

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII
BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie a Instalațiilor

Departamentul de Instalații Hidraulice, Termice și
Protecția Atmosferei

**CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND
EFICIENȚA SISTEMELOR DE
REMEDIERE LA PROPAGAREA
RADONULUI ÎN CLĂDIRI DE LOCUIT**
- Rezumat -

Doctorand

Ing. Ion-Costinel MAREȘ

Conducător științific

Conf. Dr. Ing. Tiberiu CATALINA

BUCUREȘTI

2022

Cuprins

1. Introducere	4
1.1. Introducere în tematica lucrării de doctorat în domeniul radonului.....	4
1.1.1. Primele cercetări de radon	4
1.1.2. Obiectivele generale ale cercetării	6
1.1.3. Obiectivele specifice ale cercetării	7
1.2. Stadiul cercetării în domeniul radonului pe plan național și internațional....	10
2. Situația actuală și trecerea în cercetarea detaliată a echipamentelor pentru asigurarea calității aerului din clădirile de locuit.....	11
3. Sisteme inteligente de control-comandă a instalațiilor de ventilare	19
4. PROIECTUL NAȚIONAL SMARTRADON.....	21
5. Prezentarea detaliată a locuințelor supuse remedierii.	23
6. Evaluarea eficienței de remediere a echipamentelor de reducere a nivelului de radon din locuințe din proiectul SMART RAD EN	24
6.1. Studiul de caz din proiectul SMART_RAD_EN la 10 clădiri rezidențiale.....	26
7. Influența nivelului crescut de radon asupra sănătății.....	27
8. Concluzii	30
<i>Referințe.....</i>	<i>37</i>

Abrevieri utilizate

COV	Compuși organici volatili
ICA	Indoor air quality
WHO	World health organization
IRART	Implementarea tehnicilor de remediere a radonului din locuințe din zona minei uranifere Băița
RAMARO	Radon map for center, west and northwest regions from Romania
SMART_RAD_EN	Sisteme inteligente privind siguranța populației prin controlul și reducerea expunerii la radon corelate cu optimizarea eficienței energetice a locuințelor din aglomerări urbane importante din România
US EPA	United states environmental protection agency
IAQ	Indoor air quality
CO	Monoxid de carbon
CO ₂	Dioxid de carbon
PM	Particule de materie
IARC	Agencia internațională pentru cercetarea cancerului
HVAC	Heat ventilation and air conditioning
PMV	Predictive mean vote
SBS	Sick building syndrome
DCV	Demand controlled ventilation
PID	Proportional-Integrat-Derivative
AI	Inteligență artificială
BIEMS	Building intelligent energy management system
DFL	Direct feedback linear
PMAC	Pulse modulation adaptive controller
PRAC	Pattern recognition adaptive controller
TSPC	Two parameters switch control
LLD	Low limit detection
TCP	Transmission control protocol
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
THP	Temperature humidity pressure
RI	Radon index
CR _n	Concentrația de radon
RADPAR	Radon prevention and remediation
PVC	Policlorură de vinil

1. Introducere

1.1. Introducere în tematica lucrării de doctorat în domeniul radonului

1.1.1. Primele cercetări de radon

Radonul reprezintă cea mai importanta sursa de radiație ionizantă și contribuitorul major la dozele de radiații naturale la care se expune populația. Expunerea la radon și la produșii rezultați din descompunerea acestuia reprezintă, după fumat, cauza principală de apariție a cancerului pulmonar. Asocierea cancerului pulmonar cu expunerea prelungită la valori mari ale concentrației radonului a fost demonstrată printr-o serie de studii [1, 2].

Solul este principala sursă din care radonul provine. În funcție de specificul geomorfologic al zonelor în care oamenii își construiesc casele în care ulterior și locuiesc, de permeabilitatea solului, de tipul pardoselii, de prezența fisurilor în fundație și în pereți, de etanșarea locului prin care conductele de instalații străpung planșeele și pereții, respectiv de gradul de ventilare a locuințelor, concentrația de radon din locuințe poate varia de la câteva dezintegrări radioactive pe secundă raportate la un volum de un metru cub (Bequerel/m^3) și până la câteva mii de dezintegrări radioactive pe secundă [3, 4]. Este recomandat de către Organizația Mondială a Sănătății ca și valoare limită cea de 100 (Bq/m^3), iar în cazul când acest lucru nu se poate aplica, să nu se depășească valoarea concentrației de 300 (Bq/m^3), doză care reprezintă aproximativ 10 mSv/an conform calculelor făcute de Comisia pentru Protecție Radiologică [5].

Radiațiile ionizante se regăsesc în mediul înconjurător, în diverse forme și în variate medii. Toate organismele vii sunt continuu expuse la radiații ionizante, care dintotdeauna au existat în mod natural. Sursele acestor expuneri sunt reprezentate de radiații cosmice provenite din spațiul cosmic și de Soare, radionuclizi tereștrii care provin din sol, din materialele de construcții, aer, apa și alimente, și chiar și în corpul uman [6, 7].

H 1 Li 3 Be 4 Na 11 Mg 12 K 19 Ca 20 Rb 37 Sr 38 Cs 55 Ba 56 Fr 87 Ra 88 Sc 21 Ti 22 Y 39 Zr 40 La 57 Hf 72 Ac 89 Rf 104 V 23 Cr 24 Mn 25 Fe 26 Tc 43 Mo 42 Re 75 Os 76 Bh 107 Hs 108
--

Co

27

Ni

28

Cu

29

Zn

30

Rh

45

Pd

46

Ir

77

Pt

78

Mt

109

Ds

110

Ag

47

Cd

48

Au

79

Hg

80

Rg

111

Cn

112

B

5

C

6

Al

13

Si

14

Ga

31

Ge

32

In

49

Sn

50

Tl

81

Pb

82

Nh

113

Fl

114

N

7

O

8

P

15

S

16

As

33

Se

34

Sb

51

Te

52

Bi

83

Po

84

Mc

115

Lv

116

F

9

Ne

10

Cl

17

Ar

18

Br

35

Kr

36

I

53

Xe

54

At

85

Rn

86

Ts

117

Og

118

Ce

58

Pr

59

Nd

60

Pm

61

Sm

62

Eu

63

Gd

64

Tb

65

Dy

66

Ho

67

Er

68

Tm

69

Yb

70

Lu

71

Th

90

Pa

91

U

92

Np

93

Pu

94

Am

95

Cm

96

Bk

97

Cf

98

Es

99

Fm

100

Md

101

No

102

Lr

103

H 1 Li 3 Be 4 Na 11 Mg 12 K 19 Ca 20 Rb 37 Sr 38 Cs 55 Ba 56 Fr 87 Ra 88 Sc 21 Ti 22 Y 39 Zr 40 La 57 Hf 72 Ac 89 Rf 104 V 23 Cr 24 Mn 25 Fe 26 Tc 43 Mo 42 Re 75 Os 76 Bh 107 Hs 108
--

Co

27

Ni

28

Cu

29

Zn

30

Rh

45

Pd

46

Ir

77

Pt

78

Mt

109

Ds

110

Ag

47

Cd

48

Au

79

Hg

80

Rg

111

Cn

112

B

5

C

6

Al

13

Si

14

Ga

31

Ge

32

In

49

Sn

50

Tl

81

Pb

82

Nh

113

Fl

114

N

7

O

8

P

15

S

16

As

33

Se

34

Sb

51

Te

52

Bi

83

Po

84

Mc

115

Lv

116

F

9

Ne

10

Cl

17

Ar

18

Br

35

Kr

36

I

53

Xe

54

At

85

Rn

86

Ts

117

Og

118

Ce

58

Pr

59

Nd

60

Pm

61

Sm

62

Eu

63

Gd

64

Tb

65

Dy

66

Ho

67

Er

68

Tm

69

Yb

70

Lu

71

Th

90

Pa

91

U

92

Np

93

Pu

94

Am

95

Cm

96

Bk

97

Cf

98

Es

99

Fm

100

Md

101

No

102

Lr

103

Figura 1 - Tabelul periodic al elementelor (tabelul Mendeleev), cu descrierea proprietăților gazului radon (The Royal Society of Chemistry's) [8]

Radonul din sol pătruns în locuințe și nivelul concentrației acestuia din mediul interior pot fi afectate de mai mulți factori, cum ar fi rata de infiltrare caracteristică a casei, permeabilitatea infrastructurii casei, permeabilitatea solului, conținutul de radon din sol și multe altele. Studiile au arătat că infrastructura locuinței reprezintă un factor crucial, determinând în mod deosebit nivelul radonului din locuință. Radonul poate pătrunde în locuință prin diverse modalități și anume: prin porozitatea pereților; prin podeaua de la subsol; prin pereții de la subsol; prin instalațiile ce deservesc o clădire; prin podeaua de la parter [9, 10].

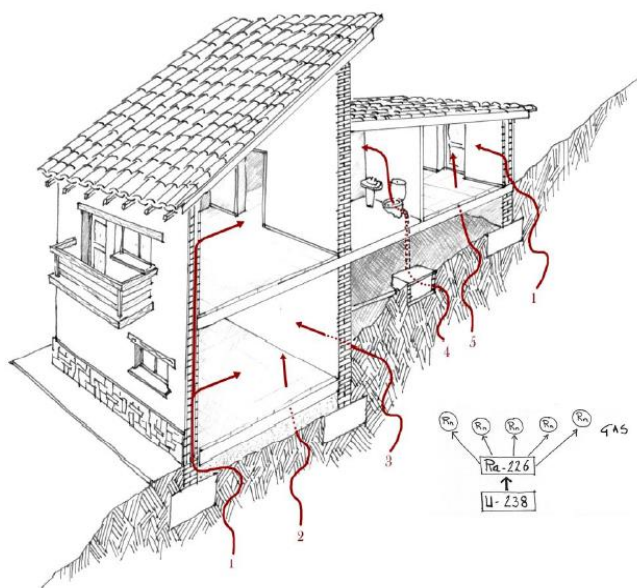


Figura 2 - Principalele căi de pătrundere a radonului în interiorul locuințelor [11]

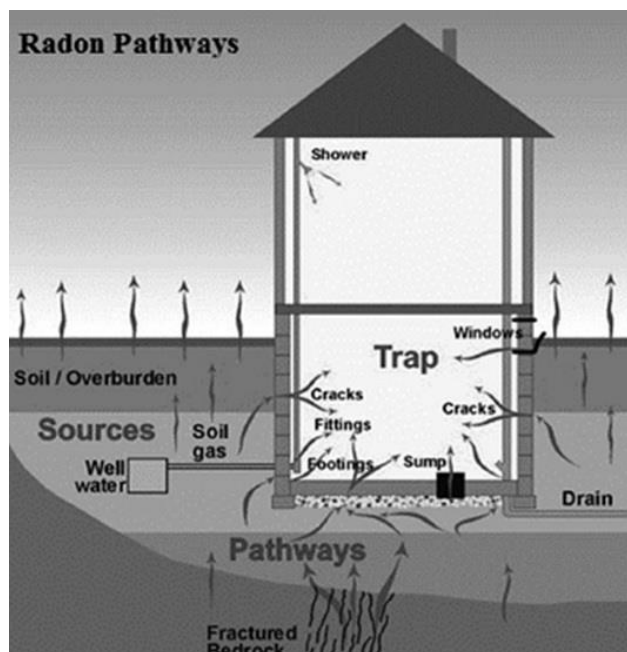


Figura 3 - Căile comune de pătrundere a radonului în interiorul locuințelor [12]

Așadar, numeroase studii au arătat pericolul determinat de expunerea prelungită la concentrații mari de radon, determinate, în principal, de dorințele de conservare a energiei,

ventilarea naturală a spațiilor devenind din ce în ce mai precară. Luca Pampuri et. al. au arătat impactul pe care intervențiile de creștere a performanței energetice a clădirilor le au asupra calității mediului interior, efecte vizibile, în principal, din cauza creșterii etanșeității anvelopei clădirii [13].

1.1.2. Obiectivele generale ale cercetării

Obiectivele propuse în cadrul proiectului doctoral constituie o premieră pentru România și Comunitatea Europeană în privința magnitudinii, tipului și planului de acțiune propus, contribuind pe deplin la cadrul necesar implementării în România începând cu anul 2018 a Directivei Europene 2010/31/UE și a Directivei Europene 2013/59/EURATOM - Prioritizarea acțiunilor privind expunerea la radon în cadrul Comunității Europene și Internaționale, în acord cu Strategia Europa 2020 [14, 15].

Pe baza constatărilor epidemiologice realizate actual cu privire la radon, multe organizații internaționale și naționale au revizuit recomandările și reglementările ce vizează expunerea la radon în locuințe și expunerea la concentrațiile de radon de la locurile de muncă. Cu diferențe mici, aceste documente noi aduc recomandări de concentrații de radon mai reduse în aerul din interior, mai ales în cel din locuințe, în comparație cu cele anterior realizate, precum o concentrație de radon mai scăzută valorii de **100 (Bq/m³)**, pentru locuințe, iar dacă această valoare nu se poate atinge în anumite țări, concentrația **să nu depășească pragul limită de 300 (Bq/m³)** [16].

Astfel, proiectul este corelat cu legislația în materie de radon pe care România trebuie să o folosească din 2018, conform normativelor europene - *DIRECTIVA 2013/59/EURATOM și a Planului național de acțiune la radon aprobat prin HG 526/2018*.

*Conform **US EPA.GOV** [17] oamenii petrec aproximativ 93% din timp în interior, 2% în exterior și 5% în tranzit. În concordanță cu timpul de expunere, cel mai important efect asupra sănătății îl reprezintă poluarea mediului interior.*

În vederea obținerii unui climat interior confortabil și sănătos, s-au documentat o serie de standarde și reglementări valabile la nivel internațional [18, 19].

