

J. J. Raičević, M. Merkle,* M. M. Ninković

Institut za nuklearne nauke "Vinča"

** Elektrotehnički fakultet Beograd*

KOEFICIJENTI RIZIKA OD UNETE AKTIVNOSTI ZA GENERACIJE ŽIVE U TRENUTKU AKCIDENTA

ACTIVITY RISK COEFFICIENTS FOR LIVING GENERATIONS

Rezime: U radu je prikazan novi model za koeficijente rizika od unete aktivnosti, na osnovu kojih se procenjuju stohastički efekti ozračivanja malim dozama zračenja. Kao primer izračunavanja prikazan je jednostavni slučaj spoljašnjeg ozračivanja iz radioaktivnog oblaka.

Abstract: This paper deals with the new concept of the Activity Risk Coefficients, ARCs, which are in PRA computer codes used for the calculation of the late stochastic effects due to low doses exposure. As an example, ARC expression for the Cloudshine is derived.

1. Uvod

Poslednjih godina ponovo se javio veliki interes za realističnim procenama efekata ozračivanja, naročito onih koji dolaze od malih doza zračenja, jer se njima izlaže veliki deo ljudske populacije. Pošto su stari konzervativni i deterministički pristup zamenjeni novijim, tzv. probabilističkim pristupom, tzv. PRA (Probabilistic Risk Assessment) metodom, kao i uvođenjem tzv. Health Effects modela, došlo se do potrebe da se efekti ozračivanja kvantifikuju na način koji bi se najlakše mogao verifikovati – njihovim brojem. Tako su prvobitne procene koncentracija, a zatim i doza zračenja zamenjene procenama efekata koje oni izazivaju – dakle brojem određenih obolenja, odn. brojem smrtnih slučajeva ukoliko se radi o letalnim ishodima.

Danas u svetu postoji nekoliko programskih sistema zasnovanih na PRA metodologiji, koji izmedju ostalog vrše i procenu broja nastalih efekata. To su izmedju ostalih pre svega CRAC2, MACCS i COSYMA. COSYMA [1] je evropski programski sistem za procenu efekata od nuklearnih udesa, i predstavlja do sada najsavremeniji programski paket. Opis samog

sistema izlazi iz okvira ovog rada – u njemu će biti samo ukratko prikazan deo modela na osnovu koga se dobijaju koeficijenti rizika od unete radioaktivnosti, ARCs (Activity Risk Coefficients) za generacije žive u trenutku akcidenta, odnosno povratka na staro stanje, kojima će biti zamenjeni koeficijenti koji se trenutno koriste u evropskom programskom sistemu za procenu posledica od nuklearnog udesa COSYMA. Pri tome će biti posmatrani samo samo somatski stohastički efekti ozračivanja od malih doza zračenja, na koje se koeficijenti rizika i odnose. Zbog obima je deo koji se odnosi na genetske efekte izostavljen, mada je metodologija proračuna gotovo identična.

Ideja za konstruisanjem koeficijenata rizika od unete radioaktivnosti nastala je u ranoj fazi izrade nemačke studije rizika [2]. Na kraju lanca izračunavanja u programima koji na osnovu probabilističkih metoda dolaze do procena odgovarajućih efekata, u programskom sistemu COSYMA izračunavaju se efekti nastali usled akcidentalnog izlaganja radioaktivnom materijalu. Da bi se učinili nezavisnim od količine i vrste radioaktivnog materijala ovi koeficijenti su računati po jediničnoj koncentraciji, te se stoga mogu nezavisno od programskog sistema unapred izračunati i memorisati, da bi se kasnije prosto množenjem sa stvarnom koncentracijom i veličinom izložene populacije dobio broj odgovarajućih efekata.

ARC-ovi omogućavaju između ostalog: a) procenu vremenske zavisnosti broja nastradalih u populaciji, b) procenu uticaja parametara koji definišu sistem zaštitnih mera, c) omogućavaju procenu prostorne raspodele efekata u odnosu na mesto akcidenta.

2. Koeficijenti rizika od unete aktivnosti

Posmatrajmo sledeći scenario. Nakon akcidenta, i određenog perioda trajanja zaštitnih mera (ukoliko su bile primenjene), ugrožena populacija se vraća svojim uobičajenim aktivnostima. U zavisnosti od načina potencijalnog izlaganja, to znači da su ponovo izloženi (dozvoljenim) nivoima zračenja. Postavimo početak vremenske skale u taj trenutak (vraćanja na staro stanje). Ovo takodje znači da je početak vremenske skale različit za različite puteve izlaganja, jer se za njih i definišu različite kontra mere. Naravno, ukoliko nije bilo nikakvih zaštitnih mera, početak vremenske skale poklapa se sa trenutkom akcidenta.

