



DOZIMETRIJA U INTERVENCIJSKOJ RADIOLOGIJI – PROCJENA EFEKTIVNE DOZE

*Saveta Miljanić¹, Nico Bols², Peter Clerinx², Hannu Jarvinen³,
Denisa Nikodemová⁴, Maria Ranogajec-Komor¹ i Francesco d'Errico⁵*

¹Institut "Ruđer Bošković", Bijenička c. 54, 10000 Zagreb, Hrvatska

²UZ Brussels, Department of Radiology, Laarbeeklaan 101,
B-1090 Brussels, Belgium

³Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), P.O.Box 14,
FIN-00881 Helsinki, Finland

⁴Slovak Medical University, Limbová 14, Bratislava, Slovakia, 83303

⁵Università degli Studi di Pisa, Pisa, Italy and Yale University,
New Haven, CT USA

e-mail: saveta@irb.hr

UVOD

U postupcima intervencijske radiologije pacijenti i osoblje mogu primiti značajne doze. Doze koje prima osoblje mjere se osobnim dozimetrima i treba ih iskazati kao efektivne doze [1,2].

Mjerenje osobnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$ jednim dozimetrom koji se nalazi nepokriven iznad olovne pregače može dovesti do znatnog precjenjivanja efektivne doze, dok mjerenje s dozimetrom ispod pregače može voditi podcjenjivanju. U cilju postizavanja veće točnosti preporučuje se mjerenje doza s dva dozimetra, jednim iznad, a drugim ispod pregače ("double dosimetry" odnosno "dvostruka dozimetrija"). Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (International Commission on Radiological Protection, ICRP) preporučuje da odjeli intervencijske radiologije uvedu praksu nošenja dva dozimetra [3].

U okviru EURADOS-a osnovana je Radna grupa 9 ("Radiation protection dosimetry of medical staff" – zaštita od zračenja medicinskog osoblja) projekta CONRAD koji je koordinirana aktivnost koju podržava Europska komisija unutar svojeg 6. okvirnog programa [4]. Cilj radne grupe je analizirati i testirati eksperimentalno i računski algoritme koji se upotrebljavaju za određivanje efektivne doze u postupcima u intervencijskoj radiologiji. Rezultati će se upotrijebiti za donošenje općih smjernica za osobnu dozimetriju u tim postupcima.

Dosadašnji rezultati publicirani su u radu u kojem je dan pregled prakse dozimetrije u intervencijskoj radiologiji zemalja koje su sudjelovale na ovom projektu, te rezultati širokog literaturnog pregleda o algoritmima koji se koriste

za određivanje efektivne doze. Točnost odabranih najnovijih algoritama ispitana je računom koji se osniva na do sada objavljenim studijama [5]. U ovom radu daje se literaturni pregled algoritama za određivanje efektivne doze kao i računsko testiranje odabranih novijih algoritama.

ALGORITMI ZA RAČUNANJE EFEKTIVNE DOZE

Pregled literature obuhvatio je oko 140 publikacija s ukupno 14 različitih algoritama koji su sumirani u Tablici 1.

Rani algoritmi koji su uzimali u obzir dvostruku dozimetriju [6-8], osnivaju se na određivanju "ekvivalenta efektivne doze" (*EDE*) definiranim u ICRP Publikaciji 26 [9]. Zaštita štitnjače nije razmatrana.

Instruktivan primjer kako je određen utjecaj nošenja pregače na *EDE* i postupak određivanja algoritma dan je u referenci [6]. Autori su pretpostavili jednolično polje zračenja, te da pregača štiti trup ostavljajući izloženima glavu, vrat, ruke i noge. Dalje su pretpostavili da je dozni ekvivalent u zaštićenim organima H_u (doza mjerena ispod pregače), a za nezaštićene organe H_o (doza mjerena iznad pregače). Težinske faktore za određene organe, w_T , uzeli su iz ICRP Publikaciji 26 [9]. U opisanoj situaciji gonade, prsa i pluća su zaštićeni dok je štitnjača nezaštićena. Analizirali su zaštićene i nezaštićene organe zajedno s njihovim težinskim faktorima i iz tih razmatranja proizašao je izraz u prvom retku Tablice 1.

