, 1993). Gölcük volkanitlerine ait andazit birim (Kalyoncuoğlu vd., 2010), çalışmanın gerçekleştirildiği yeri de kapsayan geniş bir alana yayılmış durumdadır.

Isparta merkez ilçesine ait 1929-2018 yılları arasındaki meteoroloji verilerinin aylık ortalamasına göre ilde yılın en soğuk ayı Ocak'tır (DMİGM, 2022). Bu ayda ortalama sıcaklık 1,8 °C olarak tespit edilmiştir. Yılın en sıcak ayı Temmuz olup ortalama sıcaklık 23,5 °C'dir. Isparta'daki yıllık ortalama sıcaklık ise 12 °C civarındadır. Gün içindeki sıcaklık farkları, yaz aylarında kış aylarına göre daha yüksektir. Ortalama nem Aralık ayında maksimum %74,5, Temmuz ayında minimum %45,4'tür. Yıllık ortalama nem oranı ise %60,6'dır. Toplam yıllık yağış miktarı 564 mm'dir. Yağışların çoğu sırasıyla kış, ilkbahar ve sonbaharda düşerken, yaz dönemi daha az yağışlı ve kurak geçer. Isparta ilinin klimatolojik olarak uzun süre incelenmesi sonucunda, Akdeniz iklimi ile karasal iklim arasında geçiş bölgesinde yer aldığı görülmüştür. Bu nedenle il sınırları içinde yıl boyunca her iki iklimin özellikleri de gözlenir. İlçelerden Sütçüler'de Akdeniz iklimi özellikleri, Şarkikaraağaç ve Yalvaç'ta ise karasal iklim özellikleri hâkimdir (Ersan ve Başayiğit 2022).

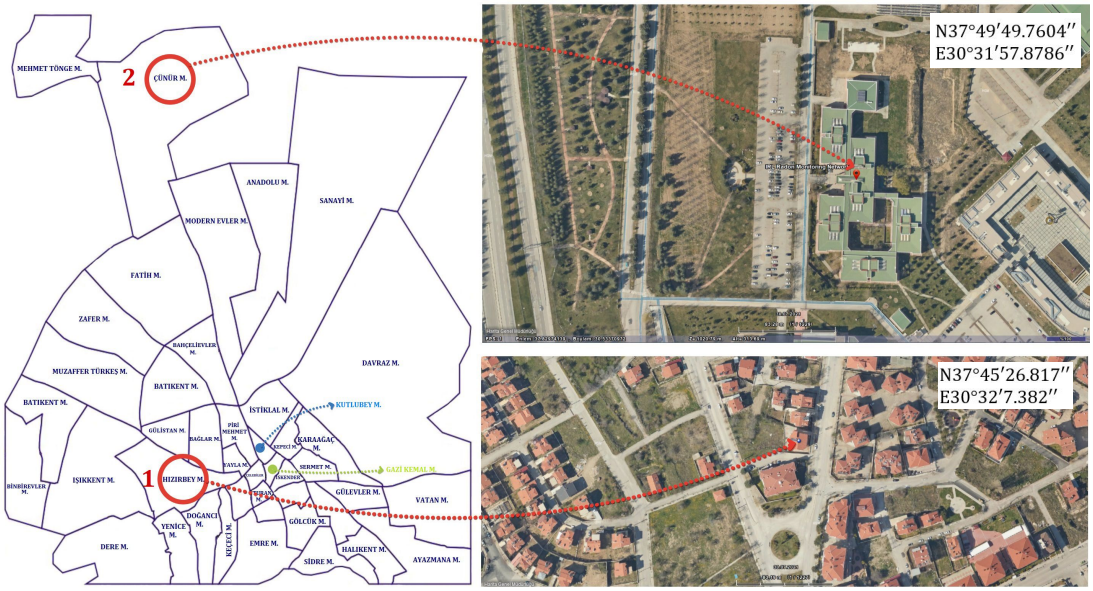
Isparta ilinde, 2021 yılı adrese dayalı nüfus kayıt sistemi verilerine göre 220699'u erkek, 224979'u kadın olmak üzere toplam 445678 nüfus bulunmaktadır. Merkez ilçe nüfusu 266982 kişiden oluşmaktadır. Göç alan bir il konumunda olan Isparta'da 2020-2021 yılları arasındaki nüfus artış hızı %1,22 olarak rapor edilmiştir (TÜİK, 2022).

İlde Süleyman Demirel Üniversitesi ve Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi olmak üzere iki adet yükseköğretim kurumu mevcuttur. Süleyman Demirel

Üniversitesinde toplamda 1935 akademisyen, 41411 lisans ve lisansüstü öğrenci bulunmaktadır. Ayrıca üniversitede 15 fakülte, 6 enstitü, 3 yüksekokul, 4 meslek yüksekokulu, 47 araştırma ve uygulama merkezi ile birlikte 121 bölüm bulunmaktadır (YÖK, 2022).

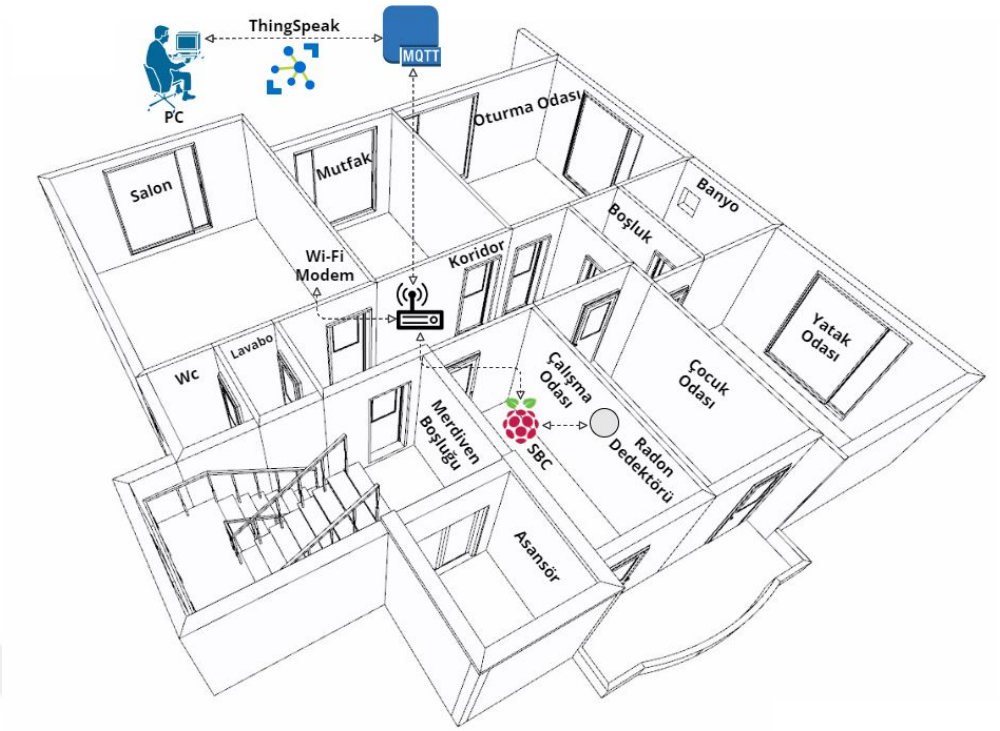
Isparta il merkezindeki bina içi radon konsantrasyonlarının yüksek seviyelere çıkabildiği daha önceki çalışmalarla gösterilmiş (Kürkçüoğlu, 2018) ve bina içi atmosferik radon düzeylerini sürekli olarak takip edilebilecek bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaçtan haraketle, yeni nesil teknolojye dayalı olarak tarafımızca geliştirilen IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi şehir merkezindeki bir evde 1 Haziran 2020-31 Ocak 2021 tarihleri arasında kullanılarak başarılı bir şekilde test edilmiştir (Şekil 3.1, 1 numaralı konum).

Daha sonra çalışmanın 2. kısmını oluşturan radon ölçüm ağının kurulumu ve test edilmesi Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesinde 1 Mart 2021-28 Şubat 2022 tarihleri arasında hayata geçirilmiştir (Şekil 3.1, 2 numaralı konum). Çalışmanın birinci basamağını oluşturan, Hızırbey mahallesindeki meskenin GPS için koordinat bilgisi; enlem: 37°45′26,8′′ kuzey paraleli ve boylam: 30°32′08,0′′ doğu meridyenidir (Şekil 3.1). Hızırbey mahallesinde 11435 kişi ikamet etmektedir (TÜİK, 2022).




Şekil 3.1. Çalışma alanlarının haritası (1: Ön-ölçümlerin yapıldığı yerin konumu, 2: Test ölçümlerin yapıldığı yerin konumu)

Ön-ölçümlere ait deneysel çalışma, il merkezindeki 3 katlı bir binanın giriş katındaki bir meskende gerçekleştirilmiştir. Bu dairede 3 kişi yaşamaktadır. Betonarme tipinde olan bu bina 2015 yılında yapılmıştır. Binanın dış duvar kalınlığı 35 cm, iç duvar kalınlığı 15 cm ve taban kalınlığı 30 cm'dir. 165 $m^2$ yaşam alanına sahip olan bu meskende 6 oda bulunmaktadır. Dairede 8 büyük pencere, 2 mini pencere ve 11 kapı mevcuttur. Ön-ölçümler için kullanılan IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin yerleştirildiği evin 3D görünümü Şekil 3.2'de verilmiştir.




Şekil 3.2. Ön-ölçümlerin yapıldığı meskenin 3D görünümü

Wave radon dedektörüyle ön-ölçümlerin alındığı çalışma odası 10 $m^2$'lik bir alana ve oldukça zayıf bir havalandırmaya sahiptir (Oda aktif olarak kullanılmamaktadır). Radon sensörü ile Raspberry Pi 3B (SBC), odanın karşılıklı duvarlarına (birbirinden yaklaşık 2,5 metre uzaklığa) yerleştirilmiştir. Dairenin ortasında yer alan Wi-Fi modem cihazı, SBC'ye yaklaşık 3 metre uzaklıktadır. Modem tüm odalardan güçlü erişime sahiptir. SBC'nin menzili 10 metre olup, modemin menzili ise 20 metre civarındadır.

Aynı ölçüm noktasında daha önce, 2018 yılının Kasım ve Aralık aylarında Safety Siren Pro 3 elektronik radon dedektörü ile kısa-dönem radon ölçümleri yapılmış ve meskende ~700 $Bq/m^3$ düzeyinde radon yoğunluğu tespit edilmiştir (Koçer ve Kürkçüoğlu, 2019). 2019 yılında zemine 10 cm kalınlığında EPS malzeme ile yalıtım uygulanmıştır. Tez kapsamındaki ön-ölçümlerimiz Haziran 2020 tarihinden itibaren 8 ay boyunca aynı noktada gerçekleştirilmiştir.

Çalışmamızın ikinci kısmında incelenen ölçüm noktaları Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi binasında bulunmaktadır. Fakülte binası 3

katlı olup, 21300 m²'lik bir alana oturmaktadır. Fakültede (11.11.2022 tarihi itibariyle) öğrenci işlerinden alınan rakamlara göre 4942 öğrenci öğretim görmektedir. Fen-Edebyat Fakültesi'ne ait GPS için koordinat bilgisi; enlem: 37°49′49,7604′′ kuzey paraleli ve boylam: 30°31′57,8784′′ doğu meridyenidir (Şekil 3.1). Fakültesinin genel önden görünümü Şekil 3.3'te sunulmaktadır.



Şekil 3.3. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi

Yeni nesil teknolojilerle geliştirilen web-kontrollü online radon ölçüm ağında kullanılan donanım ve yazılım izleyen bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Fen-Edebiyat Fakültesinde radon ölçümlerinin yapılabilmesi için alınan çalışma izin belgesi EK A'da verilmiştir.

## 3.2. Kullanılan Ekipman ve Yazılımların Tanıtımı

### 3.2.1. Donanımsal bileşenler

Tasarlanan online kablosuz radon ölçüm sisteminde donanım bileşenleri olarak Raspberry Pi 3B, Wave radon dedektörü, modem, ana bilgisayar, mikro SD kart, güç adaptörü, SBC muhafaza kutusu ve internet kullanılmıştır. Bu sistemin en önemli parçaları radon dedektörü ve mini bilgisayar olan Raspberry Pi 3B'dir.

#### 3.2.1.1. Wave radon dedektörü

Bu çalışmada, atmosferik bina içi radon konsantrasyonlarını saatlik olarak veren bir dedektör seçilmiştir. Bu cihaz ticari olarak temin edilebilen uygun maliyetli bir elektronik ölçüm dedektörüdür (Şekil 3.4). Wave radon dedektörü; ölçüm

kapasitesi, çalışma sıcaklık ve nem aralıkları bakımından bina içi radon radon konsantrasyonu ölçümleri için uygundur. Bu portatif dedektörün bazı teknik özellikleri Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.




Şekil 3.4. Wave radon dedektörü (Airthings, Norveç)

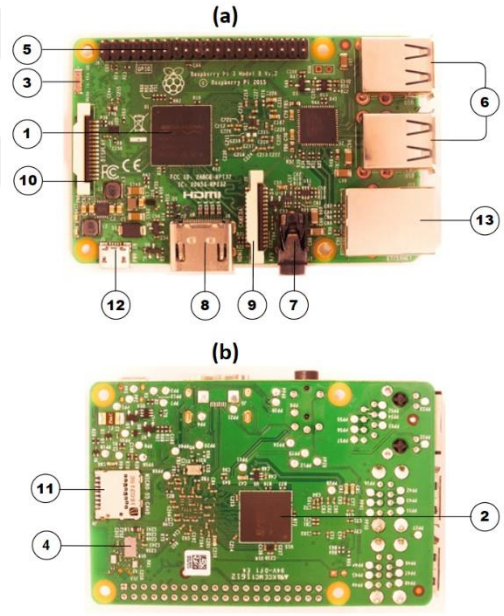
Çizelge 3.1. Dedektörün temel özellikleri (Airthings; Wave Radon, 2022)

| **Ölçüm Özellikleri** | **Radon, Sıcaklık & Nem** |
|---|---|
| Dedeksiyon Yöntemi | Alfa Spektrometresi |
| Radon Örneklemesi | Pasif difüzyon odası |
| Ölçüm Kapasitesi | 0-20.000 Bq/m$^3$ |
| Ölçüm Hassaslığı | 1 Haftadan sonra <%10 @200 Bq/m$^3$<br>2 Aydan sonra <%5 @200 Bq/m$^3$ |
| **Genel Özellikler** | |
| Operasyonel Limitler | 4-40 °C & % 0-100 Nem |
| Bağlantı | Kablosuz (Bluetooth) |
| Güç | 2 AA batarya (18 Ay) |
| Ağırlık | 216 g (batarya ile) |
| Boyutlar | 12cm (çap), 3,6cm (yükseklik) |

### 3.2.1.2. Raspberry Pi 3B

Ölçülen veriler, Wave radon dedektöründen Bluetooth iletişim protokolü ile bir Raspberry Pi 3B (SBC)'ye aktarılmıştır. Raspberry Pi 3B, tek kartlı bir bilgisayar sistemidir.

SBC (Raspberry Pi 3 Model B) kartında genellikle bir işlemci, RAM, güç giriş jakı, ağ bağlantısı için bir ethernet bağlantı noktası ve USB bağlantı noktaları bulunur (Dow, 2018). Radon takip sistemi için Raspberry Pi 3B (Raspberry Pi Vakfı; Raspberry Pi 3B, 2018) modeli seçilmiştir. SBC, internet bağlantısı için bir Wi-Fi aracına ve farklı cihazlarla iletişim kurmak için bir Bluetooth aracına da sahiptir. SBC'nin çalışması için bir işletim sistemine ihtiyacı vardır. Bundan dolayı Raspberry Pi 3B'ye, daha önce bir bilgisayardan win32disk görüntüleyici aracılığıyla Raspbian işletim sisteminin (Raspberry Pi Vakfı; Raspbian OS, 2018) yüklendiği bir mikro SD kart yerleştirilmiştir. Daha sonra Python'da geliştirilen kod çalıştırılarak IoT kart kurulumu tamamlanmıştır (Python Yazılım Vakfı; Python, 2022). Bu çalışmada kullanılan SBC'nin önden ve arkadan görünümleri Şekil 3.5'te gösterilmiş ve bileşenleri Çizelge 3.2'de listelenmiştir.




Şekil 3.5. Sistemde kullanılan SBC'nin önden (a) ve arkadan (b) görünüşü

SBC'nin teknik özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. SBC'nin teknik özellikleri (Raspberry Pi Vakfı; Raspberry Pi 3B, 2022)

| Kod | Tanım |
|---|---|
| 1 | Broadcom BCM2837 64bit ARMv8 dört çekirdekli işlemci (1.2 GHz) |
| 2 | 1 GB RAM |
| 3 | BCM43143 Dâhili Wi-Fi |
| 4 | Bluetooth (BLE) |
| 5 | 40 pinli genişletilmiş GPIO |
| 6 | 4 adet USB2.0 bağlantı noktaları |
| 7 | 4 kutuplu Stereo çıkış ve kompozit video bağlantı noktası |
| 8 | Full HDMI |
| 9 | CSI kamera bağlantı noktası |
| 10 | DSI ekran bağlantı noktası |
| 11 | Mikro SD bağlantı noktası |
| 12 | Mikro USB güç girişi (2,4 Ampere kadar) |
| 13 | 10/100 LAN bağlantı noktası |

### 3.2.1.3. SD kart

Raspberry Pi, işletim sisteminin başlayabilmesi ilk olarak için SD karta ihtiyaç duymaktadır. SD kartlar hızlarına göre 5 kısımda ve depolama türleri olarak 3 kısımda incelenmektedir. Hız sınıfları 5 ayrı kategoriye ayrılmaktadır, bunlar; Class 2, Class 4, Class 8, Class 10 ve UHS-1'dir. Depolama çeşitleri bakımından ise; SD, SDHC (Secure Digital High Capacity) ve SDXC'dir (Secure Digital Extended Capacity). SD kartlar 512 MB ile 4 GB arasında veri depolayabilirken, SDHC'ler 4GB ile 32 GB ve SDXC'ler ise 32 GB ile 2 TB aralığında veri depolayabilmektedir (Kurniawan, 2016). Çizelge 3.3'te SD kartların yapısı, türleri ve hızları hakkında bilgiler verilmektedir.

Çizelge 3.3. SD kartların yapısı, türleri ve hızları

| | | Marka | Minimum Seri Verisi | Veri Yolu Modu | Uygulama |
|---|---|---|---|---|---|
| UHS Sınıfı | Hız | 3 | 30 MB/s | UHS-2 | 4K2K Video Kaydı |
| | | 1 | 10 MB/s | UHS-1 | Full HD Video Kaydı |
| Hız Sınıfı | | Class10 | 10 MB/s | Yüksek Hızlı | HD Hareketsiz görüntü Sürekli Çekim |
| | | Class6 | 6 MB/s | Normal Hızlı | HD ve Full HD Video Kaydı |
| | | Class4 | 4 MB/s | | |
| | | Class2 | 2 MB/s | | Standart Video Kaydı |

#### 3.2.1.4. Modem

SBC'de toplanan veriler, modem aracılığıyla internet alanına aktarılmıştır. Bu amaçla Tp-Link AC1200 Kablosuz VDSL/ADSL Modem Yönlendirici (TP-LINK Technologies Co., Ltd., 2022) kullanılmıştır. Raspberry Pi 3B ile modem arasındaki iletişim, Wi-Fi protokolü üzerinden sağlanmıştır.

### 3.2.2. Yazılımsal bileşenler

Tasarlanan IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi ve web-kontrollü online radon takip ağı için IoT kartı olarak Raspberry Pi 3B kullanılmıştır. Bu IoT kartına yazılım dili Raspbian ve Python kurulmuştur. Raspberry Pi 3B'nin içerisinde bulunan SD karta işletim sistemi kurulmuştur (Raspberry Pi İmaj Yöneticisi). Daha sonra Python'da yazılan kod sayesinde, cihazdan alınan radon ölçümleri (zaman ve yer bilgileriyle birlikte), internet ortamına (blok alanda depolama yapılacak biçimde) aktarılmıştır. Buradaki verilerin hangi zaman aralıklarında veri tabanına aktarıldığı, Raspberry Pi 3B'yi programlamak için yazılan kodlarla belirlenmiştir.

IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminde, IoT platformu için ThingSpeak kullanılmıştır. Web-kontrollü online radon takip ağı için de web-kontrol programı kullanılmıştır. Kontrol programı için ilk olarak Visual Studio programı kullanılarak, bu program içerisinde C# tabanında "ASP.NET" MVC5 (Model, View, Controller) ile web yazılımı sağlanmıştır. Burada "ASP.NET MVC5" olarak adlandırılan web yazılımına aynı zamanda Back End (Arka tarafta çalışan kodlar bütünü) denilmektedir. ASP kısmı, Microsoft'un tarayıcı tarafından okunabilir HTML sayfaları oluşturmak için sunucu taraflı işlemeyi kullanan ilk web uygulaması çerçevesi olan "Aktif Sunucu Sayfaları" (Active Server Pages) anlamına gelir. MVC (Model, View, Controller) kodları model, görünüm ve denetleyici olmak üzere üç bölüme ayırır. Model, görüntülenen verilerdir. Görünüm (View), verilerin kullanıcıya nasıl gösterildiğidir. Denetleyici (Controller), uygun modelin doğru görünüme sunulmasını sağlama işini yapan aracıdır.

İkinci olarak web-kontrolünde görsel programlar için HTML, CSS (Cascading Style Sheets; Basamaklı Stil Şablonları ya da Basamaklı Biçim Sayfaları), bootstrap ve javascript programları kullanılmıştır. Bu programlar web tasarım sağlayan (Front End) yazılımlardır. Hypertext Transfer Protocol (HTTP), İnternet içindeki iletişim için temel görevi gören uygulama protokolüdür. İstemci makine ile sunucu arasındaki etkileşimi, istemci makinenin belirli bir kaynağı talep ettiği veya talep ettiği ve sunucunun uygun şekilde bilgi ile yanıt verdiği veya hakkında bir yanıt gönderdiği bir istek-yanıt modelini takip ederek tanımlanır. CSS, tarayıcıya, web sayfasının görünümünün nasıl şekillendirileceğine ilişkin talimatlar verir. Yazı tipleri, renkler, arka plan resimleri, satır aralığı, sayfa düzeni vb. CSS ile kontrol edilir. CSS spesifikasyonu ayrıca belgelerin bir tarayıcı dışında, ekran okuyucu tarafından yüksek sesle okunması veya yazdırılması gibi bağlamlarda nasıl sunulacağını kontrol etmek için yöntemler sağlar. Bootstrap, web sayfaları uygulamalarında kullanılabilecek, HTML ve CSS tabanlı tasarım şablonlarını içerir. Programda kullanılacak olan açık kaynaklı kütüphanelerin indirildiği yer burasıdır. JavaScript, tarayıcının kullanıcıya etkileşimde bulunması, tarayıcının kontrol edilmesi, senkron bir şekilde sunucu ile iletişime geçilmesi ve web sayfası içeriğinin değiştirilmesi gibi işlevleri sağlar.

Üçüncü olarak, grafiklere veri aktarılmasını sağlayan jquery ve Ajax (Back End) programlarıdır. Bu programlar kullanılarak cihazdan alınan veriler grafik alanına yazılmaktadır. Dördüncü olarak Web API programı kullanılmıştır. Web API, ASP.NET MVC'ye dayalı RESTful web hizmetleri geliştirmeye yönelik bir yaklaşımdır. Burada kullanılan programlar, Wave radon dedektöründen alınan verilerin çekilerek web programına aktarılmasını sağlayan aracı görevindedir. Yani iki cihazın haberleşmesini sağlamaktadır. Beşincisi ise veritabanına gelen bilgileri kullanarak web sayfalarının oluşumu Mssqlserver ile sağlanmaktadır. Microsoft SQL server, Microsoft tarafından geliştirilen veritabanı yönetim sistemidir. Yazılım uygulamalarının talep ettiği verileri internet üzerinden uzaktan veya yerel olarak saklanılmasına imkân tanır. Geliştirilen web-kontrol programının sanal ortamda yayınlanabilmesi için bir alan (hosting) ve alan adı (domain) gerekmektedir.

Geliştirilen kontrol programını yayınlamak için gerekli olan sanal araziye "hosting" adı verilir. İngilizce bir terim olan hosting, dilimize "web barındırma alanı" ya da "barındırma alanı" olarak çevrilebilir. Google Chrome, Opera, Internet Explorer gibi tarayıcılar kullanılarak "adres çubuğu" kısmına yazılan, "http" ya da "https" ile başlayan ve ".com", ".me" gibi bir uzantıyla biten site adresine ise "domain" veya dilimizdeki ifadesi ile "alan adı" denmektedir. Geliştirilen kontrol programına "me" uzantılı domain alınarak www.irl32.me adresinden erişim sağlanmıştır. Kontrol Programında kullanılan yazılımlar izleyen bölümde tek tek anlatılmaktadır.

#### 3.2.2.1. Python

Python programlama dili 1980'lerin sonuna doğru geliştirilmeye başlanmıştır. Daha sonra ilk uygulaması Guido van Rossum tarafından 1989 Aralık ayında gerçekleştirilmiştir. Van Rossum, ''Python'' adını 1970 dönemindeki çok sevilen televizyon komedi serisi ''Monty Python's Flyin' Circus''tan esinlenmiştir. Python 2.0, 16 Ekim 2000 tarihinde Unicode desteği ve döngüsel çöp toplama sistemiyle beraber kullanıma sunulmuştur.

Bu serinin son sürümü 2.7'dir. Ptyhon 3.0, 3 Aralık 2008 tarihinde piyasaya sürülmüştür. 28 Haziran 2018 tarihinde bu serinin son sürümü 3.7.0 piyasaya sürülmüş olup halen günümüzde de kullanılmaktadır (Aksoy, 2019). Gerekli program yüklenerek oluşturulan mini bilgisayar üzerine python programı kurulup, radon dedektörü ile mini bilgisayar birbirlerine bluetooth üzerinden bağlanarak gerekli python kodları yazıldıktan sonra online radon takip sisteminin veri akışı sağlanmış olacaktır. Raspberry Pi 3B'nin VNC programı ile Wi-Fi üzerinden kablosuz bir şekilde kontrolü sağlanmaktadır (Chou, 2017).

IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi ve web-kontrollü online radon takip ağı için SBC içerisine python'da yazılan kodlar ile makineden makineye (Wave ve SBC) iletişim kurularak Wave'den okunan değerlerin internet alanına aktarılması sağlanmıştır.

#### 3.2.2.2 Raspbian

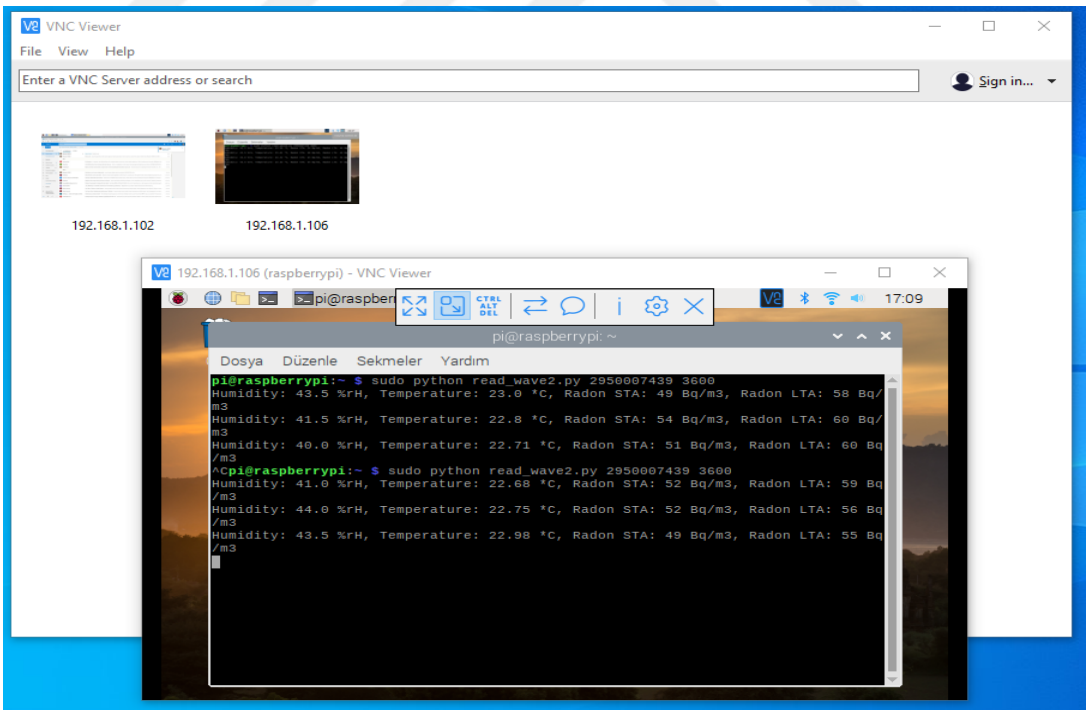
Raspbian, SBC (Raspberry Pi) donanımı için optimize edilmiş işletim sistemidir. Raspbian OS, Mike Thompson ve Peter Green tarafından başlatılan açık kaynaklı bir işletim sistemidir. Raspbian işletim sistemine şirketin resmi sayfasından erişilmektedir (Kurniawan, 2016; 2017; 2019).

Raspberry Pi, GNU/Linux işletim sistemleriyle uyumlu çalışacak şekilde dizayn edilmiştir. Kullanım için minimum 4 GB boyutlu bir mikro SD karta gerek duyulmaktadır. SBC (Raspberry Pi) için özel olarak hazırlanan ve Debian sürümü olan Raspbian, tercih edilen en popüler işletim sistemidir (Kurniawan, 2016; 2017; 2019). Raspbian kurulumu için Raspberry Pi'nin internet sitesine bağlanılır. Raspbian'ı indirdikten sonra SD karta yazılması için gerekli olan Win32DiskImager programı indirilir, daha sonra Win32DiskImager-0.9.5-binary.zip uzantılı dosyalar açılır (Win32 Disk Imager, 2019). Mikro SD kart bilgisayara takılıp Win32DiskImager.exe programı çalıştırılır. Daha sonra zip'ten çıkartılan Raspbian görüntü dosyası seçilir. Seçilen dosyadan ve yazmak istenilen sürücü harfinin doğruluğundan emin olduktan sonra Write'a tıklayarak yazdırma işlemi başlatılır. İşlem tamamlandığında program "Write Succesful" şeklinde işletim sisteminin yüklendiğini söyleyen mesajı göndermektedir. Bu kısımda mikro SD kart bilgisayardan çıkarılıp SBC'ye takılır. SD kart SBC'ye takıldıktan sonra ilk başlatma için, SBC'ye klavye-fare seti USB portu yardımıyla bağlanıp HDMI bağlantı noktası ile de bir harici ekrana veya harici ekran özellikli televizyona bağlantı yapılır. Mikro USB güç noktasından orijinal adaptörü bağlanıldığında Raspberry Pi 3B açılacaktır. Raspbian'ın 2019 sürümü doğrudan masaüstüne açılmaktadır (Kurniawan, 2016; 2017; 2019). İşletim sistemi Raspberry Pi 3B'ye kurulduktan sonra HDMI kablosu ile monitör bağlantısı yapılıp internet ve Wi-Fi ayarları yapılarak SBC çalıştırılmıştır.

#### 3.2.2.3. VNC

VNC (Virtual Network Computing-Sanal Ağ Sistemi), bir ağ sunucusu üzerinde çalışan grafik arabirimi; uygulamalara, başka bir ağ üzerindeki bilgisayardan

erişerek bu uygulamaların kullanılabilmesini ve yönetilebilmesini sağlamaktadır. Uzaktaki bir bilgisayara VNC sunucusu ve bağlanacak olan bilgisayara VNC programı kurulur. Böylelikle, VNC programı ile bilgisayarların bağlantısı ağ üzeriden sağlanır. VNC programı, masaüstü ve pencere ekranlarını görüntü akışı şeklinde VNC istemcisine göndermektedir. VNC programı video oynatıcı görevi alarak bu görüntüleri göstermektedir. PC'de bulunan VNC programı, uzak sunucuya bağlanıldığında kimlik doğrulama gerçekleşmektedir. Kimlik doğrulama işlemi tamamlandığında, kullanılacak olan masaüstü ve piksel biçimi isteği istemciden sunucuya bildirilmektedir. Etkileşim sonucunda bağlanılmak istenilen bilgisayarın masaüstü erişimi sağlanarak VNC programı ile sunucudan PC'ye dosya aktarımı gerçekleştirilebilir, sunucuda sabit diskten dosya ve veri arama yapılabilmektedir. Bu sayede iş istasyonu bilgisayara uzak masaüstü bağlantısı sağlanmış olmaktadır. Bu bilgisayara işlem yapılabilir ve yönetilebilir (Kurniawan, 2016; 2017; 2019). Şekil 3.6'da VNC ile uzaktan Raspberry Pi 3B'nin kontrolü görülmektedir. VNC ile ilgili detaylar EK B'de verilmiştir.




Şekil 3.6. VNC ile uzaktan SBC'nin kontrolü

IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi için IoT platformu olarak ThingSpeak kişisel yayın kanalı kullanılmıştır. Bu program, ücretsiz ve hazır yazılım olmasından

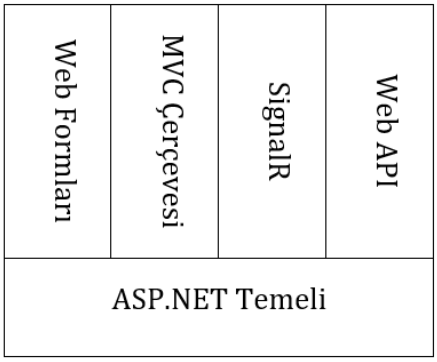
dolayı çalışmanın birinci basamağını oluşturmaktadır. ThingSpeak yazılımı ile ilgili bilgi izleyen bölümde anlatılmaktadır. Web-kontrollü online radon takip ağı sistemi için de C# dilinde bazı programlar kullanılmış ve izleyen bölümde bu programların hangi amaçlar için kullanıldığı anlatılmaktadır.

#### 3.2.2.4. ThingSpeak

ThingSpeak, buluttaki canlı veri akışının toplanması, görselleştirilmesi ve analiz edilmesine olanak tanıyan bir IoT analitik platform hizmetidir. ThingSpeak ile IoT cihazları tarafından ThingSpeak'e gönderilen verilerin anında görselleştirilmesi sağlanır (ThingSpeak IoT Platformu, 2022). Ön çalışmanın yapıldığı IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminde ThingSpeak programı ücretsiz olduğu için kullanılmıştır. Bu program üzerinden 8 ay boyunca veri elde edilmiştir.

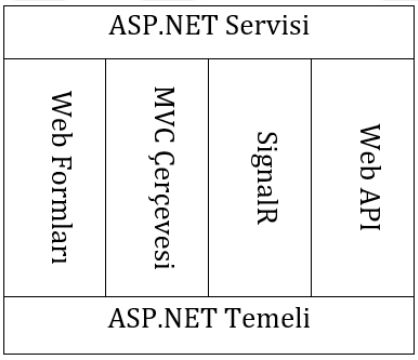
#### 3.2.2.5. ASP.NET ve MVC5

ASP.NET platformu orijinal olarak Web Formları ile kullanılmak üzere geliştirilmiş olup MVC çerçevesi daha sonra eklenmiştir. ASP.NET platformu zengin ve kullanışlı özelliklerle doludur. ASP.NET, orijinal olarak web uygulaması geliştirme deneyimini mümkün olduğunca geleneksel bir masaüstü uygulaması geliştirmeye benzer hale getirmeyi ve HTML ve HTTP ayrıntılarını soyutlamayı amaçlayan Web Formları ile eşanlamlıdır. Web geliştirme dünyasında güncel kalmak için Microsoft, ASP.NET'i MVC çerçevesini ve daha yakın zamanda SignalR ve Web API'sini içerecek şekilde genişletmiştir. Örneğin, HTTP isteklerini alma ve işleme ihtiyacı gibi ASP.NET genelinde ortak olan özellikler, Şekil 3.7'de gösterilen teknoloji yığınıyla sonuçlanan ortak bir temelde uygulanır (Freeman, 2014).



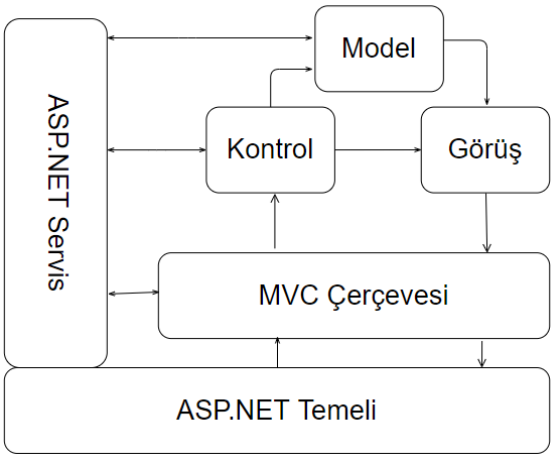

Şekil 3.7. ASP.NET temeli

Şekil 3.7'de, Web Formları tek ASP.NET teknolojisi olduğunda alınan bazı tasarım kararlarının hala ASP.NET temelinde mevcut olduğunu göstermektedir. Çoğunlukla, bu sadece temel API'de bazı yöntem adları olduğu anlamına gelir. ASP.NET platformu yalnızca ASP.NET teknoloji yığınına ortak özellikler sağlamaz; aynı zamanda Şekil 3.8'de gösterildiği gibi güvenlik, durum verileri ve önbelleğe alma gibi web uygulamalarının yazılmasını kolaylaştıran bir dizi hizmet sağlamaktadır (Freeman, 2014).




Şekil 3.8. ASP.NET hizmetleri

ASP.NET platformu, temel ve hizmetlerin birleşimidir ve MVC çerçeve uygulamalarında ASP.NET platformunun kullanılması, Şekil 3.9'da gösterildiği gibidir (Freeman, 2014).




Şekil 3.9. ASP.NET platformu ile MVC çerçevesi arasındaki ilişki

Geliştirilen online radon ölçüm sistemindeki kontrol programında "ASP.NET MVC5" olarak isimlendirilen Windows destekli yazılım, tüm kodların bir arada çalışmasını sağlayan kodlar bütününü oluşturmaktadır. D1'den D12'ye kadar olan tüm dedektör kodlarının bir araya getirilmesi bu program sayesinde gerçekleşmiştir. Aynı zamanda mail adresinin yazıldığı yeri sağlayan ve mail şifresi girildikten sonra kontrol paneline geçişini sağlayan yazılımdır.

ASP.NET'in yazılımının gerçekleştirilmesi için bazı programlar mevcut olup proje ücretsiz uygulama olan Visual Studio 2019 seçilmiştir. Visual Studio 2019'un kurulum detayları ve www.irl32.me'nin nasıl aktif edildiği sayfa 63'te detaylandırılmıştır.

### 3.2.2.6. HTML5, CSS, Bootstrap ve Javascript

HTML5, web sayfaları (masaüstü, tablet ve mobil sürümler için) oluşturmak için kullanılan komut dosyası dilidir. CSS, web sayfalarını süslemek için kullanılan basamaklı stil sayfasıdır. Stiller "{}", HTML5 öğelerine, satır içi stil veya ID/CSS seçiciler kullanılarak uygulanmaktadır. Bootstrap, sınıflara ve simgelere sahip, tasarıma duyarlı web sayfaları için bir CSS kitaplığıdır.

Javascript, HTML sayfalarına işlevsellik (olayları kullanma, işlevler oluşturma, API kullanarak sunucu tarafı bileşenleriyle iletişim) sağlamak için kullanılan nesne yönelimli bir betik dilidir (Deitel ve Deitel, 2008).

HTML, CSS, Bootstrap ve Javascript (Front–End) kontrol sisteminde web tasarımı amacıyla kullanılmıştır. D1'den D12'ye kadar dedektör resimlerinin bulunduğu kontrol panelinin boyutunun ve görüntüsünün sağlandığı yazılımlar ASP.NET MVC5, HTML5, CSS ve JavaScript'dir.

Aynı zamanda tüm dedektörlerin yuvarlak, etrafında kare biçiminde çerçevenin oluşturulması ve radonun belirlenen limit değerlere göre renk değişimlerini (yeşil, sarı ve kırmızı) sağlayan yazılım ASP.NET MVC5'dir.

Grafik alanların boyutlarının ve renginin belirlenmesini sağlayan ve aynı zamanda grafik üzerine gelindiğinde kutucuk içerisinde tarih, saat, radon, nem ve sıcaklık bilgisinin olduğu yazılımlardan bir tanesi Javascript'tir. Grafik alanlarının sağ üst tarafında 3 çizgi ile belirlenen yere fare ile tıklandığında çıktıları resim, pdf ve excel olarak almamızı sağlayan yazılımlardan bir tanesi de Javascript'tir.

#### 3.2.2.7. Jquery ve Ajax

Ajax, sunucuya eşzamansız çağrılar yapmak için bir web geliştirme tekniğidir. Jquery, bazı web geliştirme görevlerini tasarlamak ve kolaylaştırmak için kullanılan bir JavaScript kitaplığıdır. Jquery, javascript'i tarayıcının dışında çalıştırmayı mümkün kılar. Javascript, tarayıcıda veya tarayıcının dışında da çalışır (Deitel ve Deitel, 2008).

Geliştirilen kontrol programında Jquery ve Ajax "Back End" için kullanılmıştır. Dedektörlerin üzerine fare ile tıklandığında grafik alanına götüren yazılım jquery'dir. Grafik alanların boyutlarının ve renginin belirlenmesini sağlayan yazılımlardan bir tanesi jquery'dir. Aynı zamanda grafikler üzerine gelindiğinde kutucuk içerisinde tarih, saat, radon, nem ve sıcaklık bilgisinin gösterilmesini

sağlayan yazılımlardan bir tanesi jquery'dir. Çıktıların resim, pdf ve excel formatında alınmasını sağlayan yazılımlardan bir tanesi de Ajax'tır.

#### 3.2.2.8. ASP.NET Web API

ASP.NET Web API, Web, Windows, Mobile vb. gibi farklı platformlarda farklı uygulamalarda erişilebilen HTTP tabanlı hizmetler oluşturmak için genişletilebilir bir çerçevedir. ASP.NET MVC5 web uygulamasıyla aşağı yukarı aynı şekilde çalışır.

Bir web hizmeti veya WCF (Windows Communication Foundation) hizmeti olup, veriyi HTML görünümü yerine yanıt olarak gönderip, yalnızca HTTP protokolünü desteklemektedir (Deitel ve Deitel, 2008).

Geliştirilen yazılımda, Web API (Back-End) (aracı) olarak kullanılmıştır. Burada kullanılan programlar, Wave radon dedektöründen aldığı verileri çekerek web programına aktarılmasını sağlayan aracı görevindedir. Yani iki cihazın haberleşmesini sağlamıştır.

#### 3.2.2.9. Visual studio ve C#

Visual Studio Code C#, 2015'ten beri Microsoft tarafından sağlanan ücretsiz, açık kaynaklı, güçlü ve popüler bir kaynak kodu düzenleyicisidir. Windows, macOS ve Linux'ta kullanılabilmektedir (Deitel ve Deitel, 2008). Geliştirilen kontrol programı Visual Studio programında C# tabanlı olarak ASP.NET MVC5 Core-3 olarak inşa edilmiştir.

#### 3.2.2.10. MSSQL

Bir veritabanı yönetim sistemi (DBMS: Database Management System), verilerin depolanması, düzenlenmesi, geri alınması ve değiştirilmesi için mekanizmalar sağlar. Veritabanı, verileri toplayan bir organizasyondur. Veri tabanı yönetim sistemleri, verilerin depolanmasını ve verilere erişimi sağlar. Günümüzün en

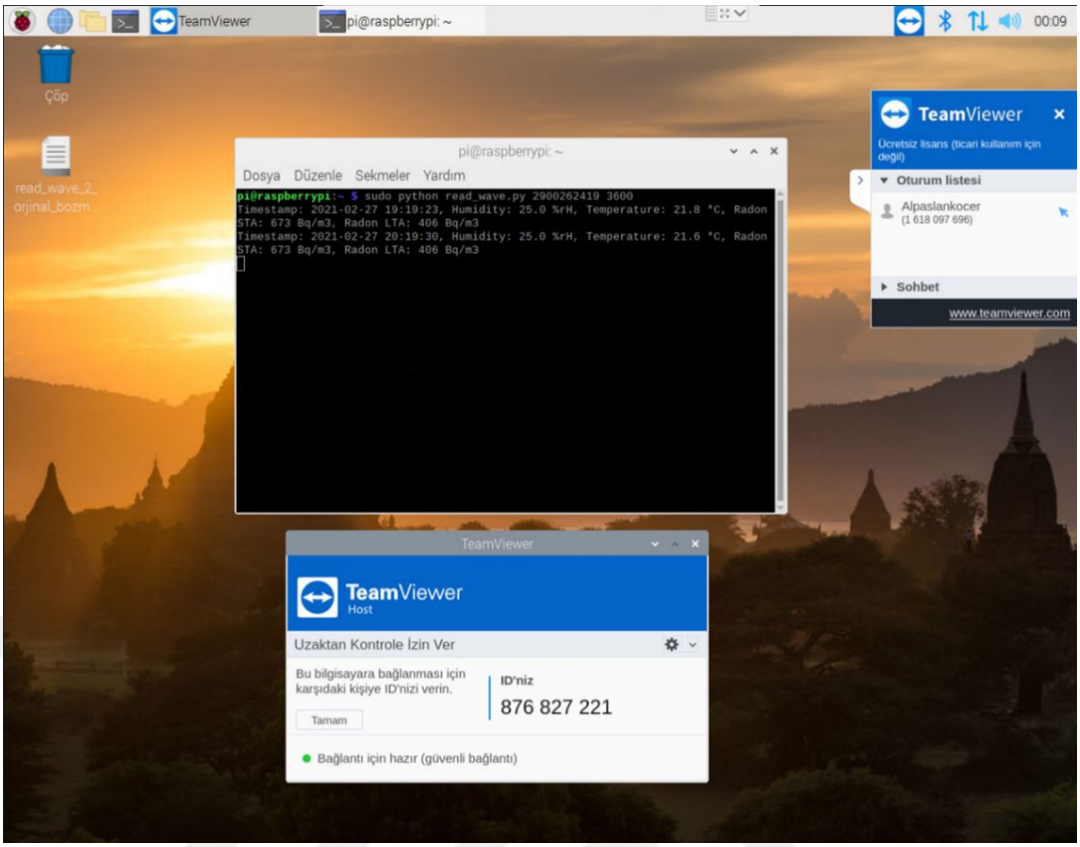
popüler veritabanı sistemleri, verilerin fiziksel yapısı dikkate alınmadan depolandığı veri tabanlarıdır. SQL; “eskuel” olarak telaffuz edilen bir dil olup, sorguları gerçekleştirmek (yani, belirli kriterleri karşılayan bilgileri talep etmek) ve verileri işlemek için neredeyse evrensel olarak ilişkisel veri tabanlarıyla kullanılan uluslararası standart bir dildir. Java gibi programlar, veritabanları ile etkileşim kurmak için JDBC (Java Database Connectivity) arayüzünü kullanabilir. Benzer şekilde, ASP.NET programcıları da veritabanlarıyla iletişim kurar ve verilerini ADO.NET (Microsoft'un veriye erişme teknolojisinin adı olup ActiveX teknolojisi ile geliştirilmiştir) tarafından sağlanan arabirim aracılığıyla yönetir. Bu veritabanı, bilgi almak ve verileri işlemek için SQL'in nasıl kullanılacağı da dâhil olmak üzere çeşitli veritabanı konseptlerini tanıtmak için kullanılmaktadır (Deitel ve Deitel, 2008).

Geliştirilen web-kontrollü online radon takip sisteminde tüm radon, nem ve sıcaklık verileri MSSQL tabanında resim (jpeg, png), pdf ve excel formatlarında depolanmıştır.

#### 3.2.2.11. TeamViewer

TeamViewer, Windows, macOS, Android ve iOS dahil olmak üzere hemen hemen her masaüstü ve mobil platformla çalışan kapsamlı bir uzaktan erişim, uzaktan kontrol ve uzaktan destek çözümüdür. TeamViewer, dünyanın herhangi bir yerinde bulunan bilgisayarlara veya mobil cihazlara uzaktan bağlanmaya ve onları oradaymış gibi kullanmaya olanak tanımaktadır (TeamViewer uzaktan yönetim, 2022).

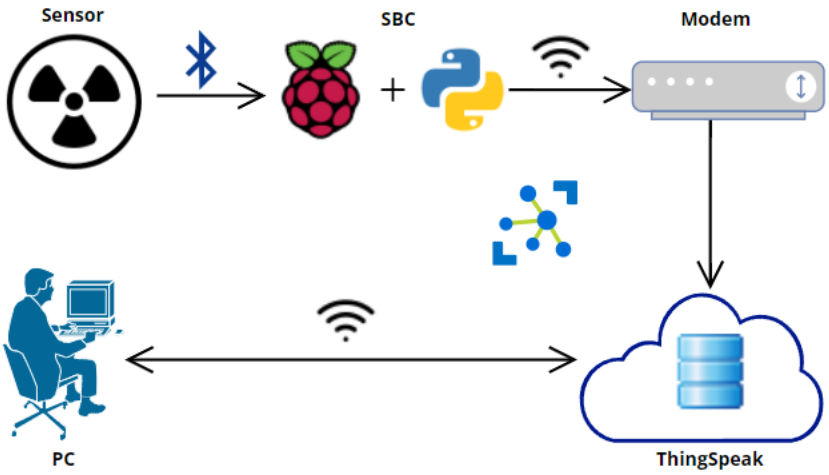
Bu program ile web-kontrollü online radon takip ağı sistemine uzaktan erişim sağlanmıştır. Her bir SBC’ye TeamViewer Host kurularak ID (kimlik numarası) belirlenmiş ve ana yöneticiye kontrol yetkisi verilmiştir. Dedektörlerden gelen verilerde kesinti olduğunda TeamViewer ID numaraları girilerek ilgili dedektörün tekrar çalıştırılması sağlanmıştır (Şekil 3.10).




Şekil 3.10. TeamViewer ile SBC'nin uzaktan kontrolü

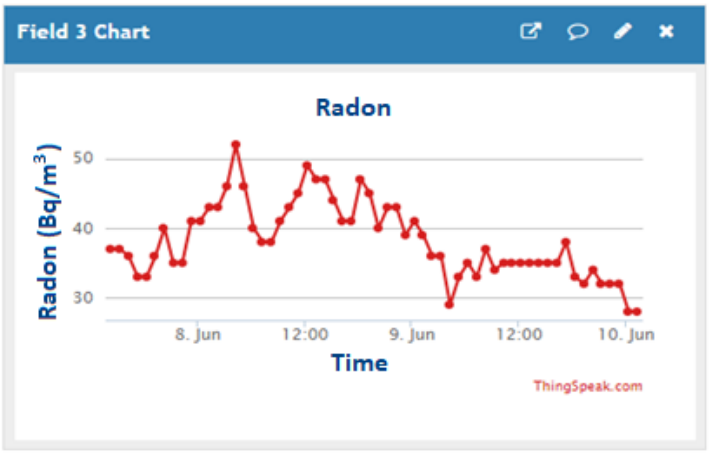
### 3.3. IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sistemi Mimarisi

Önerilen sistemde radon, nem, sıcaklık ölçümlerinin nasıl yapıldığı ve veri işleme aşamaları şu şekilde özetlenebilir. Sensör (Wave radon dedektörü) saatte bir kez bina içi radon, sıcaklık ve nem seviyelerini ölçmüştür. Dedektörün okumaları Bluetooth bağlantısı aracılığıyla SBC (Raspberry Pi 3B) tarafından alınmıştır. Daha sonra radon ve diğer parametreler (sıcaklık ve nem) modem kullanılarak buluttaki veri tabanına (ThingSpeak kanalı) gönderilerek veri toplama aşamasına geçilmiştir. Modem, bir Wi-Fi bağlantısı üzerinden SBC ile iletişim kurmuştur. Sensör verilerini alma, aktarma ve saklama adımları, Python dilinde yazılmış kod kullanılarak SBC tarafından çalıştırılmıştır. ThingSpeak web sunucusunun yardımıyla, internete bağlı bir cihaz (PC, tablet veya cep telefonu) kullanarak zaman etiketli verileri yayınlayabilir, işleyebilir veya alabilir. IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin mimarisi Şekil 3.11'de sunulmaktadır.




Şekil 3.11. IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin mimarisi

Şekil 3.11'de verilen IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin mimarisi ile atmosferik radon konsantrasyonu ölçümlerinde, verilerin ilk değerlendirilmesi için ThingSpeak aracılığıyla görsel bir inceleme kullanılmıştır. Bu işlem, herhangi bir ölçüm periyodu için önerilen sistem kullanılarak kolaylıkla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11'de verilen IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin çalışma mimarisi ile ThingSpeak üzerinden 8 ile 10 Haziran 2020 tarihleri arasında kaydedilen radon ölçümleri grafiksel olarak Şekil 3.12'deki gibi elde edilmiştir.




Şekil 3.12. ThingSpeak aracılığıyla saatlik radon değişiminin görsel incelemesi

Şekil 3.12'deki sistemde dedektörden alınan verilerin online sisteme nasıl aktarıldığı ve bu verilerin sonuçlarının hangi formatta alındığı EK B'de adımlar halinde anlatılmaktadır.

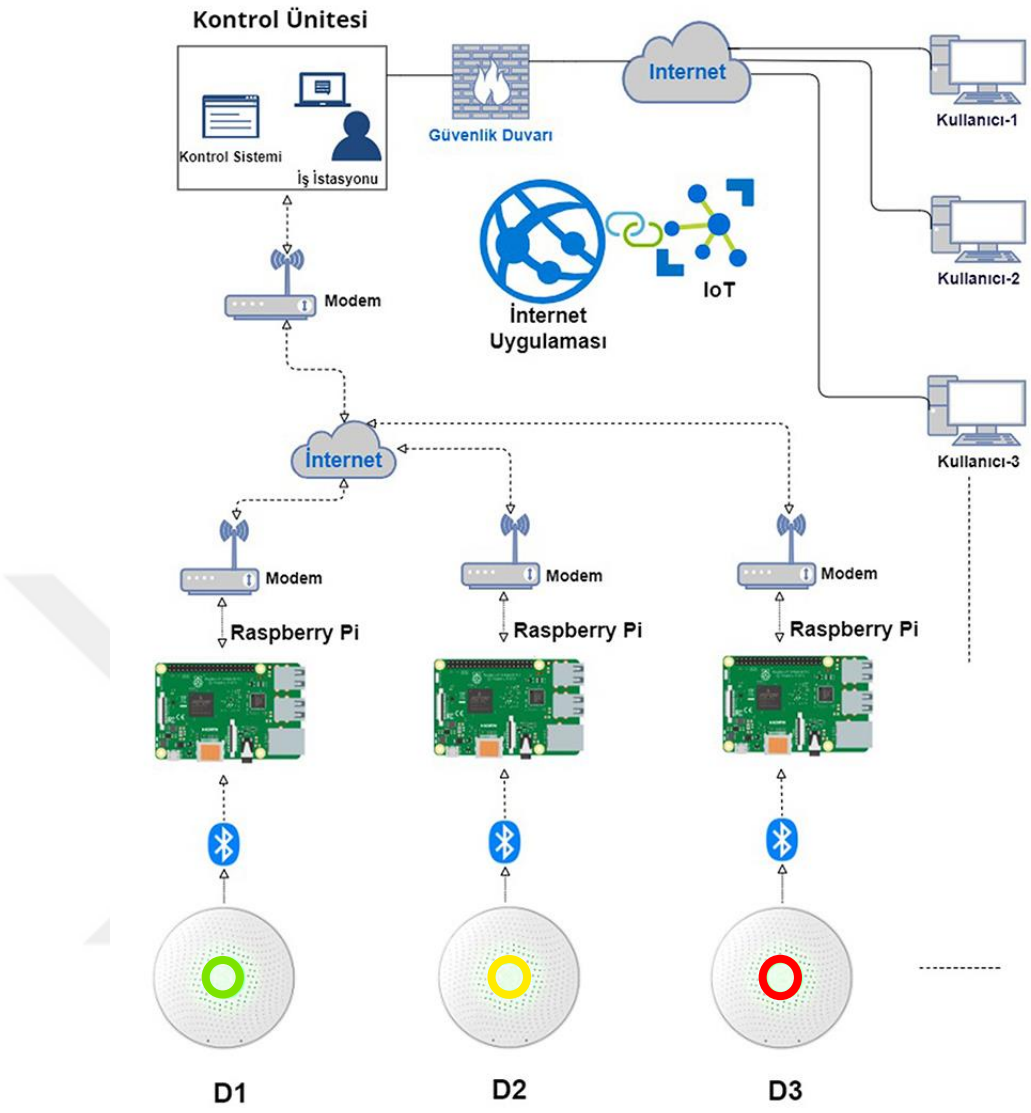
### 3.4. Web-Kontrollü Online Radon Takip Ağı Mimarisi

Bölüm 3.3'te anlatılan IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminde kullanılan tüm donanımlar web-kontrollü online radon takip ağında da kullanılmıştır. Bir önceki bölümde yapılan ölçüm sisteminden farklı olarak web-kontrol programı kullanılmıştır.

Tasarımı gerçekleştirilen web-kontrollü online radon takip ağı "nesnelerin interneti" kavramına örnek teşkil etmektedir. Visual Paradigm Online Diagrams programı kullanılarak çizilen web-kontrollü online radon takip ağı sisteminin çalışma mimarisi Şekil 3.13'te gösterilmektedir.

Ölçümleri yapılan D1, D2…D12 noktalarının radon miktarına, nem ve sıcaklık değerlerine internet ortamında kontrol ünitesi aracılığıyla ulaşılmıştır (Şekil 3.13). Online radon ölçümünü yapan kontrol ünitesinde iş istasyonu bulunmaktadır. Buradaki merkezde D1, D2 ve D3 ortam ölçümleri, kontrol ünitesindeki yetkilendirmeye bağlı olarak kullanıcılar (Kullanıcı-1, Kullanıcı-2 ve Kullanıcı-3 gibi) tarafından da online olarak takip edilmiştir.

Şekil 3.13'te gösterilen web-kontrollü online radon takip ağı mimarisinde radon, nem ve sıcaklık değerleri internet üzerinden paylaşıldığı için kullanıcı-1, 2, 3 örnek olarak gösterilmiştir.




Şekil 3.13. Web-kontrollü online radon takip ağının çalışma mimarisi

Ölçüm yönteminde ise, radon dedektöründen Bluetooth bağlantısı ile Raspberry Pi 3B'ye aktarılan ölçüm verileri, Raspberry Pi 3B'den ethernet (yerel alan ağı teknolojisi) kablosuyla modeme aktarılmıştır. Buradan da internet alanına geçiş gerçekleşmiş ve bu durum kontrol ünitesinde online takip imkânı sağlamıştır (Şekil 3.13).

Bu noktada çekilen data üç farklı bilgi ile etiketlenmiştir: (i) data zamanı, (ii) datanın çekildiği yer ve (iii) dedektör kimliği. İlk özellik (i) bu datanın hangi zamanda hangi değerlere ulaştığını gösterirken, ikincisi (ii) ise dedektörün

yerleştirildiği yer bilgisini kayıt altına almış, üçüncüsü (iii) ile de dedektörün kimliği belirlenmiştir. Geliştirilen yeni radon ölçüm sistemi için patent başvurusu yapılmış ve EK C'de sunulmuştur.

Veri tabanında ortama ait sıcaklık, nem, radon bilgilerine ait veriler, tablolarda tutulmuştur. Veriler, internet tarayıcılarında grafik şeklinde görüntülenmiştir. Ortama ait her bilgi için (kısa-uzun dönem radon, nem ve sıcaklık) ayrı birer grafik bulunmaktadır. Online atmosferik radon ölçerin kutulanmış hali Şekil 3.14'te verilmektedir.




Şekil 3.14. Radon ölçerin kutulanmış hali

Şekil 3.14'teki sistemde dedektörden alınan verilerin online sisteme nasıl aktarıldığı ve bu verilerin sonuçlarının hangi formatta alındığı geliştirilen yazılımla yapılmıştır. İzleyen bölümde yazılım tanıtılmaktadır.

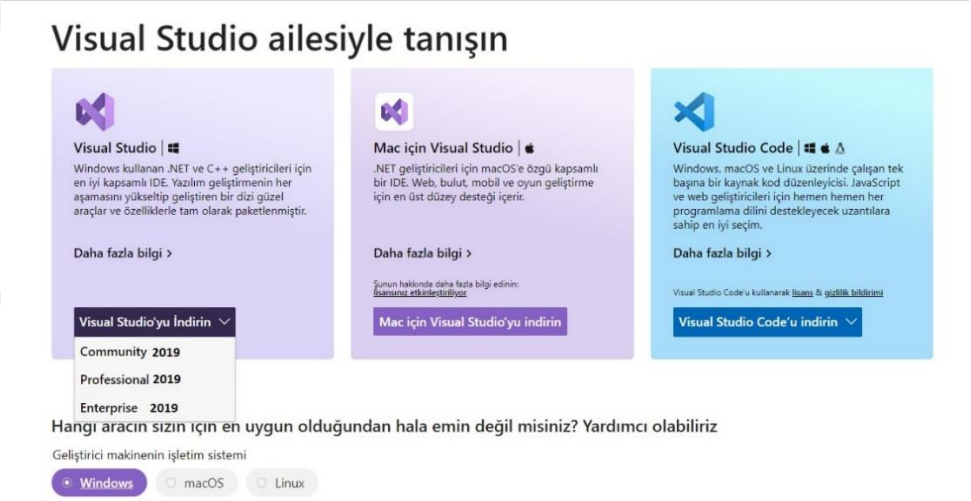
### 3.4.1. Visual studionun kurulumu

Visual Studio, popüler bir yazılım platformudur. Visual Studio IDE'nin (Integrated Development Environment) geliştiricilerine daha üretken hale getirmek için bir dizi araç ve özellik sunmaktadır. Bu program, farklı geliştirme platformlarında bulunan dilleri kullanarak web, mobil ve bulut uygulamaları yazmak için tasarlanmış çok güçlü bir kod odaklı geliştirme ortamıdır. Visual Studio Code ile

ayrı kod dosyalarıyla veya klasörlere dayalı yapılandırılmış dosya sistemleriyle çalışılabilmektedir (Strauss, 2020).

Bu çalışma yapıldığı sırada, Visual Studio 2019, Windows makineleri ve macOS makineleri için mevcut durumdaydı. Windows için Visual Studio 2019'u Microsoft Corparation şirketinin resmi adresinden indirilebilir (Microsoft Corporation-1, 2020). Eğer macOS kullanılıyorsa "mac" uzantılı adrese gidilmesi gerekmektedir (Microsoft Corporation-2, 2020).

Visual Studio İndir düğmesine tıklandığında, Şekil 3.15'te görüntülenen seçenekleri içeren bir menü listesi açıldığı görülebilir.




Şekil 3.15. Kullanılabilir visual studio sürümleri

Visual Studio 2019 sürümlerini karşılaştırmak istenirse ayrıntılı bir karşılaştırma yapmak için "compare" uzantılı adres incelenebilir (Microsoft Corporation-3, 2020). Visual Studio 2019 ücretsiz olarak kullanılmak isteniyorsa, Visual Studio Community 2019'u indirmek gerekmektedir. Visual Studio Community 2019, öğrencilere, açık kaynak kodlu ve bireysel geliştiricilere yöneliktir. Ücretli katmanlar, küçük ekipleri hedefleyen Visual Studio Professional 2019 ve büyük geliştirme ekiplerini hedefleyen Visual Studio Enterprise 2019'u içerir. Bilgisayara Visual Studio yüklemek için önerilen sistem gereksinimleri şu şekilde incelenebilir: Kapsamlı bir liste için system-requirements uzantılı adreste detaylı bir araştırma yapılması gerekmektedir (Microsoft Corporation-4, 2020).

Visual Studio 2019'u yüklemek için sistem gereksinimleri, Visual Studio'nun önceki sürümlerinden farklı olabilir. Visual Studio'nun önceki sürümlerinde, sistem gereksinimlerini belirlemek için Microsoft Corporation şirketinin docs uzantılı belgelere bakılması gerekmektedir (Microsoft Corporation-5, 2020).

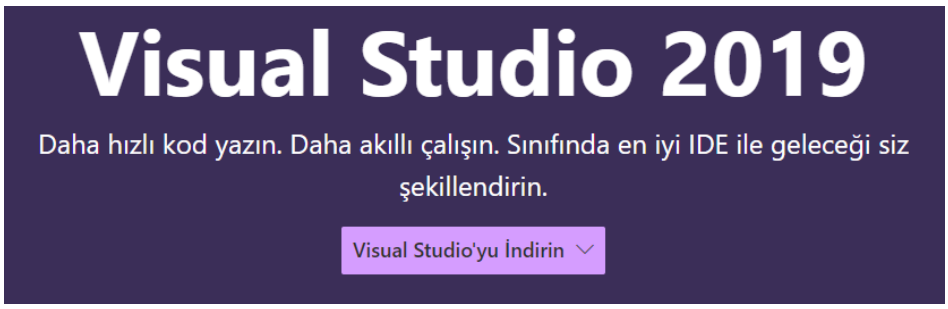
Visual Studio Enterprise 2019, Visual Studio Professional 2019, Visual Studio Community 2019 ve Visual Studio Team Foundation Server Office Entegrasyonu 2019, aşağıdaki sürümlerde kullanılmaktadır (Strauss, 2020).

