

# ALARA, CZYLI OPTYMALIZACJA W OCHRONIE RADIOLOGICZNEJ – ANALIZA DLA POLSKI

## ALARA, optimization in radiation protection – analysis for Poland

Ernest Bugała, Krzysztof W. Fornalski

**Streszczenie:** W niniejszym artykule skupiono się na ilościowym podejściu do opisanej w ustawie Prawo atomowe zasady optymalizacji, która jest implementacją międzynarodowej zasady ALARA, czyli redukcji narażenia na promieniowanie jonizujące do poziomu tak niskiego, jak jest to rozsądnie możliwe. W oparciu o praktyki międzynarodowe opisano kwestię wyznaczania parametru  $\alpha$  (alfa) w ochronie radiologicznej dla Polski, który opisuje materialny koszt skutków napromienienia pojedynczej osoby dawką skuteczną jednego siwerta. Obliczenia zostały przeprowadzone dla trzech sposobów wyznaczania parametru  $\alpha$ : metody PKB, metody bazującej na państwowo regulowanych odszkodowaniach oraz metody skłonności. Ostatecznie oszacowany dla Polski parametr alfa wynosi około 100 000 zł/Sv, co jest zgodne z praktykami międzynarodowymi. Obliczenia te przeprowadzono także dla różnych wariantów modelu ryzyka radiacyjnego: modelu liniowego (LNT), progowego oraz hormetycznego.

**Abstract:** The following paper focuses on a quantitative approach to the described in the Polish Atomic Law optimization principle that is an implementation of an international ALARA principle which requires reducing exposition to ionizing radiation to levels that are as low as reasonably achievable. Basing on international practice, an issue of calculating the  $\alpha$  (alpha) parameter in radiation protection for Poland is raised, which describes material cost of exposing a single person to an effective dose of one sievert. The calculations are conducted for three methods of calculating the  $\alpha$  parameter are presented: GDP method, method based on nationally regulated compensation and the willingness method. Estimated value of  $\alpha$  parameter for Poland is about 100 000 PLN / Sv and corresponds with international practice. The calculations were conducted for different radiation risk models: linear non-threshold (LNT), threshold and hormetic.

**Słowa kluczowe:** ochrona radiologiczna, promieniowanie, optymalizacja, dawka, parametr  $\alpha$

**Keywords:** radiation protection, radiation, optimization, dose,  $\alpha$  parameter

### 1. Wstęp

Zasada optymalizacji w ochronie radiologicznej wielokrotnie pojawia się w ustawie Prawo atomowe [1] – znajduje się ona m.in. w samej definicji ochrony radiologicznej, jako „zapobieganie narażeniu ludzi i skażeniu środowiska, a w przypadku braku możliwości zapobieżenia takim sytuacjom – ograniczenie ich skutków do poziomu tak niskiego, jak tylko jest to rozsądnie osiągalne, przy uwzględnieniu czynników ekonomicznych, społecznych i zdrowotnych” [1]. W powyższej definicji widać, więc fragment zasady optymalizacji, która w innym miejscu jest zdefiniowana, jako „wymagająca żeby – przy rozsądnym uwzględnieniu czynników ekonomicznych i społecznych oraz aktualnego stanu wiedzy technicznej – liczba narażonych pracowników i osób z ogółu ludności oraz prawdopodobieństwo ich narażenia były jak najmniejsze, a otrzymywane przez nich dawki promieniowania jonizującego były możliwie małe” [1]. Zasada ta jest znana za granicą, jako zasada ALARA (od angielskiego „as low as reasonably achievable”) lub ALARP („as low as reasonably practicable”). W każdym

z przypadków chodzi o minimalizację ryzyka narażenia na promieniowanie jonizujące oraz przyjmowanych dawek przy jednoczesnym rozsądnym gospodarowaniem zasobami. Przytoczona zasada optymalizacji oraz jej zastosowanie stanowi jeden z podstawowych problemów w ochronie radiologicznej w wielu krajach świata.

Międzynarodowa zasada ALARA, a wraz z nią nasza rodzima zasada optymalizacji, bazuje na konserwatywnym założeniu o szkodliwości każdej dawki promieniowania i liniowej zależności dawka-efekt (tzw. Hipoteza LNT, linear no-threshold, czyli liniowa bezprogowa). Nie wchodząc w dyskusję na temat słuszności takiego podejścia, należy podkreślić, że praktycznie wszystkie standardy ochrony radiologicznej obowiązujące na świecie bazują na hipotezie LNT, a co za tym idzie – zasada ALARA jest powszechnie stosowana, chociaż podejście do niej bywa bardzo różne.

W polskich przepisach istnieje oczywiście konieczność stosowania zasady optymalizacji, aczkolwiek jej ściśle i precyzyjne określenie jest trudne do zidentyfikowania. Jednym z jej przejawów jest sama koncep-

cja dawki granicznej, która jest różna dla pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące (dawka skuteczna mniejsza niż 20 mSv/rok) oraz osób z ogółu ludności (1 mSv/rok) dla narażenia pochodzącego ze źródeł sztucznych pozamedycznych. Jednak dużo istotniejsze jest pojęcie ogranicznika dawki (limitu użytkowego dawki) zdefiniowanego jako „ograniczenie przewidywanych dawek indywidualnych, wyrażonych jako dawki skuteczne (efektywne) lub dawki równoważne, które mogą pochodzić od określonego źródła promieniowania jonizującego, uwzględnione podczas planowania ochrony radiologicznej w celach związanych z optymalizacją” [1]. Jest to więc jednoznaczny nakaz, aby dla konkretnej sytuacji narażenia przyjmować subiektywne ograniczenia na dawki jako mniejsze od dawek granicznych. Jednakże nie zostało podane ani kryterium, według którego będą one oszacowane, ani sposób takiego szacowania pozostawiając tak naprawdę wolną rękę użytkownikowi oraz nadzorującemu go regulatorowi.

W niniejszym artykule przedstawiono sposób podejścia do zasady optymalizacji za granicą przy użyciu tzw. parametru alfa ( $\alpha$ ). Jest to na tę chwilę jedyne ściśle i jednoznaczne kryterium używane do aplikacji zasady optymalizacji w praktyce. W oparciu o istniejące dane przedstawiliśmy jak wyglądałoby wdrożenie takiego podejścia w Polsce. Ponadto przedyskutowaliśmy w tym kontekście także inne modele dawka-efekt, alternatywne do modelu LNT.

## 2. Przykładowe zastosowanie zasady optymalizacji

Dobrym przykładem zastosowania zasady optymalizacji w praktyce jest wycofanie z eksploatacji oraz demontaż reaktora BR3 (Belgian Reactor 3) zlokalizowanego w belgijskim centrum badań jądrowych SCK-CEN koło miasta Mol. Reaktor działał od 1962 do 1986 r. i wówczas był pierwszym reaktorem typu PWR zbudowanym w Europie. Dodatkowo projekt wycofania reaktora BR3 z użytku był pierwszym przypadkiem zakończenia eksploatacji oraz demontażu reaktora jądrowego w Belgii. Te dwa fakty złożyły się na jeden z głównych problemów inwestycji, mianowicie oznaczały brak poprzednich doświadczeń w demontażu reaktora typu PWR, czyli brak danych, na których można by było oprzeć plan pracy i kolejność planowanych działań. Biorąc powyższy problem pod uwagę, pojawił się automatycznie kolejny (oprócz demontażu reaktora i jego instalacji) cel polegający na zebraniu danych radiacyjnych, na których można by oprzeć przyszłe inwestycje. Zebrane dane zawierały między innymi:

- pomiary dozymetryczne pracowników,
- liczbę pracowników zaangażowanych przy określonych zadaniach,
- pomiary czasu wykonywania poszczególnych zadań,

- określenie ryzyka narażenia pracownika na promieniowanie,
- opis innych potencjalnych niebezpieczeństw związanych z wykonywaniem zadań (styczność z toksycznymi chemicznie pierwiastkami i związkami np. azbest lub kwasy).



**Fot. 1.** Budynki reaktorowe i korpus reaktora BR3 znajdującego się w ośrodku jądrowym SCK-CEN w Belgii niedaleko miasta Mol (fot. Krzysztof Fornalski)

**Photo 1.** Reactor buildings and BR3 reactor vessel located in SCK-CEN nuclear research center in Belgium near Mol (photo: Krzysztof Fornalski)

Reaktor BR3, jak każdy PWR, posiadał dwa obiegi wody: wewnętrzny, który ma bezpośredni kontakt z elementami paliwowymi reaktora (woda działa w roli chłodziwa i moderatora reakcji jądrowych) oraz zewnętrzny, gdzie wytworzona para napędza turbiny generujące prąd. Warto w tym miejscu wspomnieć, iż BR3 miał dwie funkcje: badawczą oraz energetyczną (na niewielką skalę). W trakcie inwestycji wzięto pod uwagę fakt, że woda z obiegu pierwotnego jest wysoce skażona, zatem aby zredukować dawkę otrzymywaną przez pracowników prace rozpoczęto właśnie od oczyszczenia obiegu pierwotnego. Następnie kolejne elementy do demontażu wyznaczano według ich wpływu na dawkę otrzymywaną przez pracowników (zaczęto od fragmentów najbardziej promieniotwórczych, aby jak najbardziej zredukować czas narażenia pracowników na wysokie moce dawek promieniowania pochodzące od tych elementów). Elementy te w kolejności to:

- wycięcie osłony termicznej (dawka kolektywna 39,55 osobo-mSv),
- oczyszczenie obiegów reaktora z azbestu (22,4 osobo-mSv),
- demontaż fragmentów budynku reaktora (22,21 osobo-mSv),
- przygotowanie oraz usunięcie paliwa reaktora (9,8 osobo-mSv),
- usunięcie zbiornika reaktora (2,42 osobo-mSv),

- umieszczenie basenu mającego uszczelnić zbiornik reaktora (14,42 osobo-mSv),
- cięcie zbiornika reaktora na fragmenty (28,09 osobo-mSv),
- demontaż zbiornika tarczy neutronowej (7,34 osobo-mSv) [2].

