

# **ROZWIĄZANIE ZADANIA KONKURSOWEGO**

## **Zadanie nr 6 – FIZYKA**

### **Świadomie o atomie**

#### **Atom dla Nauki**

**Autor: Dominik Muszyński**

*Żyrardów, dn. 29.02.2016 r.*

*Szanowni Państwo,*

Mam przyjemność przekazać do oceny pracę konkursową w ramach III edycji konkursu dla studentów Atom dla Nauki ZADANIE NR 6 – FIZYKA. W konkursie biorę udział drugi raz stąd układ graficzny może wydawać się podobny, ale praca nie jest kopią poprzedniej – zwłaszcza, że treść zadania konkursowego jest inna.

Praca zgodnie z zadaniem konkursowym została podzielona na 3 rozdziały:

- I. Oszacowanie Dawek
- II. Ryzyko Radiologiczne
- III. Działania Zapobiegawcze

Pierwszy rozdział jest dość obszerny – zawiera oszacowanie poszczególnych składowych efektywnych dawek dla poszczególnych przypadków. W tym rozdziale moim celem było przedstawienie metodologii obliczania dawek oraz uzasadnienie wyboru kolejnych wzorów czy wartości. W pracy nie zagłębiam się w teorię, nie przytaczam definicji z zakresu ochrony radiologicznej, ponieważ wg mnie to nie było zakresem zadania konkursowego. Kolejne dwa rozdziały krótko traktują o ich tematach – przedstawiając zwięźle omawiane zagadnienia. Na samym końcu znajduje się literatura z której korzystałem.

*Z poważaniem,*

*Dominik Muszyński*

# I. OSZACOWANIE DAWEK

## 1. WTÓRNE PROMIENIOWANIE KOSMICZNE

Dawkę otrzymaną od wtórnego promieniowania kosmicznego można podzielić na dwa komponenty (za formułą przedstawioną przez Bouville - Lowder), tj.: składową jonizacyjną i neutronową [1] [2]. Otrzymana dawka od promieniowania kosmicznego zmienia się w zależności od wysokości nad poziomem morza oraz od szerokości geomagnetycznej.

**Składowa jonizacyjna** dla mocy dawki skutecznej określana jest jako

$$\dot{E}_I(z) = \dot{E}_I(0)[0.21e^{-1.649z} + 0.79e^{0.4528z}]$$

gdzie:

$\dot{E}_I(0)$  – moc dawki składowej jonizacyjnej na poziomie morza dla danego regionu na Ziemi

$z$  – wysokość terenu nad poziomem morza wyrażona w kilometrach

**Składowa neutronowa** dla mocy dawki skutecznej określana jest jako:

$$\dot{E}_N(z) = \dot{E}_N(0)b_N e^{az}$$

gdzie:

$\dot{E}_N(0)$  – moc dawki składowej neutronowej na poziomie morza dla danego regionu na Ziemi

$b_N$  – współczynnik zależny od wysokości nad poziomem morza

$a$  – współczynnik charakterystyczny dla danego regionu na Ziemi

$z$  – wysokość terenu nad poziomem morza wyrażona w kilometrach

Tabela 1

### ***Dane geograficzne poszczególnych lokalizacji z zadania konkursowego***

Lp.	Lokalizacja	Współrzędne geograficzne		Wysokość n.p.m [m]	Współrzędne geomagnetyczne	
0	1	2		3	4	
1	Polska , centrum	52.23 N	21.00 E	80-180	50.42 N	105.61 E
2	Iran, Ramsar	36.92 N	50.65 E	0-25	31.06 N	128.63 E
3	Polska, Zakopane	49.28 N	19.93 E	830-860	47.73 N	103.46 E
4	Francaja, Flamanville	49.53 N	1.87 W	70-75	51.60 N	82.27 E
5	Polska, Suwałki	54.10 N	22.93 E	165-175	51.91 N	108.19 E

Współrzędne geomagnetyczne dla różnych wariantów obliczeniowych zostały obliczone na podstawie danych dla lutego 2016, na podstawie współrzędnych geograficznych oraz wysokości n.p.m. przy użyciu kalkulatora NASA Goddard Space Flight Center. Bieguny magnetyczne nie mają stałego położenie, obserwuje się ich wędrówkę.

Tabela 2

**Składowe i stałe użyte do wyliczenia całkowitej dawki rocznej od promieniowania kosmicznego**

Lp.	Lokalizacja	Składowa jonizacyjna $\dot{E}_I(0)$ [nSv/h]	Składowa neutronowa $\dot{E}_N(0)$ [nSv/h]	Stała $a$ [km <sup>-1</sup> ]	Stała $b_N$ [-]	Wys. n.p.m. $z$ [km]	Składowa jonizacyjna $\dot{E}_I(z)$ [nSv/h]	Składowa neutronowa $\dot{E}_N(z)$ [nSv/h]
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>Polska, centrum</b>	32	10.0	0.85	1	0.12	<b>32.21</b>	<b>11.07</b>
2	<b>Iran, Ramsar</b>	32	5.3	0.70	1	0.01	<b>32.00</b>	<b>5.34</b>
3	<b>Polska, Zakopane</b>	32	7.8	0.85	1	0.85	<b>38.80</b>	<b>16.06</b>
4	<b>Francaja, Flamanville</b>	32	10.0	1.04	1	0.07	<b>32.08</b>	<b>10.76</b>
5	<b>Polska, Suwałki</b>	32	10.0	0.85	1	0.17	<b>32.38</b>	<b>11.55</b>

**Wartości dawek składowej jonizacyjnej  $\dot{E}_I(0)$  oraz neutronowej  $\dot{E}_N(0)$**  na poziomie morza ( $z = 0$ ) dla danego regionu na Ziemi zmieniają się wraz z szerokością geomagnetyczną. Wartości  $\dot{E}_I(0)$  i  $\dot{E}_N(0)$  dla danych lokalizacji zostały przyjęte na podstawie szerokości geomagnetycznych z Tabeli 1 w oparciu o raport Komitetu Naukowego ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego (UNSCEAR 2010) [2].

**Współczynnik  $b_N$**  zależy od wysokości nad poziomem morza:  $b_N = 1$  dla  $z < 2$  km lub  $b_N = 2$  dla  $z > 2$  km [2]. Dla każdej lokalizacji z zadania współczynnik  $b_N = 1$ , wszystkie miejscowości leżą poniżej wysokości 2000 m n.p.m.

**Współczynnik  $a$**  na podstawie raportów UNSCEAR 2008 i wcześniejszych, dla terenów poniżej 2000 m n.p.m. można przyjąć umownie wartość  $a = 1.0$  [m<sup>-1</sup>] [1]. Niemniej jednak w literaturze można znaleźć eksperymentalnie wyznaczone wartości współczynnika  $a$  dla określonych regionów na kuli ziemskiej, gdzie przeprowadzono pomiary. Poniżej przedstawiono wartości tych współczynników wraz z referencjami:

- **Polska  $a = 0.85$  [km<sup>-1</sup>]**, na podstawie pracy M. Florek [3], w pracy przeprowadzono badania i pomiary na różnych wysokościach w obszarze Europy Środkowej pomiędzy 48°-52°N oraz 16°-20°E;
- **Flamanville  $a = 1.04$  [km]**, zaproponowany przez Bouville i Lowder w roku 1988 dla obszarów w okolicy szerokości geograficznej 50°N [2];
- **Ramsar  $a = 0.7$  [km<sup>-1</sup>]**, wartość ta odpowiada terenom o podobnym oddaleniu od równika magnetycznego – Japonia [4]. W literaturze brak konkretniej wartości dla Iranu.

Ekspotencjalny charakter równania na składową neutronową  $\dot{E}_N(\mathbf{0})b_N e^{a\mathbf{z}}$  oraz niskie wartości wielkości  $\mathbf{z}$  (wysokość n.p.m podana w kilometrach) powodują, iż różnice co do przyjętej wartości współczynnika  $\mathbf{a}$  nie wpływają w istotny sposób na wynik końcowy. Co więcej dla miejscowości nadmorskich (Flamanville, Ramsar) wartość  $e^{a\mathbf{z}}$  dąży do jedności, niezależnie od przyjętej wartości współczynnika  $\mathbf{a}$ . Największa różnica w obliczaniu wyniku mocy dawki pomiędzy współczynnikiem umownym  $a = 1.0 [m^{-1}]$ , a odnalezionym w literaturze, występuje dla Zakopanego – najwyżej położonego nad poziomem morza przypadku z zadania konkursowego. W stosunku rocznym różnica w dawce skutecznej otrzymanej od promieniowania kosmicznego nie przekracza 4% (~16  $\mu\text{Sv}$ ). Wartość ta jest tożsama z dawką jaką statystyczny Polak otrzymuje w niespełna dwa dni lub dawką jaką otrzymuje pacjent prześwietlając ząb 3 razy (standardowa procedura leczenia zęba kanałowo). Przyjęcie wartości powyższych współczynników z literatury dla poszczególnych regionów Ziemi, wnosi większą wartość i dokładność w obliczeniach końcowych, aniżeli zastosowanie jednej wartości umownej dla wszystkich terenów poniżej 2000 m n.p.m.