Astfel, obiectivele generale ale tezei de doctorat sunt :

-  Evaluarea calității aerului interior.
-  Cercetări privind analiza și proiectarea mai multor sisteme de remediere la radon pentru clădiri de locuit.
-  Implementarea echipamentelor prototip integrat pentru monitorizarea, controlul și reducerea nivelului de radon din locuințe.
-  Analiza eficienței de remediere a expunerii la radon și alți poluanți din locuințe, corelate cu confortul termic și eficiența energetică.
-  Realizarea analizelor cost beneficiu pentru sistemele analizate.

 Elaborarea unui protocol general de monitorizare și control al radonului în clădiri, a unor ghiduri.

În concluzie, în vedere atingerii obiectivelor stabilite, se vor realiza analize experimentale în cele 10 case pilot, alese ca fiind reprezentative. Aceste analize vor duce la o serie de concluzii cu privire la eficiența de reducere ale echipamentelor, corectitudinea implementării și exploatării lor, eficiența privind consumurile de energie, în vederea asigurării unui climat interior sănătos și confortabil pentru ocupanți.

Mai mult decât atât, Directiva 2013/59/EURATOM - Prioritizarea acțiunilor privind expunerea la radon în cadrul Comunității Europene și Internaționale, solicită tuturor statelor de pe continentul European realizarea unui plan la nivelul fiecărei țări, național de acțiune pe termen lung pentru stabilirea nivelurilor de expunere la concentrațiile de radon și la riscurilor ce rezulta astfel în locuințe, în clădiri publice și la locurile de muncă, respectiv pentru materialele de construcție cu conținut ridicat de radionuclizi naturali reprezentat pe plan național de Planul național de acțiune la radon care reglementează o serie de acte normative ce urmează să apară.

Aceste obiective vor clădi o bază pentru redactarea unora dintre aceste reglementări, devenite o prioritate la nivel European privind protecția și starea de bine a populației.

1.1.3. Obiectivele specifice ale cercetării

Obiectivele specifice au în vedere abordarea cât mai aplicată a obiectivelor generale ce au ca scop aprofundarea studiilor deja existente și realizarea analizelor sistemelor pentru îmbunătățirea calității mediului interior și reducerea concentrațiilor de radon din locuințe.

Problematica radonului a fost tratată de o serie de cadre didactice ale Universității „Babeș-Bolyai” din Cluj-Napoca, sub conducerea profesorului Carlos Sainz, în perioada 2010 – 2013, în cadrul proiectului “**Implementarea tehnicilor de remediere a radonului din locuințe din zona minei aurifere Băița-IRART**” [20-22].

Studiile privind asigurarea unui mediu interior sănătos și confortabil sunt tot mai abordate pe plan internațional, reducerea radonului, dar și a altor poluanți interiori, devenind o prioritate, numeroase studii aducând contribuții importante [23-27].

Având în vedere importanța problematicei abordate în domeniul radonului, protejarea populației de radon și de alți poluanți din interiorul locuințelor reprezintă o contribuție esențială la îmbunătățirea calității aerului în interior și a condițiilor generale de viață, cu rezultate importante și asupra evoluției economice și sociale a vieții oamenilor [28-30].

Tot pe plan național, în cadrul **proiectului național RAMARO** pe teritoriul a 16 județe din zona de Vest și Nord-Vest, s-au desfășurat monitorizări ale radonului din locuințe [31, 32].

Pe plan mondial, au fost realizate o serie de analize de grupuri de cercetători în cadrul mai multor proiecte în studii efectuate în Asia, Europa și America au relevat ca expunerea prelungită la acumulări mari de radon din interiorul clădirilor are o influență semnificativă la apariția cancerului pulmonar, fiind principalul cauzator al acestuia, după fumat [33-35].

Trecând în revistă, obiective specifice sunt:

☢ *Utilizarea de metode de actualitate care să permită evaluarea calității mediului interior.*

☢ *Utilizarea de programe actuale de calcul pentru simulări numerice și corelarea datelor din simulările numerice cu datele obținute pe cale experimentală,*

☢ *Utilizarea de echipamente în vederea remediere nivelului de radon din cele 10 case analizate.*

☢ *Utilizarea de echipamente de măsurare inteligente în vederea analizării datelor din funcționarea echipamentelor pentru remediere.*

☢ *Utilizarea simulărilor numerice pentru calculul consumurilor energetice ale diferitelor echipamente în funcționare normală, corelate cu îmbunătățirea mediului interior.*

Datorita necesității iminente de aplicare a directivelor europene, a dezvoltării legislației în domeniu, dar și a elaborării unor ghiduri de bune practici privind limitarea nivelului de radon din locuințe, această lucrare poate fi considerată ca fiind una prioritară, cu puternic impact asupra îmbunătățirii mediului interior.

1.1.4. Principalele rezultate așteptate ale cercetării

Pentru a evalua problema radiologică foarte importantă ce afectează sau poate afecta sănătatea oamenilor într-un mediu locuibil este necesar să se înceapă măsurarea radioactivității chiar cu sursa de poluare, precum sol (cu materialele de construcții realizate din materiale roci/pământ ce conține radon, elementele de construcție în contact direct cu solul), cât și apa (apa din pânza freatică ce deservește sistemul de alimentare cu apă rece a caselor, apa ce vine în contact cu elementele de construcție ale caselor) și aerul (exterior și interior din locuințe) [36].

Măsurarea radonului

Dintre metodele cele mai eficiente pentru măsurarea concentrațiilor de radon în interiorul locuințelor sunt amintite metodele de integrare a detectorilor de urme cu siliciu CR - 39, constând în măsurători pasive cu detectori de urme CR - 39 (RadoSys) în aerul din mediul interiorul clădirilor [37-40].

Cucoș – Dinu, A., et alia. au utilizat 1200 detectori de urme CR - 39 expuși pe o perioadă îndelungată de timp în camerele locuibile din interiorul a 300 de case din satele România, județul Bihor, ca Băița, Câmpani, Fânațe, au fost obținute rezultate reprezentative și importante cu privire la acumulările concentrațiilor de radon din locuințe [31, 41]. În această cercetare, urmele de particule alfa de pe suprafața filmului sensibil de plastic al detectorilor de urme CR - 39 au fost citite cu ajutorul microscopului optic *RadoMeter 2000 RadoSys* [42]. Pe baza densității urmelor de particule alfa pe (mm²) a fost calculată concentrația medie de radon în (Bq/m³), aplicând formula de calcul:

$$C_{Rn} = \frac{\rho F_C}{t} \quad (1)$$

în care explicităm: C_{Rn} este concentrația de radon calculată (Bq/ m³), ρ este densitatea de urme măsurată (urme mm⁻²), F_C este factorul de calibrare ce se comunică de către producător pentru fiecare serie de detectori, t este timpul de expunere (zile) (RadoSys)[41].

Concentrația medie anuală de radon se estimează cu formula propusă în raportul *National Radiation Protection Board, NRPB 2000* [43]:

$$C_a = f_s x AM \quad (2)$$

în care explicităm, f_s reprezintă factorul de corecție sezonier în funcție de luna în care s-au demarat operațiunile de măsurare.

Prin urmare, unul dintre scopurile acestor studii și cercetări este de a realiza o *comparare a rezultatelor cu datele existente pe plan internațional în vederea unor mai bune calibrări și îmbunătățiri ale metodelor de măsurare*, pentru diminuarea erorilor, *Laboratorul de Radioactivitatea Mediului și Datăre Nucleară* obținând erori mai mici de 5%, acesta fiind o eroare foarte bună în domeniul măsurării radonului [41].

Astfel, punctăm rezultatele așteptate ale cercetării ca fiind:

🔬 *Elaborarea și obținere unor date pertinente pentru evaluarea calității aerului interior și exprimarea unui grad de confort pentru mediul interior din locuințe existente;*

🔬 *Elaborarea și obținerea de rezultate relevante folosind metode și protocoale actuale de lucru în vederea analizelor și simulărilor numerice privind impactul energetic al implementării soluțiilor de remediere la radon;*

🔬 *Elaborarea și obținerea de rezultate relevante folosind metode și protocoale actuale de lucru, în vederea stabilirii eficienței în îmbunătățirea calității aerului interior;*

🔬 *Determinarea gradului de importanța și de noutate a gazului poluant – radon, în calitatea aerului interior;*

🔬 *Intercomparări, comparări, corelații si calibrări de metode și protocoale de lucru pentru datele cercetate atât la nivel național cât și internațional.*

Cercetarea radonului atinge puncte sensibile în ceea ce privește îmbunătățirea calității mediului interior, implicit a sănătății ocupanților mediului interior, care își petrec un timp îndelungat în interiorul locuințelor, prin urmărirea evoluției concentrației de radon din marile aglomerări urbane din România.

Astfel, o primă concluzie pe care o putem desprinde este faptul că, la nivel global, monitorizarea cu atenție a condițiilor de locuit și implementarea unor acțiuni, acolo unde este cazul, pot duce la îmbunătățirea parametrilor și condițiilor generale de viață, ce au consecințe atât directe cât și indirecte asupra menținerii unui stil de viață sănătos.

1.2. Stadiul cercetării în domeniul radonului pe plan național și internațional

1.2.1. Calitatea aerului interior

Calitatea mediului interior (IAQ) reflectă nivelul calitativ al aerului din și din jurul clădirilor și structurilor, făcând referire în special la *sănătatea și confortul ocupanților* clădirilor. Înțelegerea și controlul principalilor poluanți din interior poate reduce *riscurile asupra sănătății ocupanților* acestora [44].

Efectele pot fi observate chiar și la scurt timp după una sau mai multe expuneri repetate. Acestea includ iritații ale ochilor, nasului, gâtului, dureri de cap, amețeli și oboseală. Uneori, prin simpla încetare a expunerii persoanelor la sursa de poluare, dacă aceasta poate fi identificată, poate funcționa pentru remediere. Reacția imediată la sursele de poluare interioară depinde de o serie de factori, inclusiv vârsta și antecedentele medicale ale persoanei. În unele cazuri, persoanele reacționează diferit la expunerea la surse de poluare [45-47].

Poluanții din aer sunt responsabili pentru aproximativ 4.9 milioane de decese premature în fiecare an, arată un studiu la nivel global privind principalele cazuri de *decès și îmbolnăviri*, publicat în jurnalul medical *The Lancet*. [48]

Number of deaths by risk factor, World, 2019

Total annual number of deaths by risk factor, measured across all age groups and both sexes.

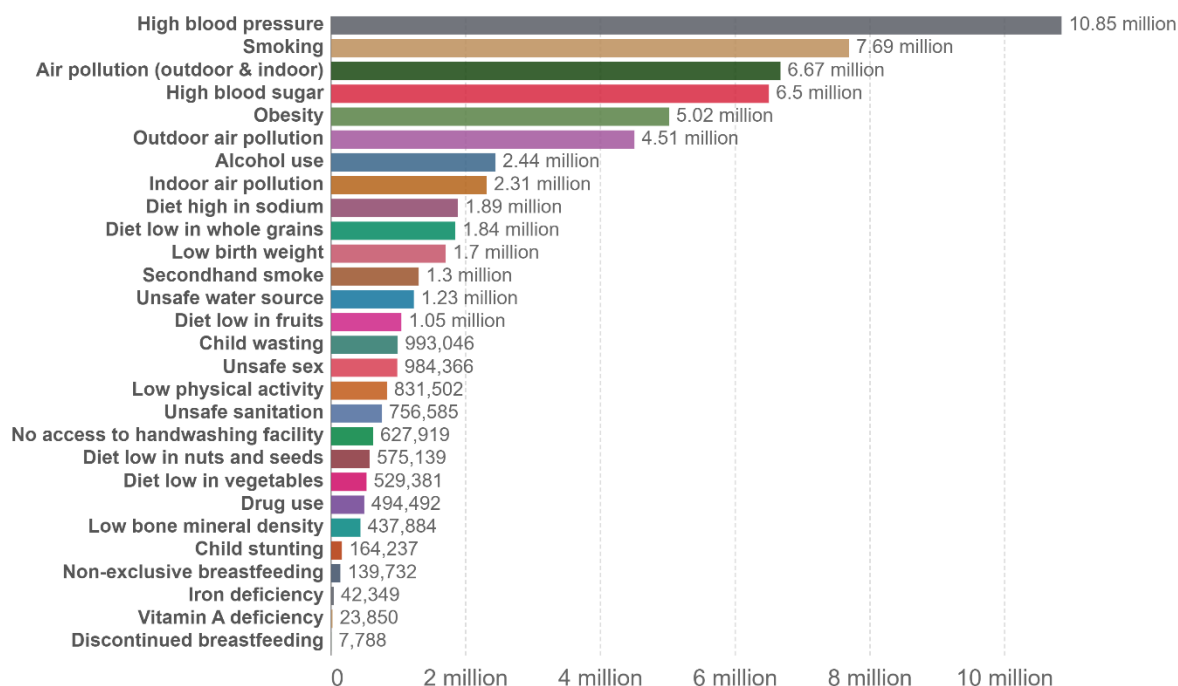


Figura 4 - Numărul de decese în funcție de factorul de risc la nivel global, anul 2017(link: <https://ourworldindata.org/grapher/number-of-deaths-by-risk-factor>) [49]

2. Situația actuală și trecerea în cercetarea detaliată a echipamentelor pentru asigurarea calității aerului din clădirile de locuit.

Ventilarea este procesul prin care aerul “curat” (în mod obișnuit din exterior) este introdus în mod intenționat într-un spațiu și aerul interior „stătut” este extras. Acest lucru poate fi asigurat prin mijloace naturale sau mecanice [50].

Ventilarea joacă un rol esențial în asigurarea unei bune calități a aerului și confortului termic.