Sumaryczna dawka kolektywna<sup>1</sup> wyniosła 158 osobo-mSv (uwzględniono również inne prace, przy których dawka kolektywna nie była tak wysoka, jak w przypadku wymienionych powyżej czynności). Przy szeregowaniu zadań pomocne były trzy zasady wprowadzone do standardów ochrony radiologicznej:

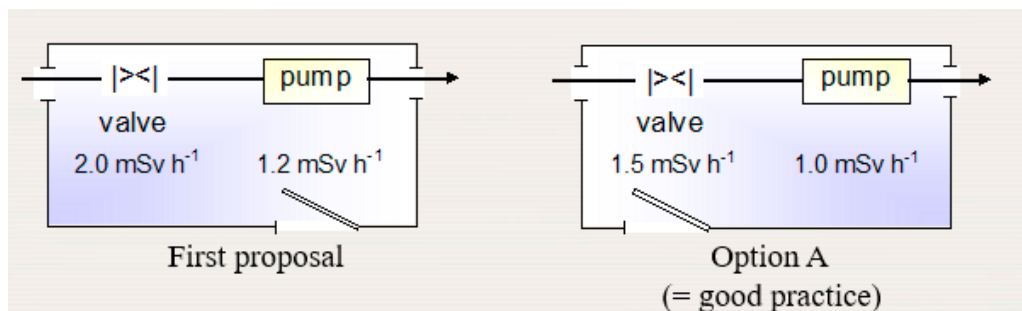
- uzasadnienie narażenia,
- optymalizacja,
- ograniczenie dawek.

Wszystkie przedstawione reguły przenikają się wzajemnie i uzupełniają. Pierwsza z nich mówi, że narażenie pracownika na dawkę promieniowania musi być uzasadnione tym, że zamierzony rezultat jego pracy będzie prowadził do ograniczenia dawek w kolejnych etapach prac. Druga wymaga optymalizacji prac pod względem otrzymanych dawek zarówno indywidualnych, jak i kolektywnych (czyli pod kątem równomiernego obciążania pracowników dawkami). Wiąże się to z trzecią zasadą, czyli ograniczeniem dawek. Sumaryczny efekt ograniczenia narażenia pracowników można osiągać na wiele sposobów, między innymi przez stosowanie osłon, skafandrów ochronnych, redukcję czasu ekspozycji i ograniczenie liczby narażonych pracowników do niezbędnego minimum (również poprzez lepsze wyszkolenie pracowników – osoba z większym doświadczeniem wykona pracę szybciej i otrzyma mniejszą dawkę). W każdym z wymienionych aspektów więcej wcale nie znaczy lepiej, gdyż należy zachować rozsądek w planowaniu działań i uwzględnić wiele aspektów pracy. Przede wszystkim zastanowić się, czy nasze działania nie przyniosą wię-

cej szkody, niż pożytku. Na przykład, czy zapewnienie pracownikowi grubszego kombinezonu ochronnego, dla większej redukcji otrzymywanej dawki nie spowoduje utrudnienia zadania do tego stopnia, że zajmie mu to znacznie więcej czasu niż wcześniej i nie spowoduje przyjęcia sumarycznie większej dawki niż przy lżejszym skafandrze. Czy wysyłając dwie osoby do zadania zamiast jednej nie zredukujemy znacznie czasu potrzebnego na wykonanie pracy i dzięki temu dawka kolektywna nie będzie mniejsza niż w przypadku pojedynczej osoby męczącej się samemu z trudnym zadaniem? Planując pracę, należy zadać sobie takie i wiele podobnych pytań i rozważyć wiele opcji tak, aby końcowo uzyskać optymalny rozkład dawek.

Innym praktycznym przykładem może być projektowanie pomieszczenia i procesu konserwacji zaworu oraz pompy pod względem optymalizacji ochrony radiologicznej. Znając częstotliwość, z jaką należy serwisować poszczególne elementy (np. raz na rok dla pompy i co tydzień dla zaworu – założono 40 tygodni roboczych w roku), czas potrzebny na przeprowadzenie konserwacji (5 godzin dla pompy oraz 15 minut dla zaworu) oraz rozkład mocy dawek w różnych wariantach układu pomieszczenia, można wybrać najlepszą z opcji. Rys. 1 obrazuje przykładowy wpływ umiejscowienia drzwi na dawki otrzymywane podczas przebywania w pomieszczeniu. Widać, że jeżeli drzwi zostaną umieszczone bliżej zaworu (który należy częściej serwisować), zmienia się rozkład mocy dawek na korzystniejszy oraz, mając na uwadze to, że częściej trzeba pracować przy zaworze, zmniejsza się czas przebywania pracownika w obszarze ryzyka (droga, którą pracownik pokonuje częściej, jest krótsza).

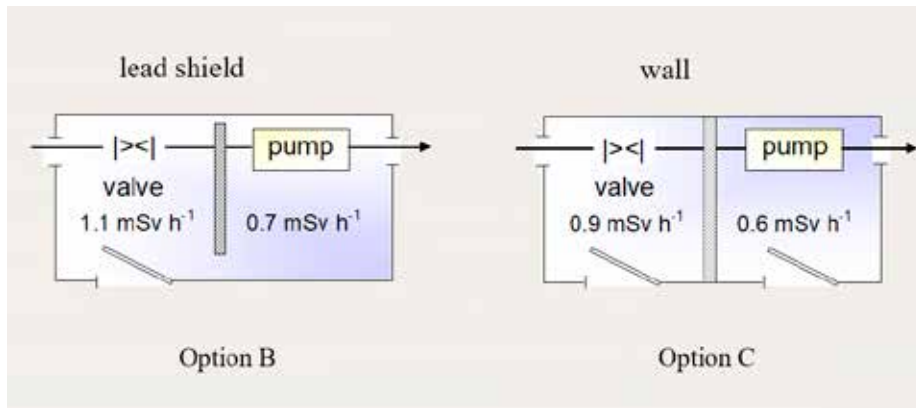
Następnie uwzględniano różnego rodzaju bariery mające jeszcze bardziej zredukować dawki otrzymywane podczas przebywania w pomieszczeniu. Dla różnych rozpatrywanych scenariuszy rozważano użycie tarczy ołowianej oraz zbudowanie ściany w pomiesz-



**Rys. 1.** Optymalizacja ochrony radiologicznej na przykładzie projektowania układu pomieszczenia (źródło: prezentacja Fernanda Vermeerscha [2]). Valve – zawór; pump – pompa; first proposal – pierwsza propozycja; option A (= good practice) – opcja A (= dobra praktyka)

**Fig. 1.** Optimization of radiation protection on the example of designing a room layout (source: Fernand Vermeersch's presentation [2])

<sup>1</sup> Należy zwrócić uwagę na fakt, iż w Polsce odchodzi się od pojęcia dawki kolektywnej, która jednakże jest jeszcze stosowana w wielu innych krajach



**Rys. 2.** Optymalizacja ochrony radiologicznej na przykładzie projektowania układu pomieszczenia – wprowadzenie bariery (źródło: prezentacja Fernanda Vermeerscha [2]). Lead shield – tarcza ołowiana; valve – zawór; pump – pompa; option B – opcja B; wall – ściana; option C – opcja C  
**Fig. 2.** Optimization of radiation protection on the example of designing a room layout – introducing a barrier (source: Fernand Vermeersch's presentation [2])

czeniu mającej oddzielić zawór od pompy (dodając dodatkowe drzwi – opcja C, zob. rys. 2).

