

# KONCEPT OSOBNE DOZIMETRIJE i OSNOVNE FIZIKALNE VELIČINE U OSOBNOJ DOZIMETRIJI

Marija, **SURIĆ MIHIĆ**, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb,  
Republika Hrvatska, msuric@imi.hr

Ivica, **PRLIĆ**, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb,  
Republika Hrvatska, iprlc@imi.hr

Jerko, **ŠIŠKO**, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb,  
Republika Hrvatska, jsisko@imi.hr

Tomislav, **MEŠTROVIĆ**, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb,  
Republika Hrvatska, tomislav@imi.hr

**SAŽETAK** – Daje se koncept osobne dozimetrije kao dio područja zaštite od zračenja. Detaljno je dan teorijski opis i definicije fundamentalnih veličina koje se koriste za fizikalne opise polja zračenja i njegove interakcije s materijom te veličina koje se koriste u dozimetriji i zaštiti od zračenja – operacionalne i zaštitne veličine. Objasnjena je veza između posljednje dvije i način određivanja operacionalnih veličina korištenjem osobnih dozimetara.

**Ključne riječi:** osobna dozimetrija, zaštita od zračenja, osobni dozimetri, doza,

## PERSONAL DOSIMETRY CONCEPT AND BASIC PHYSICAL QUANTITIES IN OCCUPATIONAL DOSIMETRY

**ABSTRACT** - Concept of personal dosimetry as a part of radiation protection programme is presented. Definitions of fundamental dosimetric quantities for describing the physical characteristics of radiation fields and its interaction with matter are presented. Quantities used in radiation protection – personal dosimetry are defined as operational and protective quantities. The way to define the operational dosimetry quantities using personal dosimeters is described.

**Keywords:** personal dosimetry, radiation protection, personal dosimeters, dose

### 1. UVOD

Tijekom svoje evolucije, ljudsko tijelo nije uspjelo razviti osjetilo za detekciju ionizirajućeg zračenja. Izravne posljedice djelovanja ionizirajućeg zračenja na živi svijet uglavnom su odgođene i često ih je teško povezati s uzrokom. Čovjek može biti izložen čak i smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja a da u samom trenutku ozračivanja ne osjeti ništa. Posljedice ozračivanja zapažaju se tek nakon protoka određene količine vremena, tj. nekoliko sati do

nekoliko dana ili čak godina, što ovisi o vrsti i svojstvima zračenja te primljenoj dozi. Potreba da se odredi doza zračenja kojoj je osoba bila izložena, a s ciljem sprječavanja eventualnih štetnih učinaka na zdravlje, time je veća.

Osobni dozimetrijski nadzor profesionalno izloženih osoba sastavni je dio programa zaštite od zračenja. Takav program zasniva se na principima opravdanosti, optimizacije i ograničenja doze. Ti principi postavljeni su Direktivom Vijeća EU 2013/59 Euratom, Basic Safety Standards (BSS)

[Council of European Union, Official Journal Vol. 57, 2014]. Ta jedirektiva jedan od osnovnih dokumenata u kojima su opisani principi osobnog dozimetrijskog nadzora te dani zahtjevi i preporuke za provođenje istoga.

U skladu s EU BSS-om (a time i relevantnim propisima Republike Hrvatske), osobni dozimetrijski nadzor predstavlja određivanje doze ionizirajućeg zračenja koju je pojedinac primio na osnovi individualnih mjerenja pomoću mjernog uređaja kojeg je ta osoba nosila na svome tijelu [Europska komisija, 2014].

Osnovni problem s kojim se susrećemo u osobnoj dozimetriji je nepoznavanje parametara ozračivanja kojem je u svom radu bio izložen pojedinac. Naime, čak ako su karakteristike samog izvora zračenja poznate, osoba je k tome izložena raspršenom zračenju iz okoline izvora (čiji energijski spektar uglavnom nije poznat) i pozadinskom zračenju. Osoba također može raditi u različitim orijentacijama u odnosu na primarni snop zračenja (koji se mogu znatno razlikovati u odnosu na baždarne uvjete), a primljena doza ovisi o čimbenicima poput koristi li zaštitnu opremu nepoznatih karakteristika i sl. Uvjeti izlaganja najčešće su znatno različiti od standardnih referentnih laboratorijskih uvjeta koje se koriste za kalibraciju dozimetrijskih sustava. Stoga u osobnoj dozimetriji ne govorimo o mjerenju osobne doze već o njezinom procjenjivanju, uzimajući u obzir veliki broj čimbenika koje unose mjernu nesigurnost. Korištenjem pasivnih dozimetara određuje se ukupna doza akumulirana tijekom perioda korištenja dozimetra. Praktički je vrlo teško, često i nemoguće, odrediti dinamiku njezina primanja. Što se tiče zdravstvenih učinaka ionizirajućeg zračenja, oni su primarno u svezi s brzinom doze kojoj je bio izložen pojedinac ili neki dio njegova tijela, a tek onda s ukupnom primljenom dozom.

