

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

Stell Tuksar

UTJECAJ IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA I RADONA NA KVALITETU ZRAKA
U STAMBENIM OBJEKTIMA

Varaždin, 2025.

Ovaj rad izrađen je na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u Zavodu za geotehniku pod vodstvom mentora doc.dr.sc. Davora Stanka i Zavodu za upravljanje vodama komentorice prof.dr.sc. Anite Ptiček Siročić te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2024./2025.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. CILJ I HIPOTEZA RADA.....	2
3. TEORIJSKI DIO	3
3.1. Ionizirajuće zračenje	3
3.1.1. Izvori i vrste.....	4
3.1.2. Mehanizmi djelovanja i učinci na zdravlje i okoliš	6
3.1.3. Mjerni instrumenti.....	9
3.2. Radon	10
3.2.1. Izvori radona u okoliš.....	11
3.2.2. Načini ulaska radona i koncentracije u zatvorenom prostoru	13
3.2.3. Mjerenje koncentracije radona.....	15
3.2.4. Koncentracija radona u Republici Hrvatskoj	16
4. ISTRAŽIVAČKI DIO	18
4.1. Monitoring ionizirajućeg zračenja	18
4.1.1. Provedba mjerenja	19
4.1.2. Parametri koji su promatrani tijekom mjerenja	20
4.1.3. Statistička obrada i vizualizacija izmjerenih podataka	22
4.2. Monitoring radona	23
4.2.1. Provedba mjerenja	24
4.2.2. Parametri koji su promatrani tijekom mjerenja	25
4.2.3. Statistička obrada i vizualizacija izmjerenih podataka	27
5. REZULTATI	29
5.1. Ionizirajuće zračenje	29
5.2. Radon	50
6. USPOREDBA IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA I RADONA.....	87
7. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE I RADON – EKOLOŠKI I ZDRAVSTVENI ASPEKTI TE MJERE PREVENCIJE.....	91

7. 1.	Utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi.....	91
7. 2.	Preventivne mjere i sigurnosni standardi	93
7. 3.	Prijedlog mjera prevencije na temelju mjerenja	94
8.	ZAKLJUČAK	96
9.	ZAHVALA	97
10.	LITERATURA	98
11.	SAŽETAK	103
12.	SUMMARY	104

POPIS SLIKA

Slika 1. - Proces ionizacije kod ionizirajućeg zračenja [9]	3
Slika 2. - Prodornost različitih vrsta zračenja – alfa, beta i gama [12]	6
Slika 3. - Primjeri povezanosti mehanizama ionizirajućeg zračenja s materijalom [13]	7
Slika 4. - Izvori radona u okolišu [20]	13
Slika 5. - Načini ulaska radona u neki građevni objekt [22]	14
Slika 6. - Županije u Hrvatskoj s povišenom razinom radona u zatvorenim prostorijama [24] ..	17
Slika 7. - Geiger-Müllerov brojač - model JT-RAD01	18
Slika 8. - Xiaomi Smart Monitor 3	20
Slika 9. - Prikaz tablice u excelu koja se koristila za bilježenje podataka	21
Slika 10. - Airthings Corentium Pro	23
Slika 11. - Mobilna aplikacije Airthings [28]	24
Slika 12. – Prikaz tablice u excelu koja se koristila za bilježenje i preračunavanje podataka	26

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za siječanj 2025.	29
Grafikon 2. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za siječanj 2025.	30
Grafikon 3. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za siječanj 2025.	31
Grafikon 4. - Raspodjela ukupnog izmjerelog ionizirajućeg zračenja po prostorijama za siječanj 2025.....	32
Grafikon 5. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za veljaču 2025.	33
Grafikon 6. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za veljaču 2025.	34
Grafikon 7. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za veljaču 2025.	35
Grafikon 8. - Raspodjela ukupnog izmjerelog ionizirajućeg zračenja po prostorijama za veljaču 2025.....	36
Grafikon 9. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za ožujak 2025.	37
Grafikon 10. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za ožujak 2025.	38
Grafikon 11. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za ožujak 2025.	39
Grafikon 12. - Raspodjela ukupnog izmjerelog ionizirajućeg zračenja po prostorijama za ožujak 2025.....	40
Grafikon 13. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za travanj 2025.	41
Grafikon 14. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za travanj 2025.	42
Grafikon 15. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za travanj 2025.	43
Grafikon 16. - Raspodjela ukupnog izmjerelog ionizirajućeg zračenja po prostorijama za travanj 2025.....	44
Grafikon 17. - Prosječne vrijednosti ionizirajućeg zračenja po prostorijama kroz mjesec za 2025. godinu	45
Grafikon 18. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti zračenja po mjesecima i prostorijama 2025.....	46
Grafikon 19. - Povezanost indeksa kvalitete zraka (AQI) i brzine vjetrova za 2025. godinu	47

Grafikon 20. - Koncentracije onečišćujućih tvari u zraku za 2025. godinu	48
Grafikon 21. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za donji kat.....	50
Grafikon 22. - Odnos tlaka zraka i razine radona za donji kat	51
Grafikon 23. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za donji kat.....	52
Grafikon 24. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za donji kat	53
Grafikon 25. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za gornji kat	54
Grafikon 26. - Odnos tlaka zraka i razine radona za gornji kat	55
Grafikon 27. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za gornji kat	56
Grafikon 28. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za gornji kat	57
Grafikon 29. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za podrum	58
Grafikon 30. - Odnos tlaka zraka i razine radona za podrum	59
Grafikon 31. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za podrum	60
Grafikon 32. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za podrum	61
Grafikon 33. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za garažu	62
Grafikon 34. - Odnos tlaka zraka i razine radona za garažu	63
Grafikon 35. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za garažu	64
Grafikon 36. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za garažu	65
Grafikon 37. - Maksimalne, srednje i minimalne koncentracije radona.....	66
Grafikon 38. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za prostorije u kojima se provodio monitoring.....	67
Grafikon 39. – Odnos relativne vlage i radona za donji kat	68
Grafikon 40. - Odnos tlaka zraka i radona za donji kat	69
Grafikon 41. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za donji kat.....	71
Grafikon 42. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za donji kat	72
Grafikon 43. - Odnos relativne vlage i radona za gornji kat.....	73
Grafikon 44. - Odnos tlaka zraka i radona za gornji kat.....	74
Grafikon 45. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za gornji kat	75
Grafikon 46. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za gornji kat	76
Grafikon 47. - Odnos relativne vlage i radona za podrum.....	77
Grafikon 48. - Odnos tlaka zraka i radona za podrum	78
Grafikon 49. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za podrum	79

Grafikon 50. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za podrum	80
Grafikon 51. - Odnos relativne vlage i radona za garažu	81
Grafikon 52. - Odnos tlaka zraka i radona za garažu.....	82
Grafikon 53. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za garažu	83
Grafikon 54. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za garažu.....	84
Grafikon 55. - Maksimalne, srednje i minimalne koncentracije radona.....	85
Grafikon 56. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za prostorije u kojima se provodio monitoring.....	86
Grafikon 57. - Linijski 3D grafikon prikazuje odnos ionizirajućeg zračenja i radona	88
Grafikon 58. - Stupčasti 2D grafikon prikazuje odnos ionizirajućeg zračenja i radona	89
Grafikon 59. - Stupčasti 3D grafikon prikazuje odnos ionizirajućeg zračenja i radona	90

1. UVOD

Ionizirajuće zračenje je oblik energije koji ima sposobnost izbacivanja elektrona iz atoma i molekule, što može imati značajne posljedice na materiju, posebno na utjecaj biološkog sustava. Iako je ionizirajuće zračenje prirodno prisutno u okolišu, njegova povećana prisutnost rezultat je antropogenih aktivnosti kao što su rad nuklearnih reaktora, medicinskih dijagnostičkih uređaja i industrijskih procesa. Zbog takvih izvora ionizirajućeg zračenja potrebno je sustavno praćenje i kontrola izloženosti, kako bi se zaštitilo zdravlje ljudi i okoliš [1]. Dva primjera koji prikazuju neodgovorno upravljanje ionizirajućim zračenjem su nuklearne nesreće u Černobilu (1986.) i Fukušimi (2011.). Upravo kako bi se izbjegli slični događaji u budućnosti potrebno je poštovati stroge sigurnosne mjere, provoditi edukaciju i odgovorno upravljati izvorima zračenja, posebno u sektorima visokog rizika [2].

Jedan od glavnih izvora prirodnog ionizirajućeg zračenja je radon (Rn), radioaktivni plemeniti plin koji nastaje raspadom uranija i prisutan je u tlu, vodi i građevinskom materijalu [3]. Radon je posebno značajan jer se može akumulirati u zatvorenim prostorima, poput kuća, škola, garaža, podruma, radnih prostora itd. U određenim prostorijama doseže koncentracije koje mogu predstavljati ozbiljan zdravstveni rizik. Dugotrajna izloženost povećanim koncentracijama radona povezuje se s razvojem karcinoma pluća [4]. Prema procjeni EPA (Environmental Protection Agency) radon je drugi najčešći uzrok raka pluća nakon pušenja [5].

Istraživanje je provedeno s ciljem ispitivanja koncentracija ionizirajućeg zračenja i radona u zatvorenom prostoru. Glavni cilj bio je utvrditi razine izloženosti te predložiti mjere prevencije. Svrha istraživanja bila je podizanje svijesti stanovništva o ozbiljnosti i štetnosti radona na zdravlje. Rezultati su pokazali da koncentracije radona značajno variraju tijekom godine te da meteorološki čimbenici imaju veliki utjecaj na njegov nastanak u zatvorenom prostoru. Na primjer, tijekom hladnijih razdoblja kada je provjetravanje otežano koncentracije radona su više nego u ljetnom razdoblju kada se redovito provjetrava prostor. Dokazano je da redovito provjetravanje i dobra cirkulacija zraka predstavljaju ključne mjere prevencije. Primjenom tih mjera moguće je održavati koncentracije radona ispod preporučenih granica od 300 Bq/m^3 te zdravlje stanara nije ugroženo [4].

2. CILJ I HIPOTEZA RADA

Tijekom izrade ovog rada, u istraživačkom dijelu provedena su mjerenja koncentracija ionizirajućeg zračenja i radona, a prikupljeni podaci su naknadno analizirani. Cilj rada bio je dobiti uvid u vrijednosti koncentracija ionizirajućeg zračenja i radona u zatvorenim prostorijama u kojima je proveden monitoring. U sklopu praćenja koncentracija radona dodatno su provedena dva ciklusa mjerenja kako bi se utvrdila razlika u izmjeranim vrijednostima te analiziralo kako različita godišnja doba utječu na razine koncentracije radona.

Na temelju analiziranih podataka predložene su mjere prevencije s ciljem zaštite zdravlja stanovništva i smanjenja izloženosti ionizirajućem zračenju i radonu. Poseban naglasak stavljen je na potrebu edukacije i podizanje svijesti građana o ovom problemu, budući da je riječ o temi o kojoj se još uvijek nedovoljno govori, unatoč njezinom značajnom utjecaju na ljudsko zdravlje.

S obzirom na poznate učinke ionizirajućeg zračenja i radona, hipoteza rada glasi:

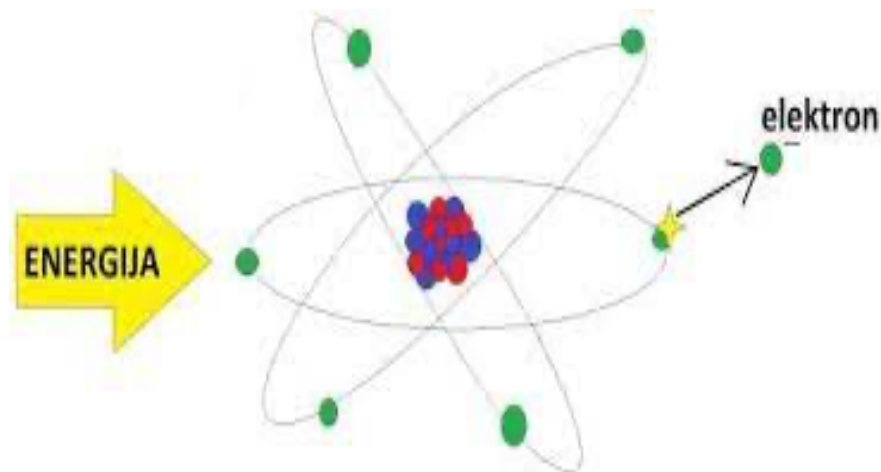
- Povišene koncentracije radona u zatvorenim prostorima mogu značajno povećati rizik od negativnih zdravstvenih posljedica, a sustavni monitoring i primjena zaštitnih mjera ključni su za smanjenje izloženosti i zaštitu zdravlja ljudi.
- Pretpostavlja se da učinkovitost zaštitnih mjera i metoda smanjenja koncentracije radona u zatvorenim prostorima ovise o kombinaciji građevinskih karakteristika objekta, ventilacijskih sustava te svjesnosti stanovništva o opasnostima i preventivnim mjerama. Primjenom odgovarajućih tehničkih i organizacijskih rješenja može se značajno smanjiti negativan učinak radona na zdravlje ljudi.

3. TEORIJSKI DIO

3. 1. Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje predstavlja oblik energije koji se prenosi kroz prostor u obliku atomskih, subatomskih ili elektromagnetskih valova, pri čemu one posjeduju dovoljno energije za proces ionizacije materije (*Slika 1.*) [6]. Zračenje prirodno nastaje u mnogim procesima u mikrosvijetu i dio je kozmičkog zračenja koje dolazi iz svemira. Osim prirodnih izvora, ionizirajuće zračenje može nastati i uslijed umjetno induciranih procesa, primjerice u nuklearnim reaktorima, rendgenskim cijevima ili tijekom nuklearnih eksplozija [7].

Proces ionizacije je postupak u kojemu atom gubi ili dobiva elektrone, pri čemu neutralna čestica prelazi u električno nabijenu česticu ili ion [6]. Zbog visoke energije, ionizirajuće zračenje pri interakciji s nekom tvari može izazvati ionizaciju iste [8]. Povezanost između zračenja i materije ovisi o svojstvima nositelja zračenja, bilo da su to fotoni ili subatomske čestice te o njihovoj energiji [7]. Predajom samo dijela ili potpune energije tvari mijenjaju svojstva ozračenim tvarima. Tijekom tog procesa, zračenje prenosi dio ili cjelokupnu energiju na tvar, uzrokujući promjene u njezinim fizikalnim i kemijskim svojstvima. Energijski sastav atoma i atomske jezgre pritom se mijenja što rezultira emisijom fotona ili drugih elementarnih čestica.



Slika 1. - Proces ionizacije kod ionizirajućeg zračenja [9]

Ionizirajuće zračenje može imati pozitivne i negativne posljedice [8]. U biološkim sustavima, ionizacija izaziva razgradnju molekularnih veza, što može dovesti do značajnih oštećenja stanica i genskog materijala [2]. Dugotrajna ili intenzivna izloženost ionizirajućem zračenju može uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme, uključujući mutacije DNK, razvoj karcinoma te druge degenerativne bolesti [8]. Prijenos energije ionizirajućeg zračenja odvija se statično, dok njegova prostorna raspodjela izravno utječe na ukupni učinak samog zračenja [5].

Ionizirajuće zračenje je stalno prisutno u okolišu kao prirodni fenomen. Sve šira primjena umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja postaje značajan čimbenik u znanstvenim, medicinskim i industrijskim procesima. Zbog potencijalnih štetnih učinaka, ključno je razvijati i primjenjivati mjere zaštite od ionizirajućeg zračenja, poput ograničavanja izloženosti, korištenja zaštitne opreme te primjene sigurnosnih protokola u radu s izvorima zračenja [8].

3.1.1. Izvori i vrste

Izvori ionizirajućeg zračenja mogu se podijeliti u dvije skupine: prirodne i umjetne. Prirodno ionizirajuće zračenje potječe iz okoliša te smo mu kontinuirano izloženi. Njegovo podrijetlo potječe još od vremena formiranja Zemlje, a nastalo je kao posljedica kozmičkog zračenja, čiji su izvori izvan Sunčevog sustava. Sunce također emitira različite vrste elektromagnetskog zračenja, uključujući radiovalove, mikrovalove, infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko i gama zračenje [8].

Glavni izvori prirodnog zračenja su:

- kozmičko zračenje – dolazi iz svemira, a njegov intenzitet raste s visinom, pa su doze veće na planinama i u zrakoplovima.
- terestričko zračenje – potječe iz prirodnih radionuklida u tlu, stijenama i vodi. Najčešći izotopi su uran-238 i torij-232, koji pripadaju prirodnim radioaktivnim lancima te kalij-40, koji je također prisutan u tlu i biološkim tkivima.
- radon-222 – radioaktivan plin koji nastaje raspadom urana u tlu i lako ulazi u zatvorene prostore, gdje može doseći visoke koncentracije.

Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja rezultat su ljudske aktivnosti i tehnološkog napretka. Oni uključuju:

- nuklearne reaktore,
- nuklearno oružje,
- radioaktivan otpad,
- dijagnostičke medicinske uređaje [10].

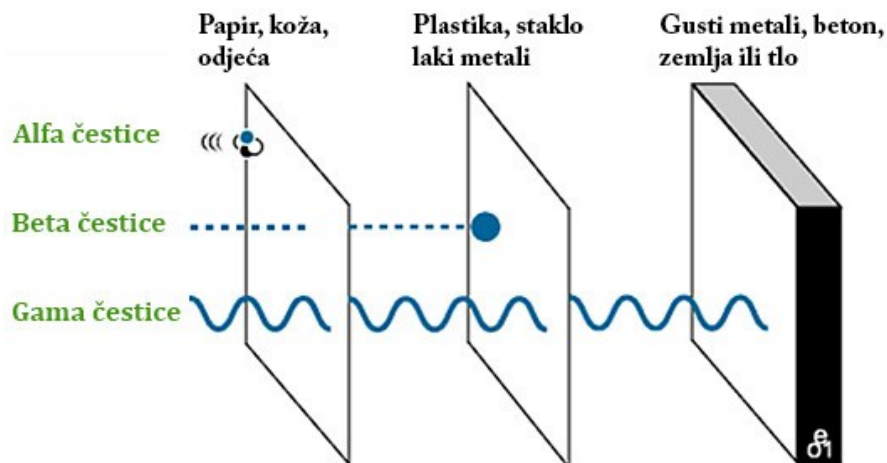
Radioaktivne tvari sadrže atome s nestabilnim jezgrama koje se spontano mijenjaju, nastojeći postići stabilnost ispuštanjem energije. Ovaj proces poznat je kao radioaktivni raspad, pri kojemu jezgra emitira elektromagnetsko zračenje ili čestice, stvarajući ionizirajuće zračenje. Budući da se raspad događa bez vanjskog utjecaja, na njega se ne može utjecati fizikalnim i kemijskim postupcima. Radioaktivna zračenja pripadaju vrsti ionizirajućeg zračenja jer imaju sposobnost ionizacije atoma tvari na koje djeluju [8].

Postoje tri glavne vrste radioaktivnog zračenja (*Slika 2.*):

- alfa (α) zračenje – sastoji se od teških pozitivno nabijenih čestica (2 protona + 2 neutrona). Ima vrlo kratki domet i može ga zaustaviti papir ili koža. Opasno je ako se unese u organizam, primjerice udisanjem radona ili gutanjem radioaktivnih čestica.
- beta (β) zračenje – sastoji se od elektrona, koji imaju veću prodornost od alfa čestica. Mogu prodrijeti kroz kožu, ali ih zaustavlja aluminijska folija.
- gama (γ) zračenje – visokoenergetski elektromagnetski valovi slični rendgenskom zračenju, ali snažniji. Nastaju u nuklearnim raspadima i koristi se u medicinskoj dijagnostici. Imaju vrlo veliku prodornost i zahtijevaju debelu zaštitu, poput olova ili betona.

Uz navedene vrste, postoje i druge vrste ionizirajućeg zračenja:

- neutronska zračenje – sastoji se od slobodnih neutrona, koji se oslobađaju tijekom nuklearnih reakcija. Ključno je za razumijevanje nuklearne fisije i djelovanje reaktora.
- rendgensko (X) zračenje – nastaje u rendgenskim cijevima, primjerice u medicinskoj dijagnostici i sigurnosnim skenerima. Ima manju energiju od gama zračenja, ali i dalje može izazvati ionizaciju tvari [11].



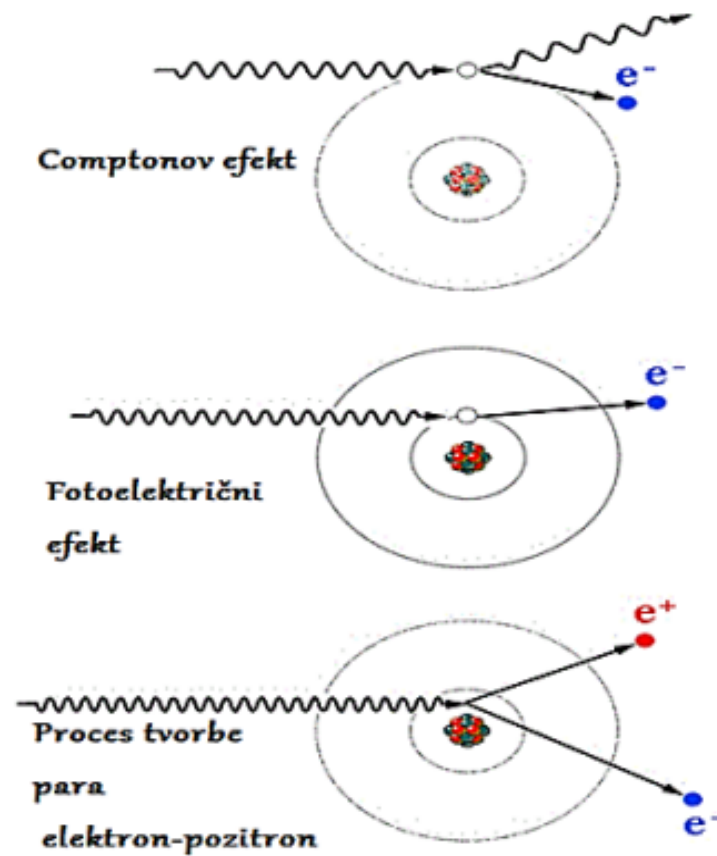
Slika 2. - Prodornost različitih vrsta zračenja – alfa, beta i gama [12]

3.1.2. Mehanizmi djelovanja i učinci na zdravlje i okoliš

Ionizirajuće zračenje predstavlja oblik energije koji ima dovoljnu energiju da izbaci elektrone iz atoma i molekula, stvarajući ione. Ovaj proces može uzrokovati promjene u biološkim materijalima, uključujući DNK i proteinske strukture u organizmima. Povezanost mehanizma ionizirajućeg zračenja s materijom uključuju fotoelektrični efekt, Comptonov efekt i produkciju parova (Slika 3.) [8].

- Fotoelektrični efekt – nastaje kada foton u potpunosti apsorbira energiju i izbaci elektron iz atoma, uzrokujući ionizaciju i nestanak fotona. Atom ostaje s pozitivnim nabojem.
- Comptonov efekt – nastaje kada se foton sudari s elektronom, prenese mu dio svoje energije i izazove ionizaciju, dok sam foton nastavlja s manjom energijom kao raspršeno zračenje. Taj proces je čest u svim materijalima i važan je faktor u zaštiti od zračenja.
- Produkcija parova (pozitrona) – proces u kojem visokoenergetski foton u polju jezgre stvara elektron-pozitron, pri čemu se njegova energija pretvara u masu i kinetičku energiju čestica. Smjer kretanja čestica ovisi o energiji fotona, a proces je moguć u prisutnosti jezgre [11].

Biološki utjecaji ionizirajućeg zračenja obuhvaćaju sve promjene koje ono uzrokuje na razini stanica, tkiva ili cijelog organizma. Jednom kada ionizirajuće zračenje prođe u organizam, počinje ionizirati molekule, što može uzrokovati oštećenje i razaranje organskih makromolekula, uključujući DNK, proteine i lipide.



Slika 3. - Primjeri povezanosti mehanizama ionizirajućeg zračenja s materijalom [13]

Biološki učinci mogu biti primarni, koji uključuju izravnu ionizaciju i stvaranje slobodnih radikala te sekundarni, koji obuhvaćaju oštećenje DNK, proteina i lipida kroz uvjetovane kemijske reakcije [8].

Biološki učinci dijele se na:

- somatske učinke – posljedice koje se pojavljuju isključivo kod ozračene osobe, a uključuju akutna i kronična oštećenja tkiva i organa.
- genske učinke – posljedice koje utječu na potomstvo ozračene osobe, uključujući mutacije i nasljedne promjene.

Biološki čimbenici ovise o nekoliko čimbenika, kao što su:

- trajanje izloženosti,
- raspodjela doze po tijelu,
- učestalost izloženosti,
- intenzitet zračenja.

Općenito, postoji linearna povezanost između količine primjene doze i težine bioloških posljedica – što je veća doza zračenja, to su posljedice ozbiljnije [11].

Biološki učinci se prema štetnosti mogu podijeliti u dvije kategorije:

1. Deterministički (nestohastički) učinci – nastaju kod primjene visoke doze zračenja i imaju prag ispod kojeg se ne pojavljuju. Zbog toga je moguće odrediti sigurnosne granice dopuštenog izlaganja. Primjeri determinističkih učinka uključuju:

- nemaligne ozljede kože,
- smanjenje broja koštanih stanica u koštanoj srži,
- fibroze,
- zamućenje očne leće,
- akutni radijacijski sindrom.

Vrste determinističkog učinka ovisi o primljenoj dozi i vremenskom intervalu nakon zračenja [14].

2. Stohastički učinci - vjerojatnost njihovog nastanka proporcionalno raste s primjenom dozom, a mogu izazvati i vrlo male doze zračenja. Ne postoji sigurna granica ispod koje se oni ne mogu pojaviti te ih nije moguće predvidjeti. Kada se pojave, posljedice su ozbiljne i dugotrajne, a primjeri uključuju:

- maligne tumore,
- genske mutacije,
- nasljedne promjene [15].

Utjecaji ionizirajućeg zračenja mogu imati dugotrajne posljedice na ekosustav i okoliš:

- Kontaminacija tla i vode – radionuklidi poput cezija-137 i stroncija-90 mogu uzrokovati dugotrajno zagađenje tla i vodnih resursa.
- Utjecaj na biljke i životinje – izloženost ionizirajućem zračenju može izazvati mutacije i promjene u reproduktivnom sustavu živih organizama.
- Nuklearne nesreće – primjeri katastrofa kao što su Černobil i Fukushima pokazali su dugoročne posljedice ionizirajućeg zračenja na okoliš i ljudsko zdravlje [2].

Kako bi smanjili izloženost i negativne učinke ionizirajućeg zračenja, primjenjuju se tri osnovna načela zaštite:

1. Ograničenje vremena izloženosti – smanjenje vremena provedenog u zoni zračenja smanjuje apsorbiranu dozu.
2. Povećanje udaljenosti od izvora zračenja – doza zračenja opada s udaljenosti od izvora.
3. Primjena zaštitnih zapreka – korištenjem materijala poput olova, betona i specijaliziranih zaštitnih odijela značajno smanjuje intenzitet zračenja i štiti organizam od njegovih negativnih učinka [11].

3.1.3. Mjerni instrumenti

Zračenje je fizikalni fenomen koji se ne može osjetiti ljudskim osjetilima, stoga je potrebno koristiti mjerni instrument za kvantifikaciju vrste i količine zračenja. Mjerni uređaji koji se mogu koristiti u ovom kontekstu mogu se opisati kao skladišta radijacija jer bilježi i prikazuje podatke o prisutnosti zračenja.

- Apsorbirana doza:
 - predstavlja količinu energije apsorbiranu po jedinici mase tvari,
 - mjerna jedinica: gray (Gy).
- Biološki učinak zračenja:
 - razlikuje se ovisno o vrsti zračenja (alfa, beta, gama, itd.),
 - različite vrste ionizirajućeg zračenja različito djeluju na tkivo, što znači da ista količina apsorbirane energije ne uzrokuje uvijek istu štetu,

- različiti oblici zračenja nisu jednako opasni za stanice i DNK.
- Ekvivalentna doza:
 - uzima u obzir biološku učinkovitost različitih vrsta zračenja,
 - mjerna jedinica: sivert (Sv).
- Aktivnost radioaktivnog uzorka:
 - predstavlja broj radioaktivnih raspada u sekundi ,
 - mjerna jedinica: bekerel (Bq).

Za mjerenje zračenja postoji niz različitih uređaja, od kojih se najčešće koriste ionizacijske komore, maglene komore, Geiger-Müllerov brojač te komore na iskre [11].

- Ionizacijska komora mjeri intenzitet ionizirajućeg zračenja prikupljanjem ionskih parova nastalih prolaskom čestica kroz plin u električnom polju. Zahvaljujući visokoj preciznosti, često se koristi u radioterapiji.
- Maglena komora ili Wilsonova maglena komora vizualizira staze ionizirajućih čestica stvaranjem kondenzacijskih tragova u smjesi vode i zraka.
- Geiger-Müllerov brojač mjeri ionizirajuće zračenje pomoću plinske komore s visokonaponskom žicom, gdje ionizacija izaziva lavinu, a različite cijevi omogućuju detekciju različitih vrsta zračenja.
- Komora na iskre je instrument koji detektira ionizirajuće čestice putem iskri nastalih između elektroda u plinskoj komori [16].

Ovi uređaji omogućuju precizno mjerenje i praćenje zračenja u različitim uvjetima te su ključni za sigurnost u područjima koja zahtijevaju visoke standarde zaštite od ionizirajućeg zračenja [11].

3. 2. Radon

Radon (Rn) je radioaktivni plin i kemijski element koji pripada 18. skupini plemenitih plinova. Riječ je o plinu bez okusa, boje i mirisa, koji se, uz plutonij, ubraja među najrjeđe elemente na Zemlji. Prirodno izbija iz torijevih i uranijevih minerala, a njegov najvažniji izotop, radon-222 ima vrijeme poluraspada od 3,8 dana. Radon-222 nastaje prirodnim radioaktivnim raspadom uranija 238, koji je prisutan u svim vrstama stijena i tla, a može se pronaći i u vodi.

Iz tla izlazi kao plin, koji se raspada i stvara radioaktivne čestice. U novijim istraživanjima, koncentracija radona u vodi i zraku povezuje se sa seizmičkim aktivnostima [4]. Udisanjem tih čestica one dospijevaju u dišni sustav gdje se talože na epitelnim tkivima dišnih puteva, potencijalno oštećujući DNK i povećavajući rizik od razvoja raka pluća. Radon je osobito opasan zbog emisija alfa zračenja, a maksimalno dopuštena koncentracija u zraku iznosi 3×10^{-4} Bq/cm³ [17].

Na otvorenom prostoru radon ne predstavlja značajne probleme jer se brzo razgrađuje do niskih koncentracija. S obzirom na to da je plin bez boje, okusa i mirisa, njegova prisutnost može se utvrditi isključivo mjerenjem. Koncentracija aktivnosti radona izražava se brojem radioaktivnih raspada atoma radona u jedinici vremena te se iskazuje u bekerelima po kubnom metru (Bq/m³). Budući da koncentracija radona varira tijekom dana i godine, kontinuirani monitoring je potrebno predvoditi najmanje godinu dana kako bi se dobili pouzdani podaci. Mjerenja se predvode pomoću detektora u prostorijama u kojima ljudi borave [18].

Kratki životni vijek i visoka radioaktivnost radona predstavlja izazov u eksperimentalnim istraživanjima njihovih spojeva [3]. Prosječna koncentracija radona na otvorenom prostoru kreće se između 5 i 15 Bq/m³, dok su razine u zatvorenim prostorima znatno veće, od 10 Bq/m³ do 10 000 Bq/m³ ovisno o uvjetima. Najviše koncentracije radona zabilježene su u rudnicima, špiljama te postrojenjima za pročišćavanje vode. Procjenjuje se da radon uzrokuje između 3 % i 14 % svih slučajeva raka pluća na globalnoj razini.

Danas su dostupne učinkovite i ekonomski isplative metode za sprječavanje ulaska radona u građevinske objekte te za smanjivanje njegove postojeće koncentracije [4].

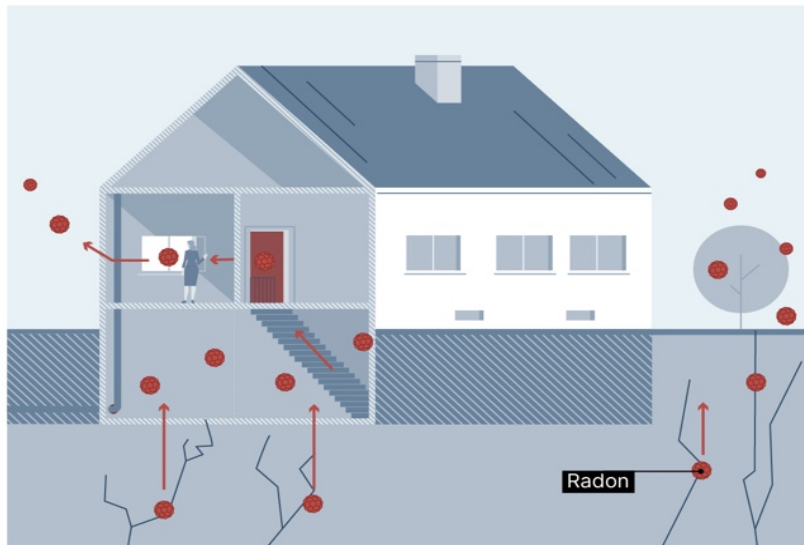
3.2.1. Izvori radona u okoliš

Radon je u prirodi vrlo rijedak element, a kao produkt radioaktivnog raspada prati elemente iz kojih nastaje, šireći se unutar njih i pridonoseći njihovoj radioaktivnosti. Svi izotopi radona su radioaktivni te se formiraju unutar raspadnih nizova uranija, aktinija i torija. Poznato je više od tridesetak različitih izotopa radona, pri čemu se najčešće pojavljuje radon-222. Ovaj izotop nastaje alfa raspadom radija-226 te pripada uranijevom raspadnom nizu. Njegovo vrijeme poluraspada iznosi 5,83 dana, dok je prosječno vrijeme života 5,51 dan.

Radon nastaje raspadom radija te je prisutan u cijeloj Zemljinoj kori. Koncentracija radona u stijenama i tlu ovisi o koncentraciji uranija i radija u tim materijalima. Većinom ostaje zarobljen unutar kristalne rešetke minerala iz kojih je nastao, sve do vlastitog raspada [19]. Glavni izvori radona je tlo koje sadrži radij, a njegovim alfa raspadom nastaje radon u plinovitom stanju. Prisutnost radona u tlu u stijenama određena je količinom i raspodjelom uranija unutar njih. Uran se u kamenim materijalima nalazi u mineralima poput cirkona, apatita i alanita. Erozijski procesi oslobađaju uranij iz navedenih minerala. Mekani minerali u dodiru s vodom formiraju čestice gline, dok se čvrsti minerali kao što su cirkon, monazit i titanit povezuju u pješčane materijale. Posljedica toga je neravnomjerna distribucija uranija u različitim vrstama tla što posljedično utječe na raspodjelu elementa koji se nalaze uz njega u raspadnutom nizu, uključujući radon.

Glavni izvori radona u kućanstvima su tlo ispod objekta (85-90 %), građevinski materijal (5-10 %), podzemne vode (oko 5 %) te Zemljin plin (manje od 1 %) (*Slika 4.*). Najjednostavniji građevinski materijali, poput drva, cigle i betona, ispuštaju relativno male količine radona. S druge strane, materijali poput granita i plovice posjeduju višu razinu radioaktivnosti te se u nekim dijelovima svijeta često koriste u gradnji [19].

Koncentracija radona u prirodi je niska jer se brzo raspršuje u atmosferi što znači da ne predstavlja značajan zdravstveni rizik. Tipična koncentracija radona na otvorenom prostoru iznosi oko 10 Bq/m³. Međutim u zatvorenim prostorima poput špilja, rudnika ili zgrada radon se ne može lako raspršiti te se nakuplja u većim koncentracijama nego na otvorenom. Prosječna koncentracija radona u zatvorenim prostorijama iznosi približno 50 Bq/m³, ali u nekim uvjetima može dosegnuti i vrijednosti do 10 000 Bq/m³ [17].



Slika 4. - Izvori radona u okolišu [20]

3.2.2. Načini ulaska radona i koncentracije u zatvorenom prostoru

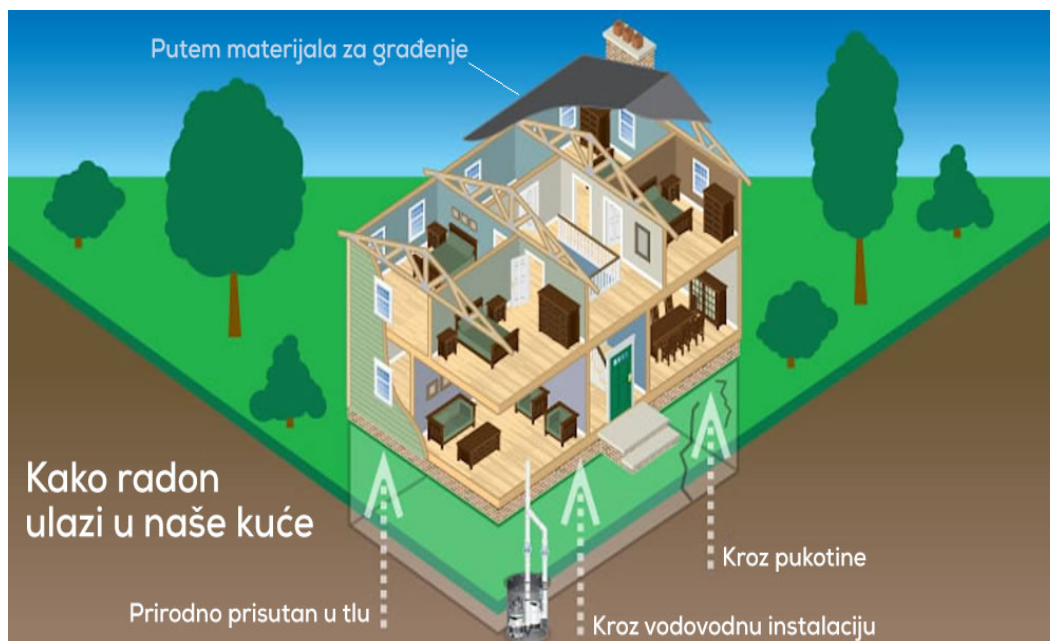
Radon je plin koji nastaje prirodnim raspadom radija, ali može dospjeti u objekte putem različitih izvora i načina. Najveći doprinos koncentraciji radona u zgradama dolazi od tla koje se nalazi ispod objekta. Radon može izlaziti iz tla i ulaziti u unutrašnjost objekta kroz otvore, često smještene u temeljima građevina. Budući da radon kontinuirano izlazi iz tla, uvijek je prisutan u zraku, ali u različitim koncentracijama. Iako su koncentracije radona obično niže u vanjskom zraku, u zatvorenim prostorima koncentracije mogu biti značajno veće zbog ograničenog kretanja zraka i spore izmjene s vanjskim zrakom.

Kada radon uđe u prostoriju dolazi do njegovog raspada i povećanja koncentracije produkata toga raspada. Ulazak radona u prostorije može također uzrokovati promjenu tlaka. Unutar prostorije tlak je obično niži nego u tlu.

Najveće koncentracije radona obično se nalaze u prizemnim dijelovima objekta i u podrumu, dok su na prvom katu koncentracije približno upola niže, a iznad prvog kata zanemarive. Uobičajeno, koncentracije radona u unutrašnjosti objekta mogu biti i do pet puta veće nego na otvorenom.

Nakon izgradnje objekta, tlo se slegne što stvara prazni prostor između betonske ploče i površine zemlje. U tom prostoru može se akumulirati radon. Mjesta kroz koja radon ulazi u unutrašnjost kuće obuhvaćaju pukotine, nosive betonske grede, pukotine na zidovima, pukotine na podu,

zatvorene terase te vodovodne i kanalizacijske instalacije (Slika 5.) [21]. Jednom kada radon dospije u prostoriju, dolazi do njegovog raspada i povećanja koncentracije produkata raspada [18].



Slika 5. - Načini ulaska radona u neki građevni objekt [22]

Kod prevencije ulaska radona u neki objekt potrebno je zatvoriti pukotine i mjesta kroz koja on može ući. Izgradnjom kvalitetne kuće koja nema pukotine na podu ili zidovima te uz kvalitetnu hidroizolaciju ulazak radon se može spriječiti.

Ako se kuća nalazi na tlu iz kojeg radon može izlaziti u većim količinama, najbolje je poduzeti mjere za zadržavanje radona izvan objekta. Kod prostora kao što je podrum gdje se radon pojavljuje u većim koncentracijama najdjelotvornije rješenje je sanacija. To se postiže sustavom ventilacije koji izdvaja radon iz prostora ispod temeljne ploče i preusmjerava ga u okolni zrak. Suvremeni sustavi ventilacije, posebice u niskoenergetskim objektima pokazali su vrlo djelotvorne rezultate u smanjenju razine koncentracije radona u stambenim objektima [21].

Intervencijske mjere za smanjenje razine radona mogu biti aktivne i pasivne.

- Aktivne mjere – ugradnja dodatne ventilacije i ventilatora koji stvaraju podtlak u prostorijama s povećanim koncentracijama radona.

- Pasivne mjere – ugradnja nepropusne membrane, temeljito brtvljenje podzemnog djela kuće (zatvaranje pukotina) te postavljanje nepropusnih manšeta na prodore ciljevi i instalacije kroz zidove.

Prema mjernim podacima na području Hrvatske srednja koncentracija radona iznosi 68 Bq/m^3 . Europska komisija preporučuje da srednje godišnje vrijednosti radona ne prelazi 400 Bq/m^3 za stanogradnju te 200 Bq/m^3 za novogradnju. Ukoliko koncentracije radona premaše ove preporučene vrijednosti potrebno je poduzeti sigurnosne mjere i sanaciju [18]. Prema Pravilniku o granicama ograničenja i preporučenim doznim koeficijentima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja, koji se temelji na Direktivi vijeća 2013/59/Euratom [23] referentne vrijednosti koncentracije radona u zatvorenim prostorima ne smiju prelaziti 300 Bq/m^3 . U slučaju ako vrijednosti radona prelaze navedenu referentnu granicu od 300 Bq/m^3 potrebno je poduzeti mjere sanacije kao što su poboljšanje ventilacije i izgradnja izolacije [17].