Na rys. 2 widać, że opcja C prowadzi do większej redukcji mocy dawki w pomieszczeniu, niż opcja B, lecz niestety jest również opcją wymagającą większego nakładu materialnego. Rozważano zatem trzy opcje (scenariusze): A, B oraz C (oznaczone na rys. 1 i 2) pod względem kosztów oraz redukcję mocy dawki w pomieszczeniu. Roczny czas konserwacji obu elementów wyznaczono na: 10 osobogodzin dla zaworu (15 minut na zadanie wymagające 1 pracownika 40 razy do roku) oraz 5 osobogodzin (raz do roku zadanie wymagające 5 godzin i 1 pracownika) dla pompy. Koszty każdej z trzech opcji oceniono na: A – 0 €, B – 1200 €, C – 4100 € jednorazowej inwestycji oraz A – 0 €/rok, B – 5 €/rok i C – 15 €/rok rocznych kosztów eksploatacji. Roczne dawki kolektywne przyjmowane przez pracowników przy wykonywaniu konserwacji układu wyniosły szacunkowo: A – 20 osobo-Sv/rok, B – 14,5 osobo-Sv/rok, C – 12 osobo-Sv/rok (obliczone jako roczny czas konserwacji zaworu razy moc dawki przy zaworze plus roczny czas konserwacji pompy razy moc dawki przy pompie dla każdego wariantu). W cytowanej analizie [2] założona roboczo wartość współczynnika  $\alpha$  wyniosła 30 €/mSv na osobę (autor analizy [2] zaznacza, że jest to wartość mocno szacunkowa i wymagane jest jej uzasadnienie i głębsza analiza tematu). Bazowano tutaj na hipotezie liniowej bezprogowej (LNT) sugerującej liniowy wzrost ryzyka wystąpienia chorób związanych z wpływem promieniowania jonizującego na organizm od dawki. Otrzymano zestawienie rocznych kosztów dla każdej z opcji (Tabela 1).

Koszt X obliczono dzieląc wartości kosztów jednorazowych postawienia odpowiedniej osłony przez 20 (założoną liczbę lat eksploatacji układu) i dodając roczne koszty eksploatacyjne danej opcji. Można zauważyć, że mimo postawienia ściany (dalszego zwiększenia poziomu ochrony radiologicznej względem tarczy ołowianej), koszty są wyższe, niż dla przypadku B. Ana-

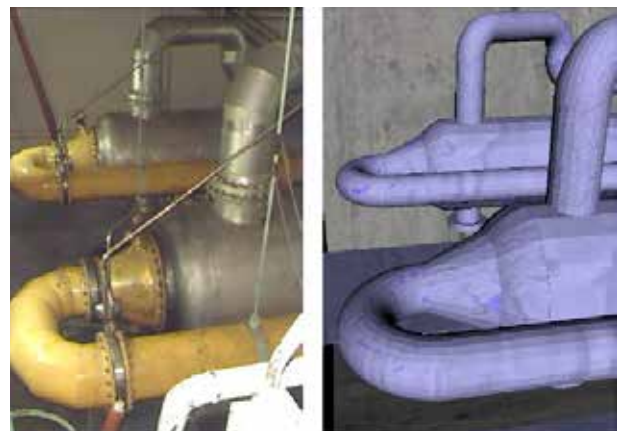
**Tabela 1.** Zestawienie rocznych kosztów każdego z trzech wariantów inwestycji przedstawionych na rys. 1 i 2 (źródło: prezentacja Fernanda Vermeerscha [2])

**Table 1.** Comparison of annual costs for each of the investment options depicted in fig. 1 and 2 (source: Fernand Vermeersch's presentation [2])

Opcja (scenariusz)	X koszt (€)	S dawka kolektywna (osobosiwerty)	X + $\alpha$ S Koszt całkowity (€)
A	-	20	600
B	65	14,5	500
C	220	12	580

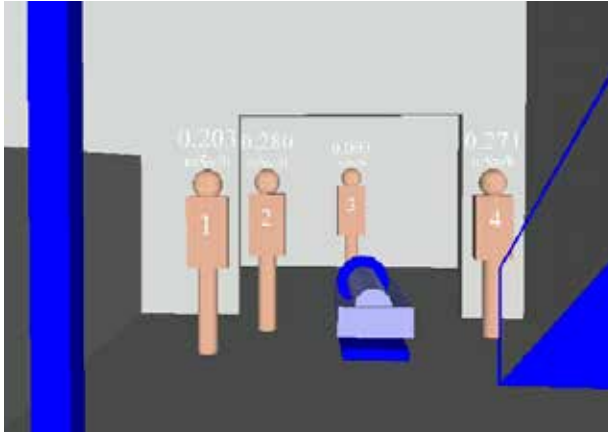
lizę sumarycznych kosztów i zależności ich składowych między sobą przedstawione są w kolejnym rozdziale (rys. 4).

Aktualnie planowanie zadań pracowników w Belgii (czas zadania, umiejscowienie i pozycja pracownika przy wykonywaniu zadania itd.) odbywa się przy pomocy symulacji komputerowych pozwalających na odwzorowanie miejsca pracy przy użyciu mode-



**Fot. 2.** Po lewej – zdjęcie rzeczywistej instalacji w elektrowni jądrowej, po prawej – ta sama instalacja odwzorowana w postaci modeli w programie Visiplan (źródło: materiały SCK-CEN [2])

**Photo 2.** Left – a photo of existing nuclear power plant installation, right – the same installation remade as models in Visiplan (source: SCK-CEN materials [2])



**Rys. 3.** Wynik symulacji programu Visiplan – prognozowane moce dawek w zależności od miejsca, w którym znajduje się dana osoba (źródło: materiały SCK-CEN [2])

**Fig. 3.** Output of Visiplan simulation – prognosed dose powers depending on person's location (source: SCK-CEN materials [2])

li geometrycznych oraz propagacji promieniowania w przestrzeni (na podstawie odpowiednich pomiarów dozymetrycznych oraz podaniu materiałów, z których zrobione są elementy pomieszczenia i instalacji). Przykładami takich programów są Visiplan (przykłady użycia pokazane są na fot. 2 i rys. 3) oraz ErgoDose. W energetyce jądrowej testowane są również bardziej zaawansowane kody numeryczne bazujące na algorytmach genetycznych, a służące do znalezienia optymalnego rozwiązania przy uwzględnieniu wielu pracowników i wielu elementów całego skomplikowanego projektu elektrowni jądrowej.

### 3. Parametr i metody wyznaczania jego wartości

Parametr jest w przypadku ilościowej optymalizacji ochrony radiologicznej jednym z najbardziej podstawowych i ścisłych parametrów. Opisuje on materialny koszt skutków napromienienia pojedynczej osoby dawką jednego siwerta. Parametr ma pomóc ocenić zasadność podwyższenia stopnia ochrony radiologicznej w rozważanym miejscu – w danym ośrodku badawczym, elektrowni jądrowej, firmie, regionie, czy kraju. Zasadność ta ma być określana przez zasadę optymalizacji, szczególnie fragmentu „przy rozsądnym uwzględnieniu czynników ekonomicznych i społecznych”. Chodzi tutaj o prostą analizę zysków i strat, w której należy zastanowić się, czy koszty zamierzonych działań nie przewyższą korzyści uzyskanych z inwestycji. To właśnie materialne podejście stoi za koniecznością wyznaczania parametru. Taka analiza bazuje na prostym równaniu zaczerpniętym z pracy [3]:

$$B = V - (P + X + Y) \quad (2.1.)$$

gdzie:

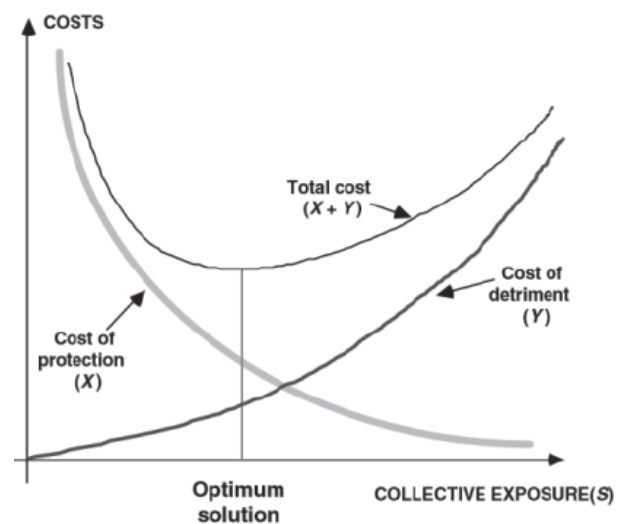
$B$  – zysk netto z zamierzonych działań,  
 $V$  – zysk brutto zamierzonych działań,

$P$  – koszt produktów potrzebnych do wprowadzenia działań w życie (bez uwzględnienia kosztów ochrony radiologicznej),

$X$  – koszt ochrony radiologicznej,

$Y$  – koszt uszczerbku na zdrowiu pracowników wywołany promieniowaniem.

Zakłada się, że wartości  $V$  oraz  $P$  są stałe i niezależne od zastosowanego stopnia ochrony radiologicznej, natomiast wartości  $X$  i  $Y$  ściśle zależą od dawki kolektywnej. Dodatkowe założenie polega na tym, że ich wartości są ze sobą skorelowane – im większe wydatki na ochronę radiologiczną, tym jest ona skuteczniejsza i tym mniejsza jest dawka kolektywna, a co za tym idzie, maleją koszty potencjalnego uszczerbku na zdrowiu wywołane promieniowaniem. Tę korelację pomaga zobrazować rys. 4.