**Przytoczone powyżej wzory na moce dawek składowej jonizacyjnej i neutronowej promieniowania kosmicznego pozwalają oszacować jedynie dawkę efektywną otrzymaną od promieniowania na zewnątrz budynku – „na powietrzu”. Oczywiście jest, iż człowiek większość czasu w ciągu roku spędza w domu. Wg danych UNSCEAR [1] [2] średnioroczny współczynnik przebywania człowieka w pomieszczeniu wynosi  $t_{IN} = 0.8$  (tj. 7008 h z 8760h), pozostały czas człowiek spędza na powietrzu. Co więcej przebywając w pomieszczeniu człowiek nabywa jakoby osłonę przed promieniowaniem kosmicznym w postaci konstrukcji budynku. Raport UNSCEAR [1] rekomenduje uniwersalny współczynnik zmniejszenia mocy dawki promieniowania kosmicznego w pomieszczeniu równy  $f = 0.8$  (tzn.  $\dot{E}_{in} = f \cdot \dot{E}_{out}$ ). Jest to współczynnik uniwersalny dla całego globu, nie uwzględniający charakterystyki mieszkaniowej danego państwa. W aneksie do raportu UNSCEAR [1] złożone jest zestawienie, w którym zawarto dawki godzinowe m.in. od promieniowania kosmicznego wewnątrz pomieszczenia i na powietrzu.**

- **$f = 0.8$  Iran** – wartość  $f$  przyjęta jako uniwersalna w związku z niemożnością odnalezienia danych szczegółowych dla Iranu. Wartość tą porównano z krajami sąsiednimi z tego samego regionu geograficznego – Kuwejtu  $f = 0.83$ , Azerbejdżan  $f = 0.66$  [1].
- **$f = 0.794$  Polska** – wartość  $f$  obliczona na podstawie danych Centralnego Laboratorium Ochrony Radiologicznej za rok 2004 o średnich dawkach skutecznych otrzymywanych przez mieszkańców Polski [5] (nowsze sprawozdania i raporty CLOR jak i PAA [6] nie uwzględniają rozdziału pomiędzy dawką wewnątrz i na zewnątrz budynku od promieniowania kosmicznego).

- **$f = 0.8$  Francja** – wartość  $f$  przyjęta jako uniwersalna w związku z niemożnością odnalezienia danych szczegółowych. Niemniej jednak wartość tą porównano z krajami sąsiednimi Belgia i Włochy dla których te współczynniki wynoszą odpowiednio 0.7879 i 0.8158 (obliczone na podstawie aneksu do raportu UNSCEAR [1]).

Tabela 3

**Składowe dawki rocznej oraz całkowita dawka roczna od promieniowania kosmicznego**

Lp.	Lokalizacja	$E_{I,out}(z)$ [nSv/h]	$E_{N,out}(z)$ [nSv/h]	$f$ [-]	$E_{I,in}(z)$ [nSv/h]	$E_{N,in}(z)$ [nSv/h]	$E_{out}$ [mSv/rok]	$E_{in}$ [mSv/rok]	$E_{total}$ [mSv/rok]
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	<b>Polska, centrum</b>	32.21	11.07	0.794	25.57	8.79	0.076	0.241	<b>0.317</b>
2	<b>Iran, Ramsar</b>	32.00	5.34	0.800	13.28	2.22	0.065	0.109	<b>0.279</b>
3	<b>Polska, Zakopane</b>	38.80	16.06	0.794	30.81	12.75	0.096	0.305	<b>0.401</b>
4	<b>Francaja Flamanville</b>	32.08	10.76	0.800	25.66	8.61	0.075	0.240	<b>0.315</b>
5	<b>Polska, Suwałki</b>	32.38	11.55	0.794	25.71	9.17	0.077	0.244	<b>0.321</b>

Oznaczenia: *in* – w pomieszczeniu, *out* – za zewnątrz

## 2. RADON Rn-222

Roczną dawkę skuteczną od wdychanego radonu Rn-222 otrzymaną w wyniku ekspozycji zarówno w pomieszczeniu jak i na zewnątrz budynku można obliczyć wg wzoru rekomendowanego przez UNSCEAR [1] oraz IRSN – Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety [7]. Równanie to uwzględnia krótkożyciowe produkty rozpadu radonu, będące radioaktywnymi izotopami metali ciężkich. Izotopy generowane są w powietrzu i są wdychane do płuc. Krótki czas połowicznego zaniku oraz droga rozpadu (promieniowanie alfa) powoduje że są one szkodliwe dla organizmu gdy zostaną pochłonięte. Co więcej metaliczne produkty rozpadu osiadają w układzie oddechowym, w przeciwieństwie do radonu nie są wydychane. Emisja cząstek alfa wewnątrz organizmu może powodować zmiany nowotworowe. Człowiek przebywając w środowisku o danej zawartości Rn-222 w powietrzu zostaje również napromieniony z zewnątrz. Jednak ta składowa jest praktycznie zaniedbywalna – większość cząstek alfa o energii kilku MeV zostanie zatrzymana na ubraniu.

$$E [mSv] = DCF \cdot PAEC \cdot \tau$$

gdzie:

$E$  – roczna dawka efektywna [ $mSv$ ]

$DCF$  – współczynnik konwersji ekspozycji na  $mSv$   $\left[ \frac{Sv/h}{J/m^3} \right]$

$PAEC$  – średnie stężenie energii potencjalnej  $\alpha$  [ $J/m^3$ ]

$\tau$  – czas ekspozycji [ $h$ ]

Współczynnik konwersji ekspozycji  $DCF \left[ \frac{Sv/h}{J/m^3} \right]$  – jest współczynnikiem umożliwiającym konwersji ekspozycji na dawkę  $E$ . Współczynnik  $DCF$  stanowi dawkę odpowiadającą jednogodzinnej ekspozycji  $PAEC \cdot \tau$  na jednostkowe stężenie energii potencjalnej  $\alpha$ . Współczynnik ten można wyznaczyć dwojako. Wykorzystując dane epidemiologiczne bazujące na ryzyku zapadalności na nowotwory dróg oddechowych lub dozymetryczne uwzględniające modele fizyczne osadzania się aerozoli w drogach oddechowych. W praktyce stosuje się metodę epidemiologiczną – nie wymaga specjalnej aparatury pomiarowej. Na podstawie publikacji Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP) [7] do dalszych obliczeń wykorzystane zostaną następujące współczynniki dla ogółu populacji  $DCF = 1.4 \left[ \frac{Sv/h}{J/m^3} \right]$  Dla pracowników fizycznych w kopalniach np. rud uranu współczynnik ten jest ponad dwukrotnie większy.

Czas ekspozycji  $\tau$  [ $h$ ] – na podstawie raportów WHO i UNSCEAR przyjmuje się, że w ciągu roku przeciętny człowiek spędza w pomieszczeniu 80% czasu, zaś na powietrzu 20%. Na podstawie danych Eurostat przeciętny Polak pracuje średni w roku 2000h.

$$PAEC = k_{Rn222} \cdot C_{Rn222} \cdot F$$

gdzie:

$k_{Rn222}$  – współczynnik konwersji dla radonu Rn-222 [ $J/Bq$ ]

$C_{Rn222}$  – średnia koncentracja radonu w powietrzu [ $Bq/m^3$ ]

$F$  – współczynnik równowagi

**Współczynnik konwersji  $k_{Rn222}$**  jest sumą energii potencjalnych na jednostkę aktywności kolejnych produktów rozpadu Rn-222, tj. Po-218, Pb-214, Bi-214 oraz Po-214. Uwzględnia on energie prawdopodobnych rozpadów kolejnych produktów oraz ich stałe rozpadu. Dla radonu współczynnik konwersji  $k_{Rn222} = 5.6 [nJ/Bq]$ . Współczynnik ten pozwala na konwersję koncentracji radonu z  $Bq$  na  $J$ .

**Średnia koncentracja radonu  $C_{Rn222}$**  podana [ $Bq/m^3$ ]. Określa aktywność radonu w powietrzu (wewnątrz pomieszczenia lub na powietrzu). Szczegóły odnośnie przyjęcia poszczególnych wartości stężenia radonu dla konkretnych lokalizacji podano poniżej.

**Współczynnik równowagi  $F$**  przyjmuje wartość z przedziału (0; 1). Powyższe wartości graniczne przedziału nie występują w warunkach naturalnych. Współczynnik ten zależy od m.in. wiatru, warunków atmosferycznych, nasłonecznienia, wentylacji budynku. Na podstawie raportów UNSCEAR oraz ICPR, przyjmuje się rekomendowaną wartość współczynnika  **$F = 0.4$  w budynku** oraz  **$F = 0.8$  na zewnątrz**.

Używając przytoczonych wyżej wzorów oraz danych z literatury w tabeli poniżej przedstawiono koncentracje radonu w pomieszczeniach i w atmosferze oraz dawki efektywne w związku z przebywaniem w takim środowisku. Poniżej tabeli znajduje się uzasadnienie oraz wskazanie źródeł na podstawie których przyjęto dane koncentracje radonu Rn-222.

Tabela 4

**Koncentracje radonu oraz dawki skuteczne od oddychania**

Lp.	Lokalizacja	$C_{Rn222\_out}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$C_{Rn222\_in}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$E_{out}$ [mSv/rok]	$E_{in}$ [mSv/rok]	$E_{out} + E_{in}$ [mSv/rok]
0	1	2	3	4	5	5
1	<b>Polska</b> centrum	6.5	49.3	1.083	0.071	1.471*
2	<b>Iran</b> kurort Ramsar	65.0	2745.0	60.327	0.714	61.041
3	<b>Polska</b> Zakopane	9.9	80.0	1.758	0.109	1.867
4	<b>Francaja</b> Flamanville	5.0	65.0	1.429	0.055	1.483
5	<b>Polska</b> Suwałki	7.7	35.0	0.769	0.085	0.854

\* Podana dawka nie uwzględnia narażenia zawodowego, tj. czasu spędzonego w pracy w elektrociepłowni – oszacowanie narażenia podane w dalszej części pracy



### **Średnie roczne stężenie Rn-222 w powietrzu atmosferycznym**

**Polska** – dane dotyczące stężenia radonu dla poszczególnych lokalizacji tj. Zakopane, Suwalszczyzna i centrum kraju zaczerpnięto z raportu sporządzonego przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w ramach projektu „Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych” (raport za rok 2014). W celu uniknięcia ewentualnego, błędu sprawdzono również raporty za poprzednie lata aby sprawdzić czy dane z roku 2014 nie odbiegają w sposób znaczący od podanych w ubiegłych latach [8] [9] [10] [15]. Dane średnioroczne przedstawiono w Tabeli 4.