3.2.3. Mjerenje koncentracije radona

Mjerenje koncentracije radona može se provoditi na dva načina: direktnim mjerenjem radona ili indirektnim mjerenjem. Detekcija radona temelji se na mjerenju razine alfa, beta i gama zračenja uz pomoć Geiger-Müllerovog brojača. Koncentracija radona određuje se usisavanjem određenog volumena zraka kroz aerosolni filter, pri čemu se mjeri vrijeme poluraspada čestica radona prisutnih u tom volumenu zraku. Uređaji za mjerenje radona u zraku funkcioniraju na princip usisavanja zraka pomoću usisne pumpe kroz aerosolni filter. Na tom filteru talože se produkti raspada radona koji su sadržani u volumenu zraka koji je prošao kroz aerosolni filter. Nakon toga, filter se stavlja u uređaj za mjerenje aktivnosti kako bi se odredila aktivnosti alfa čestica. Alfa detektor Geiger-Müllerovog brojača mjeri aktivnost raspada radona u zraku, a rezultat toga je krivulja radioaktivnog raspada koja prikazuje smanjenje broja čestica tijekom vremena. Dobivenom krivuljom omogućava se identifikacija elemenata.

Rezultati mjerenja produkata raspada omogućuju određivanje koncentracije pojedinih produkata u zraku u jedinicama Bq/m^3 ili potencijalne alfa energije u J/m^3 ili MeV/cm^3 . Za usporedbu koncentracija radona često se koristi potencijalna koncentracija alfa energije prikazana u obliku

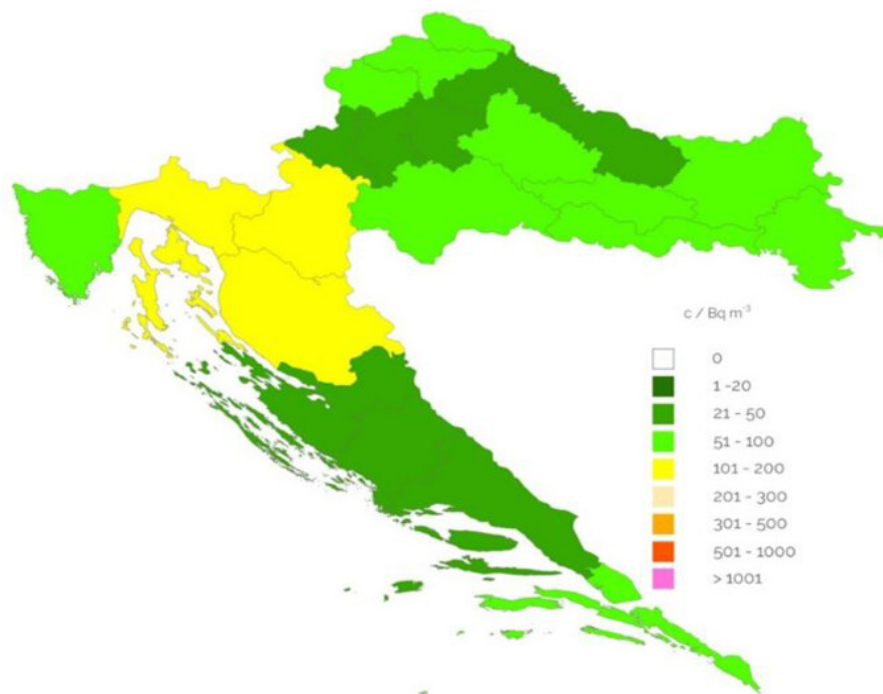
ravnotežne koncentracije u Bq/m³. Osjetljivost mjernog uređaja ovisi o protoku zraka i snazi usisne pumpe. Najveći izazov kod mjerenja radona su pogreške nastale prilikom mjerenja koncentracija. Mjerenje koncentracije radona također se može mjeriti u vodi i tlu.

- RAD7 – prijenosni uređaj za mjerenje koncentracije radona u vodi, zraku i tlu, koji omogućava precizno prikazivanje alfa spektra pohranu podataka u internu memoriju. Koristi se na terenu i u laboratoriju te može generirati izvještaje s ključnim statističkim podacima i alfa spektrom,
- RAD-H20 - uređaj za mjerenje koncentracije radona u vodi, koji koristi zatvorenu petlju za ekstrakciju radona u zrak radi analize. Točnost ovisi o više faktora, a uređaj se može koristiti u kombinaciji s drugim sustavima za mjerenje [18].

3.2.4. Koncentracija radona u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj praćenje ionizirajućeg zračenja provodi se pod nadzorom Hrvatskog državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost. Posebna pažnja posvećena je praćenju koncentracija radona, pri čemu se istraživanja uglavnom odnose na mjerenja razine radona u zatvorenim prostorijama.

Nacionalno istraživanje provedeno 2006. godine obuhvatilo je jednogodišnje mjerenje koncentracije radona u nasumično odabranim kućanstvima diljem Hrvatske. Rezultati su pokazali da aritmetička sredina izmjerenih koncentracija radona iznosi 68 Bq/m³, što je u skladu s prosječnim vrijednostima izmjerenim na prostoru srednje i južne Europe. Dodatna istraživanja pokazala su regionalne razlike u koncentraciji radona, pri čemu su povećane vrijednosti utvrđene u Ličko-senjskoj županiji u odnosu na ostatak županija (*Slika 6.*).



Slika 6. - Županije u Hrvatskoj s povišenom razinom radona u zatvorenim prostorijama [24]

Meteorološki čimbenici kao što su vjetera, temperatura i tlak imaju veliku ulogu o koncentracije radona [19]. S obzirom na potencijalne zdravstvene rizike povezane s dugotrajnom izloženosti radonu, Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost donio je 27. prosinca 2018. odluku o provođenju akcijskog plana za razdoblje 2019-2024. (NN 118/2018) [25].

Dugoročni cilj ovog plana bio je smanjiti koncentracije radona u zatvorenim prostorijama kako bi se smanjila pojava karcinoma pluća u Republici Hrvatskoj.

Mjere predviđene akcijskim planom uključuju:

1. Sustavno mjerenje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama, tlu i vodi namijenjenoj za ljudsku potrošnju,
2. Izradu radonskih zemljovida, provedba postupaka za smanjenje koncentracije radona na prihvatljive razine [17].

4. ISTRAŽIVAČKI DIO

4. 1. Monitoring ionizirajućeg zračenja

Monitoring ionizirajućeg zračenja provodio se tijekom četiri mjeseca uz primjenu Geiger-Müllerovog brojača modela JT-RAD01 (*Slika 7.*). Mjerni podaci kontinuirano su bilježeni i pohranjivani u tablicu programa Microsoft Excel zbog daljnje analize.

Mjerenja su provedena na lokaciji u Strahonincu, u blizini Čakovca s ciljem utvrđivanja razine ionizirajućeg zračenja na tom području. Na lokaciji je definirano osam mjernih točaka pri čemu su podaci prikupljeni u različitim vremenskim intervalima kako bi se stekla šira slika o varijacijama u razini zračenja. Primjena standardiziranih metoda mjerenja i analiza podataka provedena je zbog veće pouzdanost i preciznost rezultata. Obrada podataka obuhvaćala je statističku analizu radi identifikacije mogućih odstupanja i uočavanja potencijalnih izvora ionizirajućeg zračenja.



Slika 7. - Geiger-Müllerov brojač - model JT-RAD01

4.1.1. Provedba mjerenja

U svrhu provođenja monitoringa ionizirajućeg zračenja korišten je detektor JT-RAD01, inovativni uređaj namijenjen detekciji gama (γ), beta (β) i regentskog (x) zračenja. Ovaj uređaj karakterizira visoka osjetljivost, stabilnost u radu i mogućnost jednostavnog rukovanja, što ga čini pogodnim za terenska i laboratorijska mjerenja. Mjerni podaci mogu se prikazati kao numeričke vrijednosti, statistički podaci ili grafičke procjene čime se omogućuje detaljna analiza rezultata.

JT-RAD01 podržava mjerenje zračenja u više različitih mjernih jedinica, kao što su:

- Mikrosiverti/ satu ($\mu\text{Sv/h}$) – standardna mjera ekvivalentne doze zračenja, koja je korištena u ovom istraživanju.
- Mikrogray/ satu ($\mu\text{Gy/h}$) – mjera apsorbirane doze zračenja.
- Mikrorentgene/ satu (mR/h) – jedinica koja se često koristi u radiološkim analizama.
- Impulsi u sekundi (CPS) i impulsi u minuti (CPM) – mjere aktivnosti zračenja kroz brojanje detektiranih čestica u vremenskom intervalu.

Osjetljivost uređaja i mogućnost prilagodbe mjernih jedinica omogućuje njegovo korištenje u različitim uvjetima, od znanstvenih istraživanja do svakodnevne kontrole razine zračenja u okolišu [26].

Mjerenja su provedena na području Strahoninca, u blizini grada Čakovca. Istraživačko mjerenje je obuhvatilo jedno područje na kojem je odabrano osam mjernih točaka kako bi se dobila što preciznija razina ionizirajućeg zračenja u različitim prostorijama.

Odabrane su sljedeće prostorije:

1. Donji kat kuće – dnevni boravak, blagovaonica i kuhinja, prostor koji se najčešće koristi.
2. Gornji kat kuće – uključuje spavaće sobe i hodnik.
3. Kupaonica – prostor s prisutnošću vodovodnih instalacija, što može utjecati na razinu zračenja.
4. Ostava – prostor za skladištenja različitih stvari i materijala.
5. Podrum – područje koje može imati povećane razine prirodnog zračenja.
6. Garaža – prostor u kojem se nalaze različiti građevinski materijali te goriva i maziva koje mogu utjecati na razinu zračenja.
7. Drvarnica – pomoćni objekt u kojem se skladište različiti oblici drvenog materijala.
8. Terasa – vanjski prostor koji omogućuje usporedbu razine zračenja između zatvorenih i otvorenih prostorija.

Mjerenja su provedena u različitim sezonskim i vremenskim uvjetima, uključujući zimske i proljetne mjesece te suho i oblačno vrijeme, kako bi se utvrdilo postoji li varijabilnost u rezultatima.

4.1.2. Parametri koji su promatrani tijekom mjerenja

Tijekom mjerenja koncentracije ionizirajućeg zračenja paralelno su prikupljeni i meteorološki podaci, kako bi se analizirala njihova potencijalna povezanost s varijacijama razine zračenja [27].

Praćeni su sljedeći meteorološki parametri:

- Temperatura zraka ($^{\circ}\text{C}$),
- Relativna vlažnost zraka (%),
- Brzina i smjer vjetra (km/h),
- Atmosferski tlak (hPa),
- Kakvoća zraka,
- Koncentracije lebdećih čestica PM 2.5 i PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),
- Koncentracije plinovitih onečišćivača: ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), dušikov dioksid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ugljikov monoksid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) i sumporov dioksid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Vanjski meteorološki parametri prikupljeni su korištenjem aplikacije AccuWeather, koja pruža ažurirane podatke o vremenskim uvjetima i kakvoći zraka. Uz mjerenje uvjeta vanjske atmosfere, tijekom monitoringa također su kontinuirano mjerene temperatura i relativna vlažnost zraka unutar prostorija u kojima su provedena mjerenja ionizirajućeg zračenja. Ovi parametri mjereni su pomoću uređaja Xiaomi Smart Monitor 3, koji služi za mjerenje temperature i vlage (*Slika 8.*) te omogućava preciznu analizu mikroklimatskih uvjeta u zatvorenim prostorijama.



Slika 8. - Xiaomi Smart Monitor 3

Mjerenja su provedena u razdoblju od četiri mjeseca, s početkom od 1. siječnja 2025. godine do 30. travnja 2025. godine, kako bi se osigurala reprezentativnost podataka i dobila što preciznija analiza dnevnih i sezonskih varijacija. Mjerenja su provedena u pet dnevnih termina, u sljedećim vremenskim intervalima:

- 07:00 h (jutarnji uvjeti, niske temperature, smanjena urbanizirana aktivnost)
- 11:00 h (dopodnevni uvjeti, povećana insolacija i promjena atmosferski parametara)
- 15:00 h (najviše dnevne temperature, najviša aktivnost atmosferske konvekcije)
- 19:00 h (večernji uvjeti, početak pada temperature i promjene u kakvoći zraka)
- 23:00 h (noćni uvjeti, stabilizacija atmosferskih parametara)

Svi prikupljeni podaci kontinuirano su bilježeni i pohranjivani u Microsoft Excel tablici (*Slika 9.*), što je omogućilo praćenje trendova i detaljne analize utjecaja meteoroloških uvjeta na razine ionizirajućeg zračenja.

Datum i Vrijeme	Lokacija	Temperatura (vani)	Temperatura (prostorije)	Tlak	Vlaga (vani)	Vlaga (prostorije)	Brzina vjetra	Smjer vjetra	Kakvoća zraka (vani)	AQI	PM 2.5 (µg/m³)	PM 10 (µg/m³)	O3 (µg/m³)	NO2 (µg/m³)	CO (µg/m³)	SO2 (µg/m³)	Zračenje
01.01.2025. 7h	Donji kat	-5	21	1030	97	39	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,10
01.01.2025. 7h	Gornji kat	-5	23	1033	97	42	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,06
01.01.2025. 7h	Kupaonica	-5	27	1033	97	44	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,20
01.01.2025. 7h	Garaža	-5	-5	1033	97	97	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,26
01.01.2025. 7h	Podrum	-5	13	1033	97	68	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,20
01.01.2025. 7h	Drvarnica	-5	-5	1033	97	97	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,16
01.01.2025. 7h	Ostava	-5	17	1033	97	48	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,23
01.01.2025. 7h	Terasa	-5	-5	1033	97	97	6	JZ	Loše	84	26	27	33	10	166	2	0,16
01.01.2025. 11h	Donji kat	3	23	1030	71	41	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,23
01.01.2025. 11h	Gornji kat	3	26	1030	71	42	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,20
01.01.2025. 11h	Kupaonica	3	27	1030	71	46	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,20
01.01.2025. 11h	Garaža	3	3	1030	71	71	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,36
01.01.2025. 11h	Podrum	3	14	1030	71	63	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,23
01.01.2025. 11h	Drvarnica	3	3	1030	71	71	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,33
01.01.2025. 11h	Ostava	3	20	1030	71	53	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,20
01.01.2025. 11h	Terasa	3	3	1030	71	71	5	JZ	Loše	94	28	31	35	10	166	2	0,20
01.01.2025. 15h	Donji kat	11	22	1027	27	42	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,16
01.01.2025. 15h	Gornji kat	11	24	1027	27	44	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,13
01.01.2025. 15h	Kupaonica	11	25	1027	27	42	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,20
01.01.2025. 15h	Garaža	11	11	1027	27	27	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,30
01.01.2025. 15h	Podrum	11	14	1027	27	58	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,13
01.01.2025. 15h	Drvarnica	11	11	1027	27	27	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,10
01.01.2025. 15h	Ostava	11	18	1027	27	52	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,20
01.01.2025. 15h	Terasa	11	11	1027	27	27	8	Jl	Nezdravo	110	37	38	40	12	278	19	0,09
01.01.2025. 19h	Donji kat	-3	23	1025	85	42	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,13
01.01.2025. 19h	Gornji kat	-3	24	1025	85	42	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,16
01.01.2025. 19h	Kupaonica	-3	26	1025	85	44	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,13
01.01.2025. 19h	Garaža	-3	-3	1025	85	85	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,26
01.01.2025. 19h	Podrum	-3	14	1025	85	66	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,16
01.01.2025. 19h	Drvarnica	-3	-3	1025	85	85	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,13
01.01.2025. 19h	Ostava	-3	18	1025	85	49	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,23
01.01.2025. 19h	Terasa	-3	-3	1025	85	85	9	J	Loše	74	22	23	45	5	302	5	0,03
01.01.2025. 23h	Donji kat	-4	23	1024	96	46	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,16
01.01.2025. 23h	Gornji kat	-4	25	1024	96	43	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,23
01.01.2025. 23h	Kupaonica	-4	27	1024	96	40	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,30
01.01.2025. 23h	Garaža	-4	-4	1024	96	96	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,26
01.01.2025. 23h	Podrum	-4	13	1024	96	68	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,23
01.01.2025. 23h	Drvarnica	-4	-4	1024	96	96	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,23
01.01.2025. 23h	Ostava	-4	17	1024	96	53	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,20
01.01.2025. 23h	Terasa	-4	-4	1024	96	96	9	SZ	Loše	77	23	26	41	6	248	4	0,13

Slika 9. - Prikaz tablice u excelu koja se koristila za bilježenje podataka

4.1.3. Statistička obrada i vizualizacija izmjerenih podataka

Nakon završetka postupaka monitoringa ionizirajućeg zračenja provedena je statistička obrada podataka s ciljem analize prikupljenih vrijednosti i identificiranja trendova. Obrada podataka uključivala je izračun ključnih statističkih pokazatelja, usporedbu pokazatelja između različitih lokacija i vremenski period te vizualizaciju rezultata u obliku tablica i grafikona.

Za svaku izmjerenu varijablu iz dnevnih podataka (prikupljenih kroz pet mjernih intervala dnevno) izračunata je srednja vrijednost za pojedini dan. Ove prosječne dnevne vrijednosti služile su kao temelj za danju analizu i vizualizaciju podataka. Time su se smanjili utjecaji kratkotrajnih varijacija, a omogućena je jasnija interpretacija dugoročnih trendova.

Dodatno su za svaki kalendarski mjesec izračunate sljedeće statističke mjere:

- Srednja vrijednost – prikazuje prosječnu razinu ionizirajućeg zračenja i meteoroloških podataka.
- Maksimalna vrijednost – identificira najvišu zabilježenu koncentraciju zračenja u analiziranom razdoblju.
- Minimalna vrijednost – određuje najnižu izmjerenu vrijednost.
- Raspon vrijednosti – prikazuje razliku između maksimalne i minimalne vrijednosti.

Za lakšu interpretaciju rezultata izrađeni su sljedeći grafički prikazi:

- Linijski grafikoni – prikaz promjene koncentracije zračenja kroz vrijeme.
- Raspršeni grafikoni - prikaz korelacije između koncentracije ionizirajućeg zračenja i okolišnih parametara, poput temperature i vlage.
- Kružni dijagram – prikazuje zastupljenost zračenja za određeni mjesec.
- Usporedni dijagrami – analiza razine ionizirajućeg zračenja i radona.

Dobiveni podaci omogućili su usporedbu izmjerenih vrijednosti između različitih lokacija, čime su uočene značajne razlike ovisno o položaju i namjeni prostorije. Primjerice, prostorije s manjom ventilacijom i većom količinom građevinskog materijala pokazivale su više vrijednosti ionizirajućeg zračenja. Također, je analiziran i utjecaj okolišnih čimbenika poput temperature, vlage i tlaka zraka na izmjerene koncentracije zračenja. Uočeno je da su vrijednosti zračenja bile više u prostorijama s povišenom temperaturom i manjom izmjenom zraka, dok su se u prostorijama s nižim temperaturama i većom ventilacijom koncentracije snižavale.

4. 2. Monitoring radona

Monitoring radona provodio se tijekom sedam dana na četiri različitim mjernih točaka uz primjenu uređaja Airthings Corentium Pro (*Slika 10.*). Mjerni podaci bilježeni su putem mobilne aplikacije Airthings (*Slika 11.*), gdje su pohranjivani u obliku tablica i grafikona radi jednostavnije vizualizacije i analize. Cilj ovog mjerenja bio je utvrditi razine koncentracije radona u zraku na odabranoj lokaciji i procijeniti potencijalni rizik za zdravlje korisnika objekta.



Slika 10. - Airthings Corentium Pro

Mjerenja su provedena na lokaciji u Strahonincu, u blizini Čakovca. Na ovoj lokaciji definirane su četiri mjerne točke pri čemu su uzorci prikupljeni u različitim vremenskim intervalima kako bi se stekla šira slika o varijacijama u razinama zračenja. Obrada podataka obuhvaćala je i statističku analizu radi identifikacije mogućih odstupanja i uočavanja potencijalnih izvora radonskog zračenja.



Slika 11. - Mobilna aplikacije Airthings [28]

4.2.1. Provedba mjerenja

Za mjerenje koncentracije radona u zraku korišten je mjerni instrument Airthings Corentium Pro, koji je specijaliziran za dugoročno praćenje razine radona u zatvorenim prostorijama. Uređaj omogućava preciznu detekciju i praćenje koncentracija radona.

Podaci o koncentraciji radona bilježeni su putem mobilne aplikacije Airthings koja omogućava jednostavnu pohranu, pregled i analizu podataka u obliku tablica i grafikona. Takav pristup omogućuje jednostavnu vizualizaciju i interpretaciju rezultata što je ključno za razumijevanje distribucije radona u različitim prostorima.

Mjerenja su provedena na području Strahoninca, u blizini grada Čakovca. Istraživačko mjerenje je obuhvatilo jedno područje na kojem su odabrane četiri mjerne točke, kako bi se dobila što preciznija razina radona u različitim prostorijama odnosno uvjetima okoliša. Mjerenje je provedeno u dvije faze tijekom hladnijeg i toplijeg razdoblja. Prva faza mjerenja odvijala se u hladnijim vremenskim uvjetima, od sredine ožujaka do početka travnja. Druga faza provedena je tijekom toplijeg razdoblja, od sredine svibnja do početka lipnja. Mjerenje je provedeno na ovaj način kako bi se uočila razlika koncentracije radona između hladnijeg i toplijeg vremena, s obzirom da temperatura i uvjeti okoliša mogu utjecati na količinu radona u zraku.

Mjerenja su obuhvatila sljedeće lokacije:

1. Donji kat kuće – područje koje se najčešće koristi za dnevne aktivnosti i koje može imati višu koncentraciju radona zbog blizine tla.
2. Gornji kat kuće – prostor gdje se nalaze spavaće sobe te može imati različitu koncentraciju radona zbog razlike u mikroklimi prostorija.
3. Podrum – područje koje može imati povećane razine prirodnog zračenja uslijed prisutnosti radona.
4. Garaža – prostor u kojem se nalaze različiti građevinski materijali te goriva i maziva, koja mogu utjecati na razinu zračenja.

Mjerenja su provedena u različitim vremenskim uvjetima, uključujući suho i vlažno vrijeme kako bi se utvrdilo postoji li povezanost s vrijednostima koncentracije radona.

4.2.2. Parametri koji su promatrani tijekom mjerenja

Tijekom mjerenja koncentracije radona u zraku, paralelno su prikupljani i meteorološki podaci, s ciljem analize njihovog mogućeg utjecaja na varijacije u koncentracijama radona. Praćeni su sljedeći meteorološki podaci:

- Temperatura zraka (°C),
- Relativna vlažnost zraka (%),
- Atmosferski tlak (hPa).

Vanjski meteorološki parametri prikupljani su korištenjem aplikacije AccuWeather, koja pruža ažurirane podatke o vremenskim uvjetima i kvaliteti zraka. Osim vanjskih parametara bilježeni su i temperatura, relativna vlažnost i atmosferski tlak unutar prostorije u kojima su provedena mjerenja radona uz pomoć uređaja Airthings Corentium Pro, koji automatski registrira i pohranjuje ove podatke.

Mjerenja su provedena u četiri odabrane prostorije za koje se pretpostavljalo da će pokazivati razlike u koncentraciji radona. U svakoj prostoriji, mjerenja su provedena tijekom kontinuiranog razdoblja od sedam dana, bez prekida, kako bi se dobili reprezentativni podaci o varijacijama radona u različitim uvjetima.

Mjerenja su provedena u sljedećim vremenskim intervalima:

1. Gornji kat

- Prvo mjerenje – od 06. ožujka 2025. u 00:41 h do 12. ožujka 2025. u 23:41 h
- Drugo mjerenje – od 13. svibnja 2025 u 00:17 h do 19. svibnja 2025 u 23:17 h

2. Donji kat

- Prvo mjerenje – od 15. ožujka 2025. u 00:03 h do 23. ožujka 2025. u 23:03 h
- Drugo mjerenje – od 21. svibnja 2025 u 00:31 h do 27. svibnja 2025 u 23:31 h

3. Podrum

- Prvo mjerenje – od 25. ožujka 2025. u 00. 40 h do 31. ožujka 2025. u 23:40 h
- Drugo mjerenje – od 29. svibnja 2025 u 00:57 h do 04. lipnja 2025 u 23:57 h

4. Garaža

- Prvo mjerenje – od 02. travnja 2025. u 00.17 h do 08. travnja 2025. u 23:17 h
- Drugo mjerenje – od 06. lipnja 2025 u 00:16 h do 12. lipnja 2025 u 23:16 h

Nakon završenog mjerenja podaci su preuzeti iz aplikacije Airthings i preneseni u Microsoft Excel (*Slika 12.*), kako bi se omogućila lakša analiza i statistička obrada rezultata.

Lokacija	Donji kat							
Datum i vrijeme	Temperatura (F)	Tlak zraka (inHg)	Vlaga (rH)	Koncentracija radona (pCi/L)	Temperatura (C)	Tlak zraka (hPa)	Vlaga (rH)	Koncentracija radona (Bq/m ³)
2025-03-14, 1:03 p.m. GMT+1	73	29,0239	53,5	1,7	23	983	53,5	62,9
2025-03-14, 2:03 p.m. GMT+1	74,1	29,0493	53	3,7	23	984	53	136,9
2025-03-14, 3:03 p.m. GMT+1	73,8	29,0528	53	3,4	23	984	53	125,8
2025-03-14, 4:03 p.m. GMT+1	74,5	29,0498	52	1,9	24	984	52	70,3
2025-03-14, 5:03 p.m. GMT+1	74,1	29,0622	52,5	1,5	23	984	52,5	55,5
2025-03-14, 6:03 p.m. GMT+1	75,2	29,0794	53	2,9	24	985	53	107,3
2025-03-14, 7:03 p.m. GMT+1	74,5	29,0959	53,5	7,4	24	985	53,5	273,8
2025-03-14, 8:03 p.m. GMT+1	74,1	29,1248	54	6,7	23	986	54	247,9
2025-03-14, 9:03 p.m. GMT+1	74,1	29,1502	54,5	4,9	23	987	54,5	181,3
2025-03-14, 10:03 p.m. GMT+1	75,2	29,1845	54,5	7,7	24	988	54,5	284,9
2025-03-14, 11:03 p.m. GMT+1	75,9	29,1999	54	10,5	24	989	54	388,5
2025-03-15, 12:03 a.m. GMT+1	74,8	29,2064	54	10,6	24	989	54	392,2
2025-03-15, 1:03 a.m. GMT+1	73,8	29,2099	54	7,9	23	989	54	292,3
2025-03-15, 2:03 a.m. GMT+1	72,7	29,2182	53,5	12	23	989	53,5	444,0
2025-03-15, 3:03 a.m. GMT+1	72	29,2382	53	9,7	22	990	53	358,9
2025-03-15, 4:03 a.m. GMT+1	71,2	29,2323	53	11,3	22	990	53	418,1
2025-03-15, 5:03 a.m. GMT+1	70,5	29,2229	52,5	12,3	21	990	52,5	455,1
2025-03-15, 6:03 a.m. GMT+1	70,2	29,2483	52,5	10,1	21	990	52,5	373,7
2025-03-15, 7:03 a.m. GMT+1	69,8	29,2642	52	11,4	21	991	52	421,8
2025-03-15, 8:03 a.m. GMT+1	69,8	29,2908	52	17,1	21	992	52	632,7
2025-03-15, 9:03 a.m. GMT+1	73	29,3003	51	12,3	23	992	51	455,1
2025-03-15, 10:03 a.m. GMT+1	73,8	29,318	51,5	13	23	993	51,5	481,0
2025-03-15, 11:03 a.m. GMT+1	74,8	29,3298	50	10	24	993	50	370,0
2025-03-15, 12:03 p.m. GMT+1	74,5	29,3351	49,5	5,6	24	993	49,5	207,2
2025-03-15, 1:03 p.m. GMT+1	73,8	29,3422	50	5,6	23	994	50	207,2
2025-03-15, 2:03 p.m. GMT+1	73	29,3422	50,5	5,8	23	994	50,5	214,6
2025-03-15, 3:03 p.m. GMT+1	75,2	29,3416	49,5	7,5	24	994	49,5	277,5
2025-03-15, 4:03 p.m. GMT+1	74,8	29,3345	49	7,3	24	993	49	270,1
2025-03-15, 5:03 p.m. GMT+1	73,8	29,3345	49,5	5,4	23	993	49,5	199,8
2025-03-15, 6:03 p.m. GMT+1	72,7	29,3416	49,5	4,5	23	994	49,5	166,5
2025-03-15, 7:03 p.m. GMT+1	73,4	29,357	49,5	6,7	23	994	49,5	247,9
2025-03-15, 8:03 p.m. GMT+1	75,6	29,3776	49,5	6,6	24	995	49,5	244,2
2025-03-15, 9:03 p.m. GMT+1	74,8	29,3812	50	6,4	24	995	50	236,8
2025-03-15, 10:03 p.m. GMT+1	73,8	29,3835	50	6,6	23	995	50	244,2
2025-03-15, 11:03 p.m. GMT+1	74,8	29,3829	50	6,8	24	995	50	251,6
2025-03-16, 12:03 a.m. GMT+1	75,2	29,3818	50	6,4	24	995	50	236,8

Slika 12. – Prikaz tablice u excelu koja se koristila za bilježenje i preračunavanje podataka

Budući da je uređaj Airthings Corentium Pro mjerene podatke pohranjivao u sljedećim mjernim jedinicama: temperatura (°F), tlak (inHg) i koncentracija radona (pCi/L), izvršena je pretvorba u sljedeće standardizirane mjerne jedinice:

- Temperatura – pretvorena u °C
- Atmosferski tlak – pretvoren u hPa
- Koncentracija radona – pretvorena u Bq/m³

Ova analiza omogućila je detaljan uvid u varijabilnost koncentracije radona u različitim prostorijama te njezinu povezanost s mikroklimatskim uvjetima i vanjskim meteorološkim parametrima.

4.2.3. Statistička obrada i vizualizacija izmjerenih podataka

Nakon završetka postupaka monitoringa koncentracije radona provedena je statistička obrada podataka kako bi se analizirali dobiveni rezultati i identificirali trendovi unutar različitih prostorija. Aplikacija Airthings automatski je generirala grafičke prikaze podataka za sedmodnevno razdoblje te je omogućila uvid u varijaciju koncentracije radona tijekom vremena. Za precizniju analizu i detaljniji odnos između parametara, podaci su dodatno obrađeni u Microsoft Excelu.

Mjerenja su se provodila neprekidno tijekom sedam dana za svaku prostoriju, što je omogućilo prikupljanje detaljnih podataka o varijacijama koncentracije radona tijekom dana i noći. Za svaku prostoriju izračunate su sljedeće vrijednosti:

- Srednja dnevna vrijednost – prosjek svih mjerenja unutar jednog dana.
- Srednja vrijednost za prostoriju – ukupni prosjek svih izmjerenih vrijednosti tijekom sedmodnevnog razdoblja.
- Maksimalna izmjerena vrijednost – najviša koncentracija radona zabilježena tijekom mjerenja.
- Minimalna izmjerena vrijednost – najniža zabilježena koncentracija tijekom mjerenja.

Ove vrijednosti omogućile su bolju usporedbu različitih prostorija te su korištene za vizualizaciju rezultata.

Za lakše razumijevanje dobivenih rezultata, izrađeni su sljedeći grafički prikazi:

- Linijski grafikoni – prikaz promjene koncentracije radona kroz vrijeme u svakoj prostoriji.
- Raspršeni dijagrami – prikaz korelacije između koncentracije radona i okolišnih parametara, poput temperature i vlage.
- Kružni dijagrami - prikazuju zastupljenost radona u određenim danima.
- Usporedni dijagrami – usporedba koncentracije ionizirajućeg zračenja i radona između pojedinih prostorija.

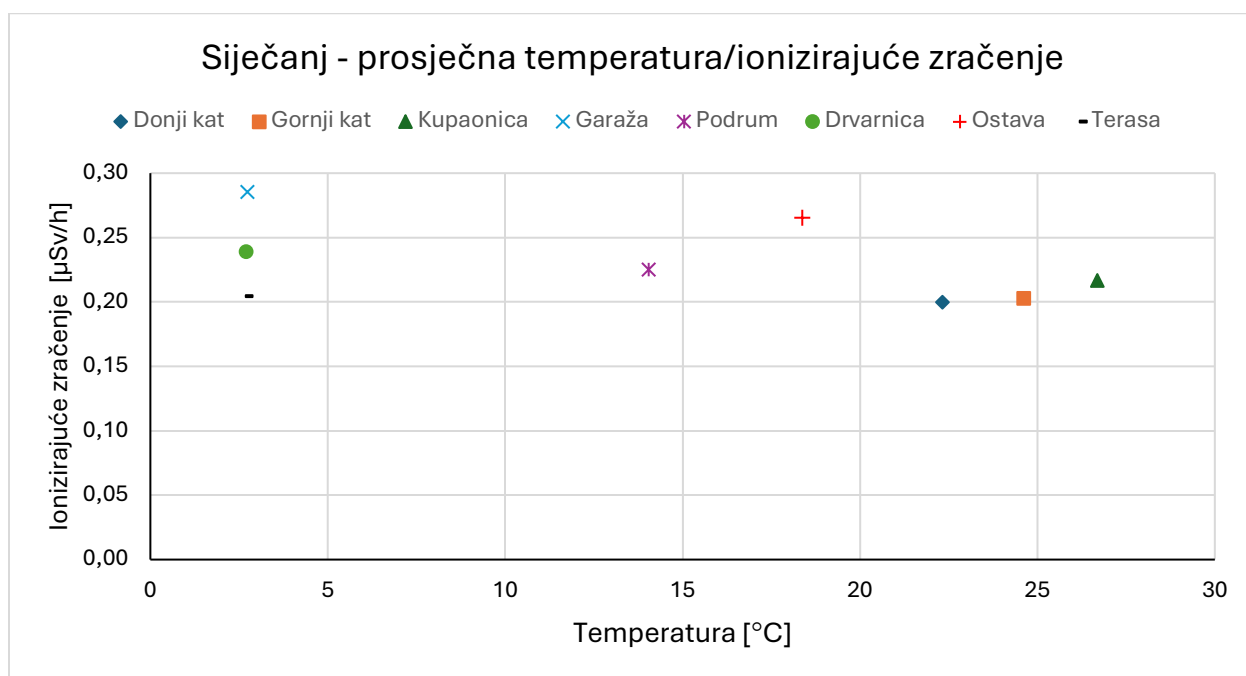
Dodatno je analiziran utjecaj okolišnih faktora, poput temperature, vlage i tlaka zraka na koncentraciju radona. Rezultati su pokazali da su prostorije s višim temperaturama, poput gornjeg kata i donjeg kata imale povišene vrijednosti radona, dok su prostorije s nižim temperaturama i s većom ventilacijom poput podruma pokazale niže koncentracije radona (u trenucima mjerenja bilo je prisutno cjelodnevno provjetravanje i dobar protok zraka) .

5. REZULTATI

5. 1. Ionizirajuće zračenje

Tijekom četveromjesečnog razdoblja provedena su mjerenja ionizirajućeg zračenja na osam različitih točaka u Strahonincu. Mjerenja su obuhvatila unutarnje prostorije (podrum, kupaonica, ostava...) i vanjske objekte (terasa, drvarnica...). Uz zračenje bilježeni su i vremenski uvjeti kao npr. temperatura i vlaga. Analizom podataka dobiveni su sljedeći rezultati:

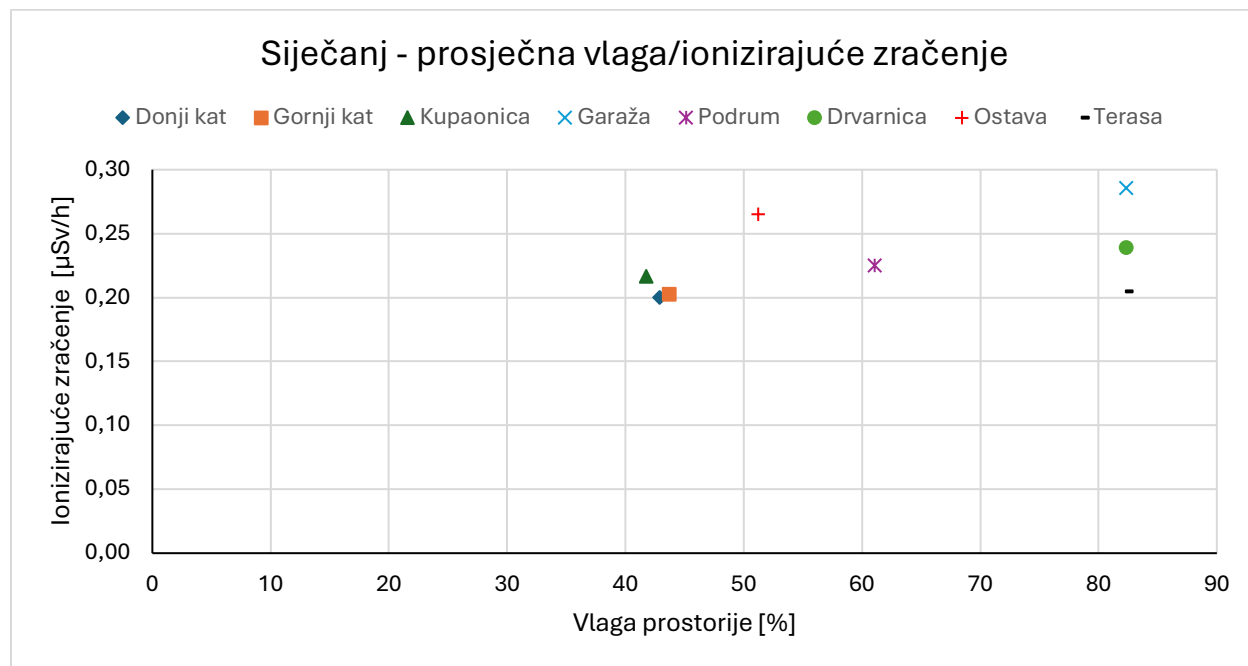
- SIJEČANJ 2025.



Grafikon 1. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za siječanj 2025.

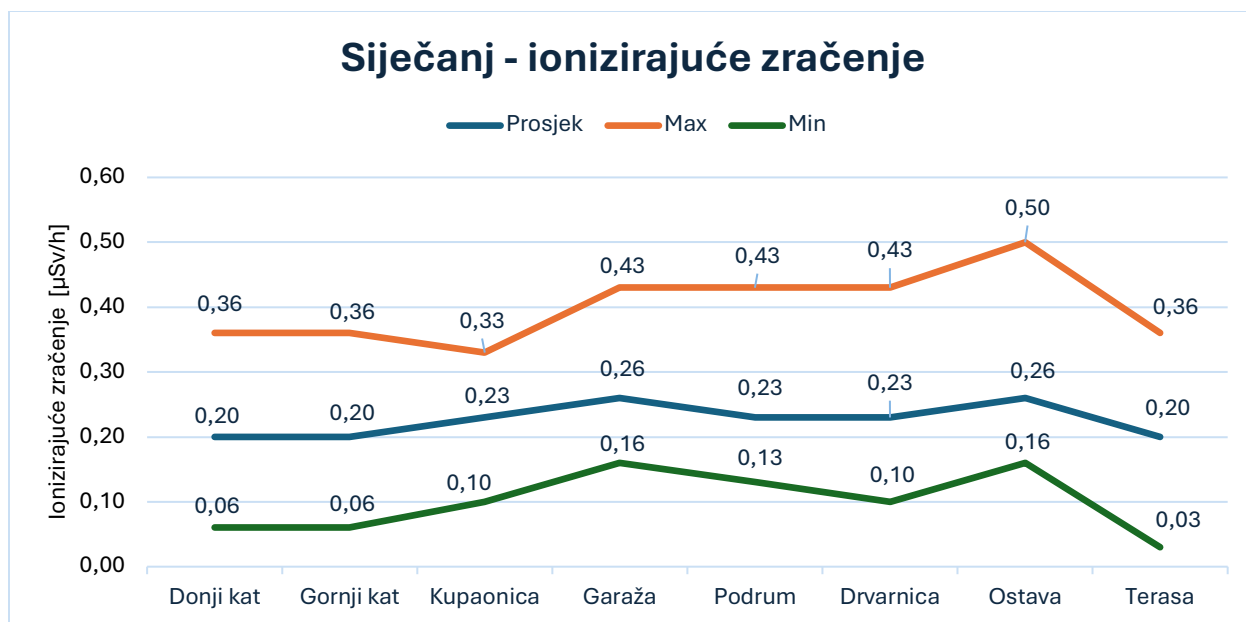
Grafikon 1. prikazuje povezanost prosječne temperature prostorije i razine izmjerene zračenja. Tijekom siječnja zabilježen je najveći raspon temperatura među prostorijama, od samo 3 °C u garaži, drvarnici i na terasi, do 27 °C u kupaonici. Ova velika temperatura razlika održava sezonski utjecaj i razlike u grijanju i ventilaciji prostora. Unatoč temperaturnim razlikama, vrijednosti ionizirajućeg zračenja bile su relativno ujednačene, većinom su se kretale između 0,20 μSv/h i 0,26 μSv/h. Najviše vrijednosti zračenja zabilježene su u garaži i ostavi, prostorima koji su zatvoreni, hladni i bez adekvatne ventilacije. To upućuje na nakupljanje ionizirajućeg zračenja, radona i

drugih prirodnih zračenja, koji se akumuliraju u prostoru tijekom zimskih mjeseci. Donji i gornji kat te kupaonica su toplije prostorije pokazuju niže, ali ponekad i veće razine zračenja, što znači da i grijanje ne sprječava akumuliranje zračenja bez odgovarajuće izmjene zraka (provjeravanja).