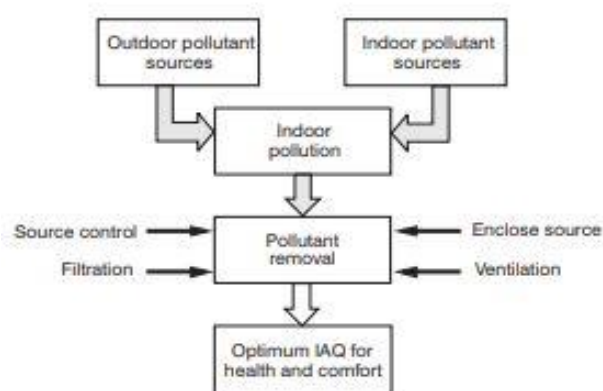


Figura 5 - Obținerea calității optime a aerului interior [50]

În vederea asigurării calității aerului interior o gamă largă de sisteme este disponibilă, fiecare dintre acestea având avantaje, dezavantaje și posibilități de implementare.

Principii care utilizează ventilarea naturală

Diferența de temperatură în lungul deschiderilor între interior și exterior corelate cu forțele din vânt sunt cei doi mari parametri care afectează debitul de aer din ventilarea unilaterală.

Ventilarea mecanică

Ventilarea mecanică descentralizată.

Ponderea consumului de energie pentru încălzire, în cazul clădirilor rezidențiale, reprezintă aproximativ 50% din consumul total de energie pentru încălzire și ventilare. Folosind unități de ventilare și evacuare a aerului viciat dotate cu recuperatoare de căldură se poate reduce consumul energetic pentru încălzire cu un procent considerabil. O astfel de opțiune o reprezintă implementarea sistemelor *de ventilare descentralizată* cu recuperare de căldură, proiectate individual pentru fiecare unitate locativă [51, 52].

Sistemele de ventilare descentralizată pot fi instalate individual pentru fiecare apartament al unei clădiri cu mai multe etaje.

În general, două mari categorii de sisteme sunt utilizate:

- numai cu introducere aer proaspăt sau cu introducere și evacuare, cu recuperare căldură pe evacuare;
- cu schimbătoare de căldură recuperative sau regenerative aplicate în apartamente.

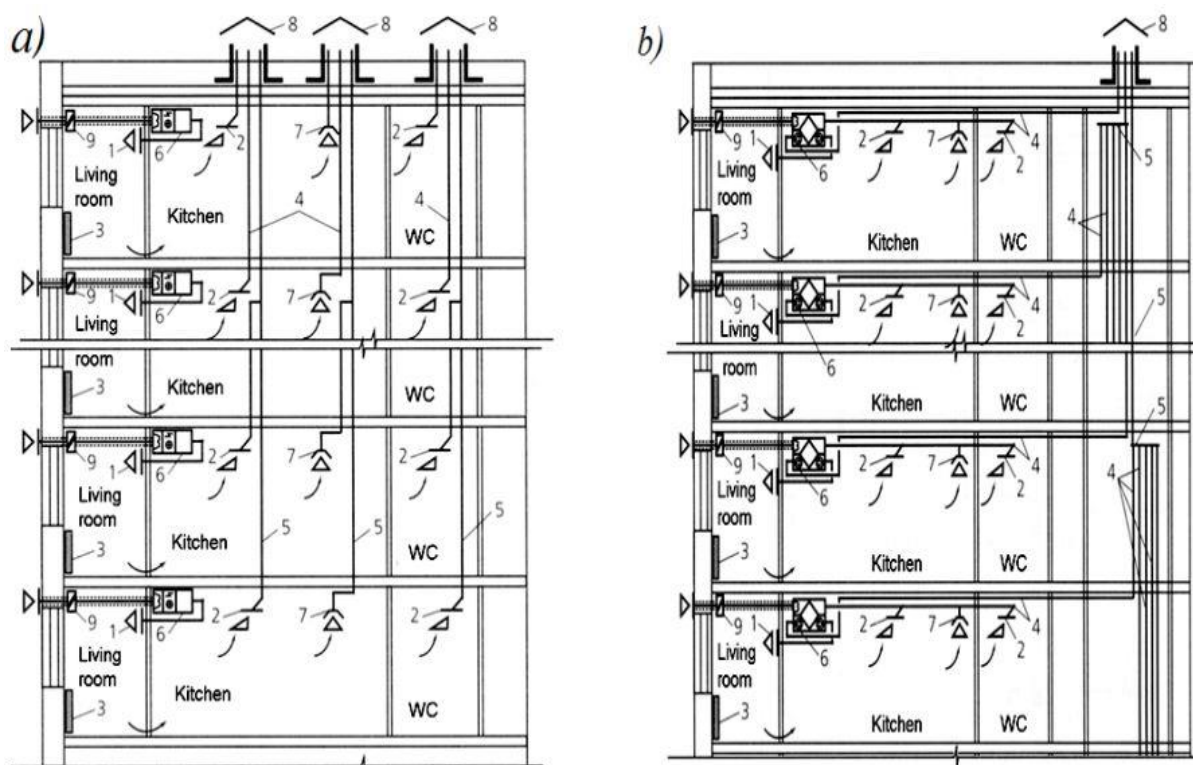


Figura 6 – a) Schema unui sistem descentralizat de ventilare cu evacuarea naturală a aerului; b) Schema unui sistem descentralizat de ventilare cu evacuare mecanică și recuperator de căldură cu flux încrucișat [51]

În figurile prezentate mai sus sunt prezentate sisteme de ventilare numai introducere sau introducere și evacuare cu recuperare de căldură cu flux încrucișat, instalate în fiecare apartament. Distribuția aerului se realizează prin intermediul unui sistem de tubulaturi, aranjat în întregul apartament. Introducerea aerului este realizată prin grile de introducere în încăperile de locuit, evacuarea făcându-se prin extracție din încăperile cu aer mai viciat (bucătărie, baie, toalete), cedând căldură în recuperatorul de căldură. Instalarea centralei de ventilare se va realiza în spațiile din balcon sau logie [53].

Sistemele de ventilare folosite în încăperi

Aceste sisteme de ventilare locală pot fi de două feluri:

- sistem de ventilare locală cu recuperare continuă cu flux reversibil;
- sistem de ventilare locală cu recuperare de căldură cu funcționare continuă atât pe introducere cât și pe evacuare.

Ventilarea mecanică centralizată

În ultimii ani, vechile clădiri rezidențiale au fost reabilitate din punct de vedere termic. Folosind tehnicile standard de reabilitare (anvelopare cu materiale în vederea creșterii rezistenței termice, schimbarea tâmplăriei exterioare etc.) pot avea ca rezultat atingerea a aproximativ 50% economii de energie [54]. A fost observat că reabilitarea termică unei clădiri existente, care a avut sisteme de ventilare naturală proiectate, a afectat

în mod negativ calitatea aerului din mediul interior și asupra rezidenților acestora, pe măsură ce clădirile se pot transmite sunete și vibrații de-a lungul tubulaturii de aceea, izolarea fonică este absolut necesară.

Sistem de presurizare/depresurizare activă/pasivă a subsolului.

Tehnicile pentru asigurarea unei calități acceptabile în clădirile de locuit localizate în zone cu concentrații mari de poluanți în sol, au fost dezvoltate în legătură cu remedierea radonului și extinsă la alte aplicații, cum ar fi prevenirea infiltrării în clădiri a gazelor din deșeuri, pentru locuințele amplasate lângă depozite de deșeuri [55].

Principiile dezvoltate asupra diferitelor tehnici de remediere constau în diluarea concentrației poluanților gazoși în volumul locuit și prevenirea poluanților gazoși să pătrundă dinspre sol. Considerând încă din faza de proiectare de posibilitatea instalării sistemelor de remediere poate duce la asigurarea unei eficiențe sporite a sistemelor cu costuri minime [56].

Cea mai eficientă metodă de reducere a infiltrațiilor de gaze poluante dinspre sol în locuință este reprezentată de Sistemul de Depresurizare a Subsolului (S.D.S.). Acesta împiedică transferul prin intermediul aerului convectiv încărcat cu poluanți din sol [57-59].

Presurizarea activă a pardoselii

Sistemele de presurizare activă a subsolului ventilează solul de sub casele afectate. Acesta reduce concentrația de radon din sol, în regiunea de sub planșeul peste sol și totodată, rata de infiltrație a radonului în locuință. Astfel, sistemul de presurizare activă, contracarează (neavând succes în toate cazurile), difuzia radonului în stratul de umplutură de sub pardoseli. Prin operarea sistemului, aerul din exterior este introdus în umplutura de sub pardoseală, încărcându-se cu particule de radon, fiind evacuat prin zonele de lângă casă (ca în figura următoare) [60, 61].

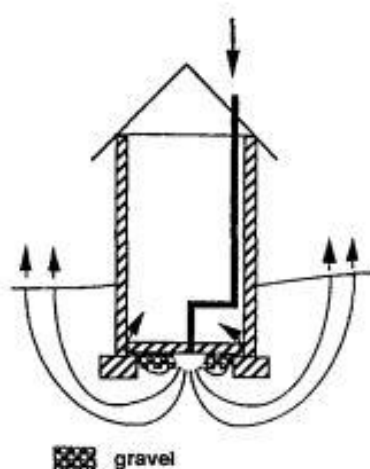


Figura 7 - Sistem de presurizare activă a subsolului [60]

În vederea obținerii rezultatelor dorite (scăderea nivelului concentrației de radon din locuință sub valorile normate), trebuie respectate o serie de măsuri, cum ar fi:

- o bună extindere a câmpului de presiuni prin asigurarea obținerii unei presiuni pozitive în întreg spațiul de sub pardoseală ($p < 0$ Pa). Atâta timp cât această condiție este satisfăcută, radonul nu poate pătrunde în stratul de umplutură prin convecție. Această condiție nu poate fi aplicată în solurile cu permeabilitate mică și la o presiune mai mică de 60 de Pa;

- sistemul poate funcționa și pentru o plajă de presiuni mai joase, numai dacă se mărește considerabil fluxul de aer introdus, condiție aplicabilă doar în cazul solurilor foarte permeabile. Acest flux mare de aer "spală" radonul din umplutura de sub pardoseală și astfel, concentrația radonului din zona de sub pardoseală este redusă;

- solul trebuie să fie suficient de permeabil astfel încât fluxul de aer introdus de sistemul de presurizare activă în stratul de umplutură de sub pardoseală să poată fi dispersat în solul din extremitățile locuinței. În cazul în care acest flux este mare, aerul care trece prin umplutură spre sol și apoi afară, poate scădea nivelul radonului prin difuzia acestuia în aerul ventilat. Pentru solurile cu permeabilitate scăzută, fluxul de aer dinspre umplutura de sub pardoseală înspre subsol se apropie de 0, lăsând radonul să fie dispersat în debitul de aer care circulă. Acest flux de aer urmează să pătrundă tot în locuință prin crăpături și alte căi având o încărcătură mare de radon;

- creșterea presiunii sistemului de presurizare reduce difuzia radonului din stratul de umplutură înspre solul din extremitățile locuinței, ducând doar la creșterea costurilor de exploatare a sistemului. Astfel, pentru ca acest sistem să funcționeze corespunzător, este absolut necesar ca solul să fie foarte impermeabil și umplutura corespunzătoare [62].

Depresurizare activa a subsolului

Sistemul de depresurizare activă inversează gradientul presiunii în lungul stratului de umplutură, calea normală de intrare a radonului dinspre sol. Obținând inversarea acestei presiuni, aerul de sub pardoseală este extras din regiunea de umplutură de sub pardoseală, prin intermediul sistemului de depresurizare activă și a conductelor colectoare, fiind evacuat în mediul exterior. Acest sistem de depresurizare activă reduce substanțial concentrația de radon din solul de sub locuință, reducând potențialul de pătrundere a radonului din sol în locuință.

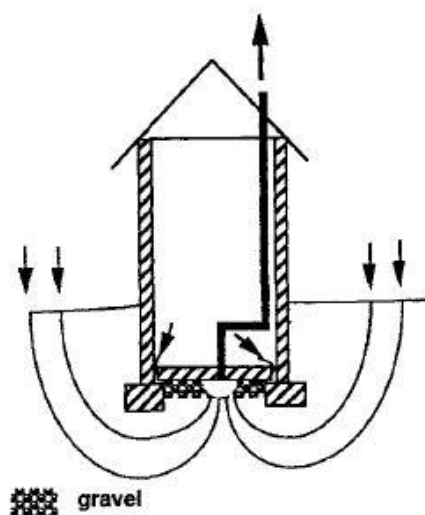


Figura 8 - Reprezentarea conceptuală a sistemului de depresurizare a pardoselii

În urma numeroaselor analize și simulări în funcționarea acestor sisteme s-au prevăzut o serie de sfaturi adiționale, cum ar fi:

- dacă stratul de umplutură este bine depresurizat, ceea ce se face la o presiune mult mai mică decât în toate punctele subsolului, direcția gradientului de presiune în lungul crăpăturilor din pardoseală este inversată și sistemul funcționează în parametrii doriți;

- dacă fluxul de aer obținut de sistem este mare, solul adiacent stratului de umplutură este “ventilat” de aerul proaspăt care traversează până la sistemul de depresurizare a pardoselii. În acest caz, chiar dacă câmpul de presiune în regiunea de depresurizare este inadecvat astfel încât să inverseze gradientul de presiune în rândul crăpăturilor din pardoseală, reducerea semnificativă a concentrației de radon din zona de sub pardoseală care ar putea pătrunde în interiorul locuinței poate arăta performanța efectivă a sistemului [23, 60, 63].

Sistem de depresurizare pasivă

Acest sistem de depresurizare pasivă, folosește principiile de stratificare termică, dar și viteza vântului, pentru a crea o depresiune în vederea realizării circulației unui flux de aer din umplutura de sub pardoseală și evacuării acestuia în exterior.