- Windows 10
- Windows Server 2019
- Windows Server 2016
- Windows 8.1
- Windows Server 2012
- Windows7

Visual Studio'nun kurulum yapılacağı bilgisayar için en az 1,8 GHz işlemci, en az dört çekirdekli 2 GB kapasiteli RAM gerekmektedir. Sanal Makine üzerinde çalışılıyorsa minimum 2,5 GB RAM gerekmektedir. Aynı zamanda yüklü özelliklere bağlı olarak 800 MB ile 210 GB arasında kullanılabilir sabit disk alanı, ayrıca 20-50 GB arası boş alan gerekmektedir. Programdan yüksek performans sağlamak için Windows ve Visual Studio'nun bir SSD'ye yüklenmesi gerekmektedir. Visual Studio, minimum 720 pixel (1280x720) ekran çözünürlüğü ile çalışmaktadır. Bu programın verimli bir şekilde çalışabilmesi için PC en az WXGA (1366x768) çözünürlük seviyesinde olmalıdır. Visual Studio ve Visual Studio Installer 14 dilde mevcut olup içerisinde Türkçe'de bulunmaktadır (Strauss, 2020).

Visual Studio 2019, yazılımcıların birkaç yoldan yeni bir proje oluşturmasına olanak tanımaktadır. İlk olarak Microsoft Corporation şirketinin "tr" uzantılı adresinden Visual Studio'nun son versiyonu indirilir (Microsoft Corporation-6,

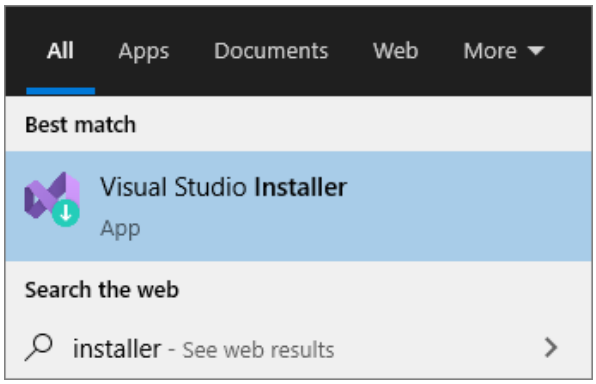
2020). Bu adreste bulunan Visual Studio'nun ticari olmayan community kısmı seçilmelidir. Bu kısım kullanıcılara ücretsiz olarak bu imkânı sağlamaktadır. Visual Studio'yu indirilmek istendiği zaman Şekil 3.16'daki kısımla karşılaşılmaktadır.




Şekil 3.16. Visual studionun 2019 versiyonu

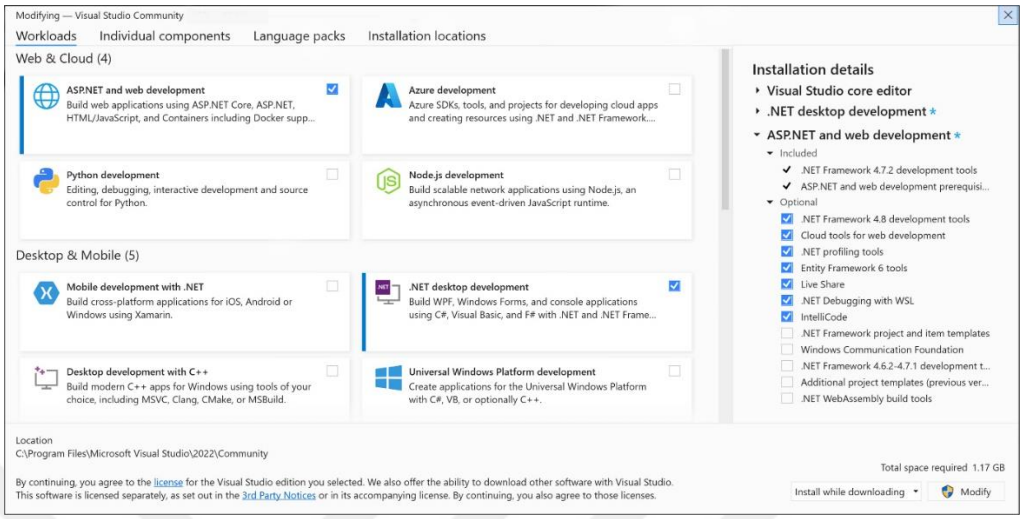
İndirildikten sonra Visual Studio'nun kurulumu yapılmaya başlanır. Kurulum tamamlandıktan sonra, iş yükleri olarak da bilinen özellik kümeleri seçilerek yükleme özelleştirilebilir.

İş yükleri, birbirine ait olan bağımsız özelliklerin bir koleksiyonu olarak düşünülebilir. Bu, Visual Studio'nun yalnızca ihtiyaç olanı içerecek şekilde kolayca değiştirilmesine olanak tanımaktadır. İş yükleri ekranının başlatılabilmesi için, Şekil 3.17'de görüldüğü gibi Visual Studio Yükleyicisi bulunmalıdır.



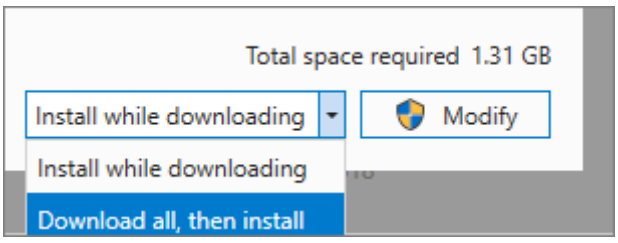

Şekil 3.17. Visual studio yükleyicisi

Visual Studio, yükleyiciye tıklanarak başlatılır ve buradan Visual Studio kod yazım alanları Şekil 3.18'de görüldüğü gibi değiştirilebilir.




Şekil 3.18. İş yüklerinin seçimi ve ihtiyaç duyulan ek alan

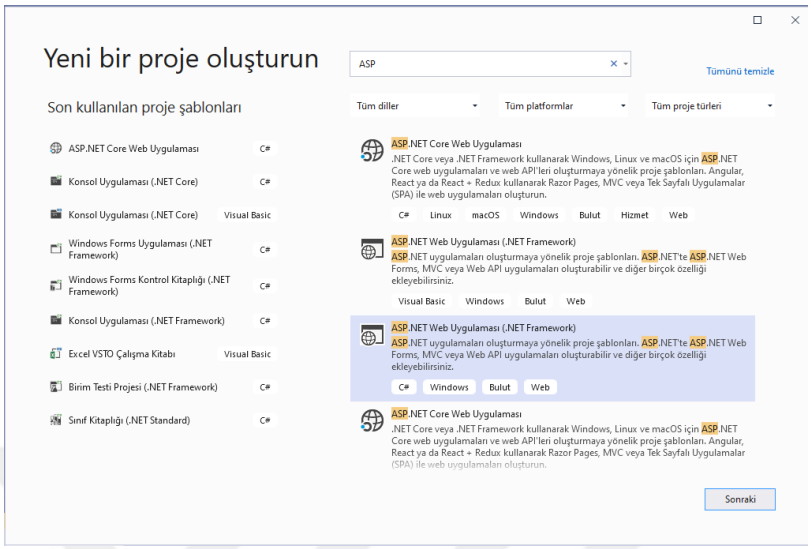
Python geliştirmeye başlamak için, Python geliştirme iş yükü kontrol edilir ve Python kurulabilir. Şekil 3.18'de görüldüğü gibi bu kurulumun ayrıntıları bölümü (installation details) güncellenerek, tam olarak neyin kurulduğunu ve seçilen iş yükünü kurmak için ne kadar ek alana ihtiyaç olduğu gösterilecektir. İş yükleri ayrıca; iş yükleri, bireysel bileşenler, dil paketleri ve kurulum konumları gibi sekmeleri de içerir. “Service Fabric Tools” gibi ek bir bileşen kurulması gerekirse, bu işlem ayrı bileşenler sekmesinden seçilerek yapılabilir. Yüklemek istenen tüm iş yükleri ve tek tek bileşenler kontrol edildiğinde, Şekil 3.19'da görüldüğü gibi kurulum yapmak veya her şey yüklenmeden önce indirme seçilebilir.




Şekil 3.19. Kurulum seçenekleri

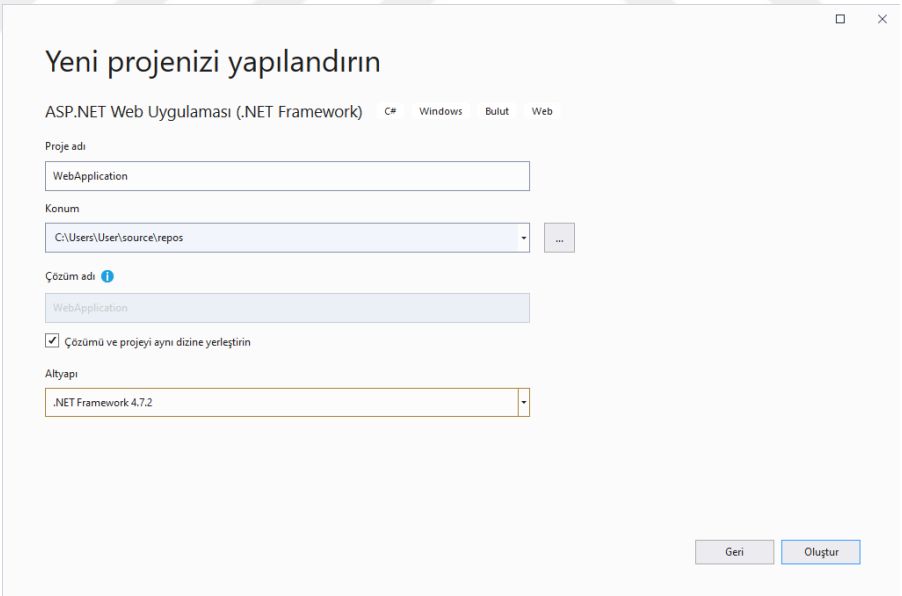
Şekil 3.19 görülen ilgili sekme, mevcut Visual Studio 2019 yüklemesi değiştirecek ve seçilen değişiklikleri uygulayacaktır. Visual Studio IDE, yazılımcıların yapmaları gerekeni verimli ve üretken bir şekilde uygulamaya yardımcı olan

özellik ve araçlarla doludur. Web-tabanlı uygulamaya başlanabilmesi için Şekil 3.20'deki gibi Visual Studio açılarak C# tabanlı site kurulabilir.




Şekil 3.20. ASP.NET web uygulama penceresi

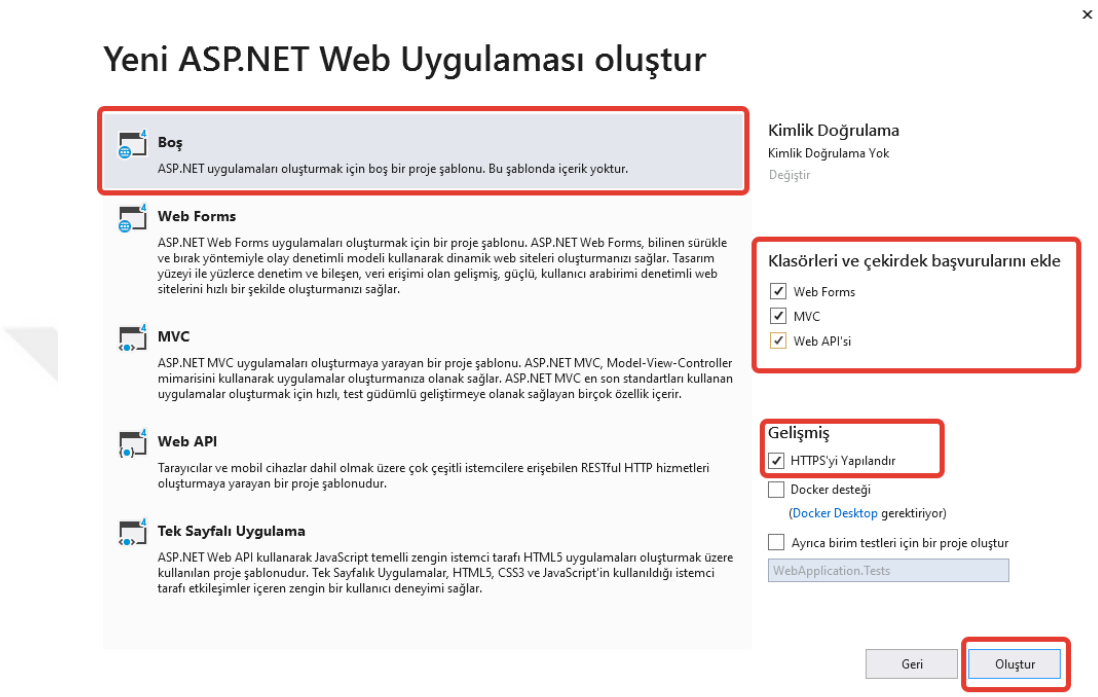
Daha sonra, sonraki tuşuna basılarak Şekil 3.21'in görüntülenmesi sağlanır.




Şekil 3.21. ASP.NET web uygulaması (.NET Framework)

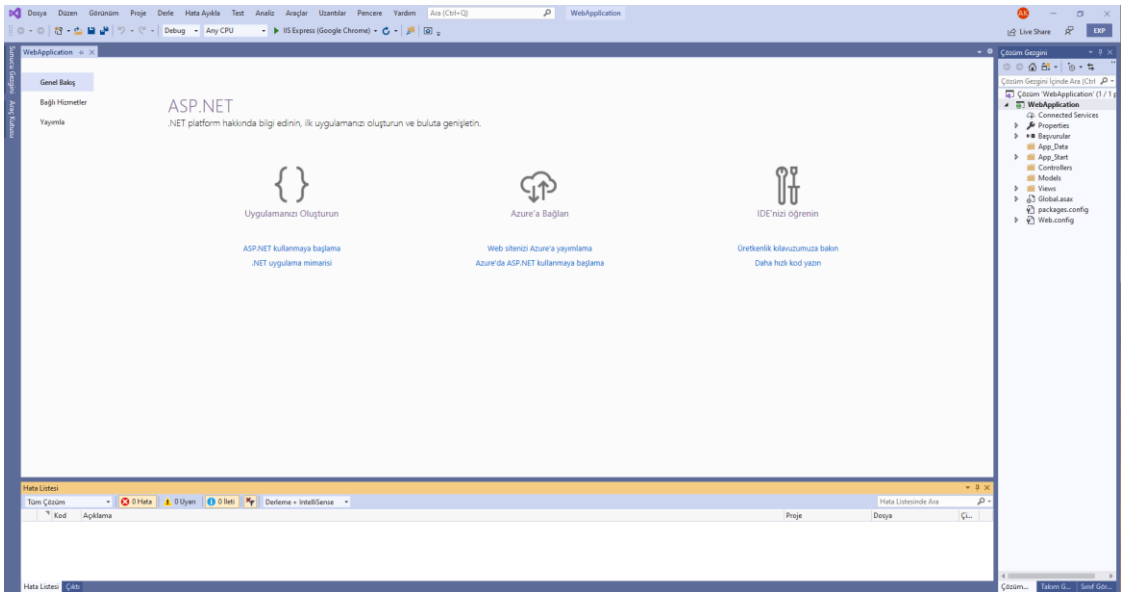
Buradaki sayfada görüldüğü üzere ASP.NET web uygulaması içerisinde C#, windows, bulut ve web bulunmaktadır. Proje adı kısmına yapılması düşünülen çalışmanın adı verilebilir. Konum kısmı projenin oluşturulacağı kısmı

göstermektedir. Bu kısmın windows'un C kısmına aktarılması, çalışmaların kesintiye uğramaması için daha iyi olacaktır. Şekilde görüldüğü üzere altyapı kısmı ".NET" Framework 4.7.2 son güncel sürümüdür. Pencerenin sağ altında bulunan oluştur kutucuğuna fare ile tıklandığında Şekil 3.22 elde edilir.




Şekil 3.22. Yeni ASP.NET web uygulaması oluştur bölümü

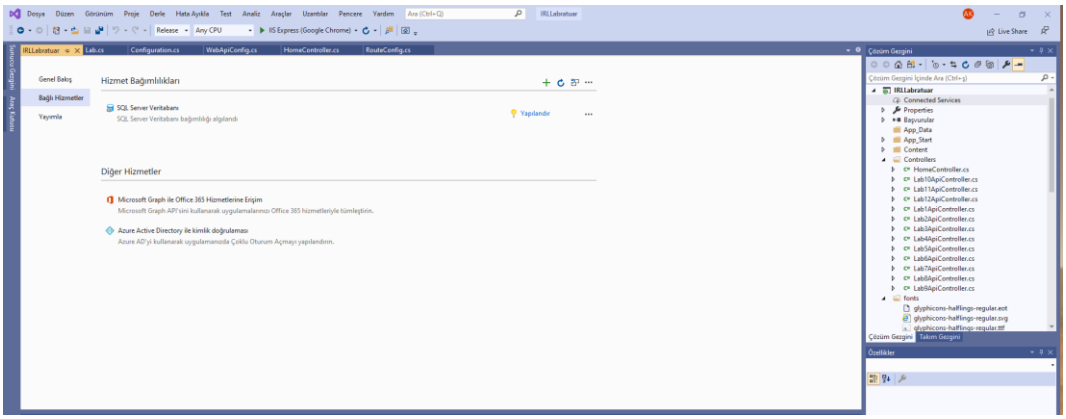
Bu sayfada görülen alanlardan "Boş" kısmı seçilir. Klasörleri ve çekirdek başvurularını ekle kısmının tamamının seçilmesi gerekmektedir. Daha sonra oluştur kısmı onaylanarak yeni pencereye geçilmiş olur. Şekil 3.23'te ASP.NET kod yazım alanı görülmektedir.



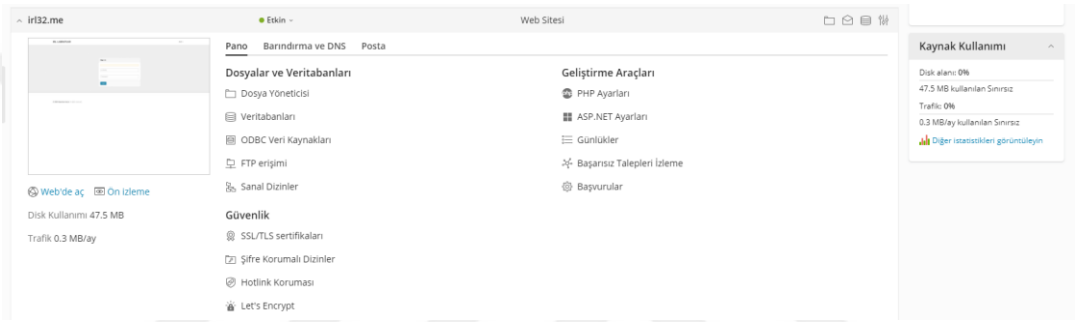

Şekil 3.23. ASP.NET kod yazım alanı

Bu sayfada bulunan kısma ise gerekli C# kodları yazılarak grafik, excel, konum ve anlık değerlerin gösterimini sağlayan yazılımlar gerçekleştirilmiş olur. Şekil 3.23'de Airthings şirketinin üretimi olan Wave smart radon dedektörünün her birinin ölçüm yapabilmesini sağlayan C# kodlarının ilgili alana yazılarak web-tabanlı kontrol programı oluşturulmuştur. On iki adet dedektör olduğu için her bir dedektör için ayrı ayrı kod alanı oluşturulmuştur.

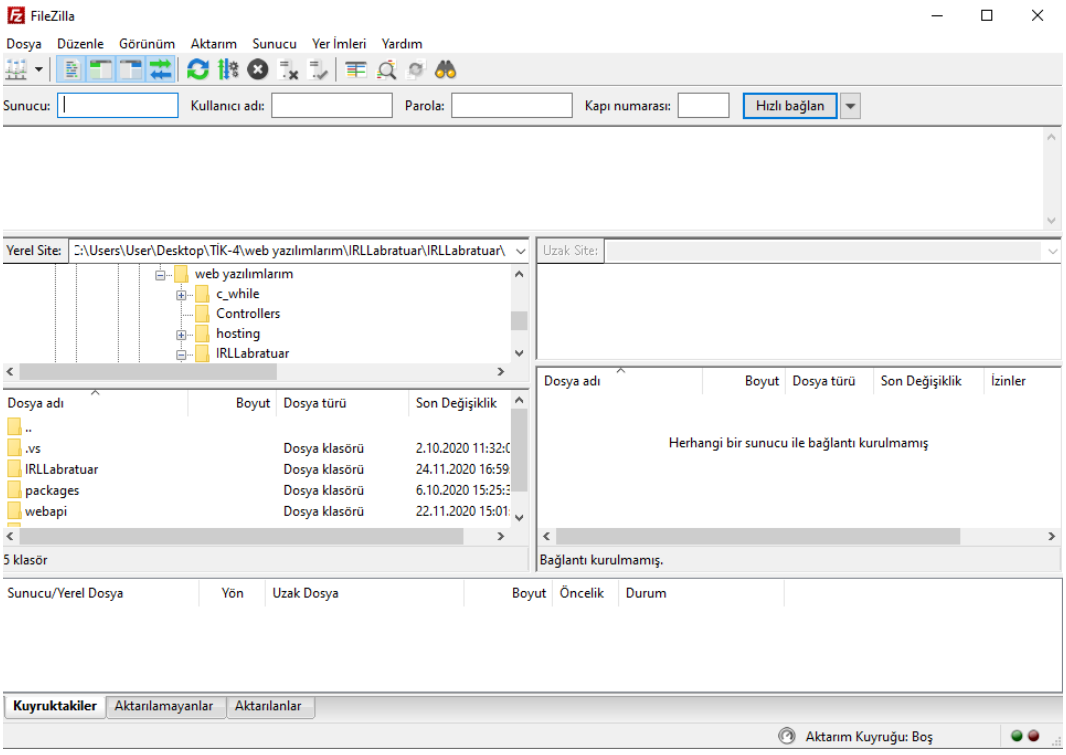
Web-kontrol programının son aşaması tamamlamış olup, bu aşamadan sonraki kısım ise Şekil 3.24'teki Microsoft SQL Visual Studio Management programıdır. Bu programa aktarılan kodlar daha sonra web hosting'e aktarılmıştır. Şekil 3.25'teki web hosting kontrol programındaki kullanılmak istenen internet alan adının özellikleridir. Bu alanı ücretsiz olarak kullanmak mümkün değildir. Bu aşamada proje sahibi kendi imkânları ile 435 TL vererek bir yıllık hosting sahibi olmuş durumdadır. Bir yılsonunda ise bu hosting üç yıl olarak yenilenmiştir. Ayrıca bu alanla birlikte internet sitesinin yayınlanması için domain gerekmektedir. Domain, com, net, site, org gibi uzantılara sahip olan internet alanının adına denilmektedir. Web programı için yazılan kodların, Microsoft SQL programından web hosting'e aktarılmasını sağlayan programın adı FileZilla'dır. Şekil 3.26'da FileZilla'nın genel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.24. Microsoft SQL visual studio management programı

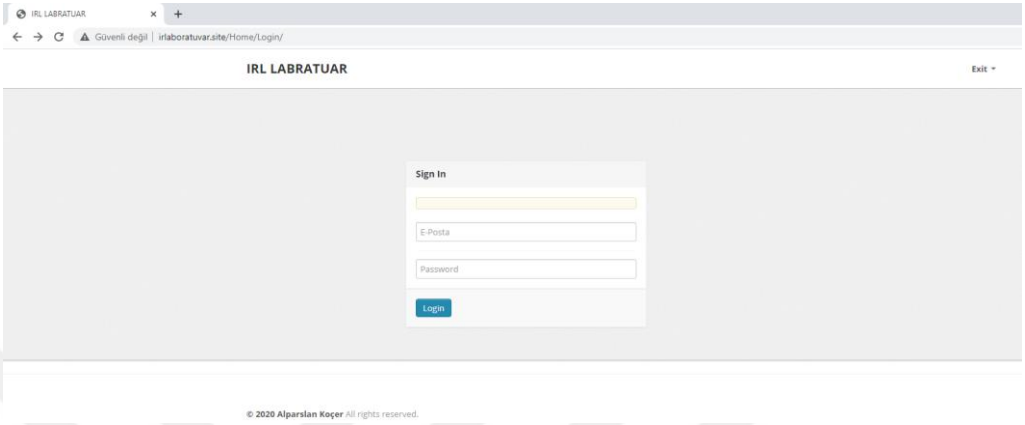


Şekil 3.25. Web hosting yönetici paneli



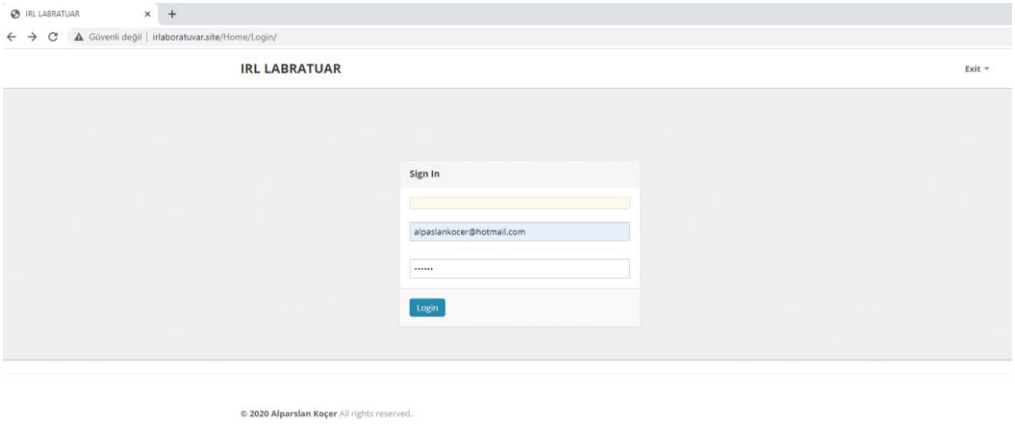
Şekil 3.26. FileZilla'nın genel görünümü

FileZilla ile web'e aktarılan kodlar neticesinde oluşturulan kontrol programının ana sayfası Şekil 3.27'de görülmektedir. Bu ana sayfada yönetici e-postası ve şifresi ile programa erişim sağlanabilir. Ayrıca daha önceden belirtildiği gibi yönetici istediği kadar kullanıcıya erişim imkanı verebilecektir (Filezilla, 2020).



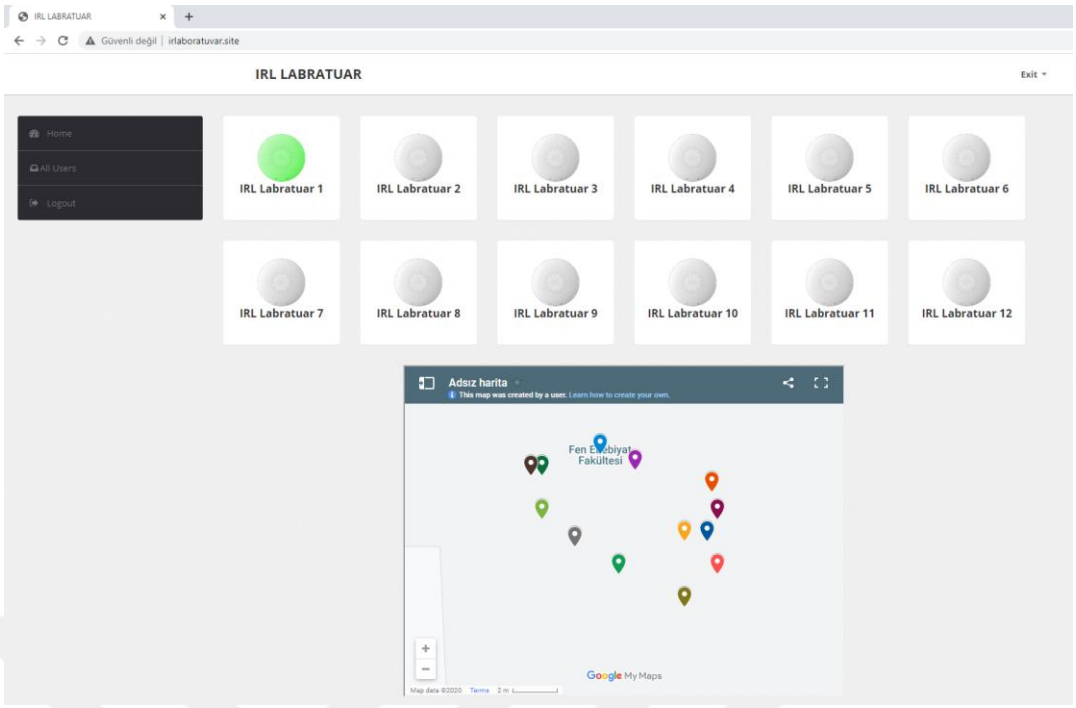

Şekil 3.27. Web-kontrol programı ana sayfası

Şekil 3.28'deki gibi kişisel e-posta adresi ve şifre ile kontrol programına erişim sağlanabilir.



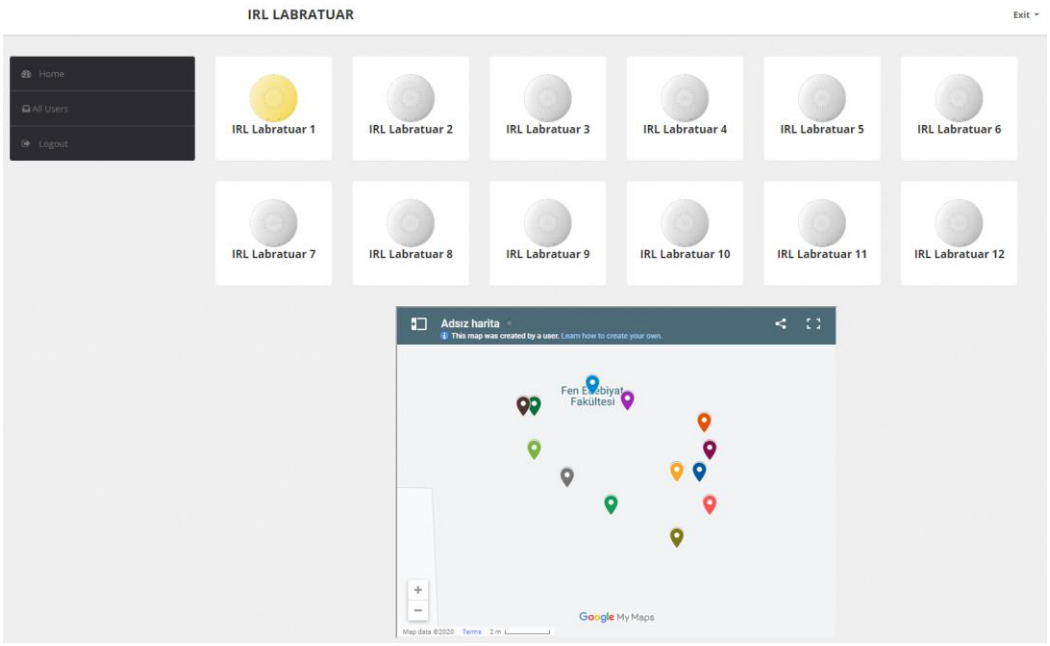

Şekil 3.28. Kontrol paneline erişim sağlayan kullanıcı bilgileri

Şekil 3.29'da ise kontrol paneline girerek tüm cihazların radon değerini gösteren renkler görülmektedir. Ölçümlere ilk başlanıldığı zamanda sadece bir dedektör aktif edilerek web yazılımının çalışması başarıyla sağlanmıştır.



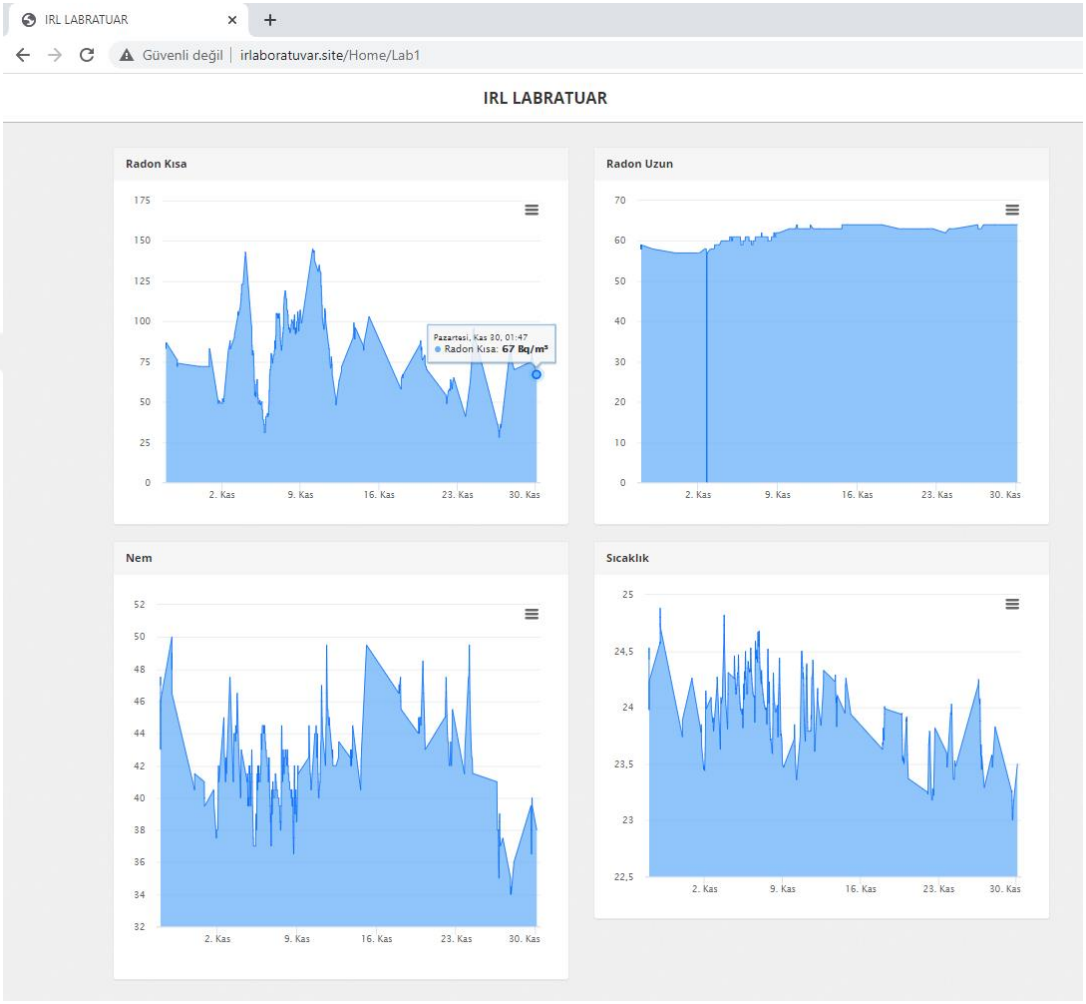

Şekil 3.29. Kontrol paneli ana sayfası

Şekil 3.30'da ise birinci dedektörün renginin yeşilden sarıya dönüştüğü görülmektedir. Bu radon değerinin 100 Bq/m$^3$ ile 149 Bq/m$^3$ arasında olduğunu göstermektedir.



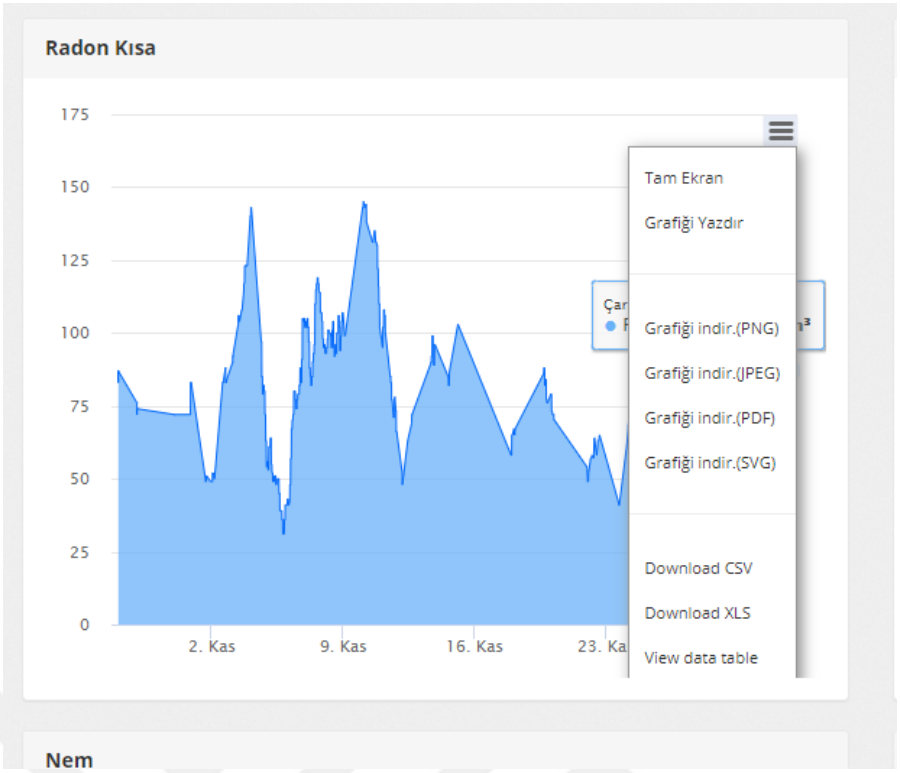

Şekil 3.30. Radon miktarının değişmesiyle birlikte dedektörün renk değiştirmesi

Şekil 3.30'daki birinci laboratuvar üzerine fare ile tıklandığında Şekil 3.31'deki ekranla karşılaşılmaktadır. Bu ekranda tüm parametrelerin grafiksel olarak değişimi görülebilmektedir. Fare ile "Radon Kısa" grafiğinin pik çizgileri üzerine gelindiğinde tarih ve saatiyle birlikte radon değeri okunabilmektedir.



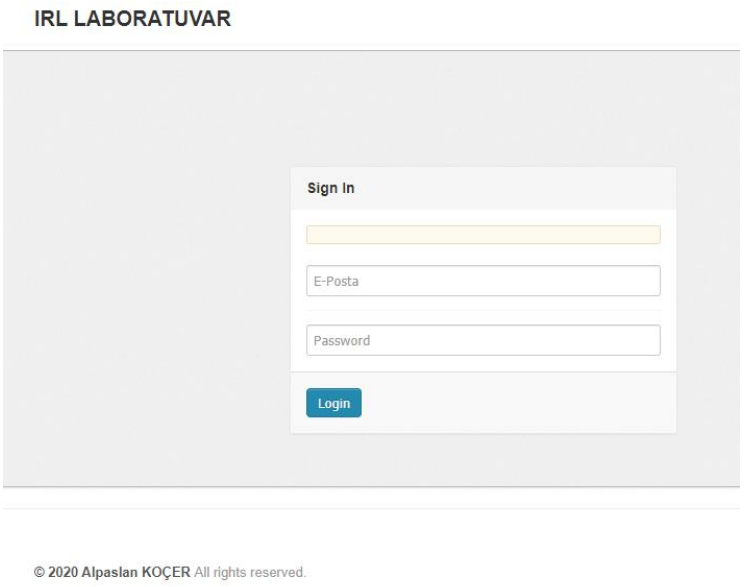

Şekil 3.31. Tüm parametrelerin bulunduğu grafik alanı

Ayrıca grafiklerin sağ üst köşesinde bulunan üçlü çizgiye fare ile tıklandığında Şekil 3.32'deki çıktı alma ekranı açılacaktır. Bu ekran ile tüm parametrelerin raporuna excel, resim ve pdf formatında sahip olunabilmektedir.

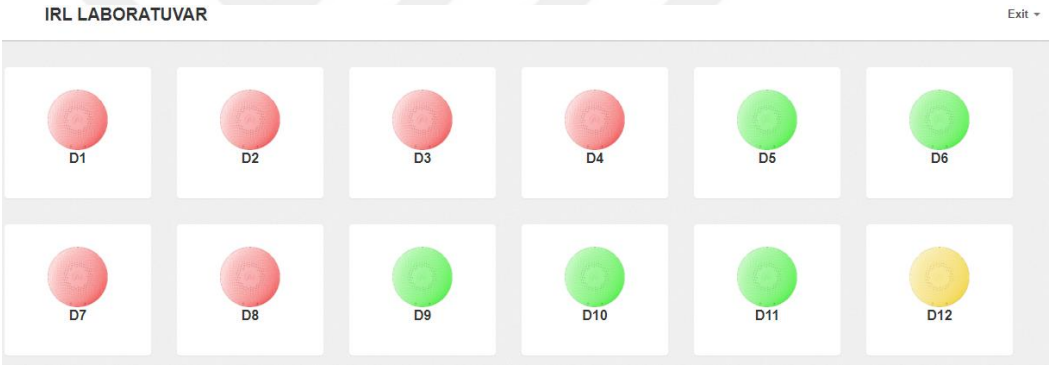



Şekil 3.32. Parametrelere erişim penceresi

Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da gösterilen şekillerde IRL Labratuar olarak görülen dedektörlere D1'den D12'ye kadar yeni isimler verilmiştir. Bu revizasyon sonrası programın web ortamına tekrar aktarılmasıyla www.irl32.me internet adresindeki kullanıcı ana panel girişi Şekil 3.33'te gösterilmiş, aktif edilen tüm detektörlerden alınan radon verilerinin ışıklı uyarılarına ait sonuçlar ise Şekil 3.34'te verilmektedir.




Şekil 3.33. Kullanıcı ana paneli




Şekil 3.34. www.irl32.me adresindeki radon, nem ve sıcaklık sonuçlarının aktarıldığı web ortamı

Bu çalışmada göz önüne alınan internet sitesinin (www.irl32.me) ara yüzü dedektörlerin yerleştirildiği mekân isimlerinin (D1, D2…D12) göründüğü kutucuklardan oluşturulmuştur. Radon seviyesinin kritik eşik değerlerini belirtmek için üç farklı renk seçilmiştir: (i) yeşil; (ii) sarı; (iii) kırmızı. Bu renklerin belirttiği kritik eşik değerler aşağıdaki gibidir:

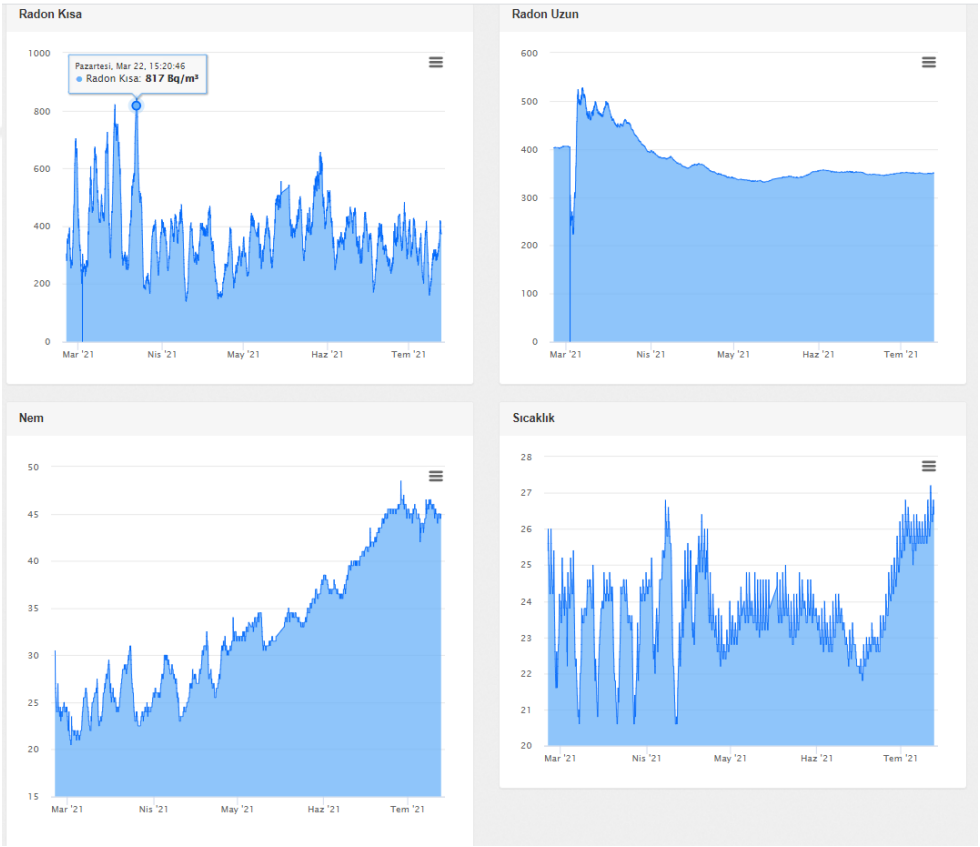
(i) yeşil; Radon seviyesi ≤99 Bq/m$^3$

(ii) sarı; Radon seviyesi 100-149 Bq/m$^3$ arasında

(iii) kırmızı; Radon seviyesi ≥150 Bq/m$^3$

Yazılımı tamamlanan web ara yüzünde ölçüm yapılan yerlerin isimlerinin yazıldığı kutucukların (Şekil 3.34) üzerine fare ile tıklandığında datanın değeri iki farklı şekilde görselleştirilmiştir: (i) örneklenen zamanla güncellenen değer; (ii) grafik (Şekil 3.35). Ölçülen verilerin her andaki değeri ekranda görünürken, grafik için farklı seçenekler kullanıcı tarafından seçilmiştir. Elde edilen tüm datalar veri tabanında kayıt altında tutulmuştur (Şekil 3.35).

Şekil 3.35'te elde edilen grafik ekranına Süleyman Demirel Üniversitesinin sağladığı internetten ve Fen-Edebiyat Fakültesi Radon Laboratuvarı'nın imkânlarından faydalanılmıştır. Uzaktan SBC'lere ulaşılmasını sağlayan program Teamviewer Host'dur. SBC'lere sadece Host kurulmaktadır. Bu kurulan Host sayesinde yer ve mekândan bağımsız olarak cihaza erişim sağlanabilmekte, kod yazılması ve gerektiğinde sisteme müdahale etme imkânı mümkün hale gelmektedir (Şekil 3.10).




Şekil 3.35. www.irl32.me adresinden elde edilen anlık verilerin değişimini gösteren grafik ekranı

Bu alan grafikleri üzerine gelindiğinde anlık olarak verilerin aktarıldığı saati ve günü görebilme imkânı bulunmaktadır. Oluşturulan kontrol programı ayrıca, ölçüm zamanına bağlı olarak radon ve diğer parametrelere ait verilerin excel formatında alınabilmesine ve depolanabilmesine de imkân sağlamıştır. Geliştirilen kontrol programı için patent başvurusunda bulunulmuş olup kontrol programıyla ilgili kodlara ulaşmak için hak sahipleriyle iletişime geçilmesi gerekmektedir.

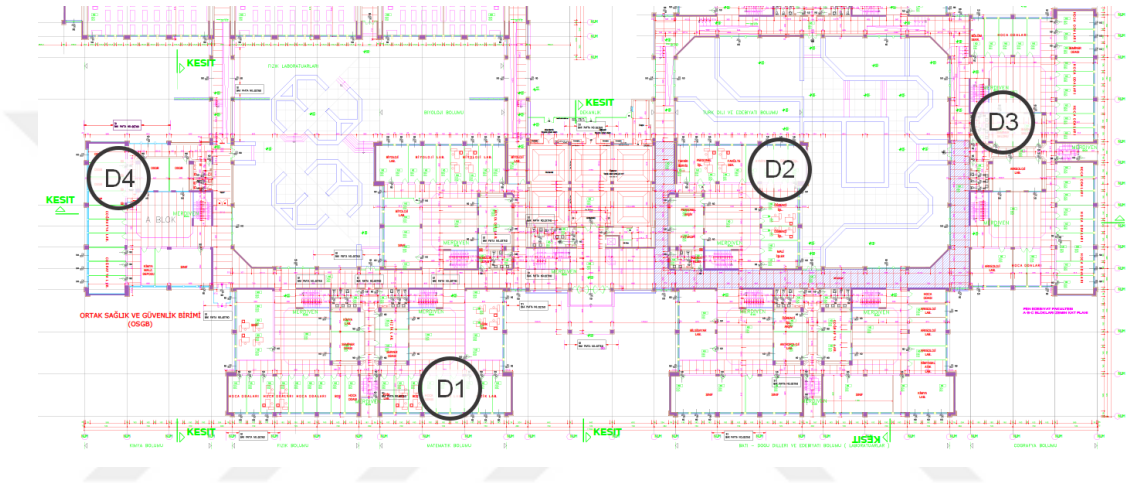
### 3.5. Ölçüm Noktalarının Tanıtımı

Bölüm 3.4'te ile sunulan web-kontrollü online radon takip ağı sisteminin test aşaması için Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi (Bölüm 3.1) seçilmiştir. IRL-RMS tasarımına ait uzun-dönem radon ölçümleri için fakülte içerisinde mümkün olduğunca homojen bir biçimde dağıtılmasına özen gösterilen ve rastgele seçilmiş 12 farklı birim, ölçüm noktası olarak belirlenmiştir. Test ölçümleri için seçilen birimlerin genel özellikleri ve bu ölçüm noktalarına yerleştirilen radon dedektörlerinin seri numaraları, çalışmada kullanılan kodlama ile birlikte Çizelge 3.4'te verilmektedir.

Çizelge 3.4. Test ölçümleri için seçilen ölçüm noktalarına ait tanımlayıcı bilgiler

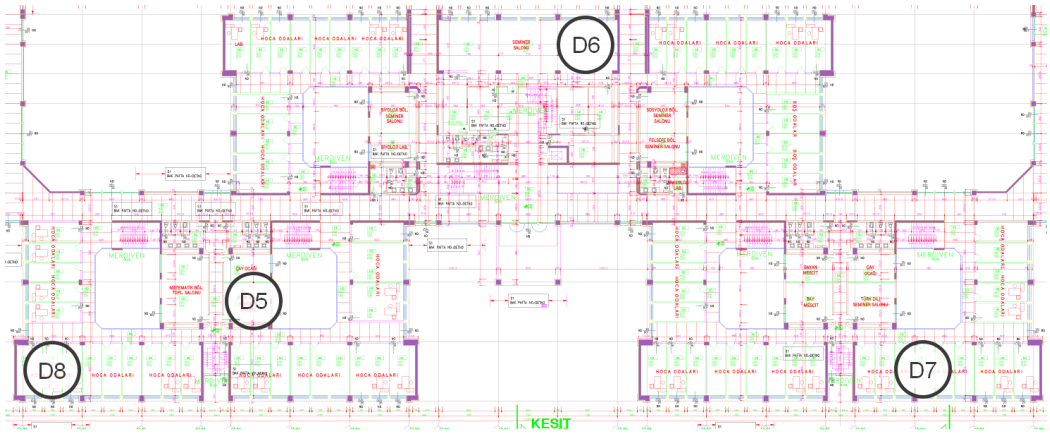
| Dedektör Kodu | Dedektör Seri No | Ölçüm Yeri Bölüm, Birim | Oda No | Kat | Kapı | Pencere | Alan | Havalandırma |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D1 | 2900262419 | Fizik, Laboratuvar | Z-5 | Zemin Kat | 1 | 1 | 15m² | Doğal |
| D2 | 2950007518 | Dekanlık, Ofis | Z-124 | Zemin Kat | 1 | 2 | 30m² | Doğal |
| D3 | 2950007514 | Arkeoloji, Seminer Salonu | Z-98 | Zemin Kat | 1 | 1 | 20m² | Doğal+Klimalı |
| D4 | 2950006741 | Kimya, Laboratuvar | Z-37 | Zemin Kat | 1 | 1 | 15m² | Doğal |
| D5 | 2950007485 | Fizik, Seminer Salonu | K1-27 | 1.Kat | 1 | 1 | 27m² | Doğal |
| D6 | 2950006731 | Dekanlık, Konferans Salonu | K1-69 | 1.Kat | 2 | 7 | 160m² | Doğal+Klimalı |
| D7 | 2950007488 | Türk Dili ve Edebiyatı, Ofis | K1-127 | 1.Kat | 1 | 1 | 15m² | Doğal |
| D8 | 2950007513 | Matematik, Ofis | K1-19 | 1.Kat | 1 | 1 | 19m² | Doğal+Klimalı |
| D9 | 2950007481 | Kimya, Bilgisayar Lab. | K2-39 | 2.Kat | 1 | 3 | 50m² | Doğal |
| D10 | 2950007492 | Biyoloji, Seminer Salonu | K2-44 | 2.Kat | 2 | 2 | 35m² | Doğal |
| D11 | 2950007495 | Felsefe, Ofis | K2-125 | 2.Kat | 1 | 1 | 15m² | Doğal |
| D12 | 2950007439 | Tarih, Ofis | K2-77 | 2.Kat | 1 | 1 | 15m² | Doğal |

Her birime birer adet tekli-ölçüm sistemi yerleştirilerek ölçüm noktaları Çizelge 3.4'teki şekilde kodlanmıştır (D1, D2…D12). Fakülte binasının her bir katı için 4'er birimde eş-zamanlı radon ölçümleri alınmış ve veriler kontrol biriminde toplanmıştır. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi zemin katına yerleştirilen 4 tekli-ölçüm sisteminin konumları Şekil 3.36 ile verilen plan üzerinde gösterilmektedir. D1; Fizik Bölümü IRL laboratuvarında, D2; yazı işleri ofisinde, D3; Arkeoloji Bölümü seminer salonunda, D4; Kimya bölümüne ait bir laboratuvarda bulunmaktadır.



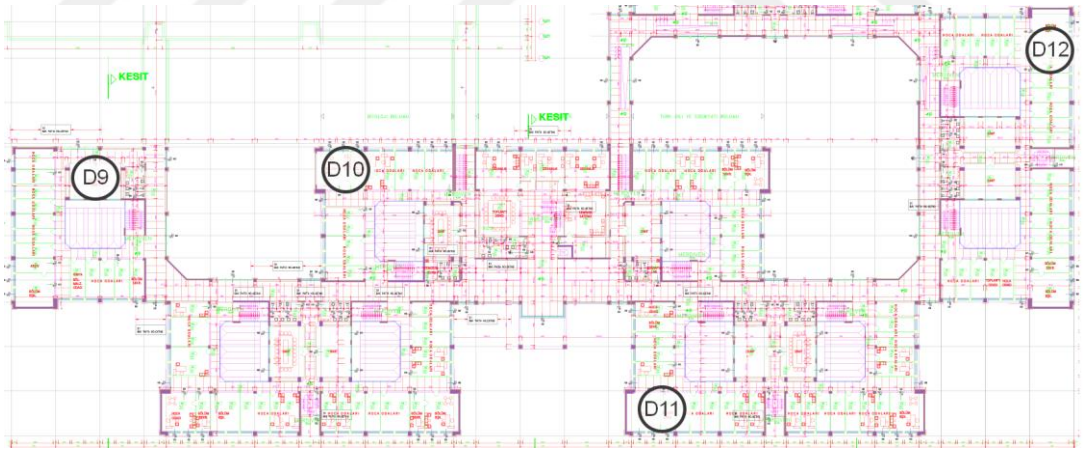

Şekil 3.36. SDÜ Fen-Edebiyat Fakültesi zemin kat planı ve radon takip sistemlerinin (D1, D2, D3, D4) yerleştirildiği ölçüm noktaları (kodlama Çizelge 3.4 ile uyumludur)

Şekil 3.37'de ise fakültenin 1. katına yerleştirilen tekli-ölçüm sistemlerinin konumları gösterilmektedir. D5; Fizik Bölümü seminer salonuna, D6; dekanlığa ait Türker Taşaltın konferans salonuna, D7; Türk Dili ve Edebiyatı Bölümü'ne ait bir ofise, D8 ise Matematik Bölümü'ndeki bir ofise yerleştirilmiştir.




Şekil 3.37. SDÜ Fen-Edebiyat Fakültesi 1.kat planı ve D5, D6, D7, D8 ölçüm sistemlerinin bulunduğu konumlar (kodlama Çizelge 3.4 ile uyumludur)

Şekil 3.38'de Fen-Edebiyat Fakültesi 2. kat planı ile bu kata yerleştirilen ölçüm sistemlerinin yerleri görülmektedir. D9 kodlu tekli-ölçüm sistemi; Kimya Bölümü bilgisayar laboratuvarına, D10; Biyoloji Bölümü toplantı salonuna, D11; Felsefe Bölümü'ndeki sekreter ofisine ve D12 ise Tarih Bölümü sekreter ofisine konumlandırılmıştır.




Şekil 3.38. D9, D10, D11 ve D12 radon ölçüm sistemlerinin konumlandırıldığı yerleri gösteren Fen-Edebiyat Fakültesi 2.kat planı (kodlama Çizelge 3.4 ile uyumludur)

1 Mart 2021 ile 28 Şubat 2022 tarihleri arasında, fakültedeki ölçüm noktalarında eş-zamanlı saatlik radon konsantrasyonu ölçümleri yapılmış ve 12 tekli-ölçüm sisteminden alınan veriler gerçek zamanlı olarak IRL-RMS kontrol birimine aktarılmıştır. Test ölçümlerine ait bulgular Bölüm 4.2'de sunulmaktadır. IRL-RMS

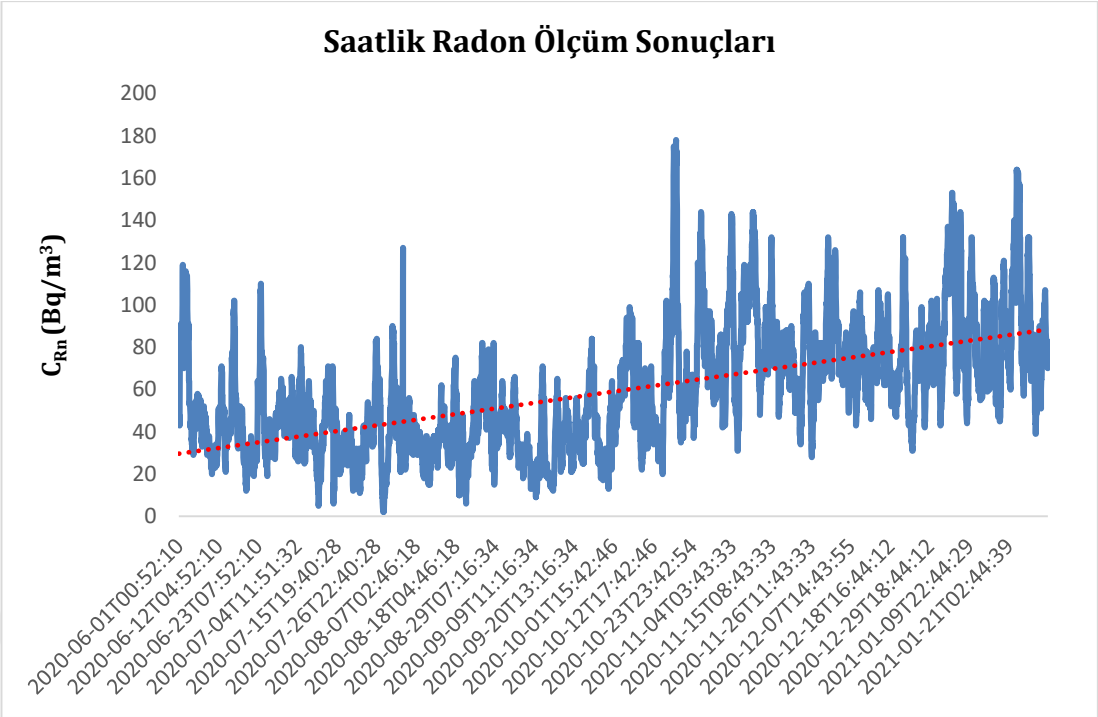
tasarımının hayata geçirilmesi sırasında karşılaşılan problemler ve bu sorunları aşmak için uygulanan çözümler EK D'de verilmiştir.

# 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde iki ayrı deneysel çalışmaya ait bulgular sunulmaktadır. Öncelikle IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi geliştirilmiş ve sekiz ay boyunca Isparta'daki bir meskende bu sistemin denenmesi ön-ölçümlerle gerçekleştirilmiştir. Bu meskenin yer aldığı çalışma alanının tanıtımı Bölüm 3.3'te ve ölçüm noktasının konum bilgileri Şekil 3.1'de verilmiştir. Uzun-dönem radon ölçümleri için veri aktarım performansının incelendiği ön-ölçümlere ait bulgular izleyen kısımda ilk olarak sunulmakadır. İkinci olarak, bu tekli sistemlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan radon ölçüm ağıyla 1 sene boyunca Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesinin 12 biriminde yapılan test ölçümlerinde elde edilen verilere ait bulgular analiz edilerek değerlendirilmiştir. Fakültenin zemin, 1.kat ve 2.katına toplamda 12 farklı birime yerleştirilen ölçüm ağına ait tanımlayıcı bilgiler Çizelge 3.4'te ve bu sistemlerin konumlarını gösteren krokiler Şekil 3.36-3.38 ile verilmiştir.

## 4.1. Ön-Ölçümlere ait Bulgular

IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi ile Isparta il merkezinde bulunan bir konutta (Bölüm 3.3), 1 Haziran 2020 ile 31 Ocak 2021 tarihleri arasında saatlik radon, sıcaklık ve nem ölçümleri 8 ay boyunca alınmıştır. IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi tarafından kayıt altına alınan tüm ölçümlere ait radon verileri Şekil 4.1'de topluca gösterilmektedir.

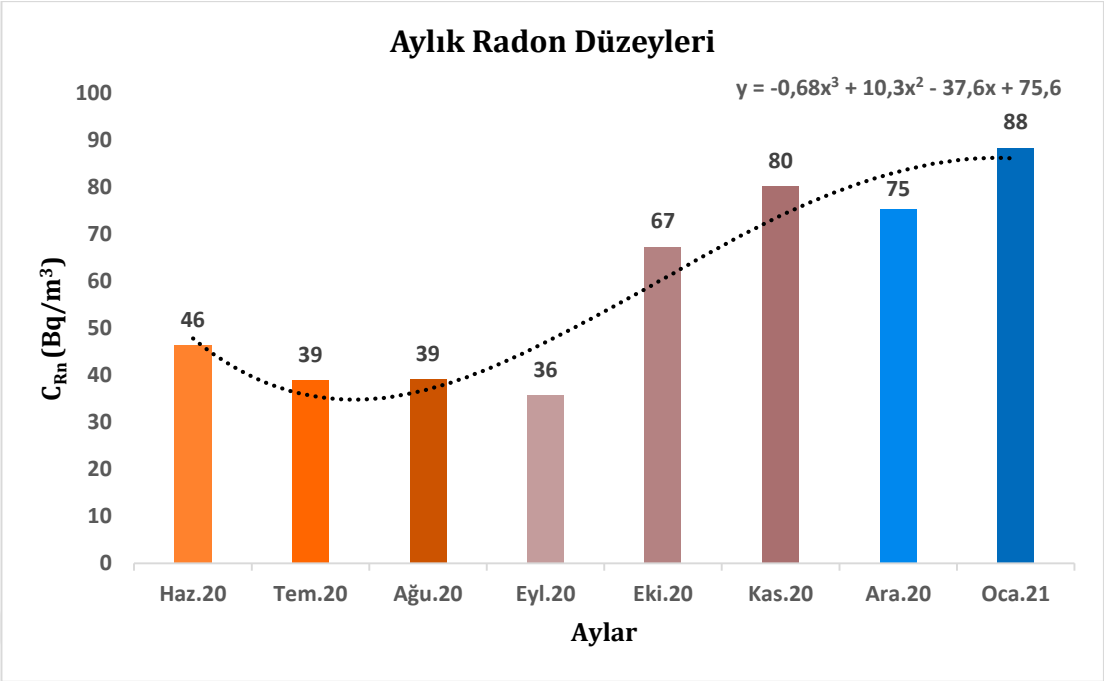



Şekil 4.1. Ön-ölçümlerden elde edilen tüm veriler

Ölçüm periyodu boyunca 5880 saatlik radon verisi alınması gerekirken sistem güncellemeleri, elektrik ve internet kesintileri gibi teknik nedenlerden dolayı 32 adet saatlik ölçüm alınamamıştır. Söz konusu elektrik ve internet kesintileri sebebiyle meydana gelen veri kaybı, ölçüm sisteminin tasarımından kaynaklanan bir sorun değildir. Tüm kesintilere rağmen geliştirilen sistemin uzun-dönem radon veri iletim performansı %99,5 gibi oldukça yüksek bir verimlilikle gerçekleşmiştir. Önerilen IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin yüksek veri iletim verimliliğine sahip olduğu ve uzun-dönem radon ölçümleri için kullanıma uygun olduğu söylenebilir.