Fiksirajmo populaciju koja se zadesila u početnom trenutku, i nazovimo je LG – ‘živuća generacija’. Takodje, sve rodjene nakon $t = 0$ nazvaćemo FG – ‘sledeće generacije’. Početna pretpostavka je da je ukupna populacija konstantna, i ona ostaje konstantna tokom celog perioda posmatranja. Mejutim, ‘fiksirana’ LG populacija će se usled prirodnih procesa umiranja stalno smanjivati, sve do trenutka $t = l_m$ gde je l_m maksimalna vrednost očekivane dužine života u posmatranoj populaciji, kada više neće biti ni jedne osobe iz populacije LG. Označimo sa $p(t)$ gustinu raspodele verovatnoće za t , gde je t očekivano trajanje života za novorodjene, tako da je

$$\int_0^{l_m} p(t) dt = 1 \quad (1)$$

Srednje očekivano trajanje života za novorođene je

$$L_0 = \int_0^{t_m} t p(t) dt \quad (2)$$

Za slučaj LG generacija, posmatraju se spoljašnje ozračenje od prolazaceg radioaktivnog oblaka CL (Cloudshine), spoljašnje zračenje usled radioaktivnog materijala nataloženog na tlu GR (Groundshine), unutrašnje ozračivanje putem inhalacije materijala koji se kreće zajedno sa radioaktivnim oblakom IH (Inhalation), unutrašnje ozračivanje usled inhalacije radioaktivnog materijala nataloženog na tlu IR (Inhalation after resuspension) i unutrašnje ozračivanje usled konzumiranja kontaminirane hrane IG (Ingestion). U ovom odeljku prikazaćemo generalni izraz za koeficijente rizika, pod pretpostavkom najslabijeg slučaja kontinuiranog unutrašnjeg ozračivanja. U svakom od navedenih slučajeva opšti izraz se redukuje (osim u slučaju IR i IG), što će radi ilustracije biti na kraju prikazano na slučaju CL.

Pretpostavimo takodje sledeći vremenski scenario. Nakon povratka na staro stanje, posmatrana individua je u trenutku t_i inkorporirala na određenom putu izlaganja, određenu količinu radioaktivnog materijala.¹ Nakon inkorporacije u t_i , došlo je do ozračenja u trenutku t_b . Od trenutka t_b , individua je izložena radijacionom riziku zbog čega će u trenutku t_s doći do mogućeg (letalnog) efekta. Pri tome je starost posmatrane individue u trenutku $t = 0$ iznosila a godina, u trenutku inkorporacije $a_i = a + t_i$ godina, u trenutku ozračenja $a_b = a + t_b$ godina, i u trenutku manifestacije posmatranog efekta $a_s = a + t_s$ godina.

Osnovna veličina oko koje je zasnovan model je $s(t_s - t_b, a_b)$, verovatnoća pojavljivanja² letalnog efekta do trenutka t_s , ukoliko je u trenutku t_b osoba koja je tada imala a_b godina ozračena sa jedinicom doze. Tada

$$\int_{t_b}^t \dot{s}(t_s - t_b, a_b) dt_s \quad (3)$$

predstavlja deo populacije koji je u trenutku t_b ozračen sa jedinicom doze i koji će usled tog ozračivanja umreti do trenutka t . Primetimo da u trenutku t_b mogući raspon starosti iz LG populacije leži u intervalu $a_b \in (t_b, t_m)$, jer ukoliko je starost neke osobe u trenutku t_b manja od t_b , tada je osoba rođena posle $t = 0$, i ne pripada populaciji LG već FG, saglasno ranije uvedenoj konvenciji. Deo osoba koje u (opadajućoj) LG populaciji ima starost u intervalu $(a_b, a_b + da_b)$ iznosi

$$\frac{P}{L_0} \int_{a_b}^{t_m} dl p(l) da_b \quad (4)$$

gde je P početna veličina populacije LG. Na osnovu (3) i (4) dobija se

$$\frac{P}{L_0} \int_{a_b}^{t_m} dl p(l) \int_{t_b}^t dt_s \dot{s}(t_s - t_b, a_b) da_b \quad (5)$$

¹ Način inkorporacije, odnosno 'unošenja' u organizam ozračene individue može biti različit, što zavisi od načina, odnosno puta izlaganja.