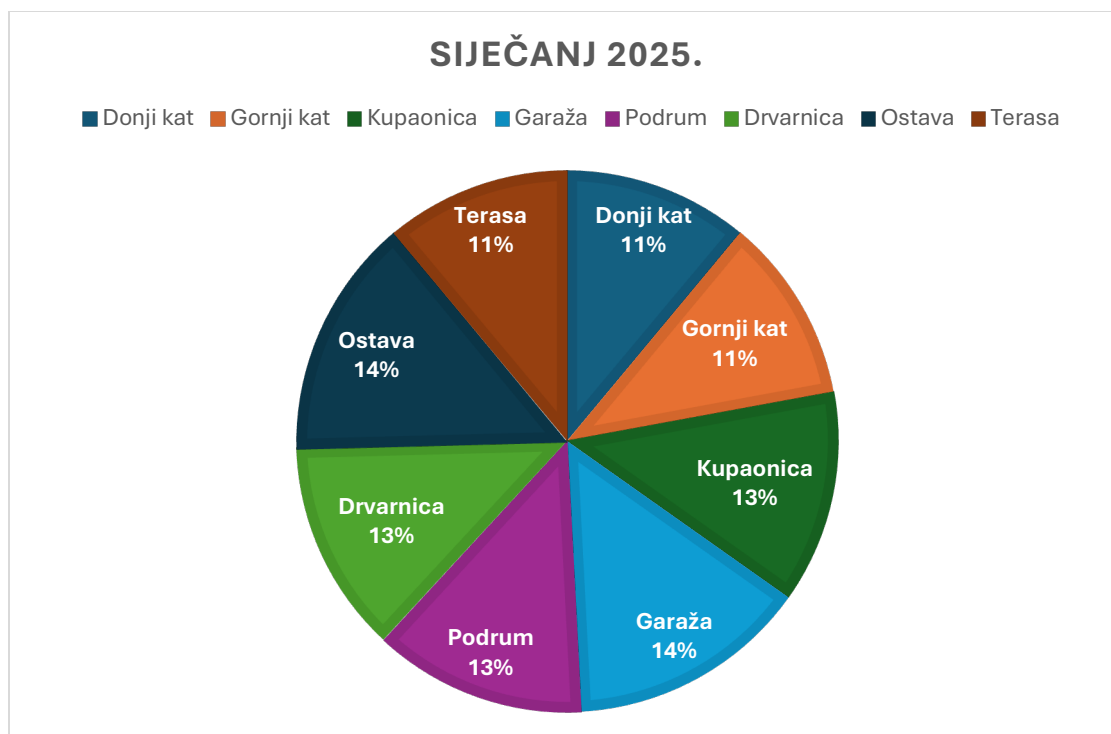
Grafikon 2. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za siječanj 2025.

Grafikon 2. prikazuje odnos između relativne vlažnosti zraka i razine ionizirajućeg zračenja. U siječnju su u nekim prostorijama zabilježene vrlo visoke razine vlage, osobito u garaži, drvarnici i terasi (82 %). Istovremeno, u tim prostorijama izmjerene su i najveće razine zračenja 0,26 $\mu\text{Sv/h}$ u garaži, 0,23 $\mu\text{Sv/h}$ u drvarnici, dok terasa ima nešto nižu vrijednost od 0,20 $\mu\text{Sv/h}$ (zbog otvorenog prostora). Ostava (51 % vlage) također pokazuje visoko zračenje (0,26 $\mu\text{Sv/h}$). S druge strane, prostorije s umjerenom vlagom poput donjeg i gornjeg kata (43 % i 44 %) bilježe niže zračenje (0,20 $\mu\text{Sv/h}$). Ovi rezultati upućuju da povećana vlažnost zraka može doprinijeti zadržavanju radioaktivnih čestica u prostoru, osobito u kombinaciji s niskom temperaturom i lošom ventilacijom [29].



Grafikon 3. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za siječanj 2025.

Na *Grafikonu 3.* prikazane su statističke vrijednosti minimalne, srednje i maksimalne koncentracije zračenja po prostorijama. Najveća maksimalna vrijednost (0,50 $\mu\text{Sv/h}$) zabilježena je u ostavi, što ukazuje na visoku akumulaciju zračenja u zatvorenim prostorima. Prosječne vrijednosti su u rasponu 0,20 – 0,26 $\mu\text{Sv/h}$, s najvišim vrijednostima u kupaonici, garaži, podrumu i drvarnici. Najniža vrijednost (0,03 $\mu\text{Sv/h}$) je zabilježena na terasi, što je očekivano zbog stalne izloženosti otvorenom zraku. Primjećuje se da su zatvorene, hladne i rjeđe korištene prostorije (garaža, ostava i podrum) podložne većoj akumulaciji ionizirajućeg zračenja [30].



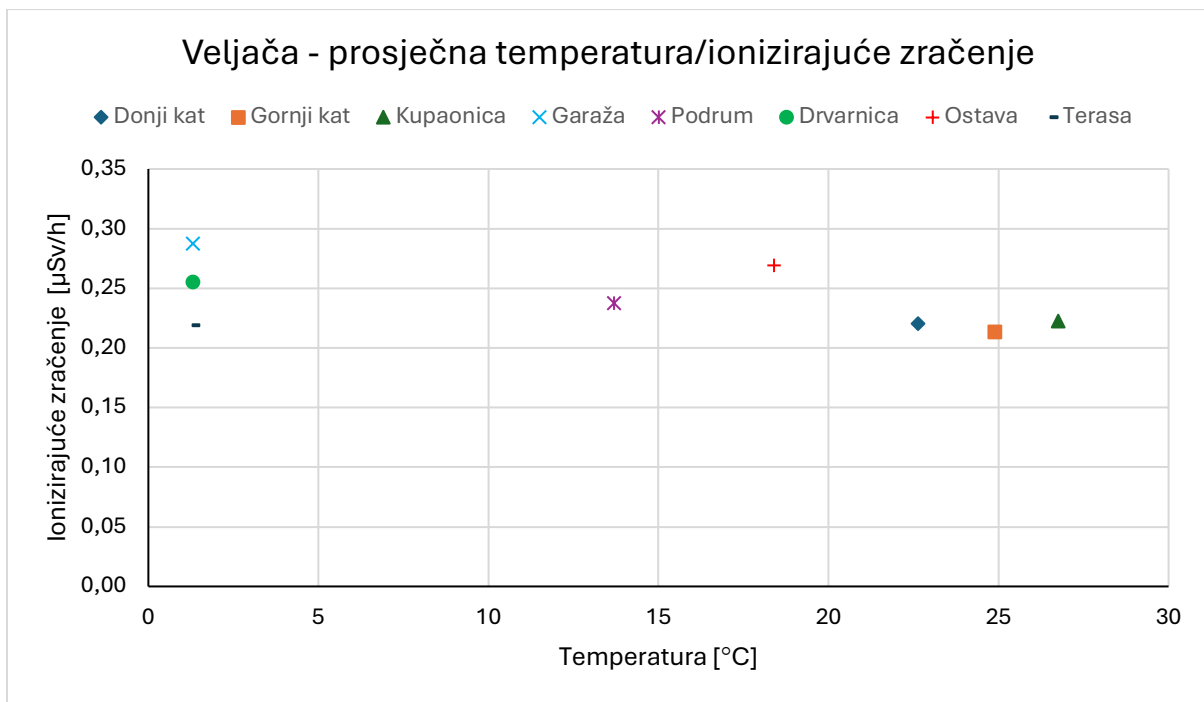
Grafikon 4. - Raspodjela ukupnog izmjereneog ionizirajućeg zračenja po prostorijama za siječanj 2025.

Kružni *Grafikon 4.* prikazuje udio izmjereneog ionizirajućeg zračenja u pojedinim prostorijama tijekom siječnja. Svaka sekcija predstavlja jedan dio ukupne izloženosti zračenju te su konkretne vrijednosti izražene u postocima. U siječnju, mjesecu s najnižim temperaturama i gotovo nikakvom prirodnom ventilacijom, kao npr. garaža i ostava bilježe najveći postotni udio ukupnog zračenja po 14 %, dok drvarnica i podrum slijede s 13 %. To su prostori bez stalnog boravka, često zatvoreni i smješteni u nižim dijelovima objekata, što pogoduje akumulaciji radona, plina koji prirodno prodire iz tla.

S druge strane, prostorije poput terase, donjeg i gornjeg kata bilježe najmanji udio zračenja (11 %), što potvrđuje da su redovito korištenje i dobra ventilacija ključni za smanjenje izloženosti [31].

- VELJAČA 2025.

Tijekom veljače nastavljeno je kontinuirano praćenje ionizirajućeg zračenja na istim mjernim točkama u sklopu stambenog objekta i izvan njega.

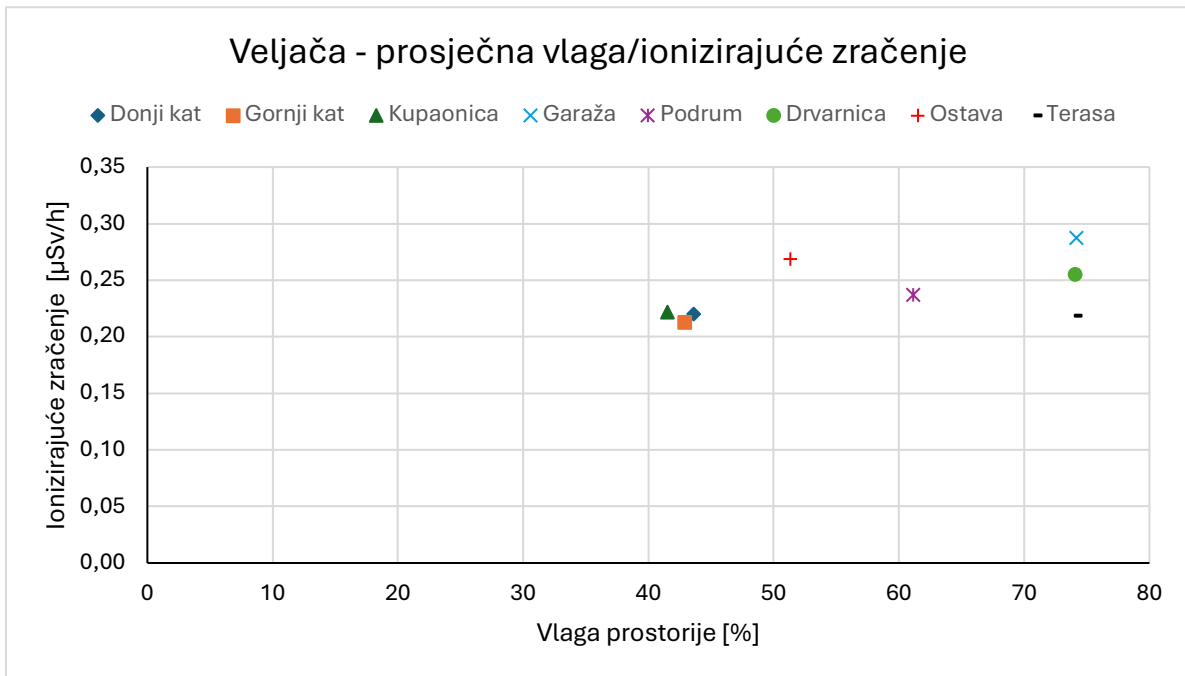


Grafikon 5. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za veljaču 2025.

Na *Grafikonu 5.* prikazan je odnos između prosječne temperature i intenziteta zračenja po prostorijama u veljači, gdje dolazi do blagog zatopljenja u dnevnim prostorijama (gornji i donji kat), no prostorije kao što su garaža, drvarnica i terasa i dalje bilježe izuzetno niske temperature od 1 °C. Temperatura u kupaonici ostaje visoka (27 °C), dok su gornji i donji kat stabilni na 23 °C i 25 °C.

Vrijednosti zračenja pokazuje da se stabilnost vrijednosti gotovo ne mijenjaju u odnosu na siječanj. Garaža i ostava ponovno imaju prosječno najveće izmjerene vrijednosti (0,26 μSv/h), što je i očekivano jer su to zatvoreni prostori bez stalnog boravka u njima, s mogućom prisutnošću građevinskog materijala koji emitira prirodno zračenje. Iako su temperature vrlo niske to ne dovodi do pada zračenja, naprotiv hladnoća i zadržavanje zraka mogu doprinijeti

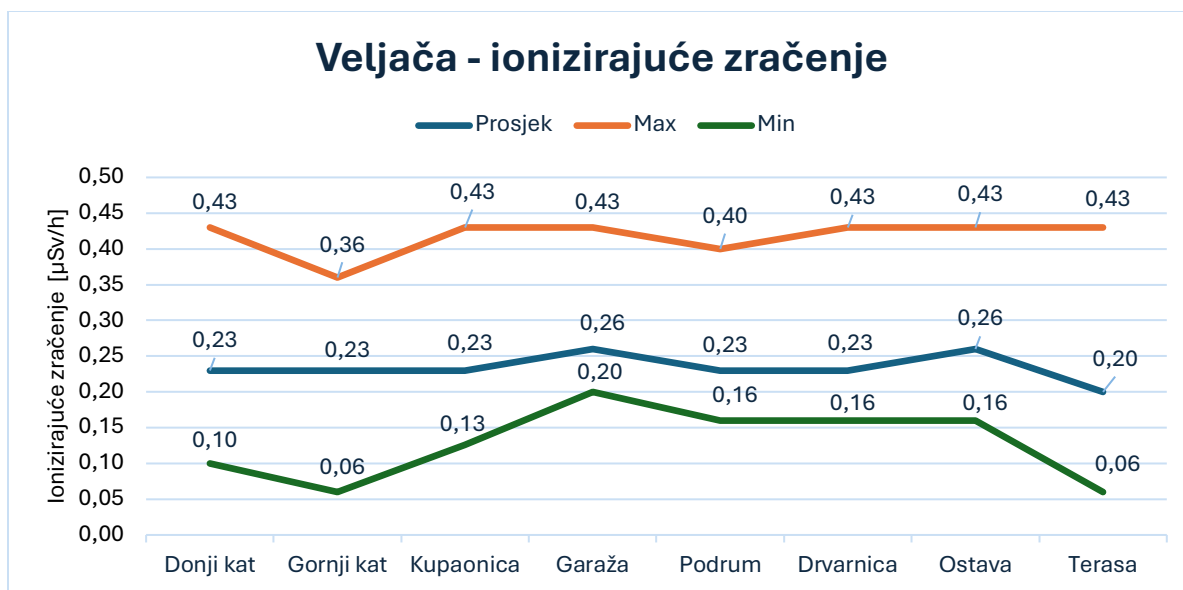
njegovoj akumulaciji. Terasa ima nisku temperaturu, ali niže zračenje (0,20 $\mu\text{Sv/h}$), što potvrđuje da otvoreni prostor sprječava zadržavanje radioaktivnih čestica.



Grafikon 6. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za veljaču 2025.

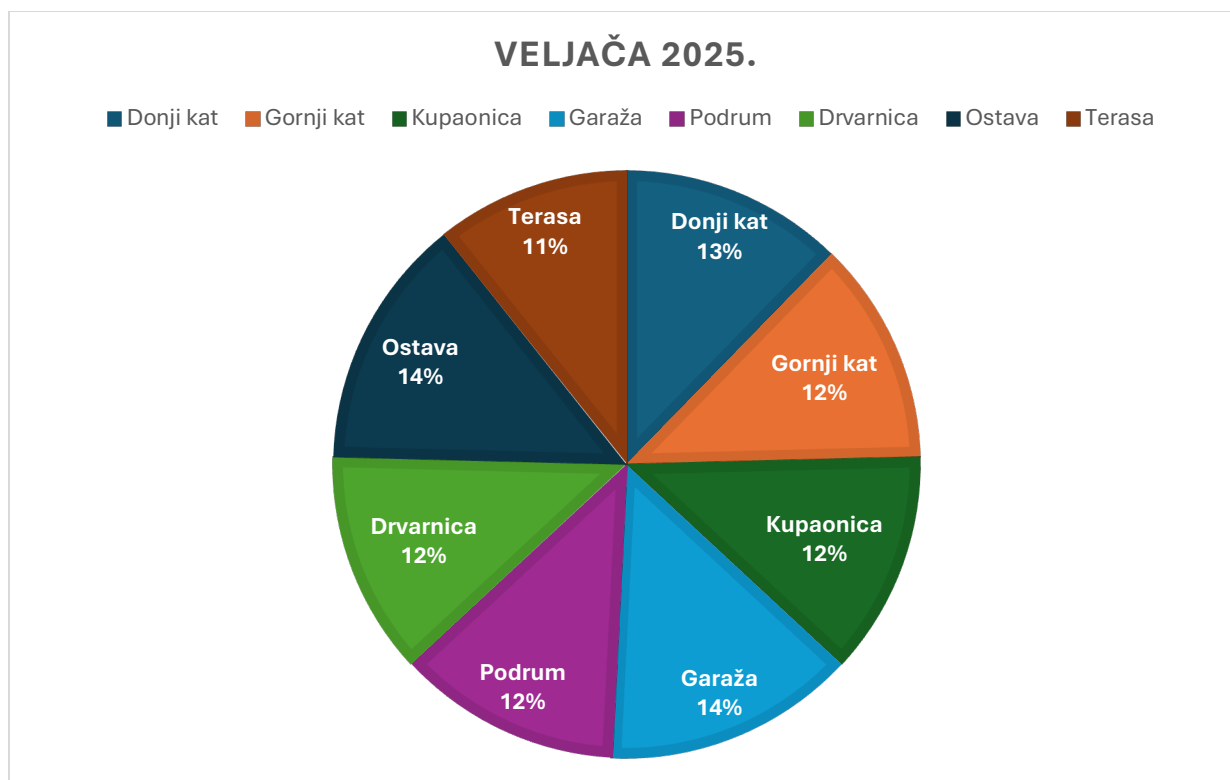
Grafikon 6. prikazuje odnos između relativne vlažnosti prostorija i razine zračenja. U veljači dolazi do blagog smanjenja vlage ranije u prethodno najvlažnijim prostorijama: garaža, drvarnica i terasa imaju vlažnost od 74 %, a zračenje ostaje na istim vrijednostima (0,26 $\mu\text{Sv/h}$ u zatvorenim prostorima i 0,20 $\mu\text{Sv/h}$ na terasi). Vlažnost u ostavi i podrumu ostaje stabilna, a zračenje se ne mijenja.

Ove podatke možemo tumačiti kao potvrdu da vlažnost utječe na razinu zračenja, ali ključni faktor ostaje zatvorenost prostora. U otvorenim prostorima vlaga se raspršuje, a u zatvorenim prostorima može pospješiti zadržavanje ionizirajućeg zračenja i njegovih produkata [29].



Grafikon 7. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za veljaču 2025.

U veljači se na *Grafikonu 7.* vidi lagano smanjenje zračenja, ali su još uvijek prisutne visoke vrijednosti. Maksimalne vrijednosti su još uvijek 0,46 $\mu\text{Sv/h}$, ali se razlike među prostorijama blago smanjuju. Prosječne vrijednosti ostaju gotovo iste kao i u siječnju oko 0,23 – 0,26 $\mu\text{Sv/h}$, a terasa ponovno ima najnižu vrijednost od 0,20 $\mu\text{Sv/h}$. Najniže zabilježene vrijednosti (min) padaju ispod 0,10 $\mu\text{Sv/h}$, što upućuje na kratkotrajna poboljšanja mikroklike u nekim prostorijama. Iako nema velikih oscilacija, vidi se početak sezonskog opadanja zračenja.



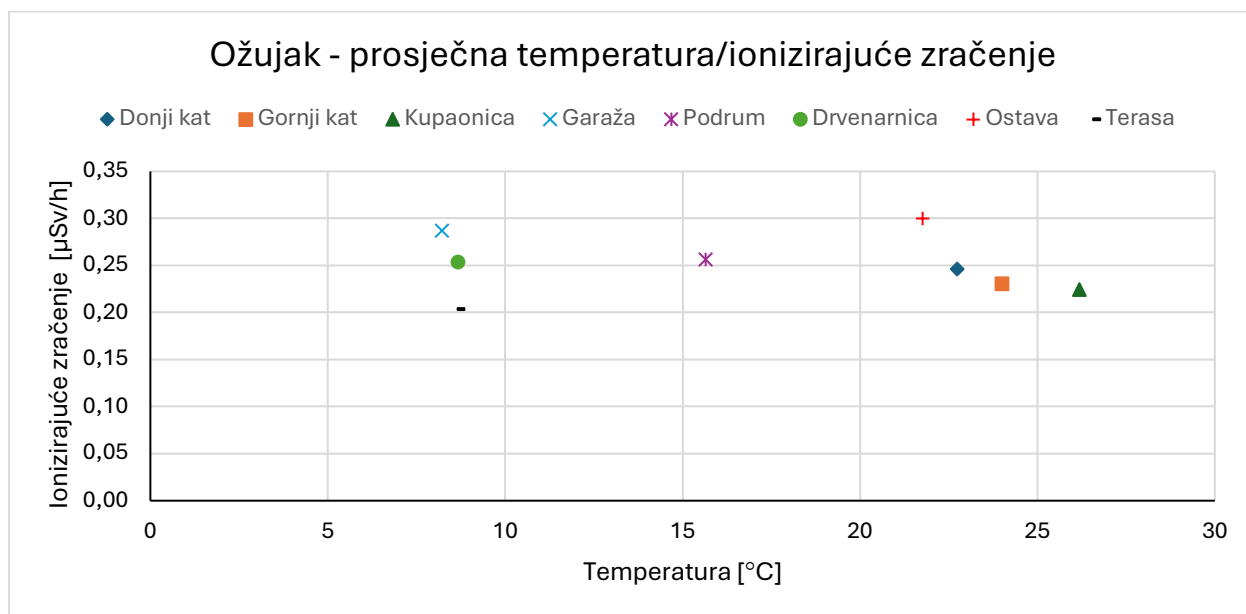
Grafikon 8. - Raspodjela ukupnog izmjereno ionizirajućeg zračenja po prostorijama za veljaču 2025.

Kružni *Grafikon 8.* za veljaču prikazuje blago ujednačenu raspodjelu zračenja, ali garaža i ostava ostaju najopterećenije s 14 %. Donji kat blago raste na 13 %, što može ukazivati na privremeno zadržavanje zračenja uslijed slabije prozračnosti u noćnim satima, dok terasa ostaje najniža s 11 %.

Važno je napomenuti da dugotrajna izloženost povišenim vrijednostima ionizirajućeg zračenja i drugih vrsta zračenja, osobito u pomoćnim prostorijama koje nisu pod nadzorom, povećava rizik za razvoj raka pluća, osobito kod osoba koje puše ili osoba koje borave u takvim prostorijama dulje vrijeme [31].

- OŽUJAK 2025.

Tijekom ožujka nastavljena su mjerenja ionizirajućeg zračenja na istim lokacijama, a rezultati su pokazali blagi pad vrijednosti u odnosu na prva dva mjeseca. Iako su podaci raspodjele ostali slični, ukupne vrijednosti zračenja bile su u prosjeku blago snižene.

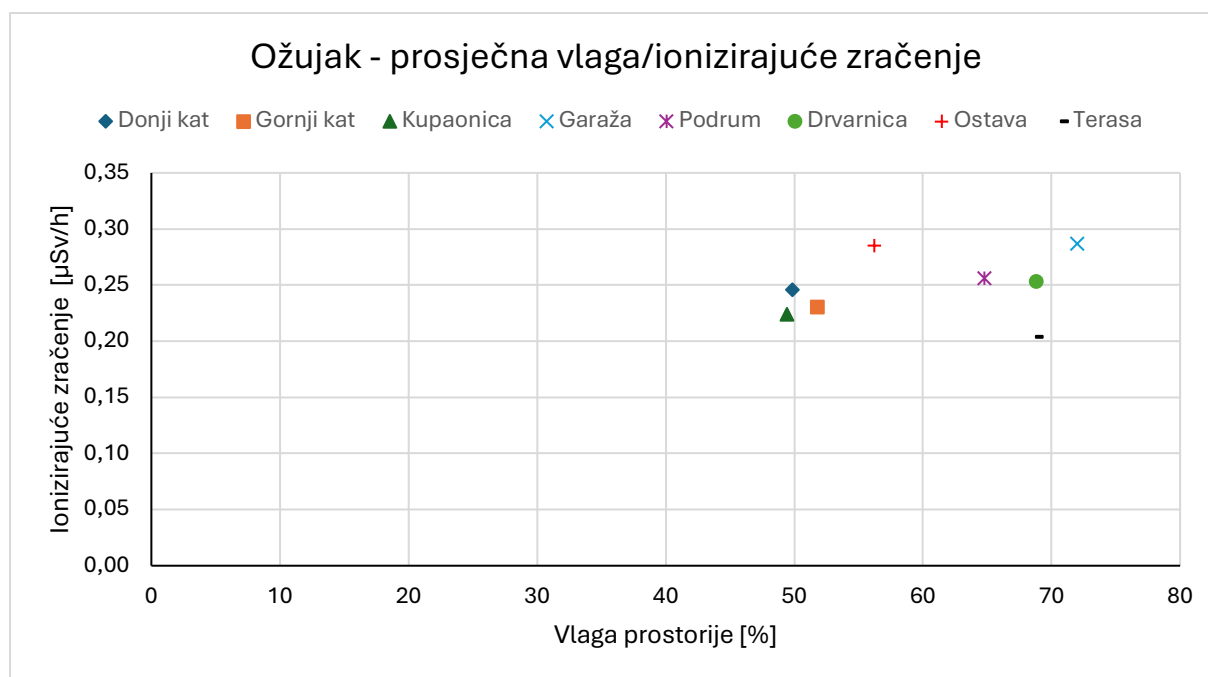


Grafikon 9. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za ožujak 2025.

Na *Grafikonu 9.* odnosa temperature i zračenja u ožujku dolazi do osjetnog porasta temperature u ranije hladnijim prostorijama: garaži (8 °C), podrumu (16 °C), drvarnici i terasi (9 °C), što ukazuje na dolazak proljetnih uvjeta. Grijane prostorije ostaju stabilne: kupaonica (26 °C) te gornji i donji kat (24 °C i 23 °C) .

Ovaj temperaturni porast, u prethodno hladnim prostorijama nije doveo do smanjenja razine zračenja. Naprotiv, vrijednosti zračenja ostaju ujednačene u većini prostorija (0,23 $\mu\text{Sv/h}$), a u ostavi čak dolazi do blagog povećanja na 0,30 $\mu\text{Sv/h}$, što je najviša pojedinačna vrijednost u ovom mjesecu. Ovaj podatak ukazuje da iako je temperatura porasla, zračenje nije proporcionalno opalo, što potvrđuje da sama toplina ne utječe izravno na smanjenje razine ionizirajućeg zračenja. U prostorijama poput ostave, koje su slabo prozračne, rijetko korištene i zatvorenog tipa, zračenje se i dalje može akumulirati, osobito ionizirajuće zračenje i radon, koji se bez pravilne ventilacije ili prozračivanja zadržavaju u prostorima.

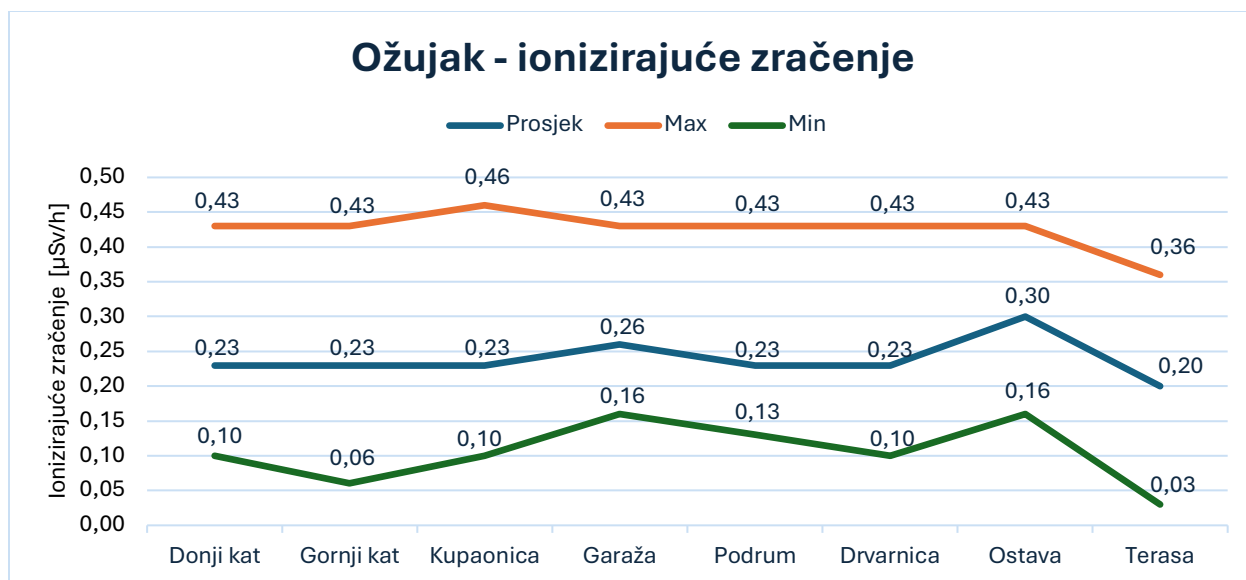
Ožujak predstavlja prijelazno razdoblje, iako su temperaturni uvjeti znatno poboljšani i prostori bilježe veće temperature, učinci slabe ventilacije i zatvorenosti prostora još uvijek su prisutni i mogu održavati ili čak privremeno povećati razine zračenja, ako se prostorije ne prozračuju redovito [32].



Grafikon 10. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za ožujak 2025.

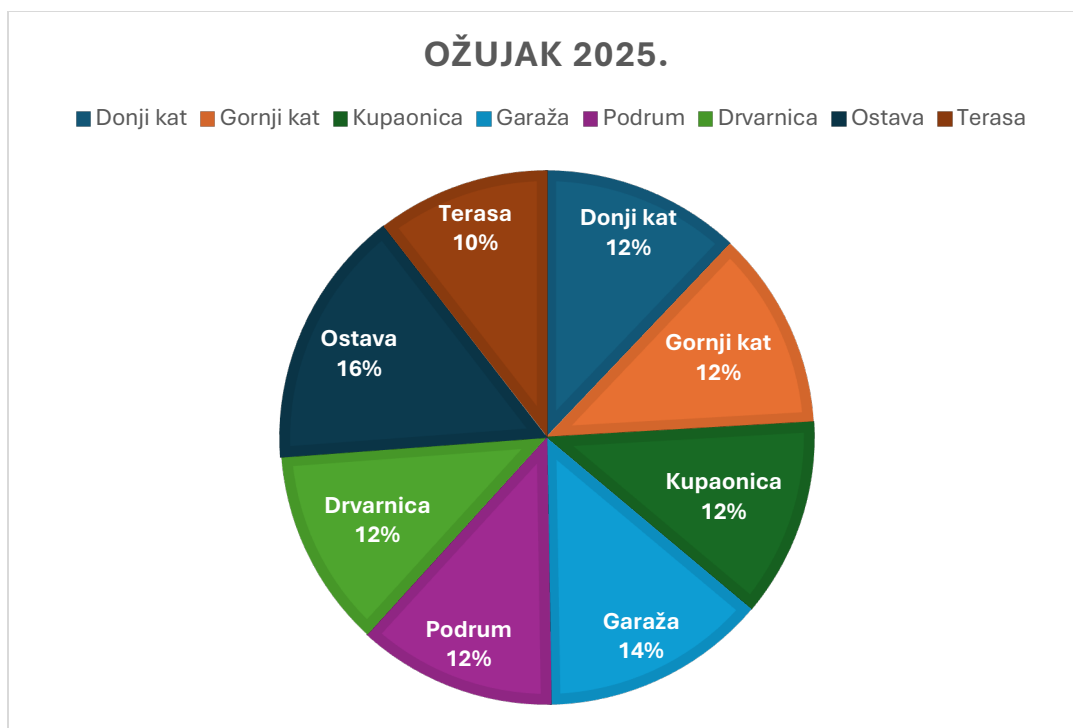
Grafikon 10. u ožujku prikazuje da dolazi do pada vlage u svim prostorijama. Vlažnost pada u garaži (72 %), drvarnici (69 %) i podrumu (65 %), dok redovito korištene prostorije imaju vlagu između 49 % - 52 %. U ovom mjesecu zračenje ostaje stabilno u svim prostorijama, osim u ostavi, gdje dolazi do izraženog skoka zračenja na 0,30 $\mu\text{Sv/h}$, iako vlaga nije ekstremna (56 %).

Ova pojava pokazuje da vlaga nije jedini uzročnik zračenja, već da su dugotrajna zatvorenost, nekorištenost prostora i eventualne emisije iz podzemlja ili građevinskog materijala ključni čimbenici [29]. Kod prelaska iz zime u proljeće, moguće su promjene tlaka i temperature koje dovode do oslobođenja dodatnih količina zračenja [32].



Grafikon 11. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za ožujak 2025.

Na *Grafikonu 11.* je u ožujku vidljivo da dolazi do stabilizacije, no ostava i dalje ima visoko zračenje. Maksimalne vrijednosti u ožujku ostaju visoke (0,46 $\mu\text{Sv/h}$), no nisu više od veljače. Ostava prikazuje izraženo povišenu prosječnu vrijednost (0,30 $\mu\text{Sv/h}$), dok se druge prostorije stabiliziraju na 0,23 $\mu\text{Sv/h}$. Terasa bilježi konstantno niske srednje vrijednosti (0,20 $\mu\text{Sv/h}$), potvrđujući da je otvoreni prostor najmanje rizičan i akumulira najmanje zračenja. Ovaj mjesec pokazuje da unatoč boljoj ventilaciji i višim temperaturama, zračenje u zatvorenim prostorima zračenje može ostati povišeno bez poduzimanja dodatnih mjera opreza (npr. provjetravanja).



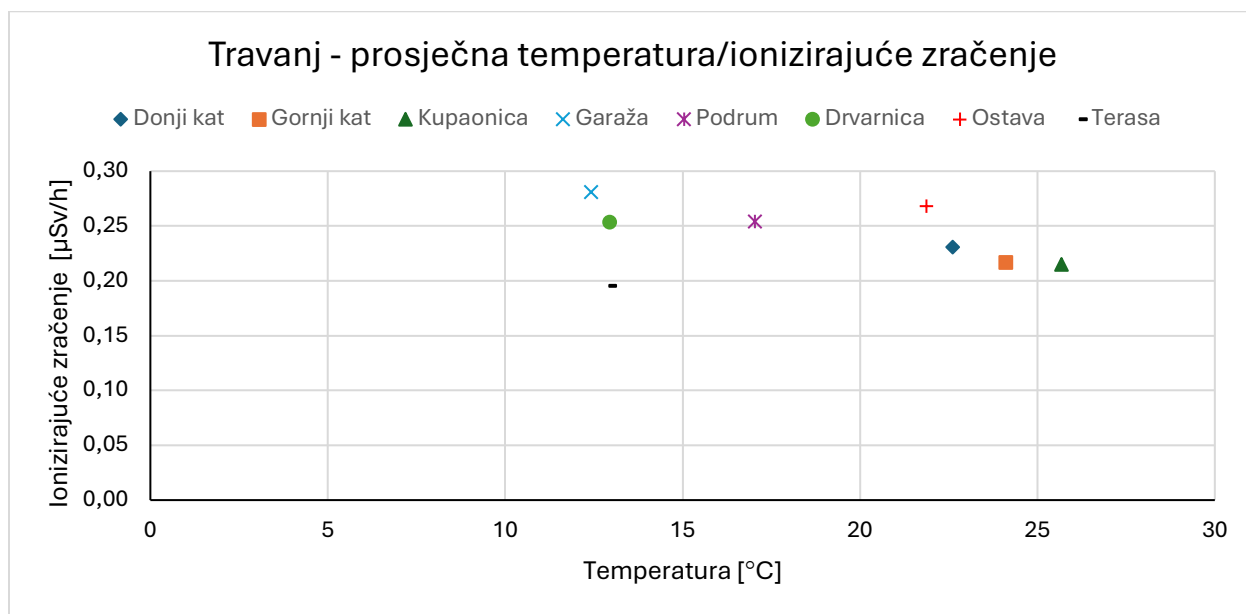
Grafikon 12. - Raspodjela ukupnog izmjerenog ionizirajućeg zračenja po prostorijama za ožujak 2025.

U ožujku, kružni *Grafikon 12.* prikazuje naglo povećanje udjela zračenja u ostavi od čak 16 %, što je u skladu s povećanjem izmjerene vrijednosti od 0,30 $\mu\text{Sv/h}$. To ukazuje na moguću akumulaciju ionizirajućeg zračenja i radona uslijed toplijeg tla i promjene tlaka zraka, pri čemu zatvorene prostorije osobito one smještene u prizemlju, mogu postati rezervoari zračenja bez da korisnici toga budu svjesni.

Rizik na zdravlje dodatno raste jer se takvi prostori obično ne prozračuju, a mogu se koristiti za odlaganje hrane, boje, goriva i drugih stvari koje mogu reagirati s zračenjem ili stvoriti dodatne kemijske rizike [29].

- TRAVANJ 2025.

U travnju su zabilježene najniže vrijednosti ionizirajućeg zračenja tijekom četveromjesečnog razdoblja. Ove vrijednosti su rezultat toplijeg vremena, povećane prirodne ventilacije te smanjene razine vlage u zatvorenim prostorima.



Grafikon 13. - Odnos temperatura i razine ionizirajućeg zračenja za travanj 2025.

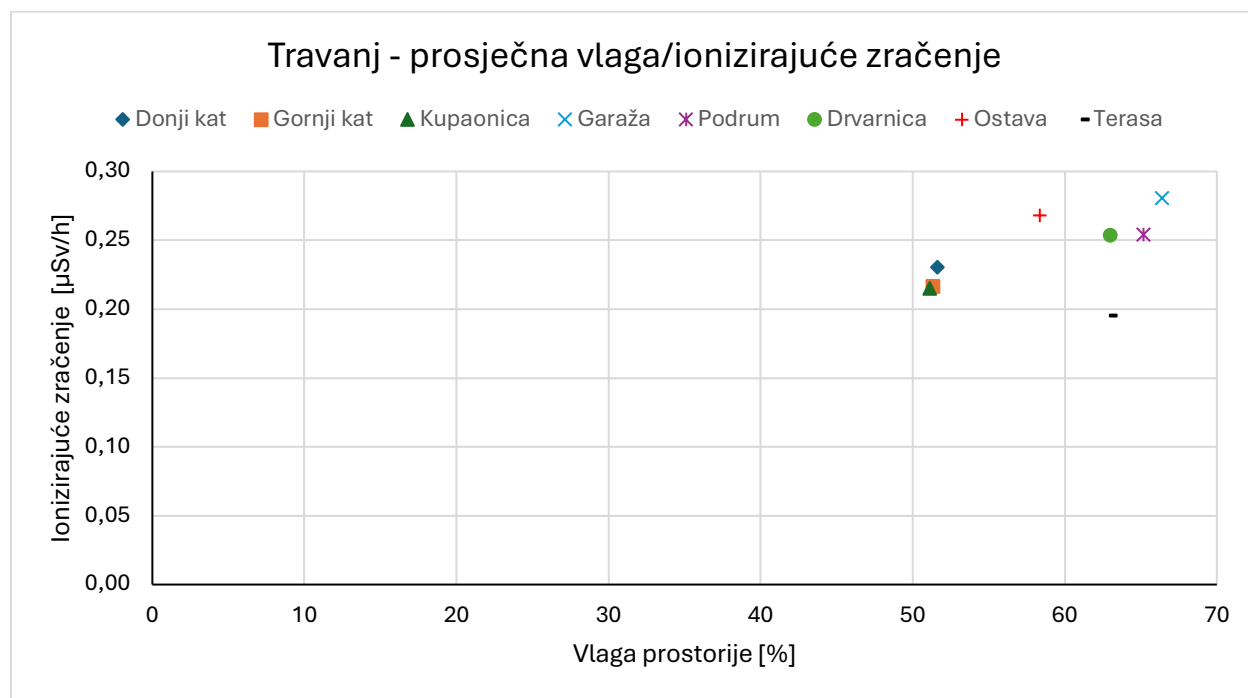
U travnju dolazi do ujednačavanja temperatura u svim prostorijama, čak su i ranije hladne prostorije (drvarnica i terasa) dosegle 13 °C, a garaža 12 °C. Ostale prostorije ostaju blago povišene 23 °C – 26 °C, što ovisi o njihovoj namjeni. Ovi podaci ukazuju na manje korištenje grijanja i veće korištenje prirodne ventilacije (provjetravanja), što je idealno za cirkulaciju zraka i smanjenje akumulacije zračenja.

No, zanimljivo je da unatoč povoljnim mikroklimatskim uvjetima, zračenje ostaje isto ili čak sadrži više razine od prethodnih mjeseci, što je vidljivo na *Grafikonu 13*. Garaža, drvarnica i ostava bilježe 0,26 μSv/h, dok su prostorije u kojima je još ponekad prisutno grijanje stabilne na 0,23 μSv/h, a terasa ponovno ima najnižu vrijednost od 0,20 μSv/h.

Ovo pokazuje da povećanje vanjske temperature ne mora nužno značiti smanjene zračenja. Ključno je da se prostorija provjetrava. Građevinski materijal koji je prisutan u prostoriji ili način

na koji je prostorija uređena (npr. sadrži li pod ili zidovi rupe, postoji li izolacija) su faktori o kojima ovisi kolika će biti razina radona [33].

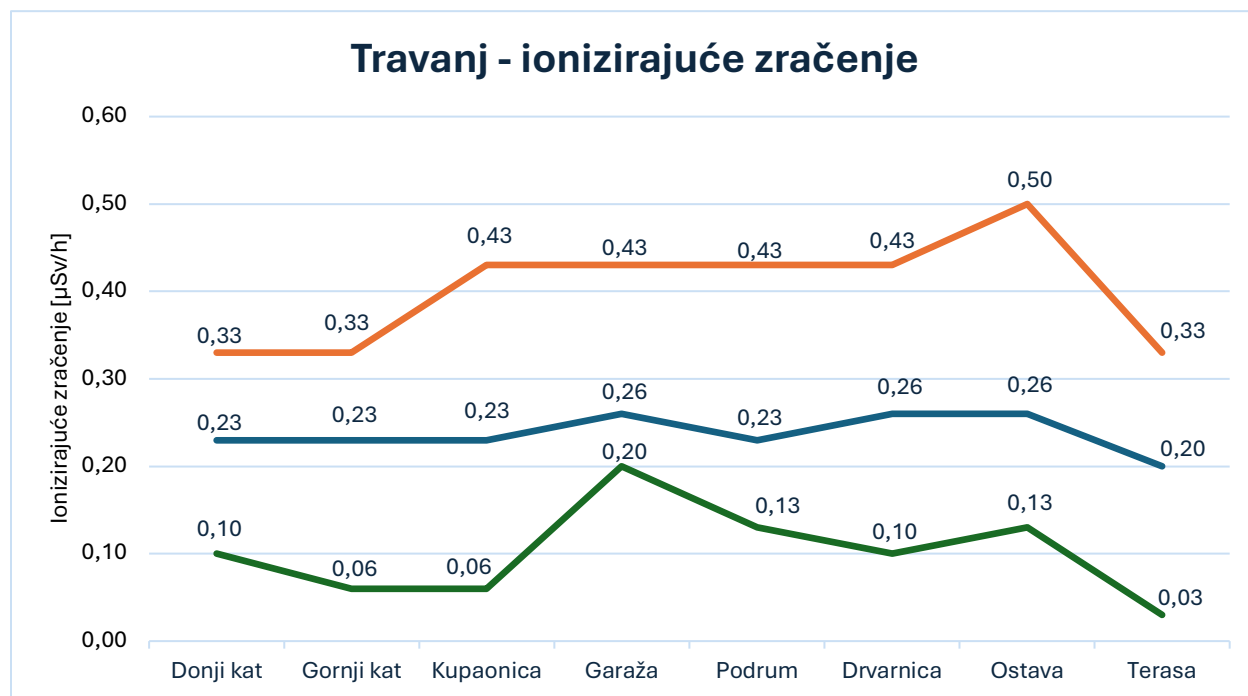
Zaključno, analiza po mjesecima otkriva da temperatura nije odlučujući faktor kod povećanja ili smanjenja razine zračenja. Ključne uloge imaju zatvorenost prostora, prisutnost izvora zračenja u materijalima te ventilacija. Iako su travanjski uvjeti najpovoljniji s obzirom na temperaturu, neke prostorije i dalje zadržavaju visoke razine zračenja, što ukazuje na strukturalne i funkcionalne karakteristike prostora kao dominantan uzorak [30, 33].