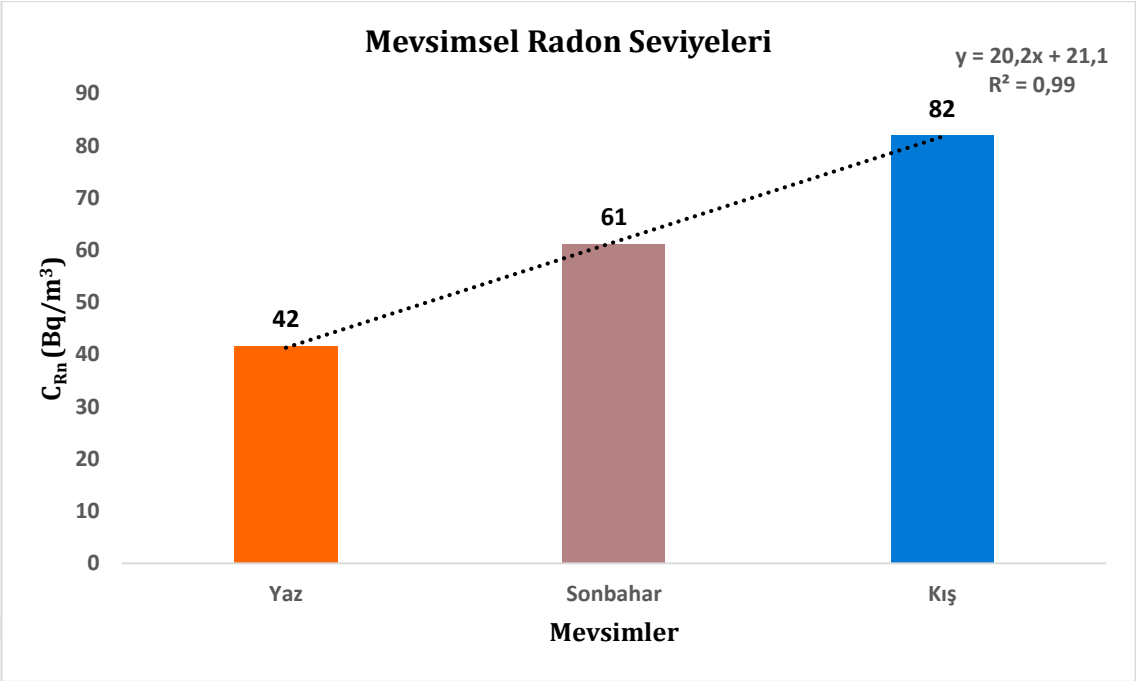
Şekil 4.1'de verilen ön-ölçümlerin gerçekleştirildiği konuttan elde edilen bina içi radon seviyeleri 2 Bq/m$^3$ ile 178 Bq/m$^3$ arasında değişmekte olup, 5848 verinin aritmetik ortalaması 59 Bq/m$^3$ ve standart sapma değeri 29 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur. Buradaki standart sapma değeri, ölçüm verilerinin ortalamadan ne kadar saptığını gösteren bir ölçüt olup radon ölçümlerinde kullanılan cihazın hassaslığıyla doğrudan bir ilişkisi bulunmamaktadır (bkz. EK E).

Ön-ölçümlerle saptanan 59 Bq/m$^3$'lük ortalama, uluslararası kuruluşlardan WHO ve ICRP ile ülkemizde yasa ile yetkilendirilen TENMAK'ın evler için tavsiye ettiği müdahale düzeylerinin altındadır. Bir başka deyişle, ölçümün yapıldığı meskendeki radon konsantrasyonunun tehlikeli düzeyde olmadığı söylenebilir (Resmi Gazete, 2004; WHO, 2009; ICRP, 2014). Şekil 4.1'de gösterilen kırmızı renkli kesikli çizgi, Haziran 2020'nin başlangıcından Ocak 2021'in sonuna dek meskendeki radon düzeyinde gözlemlenen artma eğilimini temsil etmektedir. Ölçüm noktasındaki radon yoğunluğu, yaz mevsiminden kış mevsimine doğru gidildikçe (yani hava sıcaklığı düştükçe) beklenildiği gibi bir artma davranışı sergilemiştir. IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi tasarımımız, bina içi atmosferik radon ölçümü konusunda farklı araştırmaların yapılabilmesini de mümkün kılmaktadır. Örneğin; ölçüm yapılan mekânlardaki aylık, mevsimlik, günlük, saatlik radon değişimlerini belirlemek, gündüz ve gece radon davranışını karşılaştırmalı olarak incelemek, işyerleri için çalışma ve çalışma saatleri dışındaki radon düzeylerini tespit etmek, bina içi atmosferik radon konsantrasyonu ile nem, sıcaklık, basınç vb. gibi ortam parametreleri arasındaki korelasyonları araştırmak gibi pek çok farklı konu geliştirilen bu sistemle çalışılabilir. Bu durum, önerilen IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi kullanılarak tez kapsamında gerçekleştirilen ön-ölçümler için yukarıda bahsedilen bazı çalışma konularına ait analizlerle somutlaştırılmıştır. Meskendeki aylık bina içi radon değişimleri incelendiğinde, ortalama radon konsantrasyonlarının ($C_{Rn}$) 36 Bq/m$^3$ ile 88 Bq/m$^3$ arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 4.2 ve EK F. Çizelge F.2). Aylık radon konsantrasyonlarının hava sıcaklığına bağlı olarak yaz aylarında azaldığı ve kış mevsimine gidildikçe artma eğilimi gösterdiği Şekil 4.2'de açıkça gözlemlenmektedir. Aylık radon seviyelerinin zamana bağlı sergilediği bu davranış, Şekil 4.2'de gösterilen üçüncü dereceden bir polinom denklemiyle temsil edilebilir ($R^2$=0,90).




Şekil 4.2. Ön-ölçümlerin aylık radon değişimi

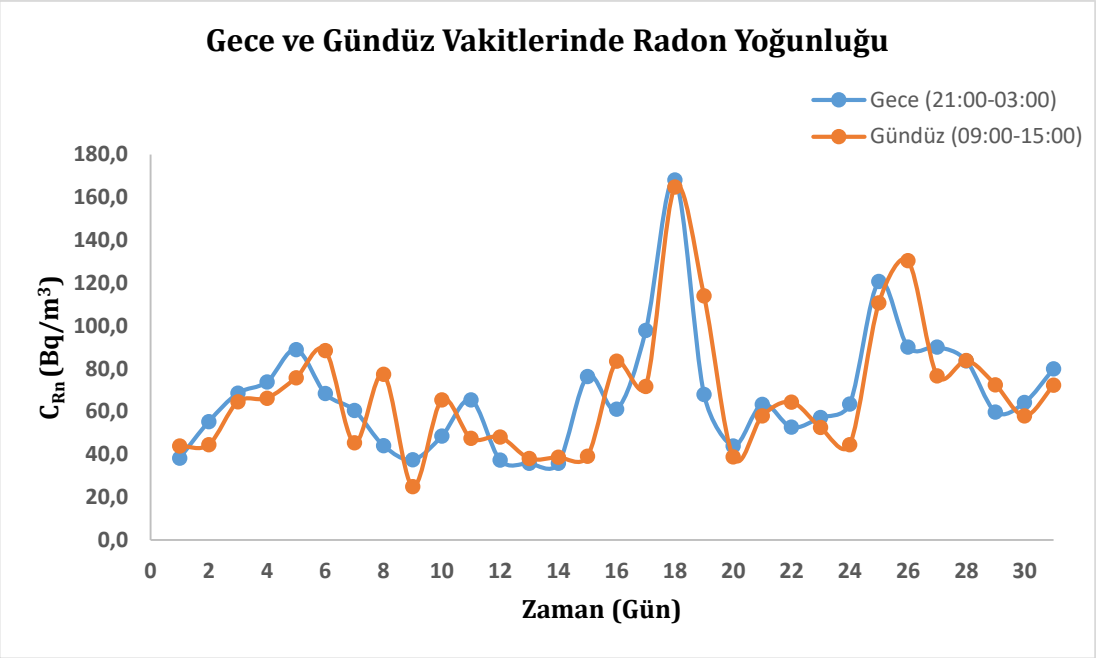
IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi, mevsimsel radon değişimlerinin incelenmesine de imkân sağlamaktadır (Şekil 4.3 ve EK F. Çizelge F.1). Konutta 3 mevsim boyunca radon ölçümleri alınmış olup en yüksek radon düzeyi kış mevsiminde (82 Bq/m$^3$) ve en düşük radon ortalaması yaz mevsiminde (42 Bq/m$^3$) gözlemlenmiştir. Meskendeki mevsimsel radon değişimi (yazdan kışa), Şekil 4.3'te ifade edilen doğrusal ilişki ile başarılı bir şekilde açıklanabilmektedir ($R^2$=0,99). Daha önceki çalışmalarda da rapor edildiği gibi (Pinel, 1995; Burke, 2011; Miles, 2012), radon seviyeleri yaz aylarında en düşük seviyede izlenmiş ve kış mevsiminde hava sıcaklığı azaldıkça maksimum seviyeye ulaşmıştır. Konuttaki kış/yaz oranı 1,95 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.3). Önerilen ölçüm sistemi yardımıyla, eş zamanlı ölçümler arasındaki (yani bina içi radon ve nem verileri arasındaki veya bina içi radon ve sıcaklık verileri arasındaki) ilişkileri ortaya çıkarmak da mümkündür. Ön-ölçümler sonucu elde edilen mevsimsel radon düzeyleri (Şekil 4.3) ile meteorolojiden Isparta il merkezi için alınan mevsimsel hava sıcaklığı ortalamaları (1929-2021 ölçüm periyoduna ait ortalamalar: yaz için 22 °C, sonbahar için 13 °C ve kış için 3 °C (DMİGM, 2022)) arasında negatif bir kolerasyon söz konusudur.




Şekil 4.3. Konuttaki mevsimsel radon değişimi

Sürekli ölçüm yapan online radon takip sistemimiz, kapalı alanlarda günlük ve saatlik radon değişimlerini monitörlemek için de uygundur (Şekil 4.1 ve Şekil 4.4). Radon seviyeleri gündüz ve gece karşılaştırmalı olarak incelenebilir. Böyle bir çalışmada, incelenecek zaman aralığı, iklim koşullarının makul ölçüde değişmeden kalmasına dikkat edilerek seçilmelidir. Ön-ölçümlerin yer aldığı çalışmamızda, radonun gece yarısı ve öğle vakitleri arasında birbirinden ne kadar farklılık gösterdiğini incelemek amacıyla meskende kayıt edilen saatlik radon verileri üzerinde çalışılmış ve her ay için öğlen (12:00) ve gece yarısı (00:00) civarındaki saatlik ölçümler günlük bazda değerlendirilmiştir. Her ay için gündüz radon ortalamalarının geceninkilere çok yakın olduğu bulunmuştur. En yüksek gece yarısı/öğlen oranı 1,01 olarak Ekim ayında gözlenmiştir. Şekil 4.4'te Ekim 2020'deki gece ve gündüz radon ortalamaları günlük bazda karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır (Günlük gece ortalamasının hesaplanmasında 21:00 ile 03:00 arasındaki 7 ölçümün ortalaması ve günlük gündüz ortalamasının hesaplanmasında 09:00-15:00 arasındaki 7 ölçümün ortalaması alınmıştır). Bu grafikte, y-ekseni radon konsantrasyonunu, x-ekseni ise günleri göstermektedir. Gündüz vakitlerindeki radon seviyeleri turuncu renkle ve gece vakitlerindeki radon seviyeleri ise mavi renkle temsil edilmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, gece

ve gündüz radon düzeylerindeki değişim birbiriyle uyumlu bir desen sergilemektedir.




Şekil 4.4. Gece ve gündüz radon seviyelerinin Ekim ayı için günlük olarak karşılaştırılması

Ayrıca, IoT-tabanlı tekli radon takip sistemiyle Isparta il merkezindeki bir konutta gerçekleştirilen ön-ölçümlere ait istatistiksel analizler EK F'de sunulmaktadır. Ön ölçümler için söz konusu mesken kasıtlı olarak seçilmiştir. 2018 yılında, aynı ölçüm noktasında Kasım ve Aralık aylarında kısa-dönem radon ölçümleri yapılmış ve meskende dünya ortalamasının 18 katı civarında, yaklaşık olarak 720 Bq/m$^3$'lük yüksek bir radon konsantrasyon ortalaması tespit edilmişti (Koçer ve Kürkçüoğlu, 2019). Bu tespitin ardından 2019 yılında evin tabanı EPS yalıtım malzemesi ile yalıtılmış ve bu işlemin ne derece etkili olduğunu araştırmak amacıyla ön-ölçümler aynı ölçüm noktasında gerçekleştirilmiştir. Ön-ölçümlerden elde edilen Kasım ve Aralık 2020 tarihlerindeki veriler incelendiğinde bu aylara ait bina içi radon konsantrasyonu ortalamasının ~78 Bq/m$^3$ olduğu bulunmuştur. Bu durum meskendeki atmosferik radon konsantrasyonunun 2018 yılının aynı aylarında yapılan ölçümlere göre 9 kat civarında azaldığını göstermektedir. Böylelikle bu tez çalışması, uygun bir radon

azaltma yöntemi uygulanarak bina içi radon konsantrasyon seviyelerinin etkili bir şekilde azaltılabileceğini de ortaya koymaktadır.

Önerilen sistemin yüksek veri iletim verimliliğine sahip olduğu bulunmuş, bina içi kısa ve uzun-dönem atmosferik radon konsantrasyonu ölçümleri için sorunsuz bir biçimde çalıştırılması başarılmış ve web-kontrollü online radon ölçüm ağı tasarımı için kullanılmaya uygun olduğu belirlenmiştir. Böylelikle önerilen sistemin mimarisine benzer bir tasarım modeline dayalı olarak çok sayıda tekli radon takip sistemine sahip bir web-kontrollü online radon takip ağı oluşturulmuştur.

### 4.2. Test Ölçümlerine ait Bulgular

Bu kısımda, Şekil 3.13'te mimarisi verilen ve Bölüm 3.4'te çalışma prensibi anlatılan IRL-RMS (Isparta Radon Laboratory-Radon Monitoring System: Isparta Radon Laboratuvarı-Radon Monitörleme Sistemi) ile 1 Mart 2021-28 Şubat 2022 tarihleri arasında, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi'nin 12 farklı biriminde gerçekleştirilen saatlik radon konsantrasyonu ölçümlerine (test ölçümlerine) ait bulgular sunulmaktadır. Test ölçümlerinin yapıldığı web-kontrollü online radon takip ağı, bünyesinde 12 adet IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi ile tarafımızca geliştrilen web-tabanlı kontrol ünitesini (Bölüm 3.4) barındırmaktadır. Ölçüm noktaları olarak belirlenen birimler (Çizelge 3.4 ve Şekil 3.36-3.38'de D1, D2…D12 şeklinde verilen tekli ölçüm sistemlerinin yerleştirildiği birimler) fakülte genelinde ve katlar arasında mümkün olduğunca homojen olarak dağıtılmıştır. Bir yıl boyunca alınan saatlik radon verileri www.irl32.me adresinden erişilebilen kontrol programımızla kayıt altına alınarak monitörlenmiş ve toplamda 97503 adet radon ölçüm verisi elde edilmiştir. İzleyen kısımda her bir tekli sistem için alınan radon verileri aylık, mevsimlik ve yıllık olarak değerlendirilmekte ve son olarak, fakülte genelindeki radon konsantrasyonu ölçümlerine ait analizler sunulmaktadır.

### 4.2.1. D1'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü zemin katında bulunan Isparta Radon Laboratuvarına (IRL) D1 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 15 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu laboratuvarda 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. IRL'de doğal havalandırma bulunmaktadır. Şekil 4.5'te ölçüm sistemi D1'in bulunduğu IRL'nin genel görünümü verilmektedir.



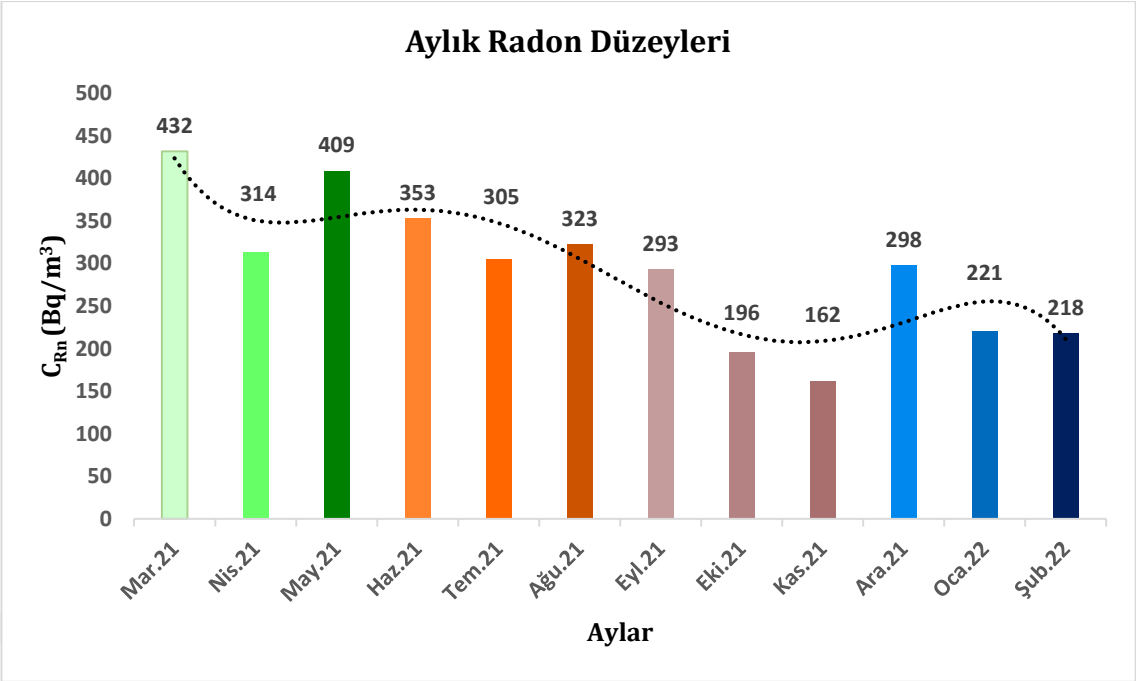
Şekil 4.5. IRL'nin giriş kapısından görünümü

Şekil 4.5'te gösterilen Isparta Radon Laboratuvarı'na konumlandırılan ölçüm sistemi D1, odanın tam ortasına yerleştirilerek yerden 1,2 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Bu seviye oturma düzeninde bulunan insanların nefes alma düzeyini göstermektedir. Şekil 4.6'da ise D1 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



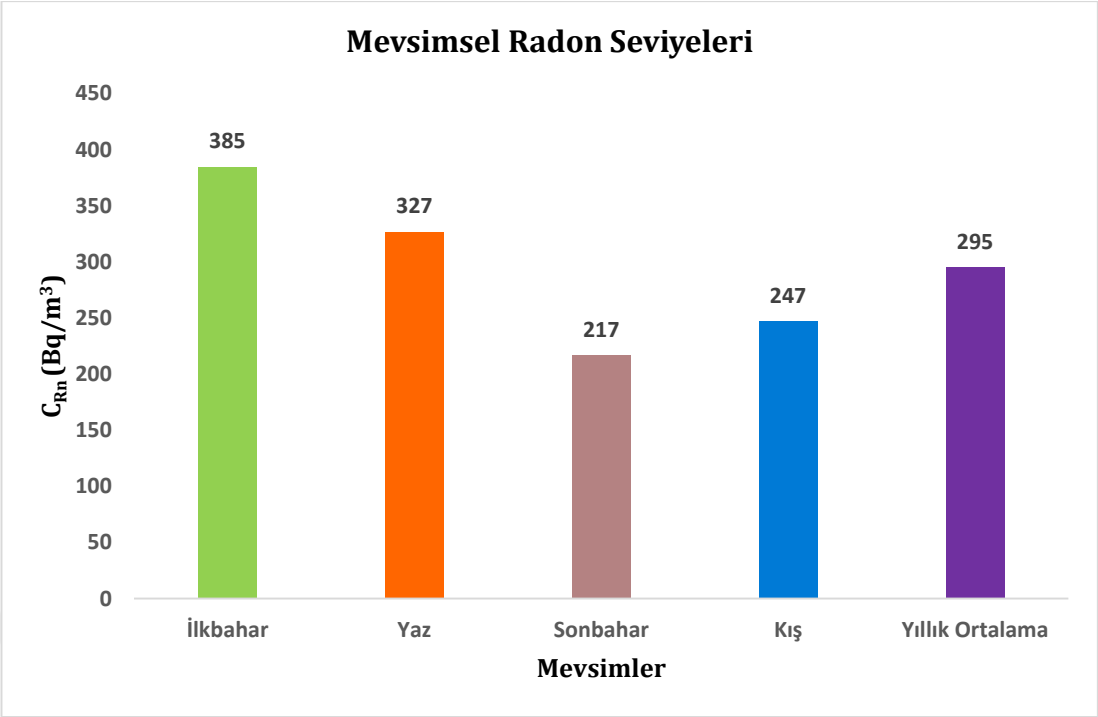

Şekil 4.6. Online radon ölçüm sistemi D1

Bir yıl boyunca toplamda 8216 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16432 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 26 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 854 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 295 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri 123 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.7'de D1 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



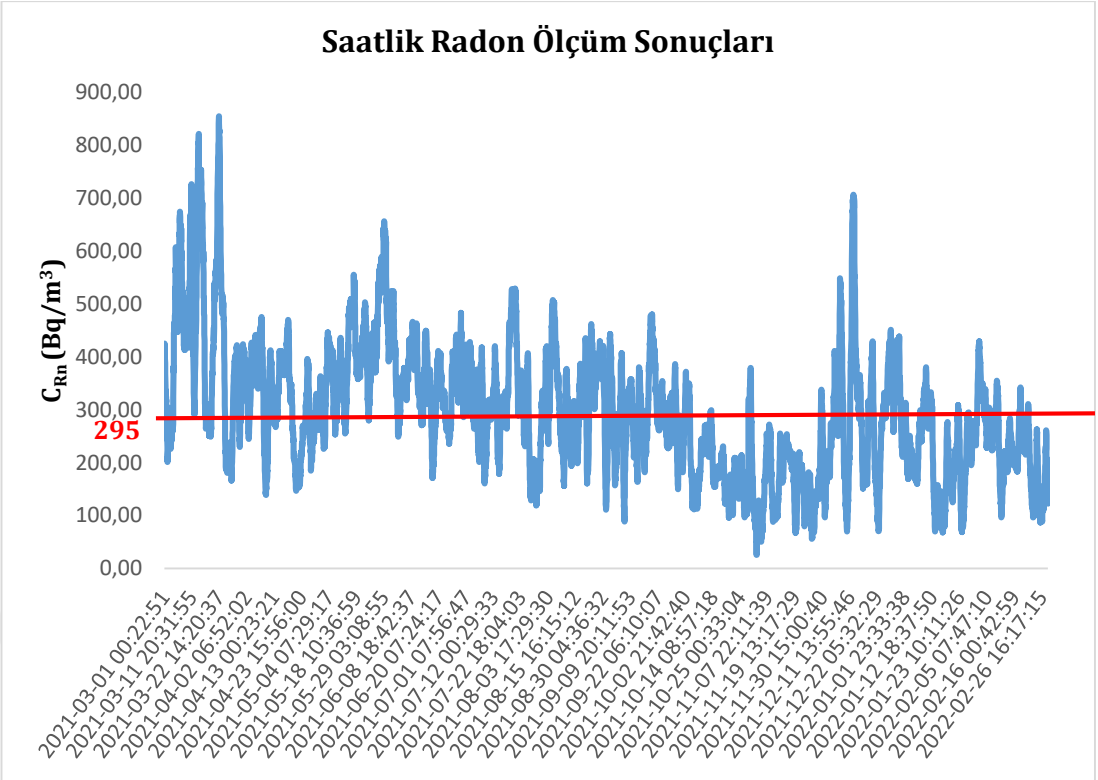

Şekil 4.7. D1 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.7'de en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Mart ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 432 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Kasım ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 162 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Bu tarihlerde üniversitede bulunan tüm birimler kapalı olup memurlar için yaz döneminde esnek çalışmaya geçilmiştir. Öğrenciler ise derslerini 4 Ekim 2021 tarihi itibariyle yüz yüze almaya başlamıştır. Bu durumlardan dolayı pandemi kısıtlama döneminde ölçüm yapılan yerlere herhangi bir giriş-çıkış durumları olmamıştır. Yani ölçüm yapılan birimde doğal havalandırma söz konusu değildir. Şekil 4.8'de ise D1 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



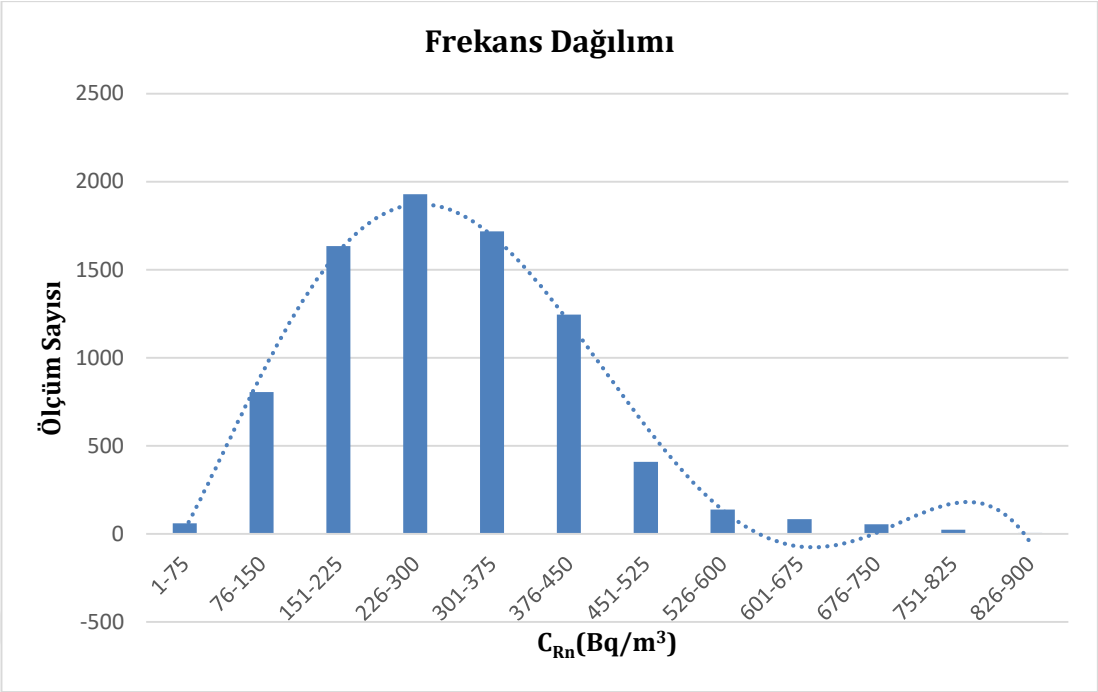

Şekil 4.8. D1 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.8'de verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının ilkbahar mevsiminde en yüksek 385 Bq/m$^3$, sonbahar mevsiminde ise en düşük 217 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine doğru ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine doğru bir düşüş eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kış mevsimine geçişte ise çok az bir radon konsantrasyonu artışının olduğu söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa uymamaktadır. Bu durum ilkbahar mevsiminin pandemi kısıtlama döneminde olması ve sonbahar döneminin ise pandemi kısıtlama sonrasına denk gelmesi (yani birimin insanlar tarafından kullanılması ve dolayısıyla birimde havalandırma yapılmasıyla) açıklanabilir. Şekil 4.9'da ise D1 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.9. D1 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer ölçüm yapılan birimdeki yıllık ortalama radon düzeyini temsil etmektedir)

Şekil 4.9'daki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu durum, pandemi kısıtlamasının kaldırılmasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.10'da D1 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.

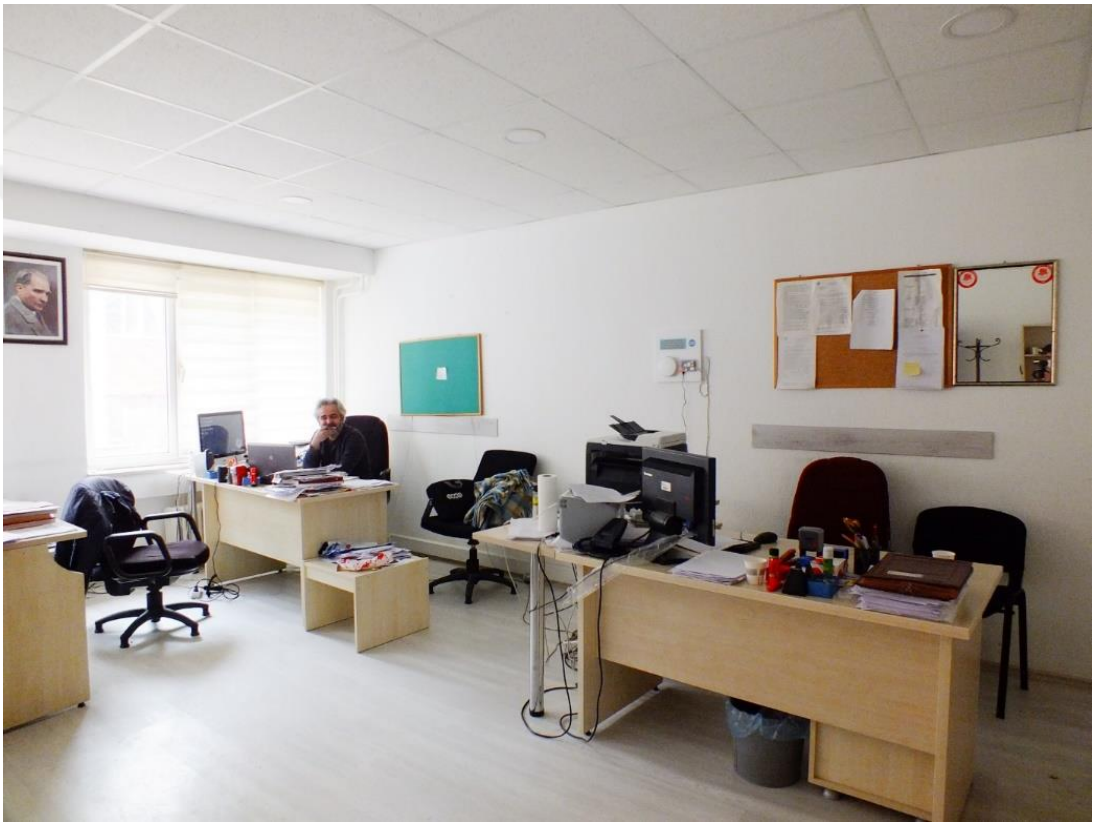



Şekil 4.10 D1 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.10'da verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 826-900 Bq/m$^3$ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 226-300 Bq/m$^3$ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8216 verinin 4222'si yani %51'i 100 Bq/m$^3$ ile 300 Bq/m$^3$ arasında olup ölçümlerin %96'sı ise Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.10'da verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir. Ölçüm yapılan laboratuvar pandemi kısıtlamasının olduğu dönemde sadece sistemin kontrolü için odaya giriş-çıkış yapılarak kullanılmıştır. Pandemi kısıtlaması bittikten sonraki dönemde (4 Ekim 2021 tarihinden sonra) bu birim tekrar düzenli olarak kullanılmaya başlanmıştır.

### 4.2.2. D2'nin bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Öğrenci işleri zemin katında bulunan dekanlık ofisine D2 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 30 $m^2$'lik alandan oluşan bu ofisin 2 adet penceresi ve 1 adet kapısı bulunmaktadır. Dekanlık ofisinde doğal havalandırma mevcuttur. Şekil 4.11'de ölçüm sistemi D2'nin bulunduğu ofisin genel görünümü verilmektedir.



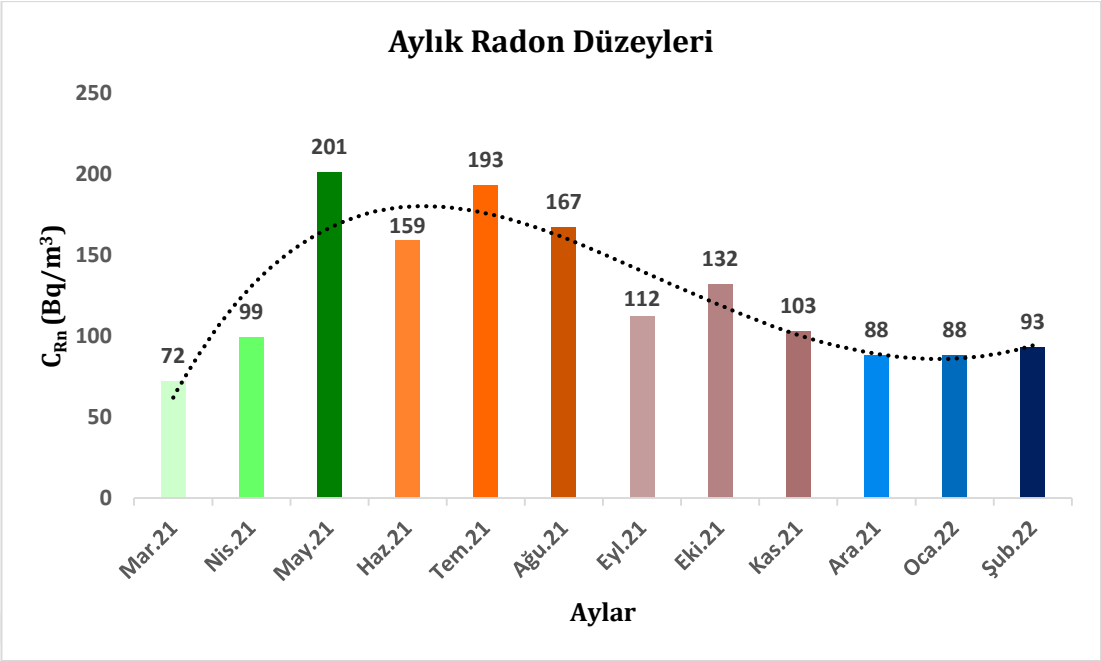
Şekil 4.11. Dekanlık ofisinin genel görünümü

Şekil 4.11'de gösterilen dekanlık ofisine konumlandırılan ölçüm sistemi D2, odanın tam ortasına yerleştirilerek yerden 1,5 m yüksekliğe yerleştirilmiştir. Buradaki ofiste idari personel olarak 3 kişi çalışmaktadır. Pandemi kısıtlamasında esnek olarak çalışan memurlar, yüz yüze eğitimin başlamasıyla tam zamanlı olarak mesailerine devam etmektedirler. Bu durumdan dolayı yazı işleri olarak kullanılan bu ofis pandemi kısıtlamasında aktif olarak kullanılmıştır. Şekil 4.12'de ise D2 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



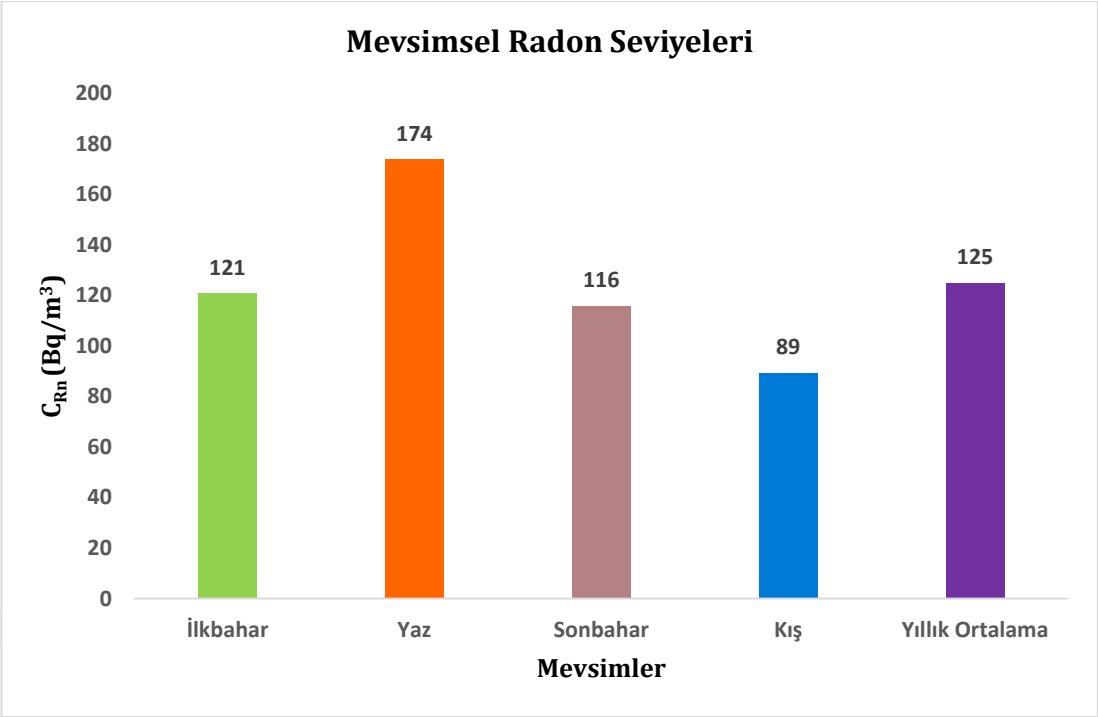

Şekil 4.12. Online radon ölçüm sistemi D2

Bir yıl boyunca toplamda 8047 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16094 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 23 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 478 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 125 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri 72 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.13'te D2 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



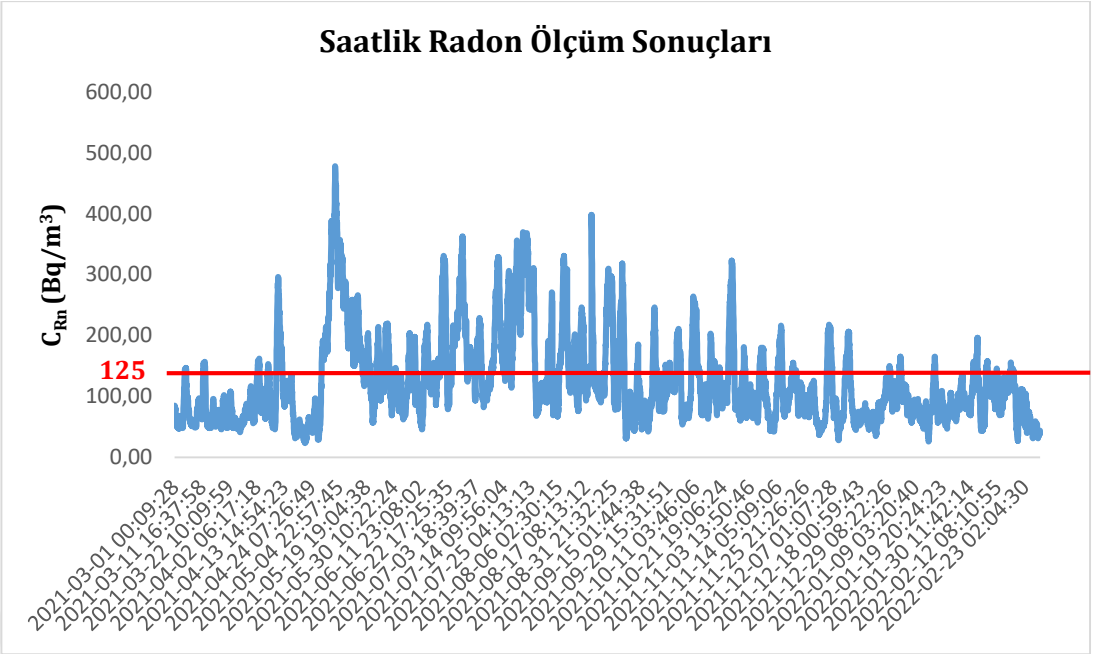

Şekil 4.13. D2 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.13'te en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Mayıs ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 201 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Mart ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 72 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi dönemine karşılık gelmektedir. Bu tarihlerde üniversitede bulunan tüm birimler kapalı olup memurlar için esnek çalışma yapılmıştır. Burada yapılan ölçüm zamanlarında ofise her zaman giriş-çıkışlar olmuştur. Yani ölçüm yapılan birimde doğal havalandırma yapılmıştır. Şekil 4.14'te ise D2 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



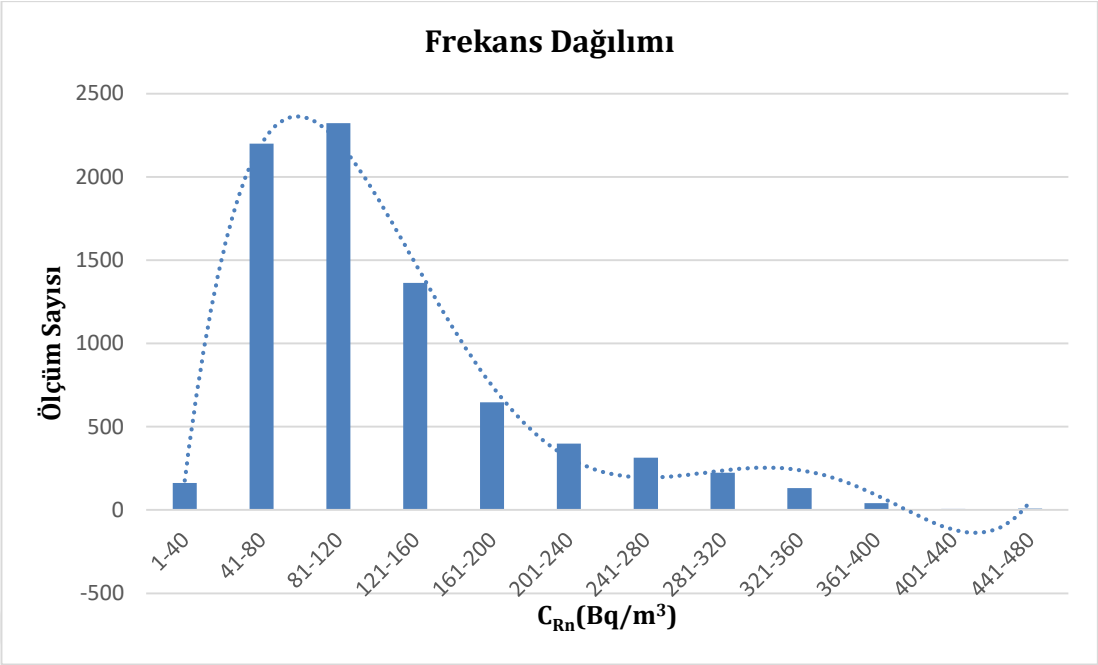

Şekil 4.14. D2 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.14'te verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının yaz mevsiminde en yüksek 174 Bq/m$^3$, kış mevsiminde ise en düşük 89 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine geçişte bir artış olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine geçişte ise bir düşüş eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kış mevsimine geçerken yine radon konsantrasyonunun düştüğü söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa uymamaktadır. Bu durum yaz mevsiminin pandemi kısıtlama döneminde olması ve kış döneminin ise pandemi kısıtlama sonrasına denk gelmesi (yani birimin insanlar tarafından kullanılması ve dolayısıyla birimde havalandırma yapılmasıyla) açıklanabilir. Şekil 4.15'te ise D2 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi grafikte gösterilmektedir.




Şekil 4.15. D2 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer zemin kat dekanlık ofisinin yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.15'teki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu durum, pandemi kısıtlamasının kaldırılmasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.16'da D2 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.




Şekil 4.16. D2 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.16'da verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 401-440 Bq/m$^3$ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 81-120 Bq/m$^3$ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8047 verinin 4117'si yani %51'i 100 Bq/m$^3$ ile 300 Bq/m$^3$ arasında olup ölçümlerin %55'i ise Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.16'da verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.3. D3'ün bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Arkeoloji Bölümü zemin katında bulunan seminer salonuna D3 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 20 $m^2$'lik alana sahip olan bu seminer salonunda 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Bu seminer salonunda doğal havalandırma sisteminin yanı sıra duvar tipi klima da mevcuttur. Şekil 4.17'de ölçüm sistemi D3'ün bulunduğu seminer salonunun genel görünümü verilmektedir.



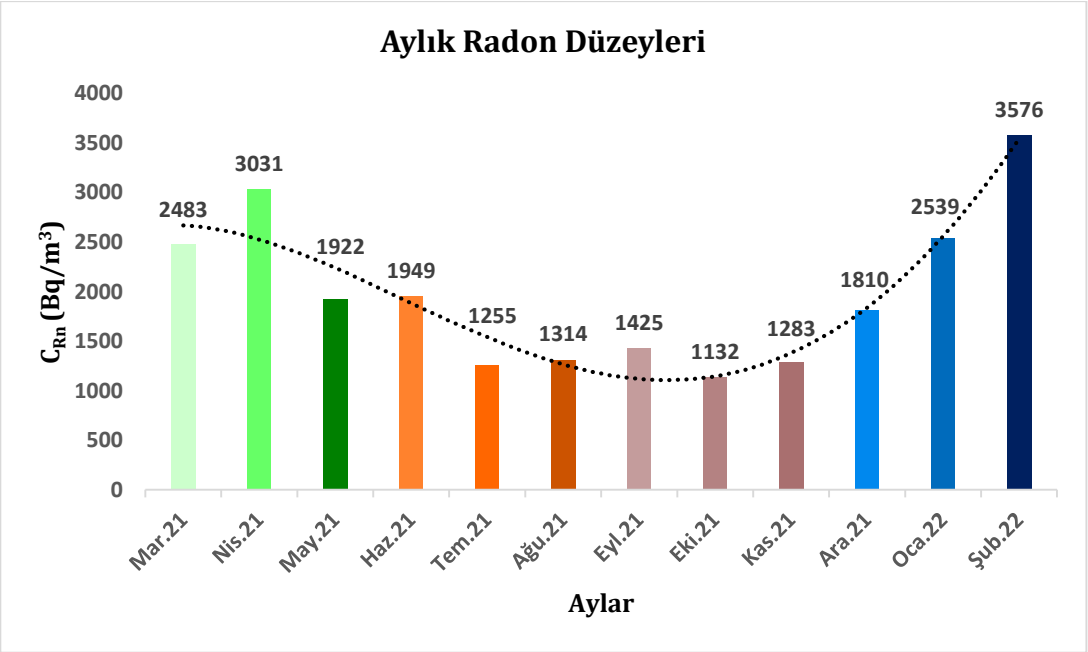
Şekil 4.17. Arkeoloji bölümü seminer salonunun genel görünümü

Şekil 4.17'de gösterilen arkeoloji seminer salonuna konumlandırılan ölçüm sistemi D3, odanın köşesine yerleştirilerek yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.18'de ise D3 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



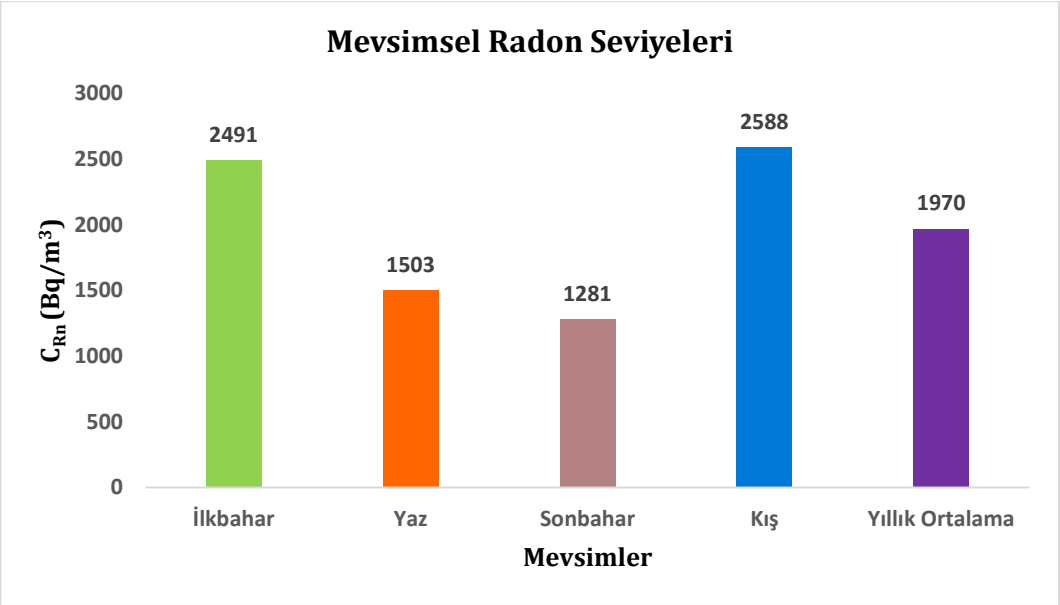

Şekil 4.18. Online radon ölçüm sistemi D3

Bir yıl boyunca toplamda 8311 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16622 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 461 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 4691 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 1970 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri 901 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.19'da D3 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



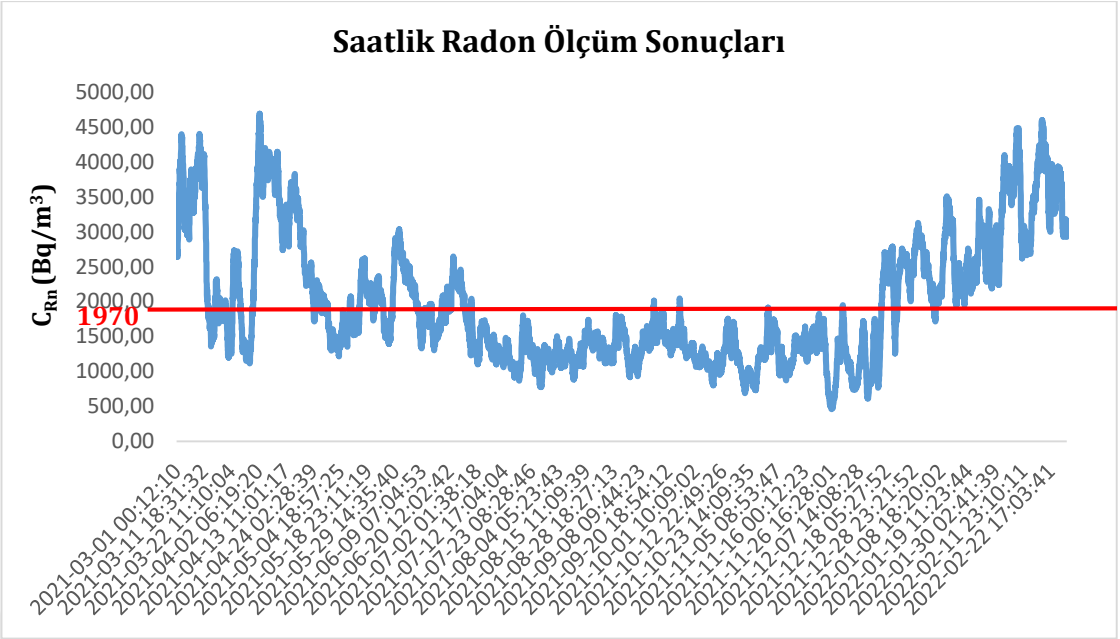

Şekil 4.19. D3 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.19'da en yüksek radon konsantrasyonu 2022 yılı Şubat ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 3576 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Ekim ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 1132 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Arkeoloji bölümü tüm ölçüm sistemleri içerisinde en yüksek radon konsantrasyonuna sahiptir. Burada bulunan seminer salonu fakültenin, batı dilleri ve edebiyatı bölümü ile arkeoloji bölümünün tam orta kısmında bulunmaktadır. Penceresi batı dilleri bölümü tarafına, kapısı ise arkeoloji bölümünün laboratuvar kısmına bakmaktadır. Fakülte binasının iç kısmında kalan D3 ölçüm noktasının dış ortamla herhangi bir teması bulunmamaktadır (Şekil 3.36). Havalandırma sisteminin kullanılmaması nedeniyle herhangi bir hava sirkülasyonu söz konusu değildir. Bu şekilde birçok olumsuz durumu barındıran seminer salonunda en yüksek radon değeri ölçülmüştür. Şekil 4.20'de ise D3 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



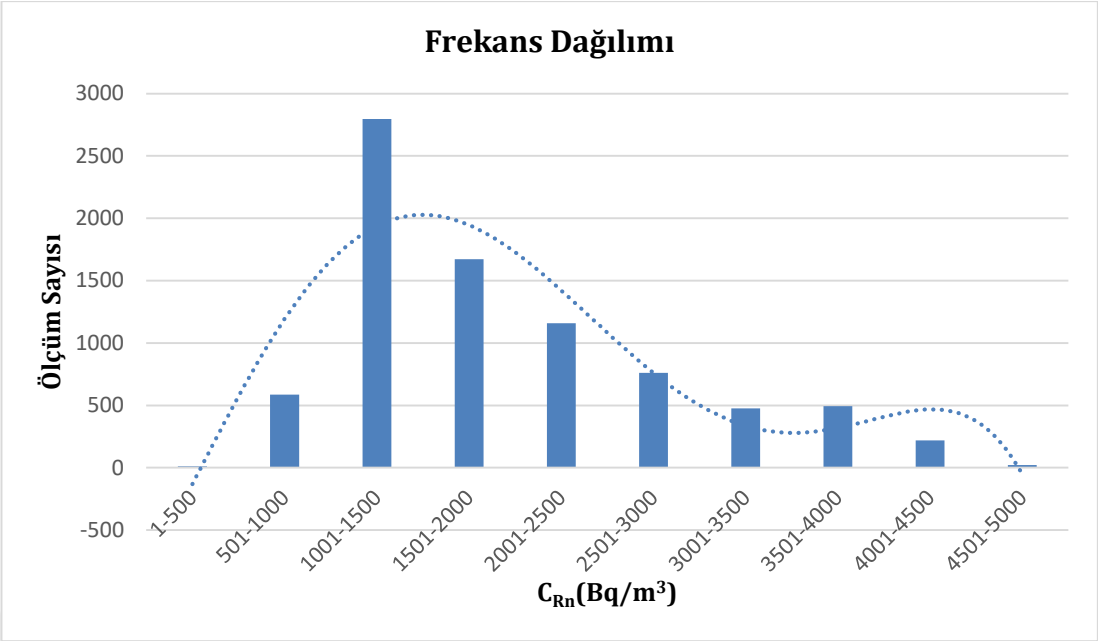

Şekil 4.20. D3 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.20'de verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının kış mevsiminde en yüksek 2588 Bq/m$^3$, sonbahar mevsiminde ise en düşük 1281 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum kış mevsiminde havalandırma olmaması yani kapı ve pencerelerin kapalı olmasıyla birlikte radon değerinin yükseldiğini göstermektedir. Havalandırmanın olduğu sonbahar döneminde ise radon konsantrasyonu düşük seviyelerde izlenmiştir. Böylece radon en yüksek kış aylarında görülmektedir. Yaz mevsiminin sonbahara göre yüksek olması pandemi dönemiyle (yani birimin insanlar tarafından kullanılması ve dolayısıyla birimde havalandırma yapılmasıyla) açıklanabilir. Pandemi döneminde kapı ve pencereler kapalı konumda kalmıştır. Sonbahar mevsiminde ise pandemi sonrası dönemde öğrenciler ve üniversite personelinin gelmesiyle birlikte radon değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum kapıların, pencerelerin kullanılması ve fakültenin sürekli olarak havalandırılmasıyla değerlendirilmiştir. Şekil 4.21'de ise D3 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.21. D3 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer zemin kat arkeoloji seminer salonunun yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.21'deki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu durum, pandemi kısıtlamasının kaldırılmasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.22'de D3 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılım sunulmaktadır.




Şekil 4.22. D3 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.22'de verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 1-500 Bq/m³ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 1001-1500 Bq/m³ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8311 verinin 7713'ü yani %93'ü Türkiye'de yasa ile yetkilendirilen TENMAK'ın işyerleri için belirlediği 1000 Bq/m³'ün üzerindedir. Şekil 4.22'de verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir. Ölçüm yapılan laboratuvar pandemi kısıtlamasının olduğu dönemde sadece sistemin kontrolü için odaya giriş-çıkış yapılarak kullanılmıştır. Pandemi kısıtlaması bittikten sonraki dönemde (4 Ekim 2021 tarihinden sonra) bu birim tekrar düzenli olarak kullanılmaya başlanmştır.

### 4.2.4. D4'ün bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü zemin katında bulunan laboratuvara D4 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 15 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu laboratuvarda 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Bu laboratuvarda doğal havalandırma sistemi mevcuttur. Şekil 4.23'te ölçüm sistemi D4'ün bulunduğu kimya bölümündeki laboratuvarın genel görünümü verilmektedir.



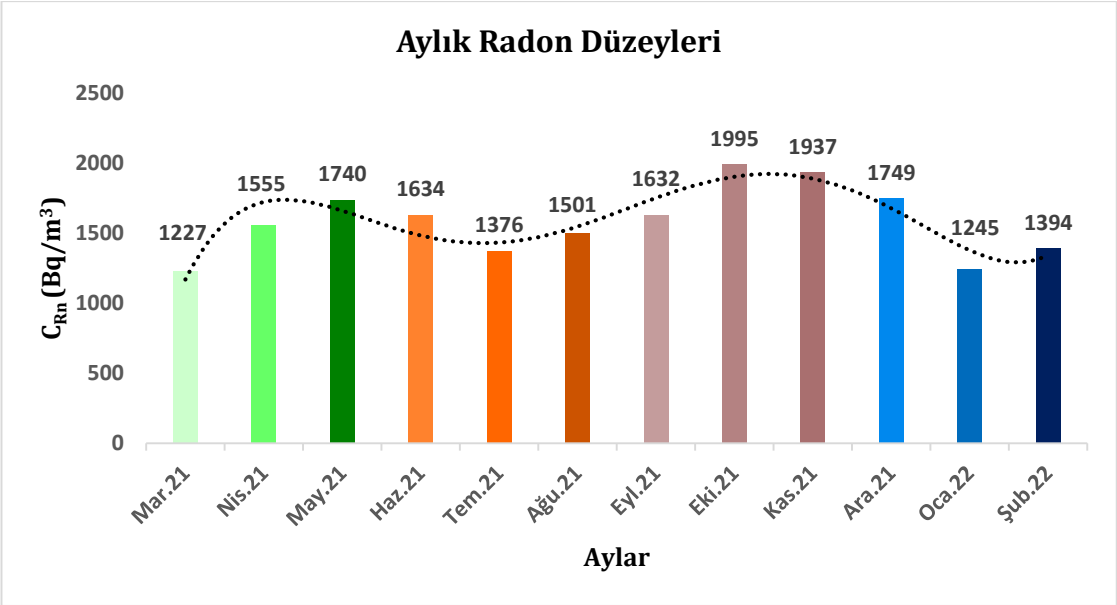
Şekil 4.23. Kimya laboratuvarının genel görünümü

Şekil 4.23'te gösterilen kimya bölümü laboratuvarına konumlandırılan ölçüm sistemi D4, odanın köşesine yerleştirilerek yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.24'te ise D4 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



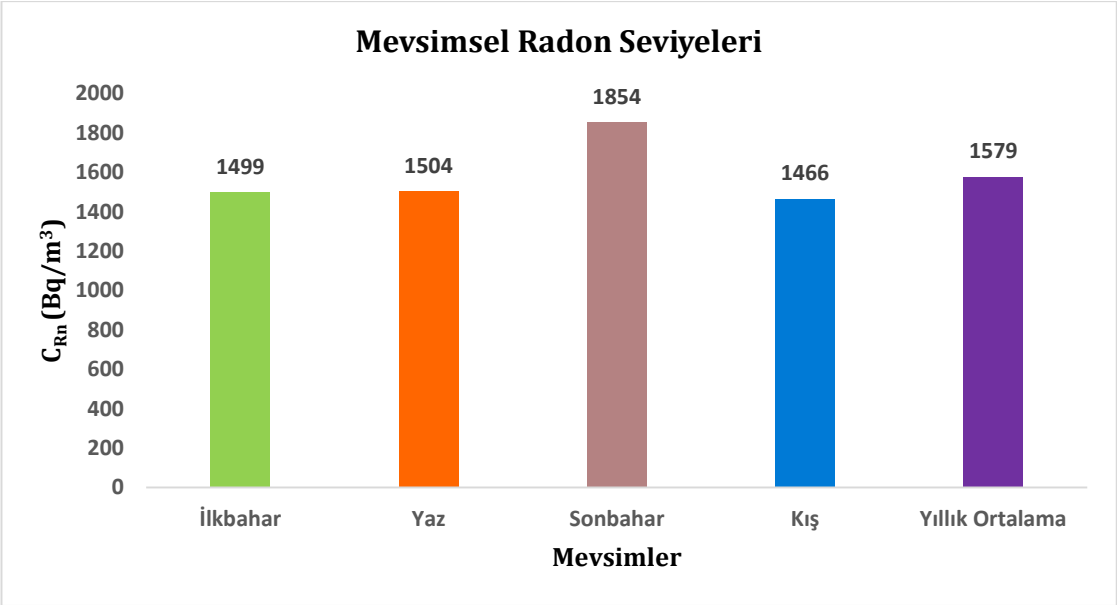

Şekil 4.24. Online radon ölçüm sistemi D4

Bir yıl boyunca toplamda 8252 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16504 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 299 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 4613 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 1579 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri ise 647 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.25'te D4 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



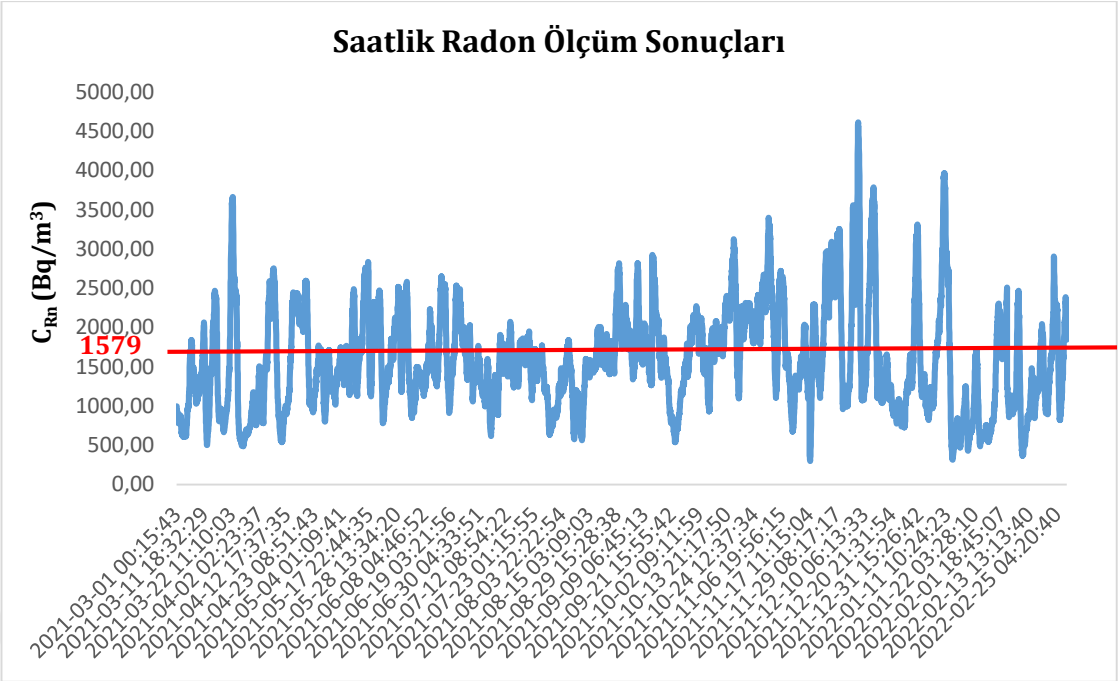

Şekil 4.25. D4 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.25'te en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Ekim ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 1995 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Mart ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 1227 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Kimya bölümü tüm ölçüm sistemleri içerisinde en yüksek 2.radon konsantrasyonuna sahiptir. Burada bulunan kimya laboratuvarı eski Ortak Sağlık ve Güvenlik birimi olarak kullanılmış ve daha sonrasında kimya bölümüne tahsis edilmiştir. Odanın 1 adet penceresi olup üniversitenin olimpik yüzme havuzu tarafına bakmaktadır. Kapı tarafı ise kimya bölümünün orta tarafında kalan iç duvar kısmına bakmaktadır. Şekil 4.26'da ise D4 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



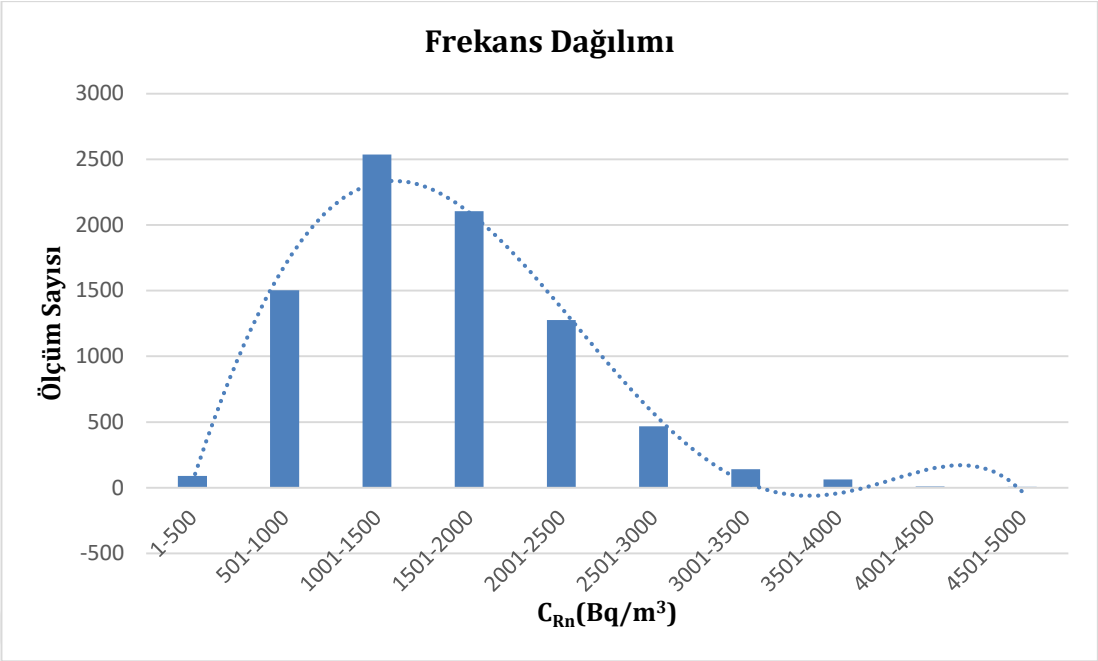

Şekil 4.26. D4 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.26'da verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının sonbahar mevsiminde en yüksek 1854 Bq/m$^3$, kış mevsiminde ise en düşük 1466 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine doğru çok az bir artış olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine doğru bir artış eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kışa geçişte ise radon konsantrasyonunun düştüğü söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa uymamaktadır. Bu durum ilkbahar mevsiminin pandemi kısıtlama döneminde olması ve sonbahar döneminin ise pandemi kısıtlama sonrasına denk gelmesi (yani birimin insanlar tarafından kullanılması ve dolayısıyla birimde havalandırma yapılmasıyla) açıklanabilir. Şekil 4.27'de ise D4 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.27. D4 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer zemin kat kimya laboratuvarındaki yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.27'deki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında sürekli artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Kimya laboratuvarında gerçekleştirilen bu ölçümler neticesinde odanın ölçüm periyodu boyunca hiç kullanılmadığı ve gerekli bir havalandırma sisteminin olmamasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.28'de D4 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.