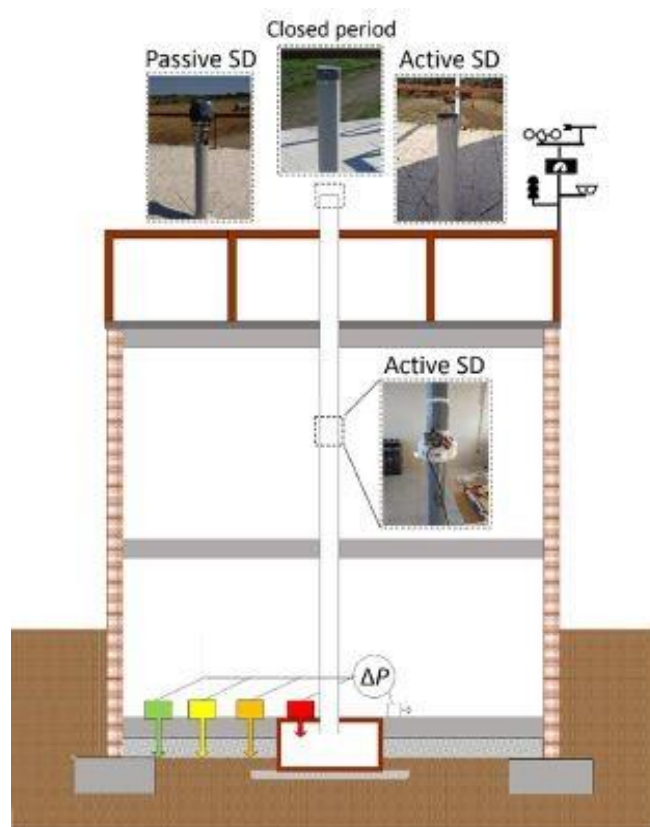


Figura 9 - Sistem de depresiurizare pardoseală activă/pasivă [64]

Fluctuațiile concentrațiilor de radon sunt zilnice sau sezonale și sunt legate de condițiile atmosferice și de schimburile de aer dintre clădire și aerul exterior. Este, de asemenea, o componentă sezonală a schimbării temperaturii exterioare și asocierii cu variațiile presiunii atmosferice, care afectează direct rata de infiltrație a radonului în clădire [65, 66].

Aplicarea membranei anti-radon

Acest sistem pasiv de protecție la radon constă în instalarea unei bariere anti-radon, etanșă sub toată pardoseala clădirii și sub pereți. Această barieră este, de obicei, o membrană din polietilenă de 300 micrometri. Difuzia radonului va surveni, probabil prin această membrană, dar cea mai mare infiltrație fiind prin crăpături, difuzia putând fi neglijată. În vederea eficienței maxime a sistemului este absolut necesar ca membrana să nu fie afectată în timpul instalării, o atenție sporită fiind acordată îmbinărilor dintre pereți și pardoseală [67].

În conformitate cu normele adoptate de mai multe state (Cehia, Germania, Spania, Olanda, Irlanda etc.) privind parametri optimi pentru proiectarea membranei anti-radon, s-au stabilit 3 tipuri de cerințe esențiale privind coeficientul de difuzie prin aceasta, după cum urmează:

1. coeficientul de difuzie al radonului D pentru membrana anti-radon, trebuie să fie sub valoarea limită;

2. grosimea d a membranei anti-radon trebuie să fie cel puțin de 3 ori mai mare decât lungimea de difuzie a radonului l calculată ca:

$$l = (D/\lambda)^{1/2} \quad (3)$$

3. grosimea membranei este calculată pentru fiecare casă în conformitate cu coeficientul de difuzie al membranei, concentrația de radon din sol și parametrii casei (rata de ventilare, suprafața în contact cu solul) [68-70].



Figura 10 - Membrana anti-radon și etanșarea acesteia la contactul cu pereții

Calculul grosimii membranei anti-radon

În condiții normale, în care membrana izolatoare este plasată sub întreaga structură a clădirii în contact direct cu solul, toate îmbinările dintre pereți și pardoseli sunt etanșe, și alte locuri prin care conductele de utilități pătrund în locuință sunt bine izolate, se poate considera ca transportul convectiv al radonului dinspre sol în locuință poate să fie neglijat. Astfel, este posibil de luat în considerare că rata de infiltrare a radonului în locuință se face doar prin difuzia prin membrana izolatoare. Bazându-ne pe aceste afirmații simplificatoare, rata maxima de exalație a radonului în casă poate fi exprimată prin intermediul ecuației:

$$E_{lim} = \frac{C_{dif} \cdot V \cdot n}{A_f + A_w} \quad \left(\frac{Bq}{m^2 h} \right) \quad (4)$$

Unde:

V este volumul interior de aer (m^3);

n este rata de schimburi de aer pe ora (h^{-1});

A_f este aria pardoselii în contact direct cu solul (m^2);

A_w este aria suprafeței pereților în contact direct cu solul (m^2);

C_{dif} este fracția din nivelul de referință al radonului, datorat difuziei. Valoarea acestui coeficient poate fi aproximat, prin intermediul unor standarde, ca fiind aproximativ 10%. Aceasta înseamnă că importanța difuziei este redusă la 10% din C_{ref} și restul de 90% din C_{ref} este rezervat pentru convecția produsă în mod accidental.

În acest context, grosimea izolației anti-radon poate fi calculată prin respectarea caracteristicilor geologice și ale clădirii reale, din condiția ca, rata de exalație E , calculată conform ecuației următoare, trebuie să fie mai mică sau egală rata maximă de exalație E_{lim} , calculată pentru casa respectivă, $E < E_{lim}$.

$$E = \alpha_1 \cdot l \cdot \lambda \cdot C_s \cdot \frac{1}{\sinh(d/l)} \quad \left(\frac{Bq}{m^2h} \right) \quad (5)$$

Unde:

C_s este concentrația de radon din sol (Bq/m^3);

λ este constanta de descompunere a radonului ($0,00756 \text{ h}^{-1}$);

d este grosimea membranei anti-radon (m);

l este lungimea de difuzie a radonului în izolație $l = (D/\lambda)^{1/2}$ (m);

α_1 factorul de siguranță care trebuie să elimine diferențele de acuratețe în timpul măsurărilor concentrațiilor de radon din sol. Valori ale acestui coeficient pot fi estimate după determinarea permeabilității solului (pentru soluri cu permeabilitate mare $\alpha_1 = 7$, pentru soluri cu permeabilitate medie $\alpha_1 = 3$ și pentru soluri slab permeabile $\alpha_1 = 2,1$).

Plecând de la premisa că izolația este omogenă, grosimea ei minimă poate fi calculată în ecuația ce urmează, înlocuind valorile obținute în ecuațiile de mai sus.

$$d \geq l \cdot \operatorname{arcsinh} \frac{\alpha_1 \cdot l \cdot \lambda \cdot C_s \cdot (A_f + A_w)}{C_{dif} \cdot n \cdot V} \quad (m) \quad (6)$$

Așadar, instalarea și utilizarea membranelor anti-radon trebuie făcută corespunzător, ca metoda secundară pentru remedierea valorilor de radon sau, în cazul în care valorile înregistrate în locuință nu depășesc mult valorile limită, ar putea fi folosită ca metodă principală.

3. Sisteme inteligente de control-comandă a instalațiilor de ventilație

Sistemul automat pentru monitorizare continuă a calității mediului interior și transmiterea la distanță a datelor, în proiectul SMART_RAD_EN.

Monitorizarea calității aerului interior este o provocare pentru cercetători deoarece concentrațiile poluanților și activitatea ocupanților variază atât spațial cât și temporal de la o încăpere la alta. În vederea monitorizării aerului interior a fost propus un sistem care combină monitorizarea mai multor parametri, cum sunt COV, CO, CO₂, concentrația de radon și parametri meteorologici (temperatură, presiune și umiditate). Acesta oferă posibilitatea setării unor valori limită ale poluanților și informarea utilizatorilor prin SMS sau notificări, atunci când aceste praguri sunt depășite. Prezența displayului este folosită pentru utilizatorii care preferă interacțiunea fizică cu dispozitivul.

Dispozitivul pilot pentru monitorizarea și transmiterea la distanță a datelor despre nivelul de radon și alți poluanți din aerul interior are avantajele SMART, prezentând următoarele grade de inovare:

- a fost primul dispozitiv inteligent de monitorizare a datelor de radon, în premieră internațională;
- primul dispozitiv inteligent care poate asocia senzorul pentru monitorizarea radonului cu alți senzori pentru monitorizarea altor poluanți interiori (CO₂, CO) și senzori meteorologici (temperatură, presiune, umiditate relativă) relevanți pentru exprimarea calității mediului interior;
- cuplarea stației de monitorizare la sistemul existent de încălzire, ventilare sau remediere la radon, în vederea comandării acestuia pe baza parametrilor măsurați;
- mobilitate, autonomie, funcționalitate, eficiență crescută și costuri de producție relativ scăzute, cu un cost total de aproximativ 1000 de euro/prototip, comparativ cu sisteme complexe disponibile pe piață;
- proiectat ca sistem de monitorizare la distanță, acesta oferă vizualizarea interactivă a influenței comportamentului ocupanților asupra calității aerului interior, prezentarea datelor statistice, alarmare în cazul în care nivelurile sunt depășite și producerea unor estimări pentru viitor ale concentrațiilor de radon corelate cu parametri meteorologici;
- baza de date și serverul sunt foarte importante, întrucât asigură autorităților indicatori relevanți asupra gradului de poluare din mediul interior, în concordanță cu eficiența energetică din clădiri.

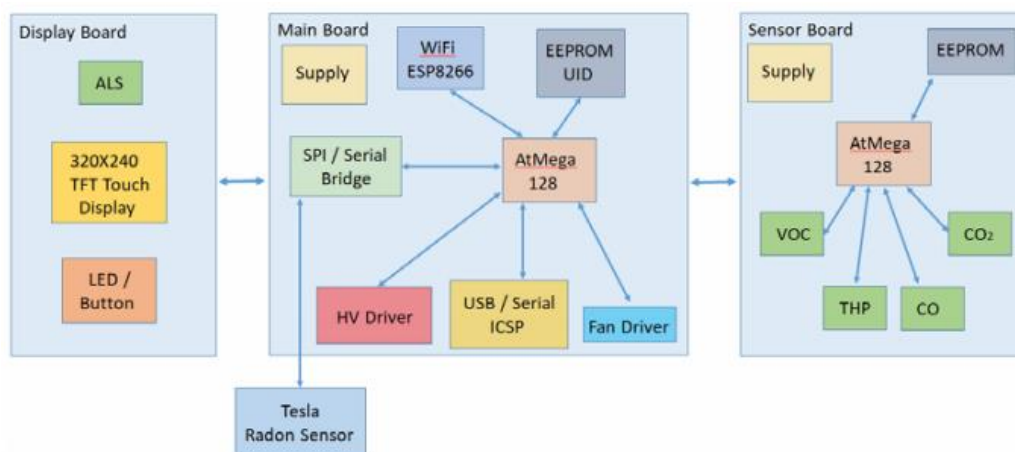


Figura 11 - Diagrama bloc a sistemului [71]

Principiul de funcționare a acestui sistem este bazată pe experiența acumulată: monitorizarea radonului din interior se face prin folosirea unei fotodiode Si-PIN, cu dimensiunea de 100 mm², montată pe o bază de fibră de sticlă, pe a cărei suprafață se găsește un strat mic de cupru legat la masă. Fibra de sticlă este plasată într-o cameră al cărui interior este acoperit cu un strat conductiv de grafit, conectat la tensiune pozitivă de 250 V. Între stratul de cupru și stratul conductiv se formează un câmp electric care favorizează capturarea și depunerea produșilor descompuși de radon. Particulele alfa

produse de dezintegrarea radioactivă a radonului și progeniturilor sale, străpung dioda și energia eliberată de aceștia, permit formarea unui impuls electric în această diodă. Datele măsurate pot fi stocate local sau transmise prin intermediul unei rețele wireless.

Microcontrolerul ATmega 128 de la Microchip (Atmel) este elementul central din placa de bază și rulează un soft dezvoltat pentru a executa măsurători, a comunica la distanță cu serverele, a afișa date pe displayul prevăzut cu touch screen.

Modului Wi-fi este construit prin intermediul chip-ului ESP8266 de la Expressif. Acesta folosește o conexiune pentru a comunica cu microcontrolerul ATmega. Poate suporta în orice moment două conexiuni active TCP: una pentru serverul de date și una pentru serverul de depanare. Ambele servere au rezervate adrese IP fixe.

Memoria EEPROM este folosită pentru a salva parametri necesarii calibrării pentru senzorii de pe placă și modurile de operare ale echipamentelor de ventilare.



Figura 12 - Echipament prototip de monitorizare continuă din proiectul SMART_RAD_EN

Echipamentul folosește un modul display de 3,2 inch, 240 x 320 pixeli ca interfață grafică între utilizator și echipament. Acesta este folosit nu doar pentru exprimarea datelor măsurate, ci și pentru setarea valorilor limită de ON și OFF pentru fiecare senzor, cu scopul de a controla echipamentele pentru ventilarea încăperii [71].

4. PROIECTUL NAȚIONAL SMARTRADON

Sisteme inteligente privind siguranța populației prin controlul și reducerea expunerii la radon corelate cu optimizarea eficienței energetice a locuințelor din aglomerări urbane importante din România – SMART-RAD-EN –

Prezentarea generală a proiectului

Acest proiect (2016 - 2020) a avut ca scop principal *determinarea metodelor/sistemelor eficiente energetic de remediere a radonului din clădirile de locuit și de a reda caracteristicile fiecărui sistem în parte cu avantajele și dezavantajele acestora.*

Au fost derulate mai multe serii de campanii de măsurare pentru stabilirea celor 10 case pilot, în care urmează să fie implementate tehnicile și sistemele de remediere la radon.

Prima serie de măsurători au avut loc în 1000 de locuințe din orașele București, Cluj-Napoca, Iași, Sibiu și Timișoara și au avut loc în două campanii prin aplicarea chestionarelor privind evaluarea calității mediului interior de către ocupanții acestora, dar și prin amplasarea a 2000 de detectori de radon. După fiecare dintre campanii detectorii au fost recoltați analizându-se măsurătorile.