**Rys. 4.** Wykres przykładowej zależności sumarycznych kosztów od dawki kolektywnej (źródło: J.Linsheng et al. [3]).

$Costs$  – koszty;  $cost\ of\ protection\ (X)$  – koszty ochrony ( $X$ );  $optimum\ solution$  – optymalne rozwiązanie;  $total\ cost$  – koszt całkowity;  $cost\ of\ detriment\ (Y)$  – koszty uszczerbku ( $Y$ );  $collective\ exposure(s)$  – kolektywna ekspozycja

**Fig. 4.** Example plot of a relationship between overall costs and collective dose (source: J.Linsheng et al. [3])

Koncentrując się na równaniu (2.1): aby osiągnąć największy zysk netto prowadzonych działań, należy dążyć do tego, aby suma  $X + Y$  osiągnęła minimum. Koszt uszczerbku na zdrowiu pracowników wywołany promieniowaniem jest funkcją zależną od wcześniej opisanego parametru  $\alpha$  oraz dawki kolektywnej (ryzyko wystąpienia zmian w organizmie spowodowanych promieniowaniem jonizującym jest oddzielne dla każdego pracownika, ale koszty dla pracodawcy/inwestora są sumą kosztów po wszystkich pracownikach). Postać tej funkcji zależy od przyjętego modelu ryzyka, a najczęściej stosowaną na świecie funkcją jest linia prosta (model LNT), chociaż z punktu widzenia wielu danych naukowych jest to dyskusyjne.

Autorzy pracy [3] podają trzy metody wyznaczania parametru  $\alpha$ :

- Metoda bazująca na produkcie krajowym brutto na osobę (PKB per capita) analizowanego państwa,
- Metoda bazująca na kwotach państwowo regulowanych odszkodowań,
- Metoda skłonności (willingness method).

#### A. Metoda PKB

Metoda bazuje na trzech współczynnikach. Po pierwsze (zgodnie z nazwą) należy określić wartość produktu krajowego brutto na osobę w badanym państwie. W Polsce w 2019 r. PKB per capita wyniosło 59 229 zł (podawane za GUS: <https://stat.gov.pl/podstawowe-dane/> [4]). Drugim z czynników jest średnie skrócenie życia człowieka wynikające z niekorzystnego wpływu promieniowania jonizującego (składają się na to głównie śmiertelne przypadki zachorowań na raka oraz czynniki dziedziczne). Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (IAEA) podaje, że czas ten należy szacować na 16 lat na każdy siwert dawki (przy zastosowaniu modelu LNT) [5]. Ostatnim współczynnikiem jest prawdopodobieństwo wystąpienia negatywnych skutków przyjęcia określonej dawki promieniowania. Tutaj kluczową rolę odgrywa dobór modelu ryzyka.

#### B. Metoda bazująca na państwowo regulowanych odszkodowaniach

Metoda opiera się na obliczeniu kosztów ponoszonych przez państwo oraz przedsiębiorstwo zatrudnia-

jące pracownika w przypadku jego śmierci poniesionej z przyczyn związanych z wykonywanym zawodem (wypadek przy pracy lub choroba zawodowa). Trzy główne składowe powyższych kosztów to:

- odprawa pośmiertna,
- zasiłek pogrzebowy,
- jednorazowe odszkodowanie z tytułu wypadku przy pracy lub choroby zawodowej.

Pierwszym z kosztów obarczony jest pracodawca, który zobowiązany jest do wypłacenia rodzinie pracownika kwoty równoważnej jedno-, trzy- lub sześciomiesięcznemu wynagrodzeniu zmarłego (zależnie od jego stażu pracy w danym przedsiębiorstwie, odpowiednio: do 10 lat, między 10 a 15 lat i przynajmniej 15 lat) [6]. Przeciętne miesięczne wynagrodzenie brutto w listopadzie 2020 r. wynosiło 5484,07 zł (dane za GUS). Zakładając wypłacanie odprawy według najwyższego progu, otrzymujemy kwotę 32 904,42 zł.

Zasiłek pogrzebowy ustalony jest na kwotę do 4 000 zł i przysługuje osobie lub organowi, który pokrył koszty pogrzebu. Jeżeli jest to członek rodziny osoby zmarłej wypłacana jest pełna kwota 4 000 zł bez względu na koszty pogrzebu. W przypadku pracodawcy i innych organizacji wypłacana jest kwota w wysokości udokumentowanych kosztów, do wysokości maksymalnej 4 000 zł [7]. W obliczeniach parametru, założymy kwotę maksymalną, z uwagi na fakt, iż koszty pogrzebu zwykle wynoszą więcej, niż podana kwo-

**Tabela 2.** Choroby zawodowe wywołane promieniowaniem jonizującym lub będące nowotworami, wymienione w Rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie chorób zawodowych

**Table 2.** Occupational diseases caused by ionizing radiation or being any kind of cancer listed in Council's of Ministers decree regarding occupational diseases

	Choroby zawodowe	Okres, w którym wystąpienie udokumentowanych objawów chorobowych upoważnia do rozpoznania choroby zawodowej pomimo wcześniejszego zakończenia pracy w narażeniu zawodowym
Choroby wywołane działaniem promieniowania jonizującego:	Ostra choroba popromienna uogólniona po napromieniowaniu całego ciała lub przeważającej jego części	2 miesiące
	Ostra choroba popromienna o charakterze zmian zapalnych lub zapalno-martwiczych skóry i tkanki podskórnej	1 miesiąc
	Przewlekłe popromienne zapalenie skóry	Nie można określić
	Przewlekłe uszkodzenie szpiku kostnego	Nie można określić
	Zaćma popromienna	10 lat
Nowotwory złośliwe powstałe w następstwie działania czynników występujących w środowisku pracy, uznanych za rakotwórcze u ludzi:	Rak płuca, rak oskrzela	Indywidualnie w zależności od okresu latencji nowotworu
	Międzybłoniak opłucnej albo otrzewnej	
	Nowotwór układu krwiotwórczego	
	Nowotwór skóry	
	Nowotwór pęcherza moczowego	
	Nowotwór wątroby	
	Rak krtani	
	Nowotwór nosa i zatok przynosowych	
Nowotwory wywołane działaniem promieniowania jonizującego z prawdopodobieństwem indukcji przekraczającym 10%	Indywidualnie, po oszacowaniu ryzyka	

(Podano za [8])

ta, więc zakłada się, że z reguły zasiłek ten wypłacany jest w pełni.

Ostatnim z wymienionych kosztów jest jednorazowe odszkodowanie z tytułu wypadku przy pracy lub choroby zawodowej. W przypadku ochrony radiologicznej interesują nas głównie choroby zawodowe (wszystkie wymienione są w odpowiednim rozporządzeniu [8]), w szczególności te związane z promieniowaniem jonizującym oraz nowotworami podane są w tabeli 2.

Za śmierć z powodu chorób zawodowych rodzinie zmarłego przysługuje jednorazowe odszkodowanie w bazowej wysokości 88 527 zł. Odszkodowanie w tej wysokości obowiązuje, jeżeli jest wypłacane małżonkowi albo dziecku (tylko jednemu z dwojga wymienionych) osoby poszkodowanej. W przypadku większej liczby dzieci (lub posiadania małżonka oraz dziecka) dodatkowo na każde dziecko przysługuje 17 214 zł. Sumaryczna kwota jest dzielona w równych częściach między uprawnione osoby [9]. Do dalszych obliczeń zakłada się podstawową wysokość odszkodowania w wysokości 88 527 zł.

Sumując wyżej wymienione koszty otrzymujemy kwotę 125 431,42 zł i ponownie uzyskane wartości parametru zależą od doboru modelu ryzyka.

### C. Metoda skłonności (willingness method)

Metoda skłonności bazuje na dwóch pojęciach. Pierwsze z nich to WTA – willingness to accept, czyli jaką kwotę osoba jest skłonna zaakceptować w ramach rekompensaty za wystawienie jej na pewne ryzyko lub niedogodności. Drugim pojęciem jest WTP – willingness to pay, czyli ile dana osoba jest w stanie zapłacić za uniknięcie tych samych niedogodności. Metoda skłonności dzieli się na trzy główne typy: metoda pensji i ryzyka, metoda rynku konsumpcyjnego oraz metoda wartości warunkowej. Autorzy pracy opisującej wyznaczanie parametru w stosunku do realiów Chin [3] korzystają z metody pensji i ryzyka. Polega ona na uwzględnieniu ryzyka związanego z wykonywaną pracą (ryzyka odniesienia uszczerbku na zdrowiu lub nawet śmierci w wyniku wypadku) przy ustalaniu pensji za wykonywaną pracę. Oznacza to wyższe pensje na stanowiskach związanych z podwyższonym ryzykiem lub niedogodnościami (ewentualnie dodatki podwyższające pensję rekompensujące ryzyko). Najprostszymi przykładami tej zależności mogą być praca na platformie wiertniczej, czy prace górnicze. Autorzy, jako zalety tego typu metody względem pozostałych dwóch podają łatwość zebrania wyników dotyczących relacji pensji-ryzyka oraz fakt, że dane te opierają się o rzeczywisty rynek pracy, a nie hipotetyczny.