**Francja (Flamanville)** – dokładnych danych dla tej konkretnej miejscowości nie znaleziono. Średnie stężenie radonu we Francji w powietrzu atmosferycznym wynosi 10 Bq/m<sup>3</sup> [10]. Sprawdzono, iż w rejonie Flamanville budowa geologiczna, nie powoduje podwyższonej koncentracji radonu w powietrzu. Wartość stężenia w Rn-222 w powietrzu atmosferycznym we Flamanville oszacowano na podstawie analogii do warunków polskich – stosunku średniej krajowej Polski do wartości stężenia radonu w miejscowościach nadmorskich Gdynia i Szczecin. Na tej podstawie oszacowano stężenie Rn-222 w powietrzu na poziomie 5 Bq/m<sup>3</sup> [8] [9].

**Iran (Ramsar)** – dane zaczerpnięto z raportu UNSCEAR [1] dla terenów o naturalnie wyższej wartości promieniowania naturalnego tła. W raporcie tym wyszczególniono konkretnie miejscowość Ramsar, przyjęto wartość średnią geometryczną.

### **Średnie roczne stężenie Rn-222 w pomieszczeniu:**

**Polska centrum** – na podstawie wyników ogólnopolskiego Ogólnopolskiego Projektu Badawczego Radonet dla terenu Mazowsza oraz danych w przyjęto, że pracownik ciepłowni mieszka w bloku na 3 piętrze i średnioroczne stężenie radonu w mieszkaniu wynosi jak średnia krajowa 49.3 Bq/m<sup>3</sup> [10].

**Polska Suwalszczyzna** – można przyjąć zgodnie z tendencją mieszkaniową na Suwalszczyźnie oraz statusem materialnym lekarza radiologa, iż mieszka poza terenem miejskim w domku drewniany, bez piwnicy, podłoga betonowa. Dla takich założeń można przyjąć, iż stężenie Rn-222 w domu wynosi 35 Bq/m<sup>3</sup> [11] [12]. Wartość jest większa niż dla otoczenia, gdyż radon ma tendencję do gromadzenia się w budynkach, a drewniana konstrukcja ułatwia jego migrację do wewnątrz. Koncentracja radonu może się zmieniać w zależności do przyzwyczajień mieszkaniowych lekarza. Na podstawie wyników badań z Rocznikach Państwowego Zakładu Higieny, stwierdzono że w Suwałkach w budynkach użyteczności publicznej średnie stężenie radonu jest zbliżone do wartości przedstawionej powyżej.

**Polska Zakopane** – na podstawie wyników ogólnopolskiego Ogólnopolskiego Projektu Badawczego Radonet oraz danych w literaturze dla mieszkania w bloku przyjęto stężenie radonu w wysokości 80 Bq/m<sup>3</sup>. Wartość ta może zmieniać się w zależności od piętra na którym znajduje się mieszkanie. Najmniej korzystne warunki, najwyższe stężenia panują na parterze. Oprócz podłoża z którego migruje radon, na stężenie wpływają również zastosowany materiał budowlany oraz nawyki mieszkaniowe lokatorów.

**Francja (Flamanville)** – na podstawie danych IRSN Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire [13] oraz Komisji Europejskiej [10] stwierdzono, że średnie stężenie radonu dla rejonu Manche mieści się w granicach od 50 do 100 Bq/m<sup>3</sup>. Do obliczeń przyjęto wartość 65 Bq/m<sup>3</sup>.

**Iran (Ramsar)** – dane zaczerpnięto z raportu UNSCEAR [1] dla konkretnie sprecyzowanych terenów o naturalnie wyższej wartości promieniowania naturalnego tła. W raporcie tym wyszczególniono konkretnie miejscowość Ramsar, przyjęto wartość średnią geometryczną dla stężeń w pomieszczeniach.

Dla kompletności oszacowania dawki rocznej otrzymanej od radonu, można dodać dawkę relatywnie niską otrzymaną poprzez rozpuszczenie gazu w krwi, w skutek zarówno inhalacji jak i spożycia np. w wodzie. Autorzy raportu UNSERAR 2000 [16] rekomendują następujący wzór:

$$E [mSv] = C_{Rn222} \cdot DCF_{Rn222} \cdot \tau$$

Współczynnik *DCF* w przeciwieństwie do poprzednich wzorów podawany jest w innych jednostkach  $\left[\frac{nSv/h}{Bq/m^3}\right]$ . Jest on w tym przypadku jakoby iloczynem niektórych wielkości z dwóch równań (przedstawionych powyżej), wiąże je ze sobą i upraszcza do jednego równania. Dla radonu współczynnik ten jest równy  $DCF_{Rn220} = 0.17 \left[\frac{nSv/h}{Bq/m^3}\right]$ . Stosując takie założenia i powyższy wzór obliczone dawkę z rozpuszczenia Rn-222 we krwi. W tabeli 5 podani całościową dawkę otrzymaną od radonu Rn-222.

Tabela 5

**Składowe całkowitej dawki skutecznej od radonu**

Lp.	Lokalizacja	$E_{inhalation}$ [mSv/rok]	$E_{out\_krew}$ [μSv/rok]	$E_{in\_krew}$ [μSv/rok]	$E_{krew}$ [mSv/rok]	$E_{total}$ [mSv/rok]
0	1	9	4	5		9
1	<b>Polska centrum</b>	1.155	1.94	14.68	0.017	<b>1.471*</b>
2	<b>Iran kurort Ramsar</b>	61.041	19.36	817.57	0.837	<b>61.878</b>
3	<b>Polska Zakopane</b>	1.867	2.95	23.83	0.027	<b>1.894</b>
4	<b>Francaja Flamanville</b>	1.483	1.49	19.36	0.021	<b>1.504</b>
5	<b>Polska Suwałki</b>	0.854	2.29	10.42	0.013	<b>0.867</b>

\* Dawka nie uwzględnia narażenia zawodowego – oszacowanie narażenia podane w dalszej części pracy

### 3. TORON Rn-220

W literaturze istnieje kilka wzorów na obliczenie dawki rocznej otrzymanej poprzez inhalację toronem w zależności od posiadanych danych. Toron tworzy się w szeregu torowym Th-232, ma okres półrozpadu 55,6 s. Dlatego silnie zależy od wymiarów pomieszczenia, krótki czas połowicznego rozpadu powoduje większe stężenie przy ścianach niż w środku pomieszczenia, zachodzi koniczność uśredniania itp. Nie spać przy ścianie ... Niestety nie znaleziono dokładnych danych na temat koncentracji toronu w pomieszeniach mieszkalnych i na zewnątrz dla wszystkich lokalizacji z zadania konkursowego. Poniżej znajduje się w Tabeli 5 zestawienie danych przyjętych do obliczeń. Pod tabelą szczegółowo przedstawiono założenia oraz źródła w literaturze. Następnie wzory z których skorzystano do obliczenia dawki (wzory są analogiczne jak dla radonu, inne są jedynie współczynniki).

Tabela 6

**Koncentracje toronu oraz dawki skuteczne od oddychania**

Lp.	Lokalizacja	$C_{Rn220\_out}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$C_{Rn220\_in}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	$E_{out}$ [mSv/rok]	$E_{in}$ [mSv/rok]	$E_{total}$ [mSv/rok]
0	1	2	3	4	5	9
1	Polska centrum	3.9	13	0.003	0.107	0.110
2	Iran Ramsar	25.0	55	0.017	0.454	0.471
3	Polska Zakopane	5.9	13	0.004	0.107	0.111
4	Francaja Flamanville	3.0	12	0.002	0.099	0.101
5	Polska Suwałki	4.6	10/13	0.003	0.090	0.093

**Koncentracja toronu na powietrzu** może się różnić w zależności od podłoża, standardowo zawiera się w przedziale 2-15 Bq/m<sup>3</sup> [1]. Za literaturą [1][17][18][19] przyjmuje się, że koncentracja Rn-220 na zewnątrz jest równa 0.6 koncentracji Rn-222 dla rejonów które nie są bogate w pierwiastki ziem rzadkich. Takie założenie zostało przyjęte dla trzech lokalizacji w Polsce oraz dla Flamanville. Wartość dla miejscowości Ramsar została zaczerpnięta z literatury [20] [21].

**Koncentracja toronu w pomieszczeniu** silnie zależy od materiału (także jego pochodzenia) z którego zbudowano ściany, strop i podłogę, wykończenia tych powierzchni od wewnątrz (farba) oraz jakości wentylacji pomieszczenia. Wartości dla lokalizacji w Europie dla domów jednorodzinnych lub mieszkań w blokach przyjęto na podstawie przeprowadzonych i opublikowanych badań [18] [19] [20] [21] [22], a dla miejscowości Ramsar na podstawie publikacji [20][23][24][25][26].

Do obliczenia dawki rocznej wywołanej wdychaniem toronu można posłużyć się przytoczonymi wyżej wzorami dla radonu stosując współczynniki dedykowane dla toronu.

$$E [mSv] = DCF \cdot PAEC \cdot \tau$$

gdzie:

$E$  – roczna dawka efektywna [ $mSv$ ]

$DCF$  – współczynnik konwersji ekspozycji na  $mSv$ ,  $DCF = 0.52 \left[ \frac{Sv/h}{J/m^3} \right]$ ,

$PAEC$  – średnie stężenie energii potencjalnej  $\alpha$  [ $J/m^3$ ]

$\tau$  – czas ekspozycji [ $h$ ]

$$PAEC = k_{Rn220} \cdot C_{Rn220} \cdot F$$

gdzie:

$k_{Rn220}$  – współczynnik konwersji dla toronu Rn-220,  $k_{Rn220} = 75.52 [nJ/Bq]$

$C_{Rn220}$  – średnia koncentracja toronu w powietrzu [ $Bq/m^3$ ]

$F$  – współczynnik równowagi,  $F_{in} = 0.03$ ,  $F_{out} = 0.01$

W literaturze [17] [18] dla niektórych regionów, typu mieszkania można znaleźć empiryczne wzory na określenie dawki od toronu, np. wiążące ze sobą  $PAEC$  czyli średnie stężenia energii potencjalnej  $\alpha$  dla radonu i toronu czy wiążące ze sobą stosunkiem koncentracji tych radionuklidów w pomieszczeniu. Przykłady przedstawiono poniżej:

$$\frac{PAEC(toron)}{PAEC(radon)} = 0.65, \quad PAEC(toron) = [PAEC(radon)]^{0.4}, \quad \frac{C_{Rn222}}{C_{Rn220}} = 5.7$$

Niestety te wzory nie miały zastosowania dla żadnej z lokalizacji z zadania konkursowego, podawały błędne wyniki. Zastosowany algorytm obliczenia dawki np. dla centralnej Polski daje wyniki zbliżone do średniej dawki od toronu dla statystycznego Polaka ,tj. 0.101  $mSv/rok$ .