² Od sada pa nadalje pod efektom ozračivanja podrazumevaćemo letalni efekat. Naravno, to ne mora biti slučaj.

kao broj osoba iz početne populacije sa starošću između $(a_b, a_b + da_b)$, koji će zbog ozračivanja u t_b sa jedinicom doze, umreti do trenutka t . Do ozračivanja u trenutku t_b dolazi usled inkorporacije radiouklida u trenutku t_i . Ukoliko sa $g(t_b - t_i, a_b)$ označimo vremenski i starosno zavisni dozni konverzioni faktor, u vremenskom intervalu $(t_b, t_b + dt_b)$, posmatrane osobe će primiti dozu

$$\dot{g}(t_b - t_i, a_b) dt_b \quad (6)$$

usled inkorporacije jedinične aktivnosti u t_i . Kako (5) ustvari definiše broj nastradalih po jediničnoj dozi, to množenjem ovog izraza sa primljenom dozom (6) dobijamo

$$\frac{P}{L_0} \dot{g}(t_b - t_i, a_b) \int_{a_b}^{t_m} dl p(l) \int_{t_b}^t dt_s \dot{s}(t_s - t_b, a_b) da_b dt_b \quad (7)$$

broj osoba koje će do posmatranog trenutka t umreti usled inkorporacije u trenutku t_i i ozračivanja u intervalu $(t_b, t_b + dt_b)$, kada su imale starost u intervalu $(a_b, a_b + da_b)$. U trenutku t_b mi posmatramo sve osobe iz generacije LG, što znači da je potrebno sumirati po svim mogućim a_b , što daje

$$\frac{P}{L_0} \int_{t_b}^{t_m} da_b \dot{g}(t_b - t_i, a_b) \int_{a_b}^{t_m} dl p(l) \int_{t_b}^t dt_s \dot{s}(t_s - t_b, a_b) dt_b \quad (8)$$

Sumiranjem po svim mogućim trenucima ozračenja t_b ($t_b \in (t_i, t)$), dobija se

$$\frac{P}{L_0} \int_{t_i}^t dt_b \int_{t_b}^{t_m} da_b \dot{g}(t_b - t_i, a_b) \int_{a_b}^{t_m} dl p(l) \int_{t_b}^t dt_s \dot{s}(t_s - t_b, a_b) \quad (9)$$

ukupan broj osoba iz početne populacije koji će usled inkorporacije jedinične aktivnosti u t_i umreti do trenutka posmatranja t . Inkorporacija zavisi od određenog puta izlaganja, i može biti trenutna, ili pak kontinuirana tokom celog perioda posmatranja. Označimo sa $\varphi_i(t_i)$ gustinu raspodele verovatnoće mogućih trenutaka inkorporacije t_i , tako da je

$$\int_0^t \varphi_i(t_i) dt_i = 1 \quad (10)$$

Tada je ukupan broj nastradalih do trenutka t usled inkorporacije jedinične aktivnosti do tog trenutka

$$\begin{aligned} N(t) &= \frac{P}{L_0} \int_0^t dt_i \varphi_i(t_i) \int_{t_i}^t dt_b \int_{t_b}^{t_m} da_b \dot{g}(t_b - t_i, a_b) \int_{a_b}^{t_m} dl p(l) \int_{t_b}^t dt_s \dot{s}(t_s - t_b, a_b) \\ &= P LARC(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Veličina $LARC(t)$

$$\begin{aligned} LARC(t) &= \frac{1}{L_0} \int_0^t dt_i \varphi_i(t_i) \int_{t_i}^t dt_b \int_{t_b}^{t_m} da_b \dot{g}(t_b - t_i, a_b) \\ &\quad \times \int_{a_b}^{t_m} dl p(l) \int_{t_b}^t dt_s \dot{s}(t_s - t_b, a_b) \end{aligned} \quad (12)$$

se naziva koeficijent rizika od unete aktivnosti (Activity Risk Coefficient) za generacije koje su se zatekle žive u trenutku početka izlaganja (odnosno rođene pre ukidanja zaštitnih mera). Kao što je već pomenuto, broj nastradalih dobija se množenjem aktuelne koncentracije na definisanom putu izlaganja sa veličinom $N(t)$. Preko koncentracije sa kojom se množi izraz (11), ukupan broj nastradalih indirektno zavisi i od primenjenih zaštitnih mera (ukoliko su bile primenjene), jer koncentracija radionuklida na određenom mestu zavisi od celokupnog vremenskog intervala, uključujući i period trajanja zaštitnih mera.

Broj nastradalih svakako zavisi od procesa, odnosno načina izlaganja, određenog radionuklida kao i organa mete za koji je definisana veličina $s(\tau, a)$. Na taj način $LARC(t)$ predstavlja višedimenzionalnu matricu, ali su zbog jednostavnosti prikazanog izraza pomenute zavisnosti izostavljene.