1991. g. ICRP Publikacija 60 [10] izdaje novi set težinskih faktora, a naziv "ekvivalenta efektivne doze" zamijenjen je nazivom "efektivna doza" (*E*). (Najnoviji težinski faktori dani su u ref. [11].) Nakon 1991. slijede algoritmi: Wambersie i Delhove, 1993. [12] uvode konzervativan algoritam osnovan na mjerenju doza sa dva dozimetra. Rosenstein i Webster, 1994 [13] za svoj algoritam koriste eksperimentalne podatke dane u radu Faulknera i Marshalla, 1993. [14]. Huyskens i suradnici, 1994 [15]. definiraju dva korekcijska faktora, djelitelj (*D*) i množitelj (*M*). Djelitelj je broj s kojim se očitavanje dozimetra iznad pregače treba dijeliti da bi se dobila efektivna doza, a množitelj je broj kojim se očitavanje dozimetra ispod pregače treba množiti da bi se dobila efektivna doza. Za fluoroskopsku intervencijsku praksu, oni predlažu $D=5$ i $M=3$ (Tablica 1). Na osnovi radova publiciranih do 1993, NCRP Report No. 122 [16] za izračunavanje *E* preporučuje $D=21$ u slučaju da se jedan dozimetar nosi na okovratniku iznad pregače, a za dvostruku dozimetriju izraz koji su dali Rosenstein i Webster, 1994 [13].

Niklason i suradnici, 1994. [17] predlažu novi algoritam koji je neovisan o debljini olovne pregače i uzima u obzir zaštitu štitnjače. Padovani i suradnici 2001. [18] zaključuju da Niklasonov algoritam zadovoljava unutar eksperimen-

talnih nesigurnosti danih u NCRP Report 122 [16], koji prihvaća precjenjivanje E za faktor 3 kada se nosi jedan dozimetar, odnosno 2 kada se nose dva dozimetra.

Švicarski pravilnik o osobnoj dozimetriji, 1999. [19] zahtijeva dvostruku dozimetriju za postupke koji dovode do izlaganja visokim dozama i uvodi svoj algoritam za računanje efektivne doze. McEwan, 2000 [20] računa algoritme za dva dozimetra koji se nose na ovratniku i na trupu (ispod pregače), a također i za samo jedan dozimetar. On nije pretpostavio zaštitu štitnjače, a također je pretpostavio da je $H_{ovratnik}$ dobra procjena doze u štitnjači. Franken i Huyskens, 2002. [21] napravili su modelno računanje za različite praktične situacije, sa i bez olovne pregače i za različite modele pregača (različito podešavanje i debljine). Zaključili su da je model pregače i njeno podešavanje često mnogo važnije od debljine olova. Njihovi jednostavni izrazi dani u Tablici 1 konstruirani su na takav način da je efektivna doza procijenjena što je točnije moguće ali nikad podcijenjena.

Za procjenu efektivne doze Sherbini i DeCicco, 2002. [22] koriste računanje doze u antropomorfnom matematičkom fantomu za različite uvjete zračenja metodom Monte Carlo (MC). Algoritam Von Boetticher i suradnici 2003. [23] i Lachmund, 2005. [24] osniva se na mjerenjima profesionalnih izlaganja zračenju u dijagnostičkoj radiografiji. Clerinx i suradnici, 2008. [25] izveli su MC simulacije za tipične geometrije raspršenih polja u postupcima intervencijske radiologije. Njihov rezultat je pokazao da očitavanje dozimetra na okovratniku i ispod pregače na prsima daje najbolju korelaciju s efektivnom dozom, te da algoritmi sa samo jednim dozimetrom u nekim slučajevima mogu rezultirati neprihvatljivim podcjenjivanjem E .

Usporedba algoritama

Siiskonen i suradnici, 2007. [26] napravili su MC simulacije za osam kardioloških i dva cerebralna postupka. Njihovi rezultati su pokazali da E značajno varira s uvjetima zračenja i s položajem dozimetra. Također zaključuju da dobiveni podaci nisu dovoljni za utvrđivanje opće prihvatljivog odnosa između očitavanja jednog ili dva dozimetra i efektivne doze.