Dla kompletności oszacowania dawki rocznej otrzymanej od toronu, można dodać dawkę otrzymaną relatywnie niską, poprzez rozpuszczenie gazu w krwi, w skutek zarówno inhalacji jak i spożycia np. w wodzie. Autorzy raportu UNSERAR [1] rekomendują następujący wzór dla toronu:

$$E [mSv] = C_{Rn220} \cdot DCF_{Rn220} \cdot \tau$$

Współczynnik  $DCF$  w przeciwieństwie do poprzednich wzorów podawany jest w innych jednostkach  $\left[ \frac{nSv/h}{Bq/m^3} \right]$ . Jest on w tym przypadku jakoby iloczynem niektórych wielkości z dwóch równań (przedstawionych powyżej), wiąże je ze sobą i upraszcza do jednego równania. Dla toronu współczynnik ten jest równy  $DCF_{Rn220} = 0.11 \left[ \frac{nSv/h}{Bq/m^3} \right]$ .

Stosując takie założenia i powyższy wzór obliczone dawkę z rozpuszczenia Rn-220 we krwi. W tabeli 7 podani całościową dawkę otrzymaną od radonu Rn-220.

Tabela 7

**Składowe całkowitej dawki skutecznej od radonu**

Lp.	Lokalizacja	$E_{total}$ [mSv/rok]	$E_{out\_krew}$ [μSv/rok]	$E_{in\_krew}$ [μSv/rok]	$E_{krew}$ [mSv/rok]	$E_{total}$ [mSv/rok]
0	1	9	4	5		9
1	<b>Polska</b> centrum	0.110	0.75	10.02	0.011	<b>0.121</b>
2	<b>Iran</b> kurort Ramsar	0.471	4.82	42.40	0.047	<b>0.518</b>
3	<b>Polska</b> Zakopane	0.111	1.14	10.02	0.011	<b>0.122</b>
4	<b>Francaja</b> Flamanville	0.101	0.58	9.25	0.010	<b>0.111</b>
5	<b>Polska</b> Suwałki	0.093	0.89	8.37	0.009	<b>0.102</b>

#### **4. ZIEMSKIE PROMIENIOWANIE GAMMA**

Określenie ziemskie ma znaczenie, jest to promieniowanie gamma od gruntu. Dlatego skorzystanie z danych mocy dawek promieniowania gamma w powietrzu jest błędem, ponieważ uwzględniają promieniowanie kosmiczne oraz pochodzące od radionuklidów zawartych w glebie. Tak więc wartości podawana z monitoringu „na żywo” na stronie internetowej PAA lub platformie Komisji Europejskiej (European Radiological Data Exchange Platform). Podobnie przedstawia się sytuacja prezentowana w raportach rocznych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej z sieci stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych. Skorzystanie powyższych danych do określenia dawek rocznych od promieniowania gamma prowadzi do ok. dwukrotnego przeszacowania wartości rzeczywistej.

Moc dawki promieniowania gamma tła na wysokości 1 m (nie uwzględniającą promieniowania kosmicznego) można obliczyć znając aktywności jednostkowe poszczególnych izotopów (U-238, Th-232 oraz K-40) według półempirycznego wzoru [27]:

$$D[nGy/h] = 0.604 \cdot C_{Th232} + 0.462 \cdot C_{U238} + 0.0427 \cdot C_{K40}$$

gdzie:

$C_i$  – koncentracja izotopu  $i$  podana w [Bq/kg]

0.604, 0.462, 0.0427 – współczynniki konwersji w  $\left[\frac{nGy/h}{Bq/kg}\right]$

Okazuje się jednak, że w glebie niektórych lokalizacji z zadania stwierdzono zawartość Cs-137, powyższy wzór nie uwzględnia takiej możliwości. Na podstawie literatury [0] zastosowano poniższą równość do obliczenia dawek:

$$D[nGy/h] = 0.662 \cdot C_{Th232} + 0.427 \cdot C_{U238} + 0.043 \cdot C_{K40} + 0.03C_{Cs137}$$

**Przeliczenie koncentracji**  $C_{Cs137}$  z [kBq/m<sup>2</sup>] na [Bq/kg].

W niektórych raportach i danych z których skorzystano, koncentracja Cs-137 podana była na jednostkę powierzchni. W powyższych wzorach wymagana jest koncentracja na jednostkę masy wg poniższego wzoru. Wyniki zamieszczono w tabeli poniżej.

$$C_p = C_m \cdot \rho \cdot d$$

gdzie:

$C_p$  – koncentracja powierzchniowa izotopu [Bq/m<sup>2</sup>],

$C_m$  – koncentracja masowa izotopu [Bq/kg]

$\rho$  – gęstość pobranej próbki gleby, przyjmuje się  $\rho = 1.6 [g/cm^3]$

$d$  – głębokość warstwy pobranej próbki ziemi, przyjmuje się  $d = 10 [cm]$

We wzorach podanych powyżej na dawkę promieniowania gamma tła widnieją koncentrację Th-232 oraz U-238, natomiast w danych zaczerpniętych z Radiologicznego Atlasu Polski [28] prezentowane są tylko stężenia ich produktów rozpadu, odpowiednio Ac-228 oraz Ra-226. Poniżej przedstawiono krótki dowód na to, że te produkty rozpadu (Ac-228, Ra-226) są w stanie równowagi trwałej z pierwiastkami macierzystymi (Th-232, U-238) oraz że stężenia (a więc i aktywność) są sobie równe.

### **Dowód:**

Nagromadzenie się promieniotwórczych produktów (indeks dolny P) rozpadu radionuklidu macierzystego (indeks dolny M) opisuje równanie [29]:

$$N_P = \frac{\lambda_M}{\lambda_P - \lambda_M} \cdot N_{M,t=0} \cdot (e^{-\lambda_M t} - e^{-\lambda_P t}) + N_{P,t=0} \cdot e^{-\lambda_P t}$$

$N_P$  – liczba atomów produktu rozpadu po czasie  $t$

$N_{i,t=0}$  – liczba atomów radionuklidu  $i$  w chwili  $t = 0$

$\lambda_i$  – stała rozpadu radionuklidu  $i$

$t$  – czas

W przypadku gdy macierzysty radionuklid jest długożyciowy, a tak jest dla Th-232 i U-238 (czasy połowicznego rozpadu wynoszą odpowiednio  $1.4 \cdot 10^{10}$  lat oraz  $4.5 \cdot 10^9$  lat) aktywność promieniotwórcza radionuklidu będącego produktem rozpadu po osiągnięciu równowagi pozostaje stała – równowaga trwała. W przypadku takiej równowagi  $(t_{1/2})_M \gg (t_{1/2})_P$ , więc również  $\lambda_M \ll \lambda_P$ . Zakłada się również, że w chwili  $t = 0$   $N_{P,t=0} = 0$ . Prowadzi to do uproszczenia równania do postaci:

$$N_P = \frac{\lambda_M}{\lambda_P} \cdot N_M \cdot (1 - e^{-\lambda_P t})$$

Skoro aktywność definiowana jest jako  $A_i = \frac{dN_i}{dt} = \lambda_i N_i$ , to prawda jest, że:

$$A_P = A_M \cdot (1 - e^{-\lambda_P t})$$

Czas jaki upłynął od początku świata  $t \gg (t_{1/2})_P$ , więc  $e^{-\lambda_P t} \rightarrow 0$  i ostatecznie  $A_P = A_M$ .

Zestawienie aktywności poszczególnych nuklidów oraz moc dawki podano poniżej w Tabeli 8. Poniżej uzasadniono wybór poszczególnych koncentracji oraz teksty źródłowe.

Tabela 8

**Koncentracje w glebie poszczególnych izotopów oraz wynikająca z nich moc dawki**

Lp.	Lokalizacja	$C_{Ra226}$ [Bq/kg]	$C_{Ac228}$ [Bq/kg]	$C_{Th232}$ [Bq/kg]	$C_{K40}$ [Bq/kg]	$C_{Cs137}$ [kBq/m <sup>2</sup> ]	$C_{Cs137}$ [Bq/kg]	$E_{gamma}$ [nGy/h]
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>Polska</b> centrum	13.0	12.8	-	310.0	1.45	9.06	27.34
2	<b>Iran</b> kurort Ramsar	1188.5	-	64.9	545.1	-	10.40	574.20
3	<b>Polska</b> Zakopane	34.3	35.0	-	517.0	2.45	15.31	71.07
4	<b>Francaja</b> Flamanville	b/d	b/d	b/d	b/d	3.50	21.88	57.14*
5	<b>Polska</b> Suwałki	17.7	19.4	-	485.0	1.03	6.44	41.45

\*Obliczono innym sposobem podanym poniżej

**Polska** – przyjęto wartości na podstawie: map rastrowych przedstawiających depozycję powyższych izotopów (CLOR) [30] oraz Radiologicznych Atlasów Polski (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska i Centralne laboratorium Ochrony Radiologicznej) [28]. Na mapach prezentowane wyniki były w postaci globalnej dla całego terytorium kraju (jednak gradient kolorów w legendzie nie pozwalał na dokładny odczyt dla danej lokalizacji). Natomiast w Atlasach jako średnie dla poszczególnych województw.

**Iran (Ramsar)** – dane zaczerpnięte z publikacji naukowej [31] oraz porównane z przedstawionymi w raporcie UNSCEAR dla terenów o podwyższonym tle promieniowania naturalnego w którym było wyszczególnione miasto Ramsar [1] (w raporcie podano jedynie przedziały wartości bez średniej geometrycznej, stąd konieczność porównania z literaturą).