Şekil 4.28. D4 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.28'de verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 4501-5000 Bq/m$^3$ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 1001-1500 Bq/m$^3$ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8252 verinin 6653'ü yani ~%81'i Türkiye'de yasa ile yetkilendirilen TENMAK'ın işyeri için belirlediği 1000 Bq/m$^3$'ün üzerindedir. Şekil 4.28'de verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir. Ölçüm yapılan laboratuvar pandemi kısıtlamasının olduğu dönemde sadece sistemin kontrolü için odaya giriş-çıkış yapılarak kullanılmıştır. Pandemi kısıtlaması bittikten sonraki dönemde (4 Ekim 2021 tarihinden sonra) bu birim yine kullanılmamıştır.

### 4.2.5. D5'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü 1. katında bulunan seminer salonuna D5 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 27 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu seminer salonunda 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Buradaki seminer salonunda doğal havalandırma mevcuttur. Şekil 4.29'da ölçüm sistemi D5'in bulunduğu seminer salonunun genel görünümü verilmektedir.



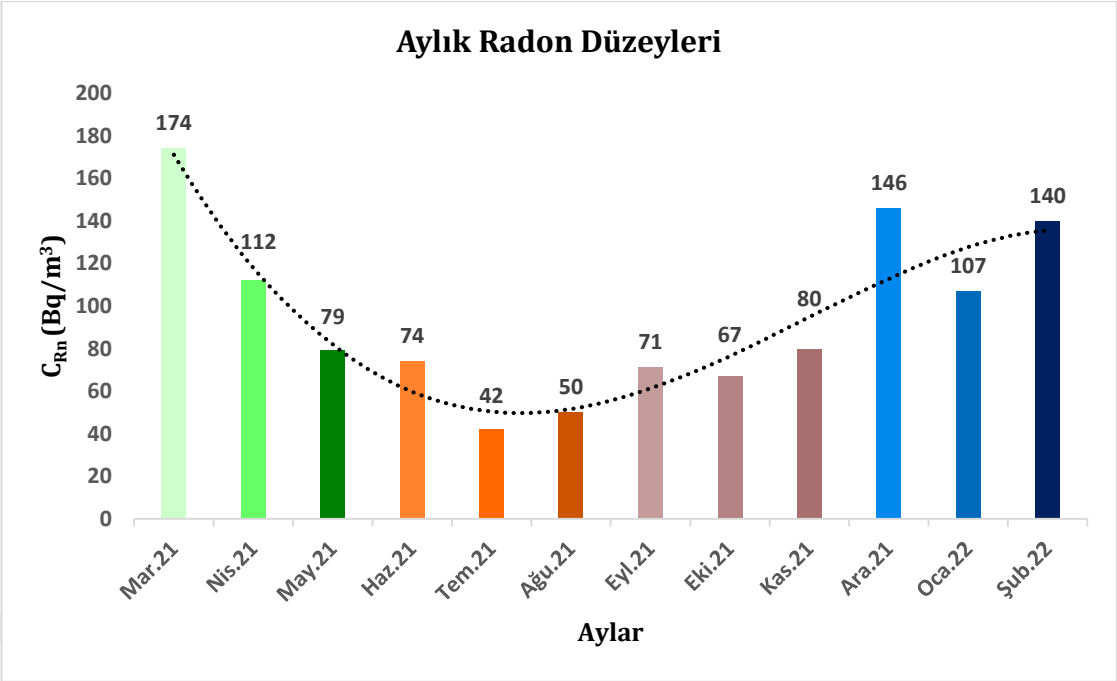
Şekil 4.29. Fizik bölümü seminer salonunun giriş kapısından görünümü

Şekil 4.29'da gösterilen fizik bölümü seminer salonuna konumlandırılan ölçüm sistemi D5, odanın köşesine yerleştirilerek yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.30'da ise D5 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



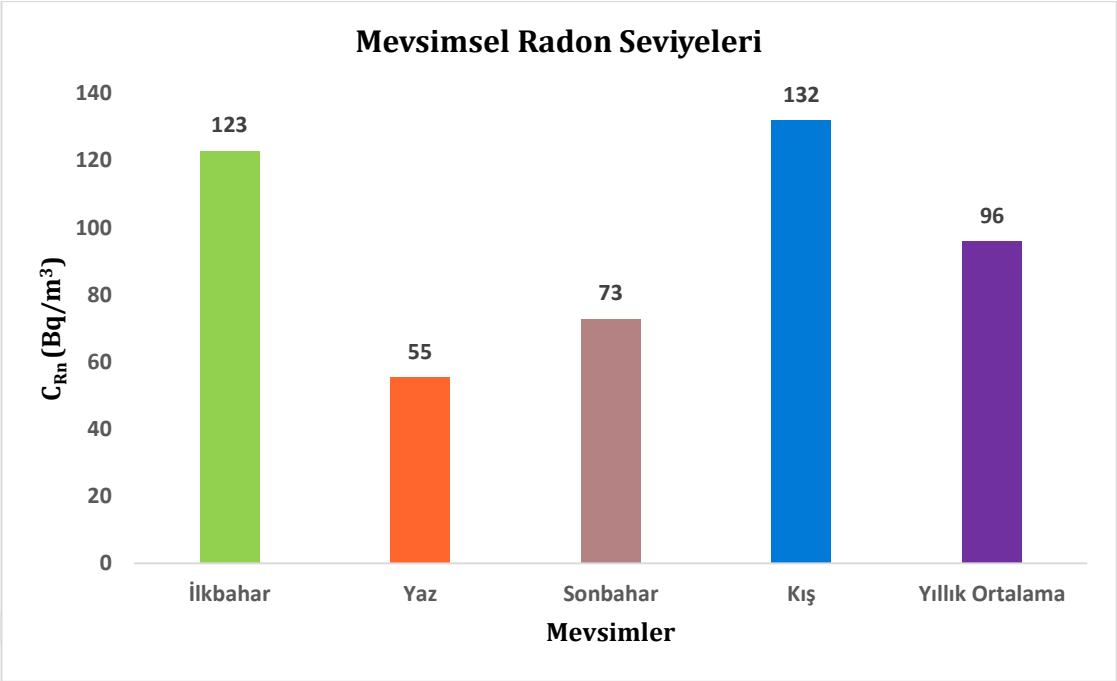

Şekil 4.30. Online radon ölçüm sistemi D5

Bir yıl boyunca toplamda 7925 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 15850 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 8 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 324 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 96 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri 57 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.31'de D5 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



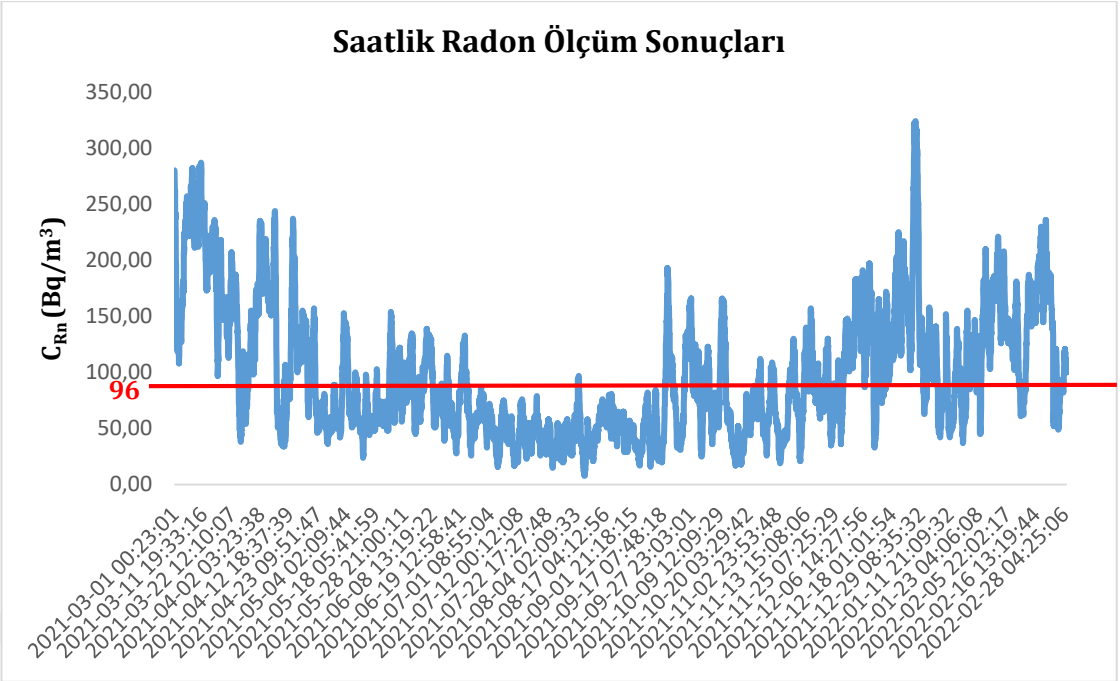

Şekil 4.31. D5 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.31'de en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Mart ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 174 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Temmuz ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 42 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Pandemi kısıtlamasının olduğu dönemde bu seminer salonu kullanılmamıştır. Öğrenciler, derslerini 4 Ekim 2021 tarihi itibariyle yüz yüze almaya başlamış ve bu seminer salonu aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle bu seminer salonuna giriş-çıkış durumları gerçekleşerek, doğal havalandırma yapılmıştır. Şekil 4.32'de ise D5 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



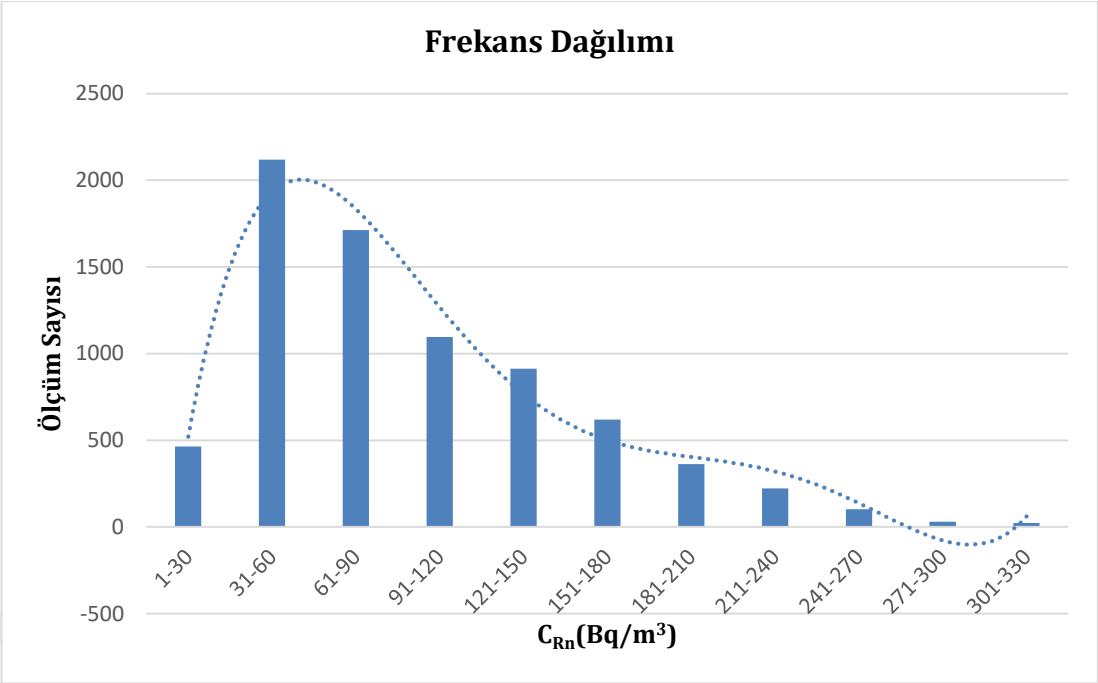

Şekil 4.32. D5 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.32'de verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının kış mevsiminde en yüksek 132 Bq/m$^3$, yaz mevsiminde ise en düşük 55 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine geçişte bir düşüş olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine geçişte bir artış eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kışa doğru ise radon konsantrasyonunun neredeyse 2 katına çıktığı söylenebilir. Bu birimden elde edilen radon sonuçları, yazdan kışa doğru mevsim normallerinde izlenmiştir. Şekil 4.33'te ise D5 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.33. D5 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer 1.kat fizik seminer salonunun yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.33'teki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında beklenildiği üzere osilasyonlu bir yapı gösterdiği yani zamana bağlı olarak artıp azalan bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Burada ölçüm yapılan fizik seminer salonunun 1.katta olması, kapı ve pencerelerinin sürekli olarak açık olması radonun düşük değerde çıkmasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.34'te D5 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.




Şekil 4.34. D5 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.34'te verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 301-330 Bq/m$^3$ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 31-60 Bq/m$^3$ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 7925 verinin 3090'ı yani %39'u Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.34'te verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.6. D6'nın bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi 1.katında bulunan Türker Taşaltın Konferans Salonuna D6 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 160 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu konferans salonunda 7 adet pencere ve 2 adet kapı bulunmaktadır. Ayrıca buradaki salonda hem doğal hem de klimalı havalandırma sistemi bulunmaktadır. Şekil 4.35'te ölçüm sistemi D6'nın bulunduğu konferans salonunun genel görünümü verilmektedir.



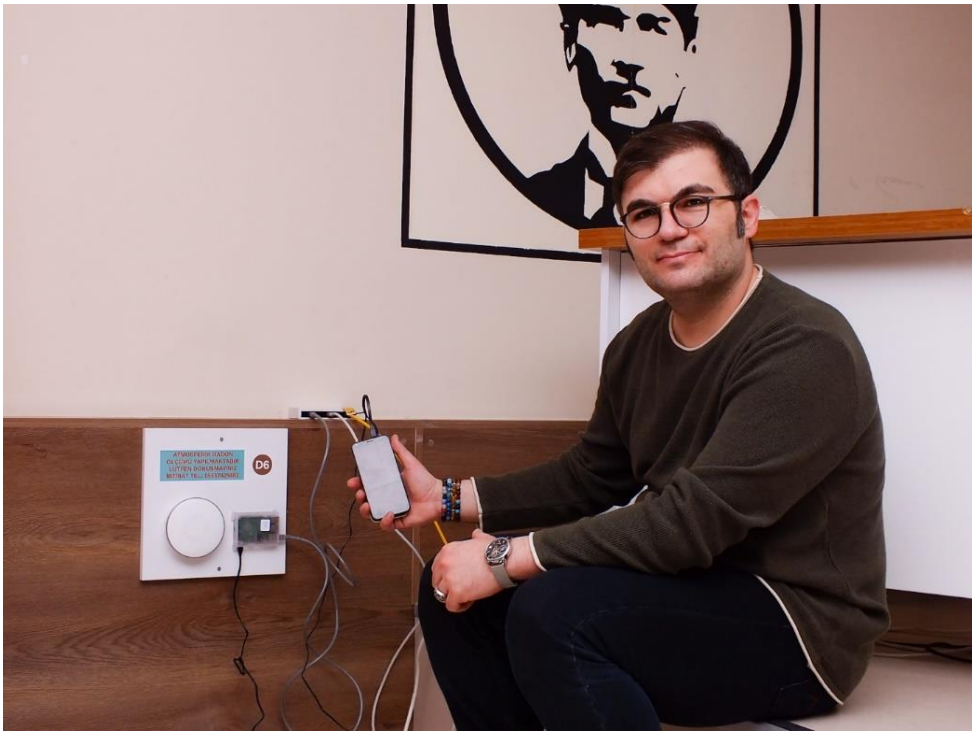
Şekil 4.35. Konferans salonunun görünümü

Şekil 4.35'te gösterilen konferans salonuna konumlandırılan ölçüm sistemi D6, salonun kürsü kısmının yakınına yerleştirilerek yerden 0,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.36'da ise D6 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



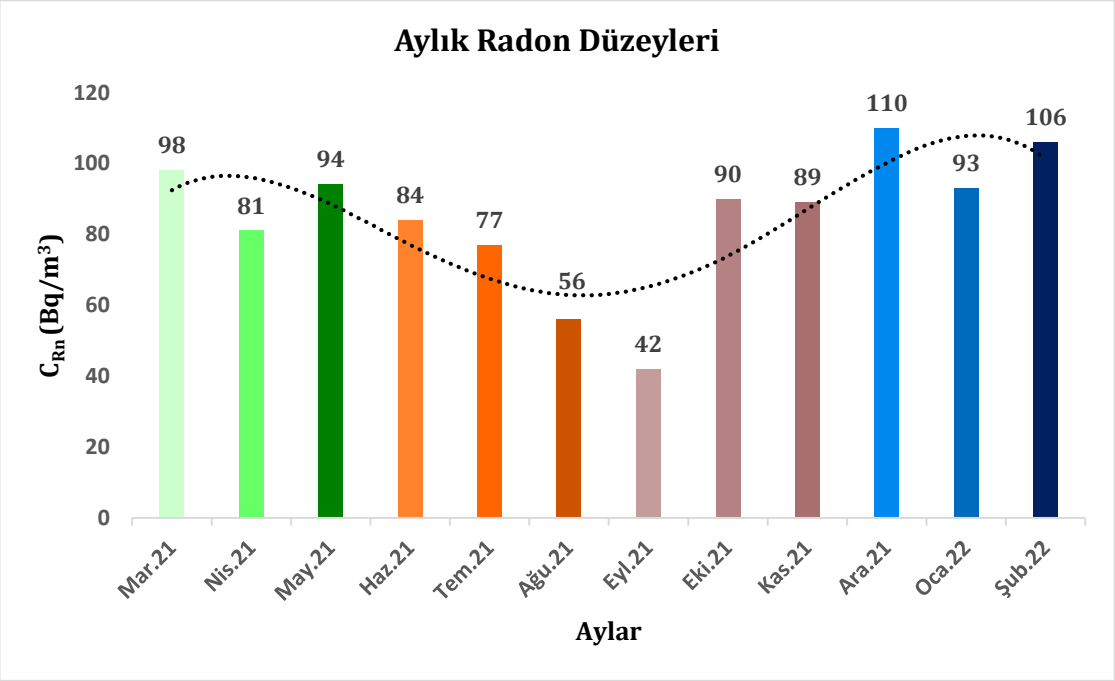

Şekil 4.36. Online radon ölçüm sistemi D6

Şekil 4.37'de Türker Taşaltın Konferans salonunda bulunan cihaz kontrol edilirken yapılan çalışma görülmektedir.



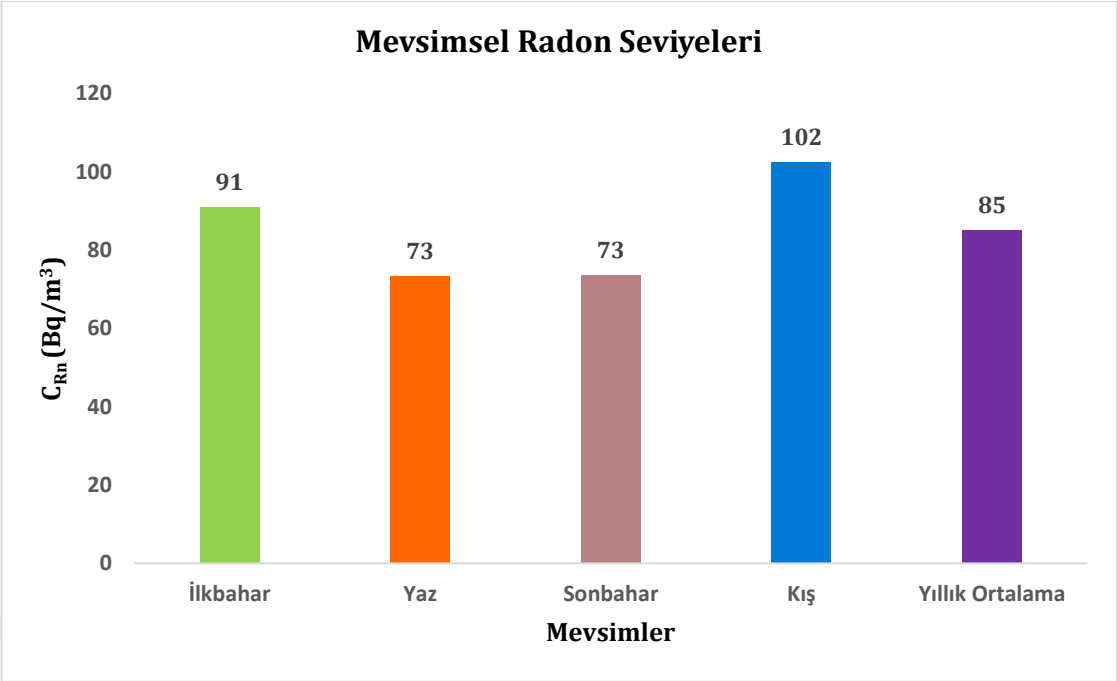
Şekil 4.37. D6 ölçüm sisteminin kontrolü

Bir yıl boyunca toplamda 8103 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16206 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 1 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 225 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 85 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri 39 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.38'de D6 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



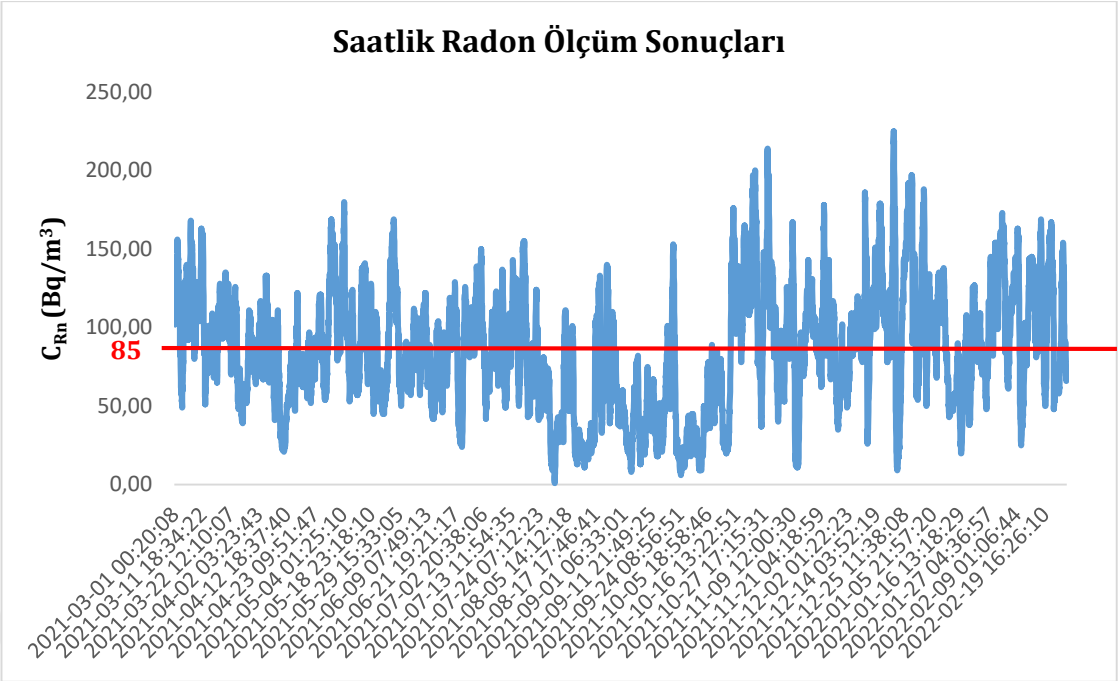

Şekil 4.38. D6 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.38'de en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Aralık ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 110 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Eylül ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 42 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Şekil 4.39'da ise D6 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



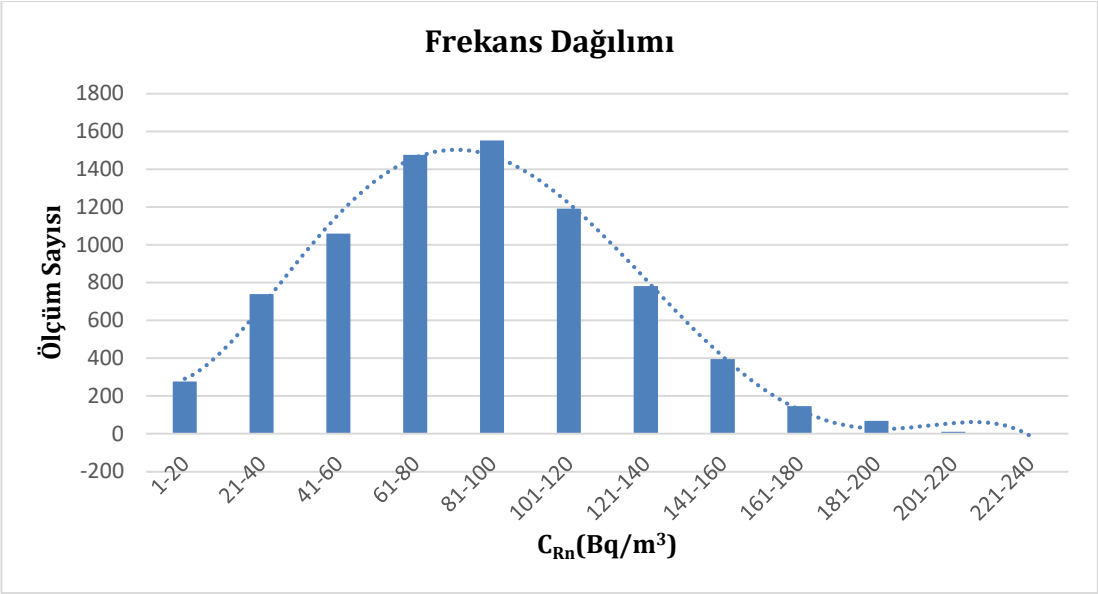

Şekil 4.39. D6 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.39'da verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının kış mevsiminde en yüksek 102 Bq/m$^3$, yaz ve sonbahar mevsimlerinde ise en düşük 73 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine doğru bir düşüş olduğu, yaz mevsimi ve sonbahar mevsiminin değişmeden aynı kaldığı, sonbahardan kışa geçişte ise radon konsantrasyonlarının arttığı söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen radon davranışına kısmi olarak uymaktadır. Şekil 4.40'ta ise D6 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.40. D6 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer 1.kat Türker Taşaltın konferans salonunun yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.40'taki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Ölçüm yapılan Türker Taşaltın Konferans Salonu pandemi kısıtlama ve sonrası dönemde neredeyse hiç kullanılmamıştır. Bu durumdan dolayı radon ortalaması 100 Bq/m$^3$ civarında bir değişim göstermiştir. Şekil 4.41'de D6 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.




Şekil 4.41. D6 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.41'de verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 221-240 $Bq/m^3$ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 81-100 $Bq/m^3$ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8103 verinin 2805'i yani %35'i Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 $Bq/m^3$'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.41'de verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.7. D7'nin bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Türk Dili ve Edebiyatı bölümünde bulunan bir ofise D7 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 15 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu ofiste 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Dinlenme odasında sadece doğal havalandırma mevcuttur. Şekil 4.42'de ölçüm sistemi D7'nin bulunduğu dinlenme odasının genel görünümü verilmektedir.



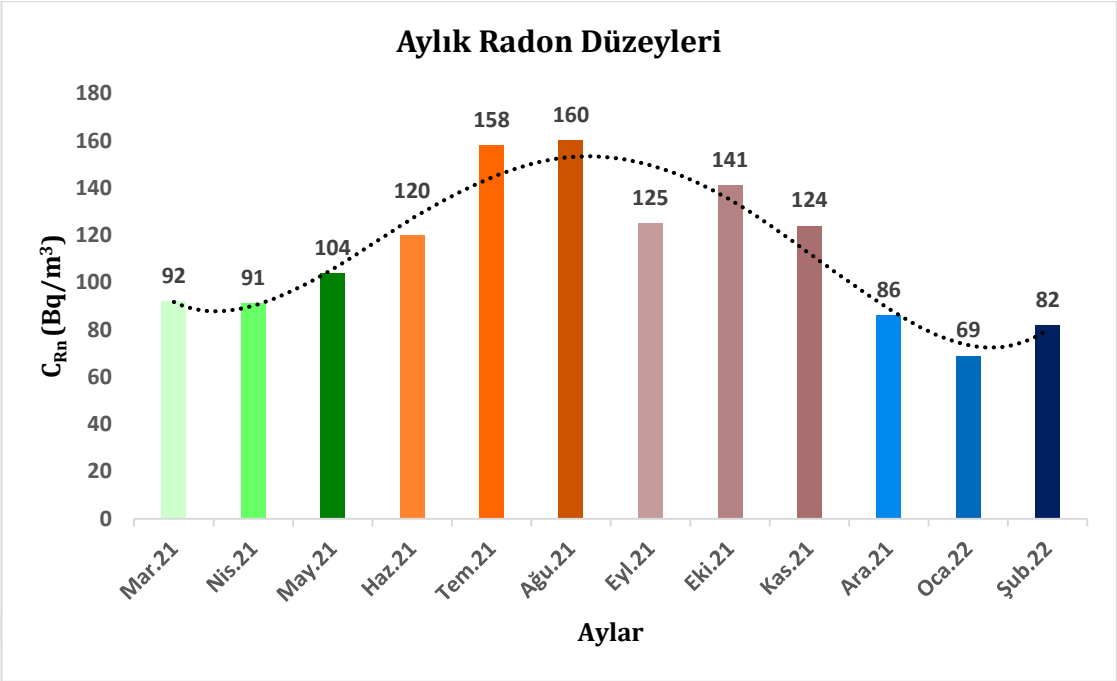
Şekil 4.42. Türk Dili ve Edebiyatı bölümünde bulunan ofis

Şekil 4.42'de gösterilen Türk Dili ve Edebiyatı bölümünde bulunan bir ofise konumlandırılan ölçüm sistemi D7, odanın köşesine yerleştirilerek yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.43'te ise D7 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



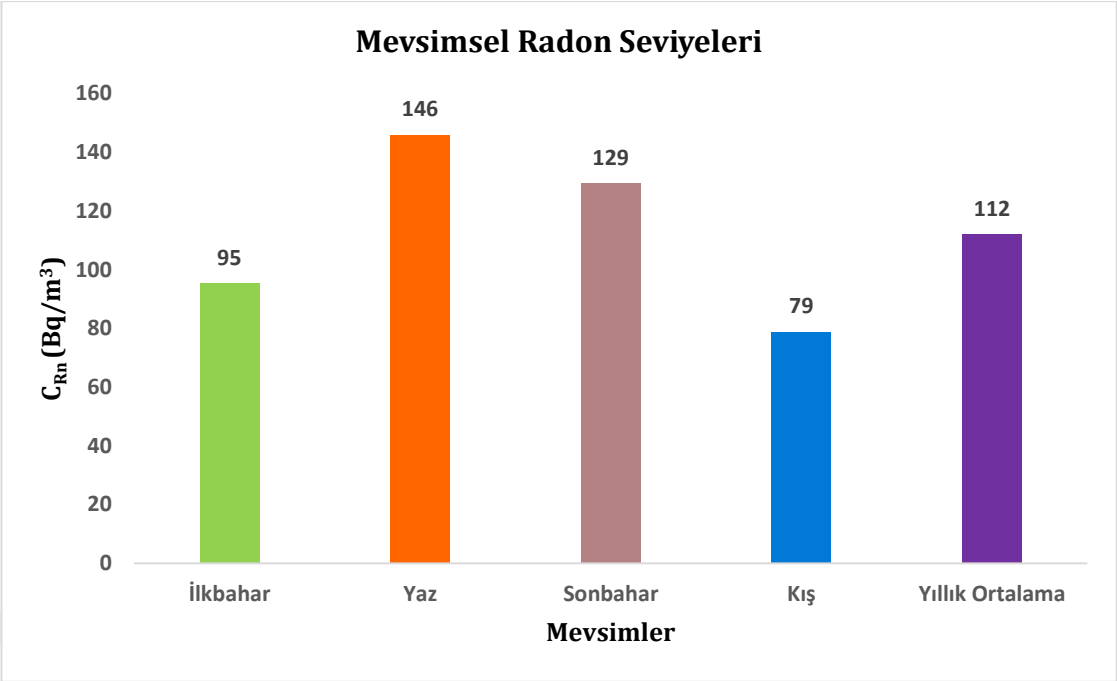

Şekil 4.43. Online radon ölçüm sistemi D7

Bir yıl boyunca toplamda 8107 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16214 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 18 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 305 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 112 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri ise 53 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.44'te D7 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



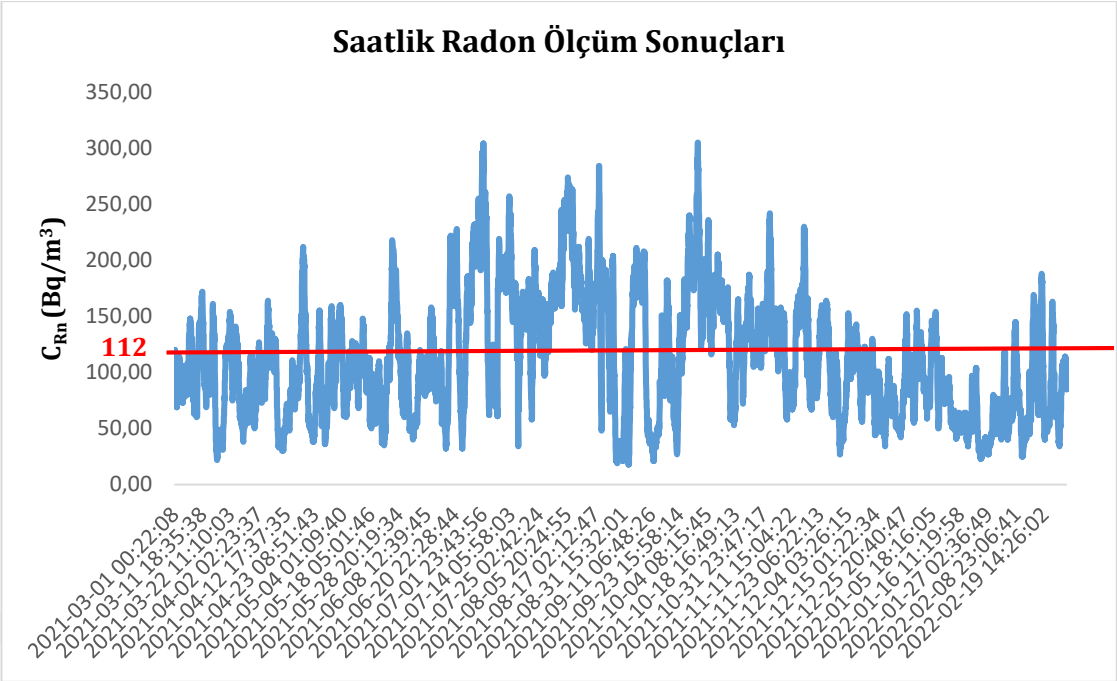

Şekil 4.44. D7 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.44'te en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Ağustos ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 160 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2022 yılı Ocak ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 69 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Ölçüm yapılan Türk-Dili ve Edebiyatı bölümünün dinlenme odası, sürekli olarak açık tutulmuştur. Öğrenciler için uzaktan devam eden eğitimler, ders hocaları ve üniversite memurları için (kronik rahatsızlığı olanlar hariç) esnek mesai uygulamasının yapıldığı döneme karşılık gelmiştir. Bu durumdan dolayı ders hocaları tarafından sürekli olarak kullanılan odanın doğal havalandırma uygulaması yapılmıştır. Şekil 4.45'de ise D7 radon ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



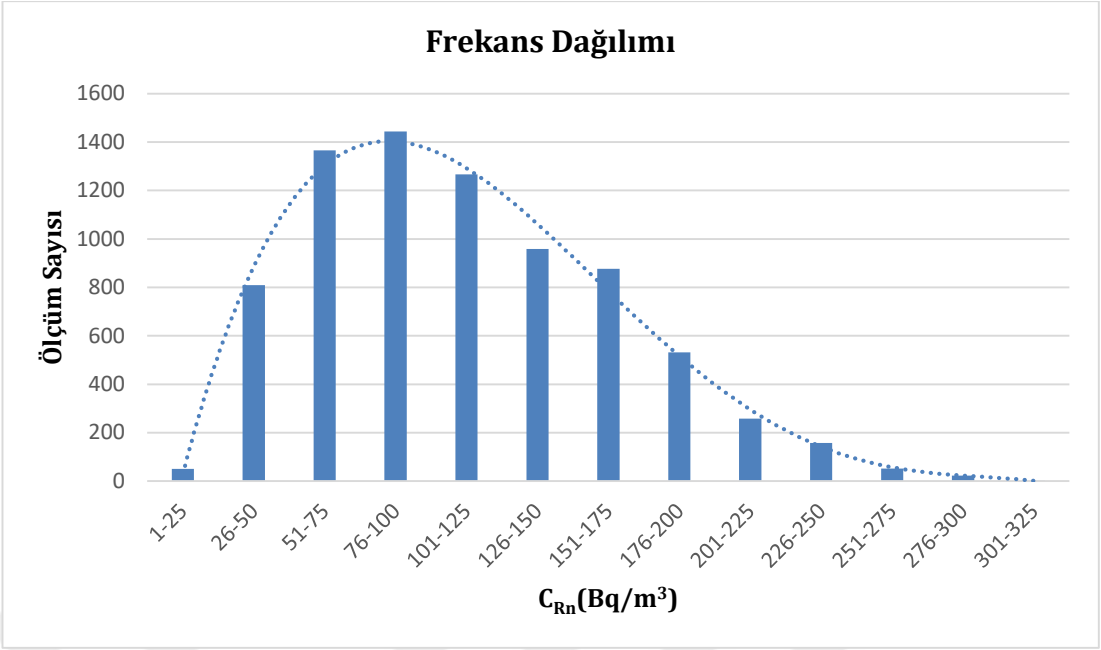

Şekil 4.45. D7 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.45'te verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının yaz mevsiminde en yüksek 146 Bq/m$^3$, kış mevsiminde ise en düşük 79 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine doğru bir artış olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine doğru bir düşüş eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kış mevsimine geçişte ise radon konsantrasyonlarının düştüğü söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa uymamaktadır. Şekil 4.46'da ise D7 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.46. D7 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer 1.kat Türk-Dili ve Edebiyatı bölümünün yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.46'daki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Şekil 4.47'de D7 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.




Şekil 4.47. D7 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.47'de verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 301-325 Bq/m³ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 76-100 Bq/m³ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8107 verinin 4316'sı yani %53'ü Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m³'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.47'de verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.8. D8'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Matematik bölümünde bulunan bir ofise D8 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 19 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu mekânda 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Bu birimde doğal havalandırmanın yanı sıra duvar tipi bir klima da mevcuttur. Şekil 4.48'de ölçüm sistemi D8'in bulunduğu ofisin genel görünümü verilmektedir.



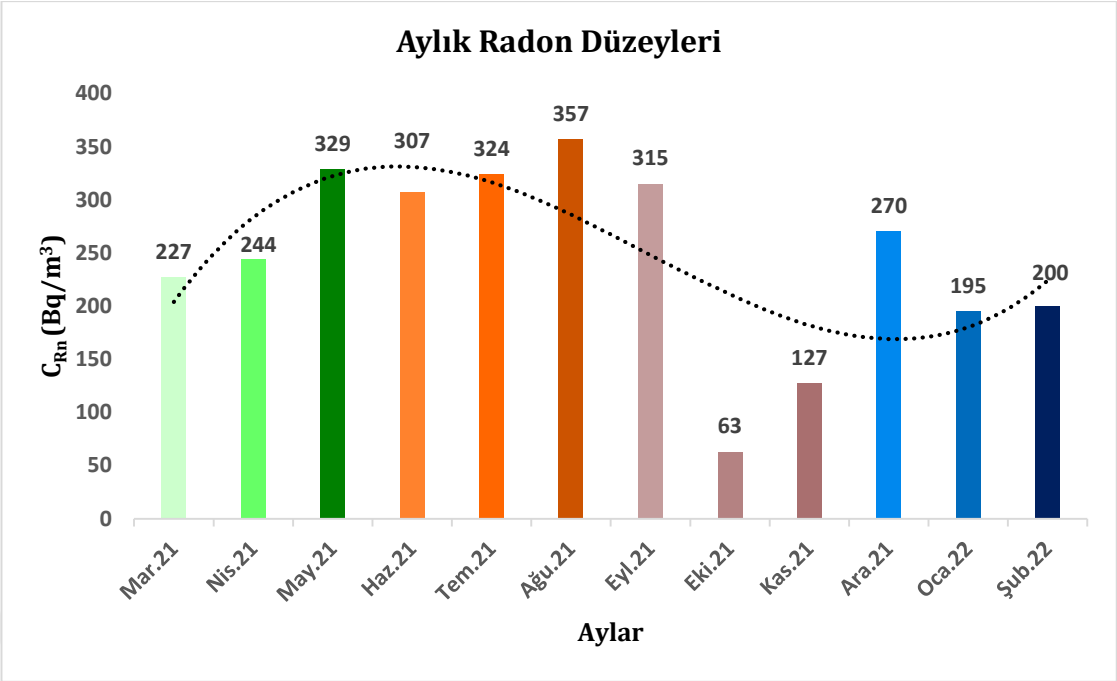
Şekil 4.48. Matematik bölümünde bulunan çalışma ofisi

Şekil 4.48'de gösterilen matematik bölümü ofisine konumlandırılan ölçüm sistemi D8, odanın tam ortasına yerleştirilerek yerden 0,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.49'da ise D8 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



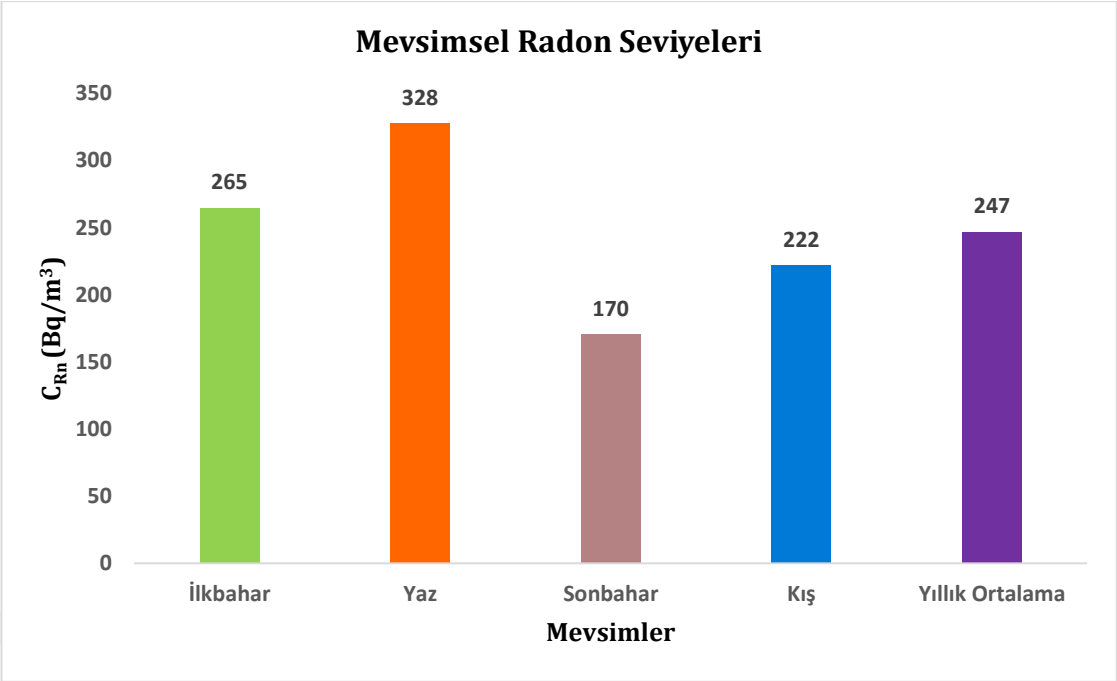

Şekil 4.49. Online radon ölçüm sistemi D8

Bir yıl boyunca toplamda 8107 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16214 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 13 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 581 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 247 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri 109 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.50'de D8 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



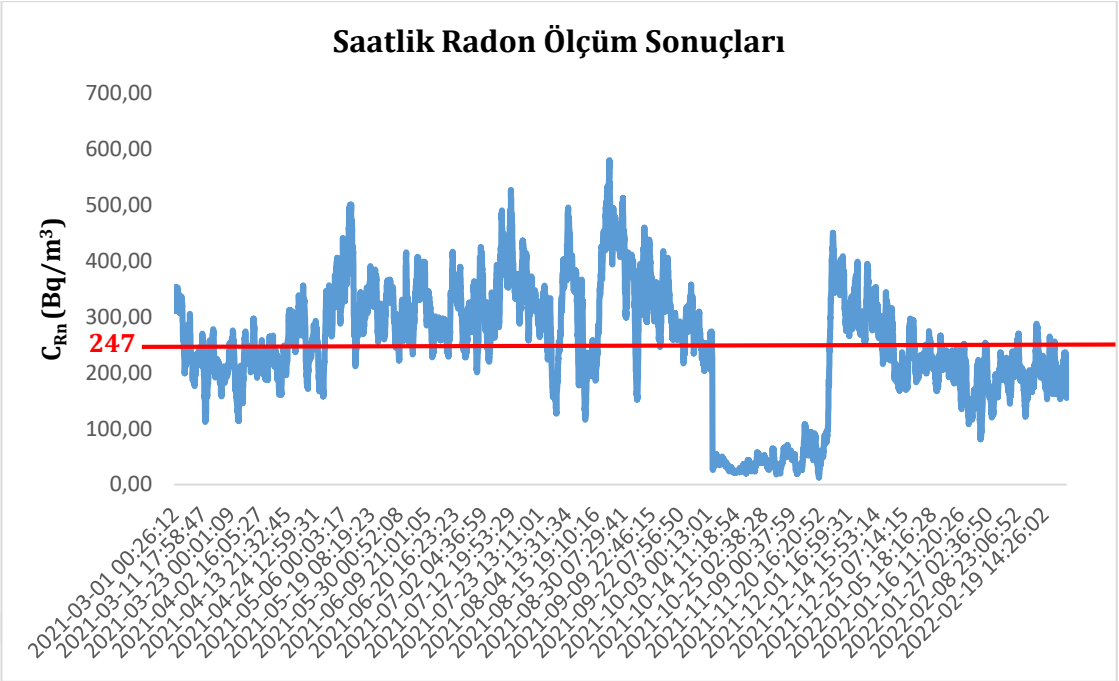

Şekil 4.50. D8 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.50'de en yüksek radon konsantrasyonunun 2021 yılı Ağustos ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 357 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Ekim ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 63 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Şekil 4.51'de ise D8 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



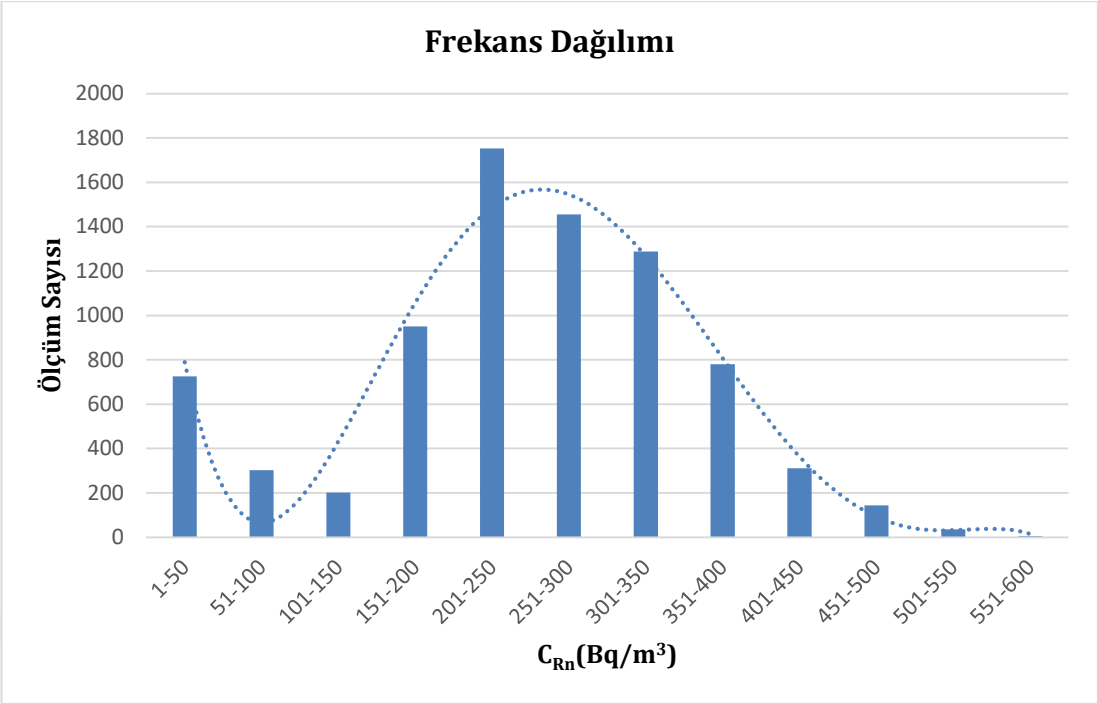

Şekil 4.51. D8 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.51'de verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının yaz mevsiminde en yüksek 328 Bq/m$^3$, sonbahar mevsiminde ise en düşük 170 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine geçişte bir artış olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine geçişte bir düşüş eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kış mevsimine geçişte ise radon konsantrasyonlarının arttığı söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa uymamaktadır. Şekil 4.52'de ise D8 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.52. D8 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer 1.kat matematik bölümündeki çalışma ofisinin yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.52'deki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu durum pandemi kısıtlamasının kaldırılmasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.53'te D8 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.




Şekil 4.53. D8 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.53'te verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 551-600 Bq/m³ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 201-250 Bq/m³ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8107 verinin 4439'u yani %55'i 100 Bq/m³ ile 300 Bq/m³ arasında olup ölçümlerin %87'si ise Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m³'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.53'te verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.9. D9'un bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya bölümünde bulunan bilgisayar laboratuvarına D9 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 50 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu laboratuvarda 3 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Ayrıca bu laboratuvarda doğal havalandırma mevcuttur. Şekil 4.54'te ölçüm sistemi D9'un bulunduğu bilgisayar laboratuvarının genel görünümü verilmektedir.



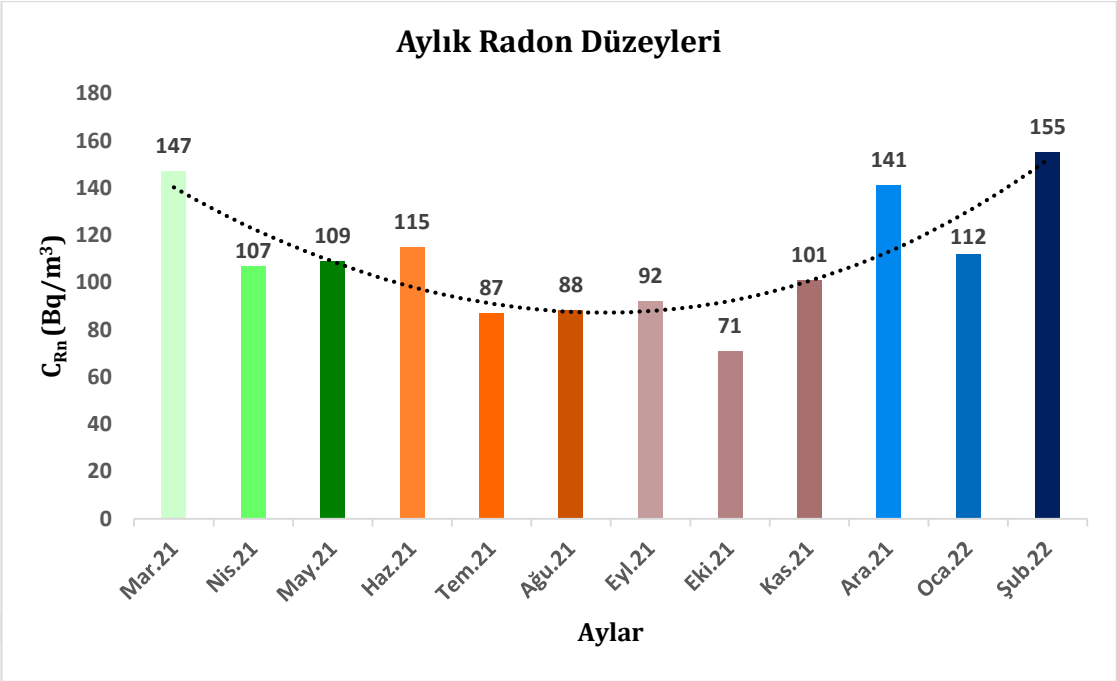

Şekil 4.54. Kimya bölümü bilgisayar laboratuvarı

Şekil 4.54'te gösterilen kimya bölümü bilgisayar laboratuvarına konumlandırılan ölçüm sistemi D9, odanın köşesine yerleştirilerek yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.55'te ise D9 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



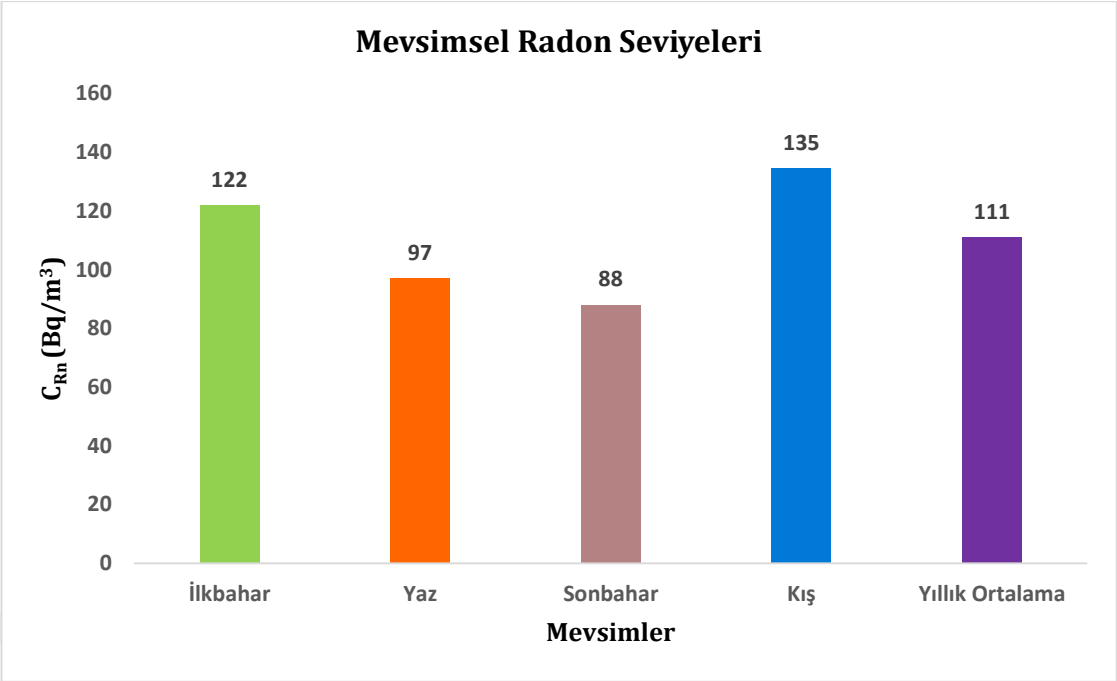

Şekil 4.55. Online radon ölçüm sistemi D9

Bir yıl boyunca toplamda 8143 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16286 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 16 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 274 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 111 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri ise 47 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.56'da D9 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



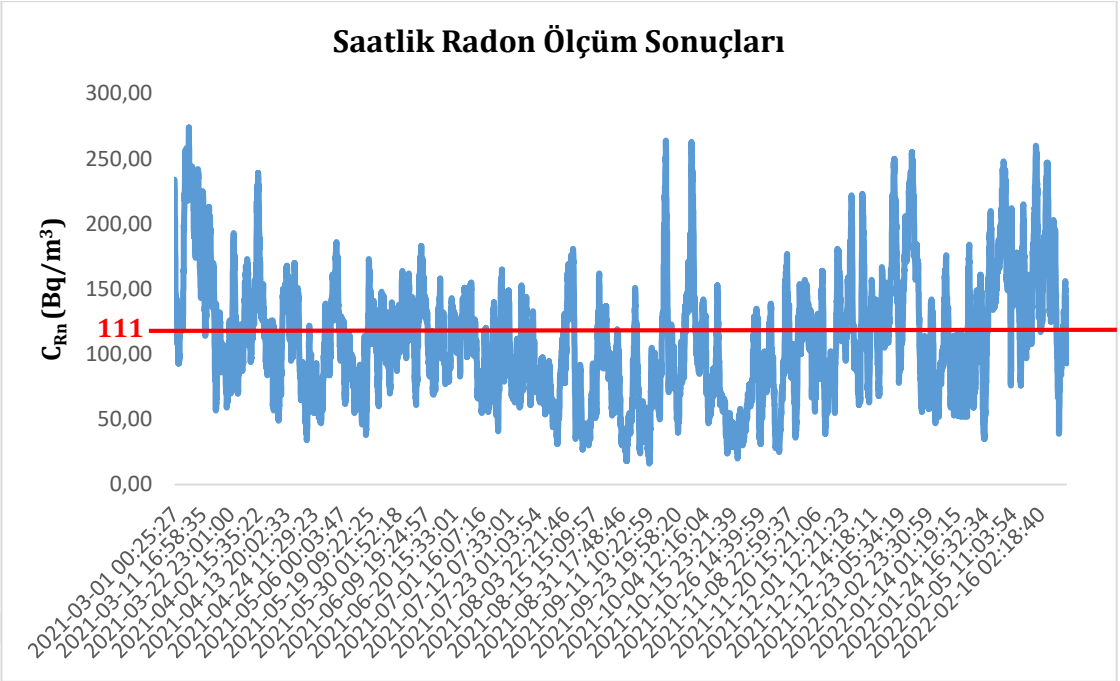

Şekil 4.56. D9 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.56'da en yüksek radon konsantrasyonu 2022 yılı Şubat ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 155 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Ekim ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 71 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Şekil 4.57'de ise D9 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



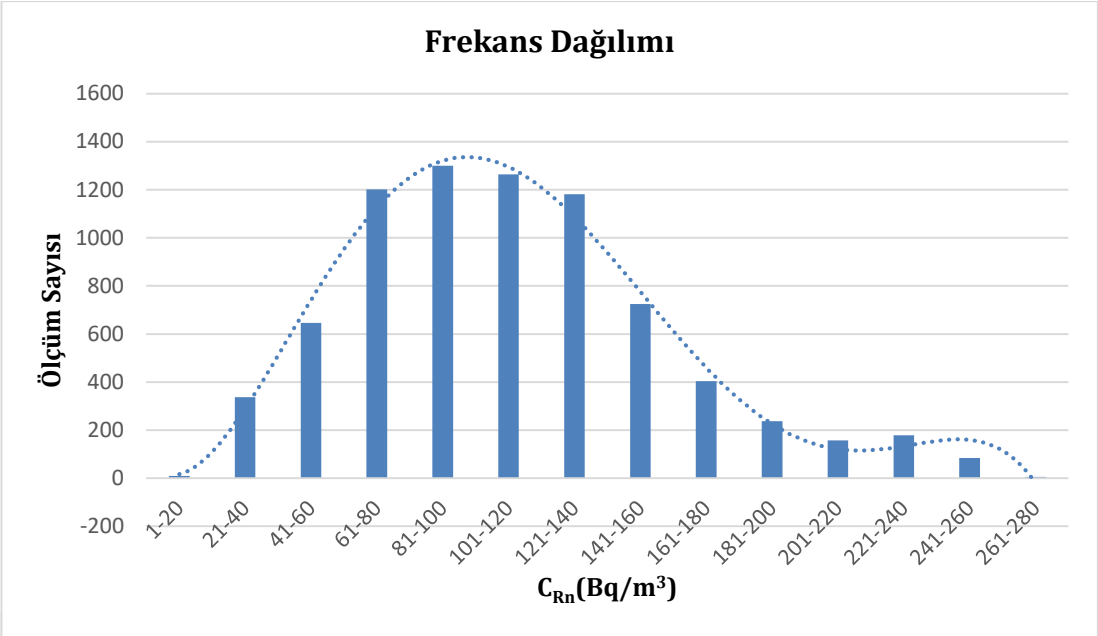

Şekil 4.57. D9 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.57'de verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının kış mevsiminde en yüksek 135 Bq/m$^3$, sonbahar mevsiminde ise en düşük 88 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine doğru bir düşüş eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kış mevsimine geçişte ise radonun arttığı söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa kısmi olarak uymaktadır. Şekil 4.58'de ise D9 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.58. D9 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer 2.kat kimya bölümü bilgisayar laboratuvarının yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.58'deki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında artma eğilimde olduğu söylenebilir. Buradaki bilgisayar laboratuvarı Pandemi kısıtlamasının olduğu esnek çalışma döneminde kullanılmamıştır. Radon ortalamasının mevsimsel olarak azalması beklenirken tam tersi bir durum gerçekleşmiştir. Bu durum fakültenin 2.katında bulunan bilgisayar laboratuvarının havalandırılmamasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.59'da D9 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.




Şekil 4.59. D9 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.59'da verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 261-280 Bq/m$^3$ arasında olduğu, en fazla radon ölçüm sayısının ise 81-100 Bq/m$^3$ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8143 verinin 4490'ı yani %55'i Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.59'da verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.10. D10'un bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoloji bölümünde bulunan seminer salonuna D10 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 35 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu seminer salonunda 2 adet pencere ve 2 adet kapı bulunmaktadır. Buradaki seminer salonunda doğal havalandırma mevcuttur. Şekil 4.60'ta ölçüm sistemi D10'un bulunduğu biyoloji bölümü seminer salonunun genel görünümü verilmektedir.