U ovom radu neki od najnovijih algoritama su testirani korištenjem podataka MC računa iz reference [26]. Efektivna doza E_1 računata je pomoću određenog algoritma uz vrijednosti očitanih doza iz MC računa (H_u i H_o) te je rezultat uspoređen s efektivnom dozom E_2 koja je dobivena MC računom za slične uvjete ozračivanja. Ako je $E_1 > E_2$ tada omjer E_1/E_2 predstavlja faktor precjenjivanja. Ako je $E_1 < E_2$ tada algoritam podcjenjuje efektivnu dozu. Rezultati za algoritme dvostruke dozimetrije prikazani su na

VII. simpozij HDZZ, Opatija, 2008.

Tablica 1. Algoritmi za računanje efektivnog doznog ekvivalenta (EDE) i efektivne doze (E)

	Autori	Algoritam	Položaj dozimetara
1	Gill et al., 1980 [6]	$EDE = 0.6 H_u + 0.4 H_o$	H_u : torzo H_o : ovratnik
2	Webster, 1989 [7]	$EDE = 1.5 H_u + 0.04 H_o$	H_u : pojas H_o : ovratnik
3	Balter et al., 1993 [8]	Jedan dozimetar: $EDE = 0.3 H_o$ Dva dozimetra: isto kao 2	H_o : ovratnik
4	Wambersie and Delhove, 1993 [12]	$E = H_u + 0.1 H_o$	H_u : prsa H_o : ovratnik ili ramena
5	Rosenstein and Webster, 1994 [13]	$E = 0.5 H_u + 0.025 H_o$	H_u : pojas H_o : ovratnik
6	NCRP Report No. 122, 1995 [16]	Jedan dozimetar: $E = H_o/21$ Dva dozimetra: isto kao 5	H_o : ovratnik
7	Huyskens et al., 1994) [15]	Jedan dozimetar: $E = H_o / D$ ili $E = H_u \cdot M$	
8	Niklason et al., 1994 [17]	(a) bez TS: jedan doz.*: $E = 0.07 H_{os}$ Dva doz.: $E = 0.06(H_{os} - H_u) + H_u$ (b) sa TS: jedan doz.*: $E = 0.03 H_{os}$ Dva doz.: $E = 0.02(H_{os} - H_u) + H_u$	H_u : pojas H_{os} : ovratnik
9	Swiss ordinance, 1999 [19]	$H_p(10) = H_u + \alpha H_o$ $\alpha = 0.1$ bez TS $\alpha = 0.05$ sa TS $H_p(0.07) = H_u + H_o$	Nije određen
10	McEwan, 2000 [20]	Dva dozimetra: $E = 0.71 H_u + 0.05 H_o$ Jedan dozimetar: (a) $E = 0.08 H_o$ (b) $E = 2 \cdot H_u$	H_u : torzo H_o : ovratnik

	Autori	Algoritam	Položaj dozimetara
11	Franken and Huyskens, 2002 [21]	Jedan dozimetar: $E \leq H_o/5$ (a) dva dozimetra bez TS: $E \leq H_u + H_o/10$ (b) dva dozimetra sa TS: $E \leq H_u + H_o/30$	H_o : sredina (ovratnik ili prsa) H_u : sredina (pojas) H_o : sredina (ovratnik)
12	Sherbini and DeCicco, 2002 [22]	$E = 1.0 H_u + 0.07 H_o$	H_u : pojas H_o : ovratnik
13	von Boetticher at al., 2003 [23] Lachmund, 2005 [24]	(a) dva dozimetra bez TS: $E = 0.65 H_u + 0.074 H_o$ (b) dva dozimetra sa TS: $E = 0.65 H_u + 0.017 H_o$	H_u : prsa H_o : ovratnik
14	Clerinx et al., 2008 [25]	$E = 1.64 H_u + 0.075 H_o$	H_u : prsa H_o : ovratnik