**Francja (Flamanville)** – kompletnych danych o aktywnościach poszczególnych izotopów w warstwie glebowej dla Flamanville lub pobliskiego regionu nie znaleziono w literaturze. Jedynie na podstawie raportu IRSN [32] udało się określić jednostkową aktywność Cs-137. Dawkę od promieniowania gamma od ziemi oszacowano na podstawie opracowania IRSN i CEA [33] odnośnie ekspozycji ludności Francji na niskie dawki promieniowania. W tym raporcie znajdowały się wartości dawek poszczególnych departamentów (jednostka administracyjna większa od powiatu a mniejsza od województwa w porównaniu do podziału administracyjnego Polski). I tak dawka wewnątrz mieszkania zawierała się w granicach 56-65 nSv/rok – do obliczeń przyjęto wartość 60 nSv/rok, na zewnątrz w powietrzu pomiędzy 36-45 nSv/rok – do obliczeń przyjęto wartość 40 nSv/rok.



Przekształcenia dawki pochłoniętej w powietrzu  $D[Gy/h]$  na skuteczną  $E[Sv/h]$  dla osoby dorosłej stosuje się współczynnik konwertujący  $0.7[Sv/Gy]$  wg zaleceń w raporcie UNSECAR [1]:

$$E[Sv/h] = 0.7[Sv/Gy] \cdot D[Gy/h]$$

Dodatkowo do obliczenia dawki rocznej od tła promieniowania gamma zakłada się że:

- W ciągu roku człowiek przebywa 0.8 czasu w pomieszczeniu, a pozostały na powietrzu [1],
- Moc dawki promieniowania w pomieszczeniu jest większa niż na powietrzu. Dochodzi składowa dawki od materiałów budowlanych. Powszechnie przyjmuje się że moc dawki od promieniowania gamma w Polsce w pomieszczeniu jest większa niż na zewnątrz o współczynnik  $f=1.4$  [1], we Francji 1.5 [32], a w Iranie 1.6 [34].
- Wcześniejsze założenie, iż mieszkańiec Suwalszczyzny mieszka w domku drewnianym implikuje, że współczynnik  $f$  będzie mniejszy niż standardowy 1.4 dla polski. W domu jest tylko podłoga murowana (1 z 6 powierzchni w pomieszczeniu) współczynnik  $f = 1.2$ , a dla czasu w którym pracuje (2000h)  $f=1.4$ .

**Tabela 9**

***Składowe oraz całkowita dawka od promieniowania gamma podłoża***

Lp.	Lokalizacja	$D_\gamma$ [nGy/h]	f [-]	$E_{\gamma.out}$ [mSv/rok]	$E_{\gamma.in}$ [mSv/rok]	$E_{\gamma.total}$ [mSv/rok]
0	1	2	3	4	5	6
1	<b>Polska</b> centrum	27.34	1.4	0.034	0.188	<b>0.221</b>
2	<b>Iran</b> Ramsar	574.20	1.6	0.704	4.507	<b>5.211</b>
3	<b>Polska</b> Zakopane	71.07	1.4	0.087	0.488	<b>0.575</b>
4	<b>Francaja</b> Flamanville	57.14	1.5	0.070	0.420	<b>0.491</b>
5	<b>Polska</b> Suwałki	41.45	1.2/1.4	0.051	0.256	<b>0.306</b>

Wartości dawek  $D_\gamma$  oraz rocznych  $E_{\gamma.total}$  od promieniowania gamma podłoża dla Polski centralnej są znacznie niższe niż średnia krajowa (47.7 nGy/rok oraz 0.462mSv/rok). Jest to region o jednych z najniższych koncentracji radionuklidów w zewnętrznej warstwie gruntu w kraju. Algorytm obliczeniowo sprawdzono dla ogólnokrajowych wartości średnich koncentracji i wartości dawek rocznych są zbieżne z raportami CLOR. Wynik dla Famanville jest niemal taki sam jak dla średniej dawki od promieniowania gamma dla Francji. Wynik miejscowości Ramsar mieści się w przedziale podawanym w literaturze.

## 5. ŹRÓDŁA WEWNĘTRZNE

Składowa napromienienia wewnętrznego pojawia się w całkowitej dawce rocznej ponieważ niektóre naturalne pierwiastki promieniotwórcze są wchłaniane przez ludzi drogą oddechową i pokarmową. Część z nich zostaje wydalona po upływie pewnego czasu, ale niektóre w wyniku procesów metabolicznych odkłada się w tkankach ludzkich.

### POKARM

Obliczenie dawek wskutek przyjętego pokarmu i płynów oraz powietrza można obliczyć na podstawie zawartości w nich charakterystycznych radionuklidów. Typowe spożycie produktów, wody oraz konsumpcja powietrza przedstawiona została w poniższej tabeli [16]. W przypadku braku danych szczegółowych dla danego kraju dawki obliczono na podstawie średniej krajowej. W przypadku Polski, spożycie produktów które odbiegało od średniej krajowej skorygowano jak w tabeli. Szczegółowych danych dla Francji i Iranu nie znaleziono, zastosowano konsumpcję jak średnia krajowa.

Tabela 10

Lp.	Produkt / medium	Unit	Konsumpcja roczna			
			Średnia światowa	Polska	Francja	Iran
0	1	2	3	4	5	6
1	produkty mleczne	kg	105	112	Brak danych szczegółowych dla poszczególnych grup, przyjęte jak średnia światowa	
2	produkty mięsne	kg	50	75.3		
3	produkty zbożowe	kg	140	99		
4	warzywa liściaste	kg	60	~200		
5	warzywa korzenne i owoce	kg	170			
6	ryby	kg	15	7		
7	woda pitna	L	500	500		
8	powietrze	m <sup>3</sup>	7500	7500		

Dawkę od przyjętych pokarmów, wody i powietrza można obliczyć wg wzoru (przykładowo dla wody):

$$E_{woda} [mSv] = \sum_i K_{woda} \cdot e_{ing} \cdot C_i$$

$E_{woda}$  – dawka roczna otrzymana wskutek spożycia wody

$K_{woda}$  – ilość wypitej wody w ciągu roku

$e_i$  – współczynnik konwersji zależny od tego czy nastąpiło spożycie czy wdychanie

$C_i$  – koncentracja poszczególnych naturalnych radionuklidów w wodzie

Tabela 11

Stałe konwersji dla naturalnych radionuklidów (Sv/Bq) UNSCEAR [16]

	238U	230Th	226Ra	210Pb	210Po	232Th	228Ra	228Th	235U
<b>Spożycie</b> $e_{ing}$	4.5E-08	2.1E-07	2.8E-07	6.9E-07	1.2E-06	6.9E-07	7.2E-08	7.2E-08	4.7E-08
<b>Wdychanie</b> $e_{inh}$	2.9E-06	1.4E-05	3.5E-06	1.1E-06	3.3E-06	1.1E-06	2.6E-06	4.0E-05	3.1E-08

Tabela 12

Koncentracje poszczególnych naturalnych radionuklidów w danym produkcie [16]

	Koncentracja (mBq/kg)								
	238U	230Th	226Ra	210Pb	210Po	232Th	228Ra	228Th	235U
<b>Produkty mleczne</b>									
<b>Polska</b>	2.6	1.2	10	18	16	1.2	-	-	-
<b>Świat</b>	1	0.5	5	15	15	0.3	5	0.3	0.05
<b>Produkty mięsne</b>									
<b>Polska</b>	3.6	1.8	15	101	100	2.1	-	-	-
<b>Świat</b>	2	2	15	80	60	1	10	1	0.05
<b>Produkty zbożowe</b>									
<b>Polska</b>	6.5	8.8	100	130	120	10	-	-	-
<b>Świat</b>	20	10	80	50	60	3	60	3	1
<b>Warzywa liściaste</b>									
<b>Polska</b>	14	7	40	47	49	5	-	-	-
<b>Świat</b>	20	20	50	80	100	15	40	15	1
<b>Warzywa korzenne i owoce</b>									
<b>Polska</b>	5	5.5	101	55	112	1.2	-	-	-
<b>Świat</b>	3	0.5	30	30	40	0.5	20	0.5	0.1
<b>Ryby</b>									
<b>Polska</b>	-	-	34	87	3500	-	-	-	-
<b>Świat</b>	30	10	100	200	2000	10	-	100	-
<b>Woda pitna</b>									
<b>Polska</b>	7.3	1.4	3.5	1.6	0.5	0.06	-	-	-
<b>Iran</b>	-	-	500	-	-	-	-	-	-
<b>Świat</b>	1	0.1	0.5	10	5	0.05	0.5	0.05	0.04
<b>Powietrze (<math>\mu\text{Bq}/\text{m}^3</math>)</b>									
<b>Polska</b>	9	-	12	370	-	-	-	-	-
<b>Świat</b>	1	0.5	1	500	50	0.5	1	1	0.05

Średnie dane wody dla Polski, nie znaleziono wyników badań dla poszczególnych lokalizacji w szczególności dla Zakopanego jest to wskazane. Znaleziono jedynie dane dotyczące wód geotermalnych, których nie wykorzystuje się do celów komunalnych, woda jest zatłaczana z powrotem do złoża. Jedyną w Polsce ciepłownią geotermalną wykorzystującą wodę ze złoża geotermalnego jako pitną – komunalną mieści się w Mszczonowie.

Tabela 13

**Średnie dawki rocznie od napromieniania wewnętrznego w zależności od produktu**

Lp.	Produkt / medium	Polska [ $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ ]	Francja [ $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ ]	Iran [ $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ ]
0	1	4	5	
1	produkty mleczne	3.74	3.20	3.20
2	produkty mięsne	14.74	6.67	6.67
3	produkty zbożowe	26.80	19.40	19.40
4	warzywa liściaste	6.48	12.52	12.52
5	warzywa korzenne i owoce	34.48	13.46	13.46
6	ryby	29.89	38.75	38.75
7	woda pitna	1.67	6.59	83.52
8	powietrze	5.04	5.64	5.64
	<b>SUMA</b>	<b>117.81</b>	<b>100.59*</b>	<b>183.16*</b>

Do wartości dawek oznaczonych (\*) tych trzeba podejść z dystansem. Zostały one oszacowane na podstawie średnich światowych koncentracji radionuklidów w pokarmie. Zastosowano takie podejście ponieważ nie znaleziono konkretnych danych dla Francji i Iranu. Szczególnie do szacunkowej dawki dla Iranu (Ramsar) należy mieć rezerwę, ponieważ stężenia średnich światowych znacząco odbiegają od warunków panujących w tej miejscowości.