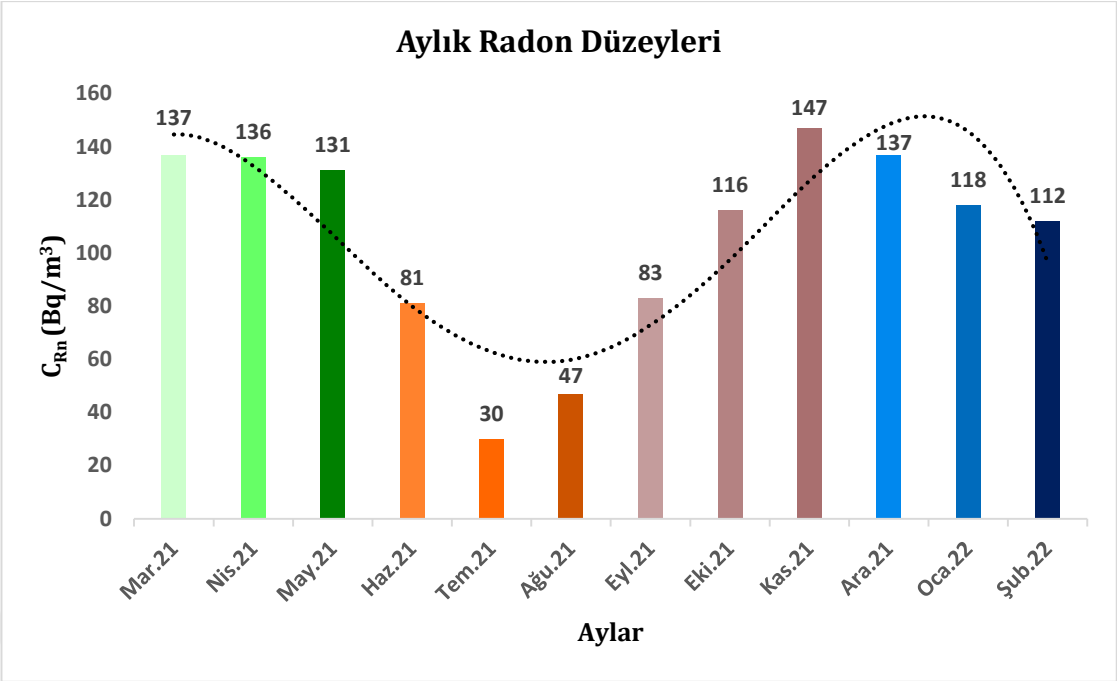
Şekil 4.60. Biyoloji bölümü seminer salonu

Şekil 4.60'ta gösterilen biyoloji bölümü seminer salonuna konumlandırılan ölçüm sistemi D10, odanın tam ortasına yerleştirilerek yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.61'de ise D10 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



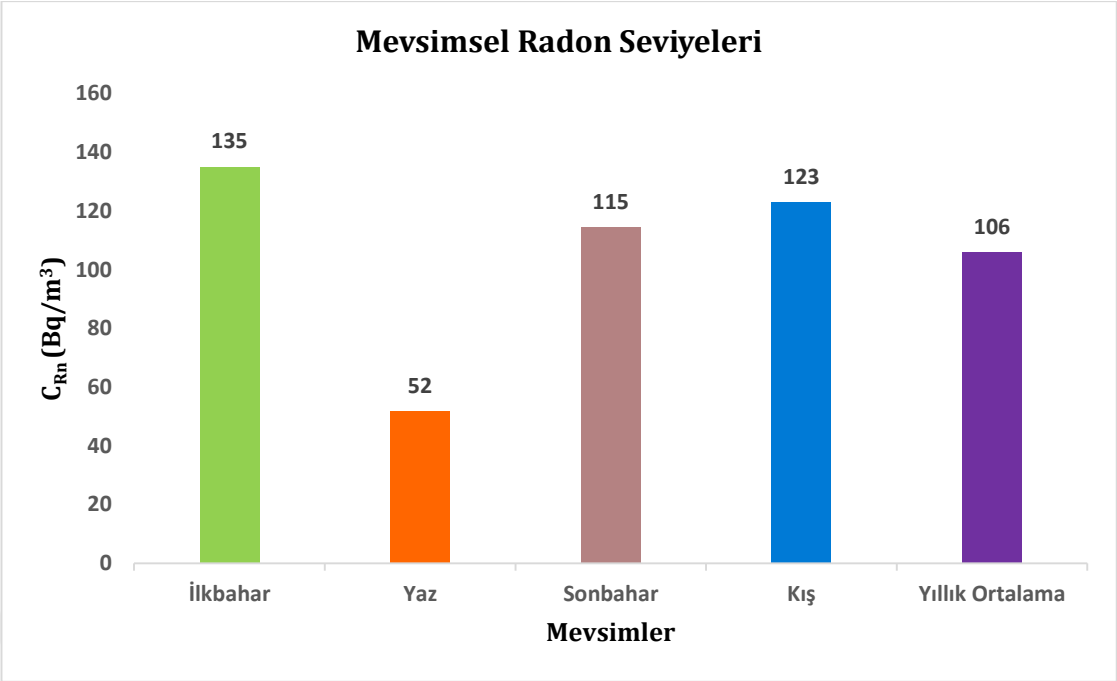

Şekil 4.61. Online radon ölçüm sistemi D10

Bir yıl boyunca toplamda 8049 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16098 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 7 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 352 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 106 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri ise 68 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.62'de D10 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



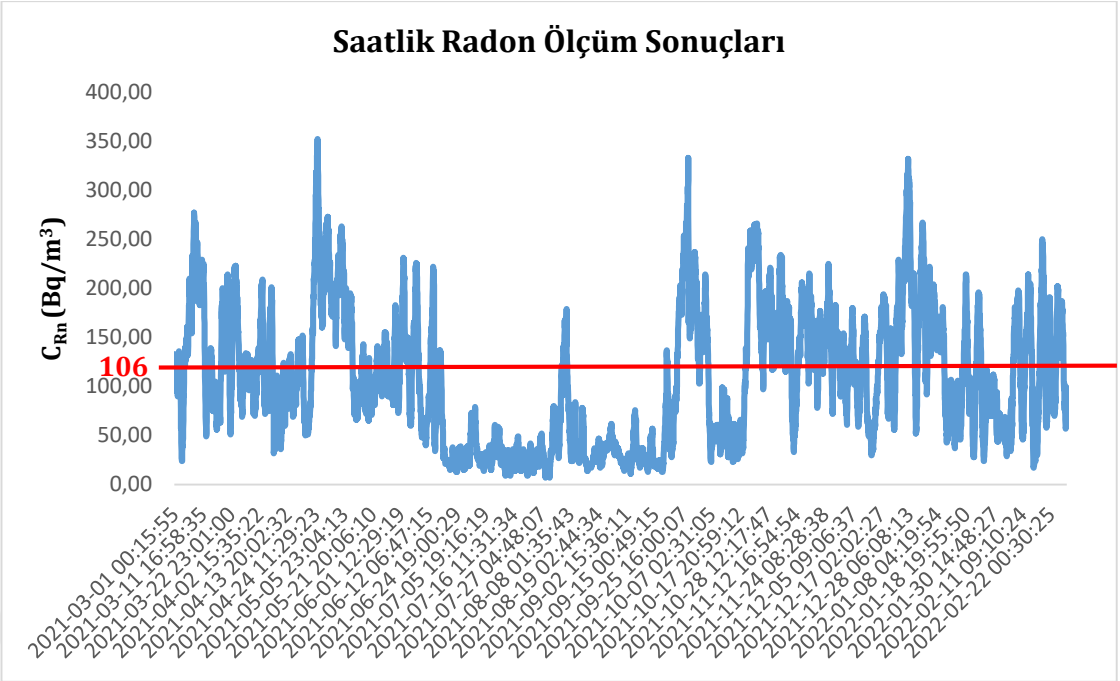

Şekil 4.62. D10 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.62'de en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Kasım ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 147 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Temmuz ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 30 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Şekil 4.63'te ise D10 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



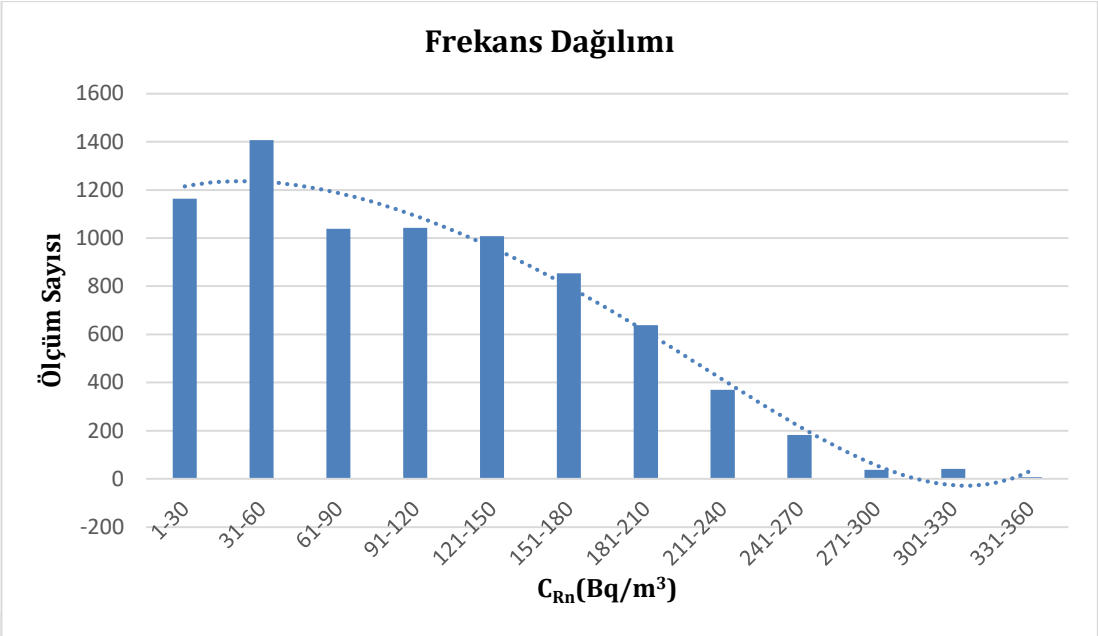

Şekil 4.63. D10 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.63'te verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının ilkbahar mevsiminde en yüksek 135 Bq/m$^3$, yaz mevsiminde ise en düşük 52 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine geçişte bir düşüş eğiliminde olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine geçişte ise bir artış eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahar ve kış mevsimindeki radon konsantrasyonlarının birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa uymamaktadır. Şekil 4.64'te ise D10 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.64. D10 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer 2.kat biyoloji bölümü toplantı salonunun yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.64'teki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında artma eğilimde olduğu söylenebilir. Buradaki seminer salonu, pandemi kısıtlama döneminde esnek mesai uygulamasının yapıldığı zamanda öğretim üyeleri tarafından kısmi olarak kullanılmıştır. Bu ölçüm noktasında radon, yaz döneminde düşme, güz ve kış döneminde ise artma eğilimindedir. Şekil 4.65'te D10 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.

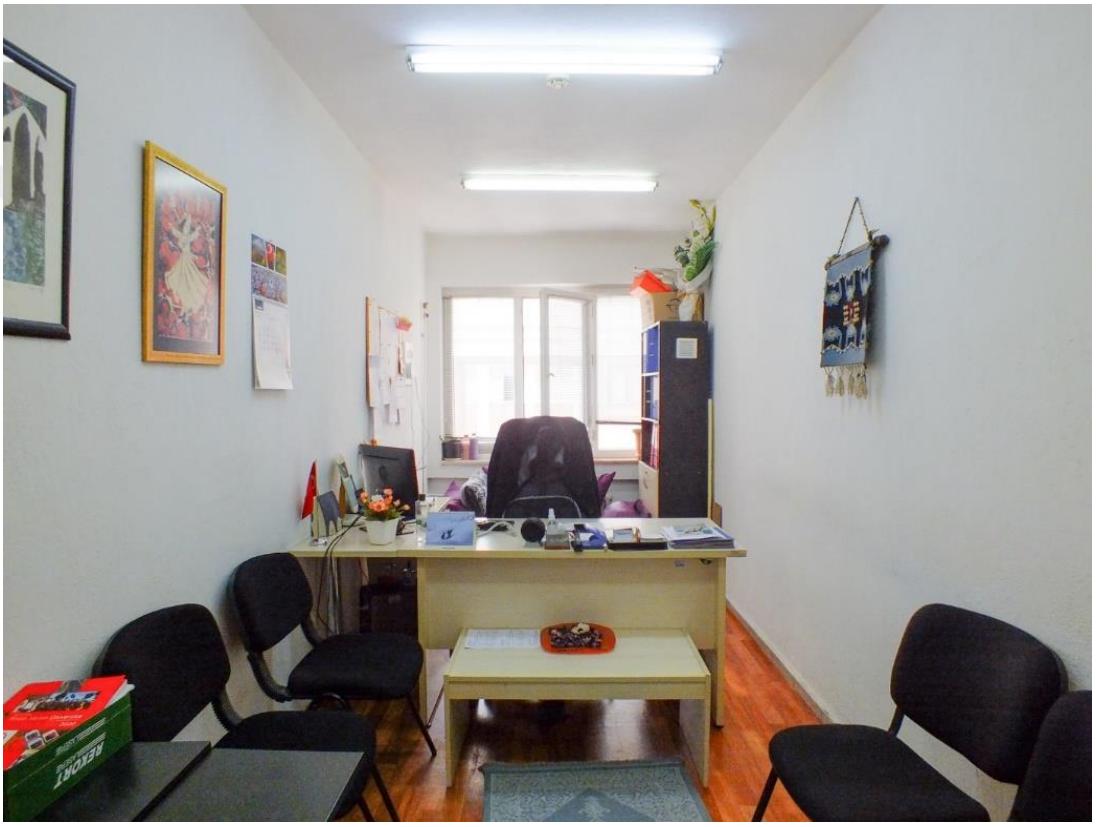



Şekil 4.65. D10 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.65'te verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 331-360 Bq/m$^3$ arasında olduğu, en fazla radon ölçüm sayısının ise 31-60 Bq/m$^3$ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8049 verinin 3886'sı yani %48'i Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.65'te verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.11. D11'in bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Felsefe Bölümünde bulunan bir ofise D11 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 15 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu mekânda 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Buradaki ofiste doğal havalandırma mevcuttur. Şekil 4.66'da ölçüm sistemi D11'in bulunduğu ofisinin genel görünümü verilmektedir.



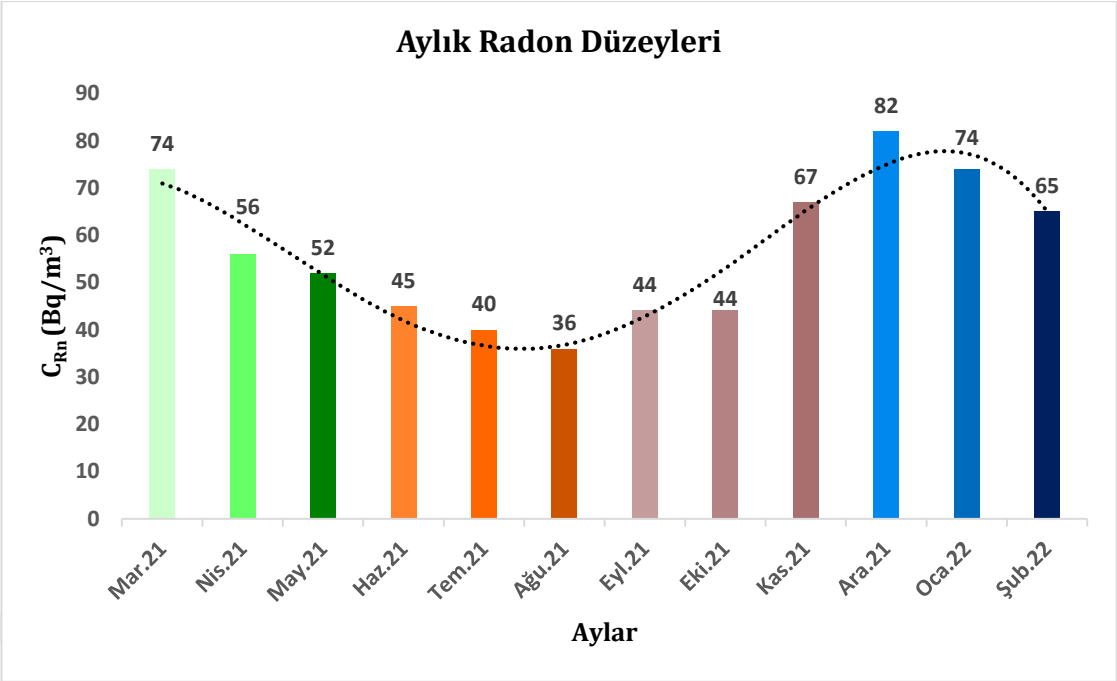
Şekil 4.66. Felsefe bölümünde bulunan ofis

Şekil 4.66'da gösterilen felsefe bölümündeki bir ofise konumlandırılan ölçüm sistemi D11, odanın köşesine yerleştirilerek yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.67'de ise D11 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



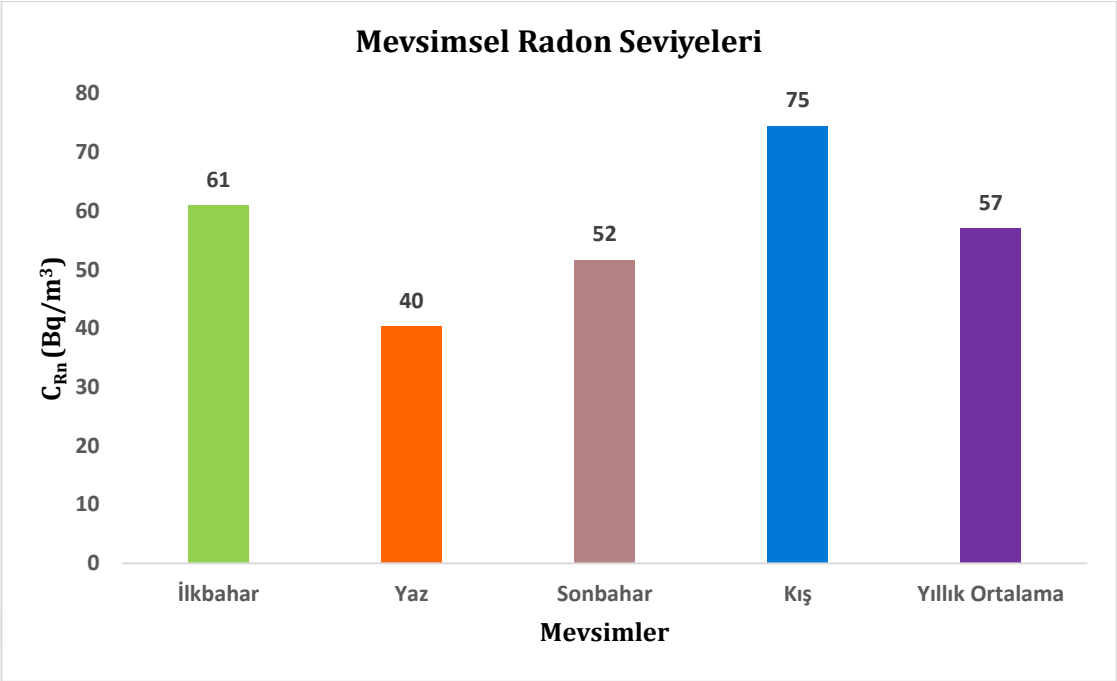

Şekil 4.67. Online radon ölçüm sistemi D11

Bir yıl boyunca toplamda 8146 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16292 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 5 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 351 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 57 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur (Ölçümlerin standart sapma değeri ise 37 Bq/m$^3$'tür). Şekil 4.68'de D11 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



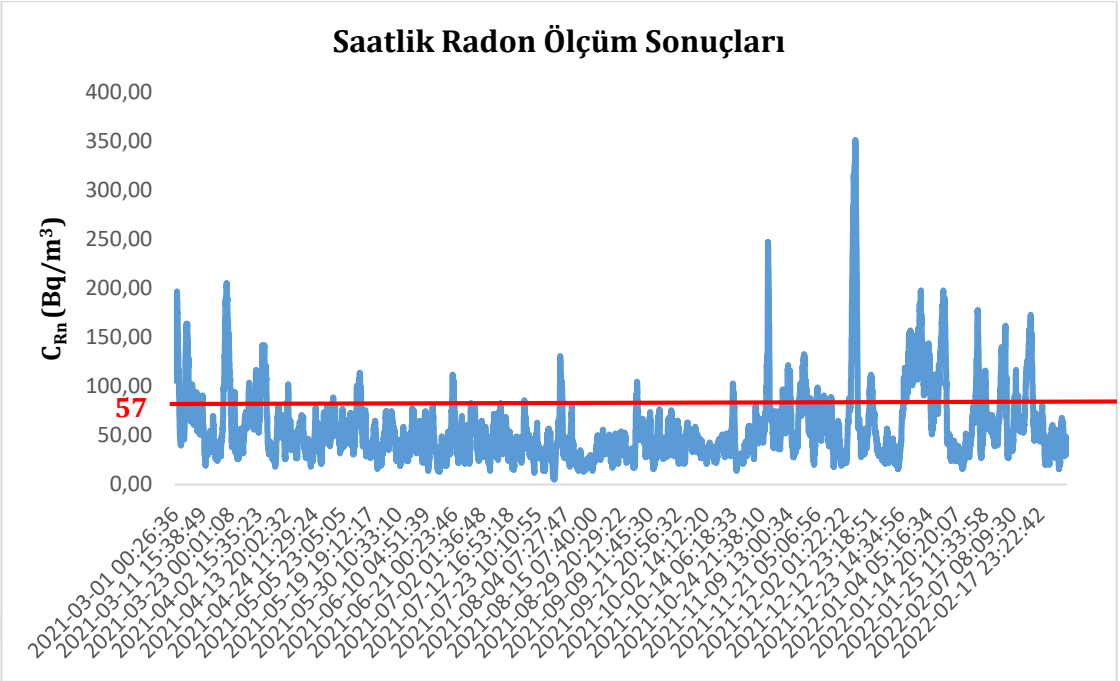

Şekil 4.68. D11 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.68'de en yüksek radon konsantrasyonun 2021 yılı Aralık ayında (pandemi kısıtlama sonrası) 82 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Ağustos ayında (pandemi kısıtlama dönemi) 36 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Şekil 4.69'da ise D11 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



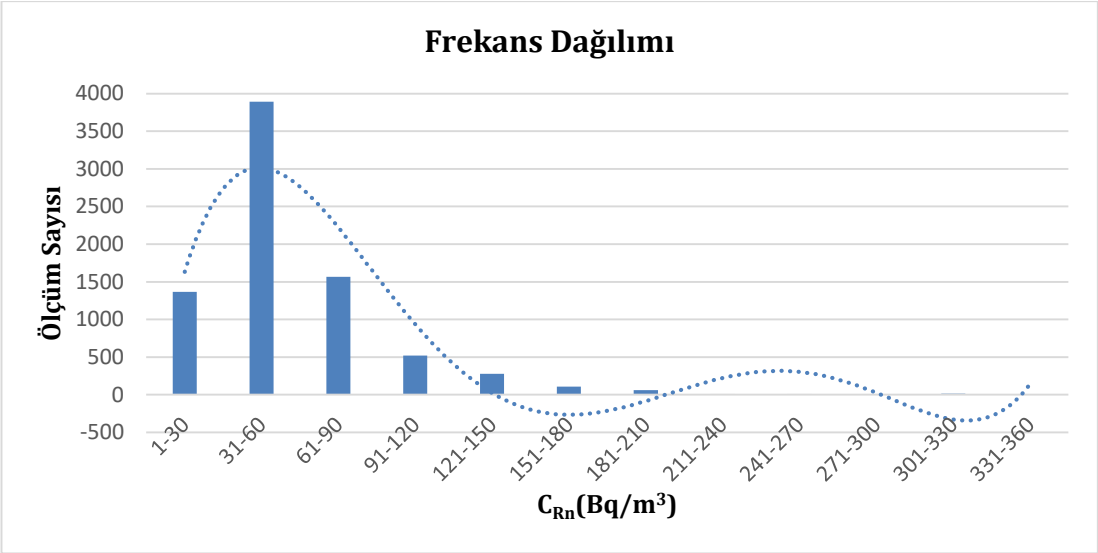

Şekil 4.69. D11 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.69'da verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının kış mevsiminde en yüksek 75 Bq/m$^3$, yaz mevsiminde ise en düşük 40 Bq/m$^3$ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine doğru bir düşüş olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine doğru bir artış eğiliminde olduğu, ayrıca sonbahardan kış mevsimine geçişte ise radon konsantrasyonlarının arttığı söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen davranışına kısmi olarak uymaktadır. Şekil 4.70'te ise D11 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.70. D11 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer 2. kat felsefe bölümü ofisinin yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.70'teki ölçümler incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında artma eğilimde olduğu söylenebilir. Radon ölçümlerinin yapıldığı bu ofis, pandemi kısıtlamasının olduğu esnek mesai zamanında sürekli olarak kullanılmıştır. Şekil 4.71'de D11 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.

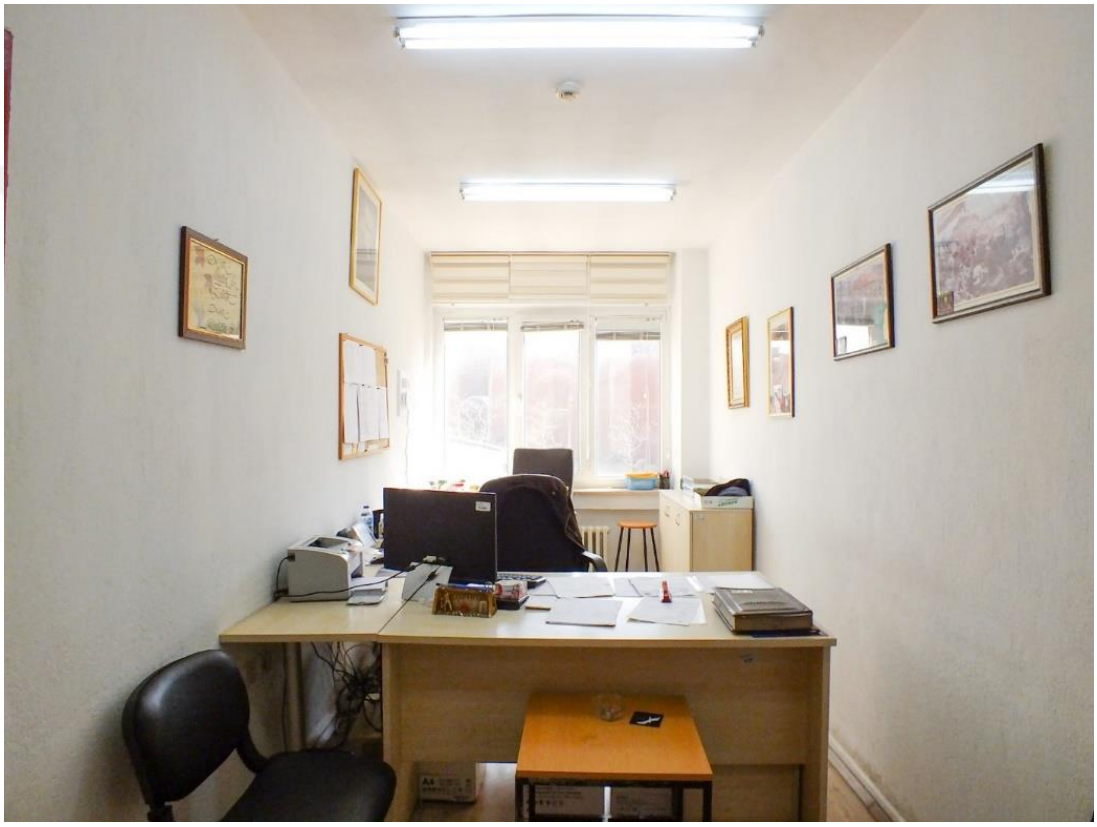



Şekil 4.71. D11 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.71'de verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 331-360 Bq/m³ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 31-60 Bq/m³ arasında olduğu görülmektedir. Toplam 8146 verinin %11'i Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m³'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.71'de verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapıdadır.

### 4.2.12. D12'nin bulunduğu birimdeki radon ölçümleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Tarih Bölümü'nde bulunan bir ofise D12 ölçüm sistemi yerleştirilmiştir. 15 $m^2$'lik bir alana sahip olan bu ofiste 1 adet pencere ve 1 adet kapı bulunmaktadır. Burada bulunan ofiste doğal havalandırma mevcuttur. Şekil 4.72'de ölçüm sistemi D12'nin bulunduğu Tarih Bölümü ofisinin genel görünümü verilmektedir.



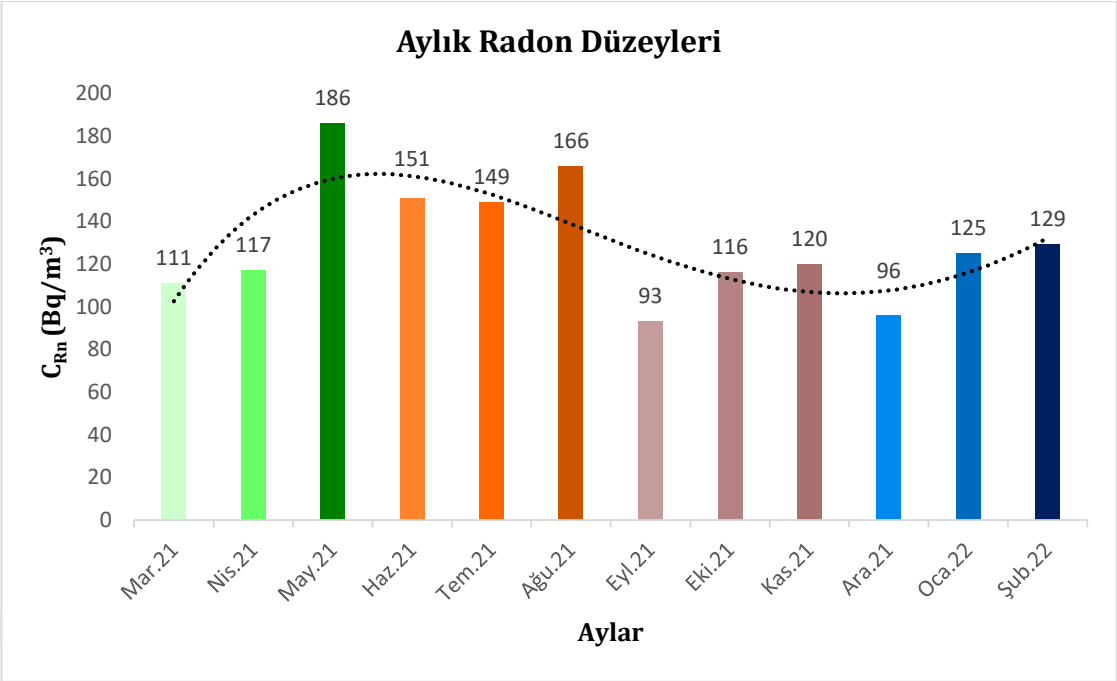
Şekil 4.72. Tarih Bölümü'nde ölçüm yapılan birim

Şekil 4.72'de gösterilen birime yerleştirilen D12 ölçüm sistemi, odanın köşesine, yerden 1,5 metre yüksekliğe montajlanmıştır. Şekil 4.73'te ise D12 radon ölçüm sisteminin yakından görünümü sunulmaktadır.



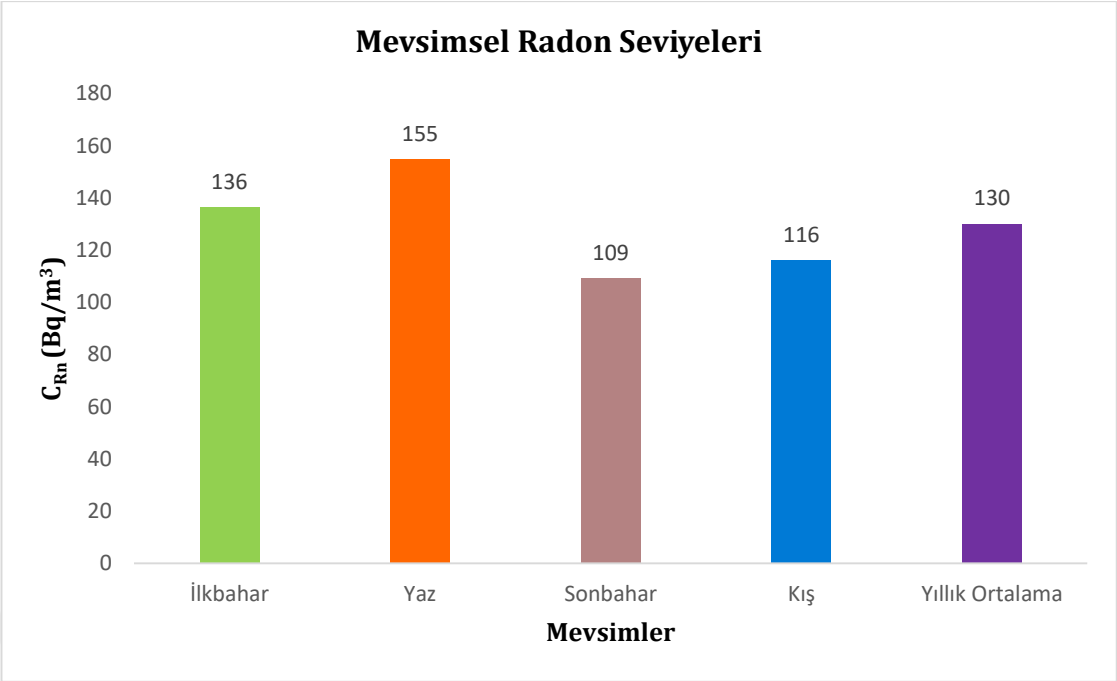

Şekil 4.73. Online radon ölçüm sistemi D12

Bir yıl boyunca toplamda 8097 radon verisi elde edilmiştir. Aynı zamanda 16194 nem ve sıcaklık verisi elde edilmiştir. Alınan sonuçlara göre, birimdeki minimum radon konsantrasyonu 21 Bq/m$^3$, maksimum radon değeri 360 Bq/m$^3$ ve ortalama radon düzeyi ise 130 Bq/m$^3$ olarak tespit edilmiştir (Ölçümlerin standart sapma değeri 64 Bq/m$^3$ olarak bulunmuştur). Şekil 4.74'te D12 ölçüm sisteminden alınan radon değerlerinin aylara bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



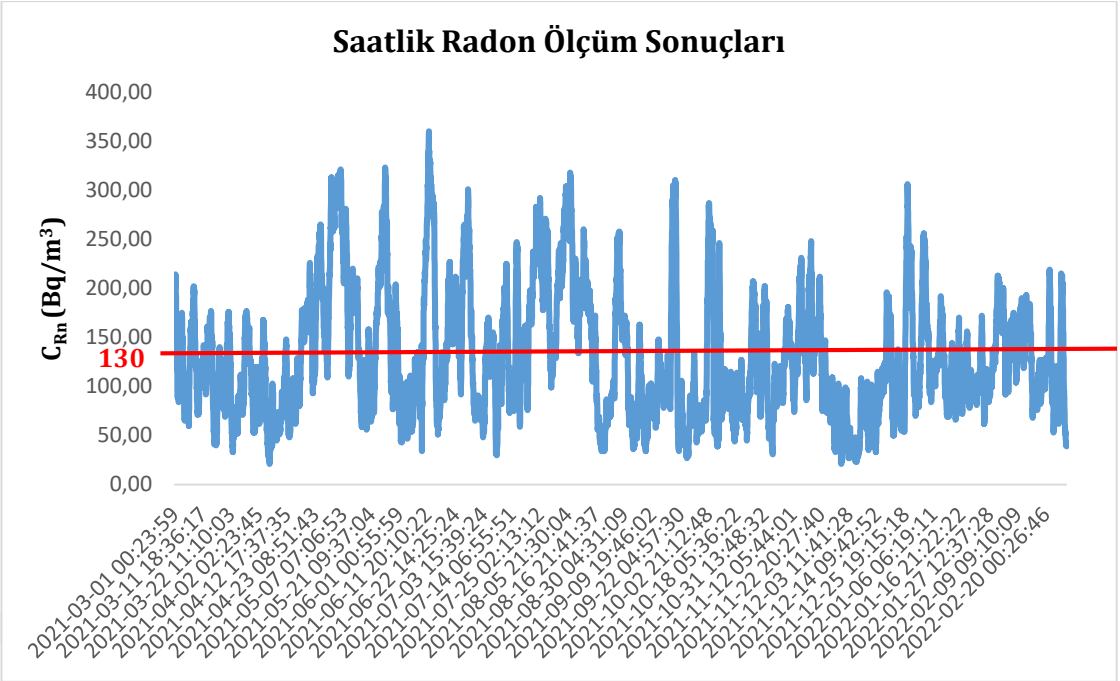

Şekil 4.74. D12 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin aylara bağlı olarak değişimi

Şekil 4.74'te en yüksek radon konsantrasyonu 2021 yılı Mayıs ayında 186 Bq/m$^3$, en düşük radon düzeyi ise 2021 yılı Eylül ayında 93 Bq/m$^3$ olarak gözlemlenmiştir. Ölçümlere başlanılan 1 Mart 2021 ile 4 Ekim 2021 tarihleri arası, pandemi kısıtlama dönemine karşılık gelmektedir. Şekil 4.75'te ise D12 ölçüm sisteminin mevsimlere bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.



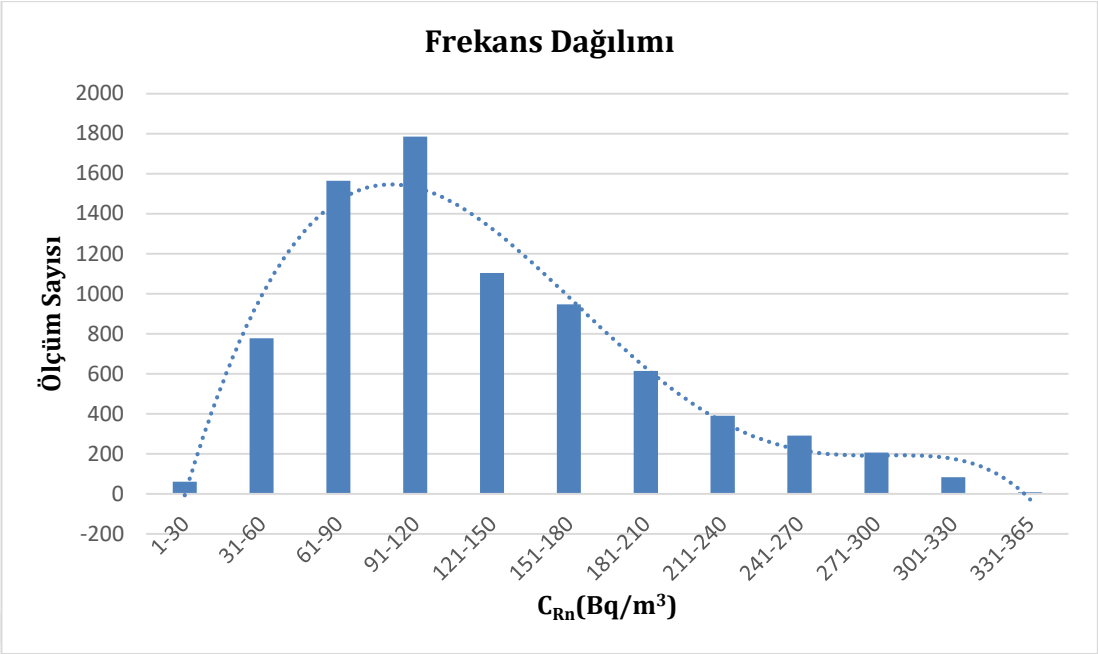

Şekil 4.75. D12 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin mevsimlere bağlı olarak değişimi

Şekil 4.75'te verilen grafikte, mevsimsel radon konsantrasyonu ortalamasının yaz mevsiminde en yüksek 155 Bq/m³, sonbahar mevsiminde ise en düşük 109 Bq/m³ değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevsimsel radon davranışı için ilkbahardan yaz mevsimine bir artış olduğu ve yaz mevsiminden sonbahar mevsimine bir düşüş olduğu, ayrıca sonbahar ve kış mevsimindeki radon konsantrasyonlarının birbirine oldukça yakın olduğu söylenebilir. Bu durum bina içi atmosferik radon ölçümlerinde çoğu zaman gözlemlenen (kışın en yüksek, yazın en düşük ve ilkbahar ile sonbahar mevsimlerinde yaz ile kış arasındaki değerlerde radon konsantrasyonunun gözlemlenmesi) davranışa uymamaktadır. Şekil 4.76'da ise D12 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi gösterilmektedir.




Şekil 4.76. D12 ölçüm sisteminden alınan saatlik radon ölçümlerinin bir yıllık değişimi (Grafikte kırmızı düz çizgi ile verilen değer Tarih Bölümündeki birimde tespit edilen yıllık ortalama radon düzeyini göstermektedir)

Şekil 4.76'da sunulan ölçüm verileri incelendiğinde birimdeki radon düzeyinin Mart-2021 tarihi ile Şubat-2022 tarihi arasında azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu durum pandemi kısıtlamasının kaldırılmasıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 4.77'de D12 ölçüm sisteminden bir yıl boyunca alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı sunulmaktadır.

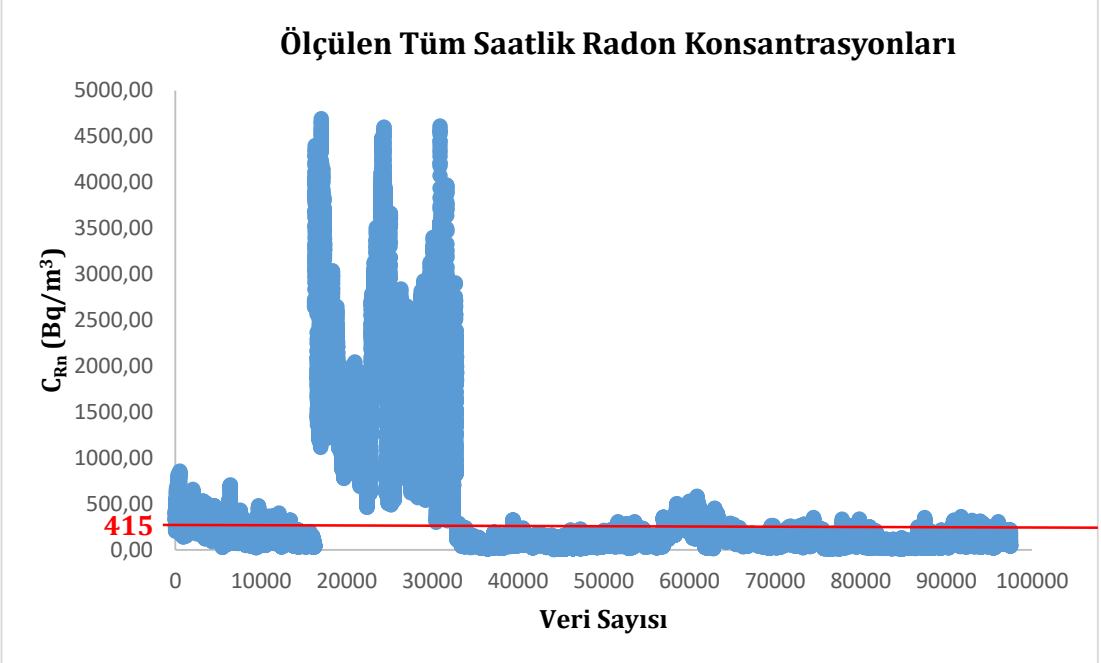



Şekil 4.77. D12 ölçüm sisteminden alınan radon ölçümlerinin frekans dağılımı

Şekil 4.77'de verilen 1 yıllık radon değişiminin frekans dağılımına göre en az radon ölçüm sayısının 331-365 Bq/m$^3$ arasında olduğu, en çok radon ölçüm sayısının ise 91-120 Bq/m$^3$ arasında elde edildiği söylenebilir Toplam 8097 verinin 4851'i yani %60'ı Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük sınırın üzerindedir. Şekil 4.77'de verilen grafikteki frekans dağılımı sağa çarpık bir yapı sergilemektedir.

### 4.2.13. Test ölçümleri için genel değerlendirme

Fen-Edebiyat Fakültesi'nin 12 farklı ölçüm noktasında (Şekil 3.36-3.38) gerçekleştirilen test ölçümleri için web-kontrollü online radon takip ağı sistemimizle (diğer bir deyişle IRL-RMS ile) toplamda 97503 adet bina içi radon konsantrasyonu verisi elde edilmiştir. IRL-RMS ile 12 birimde bir yıl boyunca kaydedilen tüm saatlik radon verileri Şekil 4.78'de topluca sunulmaktadır. Bu grafikte x-ekseni alınan verinin numarasını, y-ekseni ise verinin Bq/m$^3$ cinsinden radon konsantrasyonu ($C_{Rn}$) temsil etmektedir. Elde edilen radon ölçümlerine ait veriler, 1 Bq/m$^3$ ile 4691 Bq/m$^3$ arasında değerlere sahip olup Şekil 4.78'deki kırmızı düz çizgi ile fakülte genelindeki yıllık atmosferik radon konsantrasyonu ortalaması gösterilmektedir.




Şekil 4.78. Test ölçümlerine ait radon verilerinin toplu olarak gösterimi

Ölçüm yapılan birimlerdeki radon verilerine ait tanımlayıcı bilgiler özetlenerek (Çizelge 3.4 ve Şekil 3.36-3.38'deki kodlamayla uyumlu olacak biçimde) Çizelge 4.1'de verilmektedir. Fakülte binasındaki yıllık atmosferik radon konsantrasyonu ortalaması (415 Bq/m$^3$), il merkezinde bina içi radon düzeylerinin belirlenmesi

amacıyla daha önce yapılmış olan çalışma sonuçlarıyla (Kürkçüoğlu, 2018) uyumludur.

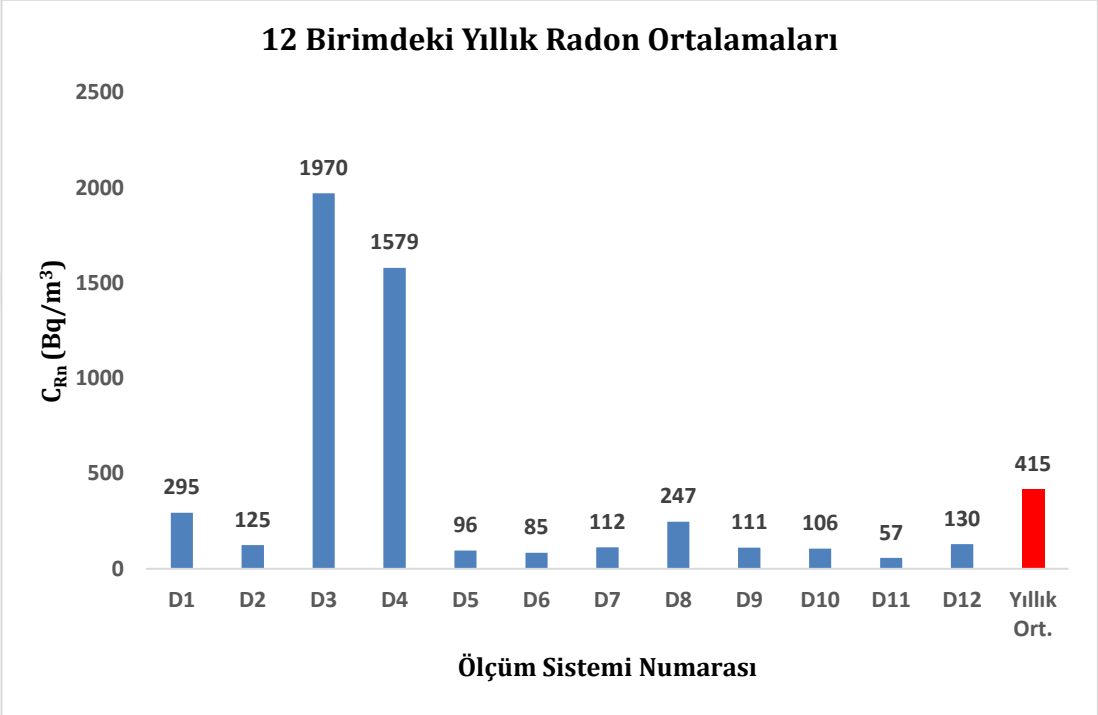
Çizelge 4.1. Tüm ölçüm noktalarının konumları ve alınan radon ölçüm sonuçları

| Dedektör Hakkında Bilgiler | | | N | Ölçümlere ait Tanımlayıcı Bilgiler (Bq/m³) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Dedektör Kodu** | **Konum (GPS Koordinatları)** | **Ölçüm Sisteminin Bulunduğu Yerler** | | **Min** | **Mak** | **Ort** | **SS** |
| D1 | N37°49′49.7604″ E30°31′57.8784″ | Fizik, Laboratuvar | 8216 | 26 | 854 | 295 | 123 |
| D2 | N37°49′48.0252″ E30°31′58.3248″ | Dekanlık, Ofis | 8047 | 23 | 478 | 125 | 72 |
| D3 | N37°49′41.574″ E30°32′00.672″ | Arkeoloji, Seminer Salonu | 8311 | 461 | 4691 | 1970 | 901 |
| D4 | N37°49′41.3184″ E30°31′59.8728” | Kimya, Laboratuvar | 8252 | 299 | 4613 | 1579 | 647 |
| D5 | N37°49′41.196” E30°32′00.0348″ | Fizik, Seminer Salonu | 7925 | 8 | 324 | 96 | 57 |
| D6 | N37°49′41.2284″ E30°31′59.6748″ | Dekanlık, Konferans Salonu | 8103 | 1 | 225 | 85 | 39 |
| D7 | N37°49′41.1132″ E30°31′59.7432″ | Türk Dili ve Edebiyatı, Ofis | 8107 | 18 | 305 | 112 | 53 |
| D8 | N37°49′41.7468″ E30°31′59.124″ | Matematik, Ofis | 8107 | 13 | 581 | 247 | 109 |
| D9 | N37°49′41.664″ E30°31′59.178″ | Kimya, Bilgisayar Lab | 8143 | 16 | 274 | 111 | 47 |
| D10 | N37°49′41.7288″ E30°31′59.4588″ | Biyoloji, Seminer Salonu | 8049 | 7 | 352 | 106 | 68 |
| D11 | N37°49′41.5416″ E30°31′59.5092” | Felsefe, Ofis | 8146 | 5 | 351 | 57 | 37 |
| D12 | N37°49′41.3544″ E30°31′59.9736″ | Tarih, Ofis | 8097 | 21 | 360 | 130 | 64 |
| Genel | N37°49′49.7604″ E30°31′57.8786″ | Fen-Edebiyat Fakültesi | 97503 | 1 | 4691 | 415 | 706 |

N (Hesaplamalar için kullanılan ölçüm sayısını gösterir, elektrik, internet kesintileri, arızalar vb. durumlarda alınamayan ölçümler ile güncellemelerin ardından başlayıp 0 Bq/m³ değerini veren ölçümler hesaplamalara dâhil edilmemiştir)

Çizelge 4.1'deki genel değerlendirme, 97503 ölçümün standart sapmasının 706 Bq/m³ olduğunu göstemektedir. Aritmetik ortalamadan daha büyük olan bu değer, Bölüm 4.1'de açıklandığı gibi ölçüm verilerinin ortalama değere göre ne ölçüde değiştiğini ifade etmekte olup ölçümlerde kullanılan dedektörlerin hassaslığı ile doğrudan ilişkili değildir. Çalışmada ölçülmek istenen bina içi radon düzeyleri, pek çok dış parametrenin etkisiyle sürekli olarak değişmektedir.

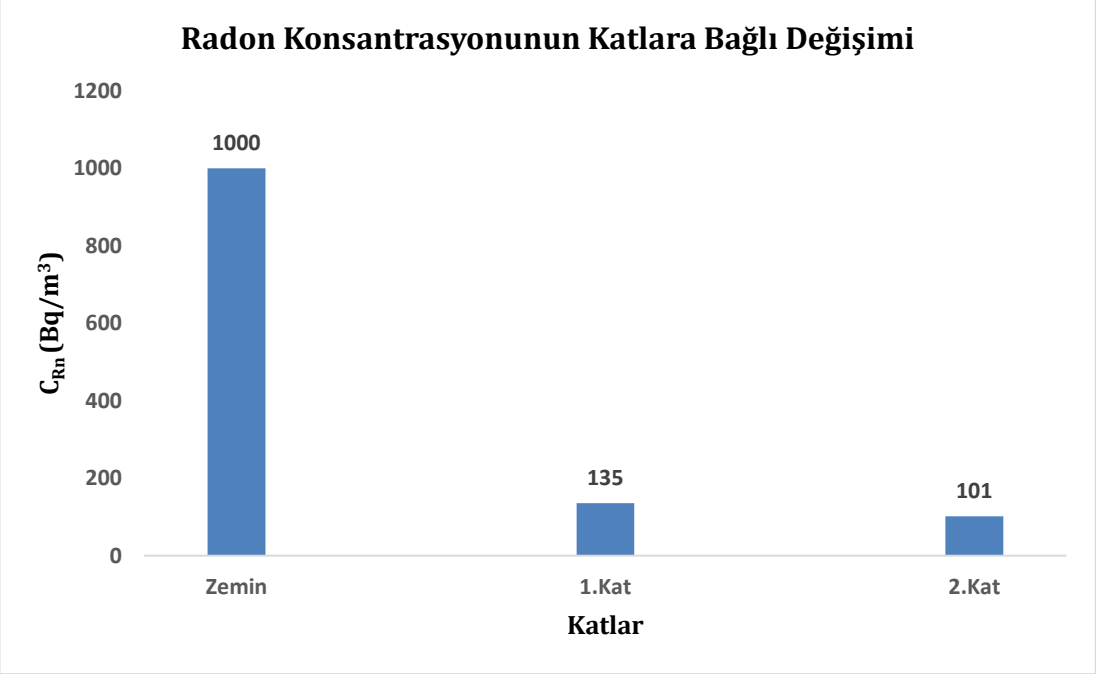
Bunun üzerine çok yüksek ve çok düşük düzeyde radon yoğunluğuna sahip birimlerdeki ölçüm verileri de eklenince, aykırı veya uç ölçümlerden aşırı derecede etkilenen standart sapmanın değeri aritmetik ortalamanın üzerinde çıkmıştır. Şekil 4.79'da ise fakültedeki 12 birim için elde edilen yıllık ölçümlerin ortalamaları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.




Şekil 4.79. Birimlerdeki yıllık ortalama radon düzeylerinin karşılaştırılması (x-ekseninde, ölçüm sistemlerinin bulunduğu noktalar Çizelge 4.1 ile uyumlu olarak gösterilmiştir)

Şekil 4.79'da verilen grafikte, D3 sisteminin bulunduğu ölçüm noktasındaki radon yoğunluğunun en yüksek seviyede, D11'in bulunduğu yerdeki radon konsantrasyonunun ise en düşük düzeyde olduğu görülmektedir. D3 radon ölçüm sistemi, fakültenin zemin katında bulunan Arkeoloji Bölümü seminer salonuna yerleştirilmiş ve bu birimin yıllık radon konsantrasyonu ortalaması 1970 Bq/m$^3$ olarak belirlenmiştir. 1579 Bq/m$^3$'lük ortalama ile en yüksek ikinci radon yoğunluğu tespit edilen yer ise D4 ölçüm sisteminin bulunduğu fakültenin zemin katındaki Kimya Laboratuvarı olmuştur. D3 ve D4 sistemleriyle saptanan bu yıllık ortalamalar, TENMAK'ın işyerleri için tavsiye ettiği 1000 Bq/m$^3$'lük sınır değeri aşmaktadır. En düşük yıllık ortalamanın D11 sistemi ile 57 Bq/m$^3$ olarak gözlemlendiği Felsefe Bölümü'ndeki ofis 2. Katta olup buradaki radon seviyesi,

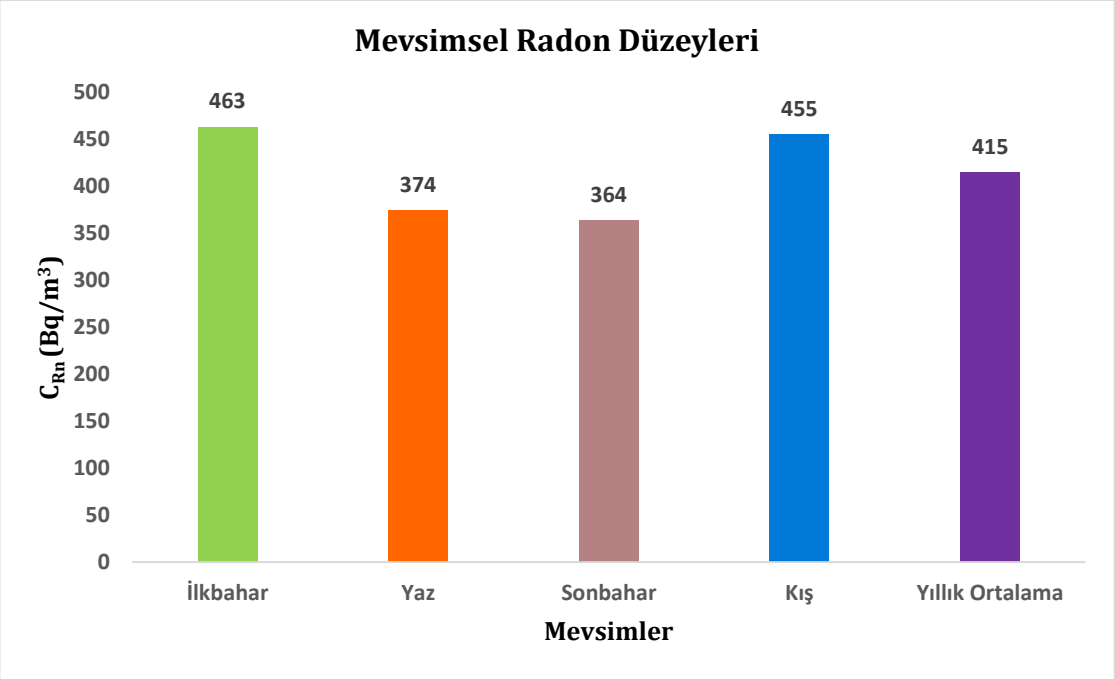
TENMAK'ın işyerleri için belirlediği sınırın ve Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük düzeyin altındadır. Radon gazı havadan daha ağır olduğundan havalandırması zayıf olan yerlerde zemine çökerek birikme eğilimi göstermektedir. Literatürde, bina içi radon konsantrasyonunun yüksekliğe bağlı değiştiğine, yani yükseklik arttıkça radon yoğunluğunun azaldığına dair çalışmalar mevcuttur (Shaikh vd., 2003). Test ölçümleri kapsamında, web-kontrollü online radon takip ağı sistemi ile fakültenin her bir katında 4'er ölçüm noktasında eş-zamanlı radon monitörlemesi yapılmıştır (Çizelge 4.1). Fakülte genelinde, katlara bağlı olarak radon konsantrasyonu ortalamalarının değişimi incelendiğinde (EK-G Çizelge G.2 ve Şekil 4.80), zemin katın radon ortalamasının 1000 Bq/m$^3$, 1. kattaki ortalama radon yoğunluğunun 135 Bq/m$^3$ ve 2. kattaki radon seviyesinin ise 101 Bq/m$^3$ olduğu, yükseklik arttıkça radonun katlara bağlı olarak azaldığı bulunmuştur.




Şekil 4.80. Fakülte genelinde katlara bağlı radon düzeyleri

Radonun kapalı kapalı mekânlarda birikme miktarı, ortamın havalandırılması zayıfladıkça artmaktadır. Kış mevsiminde hava sıcaklığının azalmasına, kapı ve pencerelerin daha az açılıp kapanmasına bağlı olarak havalandırılma oranında bir azalma olur. Ayrıca, soğuk mevsimlerde bina içi ve bina dışı sıcaklıklar arasındaki farkın artması, radonun bina içine girişini arttırmaktadır (Çine, 2017).

Bu nedenlerle, kapalı ortam içerisindeki radon yoğunluğunun daha soğuk dönemlerde artış göstermesi beklenmektedir. Ancak test ölçümlerinin pandemi kısıtlamasına denk gelmesi, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde ölçüm yapılan birimlerin kapalı olması, yani doğal havalandırma bile yapılamamış olması, mevsimsel radon davranışının daha farklı bir yapı sergilemesine neden olmuştur (her bir birimde gözlemlenen bu durum için bkz. Bölüm 4.2.1-4.2.12). Fakülte genelinde gerçekleştirilen tüm ölçümlerin mevsimsel olarak değerlendirilmesine yönelik sonuçlar EK-G Çizelge G.1' de özetlenmekte ve görsel olarak Şekil 4.81'de sunulmaktadır.




Şekil 4.81. Fakülte binasındaki mevsimsel radon seviyeleri

EK-G Çizelge G.1 ve Şekil 4.81'deki değerlendirmler için kış mevsimi ortalaması, Aralık 2021, Ocak 2022 ve Şubat 2022 ölçümleri esas alınarak elde edilmiştir. En yüksek mevsimsel radon düzeyi 463 Bq/m$^3$ ile ilkbahar mevsiminde gözlemlenirken en düşük yoğunluk 364 Bq/m$^3$'lük ortalama ile sonbaharda gerçekleşmiştir. Fakültenin Ekim 2021'den önce pandemi kısıtlamaları nedeniyle kullanıma kapalı olması nedeniyle ölçüm noktalarında hiç havalandırma yapılmaması ve küresel ısınmanın etkisiyle mevsimlerde gözlemlenen değişimler bu sonucun elde edilmesi üzerinde rol oynamış olabilir. Küresel ısınmanın etkisiyle, mevsim uzunlukları ve başlangıç tarihlerinin değiştiği ve bu

değişikliklerin gelecekte daha da artacağı ön görülmektedir. 1952-2011 döneminde, yaz uzunluğu 78 günden 95 güne yükselmiştir. İlkbahar, sonbahar ve kış uzunlukları ise sırasıyla 124'ten 115'e, 87'den 82'ye ve 76'dan 73 güne değişmiş durumdadır. 2100 yılına kadar yaz mevsiminin git gide uzayarak tüm yılın yarısına kadar süreceği ve kış mevsiminin de 2 aydan daha az bir süreye düşeceği tahmin edilmektedir (Wang vd., 2021). Şekil 4.81'de verilen fakülte genelindeki mevsimsel radon davranışı incelendiğinde, radon yoğunluğunun havaların ısınmasıyla birlikte ilkbahar mevsiminden yaz mevsimine geçerken azaldığı, binanın kullanılmaya başlaması nedeniyle havalandırmanın devreye girmesiyle sonbaharda yaz mevsimindekine benzer bir düzeyde seyrettiği ve havaların soğumasıyla birlikte kış mevsiminde tekrar yükselmeye başladığı söylenebilir. Test ölçümleri için katlara ve mevsimlere bağlı istatistiksel analizler detaylı olarak EK G'de ayrıca sunulmaktadır.