Wyżej wspomniana praca przy wyznaczaniu parametru  $\alpha$  metodą skłonności korzysta z danych zebranych przez grupę chińskich naukowców, którzy w 2012 r. przeprowadzili wśród 795 pracowników z 98

firm z sektorów usług, budownictwa, chemicznego, produkcji oraz węglowego kwestionariusz dotyczący oczekiwanych dodatków pieniężnych mających zrekompensować zwiększone ryzyko wypadku lub śmierci związane z wykonywaną pracą. Warto zaznaczyć, że kwestionariusz został przeprowadzony wśród pracowników zajmujących stanowiska z grup pracowników lokalnych („on-site staffs”, czyli znajdujących się bezpośrednio na miejscu wykonywanej pracy), kierownictwa lokalnego, administracji oraz kierownictwa wyższego szczebla (ostatnie dwie grupy niekoniecznie znajdowały się lokalnie w obszarze podwyższonego ryzyka). Analiza otrzymanych wyników pozwoliła autorom na wysnucie wniosków, że parametr WTA podlega rozkładowi normalnemu i przy 95% poziomie ufności wynosi 38 544 000 RMB (renminbi, waluta obowiązująca w Chińskiej Republice Ludowej zwana inaczej juanem). Rozumie się przez to, że zbadana kwota miałaby odzwierciedlać niedogodności odniesione w nieokreślonym czasie pracy (nie jako dodatek np. miesięczny lub roczny, lecz przy całościowym stażu pracy od początku kariery aż do emerytury).

Z uwagi na brak dostępnych danych z tego zakresu dla Polski przyjęto metodę przeliczenia danych uzyskanych we wspomnianej pracy [3] poprzez porównanie parametru WTA do średniej pensji w tym samym roku i wyznaczenie, jaką wielokrotność pensji stanowi współczynnik WTA, a następnie obliczenie parametru WTA dla Polski na podstawie obecnej średniej pensji. Stosując powyższą metodę zakłada się, że wartość, jaką niesie ze sobą pieniądź dla osoby w danym czasie i państwie jest skorelowana z jej pensją. Metoda ta pozwala na pominięcie analizy związanej z inflacją na przestrzeni lat w obu krajach oraz zmienności kursu walut. Zaniedbujemy więc wszelkie uwarunkowania polityczne, kulturowe i relacje międzynarodowe na rzecz skupienia się na tym, ile dla człowieka jest wart pieniądź oraz ryzyko z jakim musi się mierzyć.

W 2012 r. średnia roczna pensja wynosiła 47 593 RMB [10] co oznacza, że parametr WTA jest w zaokrągleniu 810 razy wyższy, niż średnia pensja w danym roku. Ostatnia (w momencie pisania) wartość średniej pensji w Polsce (na listopad 2020) wynosi 5484,07 zł (dane za GUS) zatem z wyliczonej zależności obecna wartość parametru WTA dla Polski wynosi 4 442 097 zł (w zaokrągleniu do pełnych złotych).

Artykuł J.K. Horowitz i K.E. McConnella [11] podaje, że średnio parametr WTA jest 7 razy wyższy, niż parametr WTP, co prowadzi do uzyskania wartości WTP równej 634 585 zł (ponownie w zaokrągleniu do pełnych złotych).

#### 4. Obliczenia wartości parametru $a$ dla modelu LNT

Do obliczenia wartości parametru  $a$  należy posiadać wiedzę na temat trzech głównych współczynników:

- średnie skrócenie życia człowieka wynikające z niekorzystnego wpływu promieniowania jonizującego (tj. śmiertelne przypadki zachorowań na raka lub czynniki dziedziczne),
- prawdopodobieństwo wystąpienia wyżej wymienionego zjawiska,
- kwota odzwierciedlająca uszczerbek na zdrowiu człowieka lub skrócenie czasu jego życia wskutek negatywnego wpływu promieniowania jonizującego

Ogólne równanie na wartość parametru jest zadane w postaci:

$$a = LPK \quad (4.1)$$

gdzie:

- $L$  – średnie skrócenie życia wynikające z wpływu promieniowania,
- $P$  – prawdopodobieństwo wystąpienia wyżej wymienionego zjawiska,
- $K$  – kwota odzwierciedlająca straty materialne związane ze skróceniem życia człowieka.

Jak wspomniano wcześniej, zgodnie z raportem Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) współczynnik  $L$  wynosi 16 lat/Sv [5]. Jest to wartość przyjęta dla modelu LNT (Linear No-Threshold), czyli liniowego bezprogowego wzrostu ryzyka radiacyjnego wraz z dawką. Prawdopodobieństwo  $P$  zależy ściśle od przyjętego tegoż modelu ryzyka radiacyjnego oraz jego parametrów. Wielkość kwoty  $K$  zależy z kolei od metody wyznaczania parametru  $a$ .

Szacując wartości parametru alfa, należy w pierwszej kolejności skupić się na używanym prawnie modelu ryzyka radiacyjnego, czyli na modelu LNT. Przypomnijmy, że model LNT – z angielskiego „linear no-threshold” – postuluje liniową zależność ryzyka powstania zmian nowotworowych spowodowanych promieniowaniem od pochłoniętej dawki. Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej (ICRP) proponuje, aby współczynnik dodatkowego ryzyka powstania zmian nowotworowych (ERR) wynosił 5%/Sv [12]. Model ten jest najprostszy w opisie oraz zastosowaniu, dlatego właśnie na nim bazują regulacje prawne dotyczące ochrony radiologicznej w wielu państwach (również w Polsce). Główną bazą modelu są badania przeprowadzone na ofiarach wybuchów bomb jądrowych w Hiroszynie i Nagasaki. Niestety badania te mają kilka wad. Po pierwsze, ofiary bombardowań otrzymały dawki w jednym krótkotrwałym impulsie przy ekstremalnie wysokiej mocy dawki, co ma się nijak do niewielkiego narażenia chronicznego spotykane-

go w ochronie radiologicznej. Po drugie, ocena dawki pochłoniętej przez badaną osobę opierała się na wywiadzie, w którym miejscu (jak daleko od strefy zero, czyli miejsca na ziemi bezpośrednio pod punktem detonacji bomby) dana osoba znajdowała się w momencie eksplozji i uwzględniała tylko promieniowanie uwolnione w momencie wybuchu, pomijając opad promieniotwórczy [13]. Metoda spowodowała powstanie znacznych niepewności pomiarowych, szczególnie w obszarze małych dawek. Daleko jest, więc tym ocenom do jakichkolwiek pomiarów dozymetrycznych, chociaż wykorzystując metody dozymetrii retrospektywnej (badania organizmu pomagające ustalić dawki pochłonięte w przeszłości, nawet lata po ekspozycji), po latach udało się nieco bardziej uwiarygodnić te dane. Po trzecie, ludność będąca poza strefą rażenia eksplozji (uznawana za grupę kontrolną), otrzymała pewne niezerowe dawki promieniowania pochodzące od opadu promieniotwórczego lub na skutek przybycia do miasta już po wybuchu. Model bazuje również na przeświadczeniu, że skoro promieniowanie jonizujące w dużych dawkach zagraża zdrowiu i życiu, to musi tak być niezależnie od dawki i powinniśmy się go jak najbardziej wystrzegać. Dlatego właśnie model LNT proponuje liniowy wzrost ryzyka nowotworu w całym zakresie dawek (nawet tych niewielkich, porównywalnych z naturalnym tłem promieniowania). Niesie to niestety za sobą wiele niezamierzonych skutków, takich jak nieuzasadnione próby zmniejszania dawek przyjętych przez pracowników przy i tak już znikomych dawkach porównywalnych z naturalnym tłem czy propagowanie radiofobii przez różne organizacje pseudoekologiczne.

Mimo wymienionych wcześniej wad modelu LNT, stanowi on podstawę współczesnej ochrony radiologicznej na całym świecie. Zakłada on liniową zależność ryzyka powstania zmian nowotworowych od dawki skutecznej, którą można opisać wzorem:

$$ERR = aE \quad (4.2)$$

gdzie:

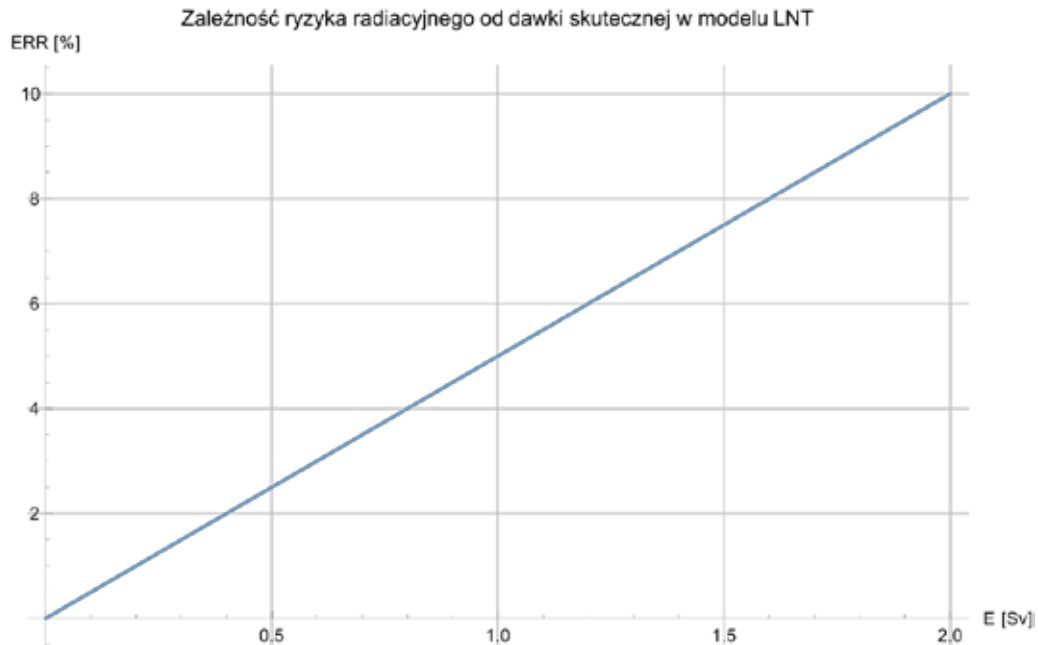
- $ERR$  – „excessive relative risk”, dodatkowe ryzyko wystąpienia zmian nowotworowych,
- $a$  – współczynnik ryzyka (nachylenie prostej),
- $E$  – dawka skuteczna.

Jak już wspomniano, sugerowana przez ICRP wartość współczynnika ryzyka wynosi 5%/Sv [12]. Poniższy wykres (rys. 5) pozwala lepiej zobrazować tę zależność.

Wyznaczone wartości parametru  $a$  dla modelu LNT obliczone przy zastosowaniu równania (4.1) dla każdej z metod przedstawiono w tabeli 3.

Widać, że otrzymane dane znacząco się różnią. O ile dla metod bazujących na PKB i odszkodowaniach różnica jest około dwukrotna, o tyle dla współczynnika WTP jest to ponad dziesięciokrotne przebicie wzglę-





**Rys. 5.** Wykres zależności ryzyka radiacyjnego w zależności od dawki skutecznej promieniowania jonizującego dla modelu liniowego bezprogowego (LNT) przy założeniu 5%/Sv

**Fig. 5.** Plot of a relationship between excess relative risk and effective dose of ionizing radiation for linear non threshold model (LNT)

**Tabela 3.** Wyznaczone wartości parametru  $\alpha$  dla modelu liniowego bezprogowego z zastosowaniem każdej z omówionych wcześniej metod

**Table 3.** Calculated values of  $\alpha$  parameter for linear non-threshold model with use of each one of the methods described earlier

Metoda wyznaczania parametru $\alpha$	Wartość parametru $\alpha$ [zł/Sv]
PKB	47 383,2
Odszkodowania	100 345,1
WTA	3 553 678
WTP	507 668

dem metody PKB, a dla współczynnika WTA wręcz siedemdziesięciopięciokrotne. Podstawą występowania takich różnic jest przede wszystkim fakt, że metody PKB i odszkodowań bazują na twardych danych określonych prawnie lub metodami statystyczno-ekonomicznymi, natomiast współczynniki WTA i WTP wynikają z ankietyzacji grupy osób z ogółu populacji, więc są danymi mocno subiektywnymi. Oczywiście wartości parametru  $\alpha$  dla WTA i WTP również podlegają pewnej statystyce, w końcu liczba ankietowanych osób była niemała i obowiązki pełnione przez badane osoby były zróżnicowane [3], jednak widać, że dominuje tutaj czynnik ludzki polegający na subiektywnej ocenie wartości zdrowia i życia ludzkiego. Drugim ważnym problemem jest to, że dane dotyczące współczynników WTA oraz WTP pochodzą z Chin, którym daleko do Europy nie tylko w znaczeniu geograficznym, ale również kulturowym i gospodarczym, więc dane te, mimo próby przeliczenia na złotówki, nie do końca mogą sprawdzić się w realiach polskiej gospodarki.

Najbardziej przekonującymi parametrami wydają się być kwoty kosztów uzyskane dla metod PKB oraz metody bazującej na odszkodowaniach. Są one zaczerpnięte bezpośrednio z danych ściśle związanych z Polską (odpowiednio dane Głównego Urzędu Statystycznego oraz obowiązujące przepisy prawne), zatem wyznaczenie parametru powinno bazować na jednej z powyższych kwot. Wielkość PKB per capita reprezentuje statystyczny (uśredniony po wszystkich obywatelach) wpływ pojedynczej osoby na gospodarkę kraju. Problem może stanowić fakt, że pracownicy ośrodków badawczych, radiolodzy, czy pracownicy elektrowni atomowych są dość specyficzną grupą, której (ze względu na swoje wyspecjalizowanie) nie powinno się określać mianem statystycznego obywatela. Wielkością, która z jednej strony jest twardo osadzona w realiach Polski, a z drugiej w razie potrzeby mogłaby podlegać pewnej personalizacji ze względu na wykonywany zawód, jest kwota uzyskana z metody odszkodowań. Dwie z trzech części są stałe dla każdego obywatela (zasilek pogrzebowy oraz jednorazowe odszkodowanie za śmierć z powodu choroby zawodowej), natomiast trzecia z nich – odprawa pośmiertna jest zależna od typu wykonywanej pracy lub piastowanego stanowiska (bezpośrednio zależy od pensji, która z kolei zależy od pracy i stanowiska). Podlega więc ona pod odpowiednie dopasowanie do charakteru planowanej inwestycji (znając planowane lub aktualne pensje pracowników na odpowiednich stanowiskach oraz ich staż pracy można z łatwością wyznaczyć wysokość potencjalnej odprawy pośmiertnej, a co za tym idzie materialnego kosztu, jaki śmierć pracownika stano-

wiaby dla przedsiębiorstwa). Wyznaczona powyżej kwota opiera się na kwocie średniej pensji krajowej, która może być zastąpiona przez dowolną inną pensję pracownika i ponownie przeliczona zgodnie z potrzebami. Jedynym zauważalnym minusem tej metody względem metody PKB jest fakt, że przepisy dotyczące odszkodowań aktualizowane są dość rzadko w porównaniu do corocznego ogłoszenia wysokości produktu krajowego brutto przez Główny Urząd Statystyczny. Fakt ten rekompensuje uwzględnienie aktualnej i rzeczywistej pensji pracownika w obliczeniach dla metody bazującej na odszkodowaniach.

Jeżeli należałoby podać jedną wartość parametru alfa, to z powodów podanych powyżej zalecałoby należyć wartość  $\alpha$  wyznaczoną na podstawie odszkodowań, czyli 100 345 zł/Sv. Porównując to z założeniami projektu demontażu belgijskiego reaktora BR3 przedstawionych w pierwszym rozdziale (zgrubne szacunki parametru  $\alpha$  wyniosły 30 €/mSv = 30 000 €/Sv, co wynosi w przybliżeniu 135 000 zł/Sv) i uwzględniając różnice gospodarcze między Belgią a Polską można stwierdzić, że dane uzyskane w pracy, co do wielkości zgadzają się z belgijskimi założeniami.

Oczywiście model LNT nie jest jedynym, który można zastosować do takich obliczeń. Przy pozostałych sprawa wyznaczania parametru  $\alpha$  nieco się komplikuje, czego najczęstszym powodem jest nieliniowość modelu. Aby ominąć ten problem można spróbować uogólnić definicję parametru  $\alpha$  i za jego wartość przyjąć koszt napromieniowania osoby nie dawką jednego siwerta, ale bardziej ogólnie – dawką o wskazanej wartości.

## 5. Przykłady zastosowania innych modeli ryzyka radiacyjnego do wyznaczania wartości parametru $\alpha$

### A. Model progowy

Model progowy, zwany też progowo-liniowym, jest modyfikacją modelu LNT. Celem tego modelu jest zachowanie prostoty oraz jednoznaczności w określaniu ryzyka powstania zmian nowotworowych w zależności od dawki, którą niesie za sobą model liniowy bezprogowy, przy jednoczesnym uniknięciu jego niezamierzonych konsekwencji. Model ten postuluje dawkę poniżej której promieniowanie jonizujące uznaje się za bezpieczne (takie, które nie powoduje dodatkowego ryzyka powstania zmian nowotworowych). Pozwala to na uniknięcie rozważań nad wprowadzaniem ochrony radiologicznej w sytuacjach, gdy dawka jest nieznaczna (nie przekracza progu) oraz pokazuje opinii publicznej, że zjawisko promieniowania jonizującego jest czymś naturalnym i niegroźnym, oczywiście w pewnych granicach.