O altă etapă a avut loc în vederea elaborării, pe baza măsurătorilor, pentru orașele studiate a unei hărți interactive suport pentru cartare.

Au fost realizate o serie de simulări numerice privind calitatea aerului de interior, confortul din interiorul clădirilor și eficientizarea energetică pe baza datelor experimentale.

O altă activitate realizată cu succes este reprezentată de *dezvoltarea unui sistem inteligent prototip pentru monitorizarea calității aerului (radon, CO₂, CO și COV-uri) și a parametrilor de mediu (presiune, temperatură, umiditate) cu transmitere la distanță a datelor*, prin conexiune la internet.

Următoarea etapă a fost selectarea a 100 de case dintre cele 1000, cu concentrații medii, superioare valorii de 300 de Bq/m³. Au fost realizate o serie de monitorizări detaliate a radonului și a calității mediului interior în raport cu eficiența energetică în casele cu expunere ridicată la radon. Rezultatele au fost evaluate pentru fiecare casă în parte.

În cele 100 de case au fost implementate și validate in situ, sistemul inteligent prototip pentru monitorizarea calității aerului (radon, CO₂, CO și COV-uri) și a parametrilor de mediu (presiune, temperatură, umiditate) cu transmitere la distanță a datelor.

Rezultatele măsurătorilor experimentale corelate cu datele din chestionarele aplicate, cu parametri de confort și cu indicii de eficiență energetică a clădirilor monitorizate au fost analizate în vederea elaborării și recomandării unor soluții de remediere. Dintre cele 100 de case analizate *au fost alese 10, cu risc de radon crescut, în vederea implementării sistemelor inteligente prototip pentru remedierea și prevenirea riscului expunerii populației la radon și alți poluanți în clădiri rezidențiale.*

În cele 10 locuințe alese ca fiind reprezentative, s-a demarat implementarea practică a sistemelor complexe integrate pentru monitorizarea, controlul și reducerea nivelului de radon și alți poluanți ambientali cu consum energetic redus. Pentru fiecare locuință a fost elaborat un protocol de lucru și implementat câte un sistem, proiectat astfel încât să reprezinte soluția optimă pentru remedierea nivelului de radon din interior, să realizeze confortul interior necesar, din punct de vedere energetic, dar și din punct de vedere al costului de instalare.

Au fost analizate eficiența remedierii expunerii la radon și alți poluanți din interiorul celor 10 case în corelație cu menținerea confortului termic și eficiența energetică, precum și realizarea unei analize cost-beneficiu.

Obiectivele secundare, cu impact civic, ale acestui proiect sunt reprezentate de elaborarea unui protocol general de monitorizare și control în clădiri pentru actorii principali (autorități publice, factori de decizie politică, constructori și arhitecți, publicul larg), a unor ghiduri cu recomandări destinate potențialilor beneficiari și a unui manual de bune practici.

5. Prezentarea detaliată a locuințelor supuse remedierii.

Introducere

Măsurătorile de radon au fost realizate în două campanii. Prima a constatat în monitorizarea pasivă pentru casele selectate, folosind detectoare pasive de radon CR-39 de tipul RSKS. Acestea au fost instalate în camerele de locuit. Fiecare detector a fost plasat și recuperat, asigurând durata necesară de expunere. Cea de a doua campanie de măsurări a implicat un diagnostic mai detaliat al radonului pentru fiecare locuință, evaluând mai multe aspecte, cum ar fi permeabilitatea clădirii, geologia solului, permeabilitatea solului, surse interioare de poluare, măsurările de doze gama din sol și materiale de construcții, existența unor sisteme HVAC, etc. O serie de informații au fost colectate de la locuitorii caselor, cum a fost descris în studiile publicate [72]. În vederea realizării măsurărilor continue pentru monitorizarea evoluției calității aerului în interiorul locuințelor, a fost realizat un echipament prototip [71]. Echipamentul descris mai sus a fost dezvoltat de un grup de cercetători din cadrul universității Babeș-Bolyai și instalat în locuințele selectate pentru a înregistra proprietățile aerului interior în timp real (temperatură, umiditate relativă, presiune, monoxid de carbon, dioxid de carbon, compuși organici volatili) pentru aproximativ un an, cu scopul de a selecta 10 case pilot, în care se vor fi implementat măsurile de remediere.

Atingerea obiectivului principal, acela de a crea un mediu sănătos pentru ocupanți, în concordanță cu respectarea problemelor legate de consumurile energetice, pe poate realiza prin implementarea unor echipamente, în funcție de specificul fiecărei locuințe analizate, posibilități de implementare, dar și alte bariere care vor trebui trecute de-a lungul proiectului.

Proiectul întrunește discipline din sfera instalațiilor de ventilare cu recuperare de căldură, instalații de depresurizare, echipamente de măsurare continuă a calității mediului interior, materiale pentru construcții. Toate acestea concură la realizarea unui mediu interior, sănătos, curat, în care ocupanții acestuia să fie în siguranță, scăzând incidența cancerului pulmonar datorat nivelului crescut de radon.

Fiecare locuință a fost analizată și a rezultat, astfel, câte un sistem recomandat a fi implementat în vederea îmbunătățirii calității mediului interior.

Casele analizate au fost selectate din principalele orașe ale României. Peste 1000 de locuințe din județele Iași, Timiș, Cluj, București și Sibiu. Dintre acestea 100 de locuințe au fost selectate pentru măsurători detaliate. Media anuală a concentrației de radon a fost calculată pentru a determina alegerea celor 10 case pilot care sunt reprezentative studiului, în vederea aplicării metodelor de remediere.

Locuințe	Județ	Valoare medie/ an
-	-	Bq/m ³
10	Iași	215,4
40	Cluj	428,3
17	București	282,9
20	Timiș	265,4
13	Sibiu	264,0

Tabel 1 - Valori medii ale radonului pe județe

Datorită valorilor ridicate măsurate în locuințele analizate și a potențialului de radon din sol, a fost observat că în partea de vest a țării expunerea populației la valori mari de radon este mai crescută. Așadar, cele 10 case alese au fost: 4 din Timiș, 5 din Cluj și doar una din București.

Proiectul constă în implementarea sistemelor de remediere a nivelului de radon în cele 10 case alese ca fiind reprezentative. Acestea sunt dispuse astfel: 4 în Timișoara (TM1+167, TM119, TM36), 5 în Cluj (CJ109, CJ284, CJ216, CJ041, CJ145), și una în București (B104).

6. Evaluarea eficienței de remediere a echipamentelor de reducere a nivelului de radon din locuințe din proiectul SMART RAD EN

Principalul scop al măsurilor aplicate în locuințele analizate, descrise în capitolul anterior, este de a remedia valorile concentrației de radon din mediul interior pentru a reduce riscurile de apariție a cancerului pulmonar indus de expunerea prelungită la radon. Pentru a obține rezultate favorabile, măsurile au vizat, în primul rând, limitarea pătrunderii radonului în locuință prin asigurarea unei mai bune etanșeități, respectiv diluarea concentrației de radon din interiorul locuințelor prin mărirea ratei de ventilație în interior sau aplicarea unor măsuri de depresurizare a solului de sub planșeu. Toate măsurile aplicate au fost proiectate ținând cont de caracteristicile fiecărei locuințe și de nevoile de remediere la radon.

Rezultatele implementării sistemelor de remediere la radon au fost extrase prin realizarea unor măsurări de verificare/urmărire prin metode active (de minimum 5 zile) și pasive de măsurare (de minim 90 de zile), conform art 18 pct. 2 din Ordinul CNCAN nr. 185/2019. Pentru a putea fi evaluată periodic durabilitatea lucrării, este necesară verificarea periodică a radonului, cel puțin o dată la 10 ani, precum și în cazul apariției

unor modificări radicale aduse caracteristicilor locuinței supuse remedierii (lucrări de creștere a performanței energetice a clădirii sau orice alte acțiuni care pot afecta rata de ventilare).

În cadrul studiului experimental [73] privind implementarea măsurilor de remediere în România a fost determinat prin măsurare randamentul a 4 tehnici principale aplicate asupra clădirilor rezidențiale existente, combinate cu alte 14 măsuri suplimentare.

Tabelul 31 arată eficacitatea fiecărei soluții de remediere a radonului implementate la locuințe în România din 2012, în proiectele de cercetare IRART și SMART_RAD_EN.

Sistemele de remediere s-au aplicat în combinație cu membrana anti-radon, cu trei excepții, când au fost efectuate intervențiile din exteriorul clădirii. Eficiența de reducere a radonului a avut un randament de 92% în absența membranei anti-radon, comparativ cu randamentul de 95% cu membrană. Sistemele de depresurizare a solului sub placă au fost concepute pentru a servi clădirilor de tip rezidențial, luând în considerare aplicarea minim invazivă, atunci când a fost posibil prin carotare din exteriorul clădirii.

Sistem principal de remediere	Măsuri adiționale	Categorii de concentrații radon pentru care se aplică (Bq/m^3)	Eficiență în reducerea radonului/ casă (%)
Depresurizarea solului sub placă	Membrană anti-radon + ventilator eolian	> 100	61 - 95
	Membrană anti-radon + extractor exterior + ventilator eolian		88 - 92
	Membrană anti-radon		76 - 95
	Membrană anti-radon + extractor în beci + ventilator eolian		78
	Membrană anti-radon + ventilator descentralizat cu recuperare de căldură		94
	Extractor exterior + ventilator eolian		82
	Ventilator eolian		72
	Ventilație descentralizată cu recuperare de căldură		92
	Ventilator eolian		78
Depresurizarea solului sub tubulatura de drenaj cu extractor	Membrană anti-radon + ventilator eolian	> 100	85
	Membrană anti-radon + ventilator eolian + ventilație mecanică a beciului		73
	2 unități + ventilație mecanică a beciului		67
Ventilare centralizată cu recuperare de căldură	1 unitate	< 400	64
	2 unități		54 - 64
Ventilație descentralizată cu recuperare de căldură	1 unitate		25 - 27
	2 unități		54 - 64

Tabel 2 – Centralizarea măsurilor de remediere la radon în funcție de categoria de concentrații de radon și de eficiența în exploatare

6.1. Studiul de caz din proiectul SMART_RAD_EN la 10 clădiri rezidențiale

Obiectivul principal din cadrul proiectului a constat în instalarea și validarea soluțiilor integrate pentru remedierea și controlul radonului și calității aerului interior.

Rezultatele soluțiilor de remediere aplicate realizate pot fi definite în termeni de ani de supraviețuire câștigați prin evitarea cazurilor de cancer pulmonar induse de radon și exprimate prin ani de viață câștigați. Costurile medii aferente tratamentului cancerului pulmonar au fost estimate pe baza studiilor efectuate în Anglia ca fiind cuprinse între 6800 și 7600 de euro (Kennedy et al., 1999). De asemenea, numărul mediu de ani de viață pierduți datorită mortalității prin cancer pulmonar a fost estimat la 13,5 ani [74].

Rezultatele obținute în cele 10 case selectate pentru aplicarea soluțiilor de remediere arată o concentrație medie anuală de radon de 512 Bq/m^3 , cu limite cuprinse între 224 și 1221 Bq/m^3 înainte de implementarea soluțiilor de remediere. Concentrațiile obținute după aplicarea sistemelor de remediere sunt cuprinse între 23 și 294 Bq/m^3 cu o medie de 149 Bq/m^3 . Redăm în graficul de mai jos situația înainte și după remediere pentru cele 10 case din perspectiva concentrației de radon:

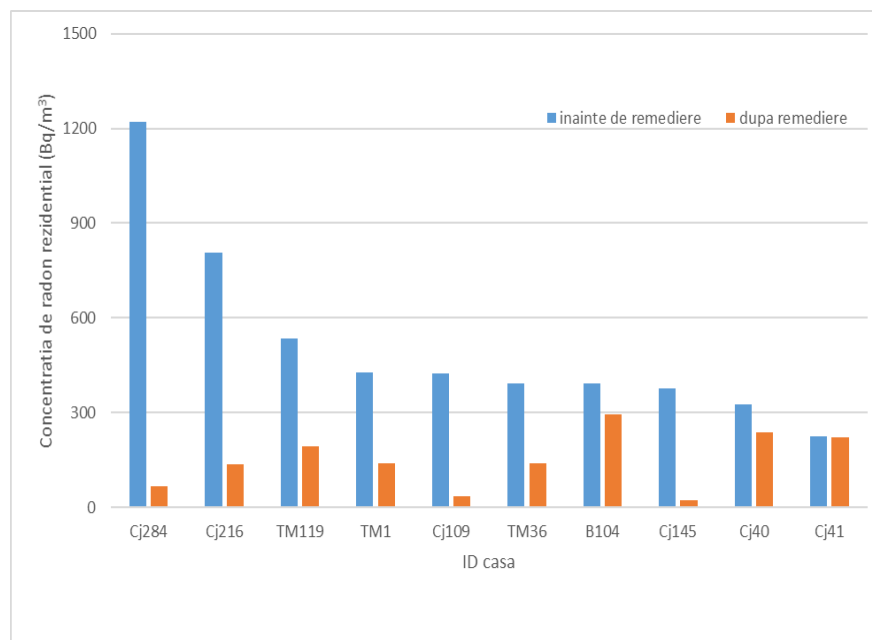


Figura 13 - Concentrațiile de radon înainte și după remedierea celor 10 case

Eficiența remedierilor efectuate s-a concretizat în rezultatele bune și foarte bune, variind de la casă la casă și de la încăpere la încăpere, situându-se în intervalul: 74 – 97%. Pentru determinarea dozei efective anuale, s-a luat în considerare un factor de ocupanță de 0.8, respectiv un factor de echilibru de 0.4. În plus, pentru determinarea dozei efective anuale pentru toți ocupanții unei case s-au estimat 3 membri per casă.