Grafikon 14. - Odnos relativne vlage zraka i razine ionizirajućeg zračenja za travanj 2025.

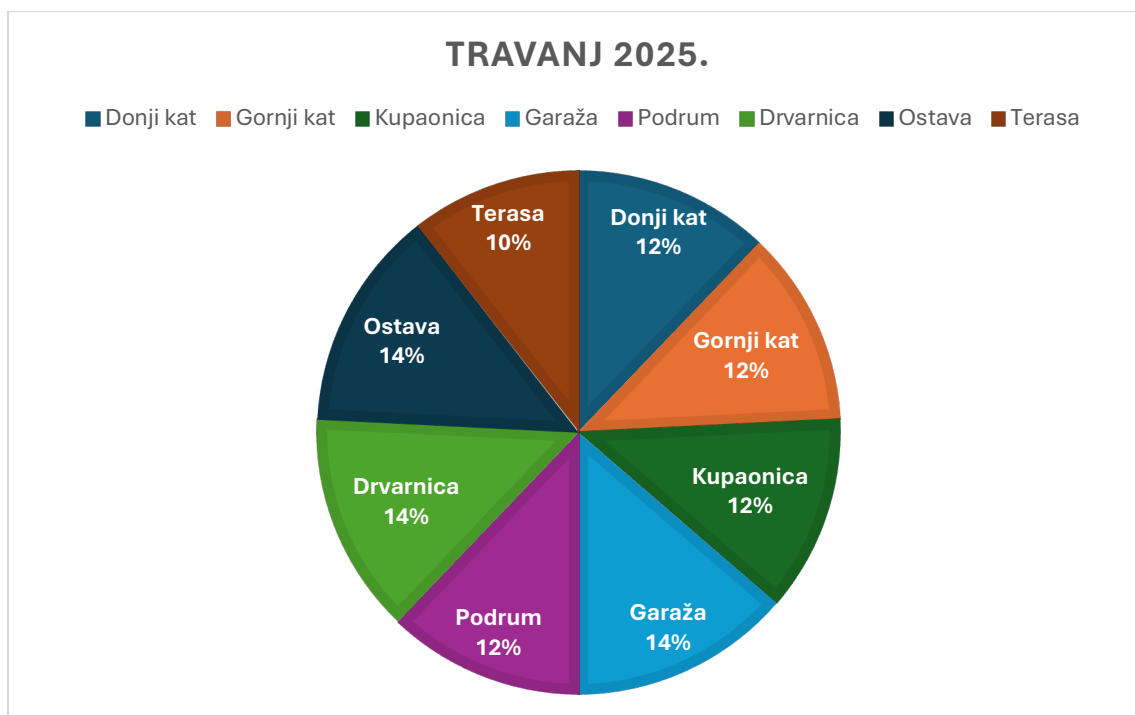
U travnju se iz *Grafikona 14.* može vidjeti smanjenje vlage. Najvlažniji prostori poput garaže (66 %), drvarnice (63 %) i podrum (65 %) imaju niže vrijednosti u odnosu na zimu, dok su dnevne prostorije gotovo izjednačene oko 51 % – 52 %. Unatoč smanjenju vlage, zračenje ostaje stabilno kod garaže, drvarnice i ostave od 0,26 $\mu\text{Sv/h}$, dok ostale prostorije imaju 0,23 $\mu\text{Sv/h}$, a terasa 0,20 $\mu\text{Sv/h}$. Ovo pokazuje da u travnju, iako je mikroklima povoljna, već postojeće zračenje ostaje prisutno, što potvrđuje da vlaga može imati kratkoročan utjecaj, ali dugoročne razine zračenja ovise o strukturi prostora i izvoru samog zračenja.

Tijekom četiri mjeseca, odnos vlage i zračenja pokazuje da povišena vlaga u zatvorenim prostorijama može pogodovati akumulaciji radioaktivnih čestica. Veliki čimbenik odnosi se na način korištenja prostorije, stupanj ventilacije i prisutnost izvora zračenja iz građevinskog materijala. Vlažnost može djelovati kao sekundarni čimbenik koji pospješuje zadržavanje zračenja, ali sama po sebi nije dovoljna da ga izazove [29].



Grafikon 15. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti ionizirajućeg zračenja za travanj 2025.

U travnju *Grafikon 15.* prikazuje da je došlo do sniženja prosječnih vrijednosti, ali određeni skokovi vrijednosti su i dalje prisutni. Opće smanjenje zračenja je vidljivo, većina prostorija ima prosječnu vrijednost od 0,23 $\mu\text{Sv/h}$ ili niže. Ipak, maksimalne vrijednosti u ostavi i dalje dosežu visoke vrijednosti i to za ovaj mjesec od 0,50 $\mu\text{Sv/h}$. Garaža i drvarnica zadržavaju visoke razine od 0,26 $\mu\text{Sv/h}$, iako su vanjski uvjeti znatno poboljšani. Minimalne vrijednosti u nekim prostorijama padaju na 0,06 $\mu\text{Sv/h}$, što je dobar pokazatelj poboljšavanja uvjeta.

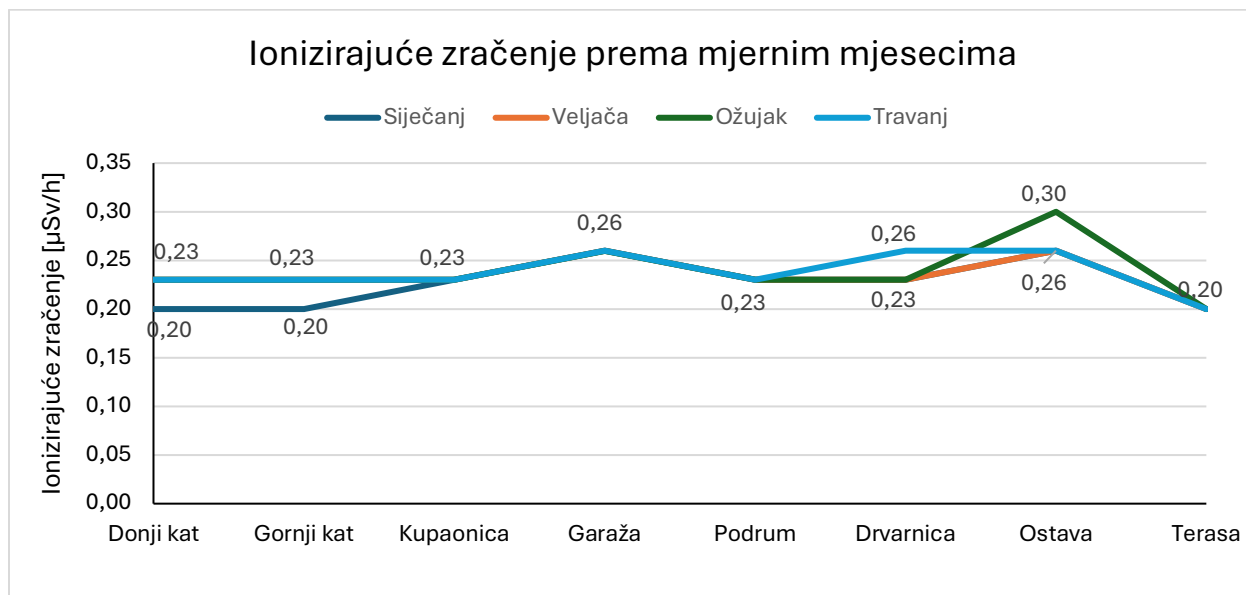


Grafikon 16. - Raspodjela ukupnog izmjerene ionizirajućeg zračenja po prostorijama za travanj 2025.

U travnju se raspodjela zračenja dodatno stabilizirala što je vidljivo na *Grafikonu 16.*, većina prostorija je ujednačena s 12 %, dok garaža, ostava i drvarnica bilježe po 14 % apsorbiranog ionizirajućeg zračenja. Ovo prikazuje da čak i kad se uvjeti u okolišu poboljšaju (toplije vrijeme, više vjetra, provjetravanje prostora), prostorije koje nemaju često provjetravanje ili dobar sustav ventilacije uzrokuju akumuliranje viših razina zračenja.

S obzirom na to da ionizirajuće zračenje nema boju, miris ni okus, njegovo nakupljanje u prostorijama može proći nezamijećeno, ali ima dugoročne zdravstvene posljedice. Dugotrajno udisanje različitih vrsta zračenja može oštetiti stanice pluća, a i rizik se povećava kod starijih osoba, djece i osoba s respiratornim problemima [31].

- PODACI ZA SVA ČETIRI MJESECA MJERENJA (2025. godine)

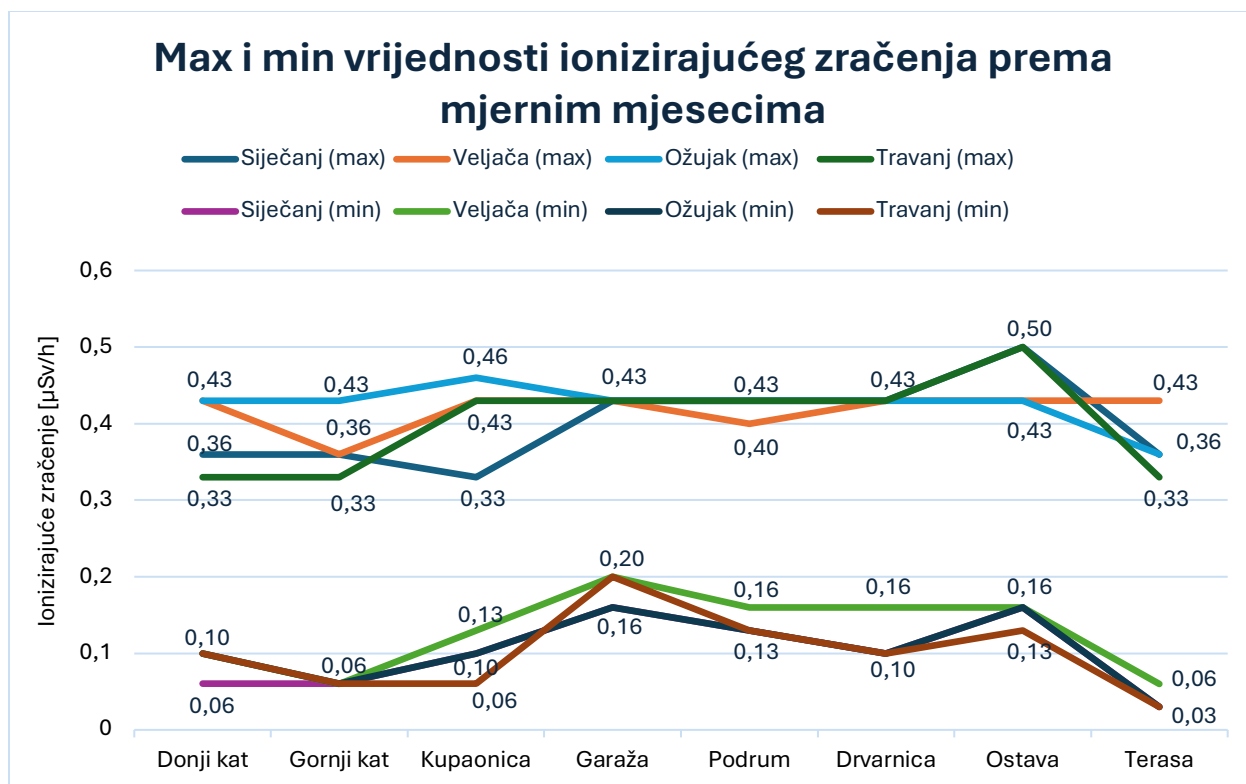


Grafikon 17. - Prosječne vrijednosti ionizirajućeg zračenja po prostorijama kroz mjesece za 2025. godinu

Ovaj *Grafikon 17.* prikazuje prosječne vrijednosti zračenja ($\mu\text{Sv/h}$) u svakoj prostoriji za svaki mjesec:

- Garaža, drvarnica i ostava kontinuirano bilježe najviše prosječne vrijednosti zračenja u sva četiri mjeseca ($0,26 - 0,30 \mu\text{Sv/h}$), što potvrđuje da su to prostorije u kojima je prisutna niska cirkulacija zraka i povećana je izloženost ionizirajućem zračenju.
- Terasa ima najnižu prosječnu vrijednost od ($0,20 \mu\text{Sv/h}$), potvrđujući da otvoreni prostor omogućuje učinkovitu disperziju radioaktivnih čestica.
- Donji i gornji kat, kao i kupaonica zadržavaju srednje vrijednosti ($0,23 \mu\text{Sv/h}$) bez značajnih oscilacija.

Iako su temperature i provjetravanje poboljšali vrijednosti zračenja od siječnja do travnja, prosječne vrijednosti zračenja ostaju stabilne, što znači da uvjeti unutar prostorija imaju dugotrajni utjecaj, bez obzira na sezonske promjene [32].



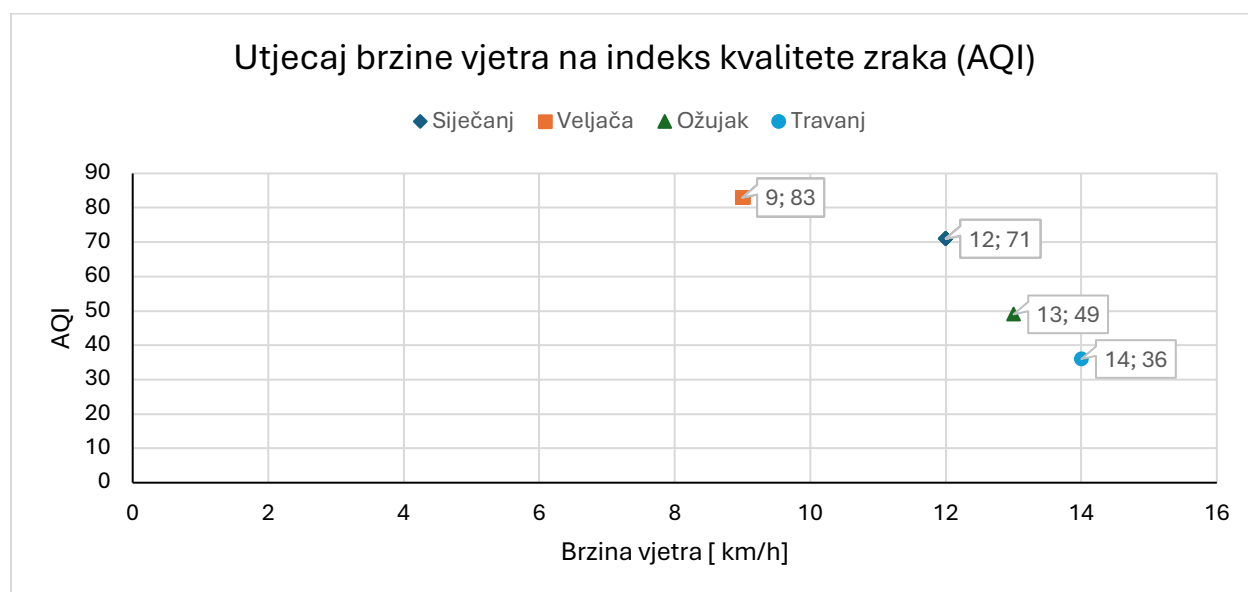
Grafikon 18. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti zračenja po mjesecima i prostorijama 2025.

Grafikon 18. prikazuje najveće i najmanje vrijednosti zračenja koje su zabilježene po prostorijama za svaki mjesec tijekom mjerenja. Na grafikonu se vidi jasan prikaz raspona oscilacija ionizirajućeg zračenja.

- Najviša maksimalna vrijednost zračenja ($0,50 \mu\text{Sv/h}$) zabilježena je u ostavi u siječnju i ponovno u travnju, što ukazuje na trajnu i visoku akumulaciju ionizirajućeg zračenja u slabo korištenim i zatvorenim prostorijama.
- Garaža ima konstantno visoke maksimalne vrijednosti ($0,43 - 0,46 \mu\text{Sv/h}$), čime se potvrđuje da je to prostor s trajnim izvorom zračenja.
- Minimalne vrijednosti zračenja u većini prostorija kreću se od $0,06 \mu\text{Sv/h}$ do $0,16 \mu\text{Sv/h}$, a terasa dosljedno ima najniže minimalne vrijednosti ($0,03 - 0,06 \mu\text{Sv/h}$).

Ovaj grafikon prikazuje varijabilnost zračenja, gdje su razlike između maksimalne i minimalne vrijednosti najizraženije u zatvorenim prostorijama. To ukazuje na promjene koje jednim dijelom ovise o dnevnim uvjetima (temperaturi, provjetravanju, vlažnosti), ali navise namjeni prostorije, prisutnosti građevinskog materijala i mjestu gdje se prostorija nalazi [32, 33].

Zaključno, prostorije poput garaže, drvarnice i ostave izložene su povećanom i promjenjivom zračenju, što nosi potencijalan zdravstveni rizik zbog dugotrajne akumulacije ionizirajućeg zračenja. Terasa i prostori koji se redovito koriste pokazuju najniže i najstabilnije vrijednosti, što potvrđuje važnost provjetravanja u svakodnevnim upotrebama prostora. Preporučuje se dodatno provjetravanje ili ugradnja ventilacijskog sustava u prostorijama s povišenim vrijednostima zračenja, kako bi se smanjili dugotrajni rizici na zdravlje, osobito plućne bolesti i karcinom kod osjetljivih skupina [31].



Grafikon 19. - Povezanost indeksa kvalitete zraka (AQI) i brzine vjetra za 2025. godinu

Na *Grafikonu 19.* koji prikazuje povezanost indeksa kvalitete zraka (AQI) i brzine vjetra tijekom razdoblja od siječnja do travnja, jasno je izražen opadajući trend AQI-a te blagi porast brzine vjetra, što ukazuje na poboljšanje uvjeta kvalitete zraka tijekom prijelaza iz zime u proljeće.

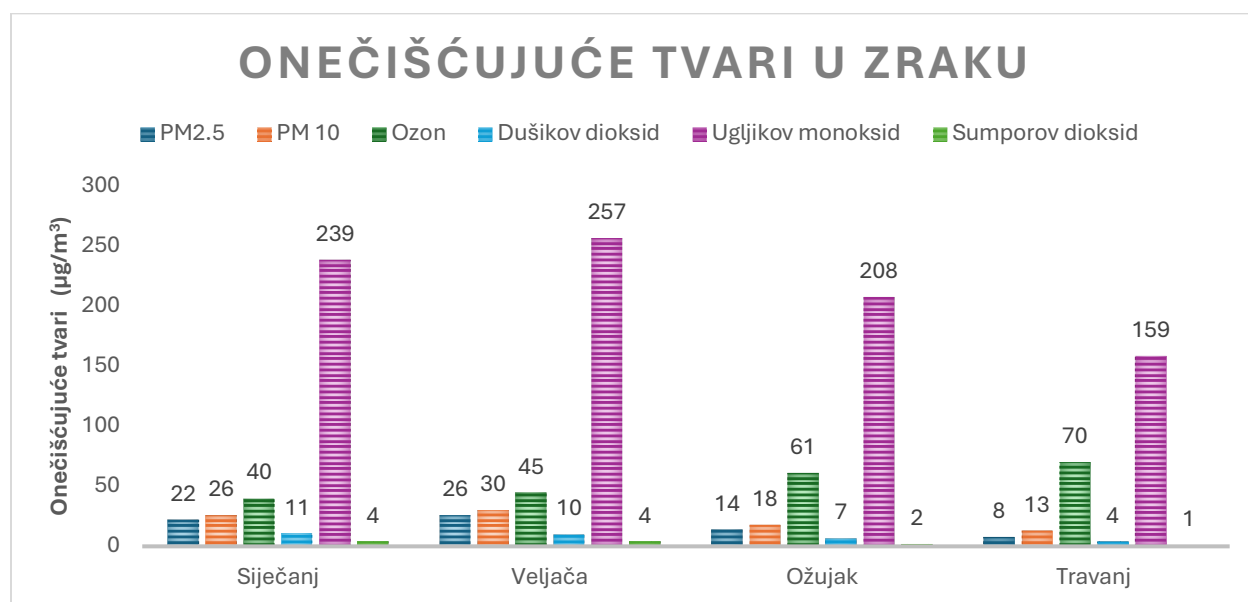
U siječnju su zabilježene najviše vrijednosti AQI-a (83) što ukazuje na lošu kvalitetu zraka. Brzina vjetra bila je najniža (9 km/h), što je pridonijelo stagnaciji zraka, nakupljanju onečišćenja u nižim slojevima atmosfere i povećanoj koncentraciji lebdećih čestica. Hladno vrijeme i pojačana upotreba grijanja dodatno su pogoršali uvjete.

Tijekom veljače situacija se blago poboljšala AQI (71- loša kvaliteta zraka) dok se brzina vjetra povećala (12 km/h). Povećana cirkulacija zraka omogućila je njegovu izmjenu, što se pozitivno odrazilo na kvalitetu zraka.

U ožujku dolazi do značajnog pomaka AQI pada na 49 (prosječna kvaliteta zraka), dok se brzina vjetra dodatno povećava na 13 km/h, čime je omogućena bolja disperzija plinova i lebdećih čestica iz zatvorenih i urbanih prostora.

Do travnja su zabilježene najniže vrijednosti AQI (36 – prosječna kvaliteta zraka), što ukazuje na najčišći zrak u promatranom razdoblju. Brzina vjetra doseže 14 km/h, što dodatno potvrđuje utjecaj meteoroloških uvjeta na pročišćavanje atmosfere. Takvi uvjeti pogodovali su i smanjenju razine ionizirajućeg zračenja, što je vidljivo iz paralelno analiziranih podataka.

Postoji negativna korelacija između brzine vjetra i vrijednosti AQI-a te glasi: kako se vjetar pojačava, kvaliteta zraka se poboljšava. Ovi rezultati jasno potvrđuju važnost meteoroloških faktora u upravljanju kvalitetom zraka i njihov utjecaj na okolišne parametre, osobito u kontekstu onečišćenja okoliša i javnog zdravlja [34].



Grafikon 20. - Koncentracije onečišćujućih tvari u zraku za 2025. godinu

Grafikon 20. koji prikazuje koncentraciju onečišćujućih tvari u zraku uključuje mjerenje lebdećih čestica PM 2.5 i PM 10, ozona (O_3), dušikov dioksid (NO_2), ugljični monoksid (CO) i sumporov dioksid (SO_2). Tijekom razdoblja od siječnja do travnja jasno se vidi opadajući trend većine zagađivača, s izuzetkom ozona čija se koncentracija prirodno povećava s dolaskom proljeća.

U siječnju su zabilježene visoke vrijednosti gotovo svih onečišćujućih tvari:

- PM 2.5 – 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 – 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, O₃ – 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ – 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO – 239 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO₂ – 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Hladni uvjeti, slaba cirkulacija zraka i intenzivno korištenje grijanja (posebno na kruta goriva) doprinijela su zadržavanju lebdećih čestica i plinova u nižim slojevima atmosfere. PM 2.5 i NO₂ bili su osobito izraženi, što je povezano s prometom i izgaranjem fosilnih goriva.

U veljači su prisutne blago povišene temperature, ali i dalje su koncentracije visoke:

- PM 2.5 – 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 – 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, O₃ – 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ – 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO – 257 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO₂ – 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Zanimljivo je da su vrijednosti lebdećih čestica čak blago porasle, što se vjerojatno dogodilo zbog temperaturne inverzije i još uvijek aktivne sezone grijanja. Početak pada koncentracija NO₂ i SO₂ sugerira prve naznake poboljšanja kvalitete zraka.

Ožujak donosi osjetan pad gotovo svih zagađivača:

- PM 2.5 – 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 – 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, O₃ – 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ – 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO – 208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO₂ – 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Povećana brzina vjetra i smanjenje grijanja pridonose učinkovitijoj disperziji onečišćujućih čestica. Iako ozon raste (što je uobičajeno za proljeće), svi ostali pokazatelji značajno se smanjuju.

U travnju se kvaliteta zraka najviše poboljšala:

- PM 2.5 – 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 – 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, O₃ – 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ – 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO – 159 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO₂ – 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Travanj se pokazao najmanje izložen onečišćenju tijekom promatranog razdoblja. Sve vrijednosti, osim ozona, su na najnižim vrijednostima. Ozon dostiže vrhunac, što je povezano s početkom toplijeg vremena (suncem) i fotokemijskim reakcijama, no ne predstavlja opasnost u ovim koncentracijama.

Analizirani podaci jasno pokazuju sezonski utjecaj na zagađenje zraka. Hladniji zimski mjeseci (siječanj i veljača) donose povećane koncentracije štetnih tvari, dok topliji proljetni mjeseci (ožujak i travanj) značajno poboljšavaju kvalitetu zraka. Ovaj trend prati i smanjenje razine ionizirajućeg zračenja, što dodatno potvrđuje važnost okolišnih uvjeta u kontekstu javnog zdravlja [35].

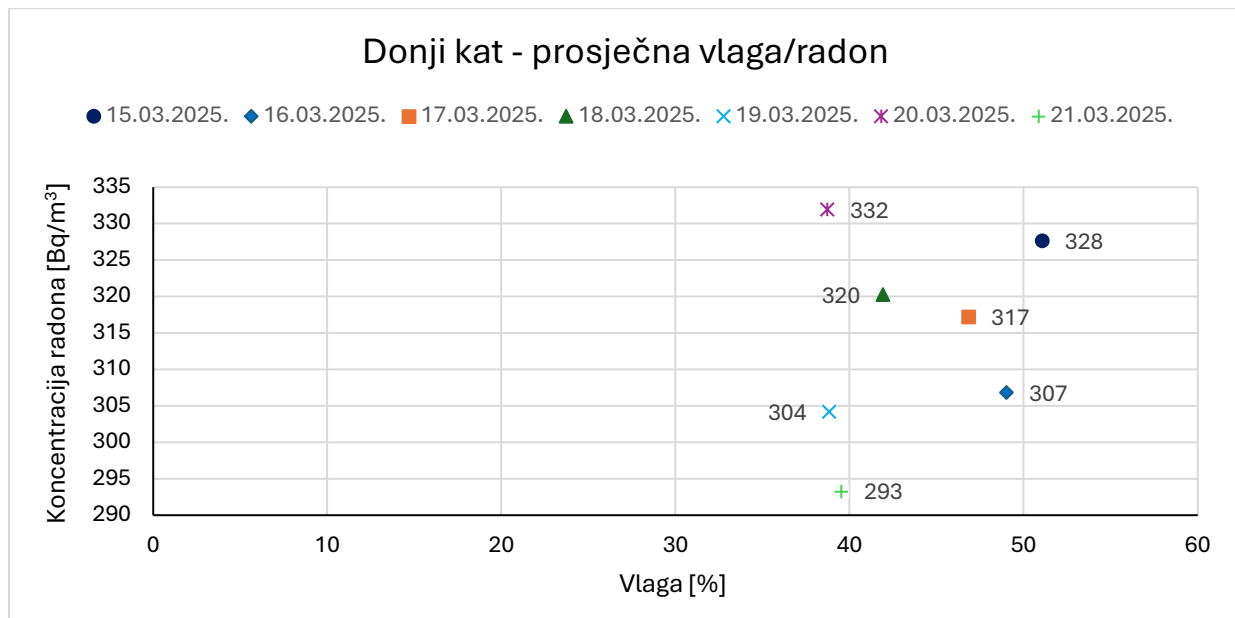
5. 2. Radon

◆ PRVA FAZA – HLADNIJE VRIJEME

Prvi ciklus mjerenja proveden je u razdoblju od 6. ožujka do 8. travnja 2025. godine, kada su vremenski uvjeti još uvijek bili tipični za zimski i rani proljetni period (niže temperature, povećana vlaga i manja mogućnost provjetravanja prostorija). Ovo vremensko razdoblje karakterizira zatvorenost prostorija zbog rada grijanja i nižih vanjskih temperatura, što pogoduje zadržavanju radona u zraku.

Cilj prvog ciklusa mjerenja bio je dobiti realan uvid u razine izloženosti u nepovoljnim mikroklimatskim uvjetima, kada su rizici za nakupljanje radona najizraženiji. Rezultati su korišteni kasnije kao referentna točka za usporedbu s kasnije izmjerenim podacima u toplijem dijelu godine i za razumijevanje sezonske osjetljivosti prostora na radon.

- DONJI KAT (kuhinja, blagovaonica i dnevni boravak)

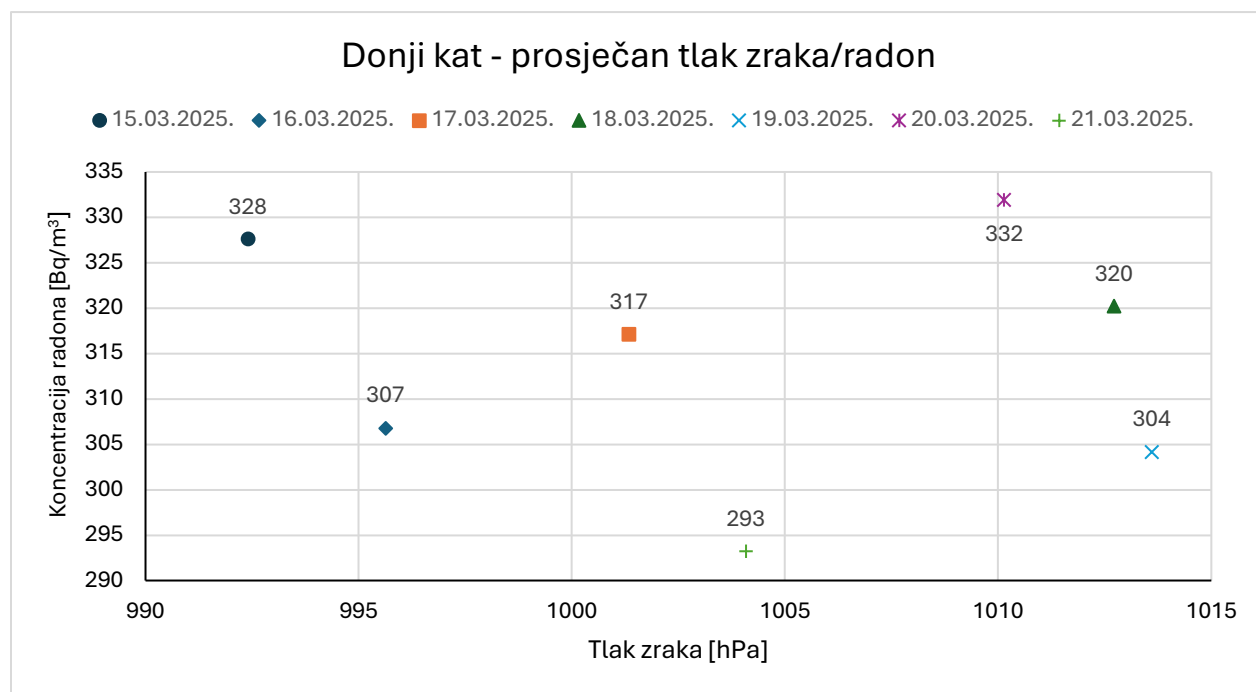


Grafikon 21. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za donji kat

Grafikon 21. prikazuje odnos prosječne vlage prostorije i radona za donji kat. Vlaga je na donjem katu bila najniža, u rasponu od 39 % do 51 %, no koncentracija radona nije proporcionalno niža,

iznosi su se kretali od 293 Bq/m³ do 332 Bq/m³. To ukazuje da vlaga nije jedini ili odlučujući čimbenik te da prostorije s normalnim uvjetima mogu imati visoku razinu radona ako [36]:

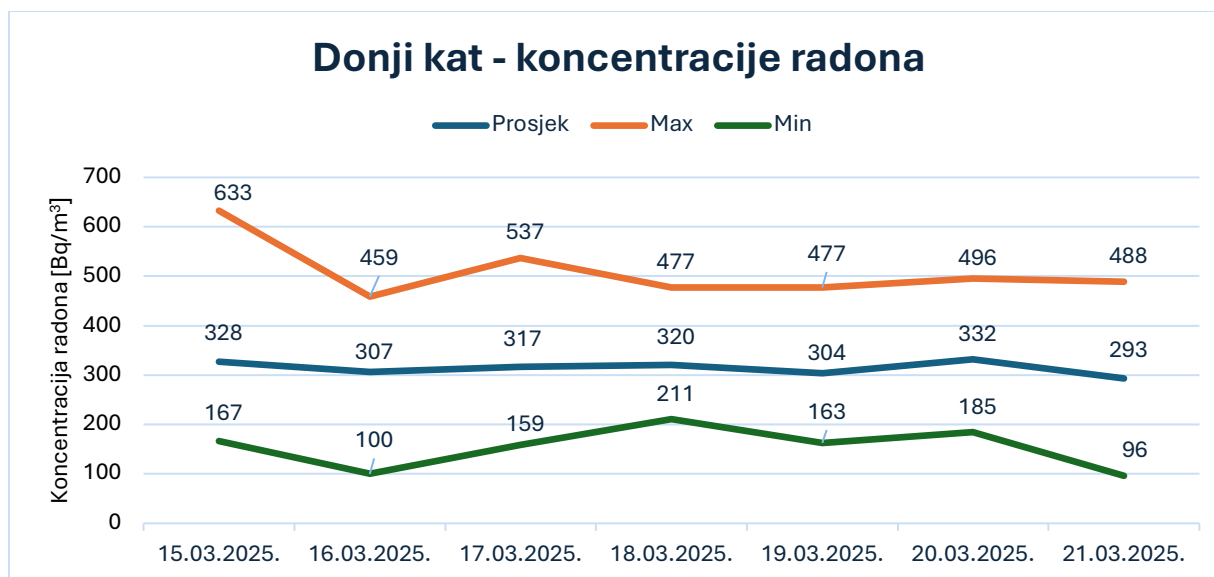
- se nalaze blizu tla,
- imaju betonsku podlogu bez izolacije,
- nisu redovito provjetravane.



Grafikon 22. - Odnos tlaka zraka i razine radona za donji kat

Grafikon 22. prikazuje podatke da donji kat koji je smješten između podruma i gornjeg kata te bilježi ujednačene vrijednosti radona, s manjim oscilacijama:

- Koncentracije se kreću od 293 Bq/m³ do 332 Bq/m³, bez naglih skokova, što upućuje na relativno stabilne mikroklimatske uvjete, ali i stalni „dotok“ radona iz donjih slojeva kuće. Zanimljivo je da se najveća vrijednost (332 Bq/m³) pojavljuje 20. ožujka pri tlaku od 1010 hPa, što može ukazivati da radon u ovim prostorijama ne ovisi isključivo o tlaku, već i o navikama korisnika prostorija (ventilaciji, grijanju te provjetravanju).

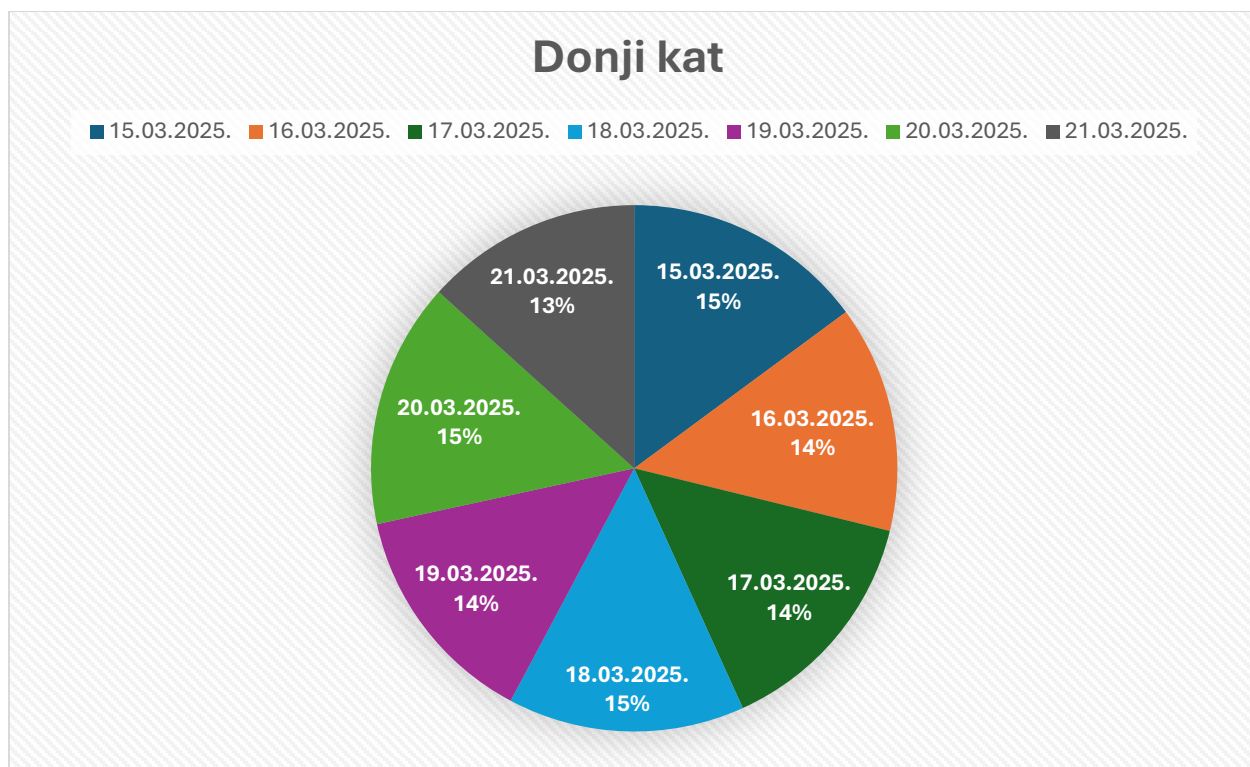


Grafikon 23. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za donji kat

Tijekom tjedna mjerenja na *Grafikonu 23.* (15. – 21. ožujka), prosječna vanjska temperatura bila je oko 5 ° C, zbog čega se prostorija nije redovito provjetravala, a grijanje je stalno radilo. Uz to, u prostoriji se pušilo, što dodatno onečišćuje zrak i stvara kemijsku smjesu u kombinaciji s radonom. Maksimalne koncentracije su dosegle vrijednosti od 633 Bq/m³, a prosječne vrijednosti bile su stalno iznad preporučenih 300 Bq/m³.

Zbog slabog provjetravanja, prostor postaje zasićen raznim onečišćivalima, radonom, vlagom i produktima izgaranja. Dugoročno to može rezultirati oštećenjem namještaja, razvojem plijesni te smanjenjem kvalitete zraka u susjednim prostorijama [36].

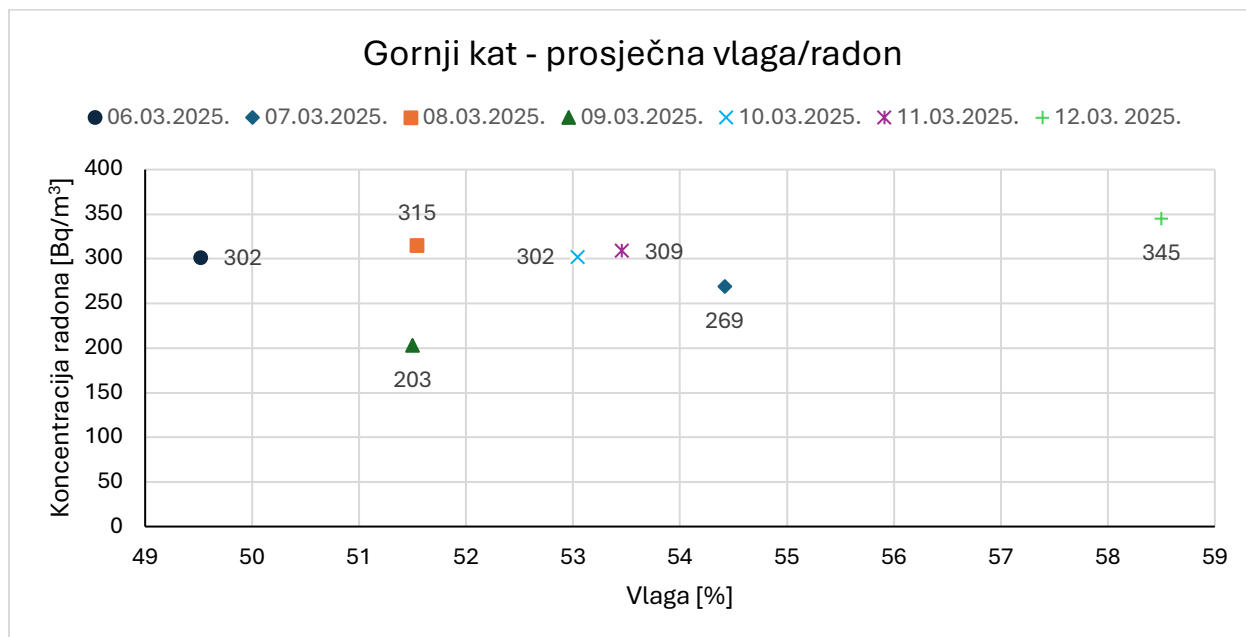
Kombinacija radona i duhanskog dima značajno povećava rizik od karcinoma pluća, kod pušača i više od 25 puta. Zatvoreni prostor sa slabom izmjenom zraka stvara idealne uvjete za akumulaciju radona i njegove produkte raspada, koji se talože u plućima [4].