#### *Osobni dozimetrijski nadzor*

Osobni dozimetrijski nadzor podrazumijeva procjenjivanje doze ionizirajućeg zračenja

koju je primio poznati pojedinac i provodi se individualnim mjerenjima uređajem koji ta osoba nosi na svom tijelu [Europska komisija, 2014]. Individualni nadzor može, u situacijama kada mjerenja na osobi nisu moguća ili su nedostatna, biti zasnovan na rezultatima mjerenja na drugim izloženim osobama ili iz rezultata nadzora radnog mjesta ili proračuna.

Cilj provedbe osobne dozimetrije je:

- Kontrola profesionalne izloženosti u cilju osiguranja sigurnih i zadovoljavajućih radnih uvjeta;
- Potvrđivanje usklađenosti s granicama doze i primjenom ALARA principa uzimajući u obzir ekonomske i socijalne faktore kao dio zakonske regulative;
- Obavješćavanje radnika o njihovoj izloženosti zračenju;
- Provođenje kontrole i analize raspodjele doza i trendova unutar grupa izloženih radnika;
- Epidemiološka istraživanja utjecaja ionizirajućeg zračenja;
- Potvrda provođenja principa zaštite od zračenja;

BSS i preporuke dane od strane Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja u publikaciji 103 [ICRP, 2007] pružaju pristupe za minimiziranje rizika od rada u polju ionizirajućeg zračenja postavljanjem sustava preporučenih granica izlaganja, smanjenja primljenih doza i referentnih nivoa doza. Osnovni principi na kojima se zasnivaju ovi bazični dokumenti u zaštiti od zračenja su:

- Principi zasnovani na dva izvora primjenjiva u svim situacijama izlaganja ionizirajućem zračenju: princip opravdanosti – bilo koja aktivnost koja uzrokuje izlaganje pojedinca ionizirajućem zračenju mora rezultirati s više koristi nego štete za društvo i pojedinca kao opravdanje za rizike koje izlaganje zračenju nosi tom pojedincu; princip optimizacije zaštite – vjerojatnost izlaganja ionizirajućem zračenju, broj izloženih ljudi i veličina njihove primljene doze mora biti zadržana toliko nisko koliko je razumno

moguća (ALARA princip) uzimajući u obzir ekonomske i socijalne faktore. Oba navedena principa baziraju se na tzv. LNT modelu;

- Principi vezani za pojedinca i primjenjivi u planiranim situacijama izlaganja: princip primjene graničnih doza – ukupna doza koju primi pojedinac od izlaganja izvorima ionizirajućeg zračenja (osim medicinskog izlaganja) ne smije prijeći odgovarajuće granice prema preporukama ICRP-a.

### Osnovne fizikalne veličine u osobnoj dozimetriji

Veličine koje se koriste u dozimetriji ionizirajućeg zračenja dijele se na:

- fundamentalne – opisuju polje zračenja i njegovu interakciju s materijom [ICRU 2011]
- veličine koje se koriste u zaštiti od ionizirajućeg zračenja, a obuhvaćaju operativne veličine i zaštitne veličine [ICRU 1993 i ICRP 2007]

## 2. FUNDAMETALNE DOZIMETRIJSKE VELIČINE

KERMA je kinetička energija fotona prenijeta elektronima u materijalu i uvijek mora biti definirana s obzirom na specifični materijal u kojem se događa interakcija (kerma u zraku  $K_A$ , kerma u vodi  $K_W$  i sl.). Ona predstavlja omjer srednje vrijednosti sume početnih kinetičkih energija svih nabijenih čestica koje su fotoni koji upadaju na element materijala mase  $dm$  oslobodili ionizacijom,  $dE_{TR}$  i mase tog elementa  $dm$ . Pri tome nije bitno usporavaju li nabijene čestice unutar tog volumena ili ne. Jedinica za kermu je J/kg.

$$K = dE_{TR} / dm. \quad (2.1)$$

Kolizijska kerma  $K_{COL}$  je veličina povezana s kermom i dugo se povezivala s apsorbiranom dozom u slučajevima kada radijacijski gubici energije nabijenih čestica nisu zanemarivi. Ona se računa prema

$$K_{COL} = K(1-g). \quad (2.2)$$

$g$  u relaciji (2.2) predstavlja udio kinetičke energije oslobođenih nabijenih čestica u materijalu koja će biti izgubljena kao radijacijski gubitak u tom materijalu.

Deponirana energija  $\epsilon_i$  je energija deponirana u jednoj interakciji prema relaciji

$$\epsilon_i = \epsilon_{IN} - \epsilon_{OUT} + Q. \quad (2.3)$$

gdje su  $\epsilon_{IN}$  energija ulazne ionizirajuće čestice (bez energije mirovanja),  $\epsilon_{OUT}$  suma energija svih nabijenih i nenabijenih čestica koje izlaze iz interakcije (bez energije mirovanja),  $Q$  promjena u energijama mirovanja jezgre i svih elementarnih čestica koje su uključene u interakciju.