	Concentrația de radon, înainte de remediere (Bq/m ³)	Concentrația de radon, după remediere (Bq/m ³)	Reducerea dozei efective anuale (mSv) per individ	Reducerea dozei efective anuale (mSv) toți ocupanții
Media aritmetică	512	149	9	27
Val. minimă	224	23	5	-
Val. maximă	1221	294	23	-
Total			91	273

Tabel 3 - Estimarea reducerii dozei anuale în cele 10 case selectate

În vederea stabilirii gradului de îmbunătățire a calității aerului, confortului termic interior și a eficienței energetice a locuinței în care a fost instalat fiecare sistem de remediere, au fost analizate o serie de date după instalarea sistemului de remediere la radon, reprezentând diverși parametri urmăriți pentru perioade de minim 3 luni consecutiv, în perioada de iarnă, prin metode active și pasive de măsurare.

7. Influența nivelului crescut de radon asupra sănătății

Scopul capitolului îl constituie analiza indicatorilor stării de sănătate a populației României pe baza indicatorilor statistici colectați de către Institutul Național de Sănătate Publică, din unitățile sanitare din rețeaua publică (Ministerul Sănătății, Administrația Locală, Academia Română).

Obiectivele acestei analize sunt menite să creeze corelații între incidența bolilor, deceselor și altor probleme de sănătate cauzate de expunerea prelungită la radon.

Conform statisticilor Eurostat, în anul 2016, un total de 1.0 milion de decese ale persoanelor care nu au împlinit vârsta de 75 de ani, ar fi putut fi evitate în Uniunea Europeană, prin mai bune sisteme de sănătate sau intervenții însemnate pentru îmbunătățirea sănătății publice [75].

Standardised death rates for preventable diseases/conditions, persons aged less than 75 years, 2017
(per 100 000 inhabitants)

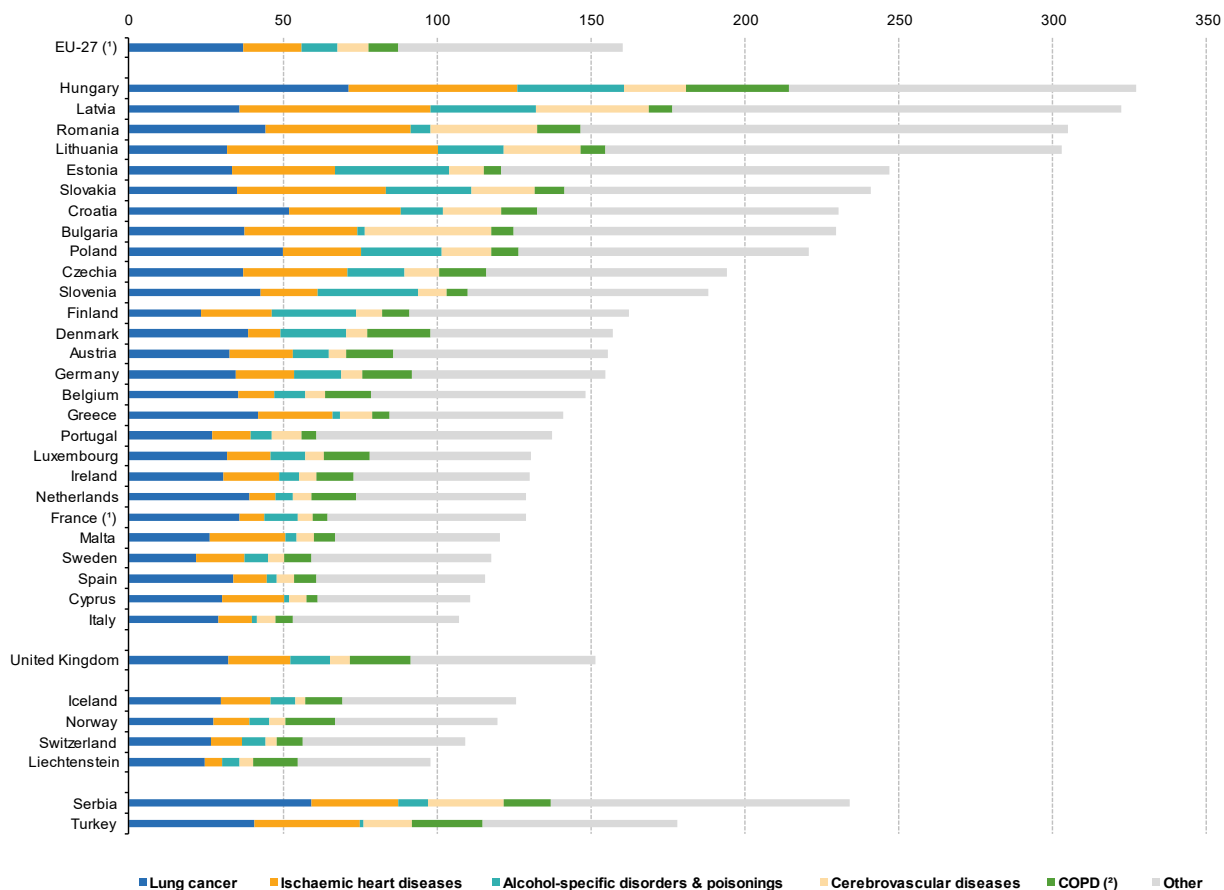


Figura 14 – Ratele deceselor prevenibile ale persoanelor sub 75 de ani, în anul 2017

Conform graficului de mai sus, realizat de Eurostat, România este printre țările fruntașe la decesele cauzate de boli ca ar fi putut fi prevenite. După cum putem observa în graficul de mai sus cancerul pulmonar reprezintă o importantă cauză a deceselor persoanelor sub 75 de ani. Nu putem nega și BPOC – Boală pulmonară obstructivă cronică (COPD - ²Chronic obstructive pulmonary disease) – care este un important factor de deces [76].

Studiile au arătat că, printre factorii care determină apariția acestei boli pulmonare, caracterizate prin limitarea fluxului de aer (bronșită cronică și emfizemul pulmonar), se poate regăsi și radonul, acesta putând fi un important cauzator al acestei boli [77, 78].

Pentru realizarea unei corelații dintre incidența bolilor aparatului respirator și potențialul zonal de radon, se va expune harta media aritmetică a măsurărilor de radon din locuințe, efectuate în pătrate de 10km x 10km.

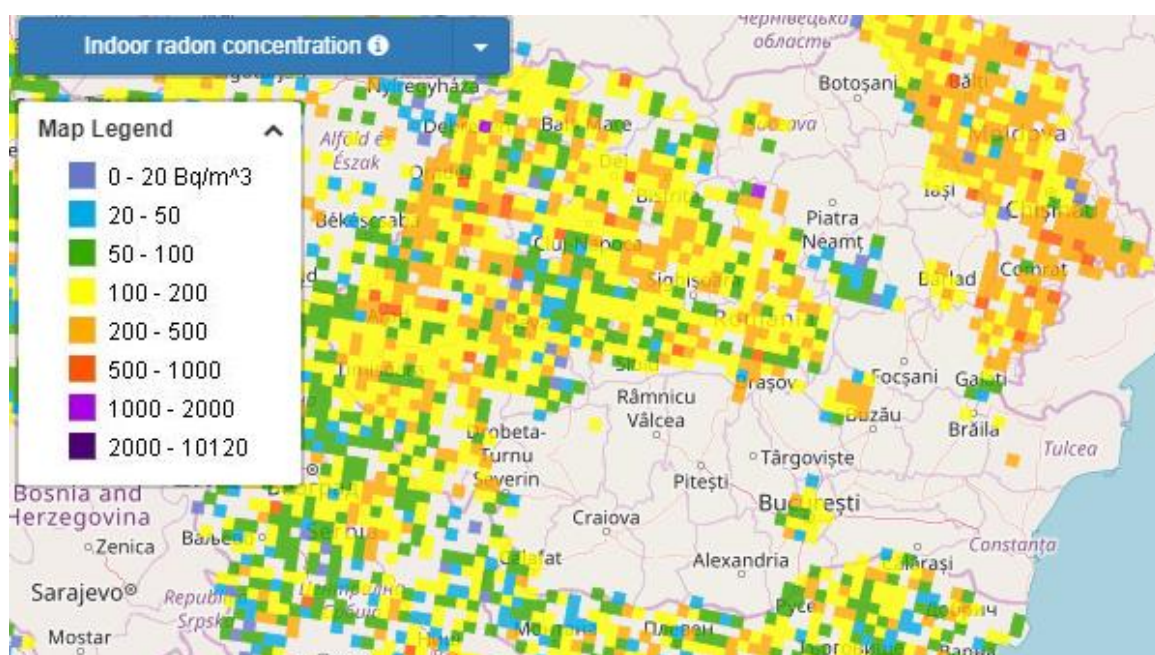


Figura 15 - Harta cu potențialul de radon din locuințe

Prin analizarea hărții radonului (în varianta disponibilă la momentul actual), putem observa o corelare a nivelului crescut de radon măsurat în aerul din interiorul locuințelor, cu nivelul crescut al deceselor cauzate de boli pulmonare. Probabil că nivelul crescut de radon la care se expune, fără măcar să bănuiască, populația, are repercusiuni fatale de-a lungul timpului. Din aceste măsurători preliminare, putem observa că în județele Mureș (130 ‰), Arad (108 ‰), Bihor (92 ‰), Timișoara (79.5 ‰) se găsește radon în interiorul locuinței în concentrații deosebit de mari. Din datele puse la dispoziție de Institutul Național de Sănătate Publică, observăm că aceste județe se găsesc fruntașe la decesele cauzate de boli ale sistemului respirator.

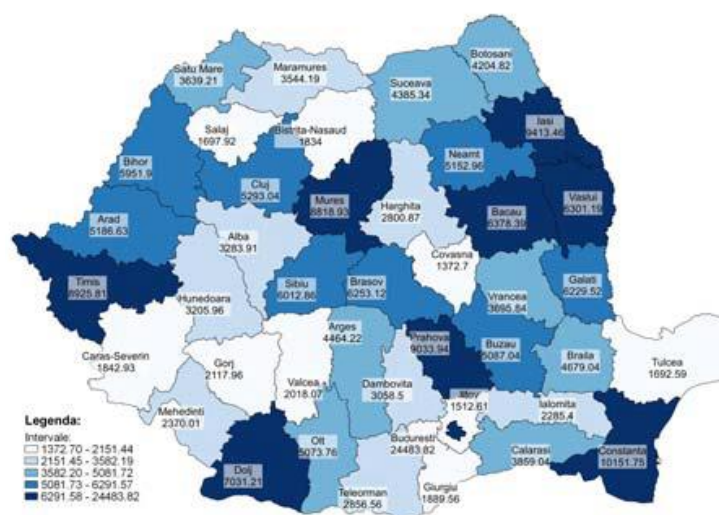


Figura 16 - Ani din viață pierduți prin boli ale aparatului respirator, în România, în anul 2019

În anul 2019, numărul anilor de viață potențial pierduți prin decese cauzate de bolile aparatului respirator au fost 209090,6, în creștere cu 15137,9 față de anul 2018. Acest

număr reiese din diferența dintre vârsta stabilită de 75 de ani, și decesele premature cauzate de bolile aparatului respirator.

8. Concluzii

Problematica radonului a început să preocupe tot mai mult cercetătorii din întreaga lume, pe mai multe domenii cum ar fi, geologie, medicină, instalații pentru construcții, și altele. Statisticile îngrijorătoare date de OMS arată că radonul este un parametru cu consecințe grave asupra sănătății oamenilor (în cazul unor expuneri prelungite) [79].

După cum putem a fost documentat în rapoartele de cercetare, România este printre primele țări din Europa la incidența deceselor cauzate de boli ale aparatului respirator. Acest lucru îngrijorător trebuie combătut cumva. Numeroase studii au arătat impactul pe care radonul îl are asupra sănătății, fiind un important factor cauzator de boli ale aparatului respirator. Analizând datele statistice, puse la dispoziție de Institutul Național pentru Sănătate Publică, Institutul Național de Statistică și Eurostat, putem concluziona că, alături de alți factori, și radonul poate avea un impact important în incidența cazurilor de boli pulmonare. Aceste date ale incidenței ratelor de îmbolnăvire au fost comparate cu măsurătorile nivelului de radon din locuințe, conform hărții radonului. Analiza a arătat o corelație între ratele de îmbolnăvire cu boli ale aparatului respirator, cu zonele în care radonul se găsește în cantități însemnate în locuințe. Conform studiilor și publicațiilor demarate de-a lungul anilor, radonul este al doilea cauzator de cancer pulmonar, după fumat. Toate aceste date ne întăresc motivele studierii a mijloacelor și metodelor pentru remedierea nivelului crescut de radon din locuințe.

Raportul tratează un studiu efectuat între anii 2016 – 2020, care a cuprins măsurarea radonului din 10 case reprezentative, după alegerea acestora, pe baza măsurătorilor efectuate, din 1000 de case participante la studiu. În interiorul acestor case s-au instalat diferite mijloace de remediere a nivelului de radon din locuință, în funcție de mai mulți factori care au fost detaliați în prezentul raport. Au fost constatate diferite niveluri ale radonului în locuințe, care au necesitat folosirea variatelor sisteme de remediere.

Analiza a continuat cu prezentarea deficiențelor induse de metoda de ventilare naturală a locuinței, metodă total inefficientă din punct de vedere energetic. Se poate spune că, în cazuri particulare, această metodă dă unele roade, însă nivelul radonului nu se stabilizează. Mai mult, principalii indicatori ai confortului termic sunt profund afectați.

În vederea stabilirii gradului de îmbunătățire a calității aerului, confortului termic interior și a eficienței energetice a locuinței în care a fost instalat fiecare sistem de remediere, au fost extrase o serie de date, reprezentând diverși parametri urmăriți pentru perioade de minim 3 luni consecutiv, în perioada de iarnă, atât înainte cât și după instalarea sistemului de remediere la radon.