Najprościej jest przedstawić zależność ryzyka radiacyjnego od dawki skutecznej przy użyciu układu równań:

$$ERR = \begin{cases} 0 & \text{dla } E < t \\ a(E - t) & \text{dla } E \geq t \end{cases} \quad (4.4)$$

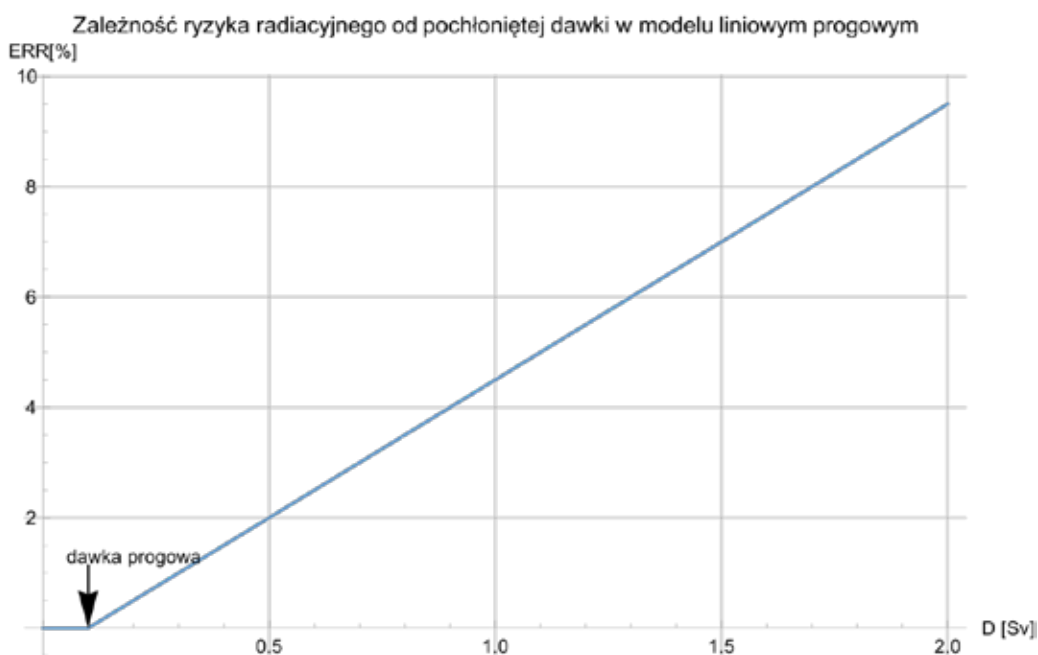
gdzie:

ERR – „excessive relative risk”, dodatkowe ryzyko wystąpienia zmian nowotworowych

$a$  – współczynnik ryzyka (nachylenie prostej nad progiem)

$E$  – dawka skuteczna

$t$  – wartość progu



**Rys. 6.** Wykres zależności ryzyka radiacyjnego w zależności od dawki skutecznej promieniowania jonizującego dla modelu progowego  
**Fig. 6.** Plot of a relationship between excess relative risk and effective dose of ionizing radiation for threshold model

Ponownie wartość współczynnika ryzyka przyjęto jako 5%/Sv [12]. Za wartość progę uznano granicę małych dawek przedstawioną w raporcie kanadyjskiej Narodowej Rady Badań Naukowych (NRC) BEIR VII [14], gdzie podano wartość granicy jako 100 mSv dla promieniowania o niskim LET. LET (z ang. „linear energy transfer” czyli liniowy przekaz energii) opisuje ilość energii jaką cząstka lub foton promieniowania jonizującego przekazuje do otoczenia w pewnej jednostce odległości. Fotony z reguły posiadają niski współczynnik LET, natomiast cząstki alfa lub fragmenty rozszczepień jąder atomowych posiadają wysoki współczynnik LET. Zależność ryzyka radiacyjnego w powyższym modelu ponownie najłatwiej zobrazować wykresem (rys. 6).

Wartości parametru dla tego modelu są identyczne, jak dla modelu LNT (podane w tabeli 3) z jednym bardzo ważnym zastrzeżeniem. Wartości te obowiązują dopiero po przekroczeniu dawki progowej 0,1 Sv i są obliczane za każdy siwert ponad tą dawkę.

### B. Model hormetyczny

Model hormetyczny bazuje na dwóch współczynnikach. Pierwszym z nich jest tzw. PROFAC (skrót od „protection factor”, czyli współczynnik ochrony) opisujący potencjalną redukcję zachorowań na choroby nowotworowe występującą przy danej dawce promieniowania względem grupy kontrolnej wystawionej na hipotetycznie zerowe dawki promieniowania jonizującego. Za wartość PROFAC w modelu hormetycznym uznaje się minimum funkcji ryzyka (wartość odpowiadająca dawce, dla której osiągnane jest maksimum efek-

tu hormezy radiacyjnej). Drugim z nich jest współczynnik NOAEL (ang. „No Observed Adverse Effect Level”). Jest to najwyższy poziom dawki, dla której nie obserwujemy żadnych efektów negatywnych związanych z działaniem promieniowania jonizującego na ciało ludzkie. Współczynnik ten można uznać za odpowiednik progę w modelu progowym.

Jako matematyczny model przedstawiający zależność hormetyczną przyjęto:

$$ERR = \begin{cases} \alpha x^2 - bx & \text{dla } E < \text{NOAEL} \\ a_2(E - \text{NOAEL}) & \text{dla } E \geq \text{NOAEL} \end{cases} \quad (4.7)$$

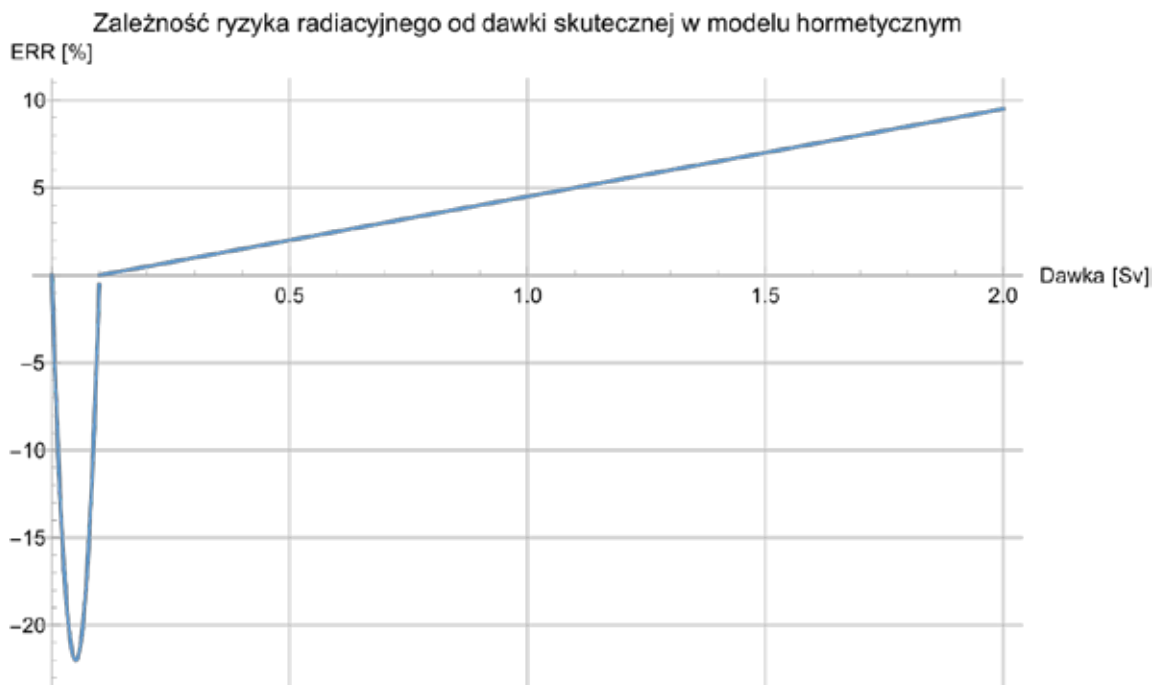
gdzie:

$ERR$  – „excessive relative risk”, dodatkowe ryzyko wystąpienia zmian nowotworowych,  
 $a$ ,  $a_2$ ,  $b$  – współczynniki modelu,  
 $E$  – dawka skuteczna.

Takie podejście pozwala na zamodelowanie efektu hormetycznego oraz zapewnia zgodność wartości ryzyka radiacyjnego z pozostałymi modelami w obszarze wysokich dawek.

Wartość PROFAC przyjęto jako 22%. Wartość ta jest podana w pracy [15], jako potencjalna redukcja śmiertelności wśród pracowników stoczni wystawionych chronicznie na niskie dawki promieniowania. Współczynnik NOAEL ustalono na 0,1 Sv dla zgodności z modelem progowym i podaną w raporcie BEIR VII [14] granicą niskich dawek.

Dla dawek powyżej 0,1 Sv, analogicznie jak w pozostałych modelach, wartość współczynnika  $a_2$  ustalono



**Rys. 7.** Wykres zależności współczynnika ryzyka radiacyjnego od dawki dla modelu hormetycznego. Widoczna jest znaczna dysproporcja pomiędzy zakresem hormetycznym a zakresem dawek większych, co jest to związane z przyjętymi standardowymi parametrami modelu  
**Fig. 7.** Plot of a relationship between excess relative risk and effective dose of ionizing radiation for hormetic model. Significant disproportion can be seen between the hormetic range and the higher dose range, however it is caused by assumed standard model parameters

**Tabela 4.** Wartości współczynnika ERR i odpowiadające im wartości parametru  $\alpha$  wyznaczonego różnymi metodami dla przykładowych dawek w modelu hormetycznym.**Table 4.** Values of excess relative risk with corresponding values of a parameter calculated with a use of different methods for example values of doses for hormetic model.