Test ölçümleriyle başarılı bir şekilde hayata geçirilen web-kontrollü online radon takip ağı sistemimizin, sistem bileşenleri bakımından online ölçüm yapabilen benzer çalışmalarla karşılaştırılması Çizelge 4.2 ile sunulmaktadır. Kullanılan sensör, IoT sistemi ve veri aktarımı için kullanılan internet bağlantısına yönelik bilgilerin yanı sıra incelenen online radon ölçüm sistemiyle ne kadar süre için ölçüm verisi alındığı ve ilgili sistem için tekli bir radon ölçerin maliyeti de bu çizelge ile karşılaştırılmaktadır. Çizelge 4.2 incelendiğinde, önerdiğimiz tasarımın üretim maliyeti bakımından uygun olduğu ve en uzun süreli ölçümlerin IRL-RMS ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Çizelge 4.3'te ise online radon ölçümlerinde sıkça kullanılan bazı elektronik dedektörlerin teknik özellikleri, kendi tasarımlarımız için kullanılan Wave radon dedektörü ile birlikte karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 4.2. Mevcut online radon ölçüm sistemleri için sistem bileşenlerinin karşılaştırılması

| No | Kaynak | Sensör Çeşidi | IoT Sistemi | IoT Protokolü | Erişim Ağı | İnternet Platformu | Ölçüm Süresi | Toplam Maliyet |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Alvarellos (2020) | RD200M 164 Dolar | Arduino mkr | MQTT | Wi-Fi and Sigfox | MQTT, Node-RED, DB Sanal Sunucular, VPN, firewall | 11 gün | 317,16 Dolar |
| 2 | Alvarellos (2021) | RD200M 164 Dolar | Arduino mkr | MQTT | Wi-Fi and Sigfox | MQTT, Node-RED, DB Sanal Sunucular, VPN, firewall | 1 hafta | 761,05 Dolar |
| 3 | Blanco-Novoa (2018) | Safety Siren Pro Series 3 120 Dolar | ESP8266 | HTTP'ye dayalı API'ler | Wi-Fi | Aplikasyon, Web Sunucu | 26 gün | 171,99 Dolar |
| 4 | Medina-Perez (2021) | Radon Scout 1853 Dolar | Raspberry Pi 3B | MQTT | Wi-Fi | Node-RED, DB ve Web Sunucu | 8 gün | 1997,5 Dolar |
| 5 | Ferreira (2020) | RD200M 164 Dolar | Arduino UNO R3 ATmega328P | HTTP'ye dayalı API'ler | Wi-Fi | Aplikasyon, Web Sunucu | 72 gün | 611,14 Dolar |
| 6 | Terray (2020) | AER+ 586,44 Dolar | LoRa | Json files | LoraWAN + LoRa gateway and 3G | Elastic Stack Suite MQTT | 6 ay | - |
| 7, 8, 9 | Pereira (2020), Lopes(2018, 2019), Martins (2020) | RD200M 164 Dolar | ESP8266 | MQTT | Wi-Fi + LoraWAN + LoRa gateway | Web Sunucu | 2 ay | - |
| 10 | Forsstrom (2020) | MidDec | ESP32/Raspberry Pi 3A+ ve Raspberry Pi 4 | MQTT | Wi-Fi | Web Sunucu | - | - |
| 11 | Bu Çalışma Tekli Sistem | Wave 200 Dolar | Raspberry Pi 3B | Bluetooth, MQTT | Wi-Fi | ThingSpeak | 8 ay | 357 Dolar |
| 12 | Bu Çalışma Radon Ölçüm Ağı | Wave 200 Dolar | Raspberry Pi 3B | Bluetooth, MQTT, HTTP'ye dayalı API'ler | Wi-Fi | Web Sunucu | 12 ay | 357 Dolar |

Çizelge 4.3. Online radon ölçümü için kullanılan bazı radon dedektörlerinin teknik özellikleri

| Üretici Firma | Modeli | Özellikleri |
|---|---|---|
| Safety Siren | Pro 3 | • Radon ölçümü: İyonizasyon odası dedektörü<br>• Güç: Elektrikle çalışır<br>• Ekran: LED kısa vadeli ve uzun vadeli ortalama radon konsantrasyonu<br>• Veri kaydı ve yayın oluşturma: Hayır<br>• Sıcaklık/Nem Ölçümü: Hayır<br>• Alarm: 200 Bq/m³ veya üzerinde sesli alarm<br>• Mobil uygulamalara bağlantı: Hayır<br>• Ölçüm Aralığı: 0-37000 Bq/m³<br>• Doğruluk: ±%20 |
| Airthings | Wave | • Radon ölçümü: Pasif difüzyon odası<br>• Güç: Pille çalışır<br>• Ekran: Ekran yok<br>• Veri kaydı ve yayın oluşturma: Evet<br>• Sıcaklık/nem ölçümü: Evet<br>• Alarm: Monitörde görsel yeşil/sarı/kırmızı uyarı ve mobil uygulama üzerinden uyarı<br>• Mobil uygulamalara bağlantı: Evet<br>• Ölçüm Aralığı: 0-20000 Bq/m³<br>• Doğruluk: ±%10 (200 Bq/m³'te 7 günden sonra), 2 aydan sonra ±%5 |
| Radon FTLab | RD200M | • Radon ölçümü: İyonizasyon odası<br>• Güç: Elektrikle çalışır<br>• Ekran: LED kısa vadeli ve uzun vadeli ortalama radon konsantrasyonu<br>• Veri kaydı ve yayın oluşturma: Evet<br>• Sıcaklık/nem ölçümü: Hayır<br>• Alarm: Monitörde görsel yeşil/sarı/kırmızı uyarı ve mobil uygulama üzerinden uyarı<br>• Mobil uygulamaya bağlantı: Evet<br>• Ölçüm Aralığı: 7,4-3700 Bq/m³<br>• Doğruluk: ±%10 |
| Algade | AER+ | • Radon ölçümü: Fotodiyot ile<br>• Güç: Pille çalışır<br>• Ekran: LED kısa vadeli ve uzun vadeli ortalama radon konsantrasyonu<br>• Veri kaydı ve yayın oluşturma: Evet<br>• Sıcaklık/nem ölçümü: Evet<br>• Alarm: Yok<br>• Mobil uygulamaya bağlantı: Hayır<br>• Ölçüm Aralığı: 0-99,9 kBq/m³<br>• Doğruluk: 300 Bq/m³'te ±%20 (24 saatte) |
| SARAD | Radon Scout | • Radon ölçümü: Yüksek Gerilim odacıklı yarı iletken dedektör<br>• Güç: Pille çalışır<br>• Ekran: Ekran yok<br>• Veri kaydı ve yayın oluşturma: Evet<br>• Sıcaklık/nem ölçümü: Evet<br>• Alarm: Yok<br>• Mobil uygulamaya bağlantı: Hayır<br>• Ölçüm Aralığı: 1-10.000.000 Bq/m³<br>• Doğruluk: 200 Bq/m³'te ±%20 veya 1000'de <%10 |
| Scandinavia AB | MidDec | • Radon ölçümü: NA<br>• Güç: Yok<br>• Ekran: Evet<br>• Veri kaydı ve yayın oluşturma: NA<br>• Sıcaklık/nem ölçümü: Evet<br>• Alarm: Yok<br>• Mobil uygulamaya bağlantı: Hayır<br>• Ölçüm Aralığı: Yok<br>• Doğruluk: NA |

Çalışmamızda kullanılan Wave radon dedektörü 200 dolar civarında olup piyasada bulunan bezer fiyatlı diğer sensörlere göre (RD200M gibi) daha geniş ölçüm aralığına sahiptir (0-20000 Bq/$m^3$). Ayrıca 1 haftadan sonra alınan radon ölçümlerinde (200 Bq/$m^3$ düzeyindeki radon konsantrasyonları için) dedektörden kaynaklı ölçüm hatası %10'dan küçük olup bu değer, iki aydan daha uzun ölçümlerde %5'in altına düşmektedir (Çizelge 4.3). Ayrıca, güçlü bluetooth bağlantısı ve yaklaşık 2 yıllık bir batarya gücüne sahip olmasından dolayı, Wave radon sensörü tasarımlarımız için tercih edilmiştir. Ölçüm aralığı daha geniş olan Radon Scout gibi dedektörler, maliyet açısından uygun olmadığı için çalışmamızda tercih edilmemiştir. Literatürde, 400 Euro'nun altındaki radon dedektörleri maliyet açısından uygun sensörler kategorisinde değerlendirilmektedir (Sá vd., 2022). IRL-RMS tasarımı için seçilen Wave radon dedektörü bu kategoriye girmektedir. Geliştirilen web-kontrollü radon ölçüm ağı sisteminin avantajları, aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

1) Önerilen tasarım bina içi atmosferik radon konsantrasyonlarının ölçümünü kolaylaştırmaktadır. Radon ölçümleri için pasif teknikte olduğu gibi; numune alınmasına ve numunelerin taşınmasına, alınan numunelerin analiz edilmesine, ölçüm sonuçlarının elde edilmesi için beklenilmesine gerek yoktur. Ayrıca, aktif ölçüm kapsamında çalışan kimi elektronik cihazlarla yapılan ölçümlerde olduğu gibi; ölçüm noktasına ölçüm boyunca çeşitli aralıklarda giderek verilerin USB bellek gibi bir birime aktarılmasına veya telefonla bağlantı yapılarak veri aktarımı yapılmasına gerek yoktur. Tasarımdaki sistem bir kez ölçüm noktasına kurulduğunda (cihaz kaynaklı hatalar haricinde) ölçüm sonlandırılana kadar ölçüm noktasının bulunduğu yere gitmeye gerek yoktur (elektrik veya internet kesintisi durumunda bile ölçüm noktasına gidilmesine gerek bulunmamaktadır). Ölçüm başladıktan 1 saat sonra veriler alınıp, görüntülenip, depolanmaya başlanmaktadır.

2) Hem kısa-dönem hem de uzun-dönem radon ölçümü yapabilme imkânı sağlamaktadır. Kısa-dönem radon ölçümleri, meskendeki atmosferik radon düzeyinin kısa sürede belirlenmesini gerektiren durumlarda genellikle, 2 ile 7 gün arasında yapılmaktadır (yurt dışındaki bazı ülkelerde geçerli olan emlak alım

satımı için bina içi radon düzeyinin belirlenmesi mecburiyetinde olduğu gibi). Sistemimiz, günlük 24 adet radon ölçümü yapacağından kısa-dönemli ölçümler için fikir verici miktarda veri alınmasına olanak sağlamaktadır. Uzun-dönem radon ölçümleri ise genellikle 3 ay veya daha uzun süreler için yapılan ölçümlerdir ve bir mekândaki ortalama radon düzeyini belirleyebilmek amacıyla bilimsel çalışmalarda tercih edilir. 3 ay boyunca yapılan bir ölçümde, pasif ölçüm tekniği kapsamında kullanılan bir katı-hal nükleer iz dedektörü ile ölçüm periyodunun ortalamasını temsil eden tek bir radon konsantrasyonu değeri elde edilmektedir. Aynı sürede, bizim sistemimizden yaklaşık 2160 adet saatlik radon ölçüm verisi elde edilmektedir (24x90=2160). Böylelikle sistemimiz (pasif ölçüm tekniği ile mümkün olmayan), radonun saatlik, günlük ve aylık değişiminin incelenmesi, radon davranışının gece ve gündüz vakitlerine göre incelenmesi, radonun nem ve sıcaklık gibi diğer ortam parametreleriyle nasıl değiştiğinin araştırılması gibi konuların çalışılabilmesine olanak tanımaktadır.

3) Ölçüm sıklığı istenildiği gibi ayarlanabilmekte (çalışmamızda ölçümler saatte 1 alınmıştır) ve ölçüm verilerine kontrol biriminden gerçek-zamanlı olarak (ölçüm alınır alınmaz) ulaşılabilmektedir.

4) Ölçüm periyodu istenildiği şekilde düzenlenebilmektedir. Sistem, 2 günlük kısa-dönem ölçümlerinden bir yıl boyunca sürecek uzun-dönem ölçümlerine hatta gerektiğinde daha uzun sürelere kadar (dedektörün pilleri 18 ay kesintisiz ölçüm yapmaya uygundur) sürekli ölçüm yapabilir.

5) IRL-RMS, birden fazla tekli sistemin farklı ölçüm noktalarına konularak bir ölçüm ağının kurulmasına ve bu ağdaki cihazların eş-zamanlı olarak monitörlenmesine müsaade eder.

6) Önerilen tasarımdaki kontrol sistemi ile gerçek-zamanlı olarak alınan ölçüm verileri, depolanıp, işlenebilmekte, ayrıca ölçümlere ait sonuçların görsel olarak takibi ve değerlendirmesi ölçümle aynı anda yapılabilmektedir.

7) Yönetici ve tanımlı kullanıcılar tarafından verilere ulaşım kolaylığı sağlar, domain adresi (www.irl32.me) üzerinden dünyanın herhangi bir yerinden internete bağlanabilen bir cihaz ile (PC, tablet, cep telefonu vb.) kontrol sistemine erişilip verilere ulaşılabilmektedir.

8) Kontrol sistemi, renkli göstergelerle ölçüm düzeylerini gösteren uygulama ekranına sahiptir. Böylelikle dedektörlerin hangilerinin, daha önceden belirlenen radon düzeylerini aştığı görsel olarak anında anlaşılabilmektedir (kontrol paneli ekranındaki dedektörü temsil eden şeklin rengi; yeşil ise o andaki radon düzeyi 0-99 $Bq/m^3$ aralığında, sarı ise 100-149 $Bq/m^3$ aralığında ve kırmızı ise ortamdaki radon seviyesinin 150 $Bq/m^3$'ten daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır).

9) Kontrol sistemi ayrıca uygulama ekranından dedektörün yerini gösteren ve konum bilgisine erişim sağlayan görsel bir harita uygulamasına sahiptir.

10) Sistem geliştirilmeye çok açıktır. SBC içerisine kurulmuş olan ve veri alışverişini yöneten Python programlama dilinde yazdığımız kod yeni ihtiyaçlara göre modifeye edilebilir. Kontrol birimini oluşturmak için kullanılan C# dilinde yazdığımız program da güncellemeye müsaittir. Yeni bir düzenleme gerektiğinde, örneğin; anlık radon ölçümlerine bağlı olarak ölçüm yapılan mekânda o an için alınan dozun hesaplanıp uygulama ekranında görüntülenmesi istenirse, C# programına bir satırlık ekleme yapılması yeterlidir (test ölçümleri sonrası sistem için böyle bir iyileştirme gerçekleştirilmiş ve ayrıca yazılan ek komutlarla sisteme sesli alarm özelliği de kazandırılmıştır). Sistem tasarlandığı tarih itibarı ile son sürüm bir IoT cihazı kullanılarak kurulmuş ve ayrıca sistem mimarisi, makineden makineye (M2M) haberleşme, makine öğrenmesi ve yapay zekâ uygulamalarının yapılmasına imkân sağlayacak biçimde oluşturulmuştur.

11) Kullanımı kolay (kullanıcı-dostu) bir sistemdir. Kullanıcı, mail adresi ve kendisine yönetici tarafından verilen şifre ile herhangi bir yerden kontrol paneline giriş yapabilir. Kullanıcı panelindeki menüler mevcut işletim

sistemlerine benzer şekilde tasarlanarak görselleştirilmiş olup anlaşılması ve kullanımı oldukça sadedir.

12) Radon dedektörü ile SBC arasındaki Bluetooth bağlantısı için gerekli olan mesafe esnetilebilir (10 metreye kadar).

13) SBC ile modem arasında kablolu veya kablosuz bağlantı kurulabilmektedir (kablosuz bağlantı mesafesi ev tipi modemler için 20 metre menzile sahiptir).

14) IRL-RMS, radon konsantrasyonlarının yanı sıra nem ve sıcak niceliklerini de ölçebilmekte, saatlik olarak alınan tüm verileri eş zamanlı olarak tarih ve yer bilgileriyle birlikte kontrol merkezine iletmektedir.

15) Sistem ekonomiktir, daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap edebilmek amacıyla düşük maliyetli olacak şekilde tasarlanmıştır (tekli ölçüm sistemimizin maliyeti 350 Dolar civarında olup, AlphaGuard (~29000 Dolar), RTM 2200 Soil Gas (~13000 Dolar), RAD7 (~10000 Dolar) gibi cihazların fiyatlarına göre oldukça ekonomik bir sistemdir).

16) Sistemlerde kullanılan radon dedektörünün ölçüm aralığı yeterince geniştir (0-20000 $Bq/m^3$). Üreticinin bildirdiği doğruluk/kesinlik değerleri bina içi atmosferik ölçümleri için uygundur (Çizelge 3.1).

17) Deneysel ölçümler, bu sistemin uzun-dönem veri iletim performansının oldukça yüksek olduğunu göstermiştir. Tekli sistemin kullanıldığı ön-ölçümlerde %99,5 ve radon ağının yer aldığı test ölçümlerinde ise Isparta'daki dağıtım şebekesinden kaynaklanan uzun süreli elektrik kesintilerine rağmen %93 seviyesinde veri aktarım verimliliği sağlanmıştır.

18) Taşınabilir, estetik, düşük güç tüketimli, kolay monte edilebilen, insanların konfor alanlarında olumsuz etki yapmayan, çok yer kaplamayan, gürültüsüz çalışan bir tasarıma sahip olup, ölçüm yapılan mekânları kullananların maruz kalmakta olduğu radon düzeyini farklı renklerdeki ışıklarla görsel olarak bildiren

(bkz. 8. madde) ve insanların manuel olarak havalandırma yapıp yapmamaları gerektiğini anlayabilecekleri bir yapıya sahiptir.

19) IRL-RMS, yetkisiz kişilerin dışarıdan müdahalesini engelleyici unsurlara sahiptir (güvenlik duvarı, şifreli kontrol programı vb.). Yönetici ise, uzak bağlantı ile kontrol birimine erişerek ağda yer alan tüm tekli sistemlerdeki ölçüm cihazlarına müdahale etme yetkisine sahiptir (gerektiğinde sistem ayarlarını değiştirebilir, cihazın ölçüm sıklığını değiştirebilir, veri iletişimi kesilen cihazı yeniden aktif hale getirebilir, herhangi bir ölçümü durdurabilir ve gerekli güncellemelerini uzaktan yapabilir). Uzaktan erişim ile ölçüm sistemine ulaşmanın avantajları deneyimlenmiştir. Pandemi döneminde, sokağa çıkma yasağının olduğu gün ve zamanlarda cihazlara uzaktan erişilerek gerekli müdahalelerde bulunulmuştur.

# 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Radon maruziyeti, halk sağlığı açısından sahip olduğu risk potansiyeli nedeniyle 20. yüzyılın başlarından günümüze dek gerçekleştirilen sayısız araştırma ile nükleer fizikte yıllardır çalışılmış ve hala yoğun olarak çalışılmakta olan bir konudur (radon kelimesi ile 31 Aralık 2022 tarihi itibarıyla arama yapıldığında, sadece Google akademikte 887000 adet sonuç çıkmakta olup bunların 12300 tanesi 2022 yılına aittir). Bu yüzden, kapalı bir mekândaki atmosferik radon konsantrasyonunun belirlenebilmesi amacıyla farklı teknolojilere dayanan birçok ölçüm tasarımı geliştirilmiş durumdadır. Son yıllarda, elektronik radon sensörlerinin yaygınlaşması ve internet teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak uzaktan algılama konsepti kapsamında online ölçüm yapabilen uygun maliyetli sistemlerin hayata geçirilmesine odaklanılmıştır. Bina içi radon düzeyinin tespiti, takibi, tahmini ve radon yoğunluğunun azaltılması gibi konular için IoT teknolojilerini kullanarak bir çözüm geliştirmek popüler çalışma konuları arasında yerini almıştır.

Bu çalışmada, insanların bina içi radon maruziyetinin azaltılabilmesi amacıyla iki aşamada geliştirdiğimiz ve ülkemizdeki ilk web-kontrollü online radon takip ağı sistemlerinden biri olan IRL-RMS tasarım mimarisi tanıtılarak önerilen sistemin gerçek hayatta ne kadar etkin bir şekilde kullanılabileceği araştırılmıştır. İlk aşamada, IoT-tabanlı tekli bir radon takip sistemi geliştirilerek bu sistemin uzun-dönemli ölçümler için veri aktarma performansı bakımından uygunluğu ön-ölçümlerle incelenmiştir. Sonraki aşamada ise, tekli ölçüm sistemlerini bir arada kontrol edebilen web-tabanlı bir kontrol programı hazırlanarak IRL-RMS kurulmuştur. 12 tekli sistemin yer aldığı bu online radon takip ağının pratikte uzaktan algılamaya ne derece uygun olduğu ise bir yıl boyunca yapılan test ölçümleri ile araştırılmıştır.

Tasarlanan IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin (Bölüm 3.3) uzun-dönem ölçümler için veri iletim verimliliği, 1 Haziran 2020 ile 31 Ocak 2021 tarihleri arasında, Isparta il merkezinde bulunan ve daha önce radon sorunları olan bir meskende yapılan deneysel bir çalışmayla araştırılmıştır. 8 ay boyunca

sürdürülen ön-ölçümlerde, tekli sistemin saatte bir aldığı veriler, ücretsiz bir IoT platformu olan ThingSpeak'e gerçek zamanlı olarak aktarılmış ve toplamda 5848 adet radon ölçümü kayıt altına alınmıştır. Önerilen tekli sisteminin %99,5 gibi yüksek bir veri iletim verimliliğine sahip olduğu bulunmuş ve uzun-dönem radon ölçümleri için uygunluğu kanıtlanmıştır. IoT-tabanlı tekli radon takip sistemimize ait ön-ölçümlerde, söz konusu meskendeki atmosferik radon konsantrasyonlarının 2-178 Bq/m$^3$ arasında değiştiği ve ortalama radon düzeyinin 59 Bq/m$^3$ olduğu belirlenmiştir. Bu değer, TENMAK'ın evler için sınır olarak kabul ettiği 400 Bq/m$^3$ seviyesinin altındadır. Aynı ölçüm noktasında, Safety Siren Pro 3 elektronik radon dedektörü kullanılarak 2018 yılının Kasım ve Aralık aylarında kısa-dönem radon ölçümleri yapılmış ve ~700 Bq/m$^3$ düzeyinde bir radon konsantrasyonu tespit edilmiştir. 2019 yılında meskenin zeminine EPS (Expanded Polystyren Foam: Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük) malzeme kullanılarak yalıtım yapılmıştır. IoT tabanlı tekli radon takip sistemi ile Kasım ve Aralık 2020 tarihlerinde yapılan ölçümlerin ortalaması ~78 Bq/m$^3$ olarak bulunmuş ve radon yoğunluğunda önceki ölçümlere göre 9 kat civarında bir azalma gözlemlenmiştir. Böylelikle, tekli sistemle yapılan ölçümler, yalıtım sayesinde radonun zeminden bina içine sızmasının etkin bir şekilde önlendiğini de ortaya çıkarmıştır. Son olarak, ön-ölçümlere ait veriler SPSS 25.0 programıyla istatistiksel olarak incelenmiştir. Herhangi bir dağılıma uymayan ön-ölçüm verilerinin istatistiksel analizleri için parametrik olmayan testlerden yararlanılmıştır. Kruskal Wallis testleri sonucunda; radon konsantrasyonlarının aylara göre ve aynı zamanda da mevsimlere göre istatistiksel olarak anlamlı bir biçimde değiştiği bulunmuştur ($p<0,05$). Yaz mevsiminde radon ölçümlerinin en çok (30, 40 Bq/m$^3$], en az ise (120, 130 Bq/m$^3$] aralığında olduğu görülmüştür. Sonbahar mevsiminde ise radon ölçümlerinin en çok (50, 60 Bq/m$^3$], en az ise (0, 10 Bq/m$^3$] aralığında olduğu görülmüştür. Kış mevsiminde ise radon ölçümlerinin en çok (60, 70 Bq/m$^3$], en az ise (160, 170 Bq/m$^3$] aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra, mevsimler arasındaki ikili karşılaştırmalar için Bonferroni testi uygulanmış, farklı iki mevsim gruplarının tümünde radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu saptanmıştır (ölçüm büyüklükleri Yaz<Güz; Yaz<Kış; Güz<Kış olarak sıralanmaktadır). Radon konsantrasyonu ölçümlerinin aylara göre incelenmesi sonucu, en geniş aralığa

sahip ay 20-178 Bq/m$^3$ ile Ekim ayı olurken, en dar aralığa sahip ayın 9-84 Bq/m$^3$ ile Eylül ayı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, hangi aylar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu Bonferroni testi ile incelenmiş ve sadece Ağustos/Eylül ve Temmuz/Ağustos aylarına ait radon değerleri arasında istatistiksel bakımdan anlamlı bir fark olmadığı bulunmuştur (0,05≤p) (aralarında anlamlı fark bulunan aylar EK-F'de tam olarak listelenmiştir). Son olarak, ölçümlerdeki benzerliklerin saptanması amacıyla (yani ölçüm hatasının araştırılması amacıyla) radon ölçümlerinin günlük değişim katsayıları hesaplanmıştır (EK F). Toplamda 245 gün boyunca gerçekleştirilen saatlik radon ölçümleri baz alınarak, ölçüm hatasının söz konusu olabileceği günler için değişkenlik katsayıları hesaplanmıştır. Ölçüm hatası olabileceği düşünülen gün sayısı 3 olarak bulunmuştur (bu günlerin tamamı yaz mevsimi aylarında yer almaktadır). Bu üç günün ikisi tolere edilebilir görünürken, bir tanesi 0,86 değişkenlik katsayısı değeri ile hatalı ölçüm yapılmış olabileceğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, IoT-tabanlı tekli radon takip sistem tasarımımız için yapılan tüm değerlendirmeler, bu sistemin kurulmak istenilen radon takip ağında kullanılmasına uygun olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, 12 adet tekli sisteminin yer aldığı bir radon ölçüm ağı (IRL-RMS) kurulmuştur (Bölüm 3.4). Ağdaki tekli sistemlerden alınan verilerin depolanıp online olarak takip edilebilmesi amacıyla ASP.NET MVC5 kullanılarak tarafımızca C# dilinde geliştirilen özgün bir kodlamayla web-tabanlı bir kontrol programı oluşturulmuş ve sistem tasarımına entegre edilmiştir (Bölüm 3.4). Önerilen sistemin çalışması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi'ndeki 12 farklı ölçüm noktasında, 1 Mart 2021 tarihinden itibaren 28 Şubat 2022 günü bitimine dek test edilmiştir. Test ölçümlerinde, SBC'lerin uzaktan kontrolü ve görüntülenmesi için TeamViewer programından yararlanılmıştır. Bir yıl boyunca kesintisiz olarak çalıştırılan IRL-RMS sayesinde, 97503 adet saatlik radon ölçüm verisi, yer ve zaman bilgileriyle birlikte alınarak önceden belirlenmiş www.irl32.me adresli internet alanına aktarılmış ve depolanmıştır (sistem kaynaklı olmayan kesintiler nedeniyle ~%7'lik bir veri kaybı söz konusudur). IRL-RMS ile alınan test ölçüm verilerinin, 1 Bq/m$^3$ ile 4691 Bq/m$^3$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Her bir birimden elde edilen ölçüm

verileri Bölüm 4.2.1 ile 4.2.12 arasında ayrı ayrı; aylık, mevsimlik ve yıllık bazda değerlendirilmiştir. Test ölçümleri sonucunda, Fen-Edebiyat Fakültesi genelindeki ortalama radon seviyesinin 415 Bq/m$^3$ olduğu bulunmuştur. Bu ortalama, TENMAK'ın işyerleri için belirlediği 1000 Bq/m$^3$'lük sınırın altında olmakla birlikte, ölçüm yapılan iki birime ait radon yoğunluğu ortalamasının 1000 Bq/m$^3$'ü aştığı gözlemlenmiştir (D3 için 1970 Bq/m$^3$ ve D4 için 1579 Bq/m$^3$). Bu iki birimde radon yoğunluğunun düşürülmesine yönelik önlemler alınması tavsiye edilmektedir. Ek olarak, 9 birimdeki radon konsantrasyonu ortalamalarının, Dünya Sağlık Örgütü'nün kapalı mekânlar için tavsiye ettiği 100 Bq/m$^3$'lük referans düzeyinin üzerinde olduğu da tespit edilmiştir (D1:295 Bq/m$^3$, D2:125 Bq/m$^3$, D3:1970 Bq/m$^3$, D4:1579 Bq/m$^3$, D7:112 Bq/m$^3$, D8:247 Bq/m$^3$, D9:111 Bq/m$^3$, D10:106 Bq/m$^3$, D12:130 Bq/m$^3$). Fakültenin katlarındaki ortalama radon yoğunlukları; zemin kat için 1000 Bq/m$^3$, 1.kat için 135 Bq/m$^3$ ve 2.kat için 101 Bq/m$^3$ olarak tespit edilmiş, bina içi radon birikiminin yükseklik arttıkça azaldığı gösterilmiştir. Tüm test ölçümlerinden elde edilen veriler istatistiksel olarak SPSS 25.0 programıyla analiz edilmiştir. Radon ölçüm verilerinin normal dağılım sergilemediği bulunmuş ve bu nedenle istatistiksel analizler için parametrik olmayan testler kullanılmıştır. Parametrik olmayan Kruskal Wallis testiyle, radon ölçümleri ile katlar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu bulunmuştur ($p<0,05$). Katlar arasında ikili karşılaştırma yapmak için Bonferroni testi kullanılmış ve radon ölçümleri bakımından 1.Kat<Zemin Kat, 2.Kat<Zemin Kat ve 2.Kat<1.Kat olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$). Parametrik olmayan Kruskal Wallis testleri ayrıca, fakülte genelinde radon ölçümleri ile mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğunu göstermiştir ($p<0,05$). Bina içi atmosferik radon konsantrasyonu ortalamalarının; kış mevsiminde 455 Bq/m$^3$, ilkbahar mevsiminde 463 Bq/m$^3$, yaz mevsiminde 374 Bq/m$^3$ ve sonbahar mevsimi için ise 364 Bq/m$^3$ olduğu bulunmuştur. Mevsimler arasında ikili karşılaştırma yapmak için Bonferroni testi uygulanmıştır. İlkbahar/Kış ve Yaz/Sonbahar ikilileri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı ($p\geq0,05$), diğer tüm mevsim ikilileri arasında ise anlamlı bir farklılık olduğu ($p<0,05$) bulunmuştur.

Sonuç olarak, farklı mekânlardaki atmosferik radon konsantrasyonlarının uzaktaki bir merkezden takip edilebilmesi amacıyla geliştirilen IRL-RMS

tasarımı, sorunsuz bir şekilde tamamlanan test ölçümleriyle hayata geçirilmiş ve önerilen sistemin kısa ve uzun-dönemli radon ölçümleri için uygun olduğu gösterilmiştir. IRL-RMS uygun maliyetli bir sistem olup radyasyon araştırmaları kapsamında, belli bir coğrafi bölgedeki meskenlerde ve/veya işyerlerinde gerçekleştirilen eş-zamanlı saha ölçümleri için kullanılabilir. IRL-RMS tasarımının (pasif ölçüm yöntemiyle çalışan cihazlara göre ve online veri aktarımına uygun olmayan elektronik radon dedektörlerine göre) avantajları Bölüm 4.7'nin son kısmında 19 madde ile sıralanmıştır. Geliştirdiğimiz web-kontrollü online radon takip ağı sistemi, radon konsantrasyonu bakımından bina içi hava kalitesinin iyileştirilmesine ve dolayısıyla radon maruziyeti nedeniyle ortaya çıkan akciğer kanseri riskinin azaltılmasına imkân sağlamaktadır. Bu yüzden tez çalışmasında tanıtılan sistemin öncelikle, insanların topluca hizmet kamusal alanlarda, radyasyon uygulamalarının yapıldığı merkezlerde ve Isparta gibi yüksek radon gözlemlenen yerleşim birimlerindeki mekânlarda kullanılması önerilmektedir.

İlerideki çalışmalarda, önerilen sistemin geliştirilmesi üzerinde durulacaktır. Sisteme kullanıcıyı uyarma özelliği kazandırılabilir. Önceden tanımlanmış radon düzeyi aşıldığında sistem otomatik olarak kullanıcıyı görsel ve sesli alarmlarla uyararak (veya SMS ile bilgilendirerek) bina içi radon yoğunluğunun düşürülebilmesi için kullanıcının doğal havalandırma yapmasına veya ilgili mekândaki havalandırma sistemini çalıştırmasına imkân sağlayabilir. Sisteme otomatik havalandırma özelliği de kazandırmak mümkündür. Bu durumda, tanımlı radon düzeyi aşıldığında, makine-makine haberleşmesi kapsamında sisteme entegre edilecek havalandırma birimleri, sistem tarafından otomatik olarak çalıştırılıp radon düzeyi düştüğünde yine sistem tarafından otomatik olarak durdurulabilecektir. İleride ayrıca, IRL-RMS tasarım mimarisinden yola çıkılarak radyasyon uygulamalarının yapıldığı merkezler için alan monitörlemesi yapabilen sistemler de geliştirilebilir. IRL-RMS için kullanılan kontrol programının modifikasyonu ve ölçüm ağı sistemindeki radon dedektörleri yerine IoT kapsamında sürekli ölçüm yapabilen diğer radyasyon dedektörleri kullanılarak böyle bir çalışma yapmak mümkün olabilir.

**KAYNAKLAR**


Airthings; Wave Radon, 2022. Erişim Tarihi: 30.11.2022. https://www.airthings.com/wave-radon.

Airthings; Corentium Pro, 2022. Erişim Tarihi: 30.11.2022. https://www.airthings.com/professionals.

Aksoy A., 2019. Yeni Başlayanlar için Python. Abaküs Kitap Yayın Dağıtım Hizmetleri, 402s, İstanbul.

Akkoyun, S., 2003. Gama Işınlarının Yön Tayini. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, Ankara.

Alvarellos, A., Gestal, M., Dorado, J., Rabuñal, J. R., 2020. Developing A Secure Low-Cost Radon Monitoring System. Sensors, 20(3), 752.

Alvarellos, A., Chao, A. L., Rabuñal, J. R., García-Vidaurrázaga, M. D., Pazos, A. 2021., Development of an Automatic Low-Cost Air Quality Control System: A Radon Application. Applied Sciences, 11(5), 2169.

Amato, A., Scarcelli, A., Rizzi, M., Di Gioia, M., Marzocca, C., Dario, R., Di Lecce, V., 2020. A New Cyber Physical System for Gas Radon Monitoring and Controlling. IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, 1-3 June, Bari, Italy, 1-6.

Amato, A., Calienno, R., Dario, R., Di Lecce, V., Guaragnella, C., Marzocca, C., Rizzi, M., 2019. RADON Project: An Innovative System to Manage Gas Radon in Civil Buildings. II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, 4-6 June, Naples, Italy, 207-212.

Avcu, M., 2018. Raspberry Pi 3 ile Güneş Takip Sistemi. İstanbul Arel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83s, İstanbul.

Aydoğmuş, Z., Aydoğmuş, O., 2008. A Web-Based Remote Access Laboratory Using SCADA. IEEE Transactions on Education, 52(1), 126-132.

Bayrak, A., 2012. Design and Optimization of a Radon Field Monitor Based on Silicon Pin Photodiode. İstanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, M.Sc. Thesis, 49p, İstanbul.

Bayrak, A., Barlas, E., Emirhan, E., Kutlu, Ç., Özben, C. S., 2013. A Complete Low Cost Radon Detection System. Applied Radiation and Isotopes, 78, 1-9.

Beasley, R. E., 2020. Essential ASP. NET Web Forms Development. Apress Media, 565p, New York.

BEIR, VI, 1999. Health Effects of Exposure to Radon. National Academies Press: Washington, DC, USA.

Blanco-Novoa, O., Fernández-Caramés, T. M., Fraga-Lamas, P., Castedo, L., 2018. A Cost-Effective IoT System for Monitoring Indoor Radon Gas Concentration. Sensors, 18(7), 2198.

Blanco-Rodríguez, P., Fernández-Serantes, L. A., Otero-Pazos, A., Calvo-Rolle, J. L., de Cos Juez, F. J., 2017. Radon Mitigation Approach in a Laboratory Measurement Room. Sensors, 17(5), 1090.

Burke, Ó., Murphy, P., 2011. Regional Variation of Seasonal Correction Factors for Indoor Radon Levels. Radiation Measurements, 46(10), 1168-1172.

Chou, E., 2017. Mastering Python Networking. Packt Publishing Ltd., 454p, Birmingham.

Chu, M. C., Kwan, K. K., Kwok, M. W., Kwok, T., Leung, J. K. C., Leung, K. Y., Pun, C. S. J., 2016. The Radon Monitoring System in Daya Bay Reactor Neutrino Experiment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 808, 156-164.

Çine, A., 2017. Isparta İl Merkezinde Okullarda Bina içi Yıllık Radon Seviyelerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 194s, Isparta.

Deitel, H. M., Deitel, P. J., 2008. Internet & World Wide Web: How to Program. Pearson/Prentice Hall, 1424p, USA.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİGM), 2022. İl ve İlçelerimize Ait İstatistiki Veriler. Erişim Tarihi:08.11.2022. https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISPARTA.

Dow, C., 2018. Internet of Things Programming Projects: Build Modern IoT Solutions with the Raspberry Pi 3 and Python. Packt Publishing Ltd., 410p, Birmingham.

Durrani, S. A., Ilic, R., 1997. Radon Measurements by Etched Track Detectors-Applications in Radiation Protection. Earth Sciences and the Environment, World Scientific, 387p, New Jersey.

Durdu, G., 2010. Web Tabanlı Uzaktan Kontrollü Mikrodenetleyici Laboratuvarının Gerçekleştirilmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 188s, İstanbul.

EC, 2011. European Commission. Laying Down Basic Safety Standards for Protection Against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation. E.C. 0254 NLE, 593p.

Ekin, K., 2013. İzmir-Urla ve Çevresindeki Sismik Aktivitenin Sürekli Radon Ölçümlerine Olan Etkisinin İncelenmesi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 98s, İzmir.

EPA, 2005. Environmental Protection Agency. Citizen's Guide to Radon. U.S. EPA 402-K02-006, 11-16.

Ersan, R., Başayiğit, L., 2022. Ecological Modelling of Potential Isparta Rosa Areas (Rosa damascena Mill.). Industrial Crops and Products, 176, 114427.

Ferreira, S. M., 2020. An Internet of Things (IoT) Ecosystem for Detection and Removal of Radon Gas. Universidade da Beira Interior, PhD Thesis, 50p, Covilhã.

FileZilla, 2022. Erişim Tarihi: 30.11.2020. https://filezilla-project.org/.

Forouzan, B. A., Fegan, S. C., 2007. Data Communication and Networking. McGraw-Hill Companies, 1134p, New York.

Forsström, S., Jennehag, U., Guan, X., 2020. A Plain Low Threshold IoT Platform for Enabling New IoT Products from SMEs. IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, 3-5 June, Roma, Italy, 390-394.

Freeman, A., 2014. Pro ASP.NET MVC 5 Platform. Apress Media, 406p, New York.

Freyer, K., Treutler, H. C., Just, G., Philipsborn, H. V., 2003. Optimization of Time Resolution and Detection Limit for Online Measurements of $^{222}Rn$ in Water. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 257(1), 129-132.

Gaware, J. J., Sahoo, B. K., Sapra, B. K., Mayya, Y. S., 2011. Development of Online Radon and Thoron Monitoring Systems for Occupational and General Environments. BARC News Letters, 318, 45–51.

Galiana-Merino, J. J., Molina, S., Kharazian, A., Toader, V. E., Moldovan, I. A., Gómez, I., 2022. Analysis of Radon Measurements in Relation to Daily Seismic Activity Rates in the Vrancea Region, Romania. Sensors, 22(11), 4160.

George, A. C., 2008. World History of Radon Research and Measurement From the Early 1900's to Today. In AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 1034(1), 20-33.

Github Anonim Şirketi, 2022. Erişim Tarihi: 30.05.2020. https://github.com/Airthings/wave-reader.

Gliner, J. A., Morgan, G. A., Leech, N. L., 2016. Research Methods in Applied Settings: An Integrated Approach to Design and Analysis. Routledge: Taylor and Francis Group, 597p, New York and London.

Hambleton Jones, B. B., Smit, M. C. B., 1980. ROAC-A New Dimension in Radon Prospecting. Atomic Energy Board, Pretoria.

He, C., Zeng, Z., Zhang, L., Wang, Y., Guo, Q., 2022. A New-Designed System for Continuous Measurement of Radon in Water. Applied Radiation and Isotopes, 187, 110320.

Henning, J. I., Jordaan, H., 2016. Determinants of Financial Sustainability for Farm Credit Applications-A Delphi Study. Sustainability, 8(1), 77.

Herring, J. S., 2004. Uranium and Thorium Resource Assessment. Encyclopedia of Energy, Elsevier, 1, 279-298.

Hosokawa, K., Murata, A., Nakano, Y., Onishi, Y., Sekiya, H., Takeuchi, Y., Tasaka, S., 2013. Development of a High Sensitivity Radon Detector for Purified Gases. In Journal of Physics: Conference Series, 469(1), 012007.

ICRP, 2010. International Commission on Radiological Protection. Lung Cancer Risk From Radon and Progeny, ICRP ref 4843-4564-6599 1, 20-23.

ICRP, 2014. International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection Against Radon Exposure, ICRP Publication 126. Annual, 43(3), 5–73.

Irlayıcı, A., 1993. Isparta Ovası Hidrojeolojisi ve Yeraltı Suları ile İlgili Çevre Sorunları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, Isparta.

Kalyoncuoğlu, Ü., Anadolu, N., Baykut, A., Yiğit, E. R. E. K., 2010. Isparta Şehir Merkezi Yüzey Toprağındaki Radyoakativite Düzeyi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(1), 111-119.

Koçer A. A., Kürkçüoğlu M. E., 2019. An Investigation on Height Dependence of Atmospheric Indoor Radon Concentration. 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology, 2-4 May 2019, Amasya, 51.

Kurniawan, A., 2016. Getting Started with Windows 10 IoT Core for Raspberry Pi 3. PE Press, 113p, Depok.

Kurniawan, A., 2017. Intelligent IoT Projects in 7 Days: Build Exciting Projects Using Smart Devices. Packt Publishing Ltd., 338p, Birmingham.

Kurniawan, A., 2019. Raspbian OS Programming with the Raspberry Pi IoT Projects with Wolfram, Mathematica, and Scratch. Apress, 180p, New York.

Kürkçüoğlu M. E., Bayraktar G., 2012. Süleyman Demirel Üniversitesi'nde Bina İçi Radon Konsantrasyonlarının Nükleer İz Dedektörleri Kullanılarak Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16 (2), 167-183.

Kürkçüoğlu M. E., Tozun F., 2015. Isparta İl Merkezindeki İş Yerlerinde Atmosferik Radon Ölçümleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 10(1), 62-74.

Kürkçüoğlu M. E., 2018. Indoor Radon in Isparta. 4th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology, 20-22 April 2018, Antalya, 42.

Lopes, S. I., Cruz, A. M., Moreira, P. M., Abreu, C., Silva, J. P., Lopes, N., Curado, A., 2018. On the Design of a Human-in-the-Loop Cyber-Physical System for Online Monitoring and Active Mitigation of Indoor Radon Gas Concentration. IEEE International Smart Cities Conference, 16-19 September, Kansas, USA, 1-8.

Lopes, S. I., Moreira, P. M., Cruz, A. M., Martins, P., Pereira, F., Curado, A., 2019. RnMonitor: A WebGIS-Based Platform for Expedite in Situ Deployment of IoT Edge Devices and Effective Radon Risk Management. IEEE International Smart Cities Conference, 14-17 October, Casablanca, Morocco, 451-457.

Lubin JH, Boice JD, Edling C et al., 1994. Radon and Lung Cancer Risk: A Joint Analysis of 11 Underground Miner Studies. National Institutes of Health, National Cancer Institute, Washington, DC.

Malling, D. C., Fiorucci, S., Pangilinan, M., Chapman, J. J., Faham, C. H., Verbus, J. R., Gaitskell, R. J., 2013. Dark Matter Search Backgrounds From Primordial Radionuclide Chain Disequilibrium Astroparticle Physics, 1-21 e-Print: arXiv:1305.5183.

Marennyy, A. Tsapalov, A., Miklyaev, P., Petrova, T., 2016. Laws of Formation of Radon Field in a Geological Medium. Publisher Pero, 394p. Moscow, Russian.

Martins, P., Lopes, S. I., Pereira, F., Curado, A., 2020. RnMonitor: An IoT-Enabled Platform for Radon Risk Management in Public Buildings. In Science and Technologies for Smart Cities: 5th EAI International Summit, SmartCity360, 4-6 December 2019, Braga, Portugal, 49-55.

Medina-Pérez, A., Sánchez-Rodríguez, D., Alonso-González, I., 2021. An Internet of Thing Architecture Based on Message Queuing Telemetry Transport Protocol and Node-RED: A Case Study for Monitoring Radon Gas. Smart Cities, 4(2), 803-818.

Microsoft Corporation-1, 2019. Erişim Tarihi: 06.11.2020. https://visualstudio.microsoft.com/vs/.

Microsoft Corporation-2, 2019. Erişim Tarihi:06.11.2020. https://visualstudio.microsoft.com/vs/mac.

Microsoft Corporation-3, 2019. Erişim Tarihi:06.11.2020. https://visualstudio.microsoft.com/vs/compare/.

Microsoft Corporation-4, 2019. Erişim Tarihi: 06.11.2020. https://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/releases/2019/system-requirements.

Microsoft Corporation-5, 2019. Erişim Tarihi:09.11.2020. https://docs.microsoft.com.

Microsoft Corporation-6, 2019. Erişim Tarihi:06.11.2020. https://visualstudio.microsoft.com/tr/.

Miles, J. C. H., Kendall, G. M., Ibrahimi, Z. F., Howarth, C. B., 2004. Practical Procedures for a Radon Etched Track Dosimetry Service. Journal of Radiological Protection, 24(2), 165.

Miles, J. C. H., Howarth, C. B., Hunter, N., 2012. Seasonal Variation of Radon Concentrations in UK Homes. Journal of Radiological Protection, 32(3), 275.

Mitsuda, C., Kajita, T., Miyano, K., Moriyama, S., Nakahata, M., Takeuchi, Y., Tasaka, S., 2003. Development of Super-High Sensitivity Radon Detector for the Super-Kamiokande Detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 497(2-3), 414-428.

Muslim Murat, S. A. C., Harmansah, C., Camgoz, B., Sozbilir, H., 2011. Radon Monitoring as the Earthquake Precursor in Fault Line in Western Turkey. Ekoloji, 20(79), 93-98.

Olsson M., Tengström J., 2004. RADON: Presence and Remedial Measures in Europe and the USA. Chalmers University of Technology, Physics and Engineering Physics, Subatomic Physics, M.Sc. Thesis, 55p, Göteborg.

Pereira, F., Lopes, S. I., Carvalho, N. B., Curado, A., 2020. RnProbe: A Lora-Enabled IoT Edge Device for Integrated Radon Risk Management. The IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, 7-9 October, Tashkent, Uzbekistan, 203488-203502.

Pinel, J., Fearn, T., Darby, S. C., Miles, J. C. H., 1995. Seasonal Correction Factors for Indoor Radon Measurements in the United Kingdom. Radiation Protection Dosimetry, 58(2), 127-132.

Pronost, G., 2020. Radon Monitoring in the Kamioka Mine. 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 9-13 September 2019, Toyama, Japan, 012254.

Python Yazılım Vakfı; Python, 2022. Erişim Tarihi: 08.11.2022. https://www.python.org/.

Raspberry Pi Vakfı; Raspberry Pi 3B, 2022. Erişim Tarihi: 08.11.2022. https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/.

Raspberry Pi Vakfı; Raspberry Pi OS, 2022. Erişim Tarihi: 08.11.2022. https://www.raspberrypi.com/software/operating-systems/.

Reddy, P. S., Kumar, R. A. R., Mathews, M. G., Amarendra, G., 2017. Online Fault Diagnostics and Testing of Area Gamma Radiation Monitor Using Wireless Network. Nuclear Instruments And Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 859, 23-30.

Rinaldi, L., Ambrosino, F., Roca, V., D'Onofrio, A., Sabbarese, C., 2022. Study of $^{222-220}$Rn Measurement Systems Based on Electrostatic Collection by Using Geant4+ COMSOL Simulation. Applied Sciences, 12(1), 507.

Rizzo, A., Cardellini, F., Poggi, C., Borra, E., Ciciani, L., Narici, L., Vilardi, I., 2022. Novel Algorithm for Radon Real-Time Measurements with a Pixelated Detector. Sensors, 22(2), 516.

Sabol J., Berka Z., Vognar M., 1997. Study of Radon Concentration Behaviour in Tunnel Complex Under Vitkov Hill in Prague. In Proceedings of European Conference on Protection Against Radon at Home and at Work, Part II. Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear and Physical Engineering, 203-207.

Saç, M. M., Camgöz, B., 2005. İzmir'de Sismik Aktiviteler ile Radon Konsantrasyonları Arasındaki Korelasyonun İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 7(3), 47-54.

Sá, J. P., Branco, P. T., Alvim-Ferraz, M. C., Martins, F. G., Sousa, S. I., 2022. Radon in Indoor Air: Towards Continuous Monitoring. Sustainability, 14(3), 1529.

Scheible, O. K., 1987. Development of a Rationally Based Design Protocol for the Ultraviolet Light Disinfection Process. Journal (Water Pollution Control Federation), 59(1), 25-31.

Scott, B. R., Guilmette R. A., 2005. Radiation Toxicology, Ionizing and Nonionizing. Encyclopedia of Toxicology (Second Edition), 601-615.

Scott, B.R., 2014. Radiation Toxicology, Ionizing and Nonionizing. Encyclopedia of Toxicology, 29–43.

Shaikh, A. N., Ramachandran, T. V., Kumar, A. V., 2003. Monitoring and Modelling of Indoor Radon Concentrations in a Multi-Storey Building at Mumbai, India. Journal of Environmental Radioactivity, 67(1), 15-26.

Spiezia, G., Mekki, J., Batuca, S., Brugger, M., Calviani, M., Ferrari, A., Wijnands, T., 2011. The LHC Radiation Monitoring System-RadMon. 10th International Conference on Large Scale Applications and Radiation Hardness of Semiconductor Detectors, 6-8 July, Firenze, Italy, 143, 1-12.

Strauss, D., 2020. Getting Started with Visual Studio 2019: Learning and Implementing New Features. Apress Media, 267p, New York.

Streil, T., Oeser, V., Feige, S., 2002. An Electronic Radon Dosimeter as a New Multipurpose Device a Bridge Between Dosimetry and Monitoring. Geofisica Internacional, 41(3), 285-288.

Studnička, F., Štěpán, J., Šlégr, J., 2019. Low-Cost Radon Detector with Low-Voltage Air-Ionization Chamber. Sensors, 19(17), 3721.

Takeuchi, Y., Okumura, K., Kajita, T., Tasaka, S., Hori, H., Nemoto, M., Okazawa, H., 1999. Development of High Sensitivity Radon Detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 421(1-2), 334-341.

Takeuchi, Y., Tasaka, S., Nakano, Y., 2017. Radon Assay and Radioactivity Database in Kamioka. XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 4-9 July 2016, United Kingdom, 012211.

T.C. Isparta Valiliği, 2022. Erişim Tarihi:08.11.2022. www.isparta.gov.tr.

TeamViewer uzaktan yönetim, 2022. Erişim Tarihi:08.11.2022. https://www.teamviewer.com/tr/.

TENMAK, 2022. Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu. Erişim Tarihi: 30.11.2022. https://www.tenmak.gov.tr/.

Terray, L., Royer, L., Sarramia, D., Achard, C., Bourdeau, E., Chardon, P., Breton, V., 2020. From Sensor to Cloud: An IoT Network of Radon Outdoor Probes to Monitor Active Volcanoes. Sensors, 20(10), 2755.

ThingSpeak IoT Platformu, 2022. Erişim Tarihi:08.11.2022 https://thingspeak.com/.

TP-LINK Technologies Co., Ltd., 2022. Erişim Tarihi:08.11.2022. https://www.tp-link.com/tr/home-networking/dsl-modem-router/archer-vr400/v1/.

Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti. Erişim Tarihi: 06.06.2022. (24.03.2000 Tarih ve 23999 Sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan S.I.No. 37, Resmi Gazete'de Yayımlanan ve 25598 Sayılı Radyasyon Güvenliği Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik),2004. https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=5272&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeligi&mevzuatTertip=5.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2022. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları. Erişim Tarihi: 08.11.2022. https://www.tuik.gov.tr/.

Uluğ, A., Karabulut, M. T., Celebi, N., 2004. Radon Measurements with CR-39 Track Detectors at Specific Locations in Turkey. Nuclear Technology and Radiation Protection, 19(1), 46-49.

UNSCEAR, 1988. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report No: E.88.IX.7, 647p.

Yıldırım G., 2016. Raspberry Pi ve Python ile IoT Uygulamaları, Abaküs Kitap Yayın Dağıtım Hizmetleri, 184s, İstanbul.

Yumurtacı, E., 2014. Toprakta Sürekli Radon Gazı Ölçümleri için Eş Zamanlı İzleme Sisteminin Geliştirilmesi ve İzmir Urla Bölgesinde Uygulanması. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 117s, İzmir.

Yüksek Öğretim Kurumu (YÖK), 2022. Erişim Tarihi:08.11.2022. https://www.yok.gov.tr/.

Wang, G., Huang, Z., Xu, H., Yin, Y., Mu, C., Wang, Q., 2020. Remote Real-Time Control of Aerosol Continuous Monitoring for High Radon Concentration Environments. Applied Radiation and Isotopes, 155, 108922.

Wang, J., Guan, Y., Wu, L., Guan, X., Cai, W., Huang, J., et al., 2021. Changing Lengths of The Four Seasons by Global Warming. Geophysical Research Letters, 48(6), e2020GL091753.

Wang, H., Zhang, L., Wang, Y., Sun, C., Guo, Q., 2022. New-Designed in-Situ Measurement System for Radon Concentration in Soil Air and its Application in Vertical Profile Observation. Journal of Nuclear Science and Technology, 59(2), 222-229.

Warkentin, P., Curry, E., Michael, O., Bjorndal, B., 2020. A Comparison of Consumer-Grade Electronic Radon Monitors. Journal of Radiological Protection, 40(4), 1258.

WHO, 2009. World Health Organization. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, 94p.

Win32 Disk Imager, 2022. Erişim Tarihi: 30.11.2020. https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/.

**EKLER**

**EK A.** Çalışma İzin Belgesi

**EK B.** IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sisteminin Kurulumu

**EK B1.** VNC Sistemi

**EK B2.** Sensörlerden Veri Alınması

**EK B3.** Sensörlerden Verilerin Okunması

**EK B4.** Verilerin İnternete Gönderilmesi ve ThingSpeak Üzerinde Grafik Çizimi

**EK B5.** IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sistemi ile Verilerin Aktarılmasında Yaşanan Problemler ve Uygulanan Çözümler

**EK C.** Patent Bülten Yayını

**EK D.** Sistem Kurulumunda Yaşanan Sorunlar ve Uygulanan Çözümler

**EK E.** Wave Radon Dedektörü için 200 Bq/m³'teki Yüzde Ölçüm Hatasının Belirlenmesi

**EK F.** Ön-Ölçümlere ait İstatistiksel Analizler

**EK G.** Test Ölçümlerine ait İstatistiksel Analizler

## EK A. Çalışma İzin Belgesi

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
Fen Edebiyat Fakültesi Dekanlığı
Genel Evrak Birimi

Sayı :71130912-108.99-E.
Konu :Çalışma İzni (Dr. Öğr. Üyesi M. Ertan KÜRKÇÜOĞLU)

Tarih: 04.02.2020
Sayı : E.19197

FİZİK BÖLÜM BAŞKANLIĞINA

İlgi :28.01.2020 tarihli ve 61684663-903.99-E.15415 sayılı yazınız.

Bölümünüzde görev yapmakta olan Dr. Öğr. Üyesi M. Ertan KÜRKÇÜOĞLU'nun Doktora öğrencisi Abbas Alpaslan KOÇER ile birlikte yapmayı planladıkları BAP projesi kapsamında Fakültemiz birimlerinde radon gazı seviyesini ölçmeye yönelik bilimsel araştırmaları için gerekli iznin verilmesi Dekanlığımızca uygun görülmüş olup söz konusu projenin gerçekleştirilme aşamasında Fakültemizde ölçüm cihazlarının konumlandığı yerlere ait bilgilerin (ölçüm noktaları) Dekanlığımıza bildirilmesi hususunda bilgilerinizi rica ederim.

Prof. Dr. Cevdet YILMAZ
Dekan a.
Dekan Yardımcısı

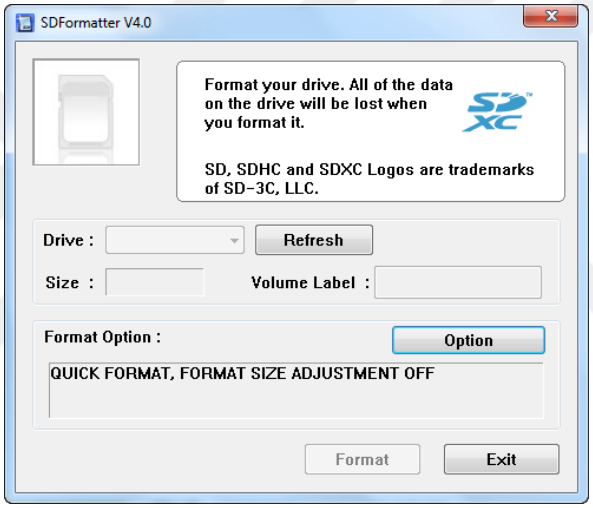
Bu evrak 5070 sayılı Elektronik İmza Kanununun 5. maddesi gereğince güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.
Doğrulama Linki :https://ebys.sdu.edu.tr//EvrakDogrula.html?2044562C

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Doğu Kampüsü
Çünür Mevki-ISPARTA
Tel No:(246) 211-4004 Faks No:(246) 211-4399
E-Posta:fef@sdu.edu.tr İnternet Adresi:http://fef.sdu.edu.tr

Bilgi İçin:Birol BELCİ
Memur
Tel No:2114004

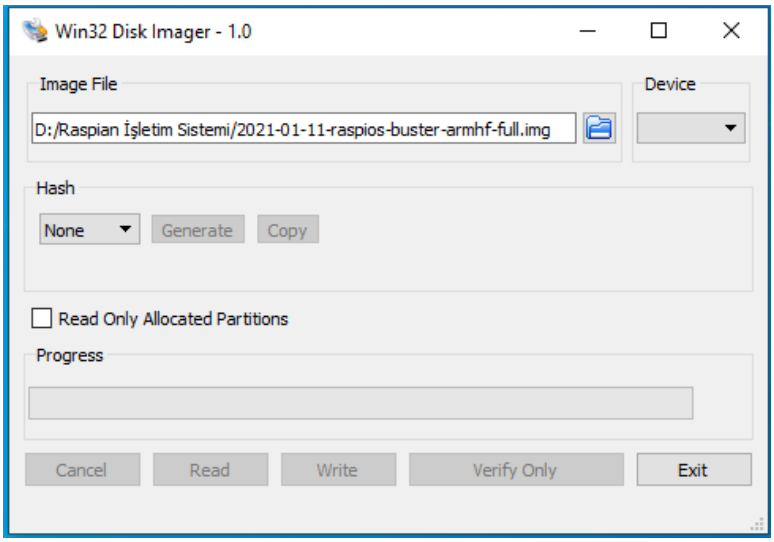
## EK B. IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sisteminin Kurulumu

Bu çalışmada ölçümlerin sürekli olarak takibinin yapılması, tek bir cihaz üzerinde tüm işlemlerin gerçekleştirilmesi amacıyla, ayrıca maliyet ve kullanım kolaylığından dolayı Raspberry Pi 3B, IoT kartı olarak tercih edilmiştir. Öncelikle Raspberry Pi 3B kartı ile uyumlu bir mikro SD kart belirlenmiştir. Mikro SD kartın boyutu 16 GB ve Class 10 olarak seçilmiştir. Mikro SD karta işletim sistemi kurulmadan önce Windows'ta SDFormatter programı aracılığıyla biçimlendirme gerçekleştirilmiştir (Kurniawan, 2016). Şekil B.1'de mikro SD kart biçimlendirme programı yer almaktadır.




Şekil B.1. Mikro SD kart biçimlendirme programı

Raspbian, Debian Linux tabanlı Raspberry Pi için oluşturulmuş açık kaynak bir işletim sistemidir. Raspberry Pi 3B kartına üzerindeki mikro SD karta işletim sistemi yüklenirken farklı işletim sistemlerindeki platformlara ve programlara ihtiyaç duyulmaktadır. Windows işletim sistemlerinde mikro SD karta Raspbian işletim sistemi Win32 Disk Imager programı aracılığıyla kurulmaktadır (Kurniawan, 2016; 2017; 2019). Şekil B.2'de mikro SD karta imaj yazma programı (Win32 Disk Imager) gösterilmektedir.




Şekil B.2. Mikro SD karta imaj dosyası yazmak için kullanılan Win32 Disk Imager programı

Mikro SD karta Linux işletim sisteminde kurulum gerçekleştirilirken "df-h" komutuyla mount edilen disk bileşenleri ve sistemdeki disklerin detaylı bilgilerine ulaşılabilir (Kurniawan, 2016; 2017; 2019).

## EK B1. VNC Sistemi

VNC bağlantısı üzerinden Raspberry Pi'ye erişim (istemci ve sunucu arasındaki iletişimde) oturum başlatma ve kimlik doğrulama şeklindedir. Kimlik doğrulamada maksimum sekiz karakterlik şifre kabul edilmektedir. İstemci ve sunucu arasındaki iletişim, DES (Data Encryption Standard-Veri Şifreleme Standartı) ve farklı VNC uygulamalara bağlı olarak 3DES (Triple Data Encryption Standard-Üçlü Veri Şifreleme Standardı) şifreleme protokolleri ile şifrelenmektedir. DES verileri 64 bitlik bloklar halinde şifreleme algoritmalarıdır. Aynı zamanda VNC sınama/yanıt (challenge/response) mekanizması kullanarak ağ üzerinde açık metin parola iletimini engellemeye yardımcı olur (Kurniawan, 2019).

VNC protokolü, OSI (Open System Interconnection-Açık Sistem Bağlantısı)'de 6. katman olan sunum katmanında (presantation layer) çalışmaktadır. VNC haberleşme programı, sunum katmanı üzerinden PC (iş istasyonu) ve sunucuda çalışan yazılımların nasıl veri transferi yapacağını belirler. Yollanan verinin

istemci ve sunucu tarafından anlaşılabilir halde olmasını sağlar. Böylece farklı programların birbirlerinin verisini kullanabilmesine imkân verir. VNC sistemini oluşturan bileşenler; VNC istemcisi, VNC sunucusu ve bir haberleşme protokolü olan RFB'dir (Remote Frame Buffer: Uzak Çerçeve Arabelleği) (Forouzan ve Fegan, 2007).

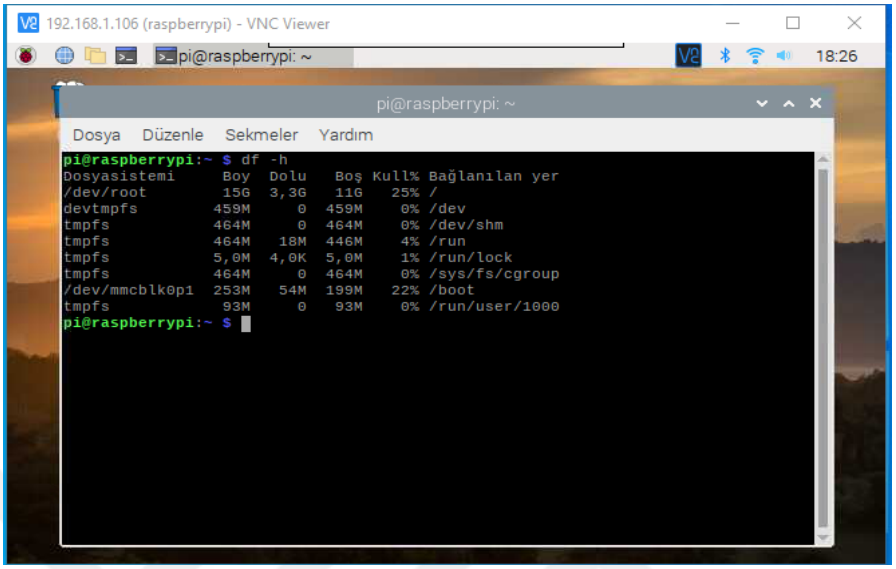
- VNC istemci, VNC sunucusuna bağlanmayı mümkün hale getirir. VNC sunucusu, bağlanılmak istenilen bilgisayara kurulur ve kurulduktan sonra istemci bilgisayarın kendisine bağlanarak Raspberry Pi 3B'yi yönetmesine imkân verir (Kurniawan, 2019).

- RFB haberleşme protokolü, grafik arayüzlerine uzaktan erişerek bilgiyi sunucudan istemciye ileten bir protokoldür. RFB protokolü ile klavye ve fare hareketleri ağ üzerinden başka bir bilgisayara gönderilip oluşturulan grafik bilgisi ve cevaplar görüntülü olarak geri alınır. RFB protokolü, TCP/IP protokolü üzerinden uzaktan erişimi sağlamaktadır. TCP haberleşme protokolü, OSI modelinde 4.katman olan taşıma katmanı (Transport Layer), IP ise 3.katman olan ağ katmanıdır (Network Layer). RFB protokolü, TCP üzerinden yollanacak verinin parçalara bölünmesini sağlar ve alıcı sistem olan VNC sunucusu üzerinde tekrar birleştirir (Forouzan ve Fegan, 2007).

Farklı cihazların birbirine bağlanmasını sağlayan RFB protokolünde, ağ üzerinde uzak masaüstü bağlantısı yapılan bilgisayar ile bu bilgisayara bağlantısı yapılmak istenen diğer bilgisayarın işletim sistemlerinin aynı olması gerekmez. Bunun yanında VNC ile birçok istemci aynı anda bir sunucuya bağlanma özelliğine de sahiptir (Kurniawan, 2019).

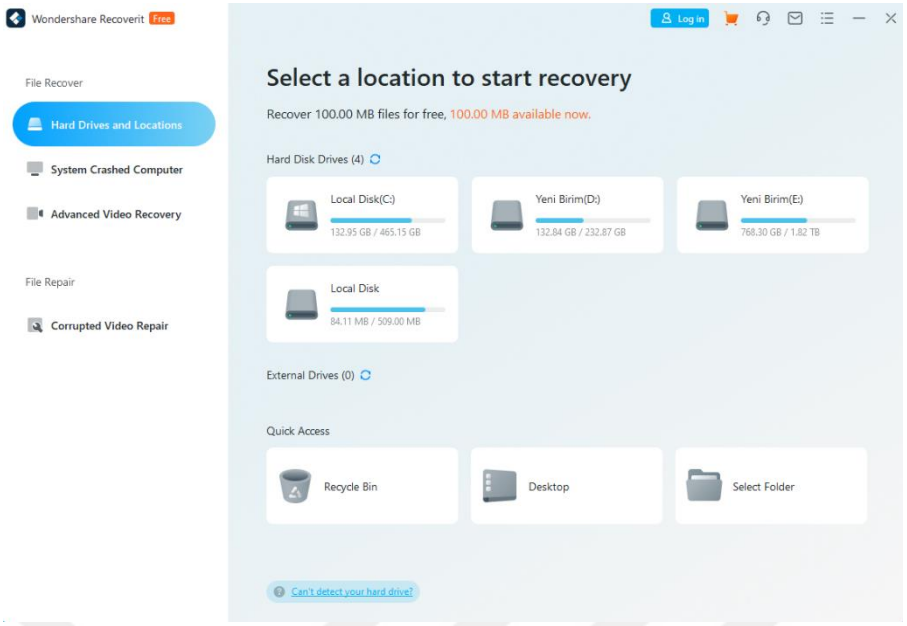
VNC'nin çalışma şekli; istemci bilgisayardan gönderilen klavye ve fare hareketlerini RFB protokolü sayesinde hedef bilgisayara aktarıp, hedef bilgisayarın ekranını görmeyi ve yönetmeyi sağlayan grafik arayüzlü uzak masaüstü paylaşımı şeklindedir. Farklı işletim sistemleri arasında uzak masaüstü bağlantısı yapması, dosya paylaşımı, sıkıştırma ve güvenlik gibi özellikleri

destekleyecek şekilde geliştirilmiş olması nedeniyle VNC'nin kullanımı oldukça fonksiyoneldir (Kurniawan, 2019). Şekil B.3'te SD kart mount edilmeden önce sistemin disk durumu gösterilmektedir.