Grafikon 24. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za donji kat

Udjeli su vrlo stabilni te se kreću između 13 % i 15 %, što je vidljivo na *Grafikonu 24*. Ukazuju na kontinuiranu, ali ujednačenu izloženost, vjerojatno zbog umjerene ventilacije i boljih građevinskih barijera. Donji kat može poslužiti kao prijenosnik radona prema višim prostorijama. Ako se u tom prostoru nalaze hrana, tekstil ili papirnati materijal, zadržavanje plina (radona) može djelovati i kontaminirajuće na okolinu. Iako pojedinačni dani nisu alarmantni, ali dugotrajno nakupljanje može povećati rizik od kroničnih respiratornih problema.

- GORNJI KAT (dvije spavaće sobe, kupaoonica i hodnik)

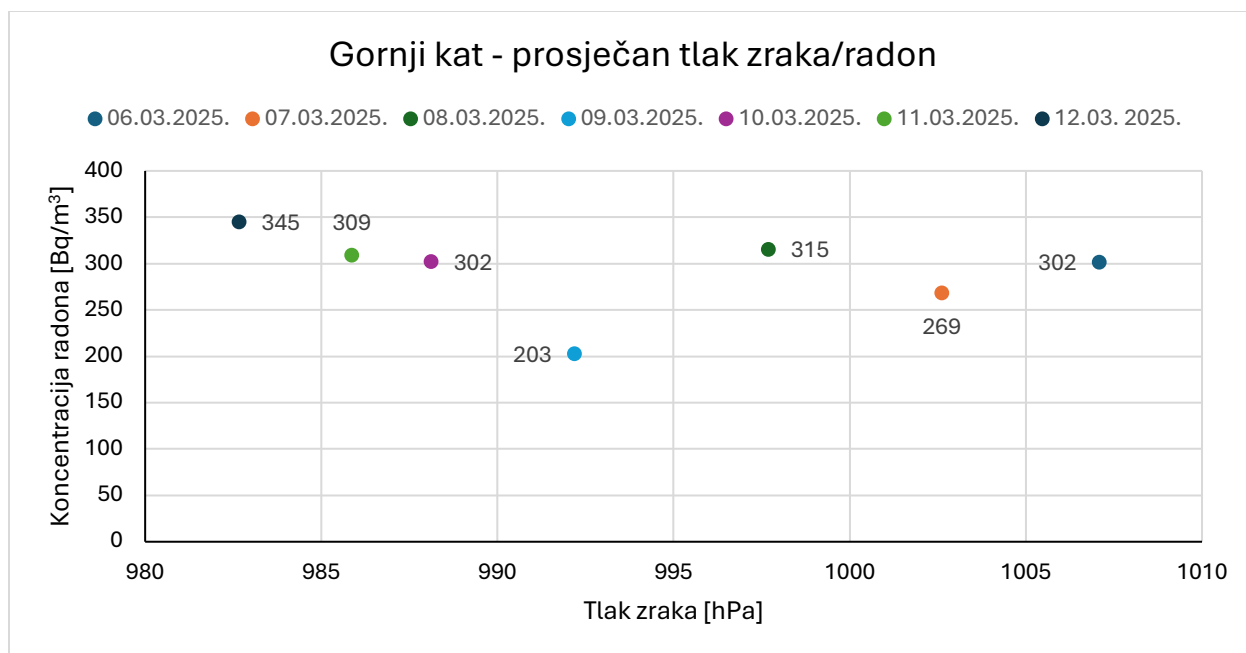


Grafikon 25. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za gornji kat

Za razliku od donjeg kata, gornji kat je povišen prostor, s manjim doticanjem s tlom. Vlažnost se kretala između 50 % i 59 %, što je u granicama normale za stambene razine. Međutim, zabilježene vrijednosti radona su dosta visoke, u rasponu od 269 Bq/m³ do 345 Bq/m³, iako je vlaga bila umjerena (*Grafikon 25.*).

Uzorak tome nije visoka vlaga, već nedostatak provjetravanja, budući da je to razdoblje bilo obilježeno nižim vanjskim temperaturama, prosječna temperatura tog tjedna bila je 12 ° C. Zbog hladnijeg vremena, prozori su ostajali zatvoreni i manje se provjetravalo, a prirodna izmjena zraka nije bila dovoljna. Time se stvorio zatvoreni mikroklimatski sustav u kojem se radon mogao nakupljati, unatoč činjenici da se prostor nalazi na višem katu i dalje od tla.

Ovaj primjer jasno pokazuje da toplina i visoka etaža ne isključuju pojavu radona, osobito kada provjetravanje nije dovoljno. Posebno je važno smanjiti vrijednosti za spavaće sobe ili ostale prostorije u kojim se duže boravi, jer se radon može nakupljati preko noći, bez da to korisnici prostorije primijete.

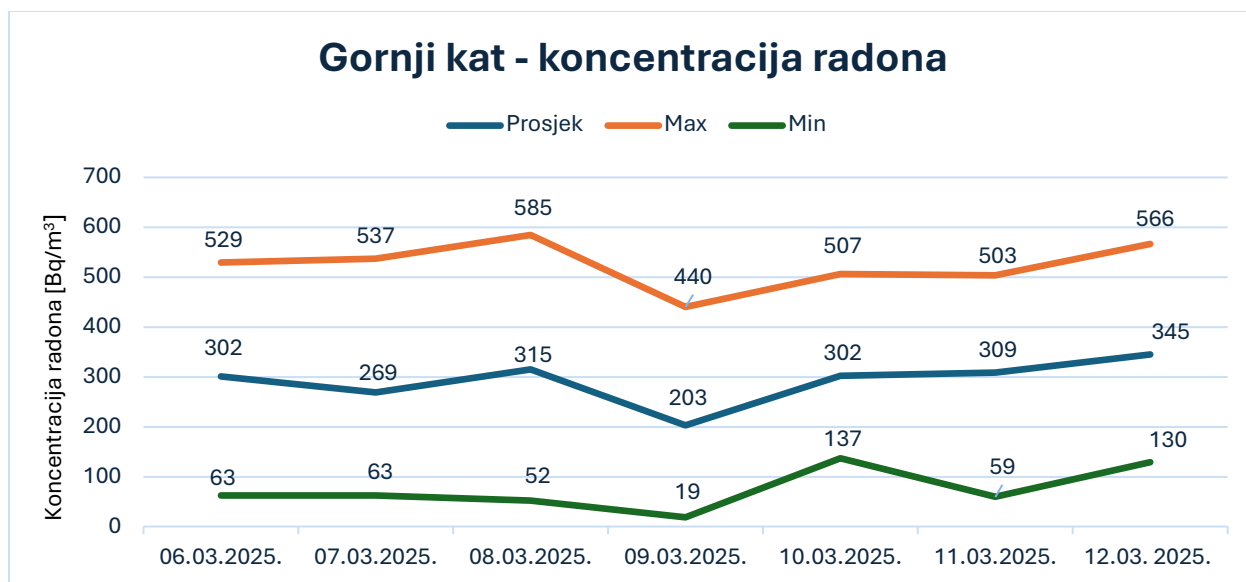


Grafikon 26. - Odnos tlaka zraka i razine radona za gornji kat

Na gornjem katu koji je najudaljeniji od tla, zabilježene su niže, ali i dalje značajne koncentracije radona, što se može vidjeti i *Grafikonu 26.*

- Najviša vrijednost bila je 345 Bq/m³ uz najniži tlak od 983 hPa (12. ožujka), dok je najniža vrijednost bila 203 Bq/m³ (9. ožujka) uz 992 hPa.
- Tijekom dana s višim tlakom (npr. 1007 hPa), koncentracija radona je niža (302 Bq/m³).

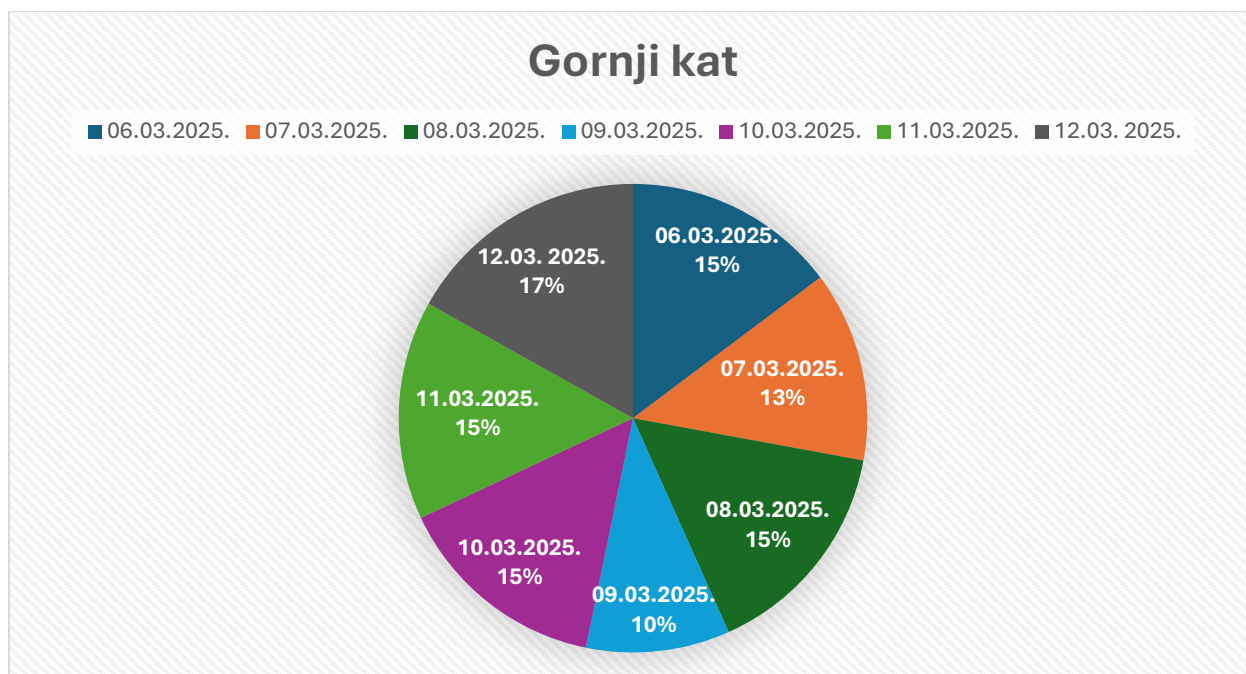
Ovi podaci potvrđuju da i više etaže nisu u potpunosti zaštićene, osobito ako zrak unutar kuće loše cirkulira ili se radon prenosi putem ventilacijskih sustava i ciljevi.



Grafikon 27. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za gornji kat

Tijekom tjedna mjerenja na *Grafikonu 27.* (6. - 12. ožujka), prosječna vanjska temperatura iznosila je 12 ° C. Upravo iz tog razloga prostorija se nije dovoljno provjetravala te je i grijanje bilo uključeno. Maksimalne vrijednosti radona dosegle su 585 Bq/m³, a prosječne vrijednosti su se kretale između 203 Bq/m³ i 345 Bq/m³, što upućuje na stalnu izloženost radonu.

Prostorije su bile zatvorene i radilo je grijanje, što je smanjilo mogućnost cirkuliranja zraka, iz tog su razloga emisije radona bile povišene. Zadržavanje plinova u prostorijama može štetno djelovati na zdravlje i na trajnost materijala u prostoru [4, 36].

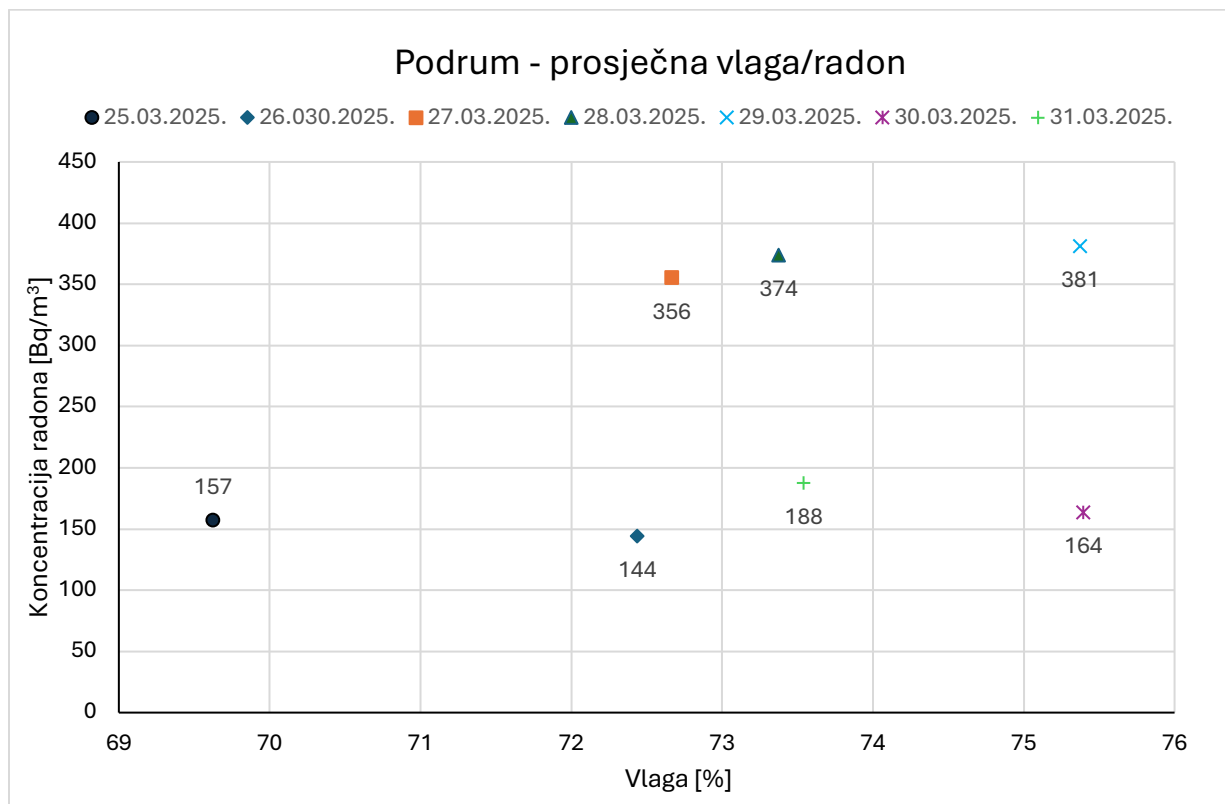


Grafikon 28. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za gornji kat

Udjeli radon zračenja prikazani su *Grafikonom 28.*, vrijednosti su se kretale između 10 % do 17 %, s vrhuncem 12. ožujka (17%). Iako se nalazi najdalje od tla, visoke vrijednosti ukazuju na slabo provjetravanje, što je dodatno opravdano prosječnom vanjskom temperaturom od 12 ° C tijekom tjedana.

Gornji kat s manjom izmjenom zraka postaje zatvoreni sustav za zadržavanje plina. Dugoročno, može doći do nakupljanja topline i vlage, čime se povećava rizik od plijesni i pogoršanja energetske učinkovitost objekta [29]. Neotkrivena prisutnost radona u višim etažama može dovesti i do apsorbiranja vrlo visokih vrijednosti radon zračenja, a da stanari toga nisu ni svjesni. Izloženost u prostorijama za spavanje može biti najopasnija, jer korisnici prostorije provedu više sati udisanjem potencijalno kontaminiranog zraka tijekom noći.

- PODRUM



Grafikon 29. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za podrum

Podrum, kao prostor koji je u izravnom kontaktu s tlom, prirodno je najosjetljiviji na prodor radona, plina koji nastaje raspadom uranija u zemljinoj kori. Tijekom promatranog razdoblja od 25. do 31. ožujka 2025., na *Grafikonu 29.* uočene su visoke vrijednosti relativne vlage (70 – 75 %), što predstavlja gornju granicu prihvatljivih uvjeta za prostore u kojima se često boravi.

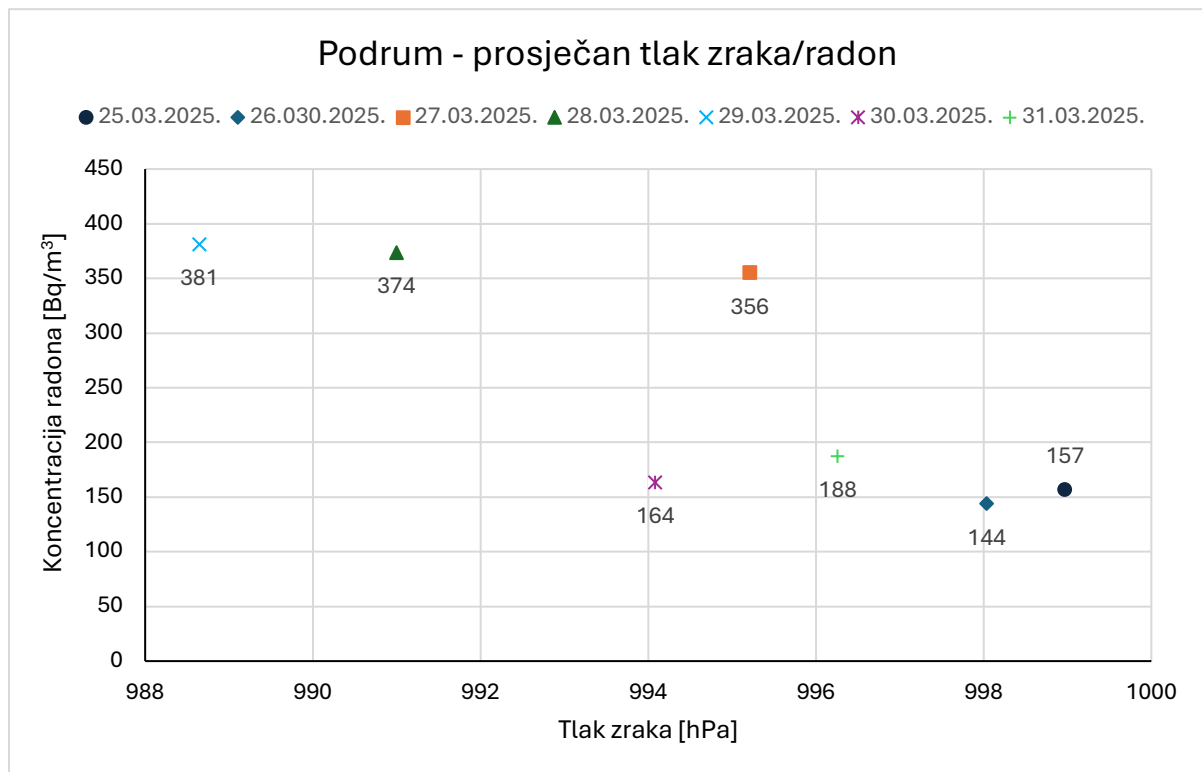
Ono što je posebno značajno jest da je prostor bio redovito provjetravan, čime su se koncentracije radona smanjile, ali je bilo i određenih naglih povećanja vrijednost.

- Početne vrijednosti (25. i 26. ožujka) bile su 157 Bq/m³ i 144 Bq/m³, što se prema normama smatra umjerenim.
- No već 27., 28. i 29. ožujka, koncentracije naglo rastu na 356 Bq/m³, 374 Bq/m³ i 381 Bq/m³ i to bez značajne promjene vlage.

Takav skok unatoč čestom provjetravanju, ukazuje na vrlo snažan prirodni izvor radona, što može biti uzrokovano padom atmosferskog tlaka, zbog čega radon iz tla pod većim pritiskom ispunjava

podzemne dijelove objekata. Visoka vlaga dodatno pridonosi zadržavanju radona u zraku, jer usporava njegovo raspršivanje i produljuje njegovo zadržavanje u prostoru.

Ova situacija pokazuje da u nekim slučajevima ni provjetravanje nije dovoljno za smanjenje koncentracije radona, ako radon prodire u velikim količinama kroz pukotine, podove ili neizolirane zidove [37].



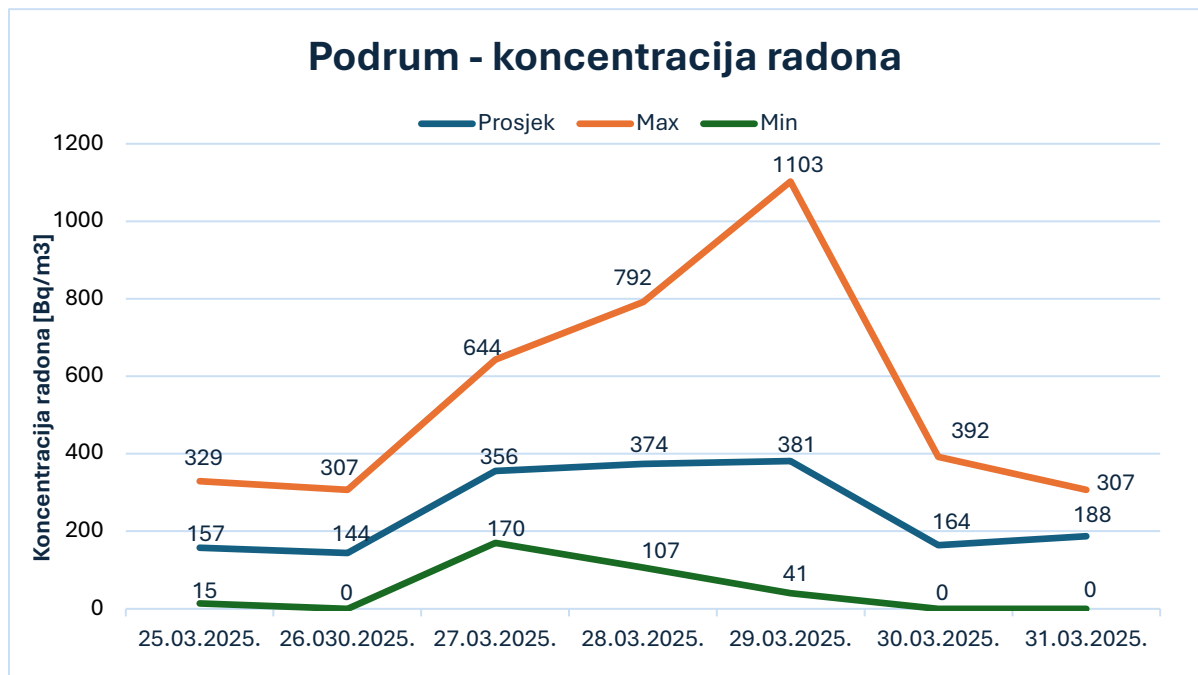
Grafikon 30. - Odnos tlaka zraka i razine radona za podrum

Grafikon 30. prikazuje vrijednosti za podrum, koji je poznat kao najkritičnija točka za nakupljanje radona, koncentracije su pokazale izražene dnevne oscilacije, s najvišim vrijednostima sredinom tjedna:

- Dana 29. ožujka zabilježena je najviša koncentracija od 381 Bq/m³, uz tlak od 989 hPa.
- Najniža vrijednost zabilježena je 26. ožujka u iznosu od 144 Bq/m³

Značajne razlike među danima ukazuju na utjecaj više čimbenika, no posebno treba istaknuti da je u tom razdoblju podrum bio često provjetravan, što je izravno doprinijelo smanjenju koncentracije radona u zraku tijekom pojedinačnih dana.

Takva praksa iako je kratkotrajno učinkovita nije dovoljna za dugoročno smanjenje rizika, jer su vrijednosti već sljedećih dana ponovno rasle kada je provjetravanje izostavljeno. Ovaj slučaj potvrđuje koliko je učinkovitost provjetravanja kratkotrajnog tipa ograničeno te da je za postizanje trajno niskih koncentracija radona u podrumskim prostorima potrebno ugraditi sustave za stalnu ventilaciju ili radonske barijere [37].



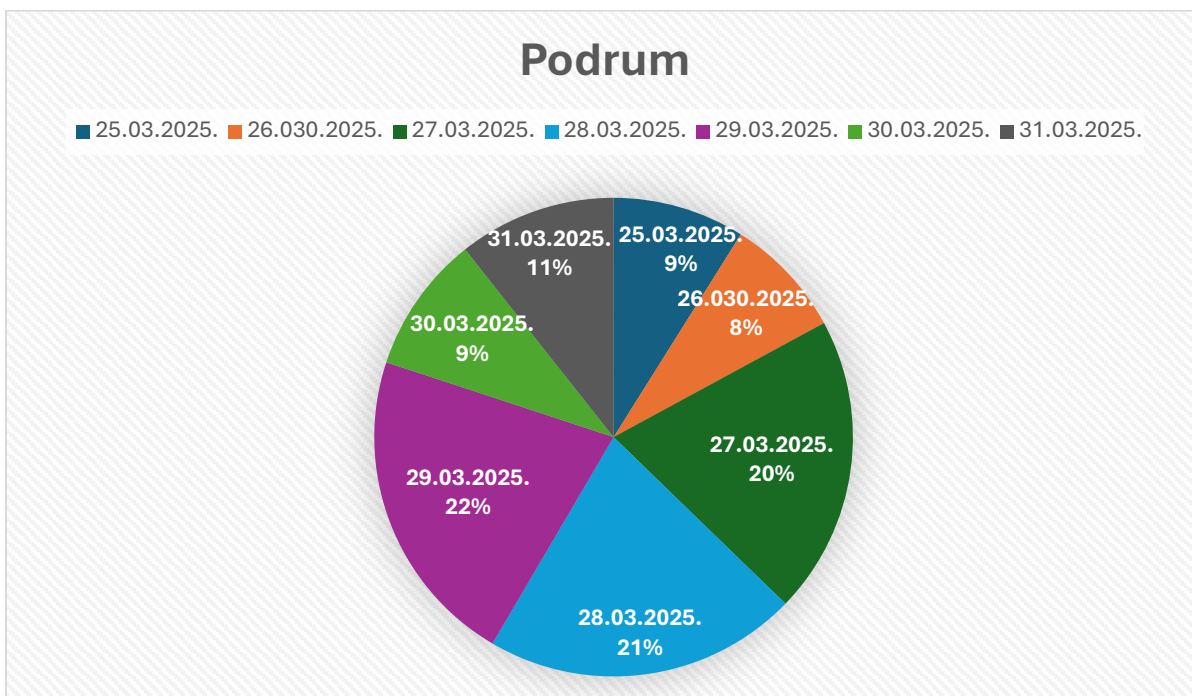
Grafikon 31. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za podrum

Na *Grafikonu 31.* od 25. do 31. ožujka, prikazuje da je podrum bio najčešće provjetravani prostor, unatoč hladnijem vremenu te je prosječna vanjska temperatura bila 10 ° C. Međutim, unatoč provjetravanju, koncentracije radona su imale određene visoke skokove vrijednosti. Maksimalna zabilježena vrijednost iznosila je 1103 Bq/m³ (29. ožujka), dok su minimalne vrijednosti povremeno padale na 0 Bq/m³, no ponovni rast do ekstremnih razina ukazuje na snažan prodor radona iz tla.

U ovom primjeru podrum djeluje kao spremnik radona, plin se vraća i zadržava unatoč redovitom provjetravanju te se širi prema višim katovima, takvo stanje ugrožava i strukturu objekta [38].

Ovakve vrijednosti zračenja su iznimno opasne, prema preporukama WHO (Svjetske zdravstvene organizacije), razine iznad 1000 Bq/m³ zahtijevaju hitnu intervenciju [4]. Iako se

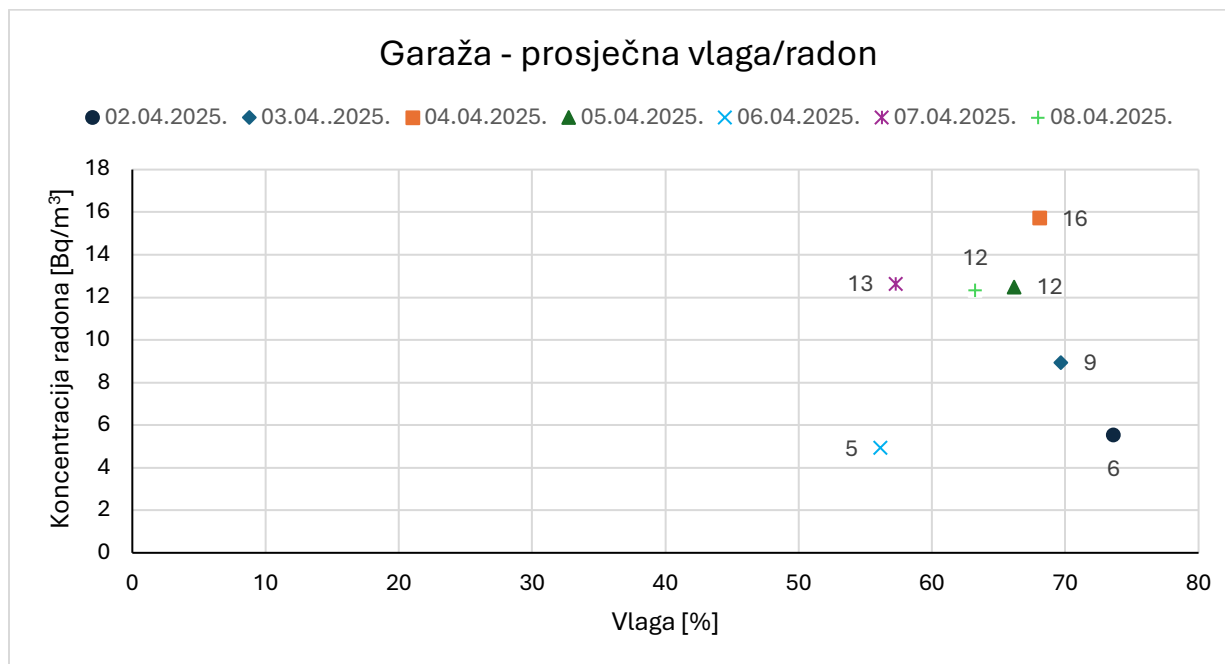
prostor redovito provjetrava, akumulacija radona je i dalje prisutna u visokoj mjeri u određenim trenucima.



Grafikon 32. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za podrum

Kružni *Grafikon 32.* za podrum prikazuje dnevne udjele od 8 % -9 % te porast koncentracija radona koji je bio prisutan na početku tjedna od 20 % -22 % između 27. i 29. ožujka. Unatoč provjetravanju, visoki udjeli ukazuju na kontinuiran i snažan prodor radona iz tla. Podrum stvara zatvoreni mikroklimatski sustav u kojem radon, uz vlagu može uzrokovati degradaciju građevinskih materijala (npr. kondenzaciju i razvoj plijesni) [36]. Može i negativno utjecati na kvalitetu zraka u višim etažama kroz tzv. efekt dimnjaka (radon se podiže kroz kuću) [39]. Dugotrajna izloženost visokim koncentracijama povećava vjerojatnost razvoja karcinoma pluća, pogotovo kod osjetljivih skupina (djece, stariji, pušači i ugrožene skupine s respiratornim problemima). Zadržavanje radona u zraku može dovesti do akumulacije radioaktivnih produkata u dišnom sustavu [31].

- GARAŽA

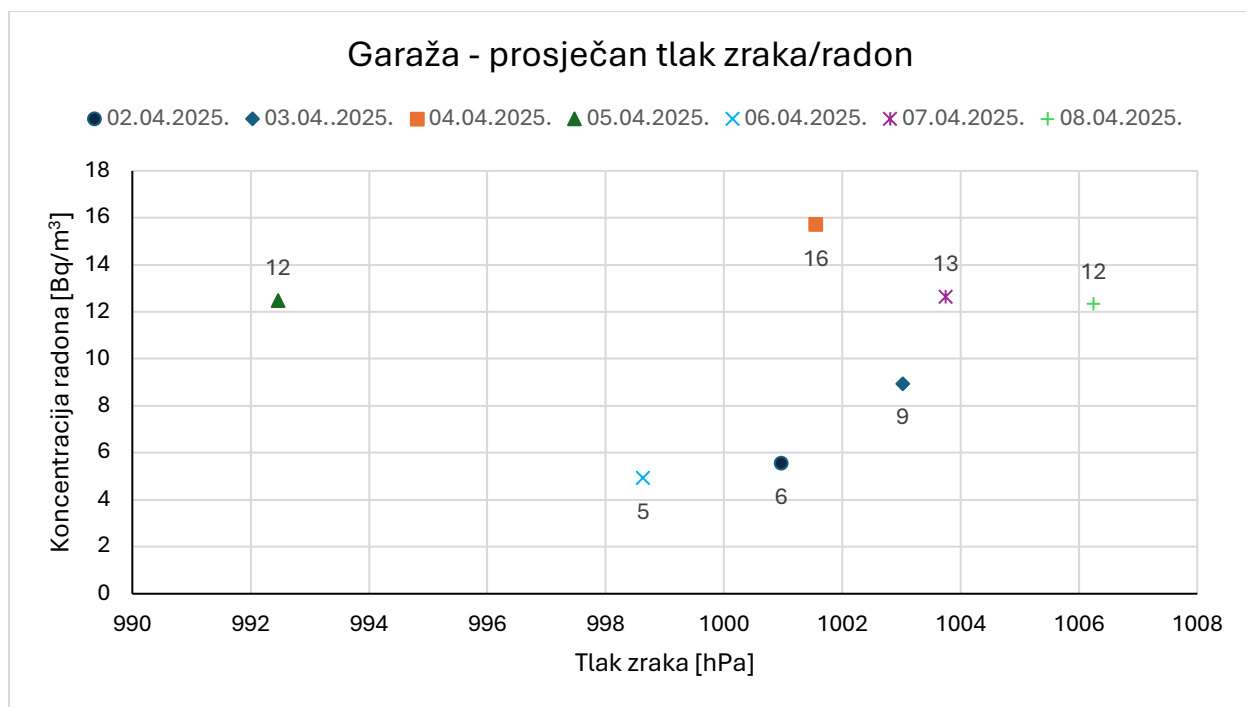


Grafikon 33. - Odnos relativne vlage zraka i razine radona za garažu

Tijekom razdoblja od 2. do 5. travnja na *Grafikonu 33.*, vrijednosti relativne vlage blago je opadala (74 % - 66 %), dok koncentracija radona raste sa 6 Bq/m³ na 16 Bq/m³, a zatim pada na 12 Bq/m³. Ovo pokazuje da niža vlaga može pogodovati lakšem oslobađanju i kretanju radona unutar zraka, osobito ako je prostor zatvoren. U našem slučaju u vremenu mjerenja prostorija se često provjetravala i bila je otvorena zbog čestog korištenja i lijepog vremena, što je glavni razlog niskih vrijednosti koncentracija radona.

- 6. travnja donosi nižu vlagu (56 %) i također najnižu razinu radona (5 Bq/m³), što ukazuje na potencijalnu povezanost provjetravanja ili promjene tlaka (*Grafikon 34*), koji zajedno s talkom utječu na zadržavanje radona u prostorijama i na emisije njegovih konačnih vrijednosti.
- Do kraja promatranog razdoblja (7. i 8. travnja), vrijednosti vlage ponovno rastu (57 % i 63 %), dok radon ostaje na umjerenim razinama (13 Bq/m³ i 12 Bq/m³).

Iako se ne vidi savršena linearna povezanost, postoji blago negativna korelacija jer kada vlaga opada, radon se često pojavljuje u blago povišenim koncentracijama, s obzirom da niža vlaga omogućuje plinovima lakšu difuziju i smanjenje njihovog zadržavanja u zraku [40].

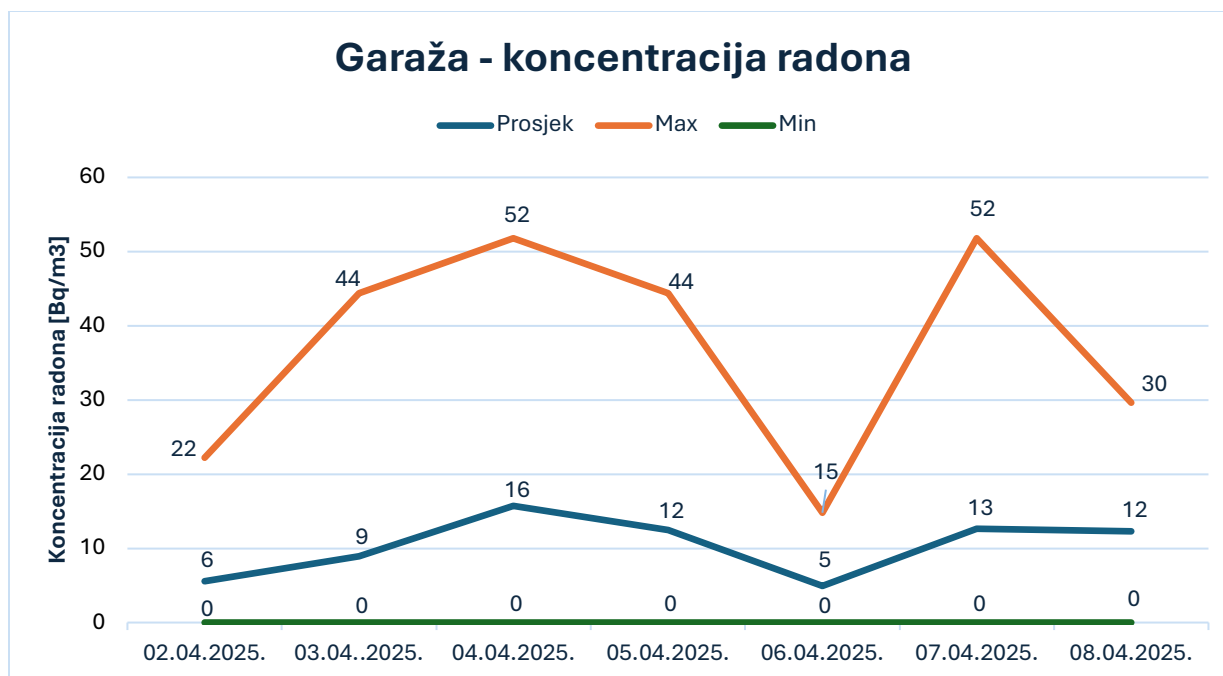


Grafikon 34. - Odnos tlaka zraka i razine radona za garažu

Tijekom promatranog razdoblja tlak se kretao između 992 hPa i 1006 hPa, dok su vrijednosti radona varirale između 5 Bq/m³ i 16 Bq/m³. Promjena koncentracije radona prati promjene tlaka zraka što upućuje na povezanost:

- 2. – 4. travnja: tlak raste (1001 hPa na 1002 hPa), a koncentracija radona također raste (6 Bq/m³ na 16 Bq/m³), što može ukazivati na zadržavanje radona u prostoriji pri stabilnom i povišenom tlaku.
- 5. travnja: nagli pad tlaka na 992 hPa poklapa se s padom radona na 12 Bq/m³, pad koncentracije je moguć i zbog povećane izmjene zraka u prostoriji, što također može biti jedan od razloga.
- 6. – 8. travnja: tlak ponovno raste (999 hPa – 1006 hPa), a vrijednost radona ostaje niska i stabilna (5 Bq/m³ – 13 Bq/m³), što upućuje na utjecaj drugih čimbenika na vrijednosti koncentracija, kao npr. temperatura, ventilacija (ako postoji u prostoriji), provjetravanje i same aktivnosti unutar garaže.

Grafikon 34. prikazuje da je odnos radona i tlaka mogu imati utjecaj na zadržavanje ili oslobađanje radona, ali mikroklima prostora i način korištenja imaju ključnu ulogu u vrijednostima koncentracija [30].



Grafikon 35. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za garažu

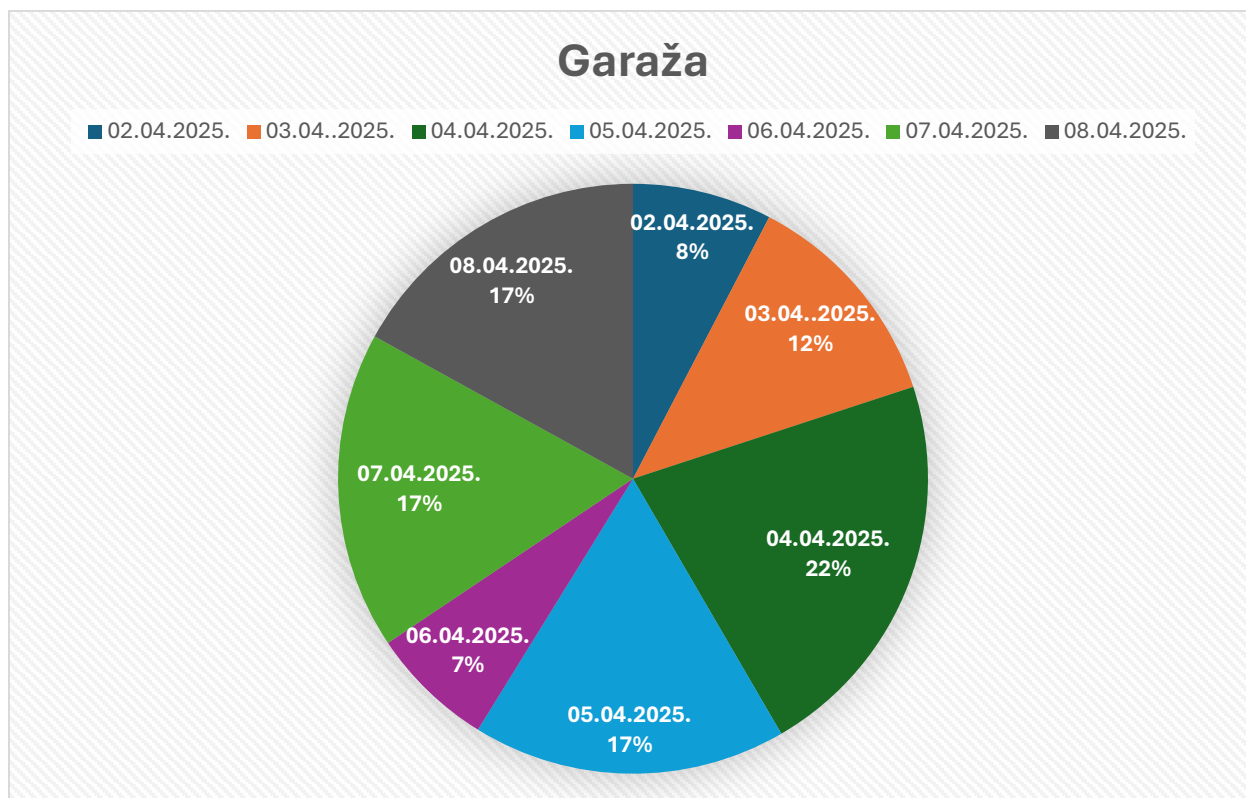
Grafikon 35. prikazuje dnevne maksimalne, prosječne i minimalne vrijednosti radona u garaži. Tijekom tjedna koncentracije su varirale, maksimalne vrijednosti dosegle su 52 Bq/m³ (04. i 07. travnja), dok su minimalne vrijednosti bile 0 Bq/m³, što ukazuje na veće dnevne oscilacije radona. Prosječne vrijednosti kretale su se između 5 Bq/m³ i 16 Bq/m³, što su u principu dosta niske vrijednosti, ali prikazuju da radon povremeno ulazi i zadržava se u prostoru, posebno kada je provjetravanje smanjeno ili se uopće ne prakticira.