3. Slučaj spoljašnjeg ozračivanja od radioaktivnog oblaka

Za jedan od najprostijih primera sa stanovišta izračunavanja u ovom odeljku će kao primer biti prikazan slučaj izračunavanja koeficijenta rizika od unete aktivnosti $LARC(t)$ za slučaj spoljašnjeg ozračivanja iz (prolazećeg) radioaktivnog oblaka CL (Cloudshine). Kako ovaj vid ozračivanja predstavlja jednokratno, odnosno trenutno ozračivanje, to se gustina raspodele po t_i može predstaviti impulsnom funkcijom

$$\varphi(t_i) = \delta(t_i) \quad (13)$$

gde je $\delta(t_i)$ Dirakova delta funkcija. Kako je CL spoljašnje ozračivanje, ne postoji vremenska razlika između inkorporacije i ozračivanja, pa se i diferencijalni dozni konverzioni faktor može predstaviti u obliku

$$g_{cl}(t_b - t_i, a_b) = g_{cl} \delta(t_b - t_i) K(a_b) \quad (14)$$

gde je $K(a_b)$ korektivna funkcija za starost u trenutku ozračivanja u slučaju spoljašnjeg zračenja. Uvodeći gornje izraze u (12) dobija se

$$LARC_{cl}(t) = \frac{g_{cl}}{L_0} \int_0^{l_m} da K(a) \int_a^{l_m} dl p(l) \int_0^t d\tau s(\tau, a) \quad (15)$$

Izraz (15) je moguće dobiti i iz pristupa koji je trenutno implementiran u COSYMA-i. Međutim, to je kao najprostiji slučaj i jedini koji je tačan. Rezultati dobijeni za ostale puteve izlaganja se razlikuju, ali zbog svog obima izlaze iz obima ovog rada.

4. Zaključak

U ovom radu je prikazan novi model za izračunavanje koeficijenata rizika od unete aktivnosti. Model koji je ranije korišćen u UFOMOD-u [3], a zatim u COSYMA-i u originalnom obliku se može prikazati kao

$$\begin{aligned}
 ARC(t, t_0) = & \frac{1}{L_0} \int_0^{t_{max}} da \int_{a+t_0}^{t_{max}} dt \int_{t_0}^{\min(t, l-a)} dt_i \int_{t_i}^{\min(t, l-a)} dt_b \\
 & \times \int_0^{\min(t, l-a)-t_b} d\tau \dot{s}(\tau, a+t_b) \dot{g}(t_b-t_i, a+t_i) \dot{u}(t_i, a) p(l) \quad (16)
 \end{aligned}$$

gde parametar t_0 definiše dužinu trajanja zaštitnih mera, a funkcija $\dot{u}(t_i, a)$ ima uloge ranije navedene funkcije $\varphi(t_i)$ iz (12). Novi pristup ARC-ovima pokazuje njihovu invarijantnost u odnosu na parametar t_0 , što ustvari smanjuje dimenzije ARC matrice. Ovaj izraz se može posle lakih integralnih transformacija svesti na oblik

$$\begin{aligned}
 ARC(t, t_0) = & \frac{1}{L_0} \int_{t_0}^t dt_i \int_0^{t_{max}} da \int_{t_i}^t dt_b \int_0^{t-t_b} d\tau \int_{a+t_b+\tau}^{t_{max}} dl \\
 & \times p(l) \dot{s}(\tau, a+t_b) \dot{g}(t_b-t_i, a+t_i) \dot{u}(t_i, a) \quad (17)
 \end{aligned}$$

Poredjenjem izraza (12) i (17) (za potrebe poredjenja može se pretpostaviti odsudstvo zaštitnih mera, dakle $t_0 = 0$) može se videti da se, pre svega zbog pogrešnog usrednjavanja po populacionim parametrima, na osnovu (17) dobijaju precenjene vrednosti efekata (osim za prikazani slučaj CL). Treba reći da novi pristup, prikazan sa (12) na jedinstven način izračunava ARC-ove, što inače nije slučaj sa pomenutim programskim sistemima, gde se trenutno za svaki put izlaganja daje poseban model za izračunavanje ARC-ova. Zbog izuzetno velikog računskog vremena i memorijskog prostora konačni ARC proračuni će biti izvršeni u Institutu u Karlsruhe-u, sa kojim se odvija tesna saradnja.

5. Literatura

- [1] COSYMA User Guide, Commission of the European Communities, EUR 13045, KfK 4331B, February 1991.
- [2] A. Bayer, et al. German Risk Study, Accident Consequence Model and the results of the study, Nuclear Technology, 59 (1982), 20-50.
- [3] J. Ehrhardt, et al. The Program System UFOMOD for Assessing the Consequences of Nuclear Accidents, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK Report 4330, October 1988.