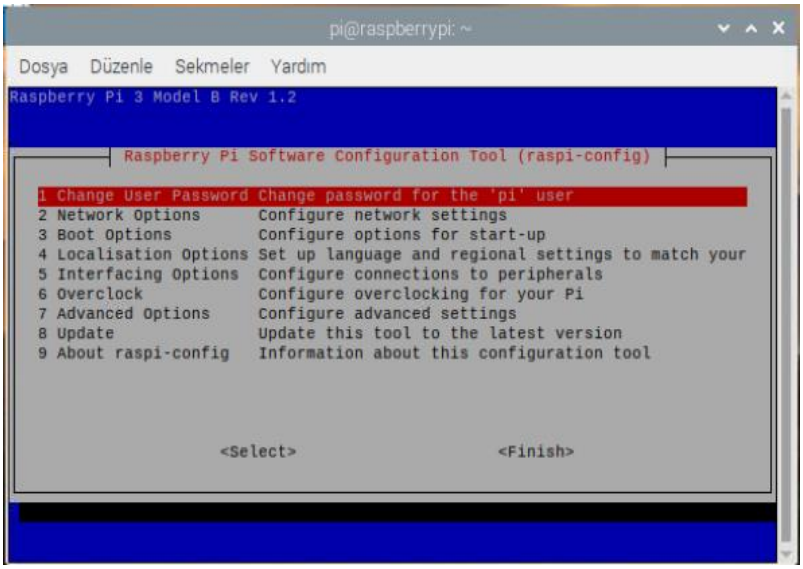

Şekil B.3. Mikro SD kart mount edilmeden önce sistemin disk durumu

Mikro SD kart takıldıktan sonra "df-h" komutu tekrarlandığında /dev/mmcblk0p1 gibi mikro SD kart bilgileri görülmektedir. Linux sistemlerde CLI'da "dd bs=4M if=2021-01-11-raspios-buster-armhf-full.img" komutuyla mikro SD karta imaj yazma işlemi gerçekleştirilmektedir. Terminal sayfasında komut uygulama işlemlerinde komutların ön kısmına "sudo" eklenmelidir. Linux işletim sisteminde sudo en yetkili kullanıcıyı temsil etmektedir. Sistemin mikro SD karta kurulum aşamaları tamamlandıktan sonra orjinal halinin imajı alınarak yukarıdaki işlemlerin tekrarlanması engellenmiştir. Mikro SD kartın imaj yedeğini PC'ye yedeklemek için bu program kullanılmıştır (Kurniawan, 2016; 2017; 2019). Şekil B.4'te SD kart imaj yedeği alma programı gösterilmektedir.



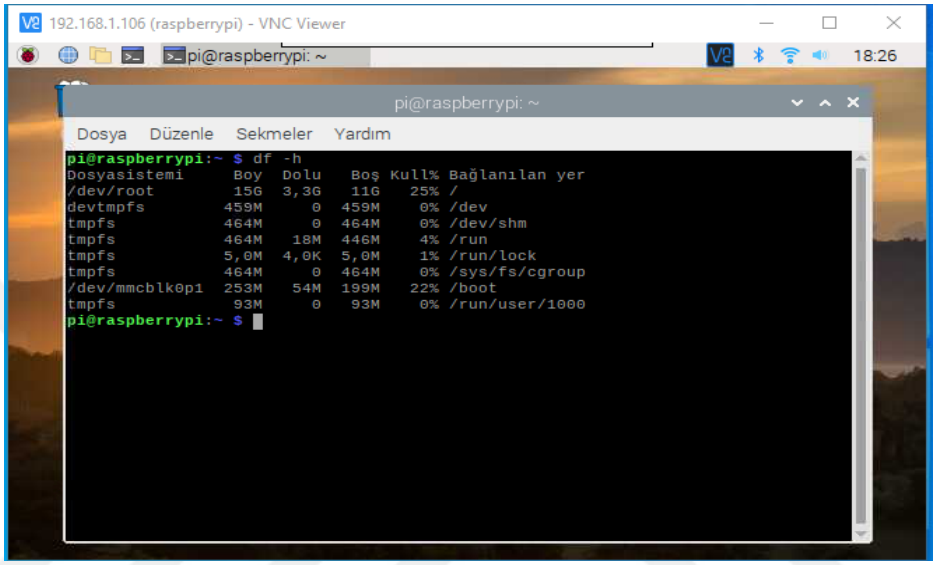

Şekil B.4. Mikro SD kart imaj yedeği alma programı

İmaj yedeği alındıktan sonra Raspberry Pi 3B'ye takılan SD kart üzerinden işletim sistemi çalıştırılmıştır. Raspbian işletim sistemlerinde login için default kullanıcı adı olarak "pi" ve şifre ise "raspberry" olarak belirlenmiştir. Raspbian işletim sisteminde Raspberry Pi 3B bileşenlerini konfigüre eden bir araç mevcuttur. Terminal ekranda bu araca erişmek için "sudo raspi-config" komutu verilmektedir (Kurniawan, 2016). Şekil B.5'te Raspberry Pi 3B terminal ekran konfigürasyon aracı gösterilmektedir.



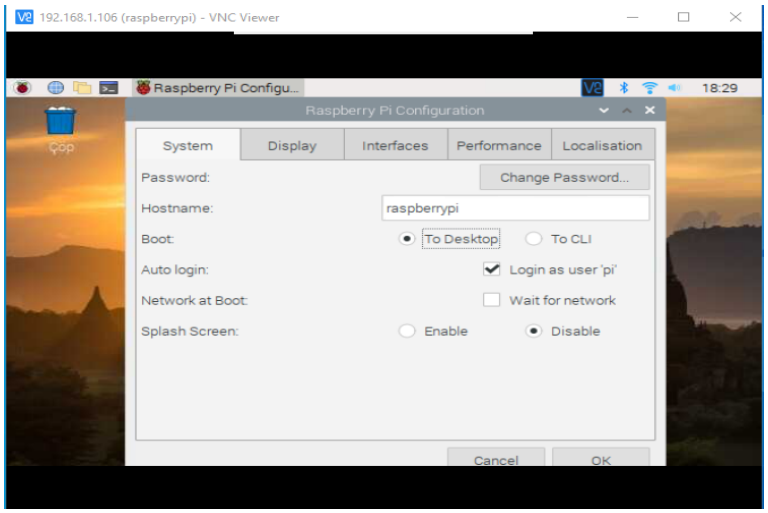

Şekil B.5. Raspberry Pi 3B CLI konfigürasyon aracı

Şekil B.5'teki arayüz kullanılarak dosya sisteminin boyutu genişletilebilmektedir. Kullandığımız disk 16 GB kapasiteye sahip olmasına rağmen Raspberry Pi 3B bunu 4 GB olarak görmüştür. Dosya genişletme işlemi sonrası sistem yeniden başlatılarak "df-h" komutu ile disk durumu kontrol edildiğinde, disk kapasitesi 16 GB olarak görülmüştür. Şekil B.6'da Raspberry Pi 3B'nin son disk büyüklüğü gösterilmektedir.



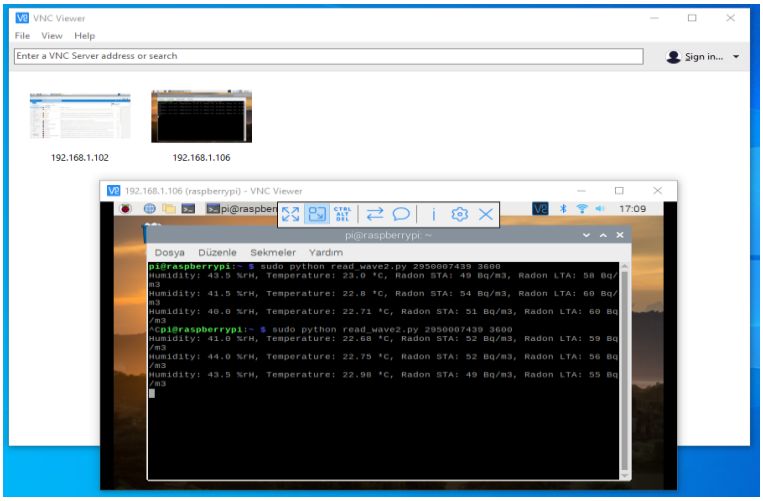

Şekil B.6. Raspberry Pi 3B disk durumu

Şekil B.6'da görülen sistemin kurulu olduğu /dev/root bölümü 3,3 GB büyüklüğünde olup mikro SD'nin %25'lik bir kısmına karşılık gelmektedir. Raspberry Pi 3B'nin konfigürasyon kısmı kullanılarak bilgilerinin güncellenmesi sağlanmıştır. Bu bilgiler arasında, açılış seçimleri, bölgesel dil-klavye ve zaman ayarları, Rastrack online haritaya kullanılan Raspberry Pi 3B'yi ekleme, hostname güncelleme, VNC-SSH-SPI-I2C gibi iletişim protokollerinin aktifleştirilmesi bulunmaktadır (Kurniawan, 2016). Raspberry Pi 3B'nin konfigürasyon kısmı Şekil B.7'de gösterilmektedir.




Şekil B.7. Raspberry Pi 3B için konfigürasyon işlemleri

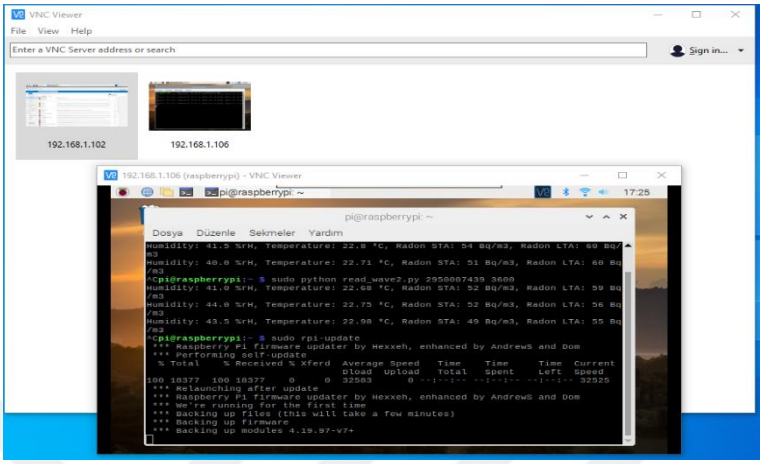
Konfigürasyon işlemleri tamamlandıktan sonra SBC'nin yanında olmaksızın uzaktan sisteme bağlanma, uzaktan dosya aktarımı, uzaktan sistem güncellemelerinin kontrol edilmesi veya extra program kurma işlemleri gerçekleştirilmiştir. IoT cihazına uzaktan bağlanarak SBC'nin komut sayfasındaki işlemlerin gerçekleştirilmesi için VNC protokolü aktifleştirilmiştir. Şekil B.8'de Windows işletim sistemine sahip masaüstü bir bilgisayardan SBC'ye yapılan VNC bağlantısı gösterilmektedir.




Şekil B.8. SBC'nin VNC ile uzaktan kontrolü

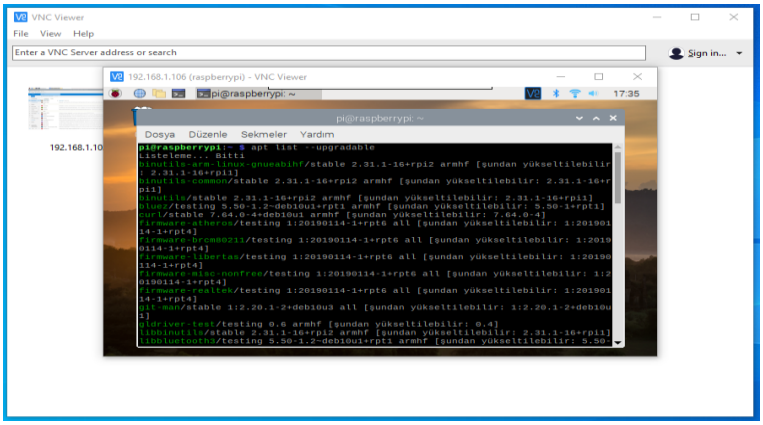
SBC'ye bağlantı yapıldıktan sonra gerekli güncellemeler kontrol edilmiştir. Güncelleme yapılmadan herhangi bir program yazıldığında verilerin okunmasında hata kodlarıyla karşılaşılmaktadır. Bu durumun yaşanmaması için

Raspberry Pi 3B'nin terminal ekranına "sudo rpi-update" komutu yazılarak güncellemeler yapılmıştır. Raspbian işletim sisteminin güncellenmesi Şekil B.9'da gösterilmektedir.



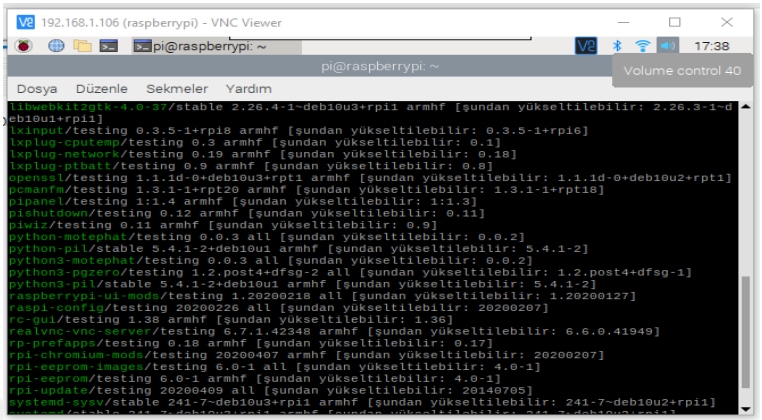

Şekil B.9. Raspbian işletim sisteminin güncellenmesi

Uzaktan kontrol edilen radon verileri için kopma ya da tutarsızlıkların önüne geçmek amacıyla Raspbian işletim sisteminde güncelleme yapılması gerekmektedir. Bundan dolayı sistem upgrage edilmiştir. Web sayfası çalışmayarak VNC bağlantısı tutarsız bir durum sergilerse tekrar güncelleme yapılarak bu sorun giderilebilmektedir. Sistemde yapılacak güncellemeler öncesi upgrade paketlerinin listelenmesi işlemi Şekil B.10'da gösterilmektedir.



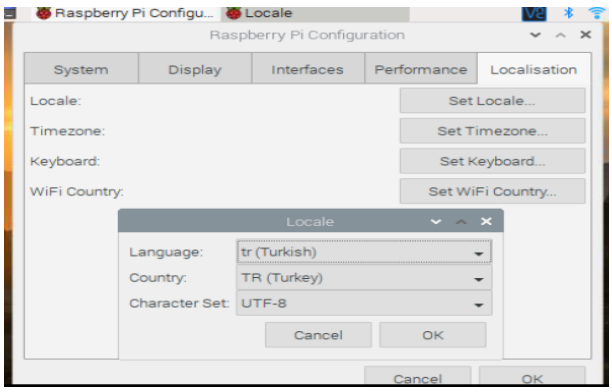

Şekil B.10. Güncellemeler öncesi upgrade paketlerinin listelenmesi

Güncelleme paketlerinin kontrolü sonrası gerekli uygulama veya bileşenler kurulmuştur. Kurulum esnasında paketlerin unpack işlemleri ve süreçleri izlenmiştir. Şekil B.11'de paketlerin kurulum süreci gösterilmektedir.




Şekil B.11. Paketlerin kurulum süreci

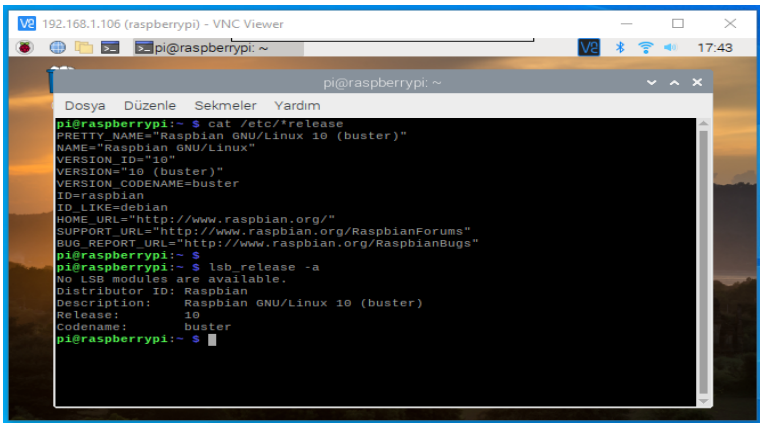
SBC 'de zaman ve bölgesel seçenekler önemli rol oynamaktadır. Bunlar; ülkeler ve bulundukları yerlere göre farklılıklar göstermektedir. Türkiye için zaman dilimi kıta olarak Avrupa, şehir olarak da İstanbul seçilmiştir. Dil olarak Türkçe kullandığımız için Şekil B.12'de gösterildiği gibi dil ve bölgesel ayarlar, "tr_TR. UTF8 UTF-8" olarak seçilmiştir.




Şekil B.12. Raspbian işletim sistemi için bölgesel ayarların yapılması

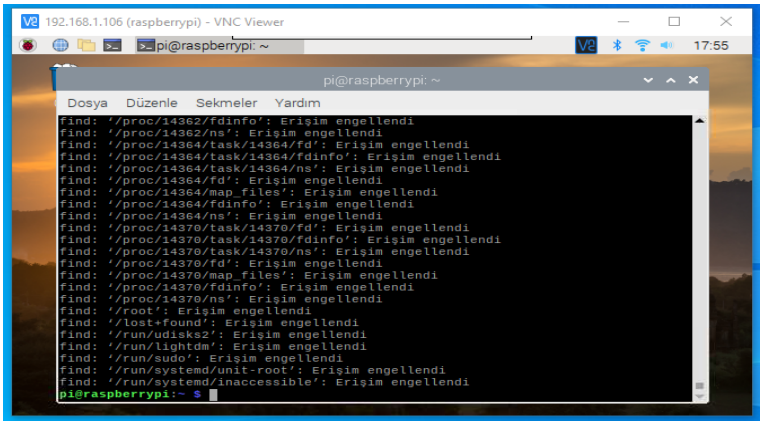
Burada yapılan çalışmada, kurulan program ve paketlerin versiyon uyuşmazlığının önüne geçilmesi, sistem yetersizliğinin önlenmesi ve sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için Raspbian işletim sisteminin güncel versiyonu

kullanılmıştır. Raspbian işletim sisteminin güncel versiyonuna ait detaylı bilgilere Şekil B.13'te gösterilen komut ve bilgilerden ulaşılabilmektedir.



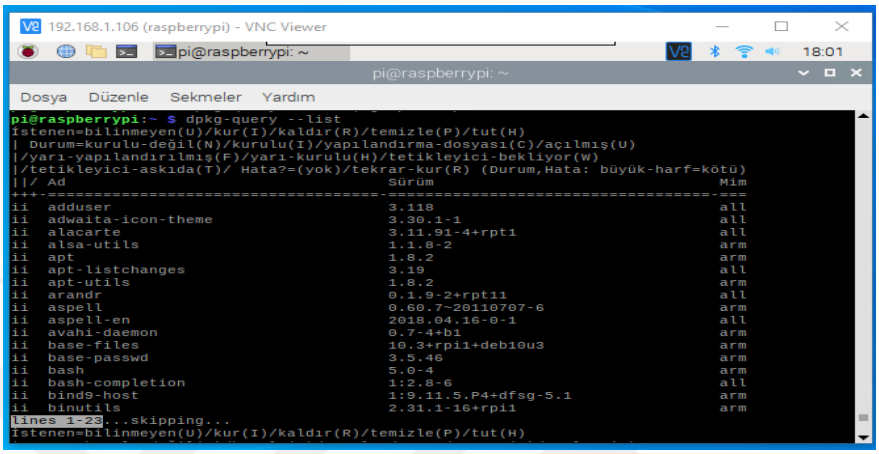

Şekil B.13. Raspbian işletim sistemi bilgileri

Yapılan çalışmalarda; gerekli olan programlar mevcut depoda bulunduğu için farklı sistemlerden indirilip kurulumları sağlanmıştır. SBC'de bulunan paketler terminal ekrana "aptitude search aranan_paket_adı" komutu verilerek kontrol edilmiştir. Daha önceden paket kurulumu yapıldığı için terminal ekranda listelenmiştir. Ayrıca paketin bulunduğu web sayfasından ilgili link kopyalanarak "wget" ile indirilmiştir. İndirilen paketler belirli formatlarda sıkıştırılmış olabilmektedir (Kurniawan, 2016). Bu paketler, dosya açma programları vasıtasıyla açılıp yükleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil B.14'te yüklenen paketin kontrolü yapılmaktadır.




Şekil B.14. Yüklenen paketin kontrolü

Dosya açma ve sıkıştırma işlemleri Debian'lı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Paketin kurulup kurulmadığını kontrol etmek için SBC'de "dpkg-query--list|greppaket_adı" komutu verilerek kontrol edilmiştir. Şekil B.15'te "dpkg-query--list" komutu verildiğinde sistemdeki kurulu paketlerin listesine ait ekran görüntüsü sunulmaktadır.




Şekil B.15. Sistemde yüklü paketlerin belirlenmesi

Günümüzde gerçek zamanlı olarak verilerin takip edilmesinde Python programlama dili kullanılmaktadır. Python programlama dilinin kullanılma sebebi; kullanım kolaylığı ve esnekliğinin yanı sıra, Debian tabanlı işletim sistemlerinde varsayılan olarak kurulu gelmesi, zengin kütüphane ve kaynaklara sahip olmasıdır.

## EK B2. Sensörlerden Veri Alınması

Python uygulamalarının PC, mini bilgisayar gibi cihazlarda çalışabilmesi için "python3-pip" paketinin yüklü olması gerekmektedir. Normalde "python3-pip" paketi SBC'ye yüklenen tam sürümlü işletim sistemlerinde bulunmaktadır. Paketin yüklü olmaması durumunda Çizelge B.1'deki komutlarla paket yüklenmelidir;

Çizelge B.1. Python 3'ün kurulumu

| |
|---|
| sudo apt-get install python3-pip |

## EK B3. Sensörlerden Verilerin Okunması

Ortamdaki radon, nem ve sıcaklık değerlerini wave radon dedektörüyle elde etmek için açık kaynak kodlu "wave-reader" kütüphanesi yüklenmiştir. Kütüphaneyi yüklerken Raspberry Pi 3B'nin terminalinde Çizelge B.2'deki kodlar sırasıyla çalıştırılmıştır (Github, 2022).

Çizelge B.2. Radon sensörü için takip kodları

```
pi@raspberrypi:~$ bluetoothctl
[bluetooth]# power on
[bluetooth]# show
[bluetooth]# exit
pi@raspberrypi:~$ python3 --version
pi@raspberrypi:~$ sudo apt-get update && sudo apt-get install libglib2.0-dev git
# For python 3
pi@raspberrypi:~$ sudo apt-get install python3-pip
pi@raspberrypi:~$ sudo pip3 install bluepy==1.3.0
pi@raspberrypi:~$ sudo git clone https://github.com/Airthings/wave-reader.git
pi@raspberrypi:~$ wget https://raw.githubusercontent.com/Airthings/wave-reader/master/read_wave.py
# For 1st Gen Wave
sudo python read_wave.py SERIAL_NUMBER SAMPLE_PERIOD [> somefile.txt]
# For 2nd Gen Wave
sudo python read_wave2.py SERIAL_NUMBER SAMPLE_PERIOD [> somefile.txt]
```

"wave-reader" kütüphanesi yüklendikten sonra, kütüphanenin ana programda (read_wave2.py) kullanılabilmesi için "import wave-reader" komutu yazılmıştır. Sensörün bağlandığı bluetooth ve diğer modüller Çizelge B.3'teki kodlarla tanımlanmıştır.

Çizelge B.3. Bluetooth ile radon, sıcaklık ve nem değerlerinin okunduğu modüller

```
import bluepy.btle as btle
import argparse
import signal
import struct
import sys
import time
```

Çizelge B.3'te verilen kodların sırasıyla açıklamaları aşağıda verilmiştir.

**import argparse:** Argparse modülü kullanıcının komut satırı arayüzlerini yazmayı kolaylaştırır. Program hangi argümanları gerektirdiğini tanımlar ve argparse bunları sys.argv'den nasıl ayrıştıracağını anlar. Argparse modülü, kullanıcılar programa geçersiz argümanlar verdiğinde otomatik olarak yardım ve kullanım mesajları oluşturur ve hatalar verir (Chou, 2017).

**import bluepy.btle as btle:** Bluetooth Düşük Enerji cihazlarıyla iletişim sağlayan bir Python modülüdür. Mevcut uygulama Linux üzerinde çalışır (dahili olarak BlueZ projesinden kod kullanır), ancak diğer platformlara taşınabilir (Chou, 2017).

**import signal:** Sinyal, bir olayın bildirimi gibidir. Sistemde bir olay meydana geldiğinde, diğer programları olay hakkında bilgilendirmek için bir sinyal üretilir. Örneğin, Ctrl+c tuşuna basılırsa, SIGINT adlı bir sinyal oluştur ve herhangi bir program, o sinyali okuyarak o olaydan gerçekten haberdar olabilir. Sinyaller tamsayılarla tanımlanmaktadır (Chou, 2017).

**import struct:** Python yapı modülü, dosyalarda, veritabanında veya ağ bağlantılarında vb. saklanan ikili verilerin işlenmesinde kullanılmaktadır (Chou, 2017).

**import sys:** Python sys modülünün sağladığı işlevler, Windows Platformu, Macintosh veya Linux olmasına bakılmaksızın, temel yorumlayıcı üzerinde çalışılmasını sağlamaktadır (Chou, 2017).

**import time:** time () fonksiyonu, zamanın başlangıcından, o anda içinde bulunulan ana kadar geçen toplam saniye miktarını vermektedir (Chou, 2017).

Programda ölçülen nem, kısa-dönem radon, uzun-dönem radon ve sıcaklık değerleri Çizelge B.4'teki kodlar yardımıyla, nem değerleri "humidity", kısa-dönem radon değerleri "radon_sta", uzun-dönem radon değerleri "radon_lta" ve sıcaklık değerleri ise "temperature" değişkenlerine atanmıştır.

Çizelge B.4. Nem, sıcaklık, kısa-uzun dönem radon değişkenlerinin atanması

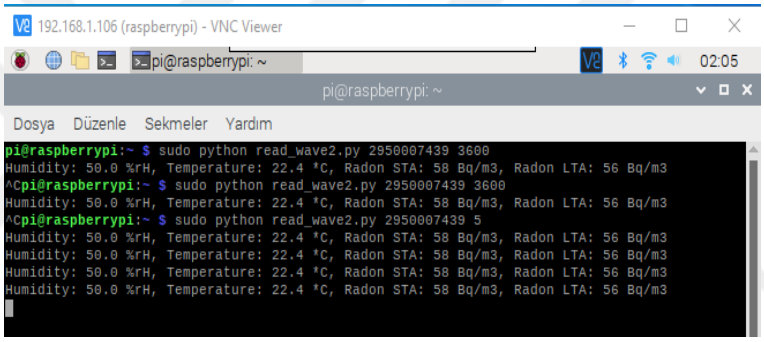
```
def __init__(self, humidity, radon_sta, radon_lta, temperature):
    self.humidity = humidity
    self.radon_sta = radon_sta
    self.radon_lta = radon_lta
    self.temperature = temperature
```

Ölçülen değerlerin terminalde gösterilmesi için Çizelge B.5'teki kod yazılmıştır.

Çizelge B.5. Radon dedektöründen verilerin okunmasını sağlayan kod

```
sudo python read_wave2.py
```

Ölçülen değerler terminalde, Şekil B.16'da verildiği gibi görülmektedir.




Şekil B.16. Nem, sıcaklık, kısa ve uzun-dönem radon bilgilerinin terminalde görünümü

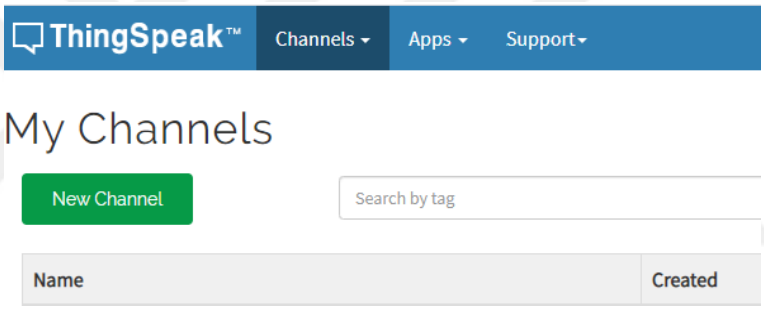
## EK B4. Verilerin İnternete Gönderilmesi ve ThingSpeak Üzerinde Grafik Çizimi

Elde edilen kısa ve uzun-dönem radon değerleri, nem ve sıcaklık verilerinin nasıl internete gönderilip, gerçek zamanlı olarak grafiklerin çizilmesi şu şekilde sağlanmıştır. Öncelikle, ThingSpeak hesabı oluşturulmuştur. Daha sonra yeni bir kanal oluşturulup, ölçümler buradan takip edilmiştir. ThingSpeak kullanırken, grafik çizmek, verileri bu siteye göndermek gibi amaçlarla sensörler için kanallar oluşturulması gerekmektedir (Yıldırım, 2016). ThingSpeak hesabına giriş yaptıktan sonra ana sayfa Şekil B.17'deki gibi görünmektedir.



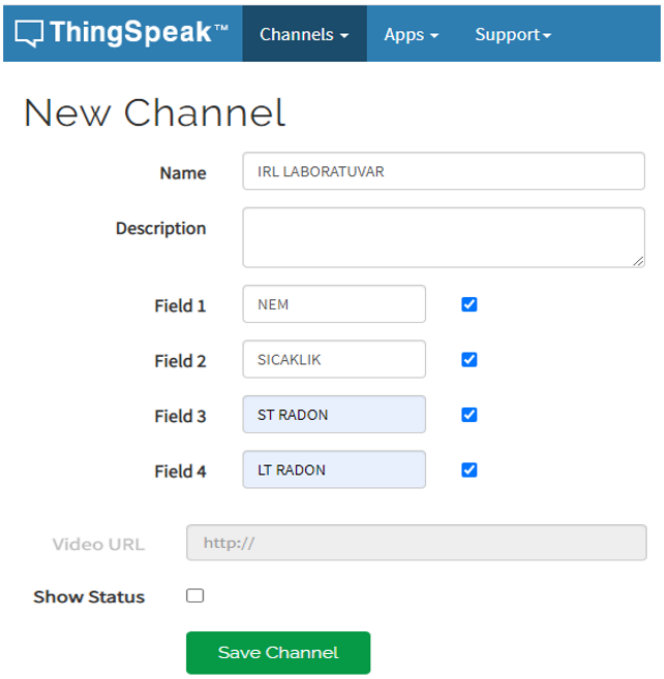

Şekil B.17. ThingSpeak ana ekranı

Ekranın üst kısımdaki Channels menüsüne gelinerek My Channels linkine tıklanmış, açılan pencerede My Channels kısmında yer alan New Channels butonuna tıklanarak yeni kanal oluşturmak için gerekli sayfaya ulaşılmıştır. Oluşturulan kanal Şekil B.18'de gösterilmektedir.



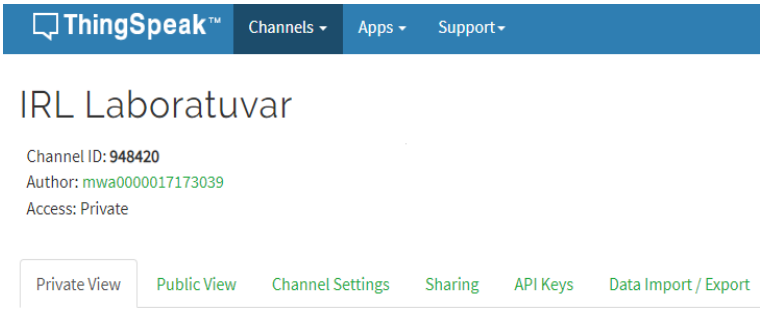

Şekil B.18. ThingSpeak my channels ekranı

Karşımıza yeni kanal oluşturmamızı sağlayan bir form gelmiş ve kanal ismi istediğimiz şekilde belirlenmiştir. Kanal adı olarak "IRL Laboratuvar" seçilmiştir. Bu kanala, farklı verileri gireceğimiz alanlar (Field) tanımlanmıştır. Field'lerin aktif olduğu sağ tarafındaki tiklerden anlaşılmıştır. Dört çeşit ölçüm verisi almak istediğimizden dolayı 4 alan tanımlanmıştır (Şekil B.19).



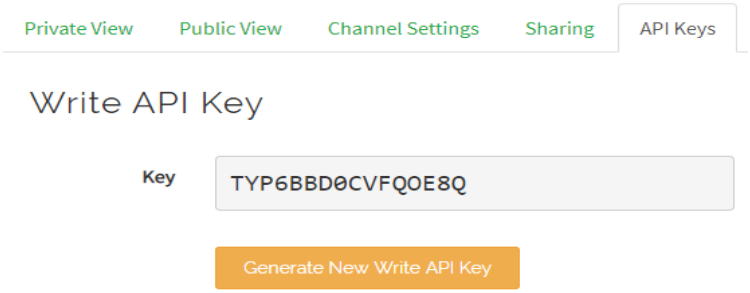

Şekil B.19. Dört alanın tanımlandığı ThingSpeak new channel ekranı

Başka bir değişiklik yapmadan, altta bulunan Save Channel butonuna basarak kanal oluşturma işlemi tamamlanmıştır. Bu aşamadan sonra program, yeni kanal sayfasına yönlendirme yapmaktadır (Şekil B.20).




Şekil B.20. ThingSpeak IRL laboratuvar ekranının görünümü

Channel ID, kanalımıza verilen numarayı temsil etmektedir. ThingSpeak üzerinde oluşturulan her kanalın farklı bir ID'si vardır. Yönetici (Author) olarak kanalı oluşturduğumuz için IRL ismi bize aittir, son olarak Access kısmında yazan private ifadesi kanaldaki verileri bizim dışımızda kimsenin göremeyeceğini ifade etmektedir. Eğer kanal ayarını Public olarak değiştirirsek oluşturan sayfa herkes tarafından görülebilmektedir. Menüden API Keys sekmesi, kanalımıza veri gönderebilmemiz için bize bir kod vermektedir (Şekil B.21).



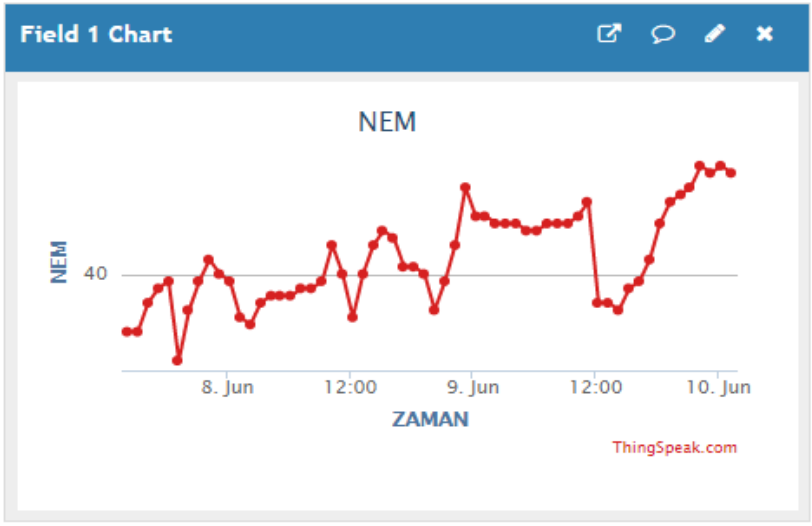

Şekil B.21. ThingSpeak Write API Key ekranı

Daha sonra API Key numarasını "yol" olarak tanımladığımız Çizelge B.6'daki kodla tüm ölçüm verilerinin internet ortamına aktarılması sağlanmıştır. Böylece Key kodunu kullanarak ölçülen tüm parametrelerin ThingSpeak üzerinden online olarak takibini yapma imkânı sağlanmıştır.

Çizelge B.6. API Key kullanılarak ThingSpeak üzerine verilerin gönderilmesi

```
yol:"field1="+str(self.humidity)+"&field2="+str(self.temperature)+"&field3="+str(se
lf.radon_sta)+"&field4="+str(self.radon_lta)
baseURL = 'http://api.thingspeak.com/update?api_key=TYP6BBD0CVFQOE8Q&'+yol
```

Çizelge B.6'da verilen kodda ilk olarak Field1 alanında humidity olarak adlandırılan nem değeri grafiğe yazdırılmıştır. Buradaki nem değeri dedektörün bulunduğu ortamdaki nem miktarını ayarlanan zaman dilimine göre Field1 alanına aktarılmıştır (Şekil B.22).



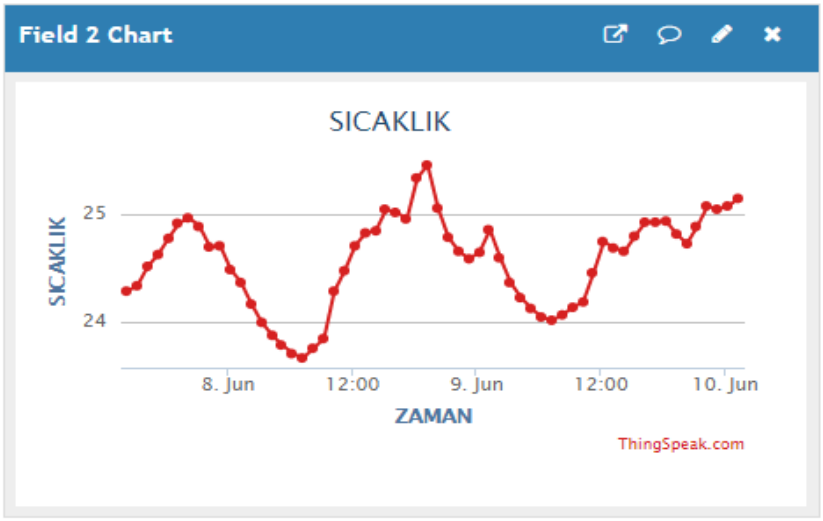

Şekil B.22. Zamana bağlı nem miktarı

Nem miktarının 8 Haziran-10 Haziran 2020 tarihleri arasındaki sürekli olarak değişimi Şekil B.22'deki gibi görülmektedir. Buradaki noktalar kodun ayarlandığı o andaki zaman dilimini ifade etmektedir (x-eksenindeki veriler). y-eksenindeki veriler ise nemin sayısal değerini ifade etmektedir. Ayrıca nem değerinin sayısal ifadesi ThingSpeak üzerinden excel formatında da alınmıştır. Şekil B.23'te yeşil renkle belirtilen kısımda nem değerlerinin saatlik değişimi görülmektedir.

| | | |
|---|---|---|
| 2020-06-08 00:15:34 39.5,24.48,41,61 | 2020-06-09 00:16:52 44.0,24.64,41,57 | 2020-06-10 00:18:21 47.5,25.07,28,54 |
| 2020-06-08 01:15:38 37.0,24.36,43,61 | 2020-06-09 01:16:55 44.0,24.85,39,57 | 2020-06-10 01:18:25 47.0,25.14,28,54 |
| 2020-06-08 02:15:40 36.5,24.16,43,61 | 2020-06-09 02:16:58 43.5,24.59,36,57 | 2020-06-10 02:18:27 46.5,25.16,31,54 |
| 2020-06-08 03:15:43 38.0,23.99,46,61 | 2020-06-09 03:17:01 43.5,24.36,36,57 | 2020-06-10 03:18:30 46.5,25.15,28,53 |
| 2020-06-08 04:15:46 38.5,23.87,52,60 | 2020-06-09 04:17:04 43.5,24.22,29,56 | 2020-06-10 04:18:33 46.5,25.14,31,53 |
| 2020-06-08 05:15:50 38.5,23.78,46,60 | 2020-06-09 05:17:07 43.0,24.12,33,56 | 2020-06-10 05:18:37 46.0,24.81,26,53 |
| 2020-06-08 06:15:52 38.5,23.7,40,60 | 2020-06-09 06:17:10 43.0,24.04,35,56 | 2020-06-10 06:18:40 45.5,24.58,23,53 |
| 2020-06-08 07:15:55 39.0,23.66,38,60 | 2020-06-09 07:17:14 43.5,24.01,33,57 | 2020-06-10 07:18:43 45.5,24.48,23,52 |
| 2020-06-08 08:15:58 39.0,23.75,38,60 | 2020-06-09 08:17:17 43.5,24.06,37,57 | 2020-06-10 08:18:47 45.5,24.5,23,52 |
| 2020-06-08 09:16:02 39.5,23.84,41,60 | 2020-06-09 09:17:20 43.5,24.13,34,57 | 2020-06-10 09:18:50 45.5,24.54,25,52 |
| 2020-06-08 10:16:06 42.0,24.28,43,60 | 2020-06-09 10:17:24 44.0,24.18,35,57 | 2020-06-10 10:18:52 45.5,24.59,23,52 |
| 2020-06-08 11:16:09 40.0,24.47,45,60 | 2020-06-09 11:17:28 45.0,24.45,35,57 | 2020-06-10 11:18:55 45.0,24.63,20,52 |
| 2020-06-08 12:16:12 37.0,24.7,49,60 | 2020-06-09 12:17:32 38.0,24.74,35,56 | 2020-06-10 12:18:59 45.5,24.88,20,52 |
| 2020-06-08 13:16:14 40.0,24.82,47,60 | 2020-06-09 13:17:40 38.0,24.68,35,56 | 2020-06-10 13:19:02 41.0,25.21,22,53 |
| 2020-06-08 14:16:17 42.0,24.84,47,59 | 2020-06-09 14:17:43 37.5,24.65,35,56 | 2020-06-10 14:19:05 43.0,25.07,24,53 |
| 2020-06-08 15:16:20 43.0,25.04,44,59 | 2020-06-09 15:17:47 39.0,24.79,35,56 | 2020-06-10 15:19:08 42.5,25.12,29,53 |
| 2020-06-08 16:16:22 42.5,25.01,41,59 | 2020-06-09 16:17:50 39.5,24.92,35,55 | 2020-06-10 16:19:11 44.5,25.27,29,52 |
| 2020-06-08 17:16:26 40.5,24.95,41,59 | 2020-06-09 17:17:54 41.0,24.92,38,55 | 2020-06-10 17:19:14 42.5,25.34,28,53 |
| 2020-06-08 18:16:29 40.5,25.33,47,59 | 2020-06-09 18:17:57 43.5,24.93,33,55 | 2020-06-10 18:19:17 45.5,25.39,27,52 |
| 2020-06-08 19:16:33 40.0,25.45,45,59 | 2020-06-09 19:18:06 45.0,24.81,32,55 | 2020-06-10 19:19:20 47.5,25.53,29,52 |
| 2020-06-08 20:16:36 37.5,25.05,40,59 | 2020-06-09 20:18:09 45.5,24.72,34,55 | 2020-06-10 20:19:23 46.5,25.43,27,52 |
| 2020-06-08 21:16:39 39.5,24.78,43,59 | 2020-06-09 21:18:12 46.0,24.88,32,55 | 2020-06-10 21:19:25 46.5,25.31,27,52 |
| 2020-06-08 22:16:46 42.0,24.65,43,58 | 2020-06-09 22:18:15 47.5,25.07,32,55 | 2020-06-10 22:19:28 45.0,25.02,27,52 |
| 2020-06-08 23:16:49 46.0,24.58,39,57 | 2020-06-09 23:18:18 47.0,25.04,32,54 | 2020-06-10 23:19:31 46.0,24.94,28,52 |

Şekil B.23. Nem değerlerinin saatlik olarak değişim miktarı

Çizelge B.6'da verilen kodda, Field2 alanında temperature olarak verilen sıcaklık miktarının değişimi grafiğe yazdırılmıştır. Buradaki sıcaklık değeri, dedektörün bulunduğu ortamdaki sıcaklık miktarının ayarlanan zaman dilimine göre Field2 alanına aktarılmasıyla oluşturulmuştur (Şekil B.24).



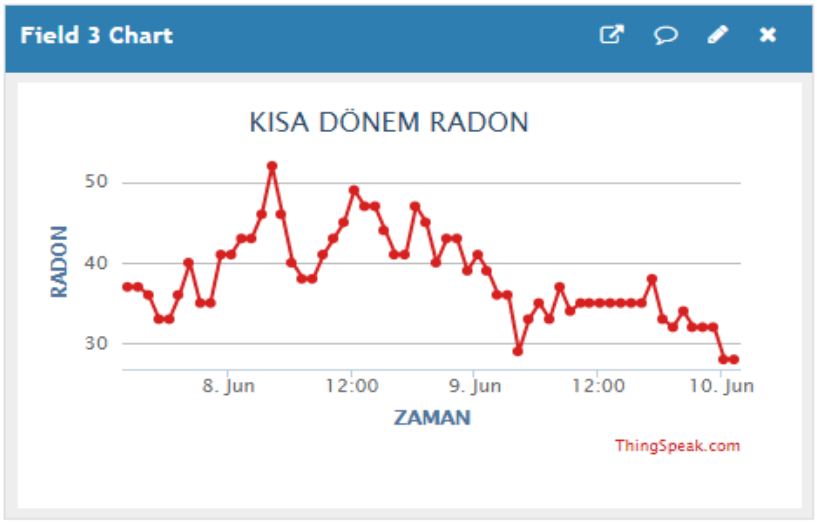

Şekil B.24. Zamana bağlı sıcaklık değerleri

Sıcaklık değerinin 8 Haziran-10 Haziran 2020 tarihleri arasındaki sürekli olarak değişimi Şekil B.24'teki gibi görülmektedir. Ayrıca Şekil B.25'te sıcaklık değerlerinin sayısal olarak saatlik değişimi kırmızı renkle belirtilmiştir.

| | | |
|---|---|---|
| 2020-06-08 00:15:34 39.5,24.48,41,61 | 2020-06-09 00:16:52 44.0,24.64,41,57 | 2020-06-10 00:18:21 47.5,25.07,28,54 |
| 2020-06-08 01:15:38 37.0,24.36,43,61 | 2020-06-09 01:16:55 44.0,24.85,39,57 | 2020-06-10 01:18:25 47.0,25.14,28,54 |
| 2020-06-08 02:15:40 36.5,24.16,43,61 | 2020-06-09 02:16:58 43.5,24.59,36,57 | 2020-06-10 02:18:27 46.5,25.16,31,54 |
| 2020-06-08 03:15:43 38.0,23.99,46,61 | 2020-06-09 03:17:01 43.5,24.36,36,57 | 2020-06-10 03:18:30 46.5,25.15,28,53 |
| 2020-06-08 04:15:46 38.5,23.87,52,60 | 2020-06-09 04:17:04 43.5,24.22,29,56 | 2020-06-10 04:18:33 46.5,25.14,31,53 |
| 2020-06-08 05:15:50 38.5,23.78,46,60 | 2020-06-09 05:17:07 43.0,24.12,33,56 | 2020-06-10 05:18:37 46.0,24.81,26,53 |
| 2020-06-08 06:15:52 38.5,23.7,40,60 | 2020-06-09 06:17:10 43.0,24.04,35,56 | 2020-06-10 06:18:40 45.5,24.58,23,53 |
| 2020-06-08 07:15:55 39.0,23.66,38,60 | 2020-06-09 07:17:14 43.5,24.01,33,57 | 2020-06-10 07:18:43 45.5,24.48,23,52 |
| 2020-06-08 08:15:58 39.0,23.75,38,60 | 2020-06-09 08:17:17 43.5,24.06,37,57 | 2020-06-10 08:18:47 45.5,24.5,23,52 |
| 2020-06-08 09:16:02 39.5,23.84,41,60 | 2020-06-09 09:17:20 43.5,24.13,34,57 | 2020-06-10 09:18:50 45.5,24.54,25,52 |
| 2020-06-08 10:16:06 42.0,24.28,43,60 | 2020-06-09 10:17:24 44.0,24.18,35,57 | 2020-06-10 10:18:52 45.5,24.59,23,52 |
| 2020-06-08 11:16:09 40.0,24.47,45,60 | 2020-06-09 11:17:28 45.0,24.45,35,57 | 2020-06-10 11:18:55 45.0,24.63,20,52 |
| 2020-06-08 12:16:12 37.0,24.7,49,60 | 2020-06-09 12:17:32 38.0,24.74,35,56 | 2020-06-10 12:18:59 45.5,24.88,20,52 |
| 2020-06-08 13:16:14 40.0,24.82,47,60 | 2020-06-09 13:17:40 38.0,24.68,35,56 | 2020-06-10 13:19:02 41.0,25.21,22,53 |
| 2020-06-08 14:16:17 42.0,24.84,47,59 | 2020-06-09 14:17:43 37.5,24.65,35,56 | 2020-06-10 14:19:05 43.0,25.07,24,53 |
| 2020-06-08 15:16:20 43.0,25.04,44,59 | 2020-06-09 15:17:47 39.0,24.79,35,56 | 2020-06-10 15:19:08 42.5,25.12,29,53 |
| 2020-06-08 16:16:22 42.5,25.01,41,59 | 2020-06-09 16:17:50 39.5,24.92,35,55 | 2020-06-10 16:19:11 44.5,25.27,29,52 |
| 2020-06-08 17:16:26 40.5,24.95,41,59 | 2020-06-09 17:17:54 41.0,24.92,38,55 | 2020-06-10 17:19:14 42.5,25.34,28,53 |
| 2020-06-08 18:16:29 40.5,25.33,47,59 | 2020-06-09 18:17:57 43.5,24.93,33,55 | 2020-06-10 18:19:17 45.5,25.39,27,52 |
| 2020-06-08 19:16:33 40.0,25.45,45,59 | 2020-06-09 19:18:06 45.0,24.81,32,55 | 2020-06-10 19:19:20 47.5,25.53,29,52 |
| 2020-06-08 20:16:36 37.5,25.05,40,59 | 2020-06-09 20:18:09 45.5,24.72,34,55 | 2020-06-10 20:19:23 46.5,25.43,27,52 |
| 2020-06-08 21:16:39 39.5,24.78,43,59 | 2020-06-09 21:18:12 46.0,24.88,32,55 | 2020-06-10 21:19:25 46.5,25.31,27,52 |
| 2020-06-08 22:16:46 42.0,24.65,43,58 | 2020-06-09 22:18:15 47.5,25.07,32,55 | 2020-06-10 22:19:28 45.0,25.02,27,52 |
| 2020-06-08 23:16:49 46.0,24.58,39,57 | 2020-06-09 23:18:18 47.0,25.04,32,54 | 2020-06-10 23:19:31 46.0,24.94,28,52 |

Şekil B.25. Sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi

Çizelge B.6'da verilen kodda, Field3 alanında radon_sta olarak verilen kısa-dönem radon verilerinin değişimi grafiğe yazdırılmıştır. Buradaki kısa-dönem radon değeri, dedektörün bulunduğu ortamdaki radon miktarının ayarlanan zaman dilimine göre Field3 alanına aktarılmasıyla oluşturulmuştur (Şekil B.26).



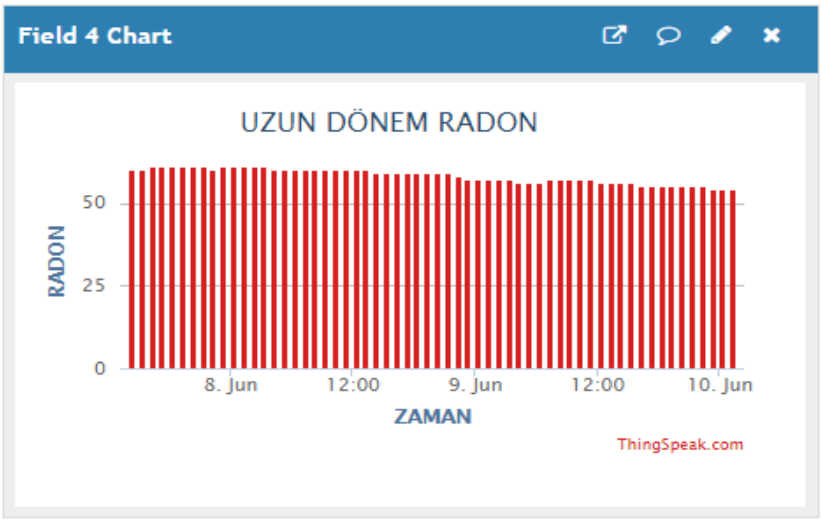

Şekil B.26. Zamana bağlı kısa-dönem radon ölçümleri

8 Haziran ile 10 Haziran 2020 tarihleri arasındaki saatlik kısa-dönem radon ölçümleri, ThingSpeak ekranında Şekil B.26'daki gibi görülmektedir. Şekil B.27'de lacivert renkle belirtilen kısımda kısa-dönem radon değerlerinin saatlik değişimi listelenmektedir.

| | | |
|---|---|---|
| 2020-06-08 00:15:34 39.5,24.48,41,61 | 2020-06-09 00:16:52 44.0,24.64,41,57 | 2020-06-10 00:18:21 47.5,25.07,28,54 |
| 2020-06-08 01:15:38 37.0,24.36,43,61 | 2020-06-09 01:16:55 44.0,24.85,39,57 | 2020-06-10 01:18:25 47.0,25.14,28,54 |
| 2020-06-08 02:15:40 36.5,24.16,43,61 | 2020-06-09 02:16:58 43.5,24.59,36,57 | 2020-06-10 02:18:27 46.5,25.16,31,54 |
| 2020-06-08 03:15:43 38.0,23.99,46,61 | 2020-06-09 03:17:01 43.5,24.36,36,57 | 2020-06-10 03:18:30 46.5,25.15,28,53 |
| 2020-06-08 04:15:46 38.5,23.87,52,60 | 2020-06-09 04:17:04 43.5,24.22,29,56 | 2020-06-10 04:18:33 46.5,25.14,31,53 |
| 2020-06-08 05:15:50 38.5,23.78,46,60 | 2020-06-09 05:17:07 43.0,24.12,33,56 | 2020-06-10 05:18:37 46.0,24.81,26,53 |
| 2020-06-08 06:15:52 38.5,23.7,40,60 | 2020-06-09 06:17:10 43.0,24.04,35,56 | 2020-06-10 06:18:40 45.5,24.58,23,53 |
| 2020-06-08 07:15:55 39.0,23.66,38,60 | 2020-06-09 07:17:14 43.5,24.01,33,57 | 2020-06-10 07:18:43 45.5,24.48,23,52 |
| 2020-06-08 08:15:58 39.0,23.75,38,60 | 2020-06-09 08:17:17 43.5,24.06,37,57 | 2020-06-10 08:18:47 45.5,24.5,23,52 |
| 2020-06-08 09:16:02 39.5,23.84,41,60 | 2020-06-09 09:17:20 43.5,24.13,34,57 | 2020-06-10 09:18:50 45.5,24.54,25,52 |
| 2020-06-08 10:16:06 42.0,24.28,43,60 | 2020-06-09 10:17:24 44.0,24.18,35,57 | 2020-06-10 10:18:52 45.5,24.59,23,52 |
| 2020-06-08 11:16:09 40.0,24.47,45,60 | 2020-06-09 11:17:28 45.0,24.45,35,57 | 2020-06-10 11:18:55 45.0,24.63,20,52 |
| 2020-06-08 12:16:12 37.0,24.7,49,60 | 2020-06-09 12:17:32 38.0,24.74,35,56 | 2020-06-10 12:18:59 45.5,24.88,20,52 |
| 2020-06-08 13:16:14 40.0,24.82,47,60 | 2020-06-09 13:17:40 38.0,24.68,35,56 | 2020-06-10 13:19:02 41.0,25.21,22,53 |
| 2020-06-08 14:16:17 42.0,24.84,47,59 | 2020-06-09 14:17:43 37.5,24.65,35,56 | 2020-06-10 14:19:05 43.0,25.07,24,53 |
| 2020-06-08 15:16:20 43.0,25.04,44,59 | 2020-06-09 15:17:47 39.0,24.79,35,56 | 2020-06-10 15:19:08 42.5,25.12,29,53 |
| 2020-06-08 16:16:22 42.5,25.01,41,59 | 2020-06-09 16:17:50 39.5,24.92,35,55 | 2020-06-10 16:19:11 44.5,25.27,29,52 |
| 2020-06-08 17:16:26 40.5,24.95,41,59 | 2020-06-09 17:17:54 41.0,24.92,38,55 | 2020-06-10 17:19:14 42.5,25.34,28,53 |
| 2020-06-08 18:16:29 40.5,25.33,47,59 | 2020-06-09 18:17:57 43.5,24.93,33,55 | 2020-06-10 18:19:17 45.5,25.39,27,52 |
| 2020-06-08 19:16:33 40.0,25.45,45,59 | 2020-06-09 19:18:06 45.0,24.81,32,55 | 2020-06-10 19:19:20 47.5,25.53,29,52 |
| 2020-06-08 20:16:36 37.5,25.05,40,59 | 2020-06-09 20:18:09 45.5,24.72,34,55 | 2020-06-10 20:19:23 46.5,25.43,27,52 |
| 2020-06-08 21:16:39 39.5,24.78,43,59 | 2020-06-09 21:18:12 46.0,24.88,32,55 | 2020-06-10 21:19:25 46.5,25.31,27,52 |
| 2020-06-08 22:16:46 42.0,24.65,43,58 | 2020-06-09 22:18:15 47.5,25.07,32,55 | 2020-06-10 22:19:28 45.0,25.02,27,52 |
| 2020-06-08 23:16:49 46.0,24.58,39,57 | 2020-06-09 23:18:18 47.0,25.04,32,54 | 2020-06-10 23:19:31 46.0,24.94,28,52 |

Şekil B.27. Kısa-dönem radon verilerinin saatlik olarak değişimi

Çizelge B.6'da verilen kodda dördüncü olarak Field4 alanında radon_lta olarak adlandırılan uzun-dönem radon verileri grafiğe yazdırılmıştır (Şekil B.28).



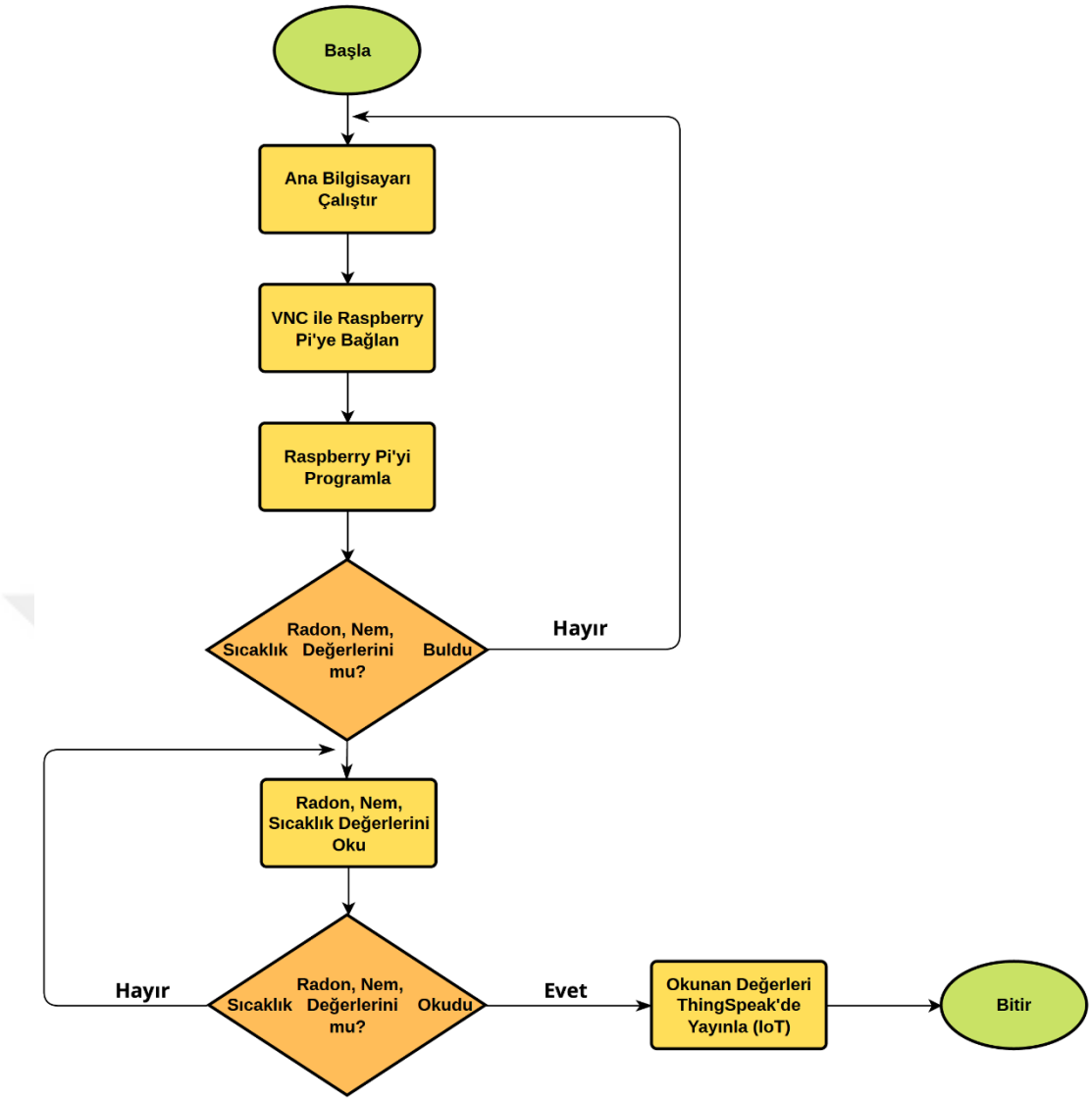

Şekil B.28. Zamana bağlı uzun-dönem radon değerleri

Uzun-dönem radon verilerinin aynı tarih aralığındaki değişimi Şekil B.28'de sunulmaktadır. Bu grafikte x-ekseni ölçümün alındığı zamanı ve y-ekseni de uzun-dönem radon konsantrasyolarının sayısal değerlerini ifade etmektedir. Şekil B.29'da sarı renkle belirtilen kısımda uzun-dönem radon değerlerinin saatlik değişimi görülmektedir.

| | | |
|---|---|---|
| 2020-06-08 00:15:34 39.5,24.48,41,61 | 2020-06-09 00:16:52 44.0,24.64,41,57 | 2020-06-10 00:18:21 47.5,25.07,28,54 |
| 2020-06-08 01:15:38 37.0,24.36,43,61 | 2020-06-09 01:16:55 44.0,24.85,39,57 | 2020-06-10 01:18:25 47.0,25.14,28,54 |
| 2020-06-08 02:15:40 36.5,24.16,43,61 | 2020-06-09 02:16:58 43.5,24.59,36,57 | 2020-06-10 02:18:27 46.5,25.16,31,54 |
| 2020-06-08 03:15:43 38.0,23.99,46,61 | 2020-06-09 03:17:01 43.5,24.36,36,57 | 2020-06-10 03:18:30 46.5,25.15,28,53 |
| 2020-06-08 04:15:46 38.5,23.87,52,60 | 2020-06-09 04:17:04 43.5,24.22,29,56 | 2020-06-10 04:18:33 46.5,25.14,31,53 |
| 2020-06-08 05:15:50 38.5,23.78,46,60 | 2020-06-09 05:17:07 43.0,24.12,33,56 | 2020-06-10 05:18:37 46.0,24.81,26,53 |
| 2020-06-08 06:15:52 38.5,23.7,40,60 | 2020-06-09 06:17:10 43.0,24.04,35,56 | 2020-06-10 06:18:40 45.5,24.58,23,53 |
| 2020-06-08 07:15:55 39.0,23.66,38,60 | 2020-06-09 07:17:14 43.5,24.01,33,57 | 2020-06-10 07:18:43 45.5,24.48,23,52 |
| 2020-06-08 08:15:58 39.0,23.75,38,60 | 2020-06-09 08:17:17 43.5,24.06,37,57 | 2020-06-10 08:18:47 45.5,24.5,23,52 |
| 2020-06-08 09:16:02 39.5,23.84,41,60 | 2020-06-09 09:17:20 43.5,24.13,34,57 | 2020-06-10 09:18:50 45.5,24.54,25,52 |
| 2020-06-08 10:16:06 42.0,24.28,43,60 | 2020-06-09 10:17:24 44.0,24.18,35,57 | 2020-06-10 10:18:52 45.5,24.59,23,52 |
| 2020-06-08 11:16:09 40.0,24.47,45,60 | 2020-06-09 11:17:28 45.0,24.45,35,57 | 2020-06-10 11:18:55 45.0,24.63,20,52 |
| 2020-06-08 12:16:12 37.0,24.7,49,60 | 2020-06-09 12:17:32 38.0,24.74,35,56 | 2020-06-10 12:18:59 45.5,24.88,20,52 |
| 2020-06-08 13:16:14 40.0,24.82,47,60 | 2020-06-09 13:17:40 38.0,24.68,35,56 | 2020-06-10 13:19:02 41.0,25.21,22,53 |
| 2020-06-08 14:16:17 42.0,24.84,47,59 | 2020-06-09 14:17:43 37.5,24.65,35,56 | 2020-06-10 14:19:05 43.0,25.07,24,53 |
| 2020-06-08 15:16:20 43.0,25.04,44,59 | 2020-06-09 15:17:47 39.0,24.79,35,56 | 2020-06-10 15:19:08 42.5,25.12,29,53 |
| 2020-06-08 16:16:22 42.5,25.01,41,59 | 2020-06-09 16:17:50 39.5,24.92,35,55 | 2020-06-10 16:19:11 44.5,25.27,29,52 |
| 2020-06-08 17:16:26 40.5,24.95,41,59 | 2020-06-09 17:17:54 41.0,24.92,38,55 | 2020-06-10 17:19:14 42.5,25.34,28,53 |
| 2020-06-08 18:16:29 40.5,25.33,47,59 | 2020-06-09 18:17:57 43.5,24.93,33,55 | 2020-06-10 18:19:17 45.5,25.39,27,52 |
| 2020-06-08 19:16:33 40.0,25.45,45,59 | 2020-06-09 19:18:06 45.0,24.81,32,55 | 2020-06-10 19:19:20 47.5,25.53,29,52 |
| 2020-06-08 20:16:36 37.5,25.05,40,59 | 2020-06-09 20:18:09 45.5,24.72,34,55 | 2020-06-10 20:19:23 46.5,25.43,27,52 |
| 2020-06-08 21:16:39 39.5,24.78,43,59 | 2020-06-09 21:18:12 46.0,24.88,32,55 | 2020-06-10 21:19:25 46.5,25.31,27,52 |
| 2020-06-08 22:16:46 42.0,24.65,43,58 | 2020-06-09 22:18:15 47.5,25.07,32,55 | 2020-06-10 22:19:28 45.0,25.02,27,52 |
| 2020-06-08 23:16:49 46.0,24.58,39,57 | 2020-06-09 23:18:18 47.0,25.04,32,54 | 2020-06-10 23:19:31 46.0,24.94,28,52 |

Şekil B.29. Uzun-dönem radon verilerinin saatlik değişimi

ThingSpeak üzerinden aynı zamanda konum bilgisi de ayarlanarak tam olarak nerede ölçüm yapıldığı belirlenebilmektedir. Bu özellik, farklı mekânlarda farklı ölçüm sistemleriyle eş zamanlı ölçüm yapılması söz konusu olduğunda önem kazanmaktadır. Şekil B.30'da IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin akış diyagramı sunulmaktadır.