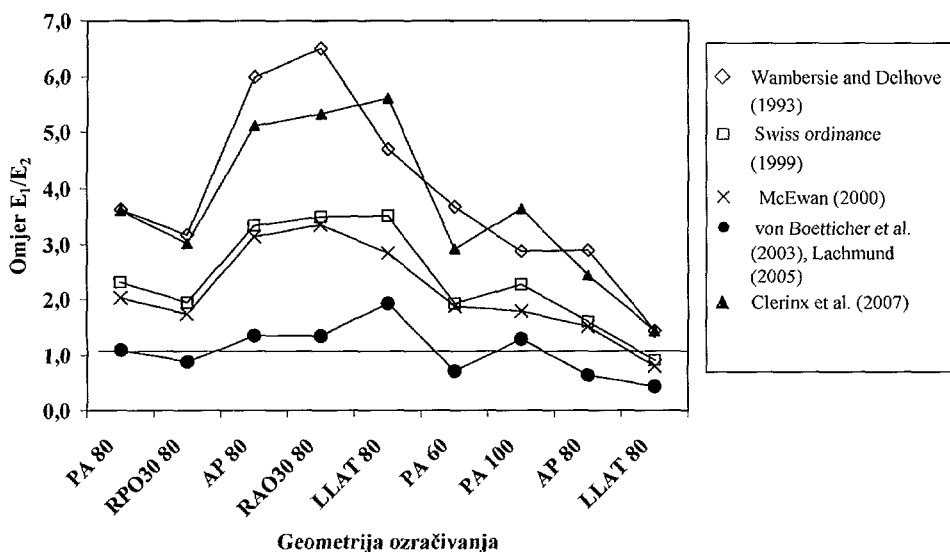
Simboli: H_u : doza ispod pregače, H_o : doza iznad pregače,

H_{os} : površinska doza iznad ovratnika tj. $H_p(0.07)$,

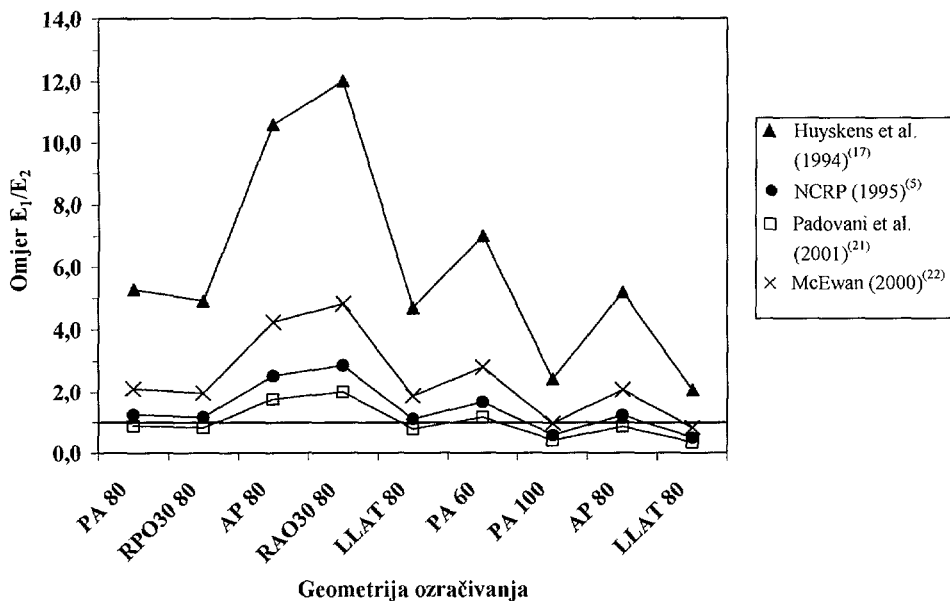
TS: zaštita štitnjače ("thyroid shield")

* Preporučeno od Padovani et al., 2001 [18] uz pretpostavku $H_u \sim 0.01 H_{os}$

Slici 1, a za jednostruke na Slici 2. Oni pokazuju da precjenjivanje E ovisi u velikoj mjeri o geometriji ozračivanja. Također, postoje značajne razlike ovisno o korištenom algoritmu, maksimalne su za faktor 2 do 7 za algoritme dvostruke dozimetrije (odnosno 2 do 12 za algoritme jednostruke dozimetrije). Međutim, treba istaknuti da geometrije kod kojih su precjenjivanja najveća (AP i RAO tj. "anteroposterior" i "right anterior oblique") nisu česte u intervencijskoj radiologiji.