Pentru o mai bună expunere privind avantajele și dezavantajele folosirii fiecărui sistem de remediere, instalat în locuințe, a fost realizată o scurtă expunere a fiecărui echipament, prezentată în continuare. Toate comparațiile au fost raportate la perioada în care se încerca remedierea nivelului de radon din locuințe prin intermediul aplicării ventilării naturale, neexistând date premergătoare acestui proces.

Ventilare mecanică centralizată – sistem implementat în 2 locuințe

Sistemul de ventilare mecanică centralizată, cu recuperare de căldură a fost proiectat și instalat în 2 locuințe, deserving între spațiul locuit. În continuare vor fi expuse rezultatele obținute comparând situația înaintea aplicării măsurilor de remediere cu rezultatele obținute după aplicarea măsurilor, în perioade similare de timp, pe perioada iernii.

1. Eficiența de remediere la radon: au fost obținute eficiențe de remediere între 44% și 55,57%, reușind în unul dintre cazuri reducerea nivelului de radon sub limita de 300 Bq/m³. Acest sistem înregistrează o eficiență bună de reducere la radon în cazul în care concentrația de radon nu depășește cu mult valoarea maximă admisă.

2. Temperatura interioară: a fost sesizată o îmbunătățire substanțială, înregistrându-se o stabilizare substanțială, comparativ cu varianta folosirii ventilației naturale.

3. Concentrația de dioxid de carbon din locuință: au fost înregistrate eficiențe de remediere a nivelului de dioxid de carbon între 38,5% și 59%, în ambele cazuri reușindu-se stabilizarea nivelului în jurul valorii medii de 550 – 570 ppm.

4. Concentrația de compuși organici volatili: în ambele cazuri, nivelul concentrației de compuși organici volatili a scăzut, înregistrându-se o stabilizare a valorii medii la aproximativ 14, respectiv 17,33% aer încărcat cu compuși organici volatili.

5. Simularea locuinței în programul de simulare numerică: reprezentând toate caracteristicile locuinței și parametri de funcționare ai sistemului de ventilare a fost observată o reducere a sarcinii termice pentru încălzirea locuinței între 28 și 57%.

Analizând cele prezentate mai sus, concluzionăm că acest sistem (dimensionat pentru asigurarea necesarului de aer proaspăt pentru ocupanții locuințelor), poate fi folosit pentru reducerea nivelului de radon din locuințe, îndeosebi în locuințele în care nivelul maxim admis nu este foarte mult depășit. Soluția prezintă și alte avantaje cum ar fi, menținerea unei temperaturi interioare în parametri, îmbunătățirea calității aerului interior prin reducerea și altor poluanți din locuință și scăderea costurilor privind încălzirea locuinței prin recuperarea energiei din ventilarea aerului interior.

Ventilarea mecanică descentralizată, dublu-flux, cu recuperare de căldură – sistem implementat în o singură locuință

1. Eficiența de remediere la radon, este destul de slabă, poate chiar lipsește, valoarea rămânând relativ asemănătoare cu cazul în care locuința a fost ventilată natural. Rezultatul se poate datora intervenției factorului uman (ocupanții locuinței au intervenit prin întreruperea funcționării sistemului).

2. În ceea ce privește variația temperaturii interioare și a umidității relative, se pot observa variații mult mai mici decât în cazul în care era aplicată ventilarea naturală. Umiditatea relativă a suferit, de asemenea, o stabilizare importantă, devenind constantă, neînregistrându-se fluctuații în perioada analizată.

3. Din punct de vedere energetic, folosirea acestui echipament comparativ cu aplicarea ventilării naturale duce la reducerea costurilor privind încălzirea locuinței cu 29%, fapt datorat eficienței recuperatorului de căldură înglobat. Datele prezentate anterior se aplică la o funcționare teoretică la parametri proiectați, fără intervenția factorului uman.

În ceea ce privește folosirea acestui sistem, dimensionat pentru asigurarea necesarului de aer proaspăt în încăperea testată, putem concluziona că poate fi o variantă, numai în cazul în care funcționarea acestuia nu ar fi perturbată de acțiunea umană și în cazul în care valorile concentrației de radon din locuință nu ar depăși cu mult valoarea limită stabilită de 300 Bq/m³. Acest echipament poate menține un confort interior crescut, comparativ cu aplicarea metodei de ventilare naturală a locuinței.

Ventilare mecanica descentralizată, simplu-flux, cu recuperare de căldură – sistem implementat în 3 locuințe

1. Eficiența sistemului la reducerea concentrației de radon din locuință a variat între 21% (locuință în care a fost instalat un singur aparat) și 44,8% (locuință în care au fost instalate două echipamente cu funcționare intermitentă, care să deservească întreaga locuință).

2. Variația temperaturii interioare – În unul dintre cele 3 cazuri confortul termic interior a fost îmbunătățit, temperatura interioară fiind relativ constantă. În celelalte două cazuri nu au fost înregistrate diferențe înaintea și după instalarea sistemelor.

3. Variația nivelului de dioxid de carbon din locuință – eficiența sistemului în reducerea nivelului de dioxid de carbon din locuință în care a fost instalat a variat între 25% și 36%, în toate cele 3 cazuri reușindu-se reducerea nivelului de dioxid de carbon din locuință la valori medii acceptabile pentru ocupanții acestora.

4. Nivelul concentrației de compuși organici volatili – sistemul descris oferă o bună eficiență și în ceea ce privește concentrația de compuși organici volatili din locuințele în

care acesta a fost instalat, arătând valori ale eficienței între 34% și 54,5%. O altă observație poate fi legată de atingerea vârfurilor de 100% (aer extrem de încărcat cu compuși organici volatili), care este mai rar întâlnită în cazul de după aplicarea metodelor de remediere la radon, sau valoarea de 100% se regăsește pentru scurte momente, nefiind menținută pentru perioade lungi, ca în cazul de înaintea remedierii la radon.

5. Din punct de vedere energetic, folosirea acestui tip de sistem pentru remedierea nivelului de radon din locuință, aduce o reducere a sarcinii termice comparativ cu utilizarea metodei de ventilare naturală, între 32% și 49% (în cazul în care au fost utilizate două echipamente cu funcționare intermitentă).

În urma analizării datelor exprimate mai sus, putem concluziona că, sistemul proiectat pentru asigurarea necesarului de aer proaspăt este eficient în reducerea nivelului concentrației de radon din locuințe existente, în special în locuințele în care valoarea maximă a concentrației de radon nu este cu mult depășită. Beneficiile utilizării acestui sistem țin de menținerea confortului termic interior, scăderea sarcinii termice a locuinței (comparativ cu utilizarea metodei de ventilare naturală), îmbunătățirea calității aerului interior prin reducerea și altor poluanți decât radonul, costurile mici pentru achiziție, lucrările de mică anvergură pentru instalarea echipamentelor, ușurință deosebită în exploatare și interconectare cu echipamentele de comandă și control.

Sistem de depresurizare activă a pardoselii

1. Eficiența sistemului la remediere nivelului concentrației de radon din locuințe a variat între 81% și 98% pentru perioada analizată de 3 luni, în ambele cazuri reușindu-se remedierea nivelului mediu al concentrației de radon din locuință de la peste 700 Bq/m³, înaintea remedierii, la sub 200 Bq/m³, respectiv 67 Bq/m³, obținându-se un nivel corespunzător al concentrației de radon.

2. Variația temperaturii interioare - după cum era de așteptat, în lipsa unui sistem de ventilare a aerului din interiorul locuinței, nivelul temperaturii interioare nu se modifică comparativ cu varianta inițială. Nivelul concentrației de radon a scăzut considerabil, reliefând că sistemul propus este eficient doar din punct de vedere al reducerii nivelului de radon din locuință.

3. Variația concentrației de dioxid de carbon din locuință – există o diferență în ceea ce privește variația nivelului concentrației de dioxid de carbon din locuință, acesta variind între 13% și 31%, comparativ cu situația în care locuința era ventilată în mod natural pentru reducerea nivelului de radon. Cel mai probabil, această diferență este datorată unor factori independenți de implementarea măsurii de remediere la radon.

4. Variația nivelului concentrației de compuși organici volatili din locuință - în urma analizării celor două perioade de timp, înaintea aplicării metodei de remediere și după aplicarea metodelor de remediere la radon, nu a fost observată nici o îmbunătățire în ceea

ce privește nivelul compușilor organici volatili, nivelul fiind constant (33-34%). Putem concluziona că echipamentul propus și implementat pentru remedierea nivelului de radon din locuință nu este eficient decât în ceea ce privește nivelul concentrației de radon din locuința analizată, neaducând nicio îmbunătățire în ceea ce privește reducerea altor poluanți sau calitatea aerului interior.

5. Din punct de vedere energetic, diferența este dată de folosirea înaintea implementării măsurilor de remediere la radon a ventilării naturale (obicei deloc eficient din punct de vedere energetic), și lipsa aplicării acestora din momentul în care a fost pus în funcțiune sistemul de remediere a nivelului concentrației de radon. În ambele cazuri, această reducere a sarcinii termice se regăsește în jurul valorii de 30%.

Analizând cele expuse mai sus, putem concluziona că, pentru reducerea nivelului concentrației de radon deosebit de mari din locuințe, acest sistem este foarte eficient, reușind scăderea nivelului extrem de dăunător din locuințe la valori cu mult sub limita maximă admisă, de 300 Bq/m³. Dezavantajele folosirii unei astfel de soluții sunt date de complexitatea lucrărilor pentru instalarea echipamentelor și tuturor accesoriilor, costul acestor lucrări. Spre deosebire de soluțiile care folosesc ventilarea mecanică cu recuperare de căldură, acest sistem nu modifică calitatea aerului interior prin reducerea și altor poluanți care nu au ca sursă de proveniență infiltrațiile din sol (nivelul concentrației de compuși organici volatili, dioxid de carbon, monoxid de carbon etc.).

Sistem hibrid – aplicarea depresurizării active a pardoselii concomitent cu utilizarea unor sisteme de ventilare mecanică descentralizată, cu recuperare de căldură

1. Eficiența sistemelor la reducerea nivelului concentrației de radon din locuință – a fost observată o importantă scădere după instalarea sistemului de remediere la radon, coborând media concentrației de radon de la o valoare de aproximativ 400 de Bq/m³, măsurată în faza premergătoare instalării sistemului de remediere la radon (în perioada când remedierea radonului se făcea prin aplicarea ventilării naturale), la o valoare medie a concentrației de radon după aplicarea măsurilor de remediere la radon de 59 Bq/m³, nivel mult sub limita impusă de 300 Bq/m³. Eficiența combinată a sistemului calculată în cele două perioade analizate de câte 4 luni, a fost în intervalul 85-95%.

2. Variația temperaturii interioare corelată cu evoluția nivelului de radon, după aplicarea măsurilor de remediere – a fost observată reducerea nivelului de radon, obținând o eficiență importantă, însă nu a fost obținută o stabilizare a nivelului temperaturii interioare. Acele oscilații importante sunt datorate valorilor de set Point ale ocupanților locuinței.

3. Variația concentrației de dioxid de carbon din locuința analizată - nivelul concentrației de dioxid de carbon din locuință a scăzut considerabil după aplicarea

metodelor de remediere la radon, plecând de la o valoare medie de aproximativ 762 ppm înaintea aplicării metodei de remediere la radon (când se încerca remedierea nivelului de radon din locuință prin aplicarea ventilării naturale, de acolo și variațiile mari ale nivelului concentrației de dioxid de carbon), la o valoare medie de 584 ppm, înregistrată în cele 4 luni analizate. Sistemele de remediere la radon, instalate în locuință, au arătat o eficiență de aproximativ 23% în cazul reducerii nivelului de dioxid de carbon.

4. Variația concentrației compușilor organici volatili din locuință – a fost înregistrată o scădere semnificativă după aplicarea metodei de remediere la radon din locuința analizată. În urma analizei a fost observat că nivelul concentrațiilor de COV a scăzut considerabil, de la o valoare medie înaintea aplicării metodelor de remediere de aproximativ 70% aer încărcat cu compuși organici volatili, la o valoare medie de aproximativ 47 % aer încărcat cu compuși organici volatili după aplicarea măsurilor de remediere la radon. Așadar, sistemul are o eficiență suplimentară de aproximativ 49% în reducerea nivelului concentrației compușilor organici volatili.

5. În ceea ce privește reducerea sarcinii termice a locuinței, putem concluziona că, a fost înregistrată o reducere a costurilor cu aproximativ 29%, comparativ cu situația aplicării ventilării naturale, cel mai probabil datorată folosirii sistemului de ventilare descentralizată cu recuperare de căldură.

Scăderea concentrației de radon din locuință a prezentat un procent mai bun în cazul folosirii sistemului de depresurizare activă a pardoselii, fără alt sistem suplimentar, decât în cazul folosirii unui sistem hibrid (depresurizare activă a pardoselii și ventilare mecanică descentralizată, simplu flux, cu recuperare de căldură) deoarece, în cazul sistemului hibrid, depresurizarea activă a pardoselii a fost realizată prin implementarea unei măsuri minim invazive, nefiind nevoie de îndepărtarea pardoselii din încăperea testată.

Direcții de cercetare

Subiectul reducerii concentrațiilor ridicate de radon este foarte variat fiind un domeniu tot mai des aprofundat de către cercetători. Studiile pot continua abordându-se următoarele potențiale direcții:

1. Analiza eficienței sistemelor de remediere la propagarea radonului în școli, companii, clădiri publice etc.
2. Testarea altor tehnici decât cele folosite în prezentul studiu în ceea ce privește eficiența de remediere la radon, corelată cu alți parametri ai climatului interior care pot fi afectați.
3. Extinderea măsurătorilor în ceea ce privește definitivarea hărții naționale a potențialului de radon din locuințe.
4. Analiza unor posibile corelații dintre concentrațiile de radon din locuință și alți parametri/poluanți din aerului interior (CO₂, VOC, CO, THP etc).