**K-40 i Rb-87**

**Istotny wkład do dawki napromieniania wewnętrznego wnoszą potas K-40 i rubid Rb-87,** które naturalnie występują w organizmie człowieka. Stężenie K-40 w ciele człowieka zależy od organu, wieku, płci oraz nawyków żywieniowych. Niemniej jednak, średnie stężenie wynosi 55 Bq/kg, a roczna dawka efektywna od K-40 została oszacowana na poziomie **165  $\mu\text{Sv}$**  [1]. W ciele człowieka występuje również Rb-87 o średnim stężeniu 8.5 Bq/kg. Średnia roczna dawka została oszacowana na **6  $\mu\text{Sv}$**  [1].

## RADIONUKLIDY KOSMOGENNE

Pierwotne promieniowanie kosmiczne wchodzi w reakcje z jądrami atomów atmosferycznych. W wyniku tych reakcji powstają cząstki elementarne, ale również radionuklidy kosmogeniczne (około 50 rodzajów H-3 do Bi-205). Radionuklidy które wnoszą mierzalny wkład do rocznej dawki efektywnej to: węgiel C-14 ( $12 \mu Sv$ ), tryt H-3 ( $0.01 \mu Sv$ ), beryl Be-7 ( $0.3 \mu Sv$ ) oraz sód-22 ( $0.15 \mu Sv$ ). Wartości przedstawione w nawiasach to przeciętne zostały na podstawie raportu [UNSCEAR 2010]. Całkowita dawka efektywna od najważniejszych radionuklidów pochodzenia kosmicznego wynosi  $E = 12.46 \mu Sv/rok$ . Jest to dawka średnia dla wszystkich lokalizacji (Polska, Francja, Iran).

Tabela 14

### *Średnie całkowite dawki rocznie od napromieniania wewnętrznego*

Lp.	Lokalizacja	Pokarm [ $\mu Sv/rok$ ]	K-40, Rb-87 [ $\mu Sv/rok$ ]	Kosmogenne [ $\mu Sv/rok$ ]	$E_{wewnętrzne}$ [mSv/rok]
0	1	2	3	4	5
1	<b>Polska</b> centrum	<b>117.81</b>	171	12.46	301.27
2	<b>Iran</b> kurort Ramsar	<b>183.16</b>	171	12.46	366.62
3	<b>Polska</b> Zakopane	<b>117.81</b>	171	12.46	301.27
4	<b>Francaja</b> Flamanville	<b>100.59</b>	171	12.46	284.05
5	<b>Polska</b> Suwałki	<b>117.81</b>	171	12.46	301.27

Średnia dawka wg raportu PAA [6] od napromieniania wewnętrznego wynosi dla statystycznego Polaka 0.284 mSv. Obliczone dawki dla Polski zbiegają się z tą wartością.

## 6. DIAGNOSTYKA MEDYCZNA

Przyjmuje się, że mieszkańcy w poszczególnych wariantach zadania konkursowego otrzymują dawki skuteczne w ciągu roku od diagnostyki medycznej takie jak przeciętny mieszkaniec danego państwa. Narażenie statystycznego mieszkańca od źródeł promieniowania stosowanych w celach medycznych oszacowane zostało na podstawie krajowych raportów jednostek odpowiedzialnych za bezpieczeństwo jądrowe (Polska – Państwowa Agencja Atomistyki [6], Francja – Autorite de Surete Nucleaire [35], Komisja Europejska [37]). W przypadku Iranu posłużono się artykułem naukowym profesora Wydziału Fizyki Medycznej Uniwersytetu Medycznego w Babol, Iran [36] (miejsowość ok. 200 km na wschód od Ramsar, również w sąsiedztwie Morza Kaspijskiego). Artykuł tym przedstawiono jedynie wyniki badań dla prowincji Mazandaran w północnej części Iranu, obejmującej również miejscowość Ramsar.

Oba raporty i wspomniany artykuł do oszacowania narażenia na promieniowanie od diagnostyki medycznej brały pod uwagę ilość i rodzaj wykonanych badań. Szczegółowe dane dotyczące poszczególnych województw w Polsce czy regionu we Francji nie były dostępne.

Tabela 14

### *Średnie całkowite dawki rocznie od diagnostyki medycznej*

Lp.	Lokalizacja	$E_{med}$ [mSv/rok]
0	1	9
1	<b>Polska</b>	<b>0.86</b>
2	<b>Iran</b>	<b>0.33</b>
3	<b>Francaja</b>	<b>1.25</b>

## **7. NARAŻENIE ZAWODOWE**

### **Lekarz radiolog**

Efektywną dawkę roczną wynikającą charakteru wykonywanego zawodu określono na poziomie **0.5 mSv/rok**. Założenie takie przyjęto na podstawie danych Ministerstwa Zdrowia oraz publikacji. Zaprezentowane tam wyniki mówią iż ponad 98% osób obsługujących pracownie otrzymuje dawki do 1mSv/rok, 0,7% pomiędzy 1-2 mSv/rok, ze średnią na poziomie 0.5 mSv/rok. Przyjęte założenie potwierdzają dane z pracowni radiologii naczyniowej i zabiegowej Zachodniopomorskiego Centrum Onkologii gdzie średnia dawka roczna lekarzy zabiegowych kształtuje się na poziomie 0.6 mSv/rok [38]. Poziom dawki w dużym stopniu zależy do układu pomieszczeń pracowni, a przede wszystkim od aparatury rentgenowskiej. Zgodnie z Prawem Atomowym wartość dawki granicznej dla pracowników kategorii B nie powinna przekraczać 6 mSv w ciągu roku.<sup>i</sup>

### **Pracownik elektrowni jądrowej**

Pod pojęciem obsługi elektrowni jądrowej może kryć się wiele aktywności z utrzymaniem w ruchu siłowni. Może być to operator przebywający w sterowni, pracownik uczestniczący w inspekcjach zbiornika reaktora, po uczestnika prac serwisowych wiązanych z czopowaniem nieszczelnych U-rurek w wytwornicy pary. Według raportu za rok 2014 ASN (Nuclear Safety Authority) [40] dla pracowników EDF roczne dawki skuteczne zawierały się w przedziale 0.75-2.7 mSv w zależności od wykochanych zadań. Np.: spawacz 1.6 mSv, mechanik 1.4 mSv, inspektor 1.5 mSv, elektryk 0.7 mSv. Do obliczeń dla pracownika elektrowni Flamanville przyjęto umownie dawkę efektywną **1.4 mSv/rok**.

### **Pracownik elektrociepłowni**

Mając na uwadze możliwości dostępu do określonych danych, niezbędnych do oszacowania dawki rocznej wynikającej z narażenia zawodowego, przyjmuje się że jest to pracownik jednej z elektrociepłowni w Łodzi. Przyjmując takie założenie pracownik narażony jest na zwiększoną dawkę od promieniowania gamma podłoża (podwyższona aktywność wskutek opadu pyłu ze spalin) oraz zwiększoną dawką wskutek inhalacji wyższych koncentracji radionuklidów.

Na podstawie literatury [43] w okolicach EC odnotowano w glebie podwyższone koncentracje następujących izotopów: K-40 330 Bq/kg, Cs-137 10.1 Bq/kg, Ra-226 19.9 Bq/kg, Th-232 17.1 Bq/kg. Na podstawie różnic koncentracji izotopów podanych w tym punkcie oraz koncentracji z punktu promieniowanie gamma od podłoża dla centralnej części Polski można wyliczyć dodatkową dawkę otrzymaną wskutek przebywania w terenie o podwyższonym promieniowaniu ziemi. Zakłada się, że pracownik przebywa w EC 2000h w ciągu roku.

$$\Delta D[nGy/h] = 0.662 \cdot \Delta C_{Th232} + 0.427 \cdot \Delta C_{U238} + 0.043 \cdot \Delta C_{K40} + 0.03 \cdot \Delta C_{Cs137}$$

$$\Delta E[Sv/rok] = 0.7[Sv/Gy] \cdot \Delta D[Gy/h] \cdot \tau[h/rok]$$

$$\Delta E = 13.17 \mu Sv/rok$$

W ciągu dnia pracy pracownik EC otrzymuje również dodatkową dawkę promieniowania od oddychania powietrzem o podwyższonej koncentracji niektórych izotopów. W literaturze znaleziono jedynie dane koncentracji radonu Ra-222 w różnych częściach elektrociepłowni opalanej węglem kamienny [41] [42]. Jest oczywiste, że pracownik obsługujący pracę kotła nie przebywa ciągle w jednym pomieszczeniu, ale chodzi w różne części zakładu i wykonuje powierzone zadania (różne koncentracje Rn-222). Na podstawie literatury zakłada się, że średnie stężenie radonu w części kotłowej EC wynosi 300 Bq/m<sup>3</sup>. Posługując się wcześniej przytoczonymi i opisanymi wzorami w części pracy dotyczącej radonu, można policzyć dodatkową dawkę otrzymaną wskutek pracy przez 2000h w warunkach o podwyższonej koncentracji radonu.

$$E [mSv/rok] = DCF \cdot PAEC \cdot \tau$$

$$PAEC = k_{Rn222} \cdot C_{Rn222} \cdot F$$

$$E = 1.882 \mu Sv/rok$$



## 8. PODSUMOWANIE OSZACOWANIA DAWEK ROCZNYCH

W tabeli 15 podano podsumowanie oszacowanych rocznych dawek efektywnych dla poszczególnych lokalizacji i ich mieszkańców. Kolejno przedstawiono dawki od: wtórnego promieniowania kosmicznego, radonu, toronu, promieniowania gamma ziemi, pochłoneń wewnętrznych (z pominięciem toronu i radonu), diagnostyki medycznej. W kolumnie 8 przedstawiono sumę wszystkich składowych dawki rocznej (bez dawki od narażenia zawodowego). W kolumnie 9 przedstawiono dawki roczne związane z narażeniem na promieniowanie podczas wykonywanego zawodu. Ostatnia kolumna 10, przedstawia efektywną dawkę roczną uwzględniającą narażenie zawodowe. Wg raportu Państwowej Agencji Atomistyki przeciętny Polak otrzymuje dawkę 3.31 mSv/rok (wyniki, kolumna 8, dla centralnej Polski oraz Suwałk zbiegają się do tej wartości). Średnioroczna dawka skuteczna dla mieszkańca Francji wynosi 3.7mSv.rok (niewielka rozbieżność w wynikach może być spowodowana niedostateczną ilością danych w napromienieniach wewnętrznych czy promieniowaniu gamma podłoża). Wynik dla miejscowości Ramsar zawiera się w przedziale opisywanym w literaturze. Niemniej jednak dla skrajnych przypadków dawka roczna może przekraczać 250 mSv/rok.