Slika 1. Omjer E_1/E_2 , tj. efektivna doza računata pomoću algoritma podijeljena s efektivnom dozom dobivenom iz MC računa za različite algoritme **dvostruke** dozimetrije u kliničkim slučajevima razmatranima i računatim u ref. [26].



Slika 2. Omjer E_1/E_2 , tj. efektivna doza računata pomoću algoritma podijeljena s efektivnom dozom dobivenom iz MC računa za različite algoritme **jednostruke** dozimetrije u kliničkim slučajevima razmatranima i računatim u ref. [26].

ZAKLJUČAK

Pregled literature pokazuje da je razvijen značajan broj algoritama za računanje efektivne doze ali da ne postoji opće slaganje o najpogodnijem algoritmu. Većina algoritama značajno precjenjuje efektivnu dozu, tipično za faktor 2 do 4, a maksimalno i više od deset puta. Razlike u točnosti dvostruke i jednostruke dozimetrije nisu značajne, ali algoritmi osnovani na jednostrukoj dozimetriji češće u praksi mogu podcijeniti efektivnu dozu. Radi toga se općenito preporučuje dvostruka dozimetrija. Najnovije studije pokazuju da ne postoji jedan algoritam koji je optimalan za sve postupke u intervencijskoj radiologiji.

Za evaluaciju primjenjivosti algoritama dvostruke dozimetrije potrebne su daljnje eksperimentalne i numeričke interkomparacije u nekoliko kritičnih konfiguracija. Sljedeći zadaci radne grupe 9 EURADOS-a su davanje preporuka za praksu dvostruke dozimetrije i predlaganje algoritama za procjenu efektivne doze.

LITERATURA

- [1] EURATOM. Council Directive of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the health protection of the general public and workers against the dangers of ionizing radiation. Council Directive 96/26 EURATOM, 1996.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.
- [3] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures, ICRP Publication 85, Annals of the ICRP; Vol. 30 No. 2, 2000.
- [4] Vidjeti www.eurados.org
- [5] Järvinen H, Buls N, Clerinx P, Jansen J, Miljanić S, Nikodemová D, Ranogajec-Komor M, d'Errico F. Overview of double dosimetry procedures for the determination of the effective dose to the interventional radiology staff. Radiat Prot Dosim (u tisku) 2008.
- [6] Gill JR, Beaver PF, Denis JA. The practical application of ICRP recommendations regarding dose equivalent limits for workers to staff in diagnostic X-ray departments. 5th International Congress of the International Radiation Protection Association. Book of Papers 1:15-18, 1980.
- [7] Webster EW. EDE for exposure with protective aprons. Health Phys 1989;56: 568-569.
- [8] Balter S. et al. Guidelines for personnel radiation monitoring in the cardiac catheterization laboratory. Cath Cardiovasc Diagn 1993;30(4): 277-279.
- [9] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Annals of the ICRP, 1(3). New York: Pergamon Press; 1977.