5. Analiza variației concentrației de radon din locuințe în cazul folosirii unui sistem de ventilare mecanică centralizată cu recuperare de căldură a cărei funcționare să fie variabilă (nu continuă) în funcție de parametrii calității aerului interior.

Referințe

1. Baias, P.F., et al., *Lung dosimetry for inhaled radon progeny in smokers*. Radiation protection dosimetry, 2010. **138**(2): p. 111-118.
2. Elío, J., et al., *Estimation of residential radon exposure and definition of Radon Priority Areas based on expected lung cancer incidence*. Environment international, 2018. **114**: p. 69-76.
3. Cosma, C., et al., *Testing radon mitigation techniques in a pilot house from Băița-Ștei radon prone area (Romania)*. Journal of environmental radioactivity, 2015. **140**: p. 141-147.
4. Chao, C.Y., et al., *Detailed measurements of indoor radon levels in five residential premises and the effect of ventilation*. Indoor and Built Environment, 1997. **6**(5): p. 277-281.
5. Organization, W.H., *WHO housing and health guidelines*. 2018.
6. Annex, D. and U.N.S.C.o.t.E.o.A. Radiation, *Sources and effects of ionizing radiation*. Investigation of I, 2000. **125**.
7. Cuculeanu, V., et al., *Dynamics, deterministic nature and correlations of outdoor ^{222}Rn and ^{220}Rn progeny concentrations measured at Bacău, Romania*. Journal of environmental radioactivity, 2011. **102**(7): p. 703-712.
8. *Radon*. Martie 2022]; Available from: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/86/radon>.
9. Wang, F. and I.C. Ward, *Radon entry, migration and reduction in houses with cellars*. Building and Environment, 2002. **37**(11): p. 1153-1165.
10. Collignan, B., C. Lorkowski, and R. Améon, *Development of a methodology to characterize radon entry in dwellings*. Building and environment, 2012. **57**: p. 176-183.
11. Frutos, B., et al. *Radon concentration control by ventilation and energy efficiency improvement*. in *Proceedings de AIVC Conference. Madrid*. 2015.
12. Deb, A., et al., *Exposure to underground radon in and around Kolkata Municipal Corporation area: an exhaustive study*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2017. **311**(1): p. 375-384.
13. Pampuri, L., P. Caputo, and C. Valsangiacomo, *Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions*. Sustainable Cities and Society, 2018. **42**: p. 100-106.
14. *COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM*, T.C.O.T.E. UNION, Editor. 2014: Official Journal of the European Union.
15. *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council*, T.e.p.a.t.c.o.t.e. union, Editor. 2010: Official Journal of the European Union.
16. *Report to Congress on Indoor Air Quality, 2*, in *Pollution, Indoor Air*, E.p. agency, Editor. 1989, EPA/400/1.
17. United States, E.P.A., *Report to Congress on Indoor Air Quality*. 1989.
18. American Society of Heating, R., and Air-Conditioning Engineers, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, in 55. 2017.
19. STANDARDIZATION, E.C.F., *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. 2006.
20. Constantin COSMA, A.C.D., Botond PAPP, Robert BEGY1, Alida GABOR, Nicoleta BICAN-BRIȘAN & Lucian BEȘUȚIU, *RADON IMPLICATION IN LIFE AND EARTH SCIENCE: BĂIȚA-ȘTEI AREA AND PECENEAGA-CAMENA FAULT (ROMANIA)*. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2014. **9**: p. 15-21.
21. Cucos Dinu, A., et al., *Thorough investigations on indoor radon in Baita radon-prone area (Romania)*. Sci Total Environ, 2012. **431**: p. 78-83.
22. Cosma, C., et al., *Testing radon mitigation techniques in a pilot house from Baita-Ștei radon prone area (Romania)*. J Environ Radioact, 2015. **140**: p. 141-7.
23. Groves-Kirkby, C.J., et al., *Domestic radon remediation of UK dwellings by Sub-Slab Depressurisation: evidence for a baseline contribution from constructional materials*. Environ Int, 2008. **34**(3): p. 428-36.
24. Canada, M.o.H.o., *Reducing Radon Levels in Existing Homes: A Canadian Guide for Professional Contractors*. Health Canada, 2010.

25. Darby, S., et al., *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. BMJ, 2005. **330**(7485): p. 223.
26. Stanley, F.K.T., et al., *Radon exposure is rising steadily within the modern North American residential environment, and is increasingly uniform across seasons*. Sci Rep, 2019. **9**(1): p. 18472.
27. Jay H. Lubin, J.D.B., Jr., *Lung Cancer Risk From Residential Radon: Meta-analysis of Eight Epidemiologic Studies*. Journal of the National Cancer Institute, 1997. **89**: p. 49-57.
28. Holmgren, O., et al., *Radon remediation and prevention status in 23 European countries*. Radiat Prot Dosimetry, 2013. **157**(3): p. 392-6.
29. Alonso, H., et al., *Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils*. Sci Total Environ, 2019. **664**: p. 449-460.
30. Field, R.W., et al., *An overview of the North American residential radon and lung cancer case-control studies*. J Toxicol Environ Health A, 2006. **69**(7): p. 599-631.
31. Cosma, C., et al., *Preliminary integrated indoor radon measurements in Transylvania (Romania)*. Isotopes Environ Health Stud, 2009. **45**(3): p. 259-68.
32. Cosma, C., A. Cucos Dinu, and T. Dicu, *Preliminary results regarding the first map of residential radon in some regions in Romania*. Radiat Prot Dosimetry, 2013. **155**(3): p. 343-50.
33. Billon, S., et al., *French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays*. Radiat Prot Dosimetry, 2005. **113**(3): p. 314-20.
34. Brand, K.P., Zielinski, J. M., & Krewski, D, *Residential Radon in Canada: An Uncertainty Analysis of Population and Individual Lung Cancer Risk*. Risk Analysis, 2005. **25**: p. 253-269.
35. R. WILLIAM FIELD, B.J.S., DANIEL J. STECK AND CHARLES F. LYNCH, *Residential radon exposure and lung cancer: Variation in risk estimates using alternative exposure scenarios*. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 2002. **12**: p. 197-203.
36. Tollefsen, T., et al., *From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation*. Radiation protection dosimetry, 2014. **162**(1-2): p. 129-134.
37. Sahu, P., D.C. Panigrahi, and D.P. Mishra, *Sources of Radon and its Measurement Techniques in Underground Uranium Mines – An Overview*. Journal of Sustainable Mining, 2014. **13**(3): p. 11-18.
38. Constantin COSMA, A.C.D., Botond PAPP, Mircea MOLDOVAN, Robert BEGY, Tiberius DICU, Dan C. NIȚĂ, Bety D. BURGHELE, Dan FULEA, Ciprian CÎNDEA, Oana DUMITRU RUSU, Cristian MALOȘ, Liviu SUCIU, Gheorghe BANCUIU & Carlos SAINZ, *Radon measurements and radon remediation in Băița-Ștei prone area*. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2013. **8**: p. 191-199.
39. Durrani, S.A. and R. Ilic, *Radon Measurements By Etched Track Detectors-Applications In Radiation Protection, Earth Sciences*. 1997: World Scientific.
40. Abbas, Y., et al., *Measurement of ²²⁶Ra concentration and radon exhalation rate in rock samples from Al-Qusair area using CR-39*. Journal of radiation research and applied sciences, 2020. **13**(1): p. 102-110.
41. Alexandra CUCOȘ (DINU), C.C., T. DICU, B. PAPP, D. C. NIȚĂ, R. BEGY, M. MOLDOVAN, C. CÎNDEA, D. FULEA, C. SAINZ, *The present situation of indoor radon measurements and the perspective of remediation actions in Băița-Bihor (Romania) mining area*. ECOTERRA - Journal of Environmental Research and Protection, 2011. **27**.
42. Khan, A.J., et al., *Calibration of a CR-39 plastic track detector for the measurement of radon and its daughters in dwellings*. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 1990. **17**(4): p. 497-502.
43. Board, N.R.P. *National Radiation Protection Board, NRPB 2000* 2000; Available from: <https://www.gov.uk/government/collections/national-radiological-protection-board-nrpb-report-series>.
44. Agency, U.S.E.P. *Indoor Air Quality (IAQ)*. Available from: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>.
45. P., W.D., *The effects of indoor air quality on performance and productivity*. Indoor Air, 2004. **14**: p. 92-101.
46. B. Berglund, B.B., H. KnOppel, T. Lindvall, M. Maroni L. Molhave and P. Skov, *Effects of Indoor Air Pollution on Human Health* Indoor air, 1992. **2**: p. 2-25.

47. Simoni, M., et al., *Indoor air pollution and respiratory health in the elderly*. Eur Respir J Suppl, 2003. **40**: p. 15s-20s.
48. Burney, P. and A.F.S. Amaral, *Air pollution and chronic airway disease: is the evidence always clear?* The Lancet, 2019. **394**(10215): p. 2198-2200.
49. Evaluation, I.f.H.M.a., *Number of deaths by risk factor, World, 1990 to 2019*. 2021, Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME).
50. Agency, I.E., *A Guide to Energy Efficient Ventilation*, ed. M.W. Liddament. 1996.
51. Murgul, V., et al. *Decentralized ventilation systems with exhaust air heat recovery in the case of residential buildings*. in *Applied Mechanics and materials*. 2014. Trans Tech Publ.
52. Murgul, V., et al. *The use of decentralized ventilation systems with heat recovery in the historical buildings of St. Petersburg*. in *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Trans Tech Publ.
53. Kim, M.K. and L. Baldini, *Energy analysis of a decentralized ventilation system compared with centralized ventilation systems in European climates: Based on review of analyses*. Energy and Buildings, 2016. **111**: p. 424-433.
54. Blumberga, A., A. Kamenders, and G. Žogla, *Energy Performance of Renovated Soviet Time Apartment Building*. 2008.
55. Rydock, J.P. and E. Skåret, *A case study of sub-slab depressurization for a building located over VOC-contaminated ground*. Building and environment, 2002. **37**(12): p. 1343-1347.
56. Abdelouhab, M., B. Collignan, and F. Allard, *Experimental study on passive Soil Depressurisation System to prevent soil gaseous pollutants into building*. Building and Environment, 2010. **45**(11): p. 2400-2406.
57. Henschel, D.B., *Radon-reduction techniques for detached houses. Technical guidance*. 1988, Environmental Protection Agency.
58. Scivyer, C., *Surveying dwellings with high indoor Radon levels: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings*. 1993.
59. Hellerich, L., et al. *Overview Of Two Large-Scale Residential Sub-Slab Depressurization System Installation Programs*. in *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy*. 2010.
60. Gadgil, A.J., Y.C. Bonnefous, and W.J. Fisk, *Relative Effectiveness of Sub-slab Pressurization and Depressurization Systems for Indoor Radon Mitigation: Studies with an Experimentally Verified Numerical Model*. Indoor Air, 1994. **4**(4): p. 265-275.
61. Prill, R. and W. Fisk, *Long term performance of radon mitigation systems*. 2002, Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States).
62. Renken, K.J. and S.J. Konopacki, *An innovative radon mitigation-energy conservation retrofit system for residential buildings*. Air & Waste, 1993. **43**(3): p. 310-315.
63. Rahman, N.M. and B.L. Tracy, *Radon control systems in existing and new construction: a review*. Radiation Protection Dosimetry, 2009. **135**(4): p. 243-255.
64. Fuente, M., et al., *Radon mitigation by soil depressurisation case study: Radon concentration and pressure field extension monitoring in a pilot house in Spain*. Sci Total Environ, 2019. **695**: p. 133746.
65. Scivyer, C., A. Cripps, and M. Jaggs, *BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings*. 1998, Brepress.
66. Nero, A., *Indoor Radon and Its Decay Products: Concentrations, Causes, and Control Strategies*. 2008.
67. Coskeran, T., et al., *The cost-effectiveness of radon-proof membranes in new homes: a case study from Brixworth, Northamptonshire, UK*. Health Policy, 2007. **81**(2-3): p. 195-206.
68. Jiránek, M. and J. Hůlka, *Radon diffusion coefficient in radon-proof membranes—determination and applicability for the design of radon barriers*. International Journal on Architectural Science, 2000. **1**(4): p. 149-155.
69. Jiránek, M. and J. Hůlka, *Applicability of various insulating materials for radon barriers*. Science of the total environment, 2001. **272**(1-3): p. 79-84.
70. Jiránek, M., K. Rovenská, and A. Fronka. *Radon diffusion coefficient—a material property determining the applicability of waterproof membranes as radon barriers*. in *Proceedings of*

American Association of Radon scientists and Technologists. AARST's. 18 th International Radon symposium. 2008. Citeseer.

71. Tunyagi, A., et al., *An innovative system for monitoring radon and indoor air quality*. Romanian Journal of Physics, 2020. **65**: p. 803.
72. Florică, Ș., et al., *The path from geology to indoor radon*. Environmental Geochemistry and Health, 2020: p. 1-11.
73. Burghel, B., et al., *Comprehensive survey on radon mitigation and indoor air quality in energy efficient buildings from Romania*. Science of The Total Environment, 2021. **751**: p. 141858.
74. Kennedy, C., et al., *A cost-effectiveness analysis of a residential radon remediation programme in the United Kingdom*. British Journal of Cancer, 1999. **81**(7): p. 1243-1247.
75. Eurostat, *Preventable and treatable mortality statistics*. Eurostat database, 2017.
76. Barbosa-Lorenzo, R., et al., *Residential radon and COPD. An ecological study in Galicia, Spain*. International journal of radiation biology, 2017. **93**(2): p. 222-230.
77. Turner, M.C., et al., *Radon and COPD mortality in the American Cancer Society cohort*. European Respiratory Journal, 2012. **39**(5): p. 1113-1119.
78. Conde-Sampayo, A., et al., *Exposure to Residential Radon and COPD: A Systematic Review*. International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease, 2020. **15**: p. 939.
79. Organization, W.H. *Radon and health*. 24.01.2022]; Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.