Takvi rezultati potvrđuju da i garaža, iako ponekad dobro prozračena, može postati izvor akumulacije radona, posebno ako se koristi kao skladište, radionica ili prostor za dulji boravak, ako se u dovoljnoj mjeri ne provjetruje.

Uređenje garaže s boljom ventilacijom i detekcijom plinova podiže razinu sigurnosti objekta i smanjuje ekološki otisak [31]. Izmjerene vrijednosti radona pripadaju kategoriji nisko rizične i ispod su svih preporučenih granica (manje od 300 Bq/m³), važno je spomenuti:

- Garaže se često koriste više od samog parkiranja vozila – skladištenje stvari i radionice, što znači da boravak u njima nije uvijek kratak.
- Radon, plin bez boje i mirisa, može se nakupljati u nižim slojevima prostora ako je garaža slabo prozračena ili ima izravan kontakt s tlom.

- Dugoročan pristup radonu, čak i pri niskim vrijednostima, može imati negativan učinak na ljudsko zdravlje, osobito kod ljudi s respiratornim bolestima [30, 31].

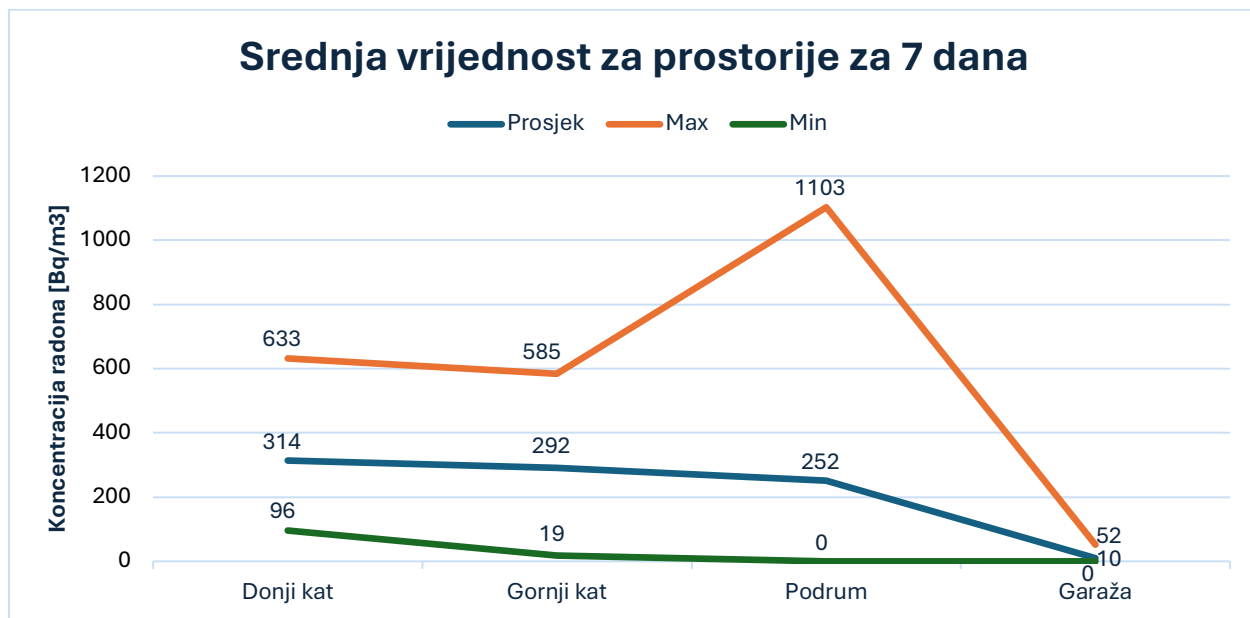


Grafikon 36. - Raspodjela ukupnog izmjerenog radona za garažu

Kružni *Grafikon 36.* prikazuje udio radona zračenja po danima kada se provodilo mjerenje. Najveći udio zabilježen je 4. ožujka (22 %), dok su 5., 7. i 8. ožujka zabilježene povišene vrijednosti (po 17 %). Najniži udjeli zabilježeni su 2. i 6. ožujka. Prikazani rezultati ukazuju na promjene uvjeta u garaži, što je povezano s provjetravanjem, korištenjem prostora i vanjskim vremenskim uvjetima.

Iako su ukupne vrijednosti niske, dugoročna izloženost može imati dugoročne i štetne utjecaje na zdravlje, posebno kod osoba koje često borave u prostoriji. Radon, čak i u malim količinama narušava kvalitetu zraka, a kombinaciji s vlagom i kemikalijama može smo povećavati štetnost [36].

- ZAJEDNIČKI PRIKAZ PODATAKA



Grafikon 37. - Maksimalne, srednje i minimalne koncentracije radona

Grafikon 37. prikazuje odnos između maksimalnih, srednjih i minimalnih vrijednosti radona u četiri mjerne prostorije. Podrum ima najvišu maksimalnu vrijednost od 1103 Bq/m³, ali u toku dana se prosječna vrijednost smanjila na 252 Bq/m³, što ukazuje na velike dnevne oscilacije i da provjetravanje prostorija ima veliki pozitivan utjecaj na smanjenje vrijednosti akumulacije radona, ali i dalje postoji problem jer u trenucima kad provjetravanje nije moguće vrijednosti su vrlo visoke.

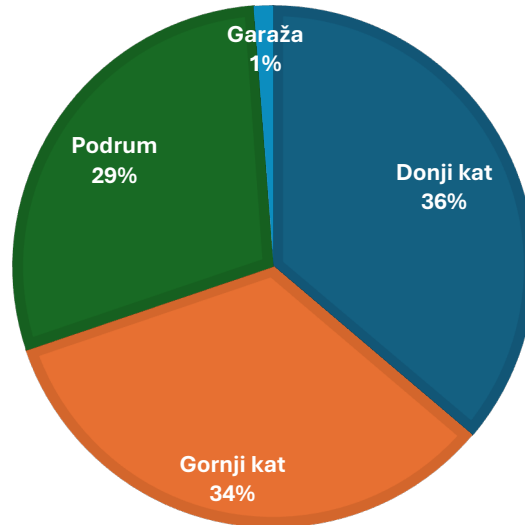
Donji kat ima najvišu prosječnu vrijednost koncentracije radona od 314 Bq/m³, uz stabilniji raspon vrijednosti (max. 633 Bq/m³ i min. 96 Bq/m³).

Gornji kat ima blago niže prosječne vrijednosti od 292 Bq/m³ i nešto nižu maksimalnu vrijednost od 585 Bq/m³, što prikazuje umjereno opterećenje radonom.

Garaža je prostorija s najnižim vrijednostima u svim kategorijama, maksimalna koncentracija radona je 52 Bq/m³, a prosjek samo 10 Bq/m³.

SREDNJA VRIJEDNOST PREMA PROSTORIJAMA ZA 7 DANA

■ Donji kat ■ Gornji kat ■ Podrum ■ Garaža



Grafikon 38. - Raspodjela ukupnog izmjenjenog radona za prostorije u kojima se provodio monitoring

Grafikon 38. prikazuje odnos koncentracije radona u četiri prostorije gdje se provodilo mjerenje. Donji kat ima najveći udio prosječne vrijednosti radona jer je mjerenje provođeno u hladnijem dijelu proljeća kad je prosječna temperatura unutar tih sedam dana mjerenja bila 5 °C. Grijanje je i dalje radilo, u prostoriji se pušilo i zbog manjih temperatura nije se provjetralo.

Gornji kat prikazuje malo manji postotak od donjeg kata, ali prikazuje da iako se nalazi na vrhu samog objekta zračenje radonom je i dalje prisutno i to u većoj mjeri. Monitoring se provodio također tijekom hladnijih dana kada je prosječna temperatura bila 12 °C. Grijanje je i dalje bilo u funkciji i provjetranje se nije često provodilo.

Podrum ima prosjek od 29 % i zanimljivo je što je manji od gornjeg i donjeg kata, a razlog tome je što je u vremenu mjerenja provjetranje bilo često i prostor se koristio tako da se radon nije mogao zadržavati u prostorijama, već je bila prisutna cirkulacija zraka. Tijekom noći vrijednosti su porasle (*Grafikon 31.*) i ukazale na jaki prirodni prodor radona kroz tlo.

Garaža je pokazala izloženost od samo 1 % te je utvrđeno da često provjetranje prostorije i korištenje može u velikoj mjeri doprinijeti smanjenju zadržavanja i akumulacije radona.

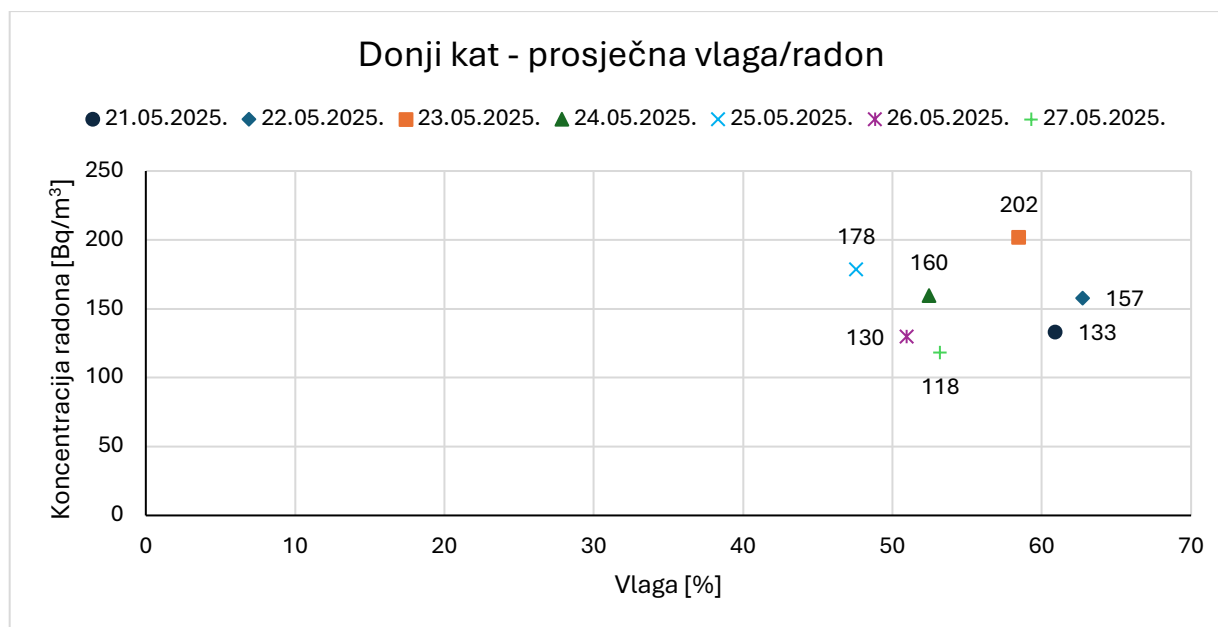
♦ DRUGA FAZA – TOPLIJE VRIJEME

Nakon što smo izmjerili prvi dio koncentracija radona za razdoblje od 6. ožujka do 8. travnja 2025., u uvjetima nižih vanjskih temperatura i smanjenog provjetravanja prostorija, uslijedio je drugi dio mjerenja koji je trajao od 13. svibnja do 12. lipnja 2025. godine. Cilj drugog mjerenja je bio analizirati sezonske razlike u koncentraciji radona u zatvorenim prostorijama te ih usporediti s rezultatima iz hladnijeg perioda mjerenja.

U toplijem razdoblju zabilježene su niže koncentracije radona nego u zimskom periodu, zbog učestalog i duljeg provjetravanja prostorija. Smanjena upotreba grijanja i manje temperaturne razlike smanjile su nakupljanje radona.

Ovim mjerenjem provedena je izravna usporedba utjecaja godišnjeg doba na prisutnost radona u različitim prostorijama. Sljedeći podaci prikazuju rezultate mjerenja radona u kasnom proljetnom periodu te se mogu koristiti za usporedbu s podacima iz ranog proljetnog perioda. Zabilježeni rezultati mogu se koristiti kod provedbe preventivnih mjera u prostorijama u kojima su izmjerene visoke koncentracije [41].

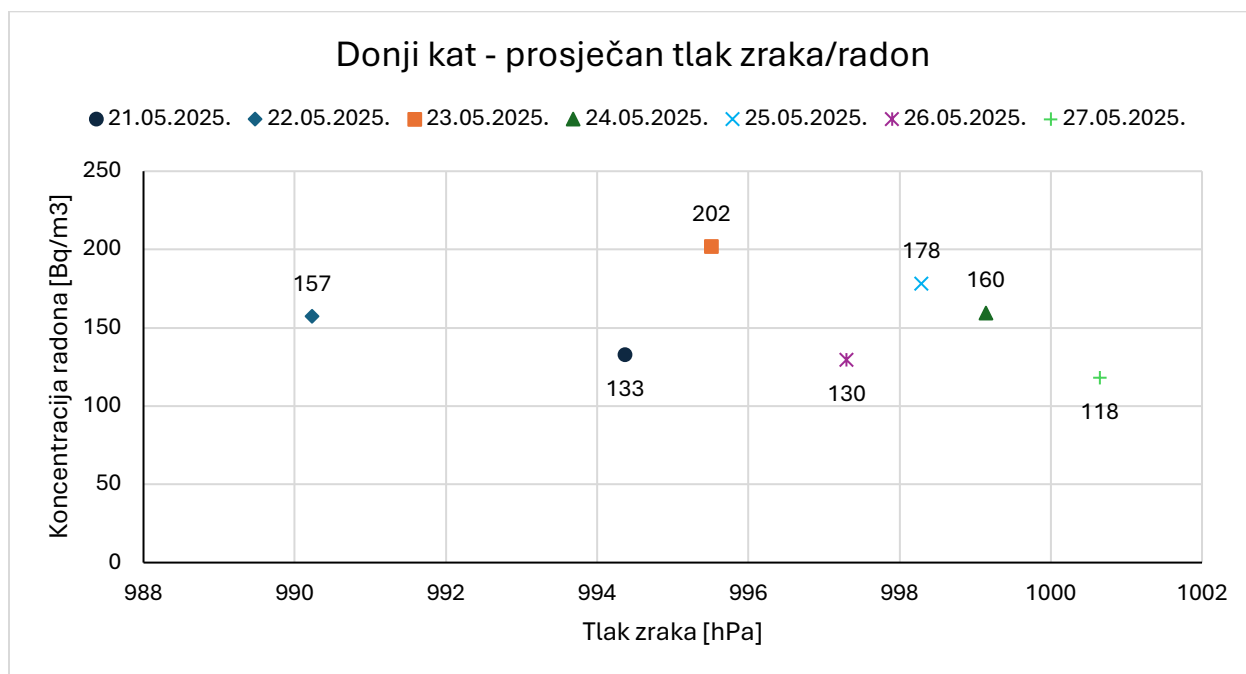
- DONJI KAT (kuhinja, blagovaonica i dnevni boravak)



Grafikon 39. – Odnos relativne vlage i radona za donji kat

Grafikon 39. prikazuje odnos relativne vlage zraka (%) i koncentracije zračenja radona (Bq/m^3) u razdoblju od 21. do 27. svibnja 2025. godine. Relativna vlaga zraka varirala je u rasponu od 48 % do 63 %, s najvišom vrijednosti 22. svibnja (63 %) i najnižom vrijednosti 25. svibnja (48 %). Koncentracije radona varirale su od 118 Bq/m^3 (27. svibnja) do 202 Bq/m^3 (23. svibnja). Prema kraju tjedna vidljiv je pad koncentracije radona i vlage. Na grafikonu se može primijetiti pozitivna korelacija (vrijednosti radona su tri dana bile povišene kao i vlaga), gdje su najviše vrijednosti radona zabilježene kada je vlaga bila u blagom padu (58 % za 23. svibnja). Nižom vlagom (ispod 55 %) prostor postaje pogodniji za širenje radona, osobito ako je provjetravanje onemogućeno. Ipak, zbog toplijeg vremena moguće da je tijekom tjedna došlo do intenzivnijeg provjetravanja, što je rezultiralo smanjenjem zračenja. Vlaga u ovom slučaju djeluje kao faktor za povećanje zračenja, utječe na kretanje i zadržavanje radona u zraku, ali pokazuje i kako prirodna mikroklima prostora može utjecati na prisutnost radona u zraku [36].

Ovi podaci pokazuju da se u toplijem razdoblju koncentracija radona na donjem katu znatno smanjuje u usporedbi s vrijednostima izmjenjenima u ožujku, kada su prosječna zračenja iznosila preko 300 Bq/m^3 . Stabilna ili niža razina vlage u kombinaciji s boljim provjetravanjem doprinijela je značajnom smanjenju akumulacije radona u zatvorenom prostoru [29, 36].



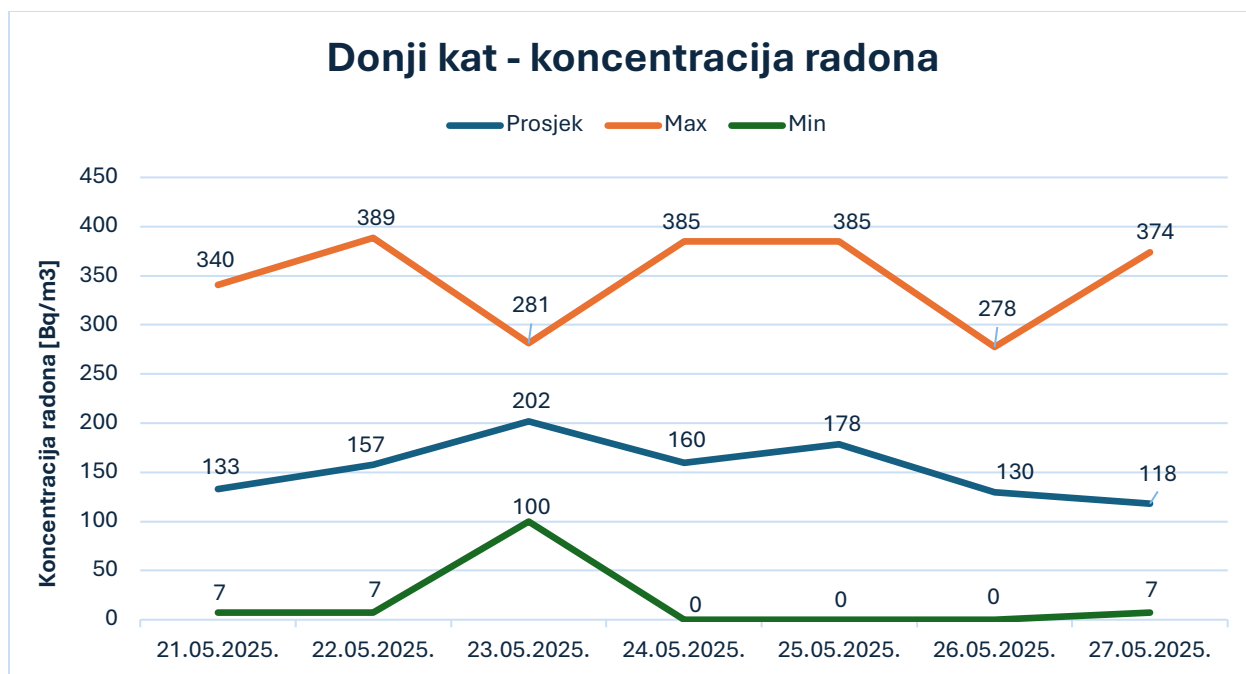
Grafikon 40. - Odnos tlaka zraka i radona za donji kat

Grafikon 40. prikazuje dnevne vrijednosti atmosferskog tlaka i koncentracije radona izmjenjenog u donjem dijelu kuće tijekom razdoblja od 21. do 27. svibnja 2025. Atmosferski tlak je varirao u rasponu od 990 hPa (22. svibnja) do 1001 hPa (27. svibnja), dok se koncentracija radona kretala u rasponu od 118 Bq/m³ (27. svibnja) do 202 Bq/m³ (23. svibnja). Najveća vrijednost zabilježena je 23. svibnja (202 Bq/m³) pri tlaku od 996 hPa, dok se prema kraju tjedna uz porast tlaka smanjila i razina radona (27. svibnja zračenje je iznosilo 118 Bq/m³). Može se uočiti blaga inverzna povezanost između nižeg tlaka i veće koncentracije radona odnosno, kada je tlak zraka niži, koncentracije radona rastu.

Usporedno s prethodnim mjerenjima koje su provedene u ožujku, vrijednosti za mjesec svibanj znatno su niža. Tada je prosjek koncentracije radona iznosio oko 314 Bq/m³, dok su u svibnju sve izmjerene vrijednosti bile ispod preporučene granice od 300 Bq/m³. Ova razlika povezana je sa sljedećim:

- Toplije vrijeme – koje je omogućilo češće i dulje provjetravanje prostora.
- Grijanje nije bilo u funkciji – sprječava dodatnu akumulaciju radona u zavarenom prostoru.
- Više prirodne izmjene zraka.

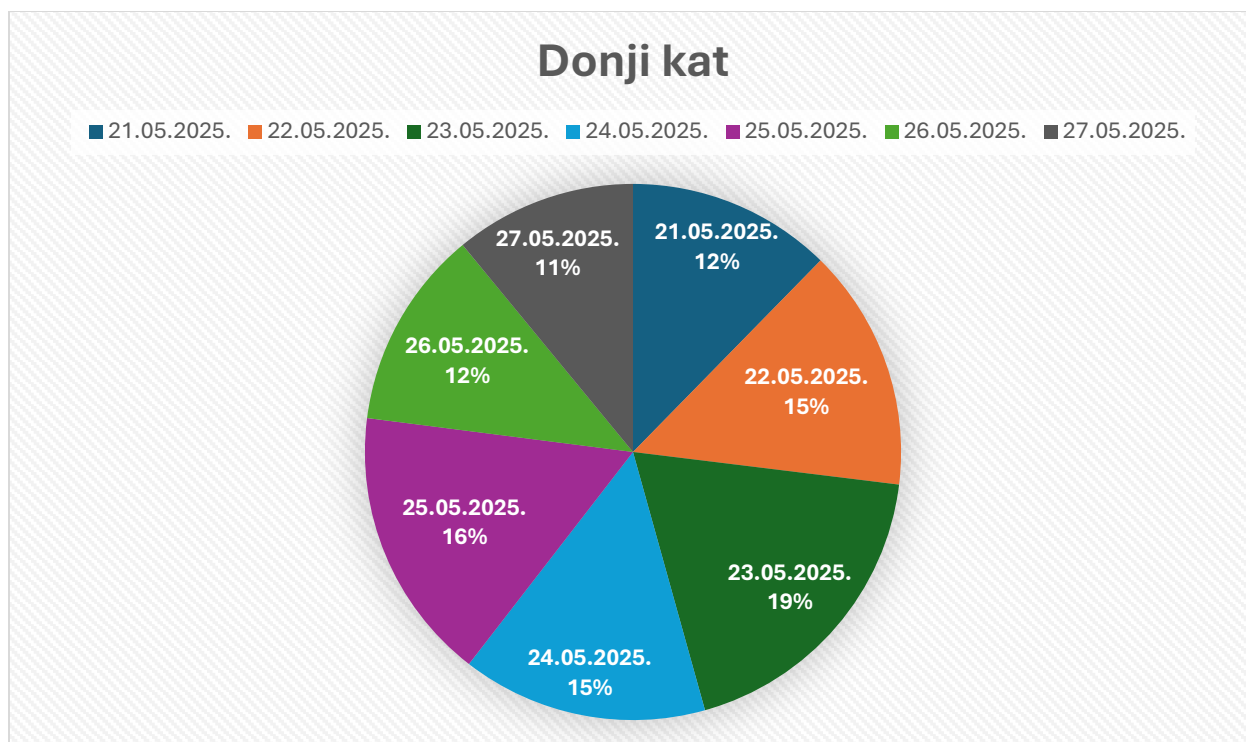
Donji kat je prostor koji je u neposrednom kontaktu s tlom, posebno je osjetljiv na prodor radona, no pravilnim provjetravanjem može se značajno smanjiti razina radona. Rezultat potvrđuje važnost mjerenja u različitim godišnjim dobima i poticanje na prirodno provjetravanje (osobito u prostorijama gdje ljudi više borave) [41].



Grafikon 41. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za donji kat

Grafikon 41. prikazuje da su se prosječne vrijednosti radona kretale od 133 Bq/m³ do 202 Bq/m³, a maksimalna izmjerena vrijednost bila je 389 Bq/m³ (22. svibnja). Minimalne vrijednosti su u nekoliko navrata iznosile svega 0 Bq/m³ -7 Bq/m³, što ukazuje na prisutnost radona, ali i na njegovu brzinu nestajanja kada je prostor otvoren. Donji kat je u neposrednom kontaktu s tлом i često je manje prozračen te se u njemu koriste duhanski proizvodi. Tijekom hladnih mjeseci izrazito je vidljivo koliko navedene tvrdnje utječu na koncentracije radona, no u toplije doba uz redovito otvaranje prozora i vrata, koncentracije se znatno snižavaju.

Donji kat je rizičniji od gornjeg, no uz sezonsko praćenje i osnovne navike provjetravanja, radon se može održati ispod graničnih vrijednosti.



Grafikon 42. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za donji kat

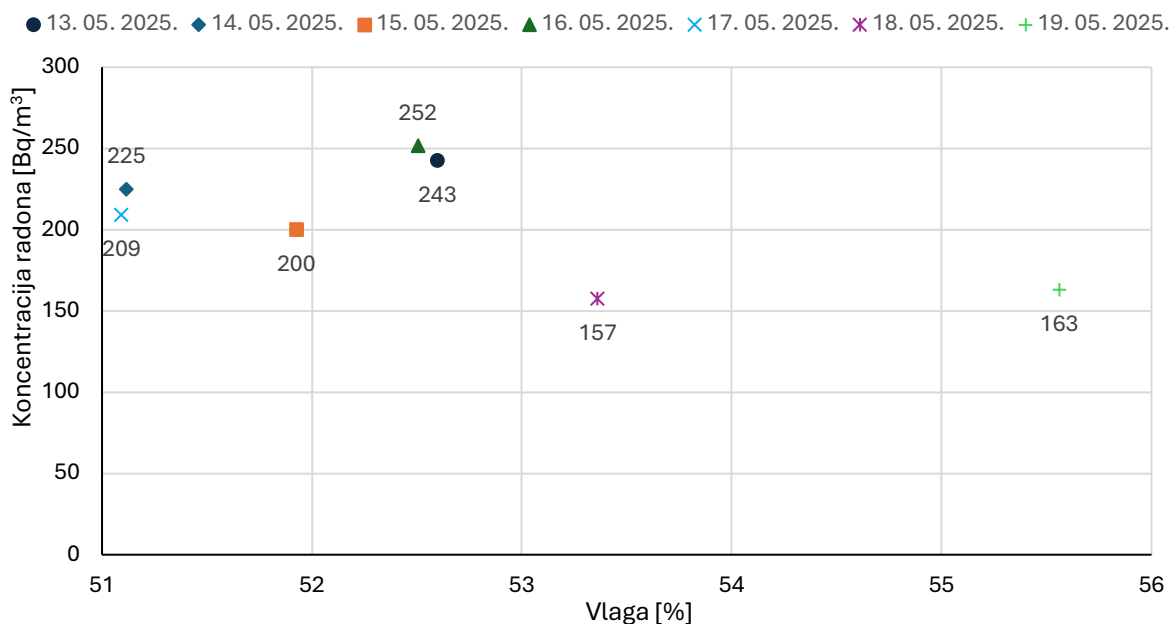
Grafikon 42. prikazuje da je najveći udio zračenja zabilježen 23. svibnja (19 %), dok su posljednji dani (26. i 27. svibnja) doprinijeli najmanjim udjelima od (12 % i 11 %) čime se potvrđuje blagi silazni trend. Raspodjela pokazuje da su koncentracije bile povišene u sredini tjedna, dok je prema kraju tjedna došlo do smanjenja vrijednosti.

Donji kat zbog blizine tla i učestalijeg korištenja, predstavlja značajan faktor izloženosti. Dani s većim udjelom radona (npr. 23. i 25. svibnja) pokazuju da neredovito provjetravanje ili promjene vremenskih prilika mogu brzo povećati koncentracije radona.

U zdravstvenom kontekstu, kronična izloženost koncentracijama većim od 300 Bq/m³ može doprinijeti oštećenju plućnog tkiva, posebice kod osoba s respiratornim problemima ili kod pušača [4]. S okolišnog aspekta, iako radon ne ostaje dugoročno u zraku na otvorenom prostoru, njegovo zadržavanje unutar zatvorenih prostorija utječe na kvalitetu unutarnjih prostora i zdravlje stanara [31].

- GORNJI KAT (dvije spavaće sobe, kupaoonica i hodnik)

Gornji kat - prosječna vlaga/radon

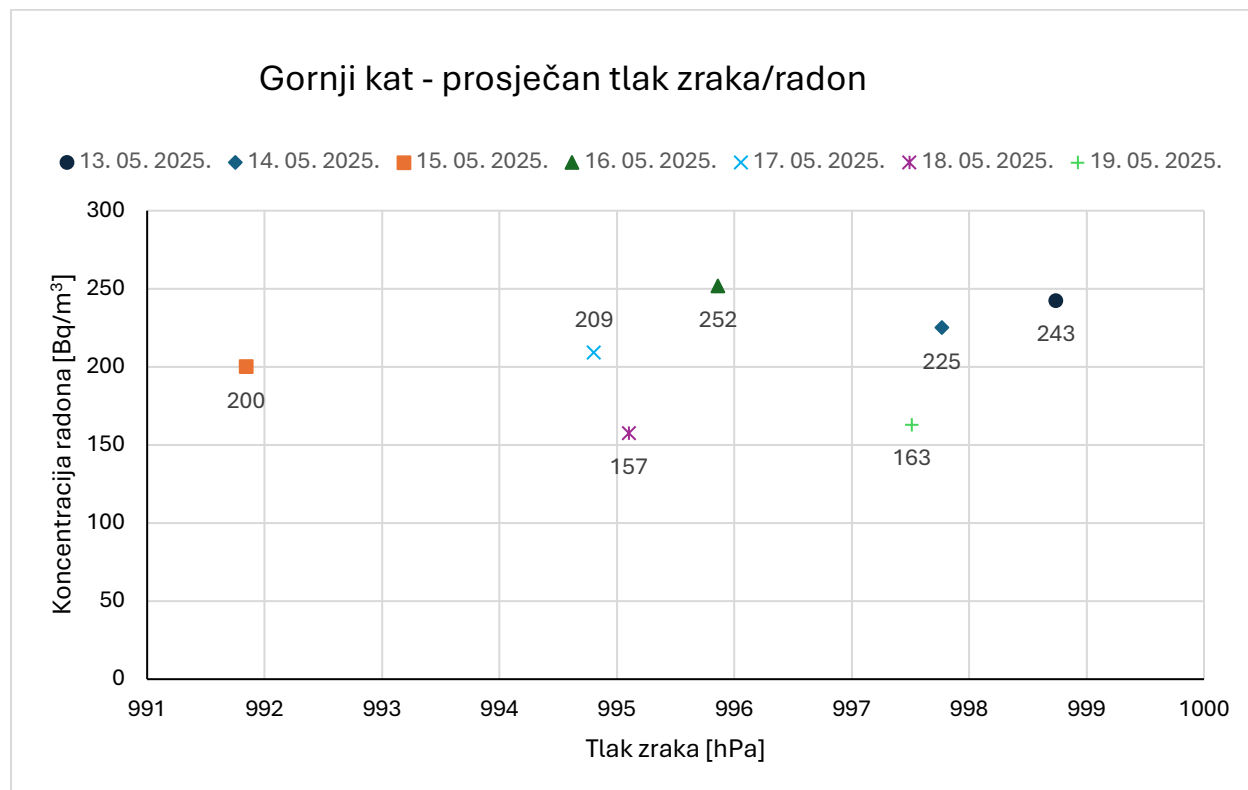


Grafikon 43. - Odnos relativne vlage i radona za gornji kat

Grafikon 43. prikazuje odnos vlage zraka i koncentracije radona tijekom 13. svibnja do 19. svibnja 2025. godine. Vlaga se kretala u rasponu od 51 % do 55 %, što upućuje na stabilnu mikroklimu unutar prostorije tijekom promatranog razdoblja, dok je koncentracija radona varirala između 157 Bq/m³ i 252 Bq/m³. Najviša vrijednost zabilježena je 16. svibnja (252 Bq/m³), a najniža 18. svibnja (157 Bq/m³). Tijekom kraja tjedna primijećen je pad koncentracije radona. Stabilna razina vlage uz dobro provjetravanje može doprinijeti smanjenju koncentracije radona. Vlaga ne može uzrokovati povećanje vrijednosti radona, ali može utjecati na zadržavanje čestica i promjenu cirkulacije zraka. Povišena vlaga može usporiti cirkulaciju zraka, što može uzrokovati povećanje vrijednosti radona, ali u ovom slučaju to se nije dogodilo (blago povišena krajem tjedna), što je povezano s redovitim provjetravanjem prostora [29, 36].

Rezultati pokazuju da se u toplijim mjesecima, kada su prozori otvoreniji i grijanje nije u funkciji, koncentracija radona se može smanjiti čak i uz povećane vrijednosti vlage. Gornji kat tijekom ožujka bilježi prosječne vrijednosti koje su prelazile 300 Bq/m³, vrijednosti koje su izmjerene u

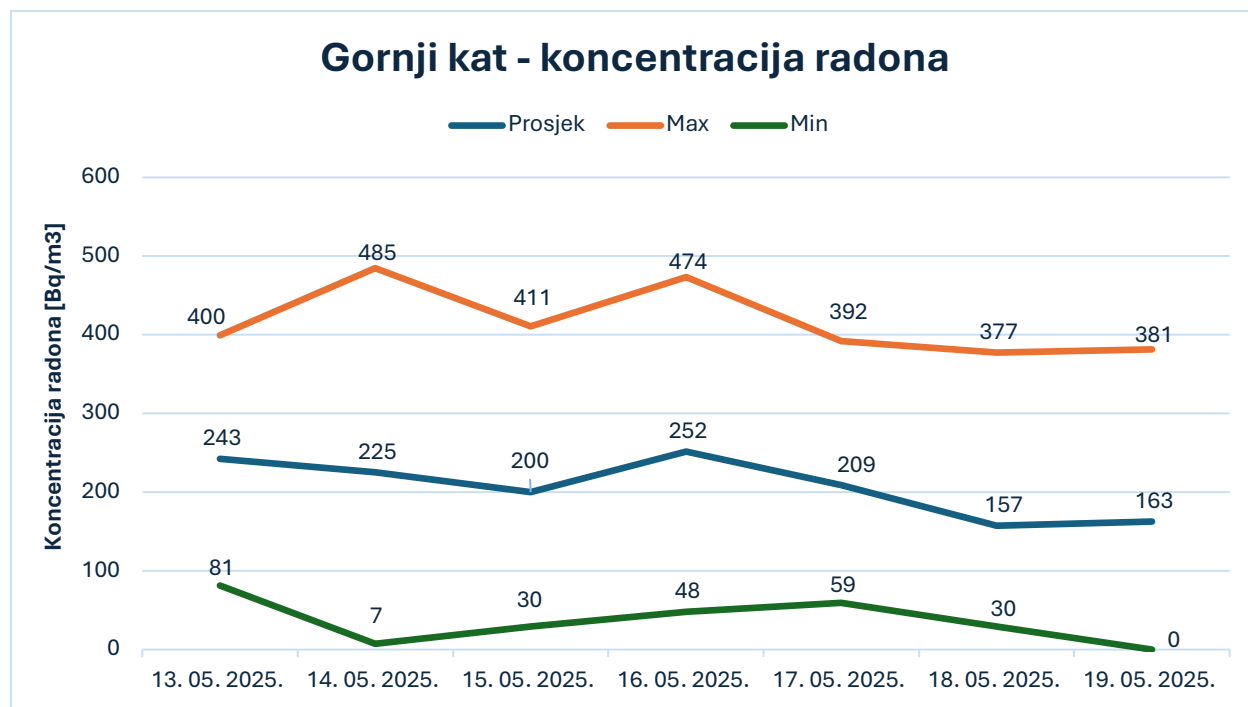
ovom periodu osjetno su niže i ispod granično preporučenih vrijednosti (300 Bq/m^3). Ovo potvrđuje da je dobro provjetravanje učinkovita mjera za smanjenje vrijednosti radon zračenja [42].



Grafikon 44. - Odnos tlaka zraka i radona za gornji kat

Grafikon 44. prikazuje vrijednosti tlaka zraka i radona na gornjem katu tijekom drugog ciklusa mjerenja u periodu od 13. do 19. svibnja 2025. godine. Atmosferski tlak tijekom tjedna kretao se između 992 hPa i 999 hPa, dok su koncentracije radona iznosile od 157 Bq/m^3 (18. svibnja) do 252 Bq/m^3 (16. svibnja). Iz grafikona se može vidjeti blagi pad vrijednosti radona tijekom kraja tjedna. Može se uočiti da su najviše koncentracije radona (252 Bq/m^3) praćene s manjim vrijednostima tlaka zraka (996 hPa). Niži atmosferski tlak može pospješiti ulaska radona iz građevinskog materijala i tla u zrak unutar prostorije. Niže vrijednosti radona praćene su višim vrijednostima tlaka zraka, što znači da viši tlak može usporiti prodiranje radona i smanjiti njegovo raspršivanje [43].

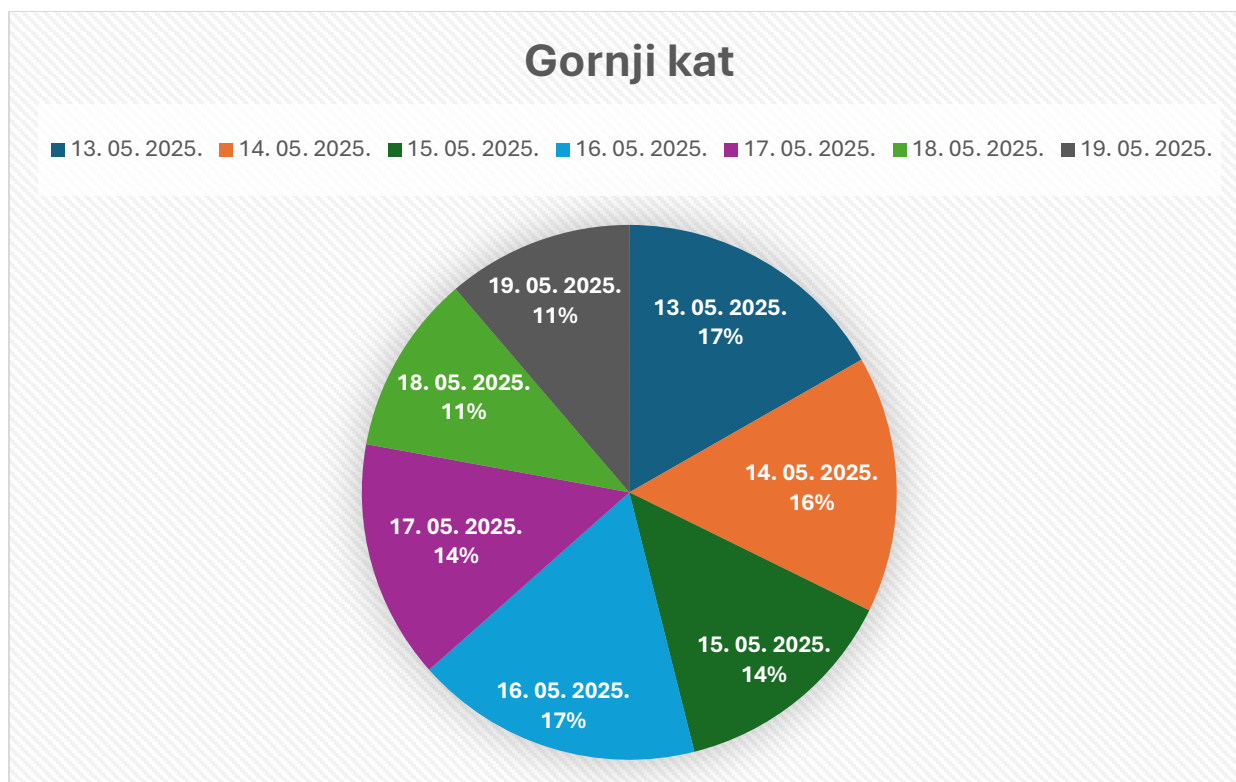
Mjerenja na gornjem katu, u drugom ciklusu pokazala su smanjenje vrijednosti radona u odnosu na prvi ciklus, kada su vrijednosti redovito prelazile 300 Bq/m³. Stabilan tlak i više vanjske temperature koje su pridonijele mogućnosti redovitog provjetravanja prostora utjecale su na smanjenje razine radona u zraku.



Grafikon 45. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za gornji kat

Grafikon 45. prikazuje prosječnu koncentraciju radona s početnih 243 Bq/m³ na 163 Bq/m³ krajem tjedana. Najviša maksimalna vrijednost iznosi 485 Bq/m³ (14. svibnja), što je znatno iznad preporučenih graničnih vrijednosti od 300 Bq/m³. Minimalne vrijednosti osciliraju od 0 Bq/m³ (19. svibnja) do 81 Bq/m³ (13. svibnja), što prikazuje na prisutno redovito provjetravanje i cirkulaciju zraka pred kraj tjedna. Ove vrijednosti potvrđuju da gornji kat, iako je najudaljeniji od tla, može lako akumulirati radon u zatvorenim uvjetima, ali uz redovito provjetravanje vrijednosti se mogu održavati u granicama da ne štete ljudskom zdravlju.

Redovito otvaranje prozora i cirkulacija zraka iznimno su učinkoviti na višim etažama te se može zaključiti da se uz dobru ventilaciju ili provjetravanje, radon može ukloniti ili svesti njegovu koncentraciju na minimalne vrijednosti [42].