Tabela 15

*Tabela podsumowująca oszacowane roczne dawki skuteczne*

Lp.	Lokalizacja	$E_{kosm.}$ [mSv/a]	$E_{radon}$ [mSv/a]	$E_{toron}$ [mSv/a]	$E_{gamma}$ [mSv/a]	$E_{wew}$ [mSv/a]	$E_{med}$ [mSv/a]	$E_{total}$ [mSv/a]	$E_{zaw}$ [mSv/a]	8+9 [mSv/a]
0	1	2	3	4	5	7	6	8	9	10
1	<b>Polska</b> centrum	0.317	1.471	0.121	0.221	0.301	0.86	<b>3.291</b>	<b>1.57</b>	<b>4.864</b>
2	<b>Iran</b> Ramsar	0.279	61.878	0.518	5.211	0.367	0.33	<b>68.478</b>	<b>0</b>	<b>68.583</b>
3	<b>Polska</b> Zakopane	0.401	1.894	0.122	0.575	0.301	0.86	<b>4.153</b>	<b>0</b>	<b>4.153</b>
4	<b>Francaja</b> Flamanville	0.315	1.504	0.111	0.491	0.284	1.25	<b>3.955</b>	<b>1.4</b>	<b>5.355</b>
5	<b>Polska</b> Suwałki	0.321	0.867	0.102	0.306	0.301	0.86	<b>2.757</b>	<b>0.5</b>	<b>3.257</b>

## II. RYZYKO RADIACYJNE

Zgodnie z treścią Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 205 sierpnia 2005 r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej mianem ryzyka radiacyjnego określana jest wielkość zagrożenia albo prawdopodobieństwo szkodliwego następstwa związanego z ekspozycją na promieniowanie jonizujące [44].

Skutki oddziaływanie promieniowania na organizmy żywe można podzielić na dwie grupy: deterministyczne i stochastyczne. Przykładem skutków deterministycznych są np. poparzenia popromienne, uszkodzenia narządów lub choroba popromienna. Są one następstwem śmierci pewnej liczby komórek, a także występują one przy dużej ekspozycji organizmu żywego. Dlatego objawy pojawiają się dopiero przy przekroczeniu pewnego progu dawki (przy małych dawkach organizm może się zregenerować, bez zauważalnego wpływu na zdrowie osobnika). Skutki tego typu można zauważyć dla dawek przekraczających pewien próg graniczny 0.5Gy (wartość progowa może być mniejsza dla poszczególnych organów). Drugim typem są skutki stochastyczne. Należą do których należą choroby nowotworowe i zmiany genetyczne. Występują one z określonym prawdopodobieństwem (mogą wystąpić, ale nie muszą). Umownie zakłada się, że prawdopodobieństwo jest liniowo zależne od otrzymanej dawki. Określenie tego prawdopodobieństwa czasami jest dyskusyjne – ujawnienie się nowotworu może być opóźnione w czasie, a także może wynikać z innych przyczynami niż otrzymana dawka graniczna.

Określenie ryzyka w związku z otrzymaniem niskich dawek promieniowania jest problematyczne ponieważ brak jest wiarygodnych danych statystycznych na ten temat. Ryzyko dla małych dawek określa się poprzez ekstrapolację z danych dla dawek dużych, stosując odpowiednią korektę. Zgodnie z informacjami podawanymi przez ICRP ryzyko śmiertelnego zachorowania na nowotwór przy jednorazowej dawce 1 Sv wynosi 5%. Ryzyko to rozkłada się na przypadki nowotworów różnych narządów tak jak podano w tabeli 15 na podstawie [45].

Tabela 15

**Współczynniki ryzyka powstania śmiertelnego nowotworu**

Tkanka lub narząd	Współczynnik ryzyka [%]
Pęcherz	0.3
Szpik kostny (białaczka)	0.5
Powierzchnia kości	0.05
Gruzoły piersiowe	0.2
Jelito grube	0.85
Wątroba	0.15
Płuca	0.85
Przełyk	0.3
Jajniki	0.1
Skóra	0.02
Żołądek	1.1
Tarczycyca	0.08
Inne	0.5
<b>Suma</b>	<b>5</b>

Posługując się liniową analogią, że 1mSv spowoduje 5% zachorowań, czyli 50 na jeden milion obliczone zostaną ryzyka zapadalności na nowotwory dla poszczególnych mieszkańców z zadania. Przyjmuje się, że mieszkańcy otrzymują skumulowaną dawkę na jeden dzień przez 365 dni. Ryzyko zostaje zsumowane przez 365 dni.

Tabela 15

**Roczne ryzyko zachorowań na milion mieszkańców dla poszczególnych przypadków**

Lp.	Lokalizacja	$E_{total}$ [mSv/a]	$E_{dzienna}$ [mSv/dzień]	Ryzyko zachorowań na milion mieszkańców	
				w ciągu 1 dnia	w ciągu 1 roku
0	1	2	3	4	5
1	<b>Polska centrum</b>	4.864	0.013	0.67	<b>243</b>
2	<b>Iran Ramsar</b>	68.583	0.188	9.39	<b>3429</b>
3	<b>Polska Zakopane</b>	4.153	0.011	0.57	<b>208</b>
4	<b>Francaja Flamanville</b>	5.355	0.015	0.73	<b>268</b>
5	<b>Polska Suwałki</b>	3.257	0.009	0.45	<b>163</b>

Z powyższych obliczeń, liniowego modelu, wynika dość ciekawy wniosek. Przy założeniu, że przeciętny mieszkaniec miejscowości Ramsar żyje 75 lat oznacza to, że z populacji 1 miliona na nowotwór zapadnie ponad ¼ populacji. To wynik przeszacowany, ponieważ nie notuje się, aż takiej zachorowalności na nowotwory w północnej części Iranu. Być może, słabszy dostęp do diagnostyki

obrazowej ma na to wpływ. Należy przypomnieć, że statystyczny Irańczyk otrzymuje dawkę od diagnostyki medycznej w wysokości 0.33 mSv.rok, Polak prawie 3 razy więcej, Francuz 4 razy.

W literaturze [46] napotkaliśmy również na wzór określający względne ryzyko zachorowania na białaczkę przy naświetleniu dawką  $D$  [Sv]:

$$RW = 0.243 \cdot D + 0.271 \cdot D^2$$

Postępując w analogiczny sposób jak poprzednio, tj. obliczając ryzyko względne na jeden dzień, a później sumując je przez 365 dni otrzymano wyniki jak w tabeli ZZ.

**Tabela 16**

***Ryzyko względne zapadalności na białaczkę w ciągu roku dla danych przypadków***

Lp.	Lokalizacja	$E_{total}$ [mSv/a]	$E_{dzienna}$ [mSv/dzień]	Ryzyko względne zapadalności na białaczkę w ciągu 1 roku
0	1	2	3	4
1	<b>Polska</b> centrum	4.864	0.013	<b>5.69E-14</b>
2	<b>Iran</b> Ramsar	68.583	0.188	<b>1.59E-10</b>
3	<b>Polska</b> Zakopane	4.153	0.011	<b>3.54E-14</b>
4	<b>Francaja</b> Flamanville	5.355	0.015	<b>7.59E-14</b>
5	<b>Polska</b> Suwałki	3.257	0.009	<b>1.71E-14</b>

Określenie ryzyka w związku z otrzymaniem niskich dawek promieniowania jest, jak już wspomniano, problematyczne ponieważ brak jest wiarygodnych danych statystycznych na ten temat. Istnieje również model hormezy radiacyjnej, wg którego niewielka ilość promieniowania jest korzystna dla zdrowia. Zjawisko to sprawdza się w przypadku wielu substancji (z życia codziennego np. dla leków: duże ilości są trujące, ale małe korzystne). Model ten jest w sprzeczności z hipotezą liniową, że małe dawki powodują zagrożenie ale proporcjonalnie mniejsze dla zdrowia niż dawki duże. Jednak na korzyść hormezy radiacyjnej przemawiają liczne badania mówiące, iż organizm działa w taki sposób, że niejako jest stymulowany do korzystnych procesów wskutek otrzymania małych dawek.

### **III. DZIAŁANIA ZAPOBIEGACZE**

Rzeczą naturalną, po szacowaniu dawek dla poszczególnych przypadków jest zaproponowanie działań zapobiegawczych prowadzących do obniżenia dawki rocznej dla mieszkańca o najwyższej rocznej dawce, czyli rodowitego Irańczyka mieszkającego w miejscowości Ramsar. I dla takiego przypadku poniżej zostaną przedstawione pewne idee. Ale najpierw chciałbym zwrócić uwagę iż w pozostałych przypadkach nie zostały przekroczone limity dawek, tj. dla lekarza radiologii dopuszczalna dawka dodatkowa wynosi wg polskiego prawa 6mSv/rok. Natomiast dla pracownika elektrowni jądrowej limity wyglądają trochę inaczej, tj. nie więcej niż 100mSv w ciągu 5 lat, z zastrzeżeniem że maksymalna roczna dawka nie przekroczy 50mSv.