Dawka skuteczna [Sv]	ERR [%]	$\alpha$ – PKB [zł]	$\alpha$ – odszkodowania [zł]	$\alpha$ – WTA [zł]	$\alpha$ – WTP [zł]
0,01	-7,92	-11 727	-24 835	-879 535	-125 648
0,03	-18,48	-27 364	-57 949	-2 052 249	-293 178
0,05	-22,00	-32 576	-68 987	-2 443 153	-349 022
0,08	-14,08	-20 849	-44 152	-1 563 618	-223 374
0,09	-7,92	-11 727	-24 835	-879 535	-125 648
0,1	0,00	0	0	0	0
0,2	0,5	4 738	10 035	355 368	50 767
0,3	1	9 477	20 069	710 736	101 534
0,5	2	18 953	40 138	1 421 470	203 067
0,8	3,5	33 168	70 241	2 457 570	355 368
1	4,5	42 645	90 310	3 198 310	456 901
1,2	5,5	52 122	110 379	3 909 050	558 435
1,5	7	66 337	140 483	4 975 150	710 735
1,8	8,5	80 551	170 586	6 041 250	863 036
2	9,5	90 028	190 655	6 751 990	964 569

na 5%/Sv. W przypadku przedziału niskich dawek wartości współczynników wynoszą

$$a = 8800 \frac{1}{Sv^2} \quad \text{oraz} \quad b = 880 \frac{1}{Sv}$$

Dobór paraboli jako funkcji ryzyka poniżej NOAEL jest motywowany faktem, że jest to najbardziej podstawowa funkcja, której parametry można jednoznacznie określić na podstawie znajomości trzech punktów (w tym PROFAC) przez które funkcja ma przechodzić.

Znając podaną wartość współczynnika PROFAC równą 22% oraz założenia wzrostu ryzyka radiacyjnego w modelu LNT wysokości 5%/Sv można zauważyć znaczącą różnicę między negatywnym wpływem promieniowania założonym w modelu liniowym a pozytywnym wpływem niskich dawek promieniowania w modelu hormetycznym. Wykres przedstawiony na rys. 7 dopiero obrazuje, jak znaczna jest dysproporcja pomiędzy ryzykiem dla dawek niskich (poniżej NOAEL) a wysokich, co jest niepokojące i zmusza do zastanowienia się nad poprawnością takiej zależności.

Podchodząc do tego od strony matematycznej: założona ujemna wartość ryzyka oznacza zmniejszoną zapadalność na różnorakie choroby (głównie nowotwory, lecz nie tylko [15]), co może prowadzić do wzrostu średniej długości życia ludzkiego średnio o 2,5 roku

[16] oraz komfortu życia. Może to mieć również wpływ na obciążenie systemu opieki zdrowotnej danego kraju lub firmy (mniej chorujących osób prowadzi do mniejszych wydatków na opiekę zdrowotną nad nimi) oraz systemu ubezpieczeń zdrowotnych (ponownie mniej chorób oznacza mniej wypłacanych odszkodowań). Ujemny współczynnik ERR prowadzi do uzyskania mniejszej od zera wartości współczynnika  $\alpha$ , czyli uzyskania ujemnych kosztów – materialnego zysku wynikającego z korzyści opisanych powyżej. Są to teoretyczne konsekwencje tak przyjętego modelu.

Z uwagi na wyniki opisane w pracy E. David'a et al. [16], w obszarze dawek poniżej NOAEL przyjęto w równaniu (4.1) współczynnik  $L = -2,5$  roku. W tym przypadku współczynnik powinno się nazwać „średnim wydłużeniem [nie skróceniem] życia wynikającym z wpływu promieniowania”. Powyżej dawki NOAEL przyjmuje się wartość współczynnika  $L = 16$  lat, identycznie jak w modelu LNT. Tak jak w przypadku poprzednich dwóch modeli, w tabeli 4 przedstawiono wartości współczynnika ryzyka radiacyjnego dla przykładowych wartości dawek oraz odpowiadające im wartości współczynnika  $\alpha$  z uwzględnieniem uwagi o wydłużeniu średniej długości życia człowieka w obszarze niskich dawek [16], czyli zmianę wartości parametru  $L$  w zależności od uwzględnianego przedziału dawek.

## Podsumowanie

Istnieje wiele metod wyznaczania parametru  $a$  w ochronie radiologicznej, każda bazująca na innych danych, często bardzo różnych od siebie. Prowadzi to do dyskusji, którą wartość parametru można uznać za najbardziej wiarygodną i jaki model ryzyka radiacyjnego przyjąć przy optymalizacji ochrony radiologicznej. Z rozważanych w artykule metod jedna przejawia największy potencjał do stosowania w praktyce: z uwagi na możliwość dopasowania wyliczeń kosztów do konkretnego ośrodka badawczego lub przedsiębiorstwa, jest nią metoda bazująca na państwowo regulowanych odszkodowaniach. Inną ważną kwestią, nad którą warto się zastanowić to, jaki model ryzyka radiacyjnego uwzględnić przy obliczeniach. Model liniowy bezprogowy stanowi normę, którą należy prawnie stosować w ochronie radiologicznej, lecz widać, że przy zastosowaniu innych modeli niż LNT rozkład wartości parametru  $a$  jest korzystniejszy w zakresie niskich dawek. Niezależnie od dyskusji nad słusnością danego modelu należy podkreślić, iż oszacowany dla Polski parametr alfa wynosi ok. 100 000 zł/Sv. W przypadku modelu LNT i obowiązujących przepisów prawnych stosuje się go do całego zakresu dawek. W przypadku innych modeli niż LNT, parametr ten jest także słuszny, ale jedynie dla dawek powyżej 100 mSv.

*Niniejszy artykuł powstał na bazie pracy inżynierskiej inż. Ernesta Bugały napisanej na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod opieką dr. inż. Krzysztofa Fornalskiego.*

*Serdeczne podziękowania dla Pani prof. dr hab. Katarzyny Grebieszko z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej za pomoc oraz uwagi edycyjne przy tworzeniu wspomnianej pracy inżynierskiej.*

*Ernest Bugała,  
Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska*

*Krzysztof W. Fornalski,  
Narodowe Centrum Badań Jądrowych oraz PEJ sp. z o.o.  
\* krzysztof.fornalski@ncbj.gov.pl*

## Literatura:

- [1] Ustawa Prawo atomowe z dnia 29 listopada 2000 r., (z późn. zmianami).
- [2] Vermeersch F.: Materiały i prezentacje SCK CEN (belgijskie centrum badań jądrowych) oraz materiały dotyczące SCK CEN udostępnione przez K.W. Fornalskiego.
- [3] Linsheng J., Yapeng Y., Zongyang F., Xiaoxiao X. oraz Jiangang Z.: The latest estimation for the parameter value of radiation protection optimization in China, Progress in Nuclear Science and Technology V.6 2019, 175-180.
- [4] Dane opublikowane przez Główny Urząd Statystyczny: <https://stat.gov.pl/podstawowe-dane/>, dostęp: 9/01/2021.
- [5] Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (IAEA): Optimization of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure, Safety Reports Series no. 21, 2002.
- [6] Ustawa Kodeks pracy z dnia 26 czerwca 1974 r., Dziennik Ustaw 2020, poz. 1320.
- [7] Ustawa o emeryturach i rentach z Funduszu Ubezpieczeń Społecznych z dnia 17 grudnia 1998 r., Dziennik Ustaw 2020, poz. 53, 252, 568, 1222, 1578.
- [8] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 czerwca 2009 r. w sprawie chorób zawodowych, Dziennik Ustaw 2013, poz. 1367.
- [9] Obwieszczenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 3 marca 2020 r., Monitor Polski 13 marca 2020 r. poz. 279.
- [10] China National Bureau of Statistics: China Statistical Yearbook 2013, 2013.
- [11] Horowitz J.K., McConnell K.E.: A review of WTA/WTP studies, Journal of Environmental Economics and Management, vol. 44, issue 3, 426-447, 2002.
- [12] Publikacja Międzynarodowej Komisji Ochrony Radiologicznej (ICRP): ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 2007 r.
- [13] Sutou S.: Black rain in Hiroshima: a critique to the Life Span Study of A-bomb survivors, basis of the linear no-threshold model, Genes Environ 42:1, 2020.
- [14] National Research Council: Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2, 2006.
- [15] Sanders C.L.: Radiobiology and Radiation Hormesis, New Evidence and its Implications for Medicine and Society, Loveland, Colorado, USA, Springer, 2017.
- [16] David E., Wolfson M., Fraifeld V.E.: Background radiation impacts human longevity and cancer mortality: reconsidering the linear no-threshold paradigm, Biogerontology, 22(2), 189-195, 2021.