Şekil B.30. IoT-tabanlı tekli radon takip sisteminin akış diyagramı

## EK B5. IoT-Tabanlı Tekli Radon Takip Sistemi ile Verilerin Aktarılmasında Yaşanan Problemler ve Uygulanan Çözümler

Kısa ve uzun-dönem radon ölçümlerinde, nem, sıcaklık değerlerinin online sisteme aktarılmasında tekli sistem denemesi yapılmış ve bu ölçümlerde neticeye ulaşılana kadar bir çok problemle karşılaşılmıştır. İlk olarak Airthings şirketinin açık kod erişiminin bulunduğu github kütüphanesi üzerinden Raspberry Pi 3B ile kodun çalıştırılması denenmiştir. İlk denemeden sonra birkaç defa radon ve diğer parametrelerin Raspberry Pi 3B üzerinden görünümü sağlanmış fakat çok fazla kesinti olduğu için başka kodlarla deneme çalışması yapılmaya çalışılmıştır. Github kütüphanesi üzerinden radon dedektöründen alınacak verilerin kesintisiz bir şekilde Raspberry Pi 3B'ye nasıl aktarılacağı konusunda araştırma yapılarak eksiklikler giderilmiş ve alternatif kodların bulunması sağlanmıştır.

Burada karşılaşılan ilk problem Raspberry Pi 3B'nin üzerinde bulunan bluetooth programındaki Wave dedektörü ile Raspberry Pi 3B arasındaki eşleşme idi. Raspberry Pi 3B üzerinden bluetooth programı çalıştırılmaya başlandığında etraftaki (10 metre içerisindeki) bluetooth uygulaması açık olan tüm cihazlar görünmüş, Wave dedektörünün ise bluetooth seri numarasının görünmesiyle eşleşme manuel olarak yapılmaya çalışılmıştır.

Daha sonra uzun araştırmalar ve yaklaşık 10000 sayfadan fazla kaynak taraması yapılarak verilerin kesintisiz bir şekilde nasıl aktarılacağı konusunda karara varılmıştır. Buradaki ilk problem, bluetooth üzerinden veriler aktarılacağından dolayı verilerin erişiminde sorun yaşanmasıdır. Eğer bluetooth üzerinden değil de, Wave cihazının seri numarası girilerek veriler aktarılacaksa, buradaki verilere erişimin daha kolay olması beklenmiştir.

Raspberry Pi 3B içerisinde bluetooth özelliği olmasına rağmen, bluetooth manager programı Raspberry Pi 3B'ye kurularak bu programın yüklenmesi tamamlanmıştır. Bu programın kurulum kodu şu şekilde idi: "$ /etc/init.d/bluetooth status." Bu kod sayesinde bluetoothun çalışabilir konumda olduğu kontrol edilmiştir. Daha sonra "$ sudo hciconfig hci0 piscan" ve "$ sudo

hciconfig -a" kodu yazılarak bluetooth'un Wave cihazını daha iyi dedekte edebildiği ispatlanmıştır. Kesintiler olmadan verilerin Raspberry Pi 3B'ye aktarılması sağlandıktan sonra bu verilerin internet ortamına nasıl aktarılacağı üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Daha sonraki hedefimiz, Raspberry Pi 3B'de oluşturulan wave_read2 dosyası içerisindeki kodlara ek olarak online sistemde bu verileri aktaracağımız kodu ve kodu yazacağımız yeri tespit etmekti. Böyle bir çalışma daha önceden yapılmadığı için çalışmamızın en zor ve sıkıntılı olan yeri burasıydı. Bu noktadan sonra "yol="field1="+str(self.humidity)+"&field2="+str(self.temperature)+"&field3="+str(self.radon_sta)+"&field4="+str(self.radon_lta)" yol olarak tanımladığımız kodun işlevi; nem, sıcaklık, kısa-uzun dönem radon ölçümü için yazılan alanların okumalarını yaparak, ilgili verilerin internet ortamına aktarılmasını sağlayacak olmasıydı. Field1 olarak nem değeri, Field2 olarak sıcaklık değeri, Field3 olarak kısa-dönem radon değeri, Field4 olarak tanımlanan ise uzun-dönem radon değeri olarak tanımlanmıştır.

Daha sonra ThingSpeak'te,
"baseURL='http://api.thingspeak.com/update?api_key=TYP6BBD0CVFQOE8Q&'+yol"
baseURL olarak oluşturduğumuz api_key kimlik numarasını yazarak tüm okunan verilerin bu alana aktarılmasının sağlanacak olmasıydı. Bundan sonra ise "send=urllib2.urlopen(baseURL)" yazarak baseURL'ye verileri gönder komutunu vererek ThingSpeak'e verilerin aktarılması sağlanmış oldu. Bu aşamadan sonra Raspberry Pi 3B'nin işletim sistemi olan Raspbian'da "sudo" olarak en yetkili kodu yazarak python programı ile 2. Nesil Wave cihazından tüm verilerin Raspberry Pi 3B'ye aktarılması sağlanmış oldu. Yazılan kod şu şekilde idi; "sudo python read_wave2.py 2950007439 3600." Buradaki py kısmına kadar olan kod, Raspbian işletim sistemindeki en yetkili kütüphane olan sudo'nun Python programı ile read_wave2 olarak oluşturulmuş dosya içerisindeki kodların çalıştırılmasını sağlamıştır. Yukarıda yazılan kodun içerisindeki 2950007439 seri numarası ile belirtilen ifade, Wave dedektörünün kimliğini tanımlamaktadır. Bu kodun en son kısmını oluşturan 3600 ile ifade edilen saniye cinsinden verilerin

hangi zaman aralıklarında Raspberry Pi 3B'ye aktarılacağını göstermektedir. Burada istediğimiz zaman aralığını vererek verileri aktarabilmemiz mümkün olmaktadır.

Verilerdeki kesintilerin tamamen elimine olmasından sonra farklı zaman aralıklarında denemeler gerçekleştirilmiştir. İlk zaman aralığı 3600 (1 saat) saniye verilmiş ve aralıksız olarak 36 saatlik veriler ThingSpeak IoT platformuna aktarılmıştır. Daha sonra buradaki zaman aralığı değiştirilerek 300 saniye ayarlanmış ve kesintisiz olarak radon ölçümünden 2461 adet veri elde edilmiştir. ThingSpeak IoT platformuna aktarılan veriler hem grafik olarak hem de excel olarak internet ortamında izlenerek kaydedilmiştir.

## EK C. Patent Bülten Yayını



(19) TÜRK PATENT TÜRK PATENT VE MARKA KURUMU

(11) TR 2021 012804 A2

(12) Patent Başvurusu

(21) Başvuru Numarası
2021/012804

(22) Başvuru Tarihi
2021/08/13

(43) Başvuru Yayın Tarihi
2021/08/23

(51) Buluşun tasnif sınıfı
*G01T 1/00*

(30) Rüçhan Bilgileri (32) (33) (31)
2021/02/28 TR 2021/003650

(74) Vekil
GÖKHAN ÇİMEN (KUANTUM PATENT A.Ş.)

(71) Başvuru Sahibi
ABBAS ALPASLAN KOÇER

(72) Buluşu Yapan
MEHMET ERTAN KÜRKÇÜOĞLU

(54) Buluş Başlığı

**WEB KONTROLLÜ ONLİNE RADON İZLEME SİSTEMİ**

(57) Özet

**Bu buluş, uzaktan kontrollü radyasyon ölçüm alanı ile ilgili olup, özelliği; bulunduğu ortamdaki radon gazı, sıcaklık ve nem seviyelerini ölçen radon dedektörü (1), radon dedektörüne (1) bluetooth (B) aracılığıyla bağlanmış ve python yazılımı ile kodlanmış mini bilgisayar (2), barındırdığı veri tabanı ile mini bilgisayardan (2) gelen değerleri kaydeden ve depolayan internet ortamı (4), internet ortamındaki (4) verilerin işlenmesini, grafiklere dönüştürülmesini ve takip edilmesini sağlayarak kullanıcı (K) bilgisayarlarına verileri kablosuz olarak gönderen kontrol ünitesi (5) ve verilerin kablosuz olarak iletimini sağlayan modeme (3) sahip olmasıdır.**

## EK D. Sistem Kurulumunda Yaşanan Sorunlar ve Uygulanan Çözümler

Pandemi döneminde resmî kurumların kapalı olmasından dolayı cihazların kontrol edilmesi, verilerin cep telefonuna aktarılması ve depolanması için iki haftada bir üniversiteye gidilmiştir. Pandemi döneminde üniversitenin pencereleri ve kapıları tamamen kapalı tutulmuştur. Herhangi bir havalandırma söz konusu olmamıştır.

Fizik bölümü 117 nolu odaya kurulan D1 dedektörünün çalıştırılması ve sisteme dâhil edilmesi en son gerçekleştirilmiştir. Tüm dedektörler kurulduktan ve online sistemde çalışmaya başladıktan sonra 1. cihaz çalışmaya başlamıştır. Bu cihazın online olarak çalışmamasının nedeni ise 1.nesil Wave dedektörü olmasıdır. 1.Nesil Wave dedektöründe bazı yazılımsal farklılıklar tespit edilmiştir. Bu dedektörün internete aktarım kodu diğer 11 cihazdan farklıdır. Buradaki problemin çözümü "timestamp" komutunun eşleşmesiydi. 2.Nesil dedektörlerde time ile yazılan bu kodlarda herhangi bir problem yaşanmadan internete aktarımı sağlanmıştır ama burada "timestamp" "datetime" ile eşleştirilememiştir. "Timestamp" yerine "date timestamp" yazıldığında detektörden alınan veriler internet alanına düzgün bir şekilde aktarılmıştır.

Fen-Edebiyat Fakültesi yazı işlerinin odasına yerleştirilen D2 ölçüm sistemindeki cihazdan ilk başta sorunsuz bir şekilde veri aktarımı sağlanırken, daha sonra internetten kaynaklı olarak veri kesilmesi meydana gelmiştir. Buradaki internet kesintisi cihazdan ya da kodlardan kaynaklı olmayıp üniversitede yaşanan internet kesintisindendir. Üniversiteden kaynaklı internet kesintisi hafta sonu meydana geldiği için cihaza müdahale imkânı olmamıştır. İnternet kesintisinin ikinci kez gerçekleşmesi ve üniversitenin pandemi nedeniyle mesai saatleri dışında kapalı olması ve sokağa çıkış yasaklarının belirli saatlerde gerçekleşmesi nedeniyle sisteme uzaktan erişilebilecek çözümler araştırılıp, TeamViewer Host ile bu durumun çözülebileceği tespit edilmiştir. Daha sonra tüm Raspberry Pi'lere TeamViewer Host kurularak uzaktan erişim imkânı sağlanmıştır. Tüm cihazların TeamViewer Host'u merkez TeamViewer'a eşleştirme yapılarak tek merkezden erişim imkânı sağlanmıştır.

Fen-Edebiyat Fakültesinin Arkeoloji Bölümünde bulanan 145 nolu odada D3 ölçüm sisteminin kurulumu yapıldı ancak internet bağlantısı yapılamamıştır. Bu oda bölüm tarafından toplantı ve seminer odası olarak kullanıldığı için internet bağlantısını sağlayacak herhangi bir unsur bulunamamıştır. Fakülte sekreterine bilgi verilip bu odaya internet çekilmesi için istekte bulunulmuştur. Ana serverdan ölçüm yapılacak olan 145 nolu odaya kadar olan mesafenin yaklaşık olarak 45 metre olduğu tespit edilerek bir gün sonra 50 metre internet kablosunun bu odaya çekilmesi için teknik servise verilmiştir. Bilgi işlem daire başkanlığından gelen yetkililerle birlikte ölçüm odasına internet kablosu çekilmiştir. Böylelikle bu ölçüm noktasının çalışması aktif edilerek sisteme entegresi sağlanmıştır.

Kimya bölümü 147 nolu odaya D4 ölçüm sisteminin kurulumu yapıldıktan sonra odaya gidilmiş ve dış kapının kapalı konumda olduğu belirlenmişti. Bu birimin kimya bölümü dışında kullanıldığı ve onların da tahliye etmesinden dolayı odanın kapısı kilitlenmiş ve cihazlara ulaşılamamıştı. Bu odanın iş-sağlığı ve güvenliği kurumu tarafından kullanıldığı ama bu kurumun başka bir birime taşınması neticesinde odanın ölçüm yapılan zaman içerisinde fakülte dekanlığına bağlı olduğu bilgisi edinilmiştir. En dışta bulunan kapının kilidi yazı işlerinden açtırılarak yaklaşık olarak bir ay sonra cihazlara ulaşılmıştır.

D5 ölçüm noktası Fizik bölümü seminer odasında bulunmaktadır. Buradaki cihaza online sisteme aktarılan kod yazıldığında hata vermiştir. Bu hatanın sebebinin ilk başta kod kaynaklı olduğu düşünülmüştür. Raspberry Pi'de bulunan işletim sistemi güncellenip tekrar kod yazılmıştır ama hep aynı hatayla karşılaşılmıştır. Hatanın sebebi, seri numarasıyla cihazın uyuşmamasıdır. Raspberry Pi'ye cihazın seri numarasını bulduran kod yazılarak tarama yaptırıldığında Wave cihazının arkasında bulunan numara ile Raspberry Pi'nin terminal ekranında bulunan seri numarasının uyuşmadığı görülmüştür. Bu durumda radon cihazının arkasında bulunan seri numarasının yanlış olduğu tespit edilmiştir. Raspberry Pi'nin terminal ekranında görülen numara, kodla birlikte yazılarak veriler başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Buradaki problem tamamen şirketten kaynaklanan bir durumdur. Bu eksiklik 2019 yılında deneysel

olarak tespit edilen seri numarasını bulduran kod ile tamamlanmıştır. Seri numarasını bulduran kodu yazabilmek için Raspberry Pi'ye ayrıca bu dosyanın yüklenmesi sağlanmıştır.

D9 ölçüm noktası Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya bölümündeki bilgisayar laboratuvarında kurulmuştur. Sistemin kurulumu zamanında pandemi nedeniyle dersler olmadığı için internet erişimi sağlanamamıştır. Bu durumun düzeltilmesi için fakülte sekreterine internetin bağlanması talebinde bulunulmuştur. Kısa zaman sonra internet bağlantısı gerçekleştirilip ölçüm sistemin online ortama aktarılması sağlanmıştır.

D10 ölçüm sisteminin kurulumu esnasında yine kod hatasıyla karşılaşılmıştır. Daha önceden D5'de yaşanan probleme 10.cihazda da rastlanmıştır. Bu sorunun çözümü daha önce deneyimlendiğinden dolayı radon cihazını bulduran kod yazılarak terminal ekrandan seri numarası tespit edilmiştir. D5 ve D10'un seri numaralarında yanlışlık yapılarak 5.cihazın seri numarası 10.cihaza, 10.cihazın seri numarası da 5.cihaza yazılmıştır. Şirketten kaynaklanan bu hata tespit edildikten sonra ilgili kod yazılıp online sisteme veri aktarımı sağlanmıştır. Buradaki cihaz Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoloji bölümü toplantı odasında bulunmaktadır.

D10 ölçüm sisteminde iki defa internet kesintisi olmuş ve uzaktan erişim sağlanamamıştır. Odaya gidilip Raspberry Pi'ye monitörle bağlanılarak kod yazılıp sistem tekrar aktif edilmiştir. Bu durumla ilk kez burada karşılaşılmıştır, normalde TeamViewer ile uzaktan kontrol sağlanmasına rağmen buradaki odaya erişim sağlanamamıştır. Sistem kapatılıp tekrar açıldıktan sonra online sisteme aktaran kod yazılarak verilerin akışı tekrar sağlanmıştır.

D11 ölçüm sistemi ise Fen-Edebiyat Fakültesi Felsefe bölümündeki sekreter odasına kurulmuştur. Buradaki ölçüm sisteminde kurulumdan sonra veriler aktarılmaya başlanmış ancak C# tabanlı yazılan kontrol programına erişim sağlayan www.irl32.me domain adresinin çöktüğü gözlemlenmiştir. Buradaki dedektör aktif edildikten sonra Web-Hosting kaynaklı bir çökme meydana

gelmiştir, firma ile iletişime geçilip bu durumun çözülmesinin talebinde bulunulmuştur. Hosting firması ilk başta bu durumun kendilerinden kaynaklı olmadığını belirtmiştir. Bu durumda yazılımsal herhangi bir eksikliğin olmadığı bilinmekteydi. Yazılımsal herhangi bir hata olsaydı diğer 10 cihaz çalıştırılamazdı. Web-Hosting firmasından 18.11.2020 tarihinde en üst düzey özelliklere sahip ve bir yıllık hosting satın alınmıştır. Firma ile tekrar yazışma yapılarak bu durumun kendilerinden kaynaklı olduğu iletilmiştir. Hosting firması 24 saatlik inceleme neticesinde sorunun Trust kaynaklı olduğunu ve bunun yükseltilmesi gerektiğini söyleyip yüksek bir bedelle bu ayarın arttırılacağını belirtilmiştir. Bir yıllık fiyat yaklaşık olarak 6000 TL'ydi. Firmanın belirlediği bedel çok yüksek bulunmuş ve hosting satın alırken yapılan trust ve diğer anlaşmalar hatırlatılmış ve bu durumun düzeltilmesi talebinde bulunulmuştur. Firma'nın verdiği cevap, "verilerin kaybından tamamen hizmet alan kişinin sorumlu olduğu" şeklinde bir teminat yazısı gönderilirse sitenin aktif edileceği ve sorunun çözüleceğidir. Bu durumun hemen çözülmesi için istedikleri teminat yazısı gönderilerek sitenin aktif hale gelmesi sağlanmıştır.

D12 ölçüm noktası Fen-Edebiyat Fakültesi Tarih bölümünde bulunan sekreter odasına kurulmuştur. D12 ölçüm noktasında verilerin kesintisi olmuştur. Bu durum üç kez gerçekleşmiştir. İlk gerçekleşmesinin nedeni; bölümdeki server arızası sebebiyle internetin kesilmesidir. İkinci kesintinin nedeni ise online sistemin çöküntüye uğraması ve uzaktan erişimin sağlanamamış olmasıdır. Son kesinti ise Raspberry Pi'nin işletim sisteminin kurulu olduğu mikro SD kartın bozulması yani kartın yanması sonucu gerçekleşmiştir. Bu durumun tekrar yaşanmaması için kapasitesi ve kalitesi yüksek bir kart alınıp Raspbian işletim sisteminin son versiyonu kurularak sistem tekrardan aktif hale getirilmiştir.

Tüm cihazlar Şubat 2021 tarihinde kurulmuş olup bu ay içerisinde internetten ve cihazlardan kaynaklanan kesintiler gerçekleşmiştir.

## EK E. Wave Radon Dedektörü için 200 Bq/m³'teki Yüzde Ölçüm Hatasının Belirlenmesi

IoT-tabanlı tekli radon takip sistemi için kullanılan 2950007439 seri numaralı Wave radon dedektörünün yüzde ölçüm hatasının kabaca belirlenebilmesi için gerçekleştirilen çalışma bu kısımda özetlenmektedir. Üretici firma bu dedektör için ölçüm hassaslığını 200 Bq/m³'lük konsantrasyon için bir haftadan daha uzun kısa-dönem ölçümleri için %10'dan düşük ve iki aydan daha fazla süren uzun-dönem radon ölçümleri için %5'ten daha düşük olarak bildirmiştir (Çizelge 3.1). Bu nedenle ölçüm hatası belirlenecek dedektör (Wave radon dedektörü), 200 Bq/m³ civarında atmosferik radon radon konsantrasyonuna sahip bir birimde (D8 ölçüm noktasında) ve daha hassas ölçüm yaptığı bilinen bir referans cihazı (Corentium Pro radon dedektörü) ile birlikte kalibrasyon çalışması için kullanılmıştır. Referans cihaz olarak seçilen 2700014103 seri numaralı Corentium Pro cihazı, BAP tarafından sağlanan FDK-2021-8430 numaralı proje desteğiyle temin edilmiştir. 4 adet radon sensörüne sahip olan bu cihaz, 100000 Bq/m³'e kadar ölçüm yapabilmektedir. Corentium Pro cihazı, AARST (Amerikan Radon Bilim Adamları ve Teknisyenleri Derneği)-NRPP (Ulusal Radon Yeterlilik Programı) sertifikalı laboratuvarda altın stardartlı bir referans cihazla (AlphaGuard cihazıyla) kalibre edilmiştir. Bu profesyonel cihaz için ölçüm hatasının; ölçümler alındıktan 24 saat sonra ~%7±5 Bq/m³ olduğu, bir hafta sonrasında ise %5±2 Bq/m³ düzeyinde olduğu üretici firma tarafından bildirilmektedir (Airthings; Corentium Pro, 2023). D8 ölçüm noktası, pek fazla kullanılmayan bir birim olup havalandırılmamaktadır. Bu birimdeki radon değişimi de daha yavaş olduğundan 200 Bq/m³ düzeyindeki konsantrasyonda referans cihaz ve test edilecek cihazın birlikte ölçüm alması için uygun bir kapalı mekândır. İki cihaz aynı yerden aynı yükseklikte ve aralarında 10 cm mesafe olacak şekilde D8 ölçüm noktasına yerleştirilerek iki hafta boyunca saatlik radon ölçümleri alınmıştır (Şekil E.1). İlk hafta ölçümleri değerlendirme dışı bırakılarak üretici firma tarafından dedektörlerin daha düşük hata ile ölçüm yaptığı bildirilen ikinci hafta verileri hesaplamalar için kullanılmıştır.




Şekil E.1. Yüzde ölçüm hatasının tayininde kullanılan Corentium Pro cihazı (referans cihaz) ve Wave radon dedektörü (test edilen cihaz)

Buradaki analiz aşağıda verilen keskinlik ve doğruluk hesaplamalarıyla gerçekleştirilmiştir. Test edilen dedektörün ölçüm keskinliği için denklem (E 1.1)'de verilen formül, doğruluğu için ise denklem (E 1.2)'de verilen formül kullanılmıştır. Daha sonra denklem (E 1.3)'te verilen formül kullanılarak ölçüm hatası hesaplanmıştır (Warkentin, 2020). Çizelge E.1'de iki dedektörün eş zamanlı radon ölçüm sonuçları verilmektedir.

**Dedektörün Kesinliği:**

$$\text{Bağıl Standart Sapma (\%)} = \frac{\text{Standart Sapma}}{\text{Ortalama}} \text{x} 100 \qquad \text{(E 1.1)}$$

**Dedektörün Doğruluğu**

$$\text{Bağıl Yüzde Hata (\%)} = \frac{(\text{Ortalama} - \text{Referans Değeri})}{\text{Referans Değeri}} \text{x} 100 \qquad \text{(E 1.2)}$$

**Ölçüm Hatası (%)**

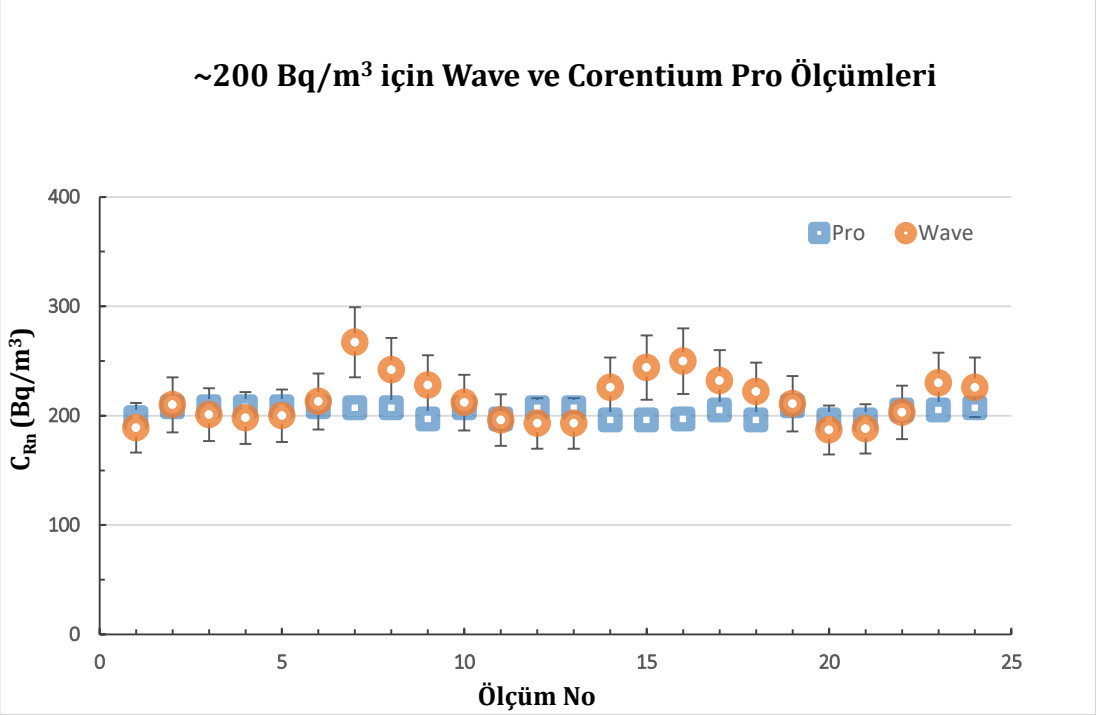
$$\text{Ölçüm Hatası (\%)} = \sqrt{(\text{Bağıl Yüzde Hata})^2 + (\text{Bağıl Standart Sapma})^2} \qquad \text{(E 1.3)}$$

Çizelge E.1. 200 Bq/m$^3$ civarında iki dedektörden alınan radon ölçümleri

| Ölçüm No | Corentium Pro (Bq/m$^3$) | Wave (Bq/m$^3$) |
|---|---|---|
| 1 | 198 | 189 |
| 2 | 208 | 210 |
| 3 | 208 | 201 |
| 4 | 208 | 198 |
| 5 | 208 | 200 |
| 6 | 208 | 213 |
| 7 | 207 | 242 |
| 8 | 197 | 228 |
| 9 | 207 | 212 |
| 10 | 197 | 196 |
| 11 | 207 | 193 |
| 12 | 207 | 193 |
| 13 | 196 | 226 |
| 14 | 196 | 244 |
| 15 | 197 | 250 |
| 16 | 205 | 232 |
| 17 | 196 | 222 |
| 18 | 209 | 211 |
| 19 | 196 | 187 |
| 20 | 196 | 188 |
| 21 | 205 | 203 |
| 22 | 205 | 230 |
| 23 | 207 | 226 |
| 24 | 207 | 267 |

Çizelge E.1'deki 24 adet saatlik radon ölçümleri baz alınarak Wave radon dedektörü için yüzde ölçüm hatası hesaplanmıştır. Referans cihazın 196-209 Bq/m$^3$ arasında ölçtüğü radon konsantrasyonlarına karşı hassaslığı test edilen dedektör 187-267 Bq/m$^3$ arasında değerler kayıt etmiştir. Buna göre, Wave radon dedektörünün ölçümlerinin ortalaması 215±22 Bq/m$^3$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca referans cihaza göre bağıl standart sapma değeri %10,1, bağıl hata ise %5,9 olarak bulunmuştur. Bu iki değer üzerinden yüzde ölçüm hatası %11,7 olarak tespit edilmiştir. Böylelikle, ön-ölçüm ve test ölçümlerinin yapıldığı Wave radon dedektörleri için yaklaşık olarak %12'lik bir ölçüm hatası ön görülebilir.

Bu sonucu desteklemek açısından Corentium Pro ile alınan radon ölçümleri ve Wave dedektörü ile alınan radon ölçümleri, iki bağımsız grup olarak kabul edilip, aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı Mann-Whitney U testi ile analiz edilmiştir. Normallik varsayımının sağlanmadığı iki bağımsız grup ortalamalarının karşılaştırılmasında kullanılan non-parametrik bir yöntemdir. Hipotezler $H_0: \mu_C = \mu_W$ ve $H_1: \mu_C \neq \mu_W$ şeklindedir ve $\mu_C$ Corentium Pro dedektörüne ait ölçümlerin ortalamasını ve $\mu_W$ Wave dedektörüne ait ölçümlerin ortalamasını temsil etmektedir. Sonuç olarak, Corentium Pro ve Wave dedektörlerinden alınan ölçümler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür ($p \geq 0{,}05$). Son olarak Corentium Pro ve Wave radon dedektörüyle elde edilen ölçümlerin yaklaşık olarak 200 Bq/m³ civarında dağıldığı da görsel olarak Şekil E.2'de sunulmaktadır.

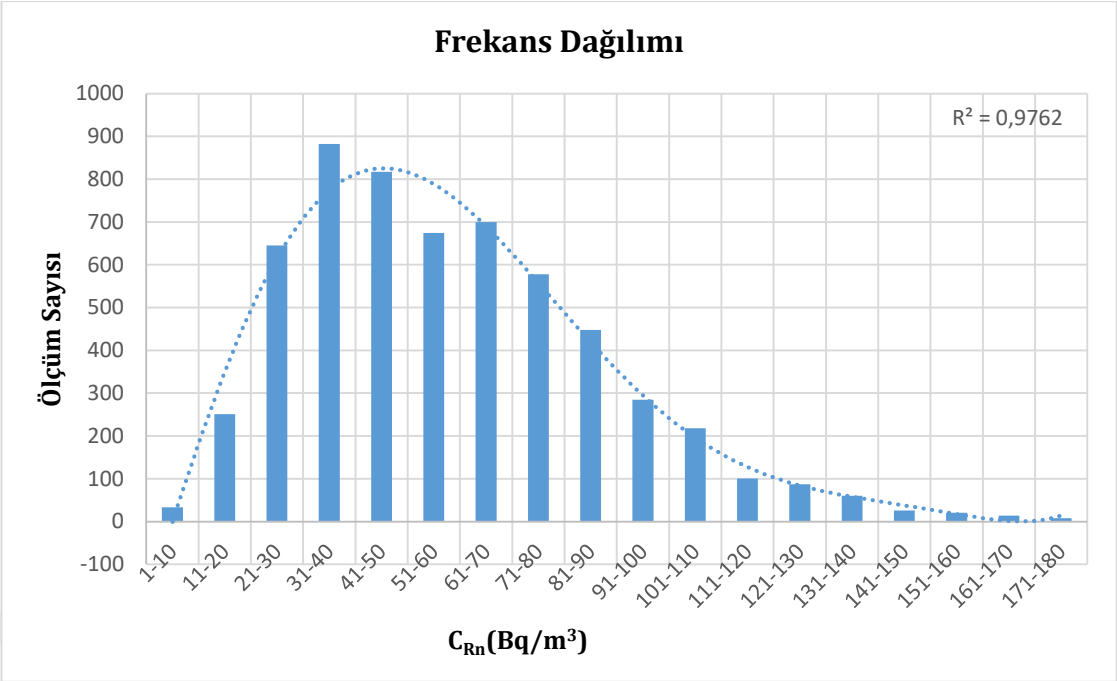



Şekil E.2. Corentium Pro cihazı ve Wave radon dedektörü ile 200 Bq/m³ civarında elde edilen eş zamanlı radon ölçümleri

## EK F. Ön-Ölçümlere ait İstatistiksel Analizler

Araştırmada elde edilen veriler SPSS 25.0 (Statistical Package for Social Sciences) programı kullanılarak analiz edilmiştir. Grafikler ise R istatistiksel programlama dili kullanılarak çizilmiştir. Radon ölçümleri, tanımlayıcı istatistiksel metotları (ortalama, standart sapma, medyan, minimum, maksimum) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, radon ölçümleri için normallik varsayımı Kolmogorov Smirnov uyum iyiliği testi ile test edilmiştir. İkiden fazla grup puanlarının karşılaştırmalarında normal dağılıma sahip olmayan ölçümler için Kruskal Wallis analizi uygulanmıştır. Gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunması durumunda, hangi iki grup arasında farklılık olduğunun tespit edilmesi için Bonferroni analizi yapılmıştır.

Radon ölçümlerinin sekiz aylık dağılımına (Şekil F.1) bakıldığında, değerlerin en çok 30-40 $Bq/m^3$ aralığında en az 170-180 $Bq/m^3$ aralığında yer aldığı görülmektedir. İlk olarak, dağılımların sağa çarpık olduğunu söylenilebilir. Kolmogorov Smirnov uyum iyiliği testi ile radon ölçümlerinin Normal, Log Normal, Üstel gibi olasılık dağılımlarına uygunluğu test edilmiştir. Fakat radon ölçümlerinin herhangi bir olasılık dağılımına uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, istatistiksel analizlerde parametrik olmayan yöntemler tercih edilmiştir.




Şekil F.1. Ön-ölçümlerin frekans dağılımı

Araştırmada mevsimlere göre radon ölçümleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığı Kruskal Wallis analizi ile test edilmiştir. Sonuçlar Çizelge F.1'de verilmektedir.

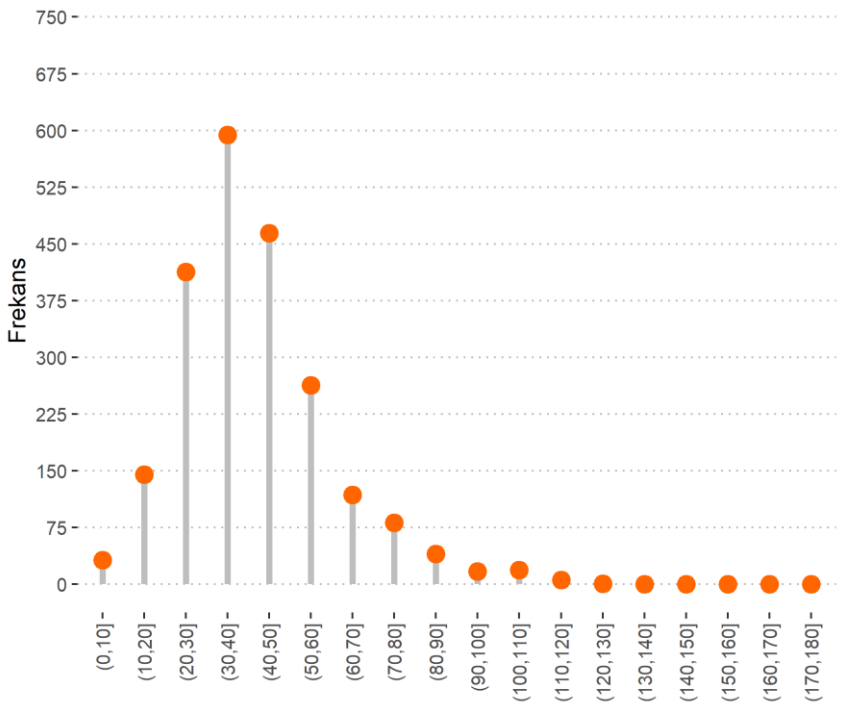
Çizelge F.1. Radon ölçümlerinin mevsimlere göre karşılaştırılması

| Mevsimler | N | Min | Medyan | Mak | Ort | SS | p | Bonferroni |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (Bq/m³) | | | | | | |
| Yaz | 2193 | 2 | 39 | 127 | 42 | 18 | 0,000 | Yaz<Güz; Yaz<Kış; Güz<Kış |
| Güz | 2171 | 9 | 58 | 178 | 61 | 30 | | |
| Kış | 1484 | 31 | 78 | 164 | 82 | 24 | | |
| **Genel** | **5848** | **2** | **55** | **178** | **59** | **29** | | |

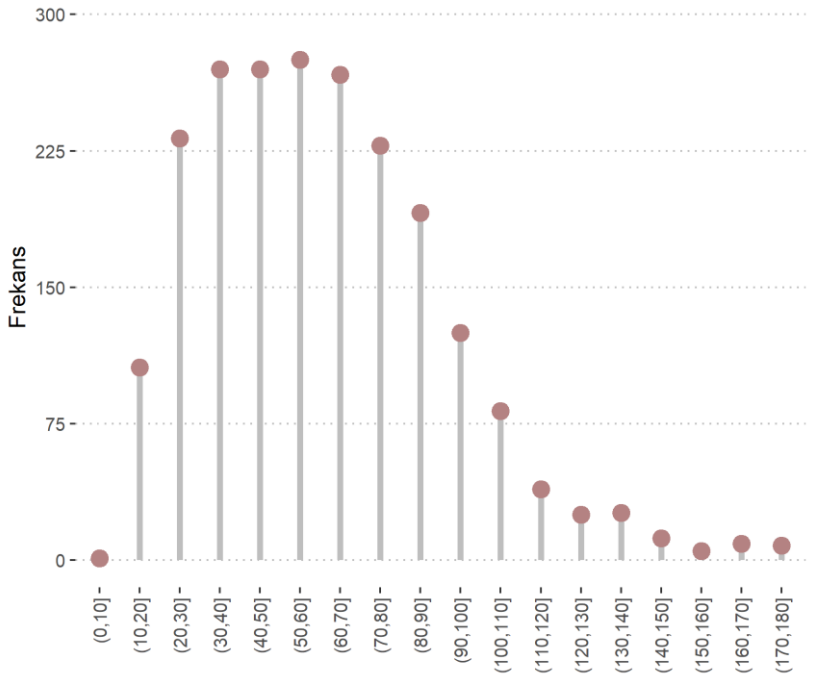
Çizelgede sırasıyla saatlik olarak ölçüm sayıları (N), ölçümlere ait minimum (Min), ortanca (Medyan), maksimum (Mak), ortalama (Ort) ve standart sapma (SS) tanımlayıcı istatistikleri yer almaktadır. Örneğin, yaz aylarında toplam 2193 saatlik ölçüm elde edilmiştir. En geniş aralığa sahip mevsim 9-178 Bq/m³ ile güz olurken, en dar aralığa sahip mevsim 2-127 Bq/m³ ile yaz olmuştur. Ayrıca, Kruskal Wallis testine ait Ki-Kare istatistiği $\mathcal{X}^2 = 1914{,}3$ şeklinde elde edilmiştir. Kruskal Wallis testine göre mevsimler arasında radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu bulunmuştur ($p<0{,}05$). Daha sonra,

mevsimler arasında ikili karşılaştırma yapmak için Bonferroni testi kullanılmıştır. Sonuç olarak, her iki farklı mevsim arasında radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmüştür ve ölçüm büyüklükleri Yaz<Güz; Yaz<Kış; Güz<Kış gibidir.

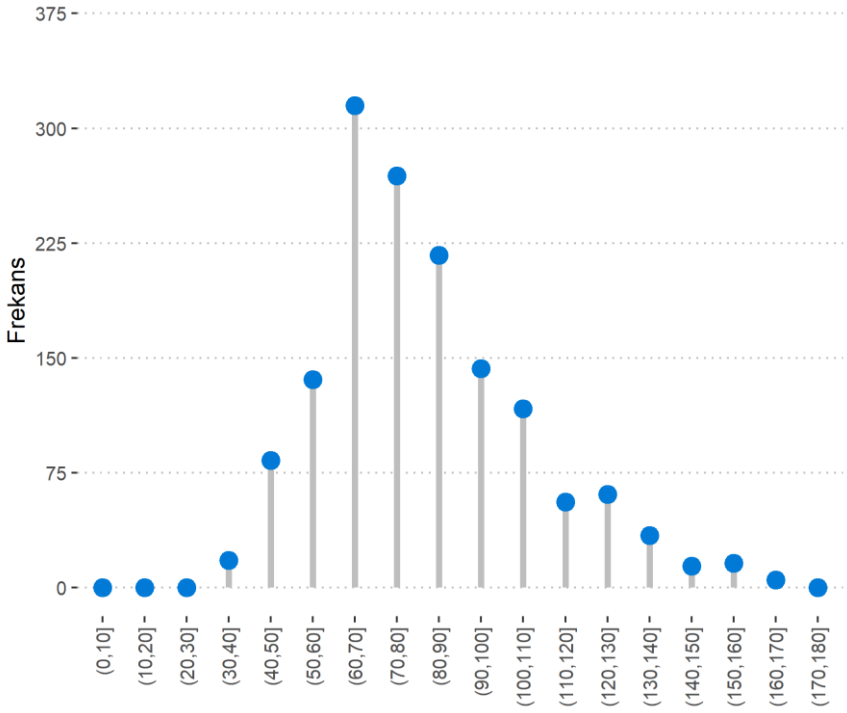
Radon ölçümlerinin dağılımları mevsimsel olarak Şekil F.2-F3-F4'te verilmektedir. Şekil F.2'ye göre, radon ölçümlerinin en çok 30-40 Bq/m$^3$ aralığında en az 120-130 Bq/m$^3$ olduğu söylenebilir. Şekil F.3'e bakıldığında, radon ölçümlerinin en çok 50-60 Bq/m$^3$ aralığında olduğu en az 0-10 Bq/m$^3$ aralığında olduğu görülmektedir. Şekil F.4'e göre, radon ölçümlerinin en çok 60-70 Bq/m$^3$ aralığında ve en az 160-170 Bq/m$^3$ aralığında olduğu gözlemlenmiştir.




Şekil F.2. Yaz mevsimindeki frekans dağılımı




Şekil F.3. Sonbahar mevsimindeki frekans dağılımı




Şekil F.4. Kış mevsimindeki frekans dağılımı

Mevsimlere ek olarak, aylar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı Kruskal Wallis testi ile kontrol edilmiştir. Çizelge F.2'de saatlik olarak alınan ölçümlerin aylara göre bazı tanımlayıcı istatistikleri yer almaktadır.

Haziran ayında 717 saat radon ölçümü yapılmış olup, en geniş aralığa sahip ay 20-178 Bq/m$^3$ ile Ekim olurken, en dar aralığa sahip ay 9-84 Bq/m$^3$ ile Eylül ayı olmuştur. Kruskal Wallis testi ile Ki-Kare istatistiği $X^2 = 3037{,}7$ olarak elde edilmiştir ve aylar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir ($p<0{,}05$).

Bonferroni testi ile aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olan aylar incelenmiştir. Buna göre aralarında anlamlı fark bulunan aylar; Temmuz<Haziran, Haziran<Kasım, Temmuz<Kasım, Ağustos<Kasım, Eylül<Kasım, Ekim<Aralık, Aralık<Ocak, Haziran<Ağustos, Haziran<Aralık, Temmuz<Aralık, Eylül<Aralık, Ekim<Ocak, Eylül<Haziran, Haziran<Ocak, Temmuz<Ocak, Ağustos<Ocak, Eylül<Ocak, Aralık<Kasım, Haziran<Ekim, Eylül<Temmuz, Temmuz<Ekim, Ağustos<Ekim, Eylül<Ekim, Ekim<Kasım, Kasım<Ocak gibidir ($p<0{,}05$). Ancak, Ağustos/Eylül ve Temmuz/Ağustos aylarına ait radon değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı söylenebilir ($p\geq0{,}05$).

Çizelge F.2. Radon ölçümlerinin aylara göre karşılaştırılması

| Aylar | N | Min | Medyan | Mak | Ort | SS | p |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (Bq/m$^3$) | | | | | |
| Haziran | 717 | 12 | 42 | 119 | 46 | 21 | 0,000 |
| Temmuz | 734 | 2 | 37 | 90 | 39 | 17 | 0,000 |
| Ağustos | 742 | 6 | 38 | 127 | 39 | 14 | 0,000 |
| Eylül | 718 | 9 | 33 | 84 | 36 | 15 | 0,000 |
| Ekim | 739 | 20 | 62 | 178 | 67 | 29 | 0,000 |
| Kasım | 714 | 28 | 78 | 144 | 80 | 24 | 0,000 |
| Aralık | 743 | 31 | 73 | 132 | 75 | 19 | 0,000 |
| Ocak | 741 | 39 | 83 | 164 | 88 | 27 | 0,000 |

Son olarak, radon ölçümlerinin günlük değişim katsayıları ($DK_j$) hesaplanmıştır, j=1,2…245. Özellikle iki kitlenin veya örneklemin aritmetik ortalamalarının birbirine eşit olduğu durumda, varyansı küçük olanın birbirine daha yakın değerlerden oluştuğunu söylemek için değişim katsayısı tercih edilmektedir (Gliner, 2016). Diğer taraftan standart sapma (SS) ise ölçümlerin aritmetik ortalama etrafındaki yayılımını gösteren istatistiktir. Eğer iki farklı kitle veya örneklem arasında değerler arasındaki benzerlik açısından bir karşılaştırma

yapılıyorsa değişkenlik katsayısı kullanılır. Bu çalışmada ise, değişkenlik katsayısının kullanılmasının amacı radon ölçümlerinin saatlik benzerliklerinin saptanmasıdır. Bir başka deyişle, ölçüm hatasının araştırılması için değişkenlik katsayısı kullanılmıştır. Her bir güne ait değişkenlik katsayısı aşağıdaki denklem (F 1.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Buradaki hesaplama 24 saatlik radon ölçümlerinin arasındaki benzerliği göstermektedir.

$$DK_j \frac{SS_j}{Ort_j} \qquad \text{(F 1.1)}$$

Denklem (F 1.1)'de, $SS_j$ ve $Ort_j$ sırasıyla j. güne ait 24 saatlik radon ölçümlerinin standart sapmasını ve ortalamasını temsil etmektedir. $DK_j$ değerleri Şekil F.5-F.7'de arasında verilmektedir. Değişkenlik katsayısına göre ölçüm hatası kararına Çizelge F.2'de yer alan değerlere göre bakılmıştır. Bu tabloda yer alan "fikir birliği" ifadesi ölçüm cihazının stabilitesi anlamına gelir. Sonuç olarak, Çizelge F.3'te mevsimlere göre DKj aralığı oluşturulmuştur.

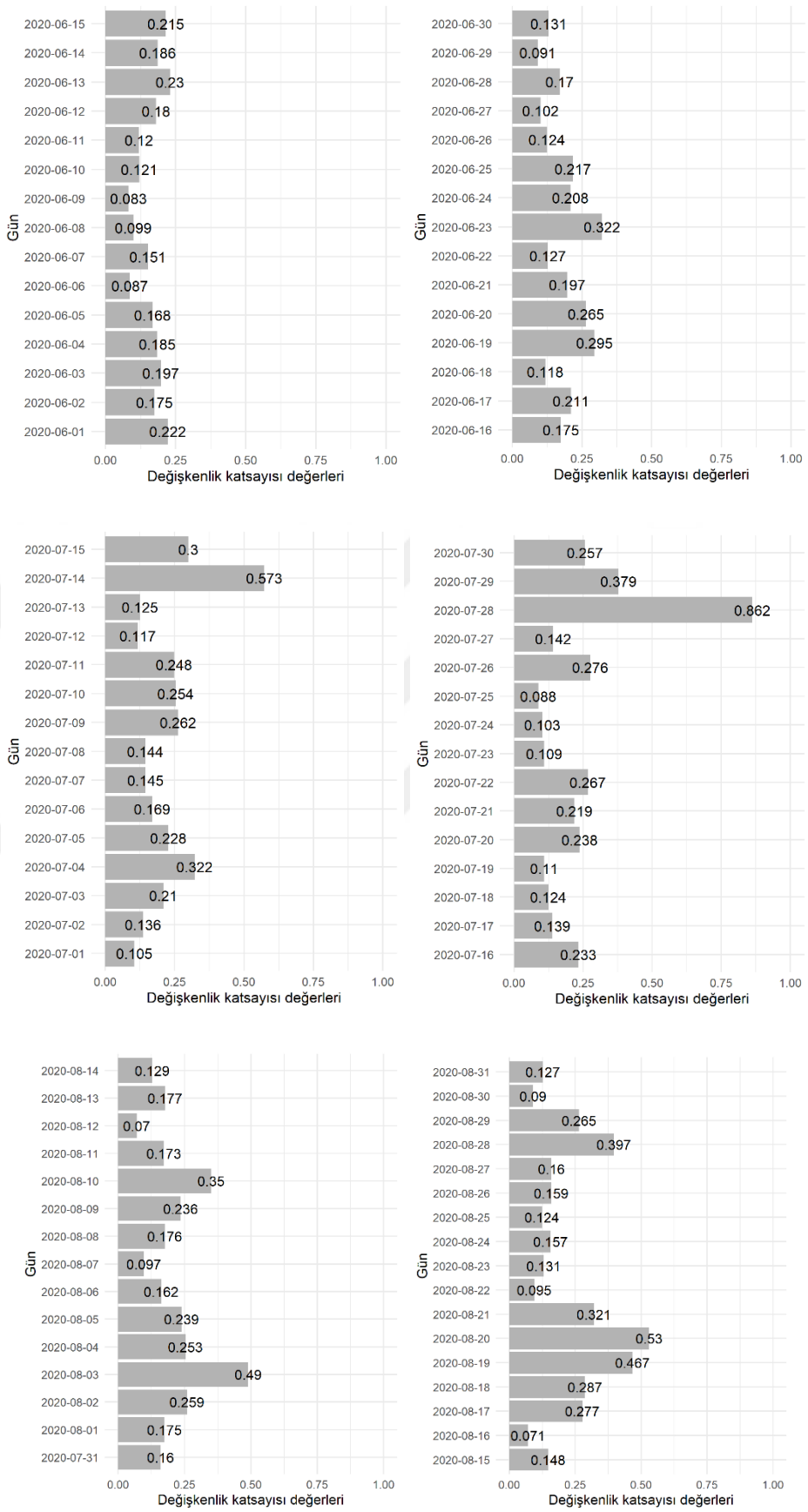
Çizelge F.3'teki değişkenlik katsayısının karar bilgilerine göre, Çizelge F.4'te hangi mevsimden kaç gün yer aldığı bilgisi görülmektedir. Buna göre, Çizelge F.4'te yer alan değerlere bakıldığında, ölçüm hatası düşünülen gün sayısının üç olduğu ve yaz aylarında yer aldığı görülmektedir. Özellikle bu üç günün ikisi tolere edilebilir görünürken, bir tanesi 0,862 değişkenlik katsayısı değeri ile zayıf fikir birliği aralığında yer almıştır.

Çizelge F.3. Değişkenlik katsayısı değerleri için karar kuralı (Henning ve Jordaan, 2016)

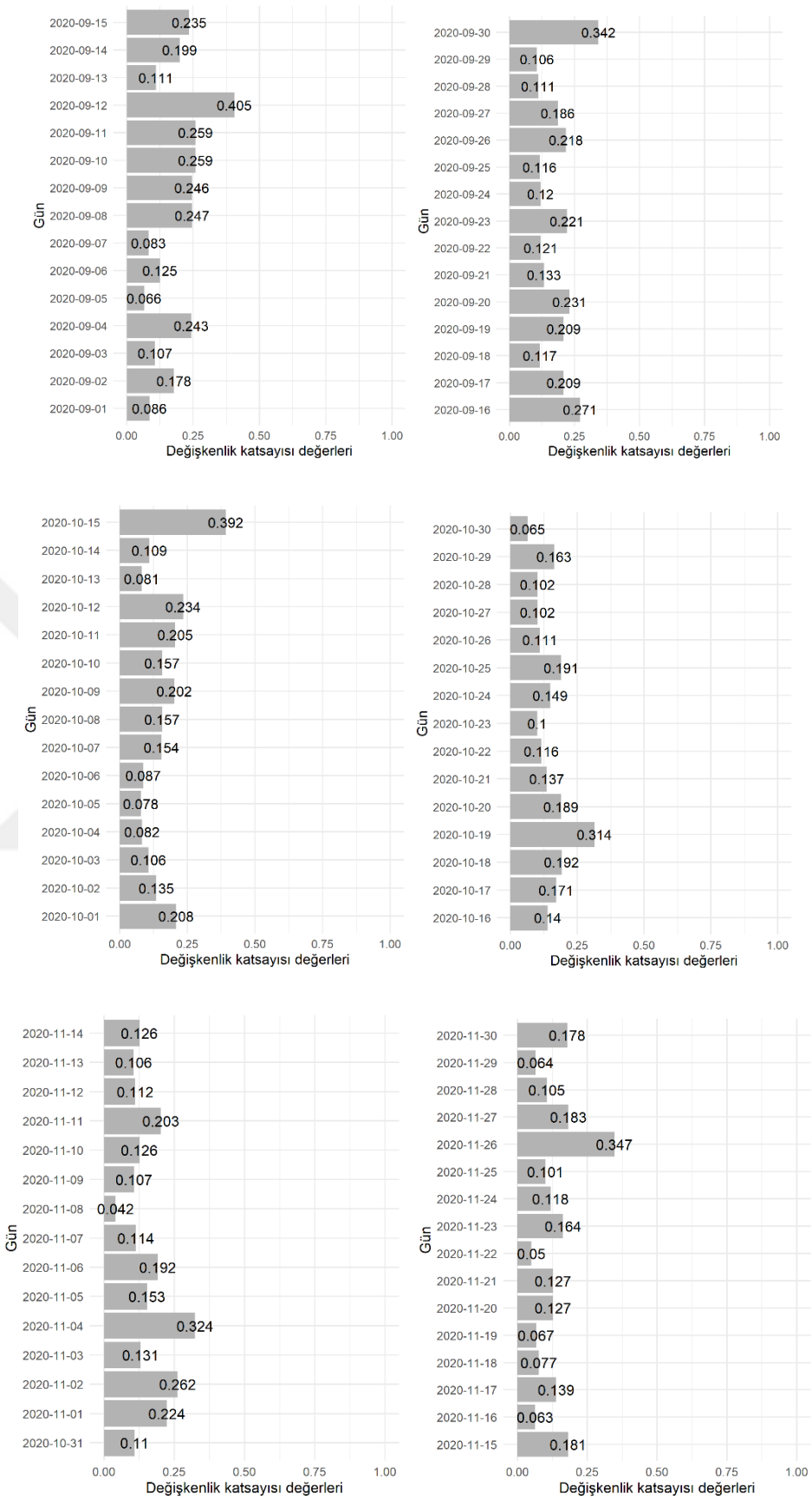
| **Değişkenlik Katsayısı** | **Karar** |
|---|---|
| 0≤DK≤0,5 | İyi derecede fikir birliği |
| 0,5<DK≤0,8 | Tatmin edici fikir birliğinden daha az |
| 0,8<DK | Zayıf fikir birliği |

Çizelge F.4. Değişkenlik katsayılarının frekans değerleri

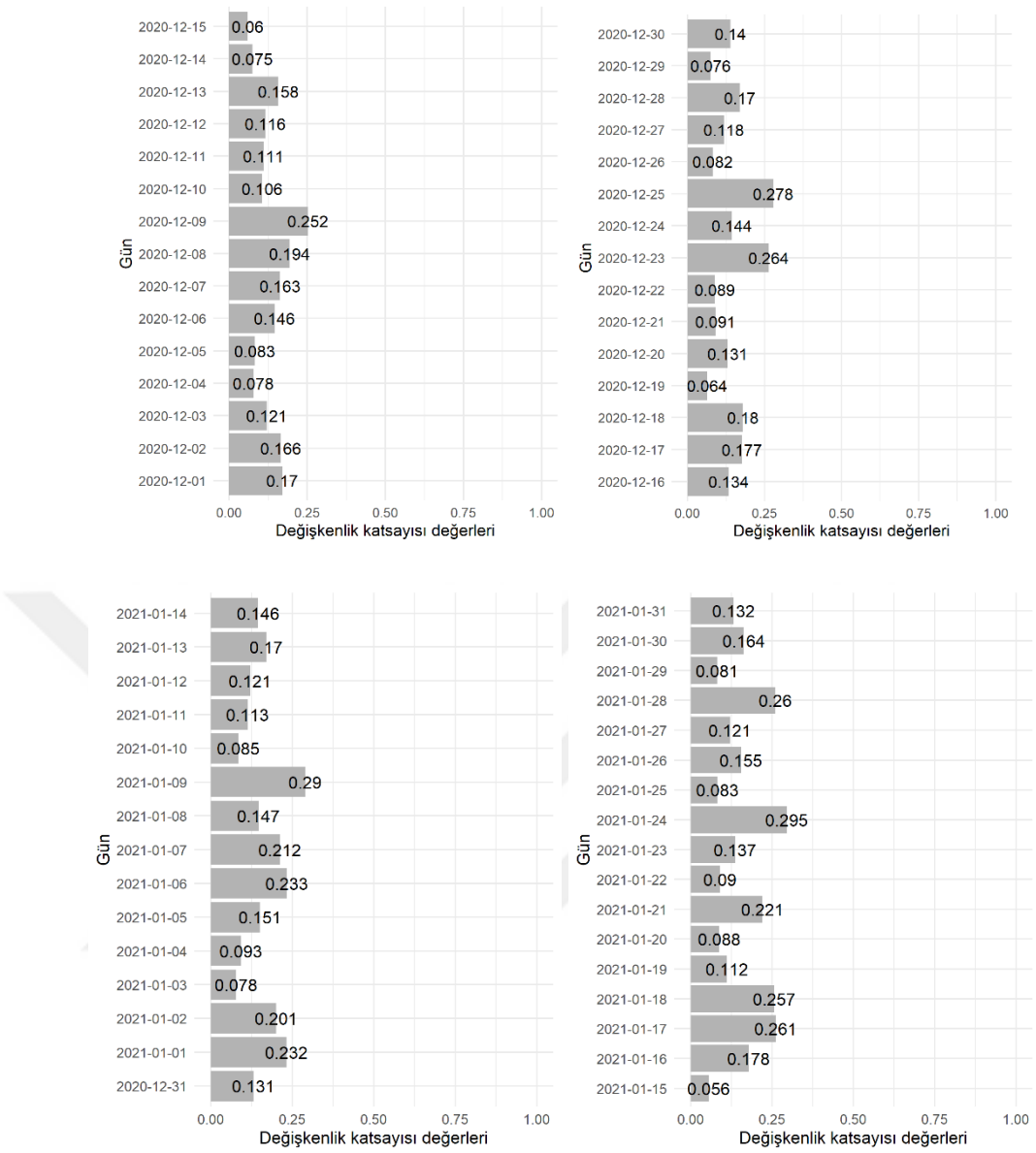
| **Değişkenlik Katsayısı** | **Yaz** | **Güz** | **Kış** |
|---|---|---|---|
| 0≤DK≤0,5 | 89 | 91 | 62 |
| 0,5<DK≤0,8 | 2 | 0 | 0 |
| 0,8<DK | 1 | 0 | 0 |
| **Toplam gün sayısı** | **92** | **91** | **62** |




Şekil F.5. Yaz mevsimi için değişkenlik katsayısı değerleri




Şekil F.6. Sonbahar mevsimi için değişkenlik katsayısı değerleri




Şekil F.7. Kış mevsimi için değişkenlik katsayısı değerleri

## EK G. Test Ölçümlerine ait İstatistiksel Analizler

Test ölçümlerinden elde edilen verilerin istatistiksel analizleri SPSS 25.0 programı ile yapılmıştır. Veriler değerlendirilirken radon ölçümeleri için normallik varsayımı Kolmogorov-Smirnov uyum iyiliği testi ile araştırılmıştır. İkiden fazla grup puanlarının karşılaştırmalarında normal dağılıma sahip olmayan ölçümler için Kruskal Wallis testi uygulanmıştır. Gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunması durumunda, hangi iki grup arasında farklılık olduğunun tespit edilebilmesi için Bonferroni analizi yapılmıştır. Çizelge G.1'de mevsimlere bağlı radon ölçümlerine ait bazı tanımlayıcı istatistiksel bilgiler sunulmaktadır.

Çizelge G.1. Radon ölçümlerinin mevsimlere göre karşılaştırılması

| Mevsimler | N | Min | Medyan | Mak | Ort | SS | p | Bonferroni |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (Bq/m$^3$) | | | | | | |
| İlkbahar | 25055 | 16 | 138 | 4691 | 463 | 792 | 0,000 | Yaz<İlkbahar; Sonbahar<İlkbahar; Yaz<Kış; Sonbahar<Kış |
| Yaz | 24168 | 1 | 136 | 2819 | 374 | 547 | | |
| Sonbahar | 23791 | 6 | 113 | 3398 | 364 | 596 | | |
| Kış | 24489 | 9 | 134 | 4613 | 455 | 832 | | |
| **Genel** | **97503** | **1** | **130** | **4691** | **415** | **706** | | |

Çizelge G.1'de sırasıyla ölçüm sayıları (N), ölçümlere ait minimum (Min), ortanca (Medyan), maksimum (Mak), ortalama (Ort) ve standart sapma (SS) tanımlayıcı istatistikleri yer almaktadır. Örneğin, kış mevsiminde 24489 ölçüm elde edilmiştir. En geniş ölçüm aralığa sahip mevsim 16-4691 Bq/m$^3$ ile ilkbahar mevsimi olurken, en dar ölçüm aralığına sahip mevsim 1-2819 Bq/m$^3$ ile yaz mevsimi olduğu görülmektedir. Maksimum ölçüm değeri 4691 Bq/m$^3$ olup ilkbahar mevsiminde elde edilmiştir. Araştırmada mevsimler göre radon ölçümlerinin arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığı Kruskal Wallis analizi ile test edilmiştir. Test istatistiği $\chi^2$=1914,3 olarak elde edilmiştir. Mevsimler arasında radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu bulunmuştur ($p<0,05$). Ayrıca, mevsimler arasında ikili karşılaştırma yapmak için Bonferroni testi kullanılmıştır. Sonuç olarak, aralarında radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark görülen mevsimler ve ölçüm büyüklükleri şu şekildedir; Yaz<İlkbahar, Sonbahar<İlkbahar, Yaz<Kış ve Sonbahar<Kış ($p<0,05$). Bu sonuçlara ek olarak, İlkbahar/Kış ve Yaz/Sonbahar

mevsimleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı söylenebilir ($p \geq 0,05$). Katlara bağlı radon ölçümlerine ait bazı sonuçlar Çizelge G.2'de sunulmaktadır.

Çizelge G.2. Radon ölçümlerinin katlara göre karşılaştırılması

| Katlar | N | Min | Medyan | Mak | Ort | SS | p | Bonferroni |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (Bq/m³) | | | | | | |
| Zemin kat | 32826 | 23 | 605 | 4691 | 1000 | 975 | 0,000 | 1.Kat<Zemin Kat; 2.Kat<Zemin Kat; 2.Kat<1.Kat |
| 1.Kat | 32242 | 1 | 107 | 581 | 135 | 95 | | |
| 2.Kat | 32435 | 5 | 89 | 360 | 101 | 61 | | |
| Genel | 97503 | 1 | 130 | 4691 | 415 | 706 | | |

Çizelgede sırasıyla ölçüm sayıları (N), ölçümlere ait minimum (Min), ortanca (Medyan), maksimum (Mak), ortalama (Ort) ve standart sapma (SS) tanımlayıcı istatistikleri yer almaktadır. Örneğin, zemin kattan 32826 ölçüm elde edilmiştir. Ayrıca, zemin kat için daha geniş bir aralıkta 23-4691 Bq/m³ ölçümler elde edilirken, 2.kat için daha dar bir aralıkta 5 ile 360 Bq/m³ arasında ölçümler alınmıştır. Maksimum ölçüm değeri 4691 Bq/m³ olup zemin katta elde edilmiştir. Araştırmada mevsimlere göre radon ölçümlerinin arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığı Kruskal Wallis analizi ile test edilmiştir. Test istatistiği $\chi^2=35772$ olarak hesaplanmış ve katlar arasında radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmüştür ($p<0,05$). Ayrıca, katlar arasında ikili karşılaştırma yapmak için Bonferroni testi kullanılmıştır. Sonuç olarak, aralarında radon ölçümleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark görülen katlar ve ölçüm büyüklükleri şu şekildedir; 1.Kat<Zemin, 2.Kat<Zemin Kat ve 2.Kat<1.Kat ($p<0,05$).