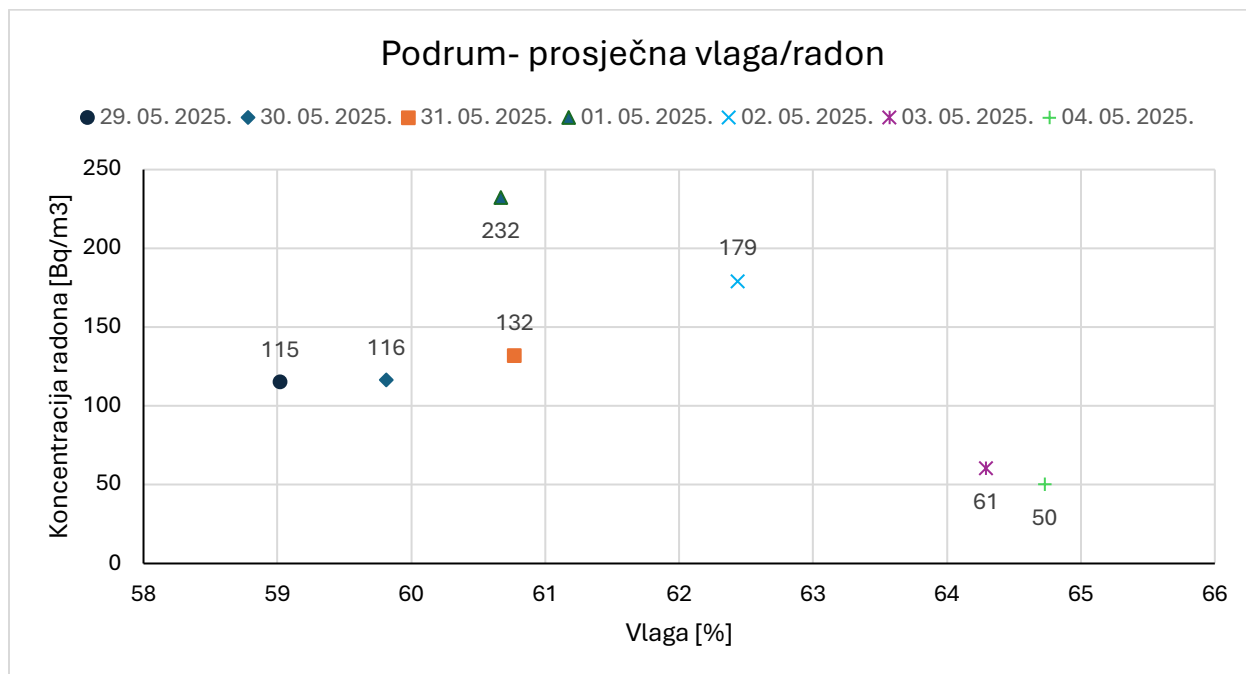
Grafikon 46. - Raspodjela ukupnog izmjerene radona za gornji kat

Grafikon 46. prikazuje da je najveći udio u ukupnoj koncentraciji radona izmjeren 13. i 16. svibnja (17 %), što se može vidjeti i na linijskim grafikonima gdje su tog dana zabilježene više razine radona. Dani s najmanjim udjelima su 18. i 19. svibnja (11 %), što se poklapa s nižim vrijednostima zabilježenim na prethodnim grafikonima, vrijednosti pripadaju trenucima kada je prostor bio provjetran. Ukupna raspodjela je relativno ravnomjerna, što ukazuje na umjerenu i stabilnu razinu oscilacija kroz tjedan.

Gornji kat je najudaljeniji od tla, ali bilo je dana kad je provjetranje bilo smanjeno (npr. 13. i 16. svibnja), što pokazuje da ni gornje etaže nisu u potpunosti zaštićene od prodiranja radona. Dugotrajno zadržavanje radona u prostorijama gdje se više boravi ili spava može povećati rizik od udisanja štetnih čestica, osobito ako su prozori zatvoreni zbog vanjskih atmosferskih uvjeta (npr. kiša i nevrijeme) [4].

Vrijednosti su ipak u toplijem razdoblju bile uglavnom ispod preporučenih graničnih vrijednosti te je redovito provjetranje i dobra cirkulacija zraka ključna za održavanje kvalitete zraka [42]. U prostorijama gdje se svakodnevno najviše boravi potrebno je provoditi navedene mjere jer se time smanjuje rizik od kancerogenih učinaka radona [4].

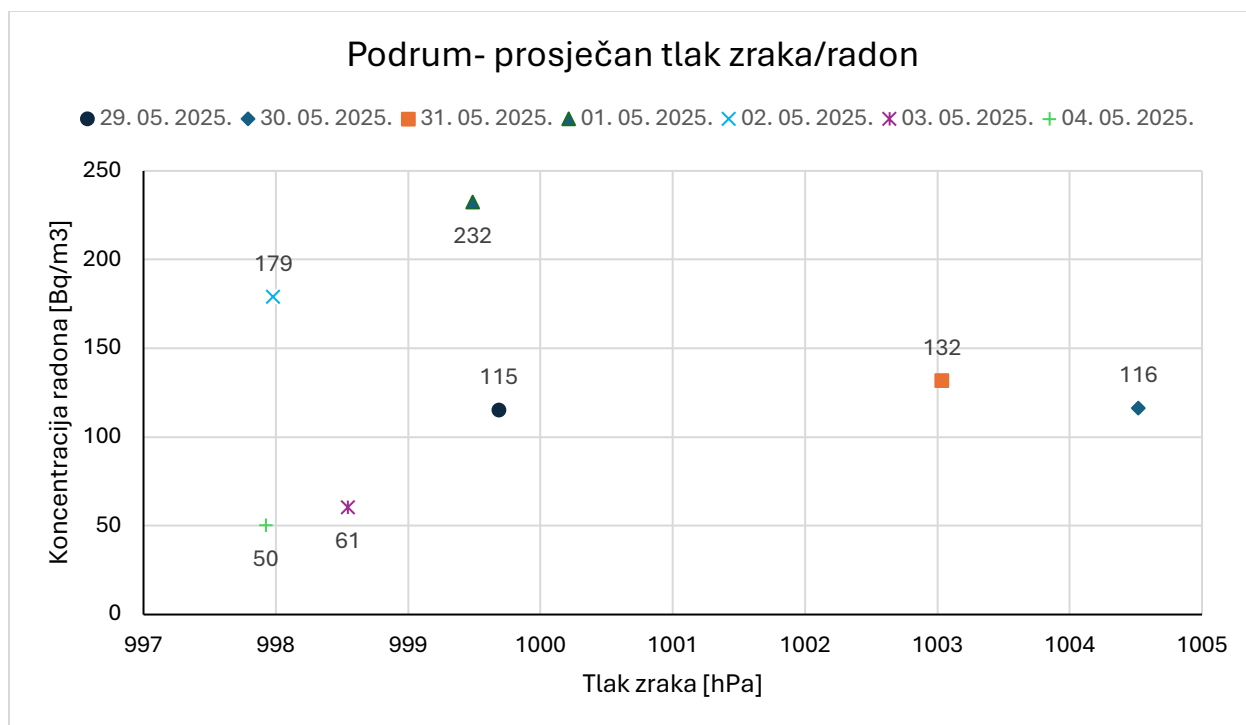
- PODRUM



Grafikon 47. - Odnos relativne vlage i radona za podrum

Grafikon 47. prikazuje vrijednosti relativne vlage zraka i koncentracije radona tijekom razdoblja od 29. svibnja i 4. lipnja 2025. godine. Relativna vlaga zraka raste tijekom tjedna od 59 % (29. svibnja) do 65 % (4. lipnja). Koncentracije radona pokazuju veću promjenjivost tijekom mjerenja. Najviša vrijednost zabilježena je 1. lipnja (232 Bq/m^3), dok je najniža zabilježena 4. lipnja (50 Bq/m^3). Vlaga zraka se povećava, dok koncentracija radona ima nelinearni tijek s vrhuncem u početku lipnja, nakon čega slijedi nagli pad. Može se uočiti da u danima kada vlaga lagano raste (61 % – 62 %), dolazi do viših vrijednosti radona (232 Bq/m^3 i 179 Bq/m^3). Nakon toga, unatoč povećanju vlage, dolazi do naglog pada vrijednosti koncentracije radona, što je posljedica pojačanog provjetravanja i korištenosti prostorije.

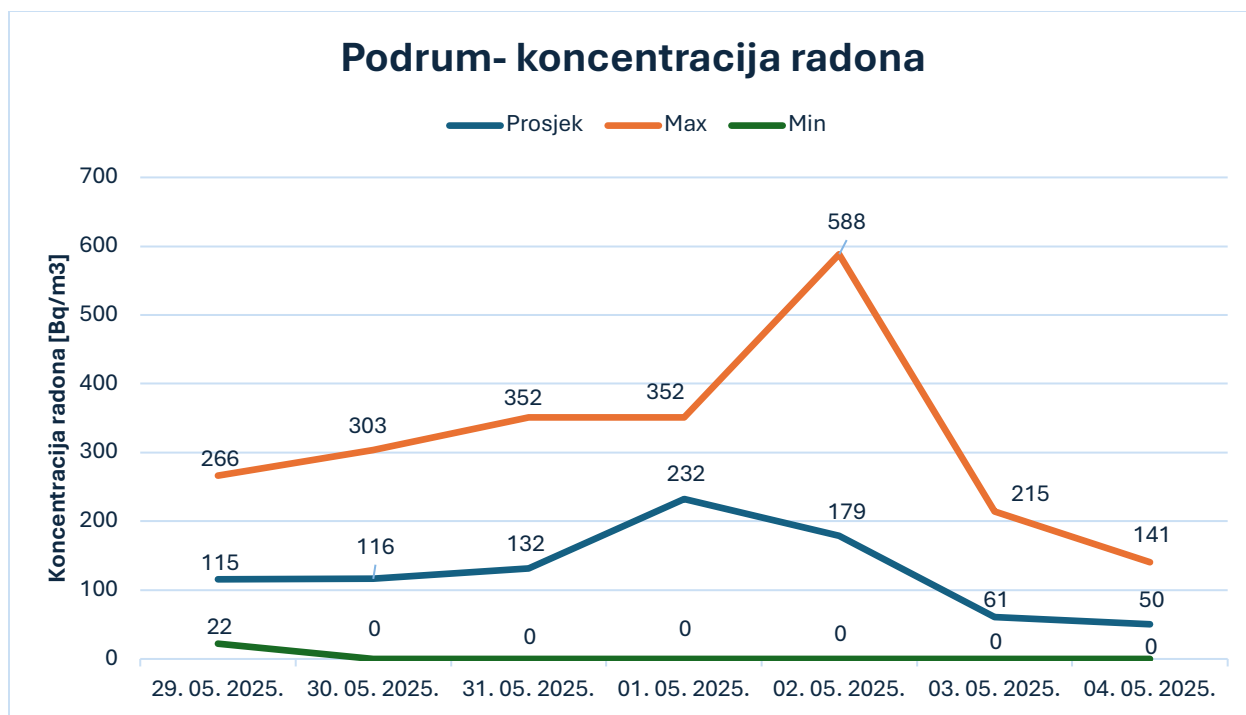
Iako se vlaga zraka u podrumu tijekom ovog ciklusa mjerenja povećala, koncentracija radona ostala je u granicama ispod preporučenih 300 Bq/m^3 . To pokazuje da toplije vrijeme, mogućnost provjetravanja i izmjena zraka imaju ključan utjecaj na koncentraciju radona, bez obzira na prisutnost vlage. Ove vrijednosti prikazuju učinkovitost sezonskog provjetravanja i mikroklimu u smanjenju radonskog zračenja, čak i u prostorijama koje su po prirodi najosjetljivije na njegov prodor [42].



Grafikon 48. - Odnos tlaka zraka i radona za podrum

Grafikon 48. prikazuje odnos između tlaka zraka i radona u drugom ciklusu mjerenja u periodu od 29. svibnja do 4. lipnja 2025. Atmosferski tlak varira između 1005 hPa i 1000 hPa, nakon čega je uslijedio pad vrijednosti na 998 hPa (1. i 4. svibnja). Koncentracija radona je varirala između 50 Bq/m³ (4. lipnja) do najviše 232 Bq/m³ (1. lipnja). Tek je nakon 1. lipnja (kad je zabilježena najviša vrijednost) vrijednosti radona počele su opadati. Stabilan tlak zraka i redovito provjetravanje pridonijeli su smanjenju vrijednosti koncentracije radona. U usporedbi s mjerenjima koje su provedena u hladnim mjesecima, kada je maksimalna zabilježena vrijednost iznosila 1000 Bq/m³, vidljivo je da se zračenje smanjilo i da prosječne vrijednosti ne prelaze 300 Bq/m³. Razlog toga su toplije vrijeme, stabilniji tlak i redovito provjetravanje.

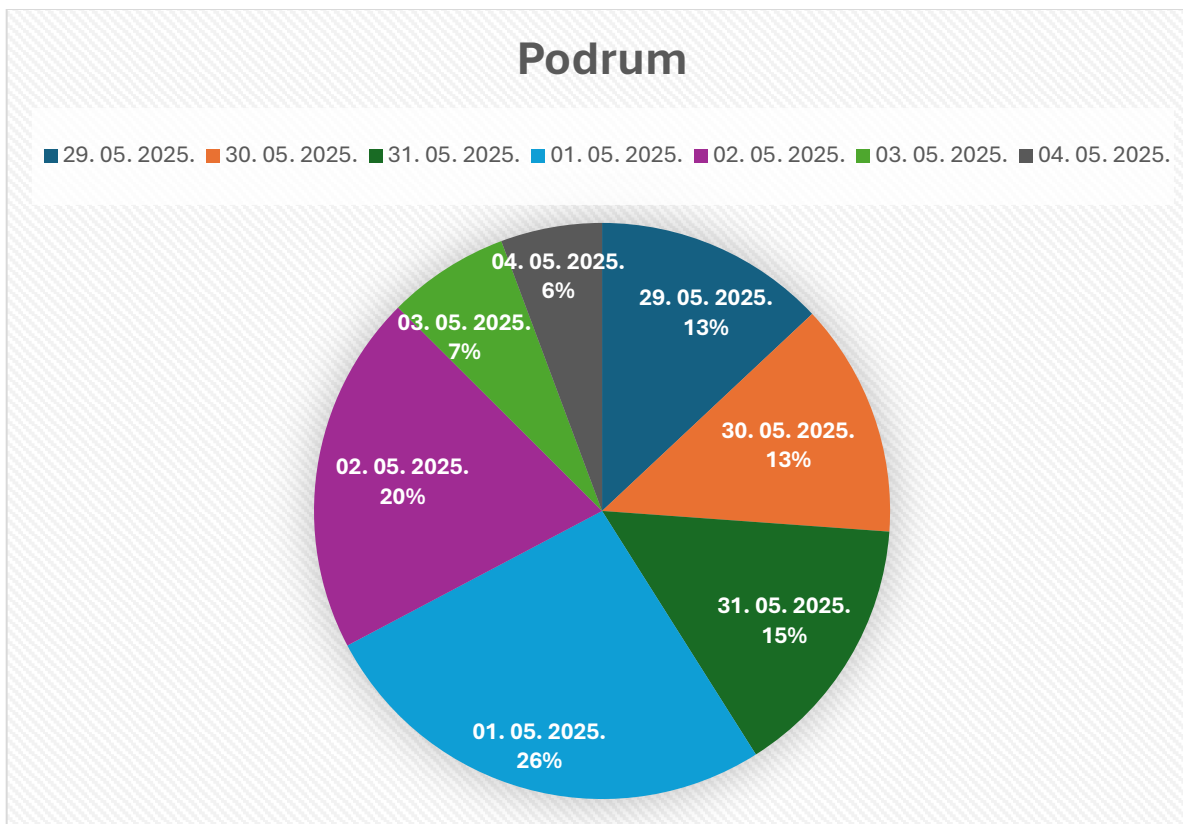
Koncentracija radona u podrumu se značajno smanjila u odnosu na zimski period. Ključnu ulogu u tome imaju redovita provjetravanja i sezonska mikroklima [42].



Grafikon 49. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za podrum

Grafikon 49. maksimalna vrijednosti zabilježena za podrum pokazuje najveću amplitudu koncentracije radona od svih četiri mjerenih prostorija. Prosječne vrijednost kreću se od 50 Bq/m³ (4. lipnja) do 232 Bq/m³ (1. lipnja), dok je maksimalna zabilježena koncentracija bila 588 Bq/m³ (2. lipnja). Minimalne vrijednosti su često bile 0 Bq/m³, ali samo ponekad što ukazuje da je podrum osjetljiv na dnevne promjene tlaka i cirkulaciju zraka. Najviše izmjerene vrijednosti (iznad 500 Bq/m³) ukazuju na potrebu stalnog provjeravanja i nadzora. Budući da je u neposrednom kontaktu s tlom, prodor radona je kontinuiran, a bez kontinuiranog provjetravanja moguće je njegovo nakupljanje. Povećanje koncentracije radona povezano je s naglim promjenama tlaka zraka, smanjenom cirkulacijom zraka i slabijem korištenju prostora.

Podrum je najkritičnija prostorija jer iako se razine koncentracije radona mogu kratkoročno smanjiti provjetravanjem, dugoročno bili bi bolje ugraditi sustav ventilacije i provoditi nadzor koncentracija [31, 42].



Grafikon 50. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za podrum

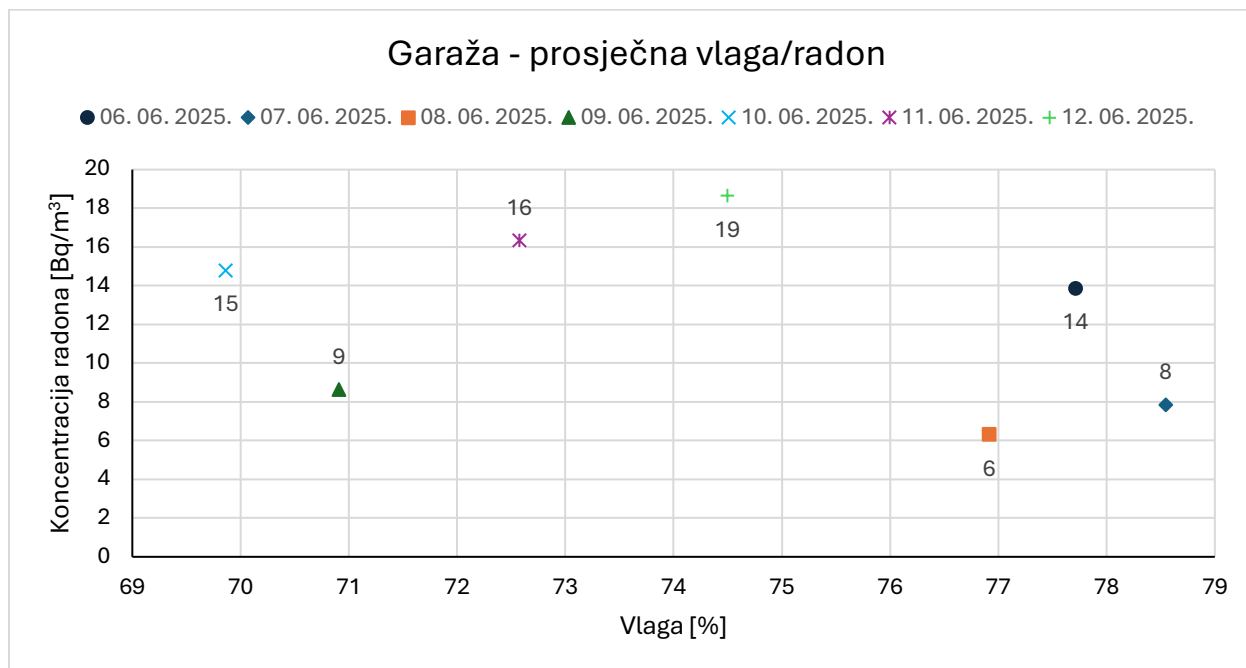
Grafikon 50. prikazuje najveće opterećenje radonom zabilježeno 1. lipnja (26 %), što se poklapa s maksimalnim koncentracijama iz toga dana (preko 500 Bq/m³). Značajan doprinos ima i 2. svibnja (20 %), dok posljednji dani (npr. 4. svibnja imao je 6 %) imaju zanemariv udio, što se može povezati s boljom cirkulacijom zraka i provjetravanjem. Raspodjela u ovom dijagramu nije ravnomjerna, što ukazuje na osjetljivost podruma na mikroklimatske uvjete te da koncentracije radona neprestano osciliraju.

Podrumi su najkritičnija zona za akumuliranje radona, što potvrđuje i dijagram gdje je vidljivo da je jedan dan (1. lipnja) udio radona bio čak 26 % od ukupne koncentracije. Visoke koncentracije radona nastaju jer se prirodno akumulira iz tla kroz pukotine i podne spojeve, osobito u građevinama gdje izolacija nije adekvatno postavljena [33].

U zdravstvenom smislu, boravak u podrumima s povišenim razinama radona čak i povremeno može povećati rizike od razvijanja raka pluća u sljedećih nekoliko godina [4].

S okolišnog stajališta, loša mikroklima u podrumu može utjecati na razvoj veće vlage i plijesni što dodatno pogoršava sigurnost za boravka u takvim prostorijama [36].

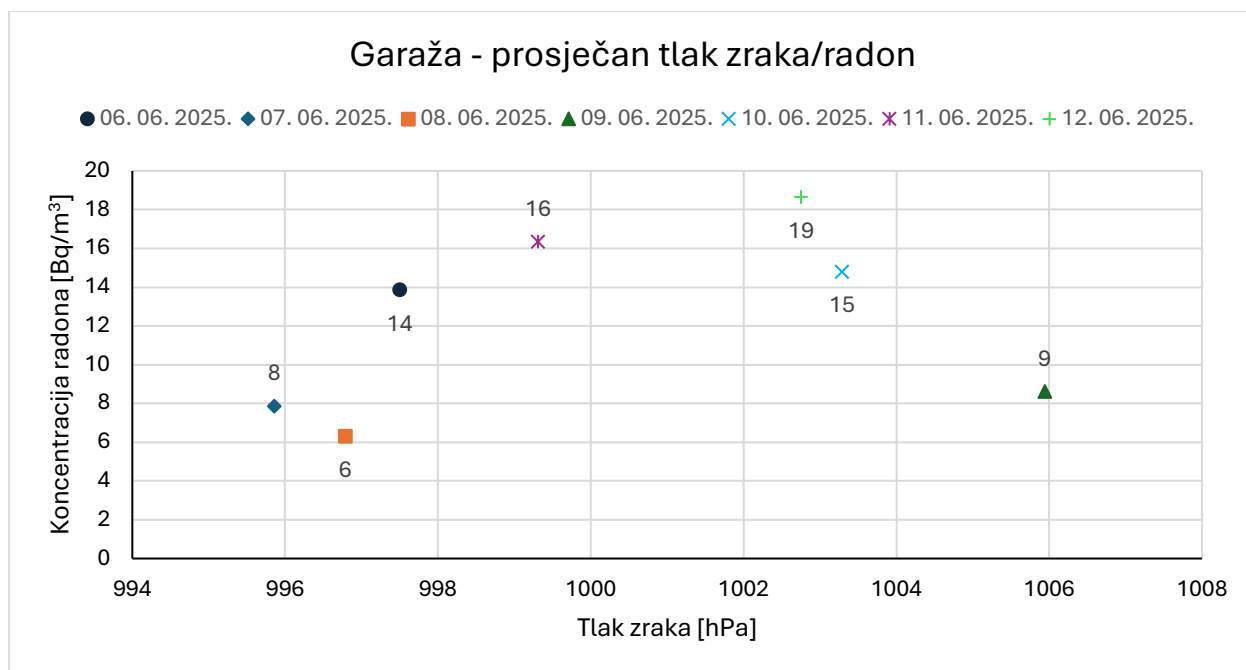
- GARAŽA



Grafikon 51. - Odnos relativne vlage i radona za garažu

Grafikon 51. prikazuje odnos vlage zraka i koncentracije radona u garaži tijekom 6. do 12. lipnja 2025. godine. Vlaga se kretala između 70 % i 79 % s najvećom vrijednosti 7. lipnja (79 %) i najnižom 10. lipnja (70 %). Koncentracija radona je bila dosta niska, najmanja vrijednost zabilježena je 8. lipnja (6 Bq/m³), a najviša 12. lipnja (19 Bq/m³). Unatoč visokim vrijednostima vlage, koncentracije radona ostale su niske svih sedam dana. Niske koncentracije radona upućuju da su provjetravanje i izolacija učinkovite. Visoka vrijednost vlage može biti posljedica zatvorenijeg prostora i nepovoljnih vremenskim uvjeta krajem tjedna, što nije uzrokovalo zadržavanje radona u visokim koncentracijama.

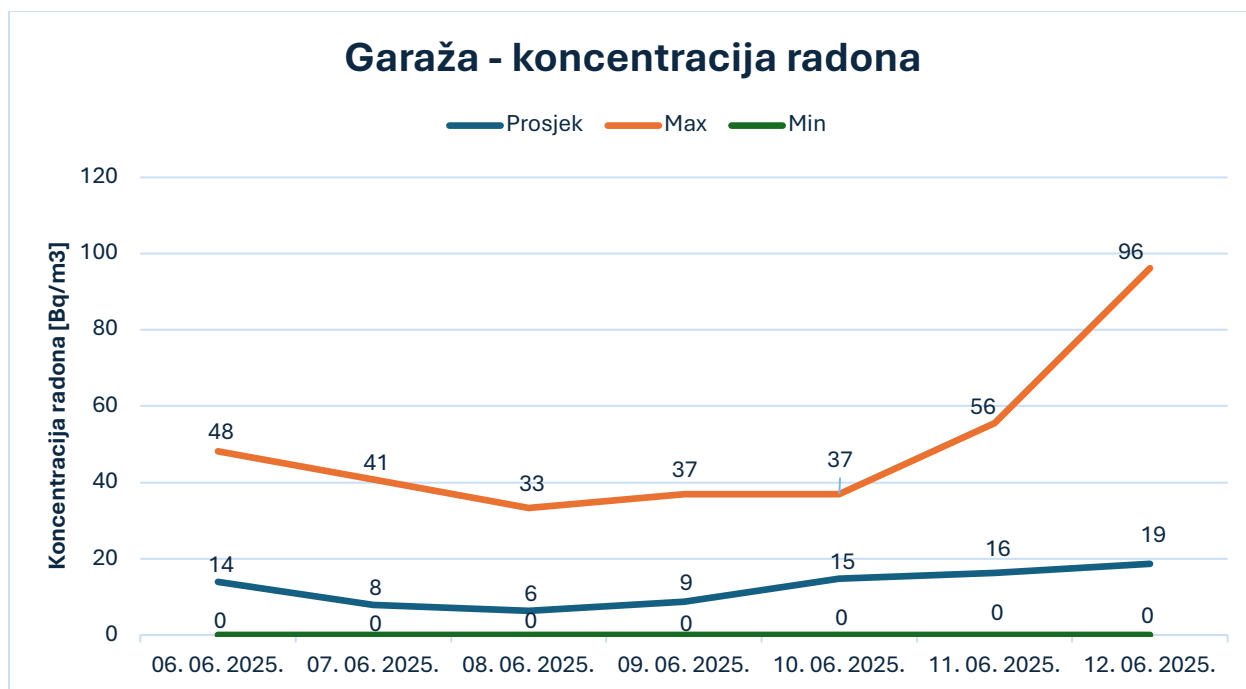
Rezultati mjerenja pokazuju da se u uvjetima više vlage, garaža u toplijem dijelu godinu ponaša kao nisko rizičan prostor za akumulaciju radona. Vrijednosti radona u ovom razdoblju znatno su niže od preporučenih granica (300 Bq/m³) i ne predstavljaju zdravstveni rizik [4].



Grafikon 52. - Odnos tlaka zraka i radona za garažu

Grafikon 52. prikazuje odnos između tlaka zraka i radona u drugom ciklusu mjerenja u periodu od 6. lipnja do 12. lipnja 2025. Atmosferski tlak se kretao od 996 hPa (7. lipnja) do 1006 hPa (9. lipnja), dok su se vrijednosti radona kretale u rasponu od 6 Bq/m³ (8. lipnja) do najviše 19 Bq/m³ (12. lipnja). Najveći porast koncentracija radona zabilježen je krajem tjedna i to bez značajne promjene tlaka, što može značiti da su drugi čimbenici imali utjecaj na više vrijednosti samog zračenja (manje provjetravanje u odnosu na prethodne dane). Očito su na razinu radona u garaži više utjecali faktori poput provjetravanja, otvorenosti prostora i učestalost korištenja prostorije, nego promjene tlaka. Niske vrijednosti radona pokazuju da je garaža dobro prozračena te da je prodor radona iz tla ograničen. Tijekom zimskog razdoblja vrijednosti su bile nešto više, što potvrđuje da provjetravanje ima ključnu ulogu u sprječavanju širenja radona.

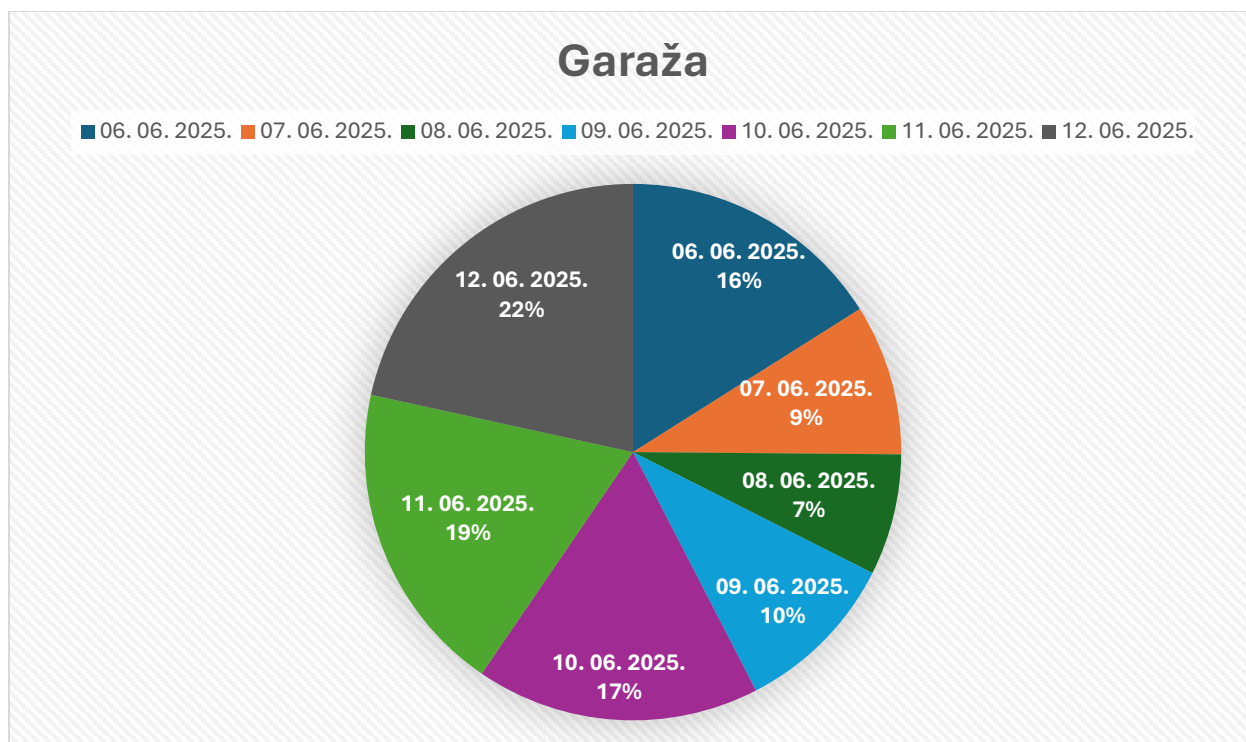
Ova mjerenja pokazala su da u garaži razine radona tijekom toplijeg vremena su vrlo niske. Ključni razlozi tome su toplije vrijeme, otvorenost prostora i dobra izmjena zraka unutar same prostorije [31, 42].



Grafikon 53. - Maksimalne, srednje i minimalne vrijednosti radona za garažu

Prosječne vrijednosti *Grafikona 53.* za koncentracije radona prikazuju niske vrijednosti tijekom većine tjedna, krećući se u rasponu od 0 Bq/m³ (7. i 8. lipnja) do 19 Bq/m³ (12. lipnja). Maksimalna koncentracija dosegla je 96 Bq/m³ posljednjeg dana mjerenja, dok su prethodnih dana maksimalne koncentracije bile znatno niže (između 33 Bq/m³ i 56 Bq/m³). Minimalne vrijednosti radona bile su najčešće 0 Bq/m³, što potvrđuje vrlo dobro provjetravanje prostora i cirkulaciju zraka. Na početku tjedna vrijednosti su bile gotovo zanemarive, ali u posljednja tri dana mjerenja zabilježen je postepen porast koncentracija radona. Razlog toga može biti smanjenje provjetravanja, manje korištenje prostorije ili promjene u vremenskim uvjetima.

Garaža je prostor u kojem su zabilježene najmanje koncentracije, no podaci iz drugog ciklusa mjerenja pokazuju da, ako se zanemari provjetravanje i smanji korištenje prostora, dolazi do porasta koncentracija radona. Sve izmjerene vrijednosti ipak ostaju vrlo niske i ne predstavljaju zdravstveni rizik, ali potvrđuju važnost redovitog otvaranja prostora i kontrole mikroklimе [31].



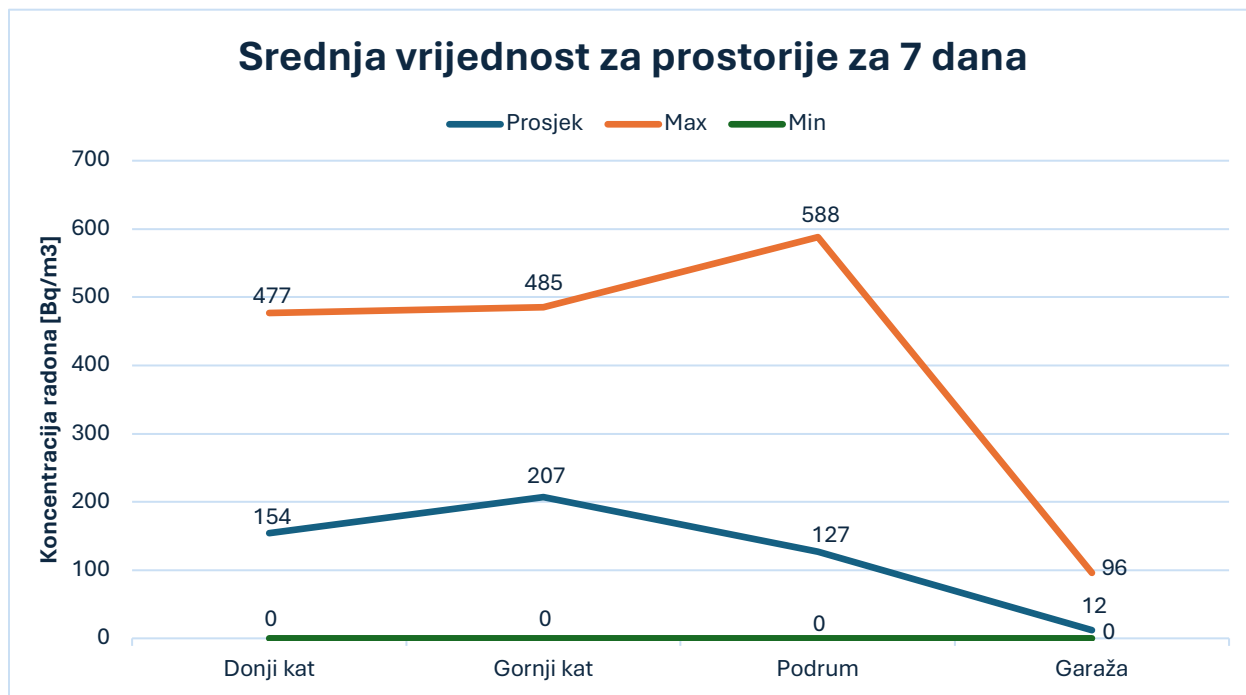
Grafikon 54. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za garažu

Na *Grafikonu 54.* je prikazani udio ukupne koncentracije radona zabilježen od 06. lipnja do 12. lipnja, kada je koncentracija dosegla najvišu vrijednost u cijelom tjednu (22 %). 7. i 8. lipnja udio je bio znatno manji od 9 % (7. lipnja) do 7 % (8. lipnja). Raspodjela grafikona prikazuje da garaža može naglo akumulirati radon, ali ga može i vrlo brzo apsorbirati ako se redovito provjetrava ili ako je prisutna cirkulacija zraka.

Garaža se smatra prostorom koji nije primarno namijenjen za boravak ljudi, nego se često u njima nalaze spremnici goriva, maziva i građevinski materijal. Kružni dijagram pokazuje da do najvećeg udjela radona dolazi posljednjih dana mjerenja (12. lipnja do 22 %), kada je koncentracija naglo porasla.

Dobiveni rezultati ukazuju da i pomoćne prostorije mogu predstavljati izvor sekundarne izloženosti zračenju, što može biti štetno ako su visoke vrijednosti zračenja te ako je garaža povezana s kućom bez odgovarajuće izolacije. U ovom primjer to nije slučaj, ali je česta pojava. Zdravstveni rizici ovise o vremenu provedenom u takvom prostoru, no s obzirom na moguće nakupljanje i ostalih štetnih tvari (npr. isparavanje goriva) kontroliranje kvalitete zraka kroz provjetravanje i cirkulaciju zraka ključne su za održavanje sigurnosti [31, 42].

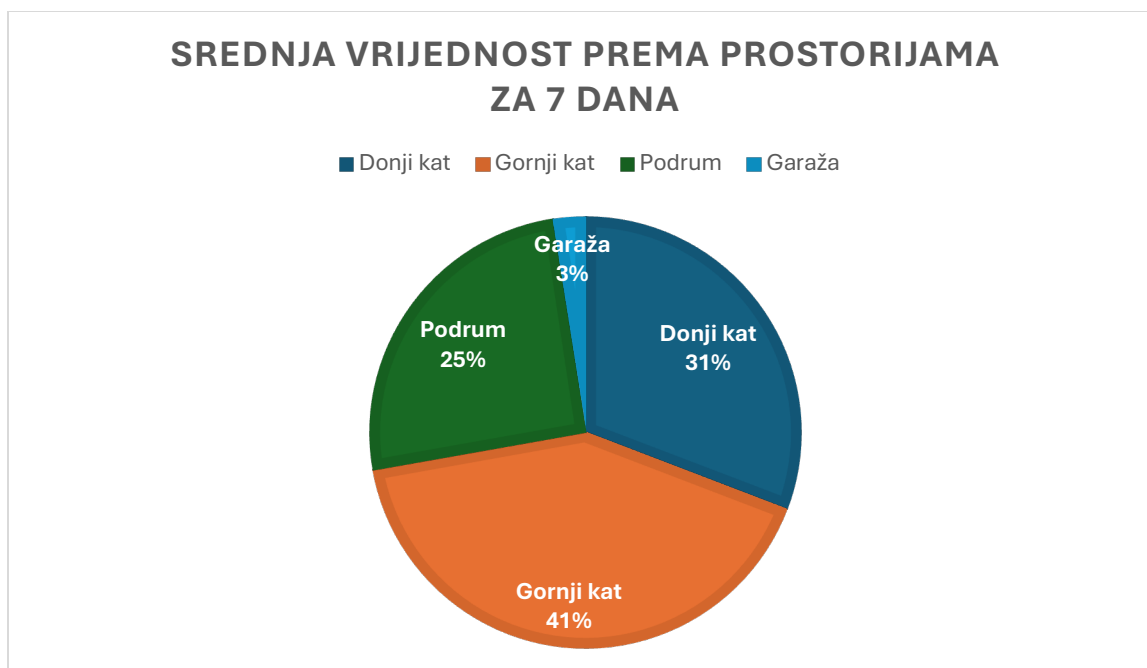
- ZAJEDNIČKI PRIKAZ PODATAKA



Grafikon 55. - Maksimalne, srednje i minimalne koncentracije radona

Grafikon 55. prikazuje srednje, maksimalne i minimalne koncentracije radona za sedam dana mjerenja na četiri različite lokacije. Gornji kat ima najveći prosjek od 207 Bq/m³, što pokazuje da ako se zanemari redovito provjetravanje (npr. zbog lošeg vremena), može doći do nakupljanja radona na višim etažama. Donji kat slijedi sa 154 Bq/m³, što je dokaz da se redovitom cirkulacijom zraka vrijednost zračenja može svesti na zadovoljavajuće, odnosno ispod granice dopuštenih vrijednosti od 300 Bq/m³. Podrum je prostorija koja je najizloženija akumulaciji radona što se može vidjeti iz maksimalnih izmjerenih vrijednosti od čak 588 Bq/m³, ali ipak ima prosjek od 127 Bq/m³, što dokazuje da redovito provjetravanje ima pozitivan učinak u smanjenju nakupljanja radona. Garaža ima vrlo nizak prosjek od 12 Bq/m³ zbog čestog korištenja prostora i dobre cirkulacije zraka.

Ovi rezultati pokazuju da koncentracija radona ne mora uvijek biti najviša u prostorijama koje su najbliže tlu, već ovise o navikama stanara i atmosferskim prilikama [30].



Grafikon 56. - Raspodjela ukupnog izmjernog radona za prostorije u kojima se provodio monitoring

Grafikon 56. prikazuje kružni dijagram za sve prostorije gdje su provedena mjerenja. Gornji kat ima najveći udio od 41 %, što dokazuje da se bez dobre cirkulacije zraka radon može nakupljati i u višim etažama. Donji kat ima udio od 31 % što je logično s obzirom da se prostor nalazi u blizini tla. Podrum iako je najbliže tlu (zapravo okružen tlom) zauzima udio od 25 % te dokazuje da redovito provjetravanje smanjuje nakupljanje radona. Podrum je „vrlo opasan“ iz razloga što u kratkom vremenu može apsorbirati vrlo visoke razine zračenja [43]. Garaža zauzima vrlo nizak udio od samo 3 % te pokazuje minimalno opterećenje zračenjem.

Zdravstveno gledano, gornji i donji kat predstavljaju najveći rizik od oboljenja za dugoročnu izloženost zračenju ako je učestalost boravka u navedenim prostorijama velika. Udisanje radona povezuje se s povećanim rizikom od razvoja karcinoma pluća. Podrum je vrlo opasan iz razloga što u krakom vremenu može apsorbirati jako visoke razine radona.

Toplije vrijeme i mogućnost otvaranja prozora tijekom svibnja i lipnja doveli su do vidljivo nižih vrijednosti radona u svim prostorijama. Najčešće mjere prevencije koje su zaslužne za smanjenje koncentracija su redovito provjetravanje i dobra cirkulacija zraka u prostoriji. Ključne mjere za zaštitu zdravlja su redovito provjetravanje, praćenje koncentracije radona (mjerenjem), tehnička rješenja (npr. barijere i dobre izolacije) i edukacija stanara [31, 42].