VII. simpozij HDZZ, Opatija, 2008.

- [10] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21(1-3). Oxford: Pergamon Press; 1991.
- [11] Streffer C. The ICRP 2007 recommendations. Radiat Prot Dosim, Advance Access published October 12, 2007. doi:10.1093/rpd/ncm246.
- [12] Wambersie A, Delhove J. Radiation protection in diagnostic radiology, a debated practice: how to wear the individual dosimeters? J Belge Radiol 1993;76(6):382-385.
- [13] Rosenstein M, Webster EW. Effective dose to personnel wearing protective aprons during fluoroscopy and interventional radiology. Health Phys 1994;67:88-89.
- [14] Faulkner K, Marshall NW. The relationship of effective dose to personnel and monitor reading for simulated fluoroscopic irradiation conditions. Health Phys 1993;64(5):502-508.
- [15] Huyskens CJ, Franken Y, Hummel WA. Guidance on personal dosimetry for occupational exposure in interventional radiology. J Radiol Prot 1994;14(3):229-234.
- [16] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Use of personal monitors to estimate effective dose equivalent to workers for external exposure to low-LET radiation. NCRP Report No. 122 Bethesda, Maryland:NCRP; 1995.
- [17] Niklason LT, Marx MV, Chan HP. The estimation of occupational effective dose in diagnostic radiology with two dosimeters. Health Phys 1994;67(6):611-615.
- [18] Padovani R, Foti C, Malison MR. Staff dosimetry protocols in interventional radiology. Radiat Prot Dosim 2001;94(1-2):193-196.
- [19] Swiss Ordinance for personal dosimetry, edited by the Federal Chancellery, Bern, 1999.
- [20] McEwan AC. Assessment of occupational exposure in New Zealand from personal monitoring records. Radiation Protection in Australasia 2000;17(2):60-66.
- [21] Franken Y, Huyskens C. Guidance on the use of protective lead aprons in medical radiology: protection efficiency and correction factors for personal dosimetry. Paper 17, 6th European ALARA Network Workshop, Madrid, Spain, 2002. Available at <http://ean.cepn.asso.fr/program6.html>.
- [22] Sherbini S, DeCicco J. Estimation of the effective dose when protective aprons are used in medical procedures: A theoretical evaluation of several methods. Health Phys 2002;83(6):861-870.
- [23] von Boetticher H, Lachmund J, Hoffmann W, Luska G. Strahlenexposition des Personals in der Röntgendiagnostik: Bestimmung der Effektiven Dosis mit dem 2-Dosimeter-Verfahren. Proc. of Jahrestagung Dortmund, 12-15. 10. 2003, "Strahlenschutz bei medizinischen Anwendungen, pp.109-113, ISBN 3-00-012084-X, 2003.
- [24] Lachmund J. Zur Quantifizierung der biologisch relevanten Strahlenexposition von Beschäftigten in Radiologie und Kardiologie. Ph. D. Thesis. Bremen Univ. 2005.
- [25] Clerinx P, Buls N deMey J. Double dosimetry algorithm for workers in interventional radiology. Radiat Prot Dos 2008 (u tisku).
- [26] Siiskonen T, Tapiovaara M, Kosunen A, Lehtinen M, Vartianen E. Monte Carlo simulations of occupational radiation doses in interventional radiology. Br J Radiol 2007;80:460-468.

**DOSIMETRY IN INTERVENTIONAL RADIOLOGY –
EFFECTIVE DOSE ESTIMATION**

*Saveta Miljanić¹, Nico Buls², Peter Clerinx², Hannu Jarvinen³,
Denisa Nikodemová⁴, Maria Ranogajec-Komor¹ and Francesco d'Errico⁵*

¹Ruđer Bošković Institute, Bijenička c. 54, 10000 Zagreb, Croatia

²UZ Brussels, Department of Radiology, Laarbeeklaan 101,
B-1090 Brussels, Belgium

³Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), P.O.Box 14,
FIN-00881 Helsinki, Finland

⁴Slovak Medical University, Limbová 14, Bratislava, Slovakia, 83303

⁵Università degli Studi di Pisa, Pisa, Italy and Yale University,
New Haven, CT USA
e-mail: saveta@irb.hr

Interventional radiological procedures can lead to significant radiation doses to patients and to staff members. In order to evaluate the personal doses with respect to the regulatory dose limits, doses measured by dosimeters have to be converted to effective doses (E).

Measurement of personal dose equivalent $H_p(10)$ using a single unshielded dosimeter above the lead apron can lead to significant overestimation of the effective dose, while the measurement with dosimeter under the apron can lead to underestimation. To improve the accuracy, measurements with two dosimeters, one above and the other under the apron have been suggested ("double dosimetry"). The ICRP has recommended that interventional radiology departments develop a policy that staff should wear two dosimeters.

The aim of this study was to review the double dosimetry algorithms for the calculation of effective dose in high dose interventional radiology procedures. The results will be used to develop general guidelines for personal dosimetry in interventional radiology procedures. This work has been carried out by Working Group 9 (Radiation protection dosimetry of medical staff) of the CONRAD project, which is a Coordination Action supported by the European Commission within its 6th Framework Program.