Na wstępie zakłada się, działania zapobiegawcze służące obniżeniu dawki nie obejmują przeprowadzki na południe Iranu czy w inny region kraju. Irańczyk pozostaje w miejscowości Ramsar.

Na podstawie oszacowanych dawek dla mieszkańca miejscowości Ramsar wynika, że znaczna rozbieżność następuje dla składowych dawki rocznej pochodzących od radonu, toronu oraz promieniowania gamma podłoża (w tym ścian budynku), niewielka różnica jest dla napromienienia wewnętrznego (jednak w tej składowej, jak już wspomniano wcześniej, z powodu braku danych uwzględniono jedynie charakterystykę wody pitnej i powietrza, pomijając żywność).

Dla składowych dawki rocznej pochodzących od radonu oraz toronu widać wyraźnie, różnice pomiędzy koncentracjami (a więc i mocami dawek) porównując wartości w atmosferze oraz w mieszkaniu. Podobny trend mają moce dawek od promieniowania gamma podłoża (w mieszkaniu o 1.4 większe w stosunku do powietrza atmosferycznego na zewnątrz).

Zmniejszenie dawki od promieniowania gamma wewnątrz budynku jest trudne do zrealizowania. Na dawkę mają wpływ zastosowane materiały budowlane. Dość częstą praktyką było stosowanie lokalnych wapieni o podwyższonej zawartości radionuklidów do budowy domów. Wkład tej składowej można zmniejszyć proponując przeprowadzkę w inną część miasta do mieszkania, które zostało zbudowane z dobrej jakości materiałów budowlanych. W literaturze podłoża miejscowości Ramsar zostało dość dobrze zobrazowane, wynika z nich że występują lokalnie zwiększone koncentracje niektórych radionuklidów w gruncie. Przy budowie nowego domu warto na to zwrócić uwagę. W Moskwie przy budowie osiedla usunięto lokalne źródło promieniowania w postaci rudy uranu – ale jest to nietypowy przypadek.

O wiele łatwiej obniżyć dawki otrzymywane od toronu oraz radonu. Toron mający czas połowicznego rozpadu 55.6 s, łatwo jest ograniczyć poprzez zwykłe pomalowanie ścian farbą. Zabieg ten uszczelnia mikropęknięcia w ścianie utrudniając migrację cząstek do mieszkania ze ściany, powodując ich rozpad w ścianie. Można również uszczelnić ewentualne spęknięcia w konstrukcji

podłogi (izolacja gazoszczelna). Przekornie można powiedzieć, że inhalację toronem można ograniczyć poprzez przebywanie, ale i również spanie w centrum pomieszczenia. Zwiększa to drogę migracji toronu ze ściany do organizmu. Podobne działania jak dla toronu można zastosować do zmniejszenia dawki od radonu. Dodatkowo dla radonu korzystnie wpływa na obniżenie koncentracji jeśli wejście od piwnicy jest z zewnątrz, a nie przez mieszkanie (w przypadku gdy mieszka się w domu wolnostojącym). W domkach jednorodzinnych można usprawnić również system wentylacji. Należy zwrócić również uwagę, iż w blokach powyżej 3-4 piętra koncentracja radonu spada znacząco i utrzymuje się mniej więcej na stałym poziomie (wyniki pomiarów w bloku dotyczyły miejscowości Guarapari w Brazyli, podwyższone promieniowanie tła, dla Ramsar brak danych). Oczywiście, dużą rolę odgrywają nawyki mieszkaniowe właścicieli, wskazane jest systematyczne i częste wietrzenie pomieszczeń. W domu wolnostojącym można również zastosować sztuczkę z obniżeniem ciśnienia w gruncie pod budynkiem lub w piwnicy poprzez usuwanie powietrza za pomocą wentylatorów. Ewentualnie można podwyższyć ciśnienie w części mieszkaniowej, ale ze względu na warunki klimatyczne jest to wątpliwe (wymaga szczelności pomieszczenia).

Koleją składową dawki rocznej, którą można zmniejszyć jest napromienienie wewnętrzne. Można zarekomendować Ramsarczykowi aby kupował pożywienie: warzywa, mięso itd. pochodzących z miejscowości/wsi dalej położonych od Ramsar, a nie z lokalnego bazaru. Również pochodzenie wody pitnej może odgrywać istotną rolę.

Na sam koniec, można zarekomendować aby w lokalnych atrakcjach, jakimi są baseny ze źródłami termicznymi, polepszyć wentylację. Może należałoby stworzyć drugi obieg, zastosować wymiennik ciepła, który przekazywałby ciepło od wysoce aktywnej wody geotermalnej do obiegu wtórnego w którym krążyłaby woda o wiele niższej aktywności.

## **ALARA**

### **As Low As (is) Reasonably Achievable**

czy podane rekomendacje są "rozsądne" – pozostawiam do oceny.

*Serdecznie dziękuję za poświęcony czas i zapoznanie się z moją pracą.*

*Będę wdzięczny za ewentualne uwagi.*

*Dominik Muszyński*  
[dominikmszynski@gmail.com](mailto:dominikmszynski@gmail.com)

## **LITERATURA**

- [1] UNSCEAR Report, Sources And Effects Of Ionizing Radiatio,2008
- [2] UNSCEAR Report, Sources and Effects Of Ionizing Radiatin, 2010
- [3] M. Florek et al., Natural Neutron Fluence Rate and the Equivalent Dose in Localities with Different Elevation and Latitude, 1996
- [4] M. Kowatari at al., Evaluation of the Altitude Variation of the Cosmic-ray, 2005
- [5] CLOR, Rocznik – Informacja o wynikach działalności statutowej w roku 2004
- [6] Państwowa Agencja Atomistyki, Raport roczny 2014
- [7] Międzynarodowa Komisa Ochrony Radiologicznej (ICRP Publication 103)
- [8] GIOŚ, Radioaktywność przyziemnej warstwy atmosfery w Polsce w latach 1960-2010
- [9] IMGW, Wykonywanie pomiarów w sieci wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych w latach 2013 – 2015
- [10] Komisja Europejska, An overview of radon surveys in Europe
- [11] Roczniki Państwowego Zakładu Higieny, s.207-212, 1998
- [12] Państwowy Instytut Geologiczny, Ocena zagrożenia radonem w wybranych obszarach Suwalszczyzny, 2015
- [13] Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire, Radon
- [14] Instytut Fizyki Jądrowej, Materiały konferencyjne: II Ogólnopolska Konferencja "Radon w Środowisku"
- [15] Podstawczyńska A., Stężenie radonu (Rn-222) w powietrzu w środkowej Polsce na tle warunków meteorologicznych
- [16] UNSCEAR Report, Sources And Effects Of Ionizing Radiatio,2000
- [17] Deepak Verma, Assesment of indoor radon, thoron and their progeny in dwellings of bareilly city of northern India using track etch detectors, 2015
- [18] T.V. Ramachandran, Environmental thoron (220Rn) : A review, 2010
- [19] UNSCEAR Report, Annex D, 1982
- [20] IAEA, Materiały konferencyjne, High levels of natural radiation
- [21] Yadolah Fakhri, Concentration of radon (Radon 222 and Thoron) in indoor air, Iran 2015
- [22] T.V.Ramachandran, 220Rn in indoor environment and work places: a review
- [23] M. Ghiassi-nejad, Very high background radiation areas of Ramsar, Iran: preliminary biological studies

- [24] Yadolah Fakhri, Assessment Risk of Lung Cancer from Inhalation of Radon 222 and Thoron (Radon 220) of Indoor Air in Staff Cement Storage Warehouses
- [25] Vimal Mehta, Study of Indoor Radon, Thoron, Their Progeny Concentration and Radon Exhalation Rate in the Environs of Mohali, Punjab, Northern India
- [26] Prabhjot Singh, A study of indoor radon, thoron and their progeny measurement in Tosham region Haryana, India
- [27] U.S. Energy Research and development administration report, The Natural Radiation Environment
- [28] Radiologicznego Atlasu Polski 2011
- [29] G. R. Choppin, Radiochemistry and Nuclear Chemistry
- [30] CLOR, Monitoring stężenia 137-Cs w glebie w latach 2012-2013
- [31] Abbaspour M., Relationship of soil terrestrial radionuclide concentrations and the excess of lifetime cancer risk in western Mazandaran Province
- [32] IRSN, Report on the Radiological State of the Environment in France in 2010-2011
- [33] IRSN, CEA, 2nd International Workshop, Dossier de Presse - Où en est la recherche sur les faibles doses?
- [34] S.M.J. Mortazavi, Is it time to shed some light on the black box of health policies regarding the inhabitants of the high background radiation areas of Ramsar?
- [35] Autorite de Surete Nucleaire, ASN Report on the state of nuclear safety and radiation protection in France in 2014
- [36] A. Shabestani Monfared, The Estimation of Radiation Effective Dose from Diagnostic Medical Procedures in General Population of Northern Iran, 2006
- [37] Raportu Komisji Europejskiej z 2014 r. Medical Radiation Exposure of the European Population
- [38] Zachodnie Centrum Onkologii, Dawka skuteczna i ekwiwalentna a ryzyko radiacyjne
- [39] Papierz S., Kacprzyk J., Occupational exposure to x and gamma rays in Poland in 2010
- [40] ASN REPORT on the state of nuclear safety and radiation protection in France in 2014
- [41] R.P. Chauhan, Low-Level Radiation Exposure to Some Industrial Workers
- [42] K.Kant, Environmental impact of coal utilisation in thermal power plant
- [43] Bem H., Wieczorkowski P., Niektóre elementy narażenia radiologicznego mieszkańców województwa łódzkiego
- [44] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 25 sierpnia 2005 r. w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medyczne
- [45] Wahlström B., Promieniowanie, zdrowie, społeczeństwo, Państwowa Agencja Atomistyki
- [46] Edward s M., Models for Estimating Risk of Radiation Carcinogenesis





---