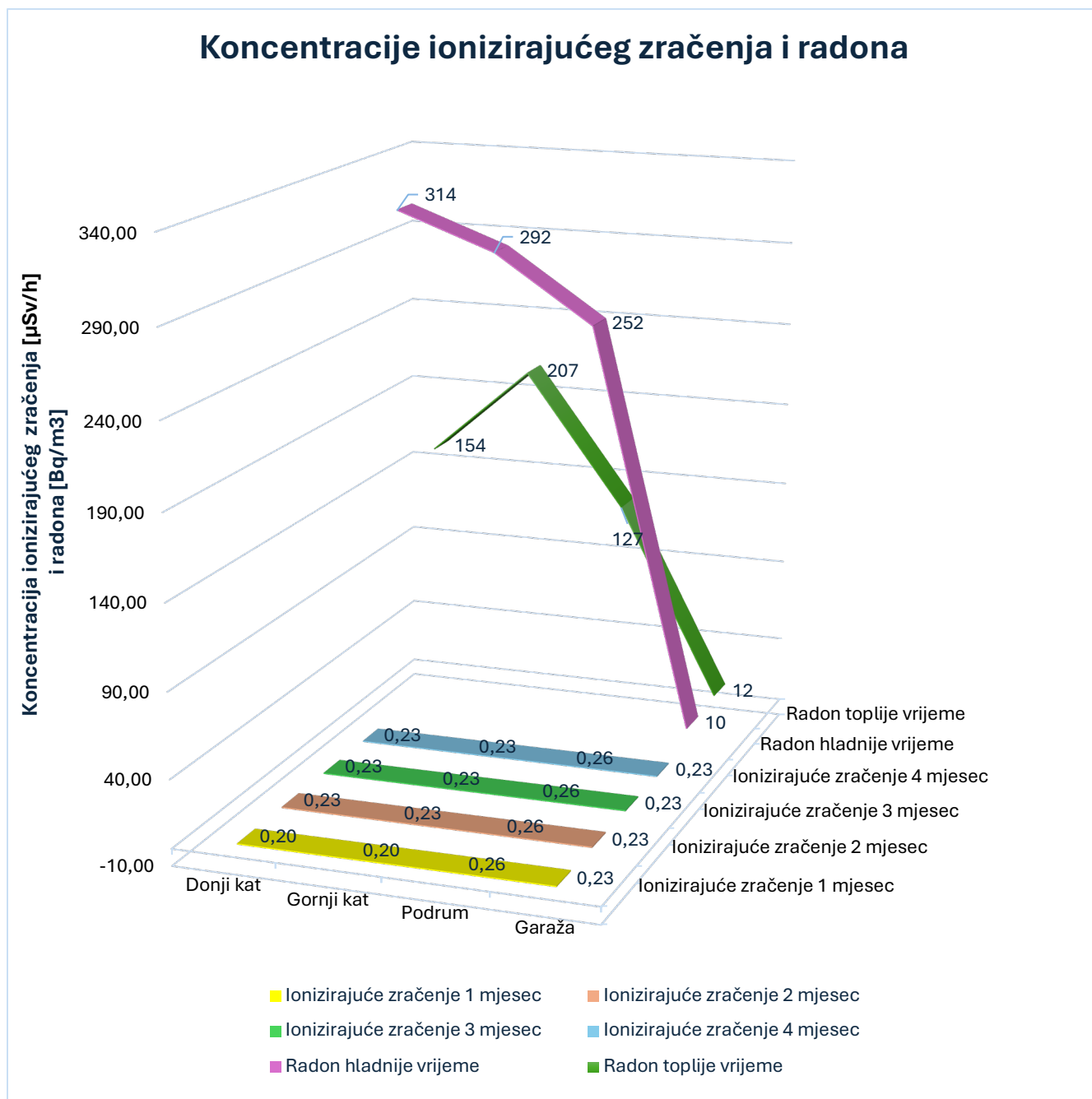
6. USPOREDBA IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA I RADONA

Grafikon 57. prikazuje usporedbu vrijednosti ionizirajućeg zračenja i radona. Prikazane su srednje vrijednosti koje su izmjerene na donjem i gornjem katu, podrumu i garaži. Na donjem katu je tijekom mjerenja ionizirajućeg zračenja u veljači, ožujku i travnju dobivena prosječna vrijednost od $0,23 \mu\text{Sv/h}$, dok je u siječnju vrijednost bila niža od $0,20 \mu\text{Sv/h}$. Vrijednosti radona se dosta razlikuju, što ovisi o razdoblju u kojem je mjerenje provedeno. Tijekom hladnijih mjeseci prosječna vrijednost je bila 314 Bq/m^3 , a tijekom toplijih 154 Bq/m^3 . Na gornjem katu je tijekom mjerenja u veljači, ožujku i travnju izmjerena prosječna vrijednost od $0,23 \mu\text{Sv/h}$, dok je u siječnju vrijednost bila $0,20 \mu\text{Sv/h}$. Tijekom hladnijih mjeseci prosječna vrijednost radona je bila 292 Bq/m^3 , a tijekom toplijih 207 Bq/m^3 . U podrumu je tijekom mjerenja u siječnju, veljači, ožujku i travnju izmjereno prosječno $0,26 \mu\text{Sv/h}$. Tijekom hladnijih mjeseci prosječna vrijednost radona je bila 252 Bq/m^3 , a tijekom toplijih 127 Bq/m^3 . U garaži je u siječnju, veljači, ožujku i travnju izmjereno prosječno $0,23 \mu\text{Sv/h}$. Tijekom hladnijih mjeseci prosječna vrijednost radona je bila 10 Bq/m^3 , a tijekom toplijih 12 Bq/m^3 . Zbog lakšeg razumijevanja odnosa između ionizirajućeg zračenja i radona napravljeni su dodano je dva grafikona, pomoću koji se može vidjeti kako su se kretale prosječne vrijednosti zračenja (*Grafikon 58.* i *Grafikon 59.*).

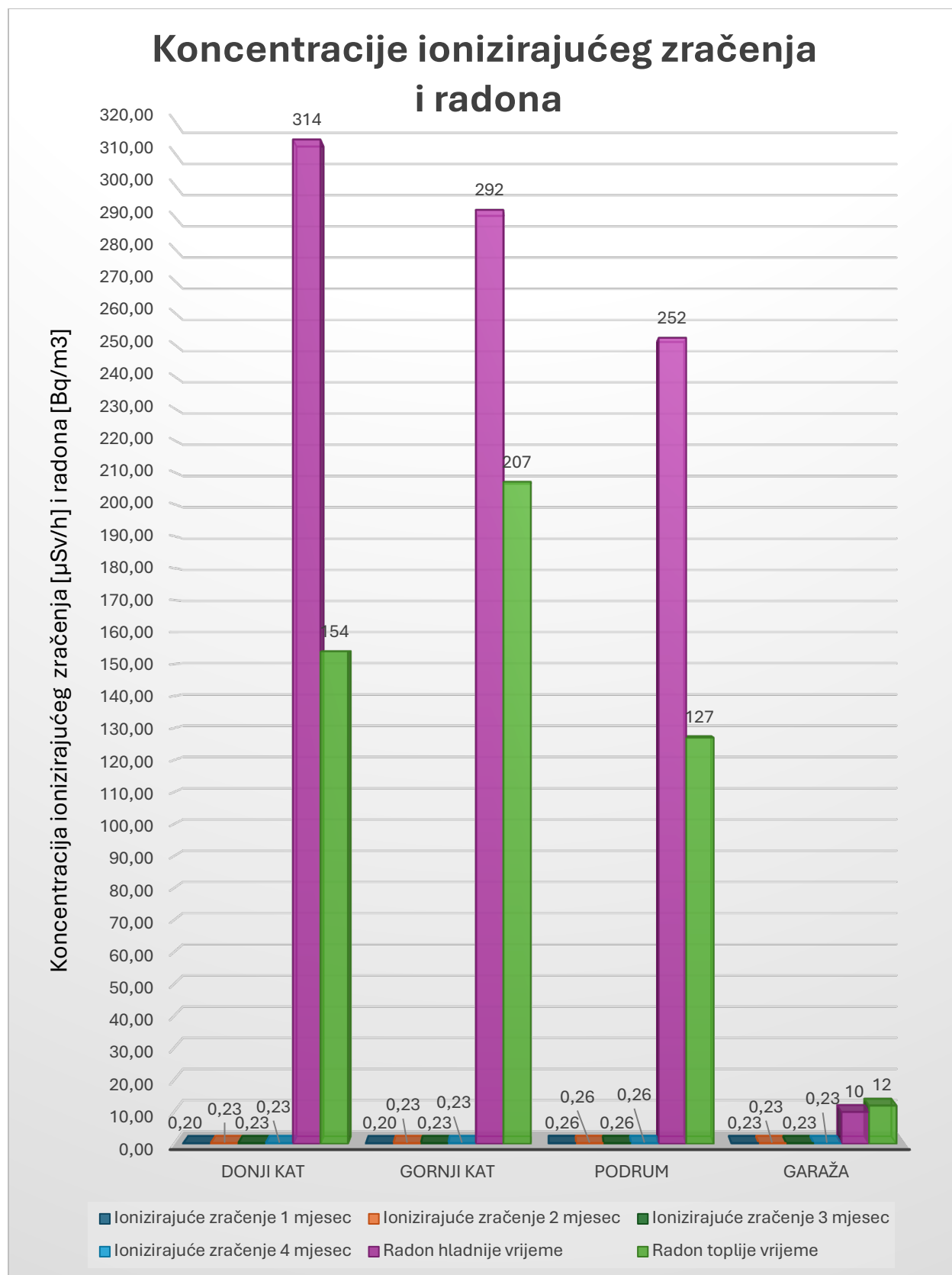
Gornji kat je pokazao najveću izloženost zračenju, iako je najudaljeniji od tla. Prikazuje vrijednosti koncentracije radona i ionizirajućeg zračenja u nešto manjim vrijednostima. Posljedica toga je neredovito provjetravanje, a i prostor veći dio dana nije u funkciji pa je onemogućena cirkulacija zraka [42]. Donji kat bilježi isto dosta visoke vrijednosti zračenja, što je za pretpostaviti zbog mjesta na kojem se nalazi (blizina tla). Unatoč tome, dokazano je da se redovitim provjetravanjem i češćim korištenjem prostora zračenje može smanjiti na vrijednosti koje nisu opasne za zdravlje [31, 42]. Podrum ukazuje na dosta velike razlike u izmjerenim koncentracijama tijekom mjerenja jer taj prostor ima veliku osjetljivost na vremenske uvjete i provjetravanje. Razlog tome su okruženost tlom i neadekvatna izolacija koji povećavaju mogućnosti stvaranja radona [31, 33]. Garaža je prostorija koja je pokazala da se uz redovito provjetravanje i dobru cirkulaciju zraka zračenje može svesti na minimalne razine [42].

Rezultati pokazuju kako najviše vrijednosti radona nisu nužno zabilježene u najnižim prostorima, već ovise o navikama stanara (npr. provjetravanju), konstrukciji objekta i učestalost korištenja prostora [30].

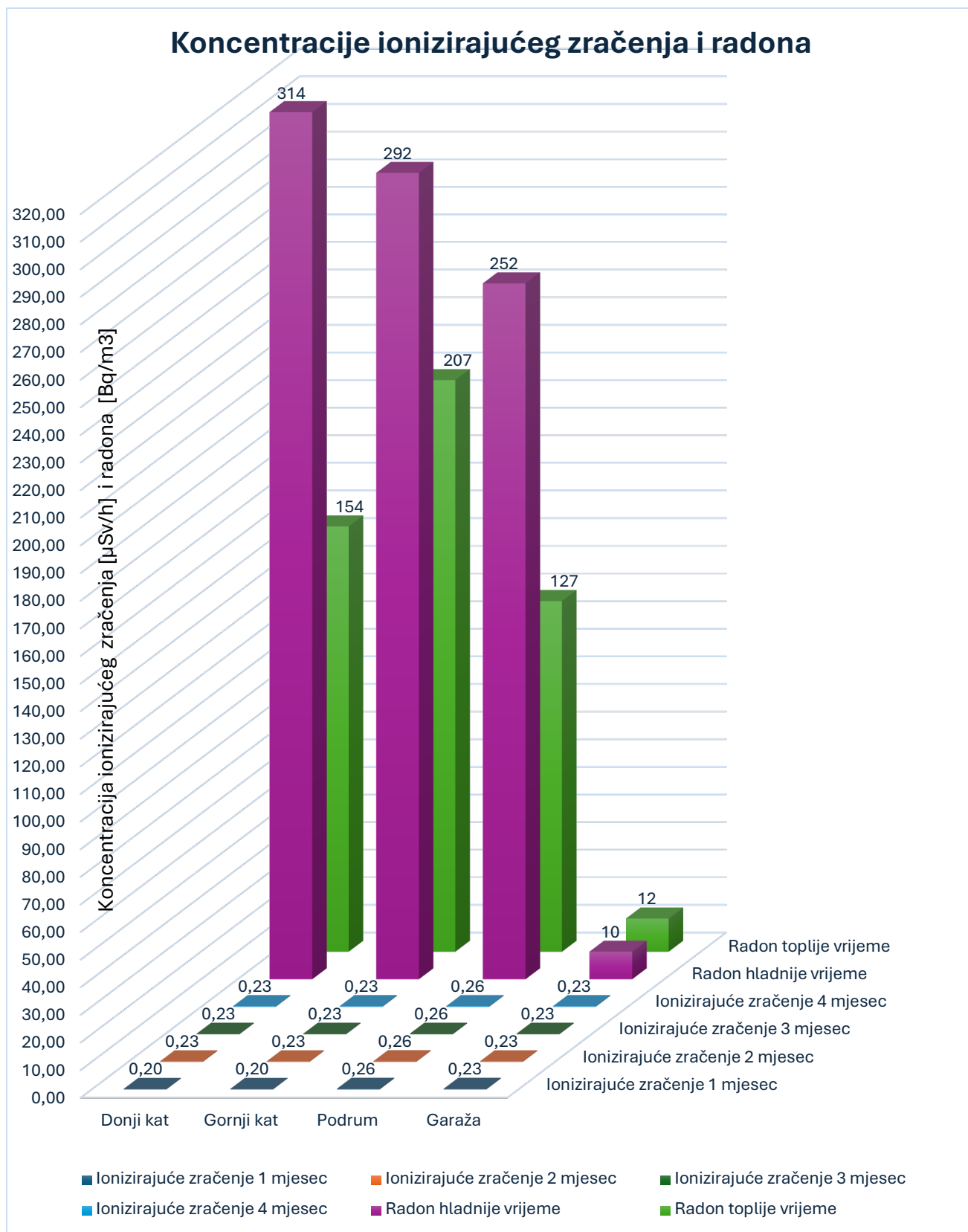
Bitno je naglasiti kako prostorije s većim udjelom zračenja predstavljaju najveći rizik za ukućane, jer se u njima svakodnevno najviše boravi. Iz tog je razloga važno na gornjem i donjem katu osigurati stalnu izmjenu zraka i ako je moguće kontrolirati vrijednosti radona, kako bi se reagiralo na vrijeme ako će se vrijednosti početi povećavati [31, 42].



Grafikon 57. - Linijski 3D grafikon prikazuje odnos ionizirajućeg zračenja i radona



Grafikon 58. - Stupčasti 2D grafikon prikazuje odnos ionizirajućeg zračenja i radona



Grafikon 59. - Stupčasti 3D grafikon prikazuje odnos ionizirajućeg zračenja i radona

7. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE I RADON – EKOLOŠKI I ZDRAVSTVENI ASPEKTI TE MJERE PREVENCIJE

7. 1. Utjecaj na okoliš i zdravlje ljudi

Ionizirajuće zračenje prisutno je u prirodi, ali može nastati iz različitih izvora. Među prirodnim izvorima najviše se ističe radon, radioaktivan plin koji predstavlja javnozdravstveni problem u zatvorenim prostorima. Nekontrolirano zračenje ili dugotrajna izloženost zračenju mogu imati ozbiljne posljedice na ljudsko zdravlje i okoliš [44].

Ovaj rad analizira učinke ionizirajućeg zračenja i radona na ljude i okoliš te pomoću dobivenih rezultata provedenog monitoringa donosi mjere zaštite i sigurnosti kako bi se u što većoj mjeri smanjili negativni učinci na ljudsko zdravlje i okoliš.

Ionizirajuće zračenje je oblik energije koji ima dovoljno snage da ukloni elektrone iz atoma, što može dovesti do oštećenja stanica i genskog materijala kod živih bića. Glavni izvori ionizirajućeg zračenja dijele se na:

- Prirodne izvore – kozmičko zračenje, zračenje iz tla i stijena (alfa, beta i gama zračenje) te radon.
- Umjetne izvore – rendgenski i CT uređaji, nuklearna medicina, industrijska primjena, elektrane [18].

Analizom rezultata može se uočiti da su gotovo sve promatrane prostorije stalno izložene različitim razinama zračenja, a preporučena vrijednost za dnevno zračenje iznosi 30 $\mu\text{Sv/h}$. Takve koncentracije, iako su ispod opasnih razina, mogu predstavljati značajan kroničan rizik ako su prisutne kroz dulje vrijeme [45]. Ionizirajuće zračenje ima dovoljno energije da ošteti stanice i genski materija. Njihov učinak je kumulativan što znači da čak i manje doze, ako traju godinama mogu dovesti do povećanog rizika od razvoja raka, pogotovo kod osjetljivih skupina popu djece, starijih ili osoba s respiratornim problemima.

Izloženost ionizirajućem zračenju može uzrokovati akutne i kronične zdravstvene posljedice, ovisno o intenzitetu i vremenskoj izloženosti. Među najpoznatijim posljedicama izloženosti dugotrajnom zračenju su [2]:

- Mutacija DNK i stanična oštećenja,
- Povećani rizik od malignim bolesti (rak pluća, leukemija, rak štitnjače),

- Akutne radijacijske bolesti (pri izuzetno visokim dozama),
- Utjecaj na reproduktivne funkcije i nasljedni materijal.

Umjetni izvori zračenja (npr. dijagnostički medicinski uređaji) također pridonose ukupnoj dozi zračenja, ali su obično kontrolirani i praćeni strogo regulativom.

Ionizirajuće zračenje može imati i negativne učinke na ekosustave, posebno ako dolazi do kontaminacije okoliša umjetnim radioaktivnim tvarima (npr. nuklearna nesreća Černobil) te uzrokuju:

- Zagađenje tla i podzemne vode,
- Poremećaje u populacijama biljaka i životinja,
- Akumulaciju radioaktivnih izotopa u prehrambenom lancu,
- Smanjenje biološke raznolikosti u zahvaćenim područjima [46]

Radon se udiše s česticama zraka, a njegovi radioaktivni produkti se raspadaju te talože u plućima [4]. Dugotrajna izloženost radonu dokazano je drugi vodeći uzrok raka pluća [5]. Radon ima ograničen utjecaj na okoliš jer se radi o plinu koji se relativno brzo raspada i ne akumulira se u živim organizmima. Njegovo ispuštanje i prisutnost u unutrašnjim prostorijama čini ga opasnim za ljudsko zdravlje. S obzirom da radon nije moguće osjetiti osjetilima, detekcija i prevencija moraju se provoditi sustavno i ciljano, kako bi se izmjerile razine zračenja [4].

Utjecaj radona na kvalitetu unutarnjih prostora:

- Zadržavanje radona u slabo ventiliranim ili provjetravanim prostorijama povećava vlagu i pogoršava kvalitetu zraka, osobito u podrumima i zatvorenim prostorijama.
- Uz duže vrijeme zadržavanja, radon može doprinijeti razvoju plijesni, kondenzaciji i koroziji zidnih i podnih materijala [29, 36].
- U objektima s lošom izolacijom, radon može širiti vertikalno (efekt dimnjaka) i kontaminirati etaže na višim dijelovima objekta [39]
- Visoke vrijednosti (izmjerene u podrumu) ukazuju na potrebu za građevinskom intervencijom – brtvljenjem, zaštitnim barijerama ili ugradnjom ventilacijskog sustava [31].

7. 2. Preventivne mjere i sigurnosni standardi

Ionizirajuće zračenje i radon predstavljaju značajne rizike za zdravlje ljudi kada su prisutni u visokim koncentracijama ili kada je izloženost dugotrajna. Prevencija i upravljanje rizicima temelji se na znanstveno utemeljenim studijama koje su provedene u svrhu zaštite od zračenja, kao i na nacionalnim i međunarodnim propisima koji definiraju sigurnosne standarde. Svrha preventivnih mjera je smanjiti zračenje i njegovu prisutnost te izloženost kod ljudi na razine koje ne ugrožavaju zdravlje [2, 4].

Zaštita od ionizirajućeg zračenja temelji se na trima osnovnim principima koje definira Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP):

1. Opravdanost – svaka radnja koja uzrokuje izlaganje zračenju mora imati više koristi nego štete.
2. Optimizacija (ALARA princip) – izloženost zračenju mora biti na najnižoj mogućoj razini.
3. Ograničavanje doza – postavljaju se granice godišnje izloženosti kako bi se spriječile štetne posljedice [47].

Konkretna mjera kojima se možemo zaštititi od zračenja:

- Upotreba zaštitne opreme – olovna zaštitna odjeća i zaštita za oči,
- Dozimetrijski nadzori – mjerenje osobne izloženosti zračenju,
- Tehnička zaštita – olovne barijere, udaljšavanje izvora, automatizirani sustavi za zaštitu,
- Ograničavanje pristupa – područjima s izvornim zračenjem,
- Redovite inspekcije i provjere opreme – u medicinskim i industrijskim ustanovama,
- Edukacija ljudi – koji rade s izvorima zračenja [31, 42, 48].

Zakonodavstvo u Hrvatskoj, u skladu s EU direktivom 2013/59/Euratom, propisuje maksimalnu godišnju izloženost zračenju za:

- Opću populaciju od 1 mSV,
- Profesionalnu izloženost osobe: 20 mSV [49].

Nadzor i primjenu zakona provodi Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS) [45].

Organizacije koje određuju smjernice i sigurnosne standarde za razine zračenja su [50]:

- ICRP (Internacional Commission on Radiological Protection) – preporuke o graničnim vrijednostima izloženosti [47].

- IAEA (International Atomic Energy Agency) – smjernice za sigurnost od izvora zračenja [51].
- DZRNS (Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost) – nacionalni nadzor nad izvornima zračenja u Hrvatskoj [45].

Ove organizacije definiraju pravila zaštite, prate znanstvena istraživanja o učincima zračenja i redovito ažuriraju preporuke [50].

Preporučene vrijednost odnosno dozvoljene za ionizirajuće zračenje su sljedeće [47, 51]:

- Normalna pozadinska razina zračenja – 0,05 - 0,30 $\mu\text{Sv/h}$ – uobičajena vrijednost zračenja za većinu mjesta na Zemlji.
- Sigurna razina za izlaganja (javni prostor) – do 0,50 $\mu\text{Sv/h}$ – ova razina se smatra sigurnom za izlaganje stanovništva, ali ne dugotrajno.
- Referentna razina za ozbiljne zaštitne mjere i evakuaciju - od 2 do 10 $\mu\text{Sv/h}$.

7. 3. Prijedlog mjera prevencije na temelju mjerenja

Monitoring koji je proveden tijekom četiri mjeseca pokazao je da ionizirajuće zračenje je stvarna i prisutna komponenta u unutrašnjim prostorijama, posebice u onima koje se ne prozračuju ili ne koriste redovito. Njegov utjecaj je trenutni, ali dugoročno može imati ozbiljne zdravstvene posljedice. Stoga je ključno povremeno pratiti vrijednosti te ako je potrebno na vrijeme reagirati i poduzeti tehničke mjere zaštite i educirati korisnike prostora o odgovorom ponašanju kao bi se zračenje svelo na što manje razine [31].

Radon predstavlja poseban problem jer je plin koji ne možemo osjetiti osjetilima. Glavni način izloženosti je udisanjem radonovih produkata u zatvorenom prostoru, posebno su osjetljivi prizemni dijelovi objekata, podrumi te prostorije koje nisu redovito u funkciji [4].

Mjere kojima se možemo zaštititi od radona [31, 42]:

- Mjerenjem koncentracije radona u zatvorenim prostorijama.
- Ventilacijom ili provjetravanjem (ovisi o dozi prethodno izmjenjenog zračenja) – poboljšavanjem protoka zraka smanjujemo koncentraciju radona.
- Zatvaranjem pukotina i rupa u temeljima, podovima te zidovima, osobito na spojevima s tlom.
- Građevinske preventivne mjere – postavljanje izolacijskih membrana koje omogućavaju prodor radona.

- Implementacija nacionalnih akcijskih planova za radon, koji uključuje edukaciju, mapiranje rizičnih područja i obavezu mjerenja radona u školama, vrtićima, bolnicama i drugim javnim zgradama [25].

Preporučena granična vrijednost koncentracije radona u zraku prema WHO-u i Europskoj uniji je:

- $< 100 \text{ Bq/m}^3$ (idealno),
- Maksimalno do 300 Bq/m^3 – iznad ove vrijednosti preporučuju se tehničke mjere smanjenja [4].

U Hrvatskoj je obavezno provođenje mjerenja radona u školama i javnim ustanovama u određenim dijelovima županije prema Nacionalnom programu zaštite od radona.

Analizom rezultata u ovom radu jasno se vidi da su sve prostorije, osim garaže izložene koncentracijama radona koje se približavaju ili su više od preporučene gornje granice od 300 Bq/m^3 u hladnom ciklusu mjerenja, što je čest slučaj kod starijih kuća i stambenih zgrada. S obzirom da je radon nevidljiv, bez mirisa i okusa jedini načini zaštite su redovita mjerenja, ventilacija ili provjetravanje i odgovarajuća građevinska prevencija [25].

Preporučene mjere na temelju ovih rezultata su:

- Postavljanje kućnih radonskih senzora u donjim etažama i podrumima,
- Redovito prozračivanje prostorija, osobito tijekom zime i kada je grijanje u funkciji,
- Tehničke mjere za sprječavanje prodora radona iz tla (podrum),
- Izbjegavanje pušenja u prostorijama s povišenim razinama radona jer kombinacija učinaka drastično povećava rizik od karcinoma pluća [31, 42].

Ova mjerenja potvrđuju da je radon stvaran problem i stvara rizik, ne samo u podrumima već i u svakodnevnim boravišnim prostorijama te predstavlja ozbiljan problem po ljudsko zdravlje koji je potrebno sanirati.

Mjere prevencije i sigurnosni standardi imaju ključnu ulogu u smanjenju zdravstvenih rizika povezanih s izloženosti ionizirajućem zračenju i radonu. Pridržavanjem međunarodnih preporuka i zakonodavnog okvira osigurava se dugoročna zaštita zdravlja ljudi i očuvanje okoliša.

8. ZAKLJUČAK

Mjerenje koncentracija ionizirajućeg zračenja provedeno je kontinuirano četiri mjeseca, dok se mjerenje koncentracije radona provodilo u dva ciklusa (hladnije i toplije vrijeme). Dobiveni rezultati jasno prikazuju kako godišnja doba i način korištenja prostorije mogu utjecati na razine izloženosti zračenju.

Mjerenja ionizirajućeg zračenja pokazala su da se vrijednosti kreću unutar očekivanog raspona za stambene prostorije, ali ipak variraju između prostorija i kroz mjesece. Od siječnja do travnja vidljivo je da vrijednosti dolaskom toplijih mjeseci lagano opadaju, što potvrđuje da ionizirajuće zračenje ovisi o sezonskom utjecaju.

Tijekom hladnijeg dijela godine, kada je provjetravanje smanjeno, a prostori su više zatvoreni zbog grijanja i hladnog vanjskog vremena zabilježene su povišene koncentracije radona. Najviše zabilježene vrijednosti prelazile su i 1000 Bq/m^3 , što je znatno iznad preporučenih razina. U toplijem razdoblju, kada su prostori bili često provjetravani koncentracije su bile osjetno niže, a dnevne oscilacije između razina zračenja slabije. Mjerenja su ipak pokazala da gornji kat, iako je najudaljeniji od tla može pokazivati značajne koncentracije radona, ako se zanemari provjetravanje i onemogućiti dobra cirkulacija zraka.

Analizom rezultata je utvrđeno da podrum i garaža bilježe nagla i intenzivnija povećanja koncentracije radona i to u kratkom vremenu.

Dobivenim rezultatima pokazali smo da je ključno rješenje za smanjenje koncentracija radona u prostorijama redovito provjetravanje, cirkulacija zraka i periodičko mjerenje. Iako radon ne utječe izravno na okoliš, njegova akumulacija u zatvorenim prostorijama značajno utječe na kvalitetu unutarnjeg zraka i zdravlje stanovnika.

Zaključno, ovo istraživanje potvrđuje da je praćenje i upravljanje razinama radona važan dio zaštite zdravlja u zatvorenim prostorijama, a niske vrijednosti ne smiju stvarati dugoročni osjećaj sigurnosti, jer se mogu nakon nekog vremena znatno povećati te ozbiljno naštetiti ljudskom zdravlju.

9. ZAHVALA

Na samom početku želim izraziti iskrenu i duboku zahvalnost profesoru mentoru doc.dr.sc. Davoru Stanku na ukazanoj prilici, povjerenju, nesebičnom dijeljenju znanja, stručnom vodstvu i stalnoj podršci tijekom izrade ovog rada. Posebno cijenim njegovo strpljenje, razumijevanje i vrijeme koje je izdvojio kako bi me usmjeravao i pomogao mi kroz sve faze ovog rada. Njegove povratne informacije, korisni savjeti i motivacijski pristup uvelike su doprinijeli razvoju ove teme i kvalitete samog rada.

Također, od srca zahvaljujem profesorici komentorici prof.dr.sc. Aniti Ptiček Siročić, koja je svakog tjedna izdvajala svoje vrijeme kako bi preuzeli i raspravili o prikupljenim izmjerenim podacima. Njezina posvećenost, organiziranost i spremnost na redovito sudjelovanje u ovoj fazi rada bili su od presudne važnosti za uspješno prikupljanje i obradu podataka. Hvala joj na korisnim komentarima, strpljenju, kontinuiranoj podršci, koju je pružala s velikim razumijevanjem i profesionalnošću.

Vaše vrijeme, trud i strpljenje koje ste mi posvetili kroz ovaj proces su mi zaista mnogo značili i na tome sam Vam od srca zahvalan.

10. LITERATURA

- [1] Bolf N. Osvježimo znanje. Kem. Ind. 67 (7-8), 2018, 332-332
- [2] Britannica, Ionizing Radiation, [Online]. Preuzeto: <https://www.britannica.com/science/ionizing-radiation>, [pristupljeno: 01.03.2025.]
- [3] Britannica, Radon, [Online]. Preuzeto: <https://www.britannica.com/science/radon>. [pristupljeno: 01.03.2025.]
- [4] World Health Organization, Radon, [Online]. Preuzeto: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>, [pristupljeno: 01.03.2025.]
- [5] EPA, Radon, [Online]. Preuzeto: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>, [pristupljeno: 01.03.2025.]
- [6] Novaković, M.: Zaštita od ionizirajućeg zračenja: popisi u Republici Hrvatskoj s komentarima, Ekoteh-dozimetrija d.o.o. za zaštitu od zračenja, Zagreb, (2001.), ISBN 953-98623-0-2.
- [7] Ionizirajuće zračenje, [Online]. Preuzeto: <https://enciklopedija.hr/clanak/ionizirajuce-zracenje>, [pristupljeno: 01.03.2025.]
- [8] M. Đurina, Ionizirajuće zračenje i učinci ionizirajućeg zračenja, (Diplomski rad), Veleučilište u Karlovcu, Odjel Sigurnosti i zaštite, Karlovac, 2021.
- [9] D. Barukčić, Zaštita na radu medicinskih sestara/tehničara zaposlenih u zoni ionizirajućeg zračenja, (Diplomski rad), Medicinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [10] Nuklearna energija – mistika ili stvarnost, [Online]. Preuzeto: <https://nemis.hr/index.php/radioaktivnost/prirodno-zracenje.html>, [pristupljeno: 01.03.2025.]
- [11] Z. Radinić, Radioaktivnost i ionizirajuće zračenje, (Diplomski rad), Veleučilište u Karlovcu, Odjel Sigurnosti i zaštite, Karlovac, 2024.
- [12] Fond, Radioaktivnost, [Online]. Preuzeto: <https://www.fond-nek.hr/radioaktivnost/> [pristupljeno: 22.03.2025.]
- [13] M. Kranjčec, Učinci ionizirajućeg zračenja na ljudsko tijelo, (Završni rad), Veleučilište u Karlovcu, Odjel Sigurnosti i zaštite, Karlovac, 2019.
- [14] Brumen V., Franić, Z., Garaj-Vrhovac V.: Ionizirajuće zračenje, Medicinska naklada, Zagreb, (2002).

- [15] E. B. Podgorsak, Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, IAEA, 2005.
- [16] E. Broda, T. Schönfeld, The Technical Applications of Radioactivity, Pergamon Press Ltd, 1966.
- [17] P. Valić, Mjerenje radona u okolišu, (Diplomski rad), Medicinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2023.
- [18] I. Pejak, Prisutnost radona u okolišu i utjecaj na ljudsko zdravlje, (Završni rad), Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin, 2018.
- [19] J. Bajkovec, Radon u kućama u Međimurskoj županiji, (Diplomski rad), Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku, Osijek, 2015.
- [20] Bundesamt für Strahlenschutz, Radon, [Online]. Preuzeto: https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/radon/radon_node.html. [pristupljeno: 06.03.2025.]
- [21] Planinić, J.: Radolić, V.: Faj Z.: Šuveljak, B. Radon equilibrium factor and aerosols // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 396 (1997), 414-417.
- [22] Logično, Kako Radon prirodni plin u našim kućama uzrokuje rak pluća?, [Online]. Preuzeto: <https://www.logicno.com/zivotni-stil/kako-radon-prirodni-plin-u-nasim-kucama-uzrokuje-rak-pluca.html>. [pristupljeno: 22.03.2025.]
- [23] European Union, [Online]. Preuzeto: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj/eng>, [pristupljeno: 03.03.2025.]
- [24] My energy shield, Radon: predstavlja ozbiljnu prijetnju zdravlju stanara, [Online]. Preuzeto: <https://energyshield.hr/projektiranje/radon-predstavlja-ozbiljnu-prijetnju-zdravlju-stanara-2/>. [pristupljeno: 06.03.2025.]
- [25] Narodne novine, Akcijski plan za radon za razdoblje 2019. – 2024., [Online]. Preuzeto: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2018_12_118_2380.html [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [26] Priručnici + –, JOY-iT-RAD01 Detektor nuklearnog zračenja Korisnički priručnik, [Online]. Preuzeto: <https://bs.manuals.plus/joy-it/jt-rad01-nuclear-radiation-detector-manual>, [pristupljeno: 14.04.2025.]

- [27] Ptiček Siročić A, Kovač S, Stanko D, Pejak I. Dependence of concentration of radon on environmental parameters – multiple linear regression model. Environmental Engineering – Inženjerstvo okoliša, Vol. 8 No. 1-2, 2021.
- [28] See the Air, Review: View Plus by Airthings, [Online]. Preuzeto: <https://seetheair.org/2022/03/21/review-view-plus-by-airthings/> [pristupljeno: 14.04.2025.]
- [29] IAO.WORKS, How your Home's Humidity Affects Indoor Air Quality, [Online]. Preuzeto: <https://iaq.works/humidity/how-your-homes-humidity-affects-indoor-air-quality>, [pristupljeno: 10.05.2025.]
- [30] Szczepanik-Scislo N, Grządziel D, Mazur J, Kozak K. Influence of Human Activity on Radon Concentration, Indoor Air Quality, and Thermal Comfort in Small Office Spaces. Sensors Basel, 30. Jul 2024.
- [31] Cleveland Clinic, Radon Gas, [Online]. Preuzeto: <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/21523-radon-gas>, [pristupljeno: 10.05.2025.]
- [32] Spasić D, Gulan Lj. High Indoor Radon Case Study: Influence of Meteorological Parameters and Indication of Radon Prone Area. Atmosphere 2022.
- [33] CDC, Facts About Radiation from Building Material, [Online]. Preuzeto: <https://www.cdc.gov/radiation-health/data-research/facts-stats/building-materials.html>, [pristupljeno: 10.05.2025.]
- [34] IQAir, How wind and weather affect air pollution, [Online]. Preuzeto: <https://www.iqair.com/newsroom/wind-weather-air-pollution>, [pristupljeno: 11.07.2025.]
- [35] World Health Organization, Ambient (outdoor) air pollution, [Online]. Preuzeto: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [36] AIR SENSE ENVIRONMENTAL, From Humidity to Radon Mitigation: Creating a Safer Indoor Environmental, [Online]. Preuzeto: <https://airsenseenvironmental.com/from-humidity-to-radon-mitigation-creating-a-safer-indoor-environment/>, [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [37] Ptiček Siročić A, Stanko D, Sakač N, Dogančić D, Trojko T. Short-Term Measurement of indoor radon Concentration in Northern Croatia. Appl. Sci. 2020.

- [38] Hernandez T L, Ring J W, Sachs H M. Variation of basement radon concentration with barometric pressure. Health Physics, 46, no. 2, pp. 440-445, 1984.
- [39] The Radon Guys, Understanding the Stack Effect & Its Impact of Radon, [Online]. Preuzeto: <https://thenashvilleradonguys.com/blog/stack-effect-on-houses>, [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [40] Akbari K, Mahmoudi J, Ghanbari M. Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house. J Environ Radioact. 2013.
- [41] Mentés G, Eper-Pápai I. Investigation of temperature and barometric pressure variation effects on radon concentration in the Sopronbátfalva Geodynamic Observatory, Hungary. J Environ Radioact, 2015.
- [42] Radon, Reducing Radon Levels in Your Home, [Online]. Preuzeto: <https://www.cdc.gov/radon/prevention/index.html>, [pristupljeno: 11.07.2025.]
- [43] Radon Gas in the Basement: A Radiation Hazard, [Online]. Preuzeto: <https://spacemath.gsfc.nasa.gov/earth/3Page11.pdf>, [pristupljeno: 11.07.2025.]
- [44] World Health Organization, Ionizing radiation and health effects, [Online]. Preuzeto: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects> [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [45] Narodne novine, Zakon o zaštiti od ionizirajućeg zračenja i sigurnosti izvira ionizirajućeg zračenja, [Online]. Preuzeto: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_06_64_1544.html [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [46] Videvall E, Burraco P, Orizaola G. Impact of ionizing radiation on the environmental microbiomes of Chernobyl wetlands. Environmental pollution. Volume 330. 1 August 2023.
- [47] ICRP. “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.”, [Online]. Preuzeto: [https://www.icrp.org/docs/icrp_publication_103-annals_of_the_icrp_37\(2-4\)-free_extract.pdf](https://www.icrp.org/docs/icrp_publication_103-annals_of_the_icrp_37(2-4)-free_extract.pdf), [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [48] Number Analytics, Radiation Protection Strategies, [Online]. Preuzeto: <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-radiation-protection-strategies>, [pristupljeno: 16.05.2025.]

- [49] European Union, Direktiva vijeća 2013/59/EURATOM, [Online]. Preuzeto: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013L0059>, [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [50] Radiation answers, Radiation Standards Organizations, [Online]. Preuzeto: <https://www.radiationanswers.org/radiation-resources/standards-organizations.html>, [pristupljeno: 16.05.2025.]
- [51] IAEA. “Radiation Protection and Safety of Radiation Sources.”, [Online]. Preuzeto: <https://www.iaea.org/publications/8736/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>, [pristupljeno: 16.05.2025.]

11. SAŽETAK

Autor: Stell Tuksar

Naslov: Utjecaj ionizirajućeg zračenja i radona na kvalitetu zraka u stambenim objektima

Radon je prirodni radioaktivni plin bez boje i mirisa koji se nalazi u Zemljinoj kori te je glavni prirodni izvor radijacije na Zemlji. Koncentracija radona je na otvorenim prostorima uglavnom niska, no unutar zatvorenog prostora može biti vrlo visoka te kao takva može ugroziti zdravlje ljudi (oštećenje DNK, razvoj karcinoma...). U svrhu isticanja važnosti problema povišene koncentracije radona u zatvorenim prostorima, proveden je monitoring ionizirajućeg zračenja i radona na više točaka na jednoj mjernoj lokaciji. Vrijednosti ionizirajućeg zračenja kretale su se unutar dopuštenog raspona za stambene prostorije, ali su varirale između prostorija i tijekom različitih mjeseci. Mjerenje koncentracije radona u hladnijem dijelu godine bile su znatno povišene u odnosu na topliji dio godine. Glavni razlog toga je mogućnost redovitog provjetravanja i bolja cirkulacija zraka unutar prostorije tijekom toplijih mjeseci. Analizom je utvrđeno da se u prostorijama poput podruma i garaže, kada se izostavi provjetravanje koncentracije radona naglo rastu. Dobiveni rezultati jasno ukazuju da su redovito provjetravanje, dobra cirkulacija zraka i periodično praćenje koncentracije radona ključne mjere prevencije. Ukoliko koncentracija radona unatoč korištenju mjera prevencije i dalje značajno prelaze graničnu vrijednost od 300 Bq/m^3 potrebno je provesti tehničku sanaciju.

Ključne riječi: ionizirajuće zračenje, radon, monitoring, zdravlje ljudi, prevencija.

12. SUMMARY

Name and surname of the author: Stell Tuksar

Paper Title: The impact of ionizing radiation and radon on air quality in residential buildings

Radon is a naturally occurring radioactive gas that is colorless and odorless, found in the Earth's crust, and represents the main natural source of radiation on Earth. While radon concentrations are generally low in open spaces, they can become very high indoors, posing a significant health risk (such as DNA damage, cancer development, etc.). To emphasize the importance of elevated radon concentrations in enclosed spaces, monitoring of ionization radiation and radon levels was conducted at multiple points within a single measurement location. The values of ionizing radiation remained within the permissible range for residential areas but varied between rooms and throughout different months. Radon concentrations measured during the colder part of the year were significantly higher compared to those in the warmer months. The main reason for this is the possibility of regular airing and better air circulation during warmer weather. Analysis showed that in areas such as basements and garages, when airing is lacking, radon concentrations increase sharply. The results indicate that regular airing, good air circulation, and periodic monitoring of radon levels are essential preventive measures. If, despite these measures, radon concentration continues to significantly exceed the threshold of 300 Bq/m^3 , technical remediation is required.

Keywords: ionizing radiation, radon, monitoring, human health, prevention.