Predana energija  $\epsilon$  materiji volumena  $V$  je suma svih deponiranih energija u tom volumenu

$$\epsilon = \sum_i \epsilon_i \quad (2.4)$$

Srednja vrijednost predane energije  $\bar{\epsilon}$  materijalu volumena  $V$  jednaka je sumi razlike srednje izračenih energija,  $R_{IN}$  i  $R_{OUT}$ , svih nabijenih i nenabijenih čestica koje ulaze u i izlaze iz tog volumen i srednje sume  $\sum Q$  svih promjena u energiji mirovanja jezgri i elementarnih čestica koji se pojavljuju u tom volumenu

$$\bar{\epsilon} = R_{IN} - R_{OUT} + \sum Q. \quad (2.5)$$

**Apsorbirana doza  $D$**  je omjer srednje vrijednosti predane energije ionizirajućeg zračenja materijalu mase  $dm$ . Fizikalna jedinica kojom se izražava apsorbirana doza je Gy = J/kg. Doza u nekoj točki računa se prema

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}. \quad (2.6)$$

Treba naglasiti da  $D$  predstavlja energiju po jedinici mase koja će ostati u

promatranoj točki i proizvesti efekte povezane sa zračenjem. Neki od tih efekata su proporcionalni s  $D$ , a neki ovise o dozi na kompliciranije načine. U realnim praktičnim situacijama, vrijednost apsorbirane doze se ne promatra u točki već kao usrednjena vrijednost preko većeg volumena tkiva. Smatra se da se kod niskih doza srednja vrijednost apsorbirane doze u nekom organu ili tkivu može povezati sa štetom od zračenja preko stohastičkih efekata u svim dijelovima tog organa ili tkiva, s dostatnom točnošću za potrebe zaštite od zračenja. Prosječna apsorbirana doza u području organa ili tkiva  $T$ ,  $D_T^-$  je definirana kao:

$$D_T^- = (\int_T D(x,y,z) \rho(x,y,z) dV) / (\int_T \rho(x,y,z) dV). \quad (2.7)$$

gdje je  $D$  doza i  $\rho$  gustoća u točki  $(x,y,z)$  organa ili tkiva volumena  $V$ .

Linearni prijenos energije (LET) je prosječna stopa gubitka energije zračenja nabijene čestice u mediju, tj. energija zračenja izgubljena po jedinici dužine putanje kroz materijal. Energijski gubici  $dE$  posljedica su kolizija nabijenih čestica sa elektronima pri prolasku puta duljine  $dl$  u materiji.

**Dozni ekvivalent  $H$**  u točki tkiva se dobiva kao umnožak apsorbirane doze  $D$  u toj točki i faktora kvalitete  $Q$  za specifično zračenje:

$$H = D \cdot Q. \quad (2.8)$$

Mjerna jedinica za dozni ekvivalent je Sv.

### 3. OPERATIVNE I ZAŠTITNE DOZIMETRIJSKE VELIČINE

Zaštitne veličine ekvivalentna doza i efektivna doza ne mogu se direktno mjeriti pa se zbog toga koriste operativne veličine. Operativne veličine, prema ICRU [ICRU 1993] se koriste za procjenu gornjih granica vrijednosti zaštitnih veličina vezanih uz izlaganje ionizirajućem zračenju. Za doze u blizini ili iznad graničnih doza potrebno je imati dodatne informacije o karakteristikama

zračenja na radnom mjestu i karakteristikama odziva dozimetra u cilju potvrđivanja prikladnosti korištenja operativnih veličina za određivanje efektivne doze, ekvivalentne doze za lokalno područje kože ili ekvivalentne doze za leću ili ekstremitete.

Razlikujemo dvije vrste operativnih veličina – za nadzor prostora i osobni nadzor.

Za nadzor prostora mjerne veličine su:

$H^*(10)$  – ambijentalni dozni ekvivalent

$H'(0,07)$  – dozni ekvivalent smjera

Ovi dozni ekvivalenti definirani su kao dozni ekvivalenti na dubinama 10 mm i 0,07 mm sfere radijusa 30 cm sačinjene od ICRU četveroelementnog tkiva [ICRU 2011 i ICRP 2007].

**Ambijentalni dozni ekvivalent  $H^*(10)$**  je veličina koja je povezana sa zaštitnom veličinom **efektivnom dozom** i općenito se koristi za buduće procjene, kategorizaciju radnih prostora, provjeru učinkovitosti debljine zaštite i slično.  $H^*(10)$  je izotropna veličina čija vrijednost ne ovisi o smjeru raspodjele polja zračenja u promatranoj točki.

$H'(0,07)$  se koristi za nadzor prostora pri određivanju doze za kožu i ostala površinska tkiva.

Mjerne veličine koje se koriste za osobni nadzor su osobni dozni ekvivalenti:

$H_p(10)$  za određivanje efektivne doze

$H_p(3)$  za određivanje ekvivalentne doze na očnu leću

$H_p(0,07)$  za određivanje lokalne doze za kožu

od fotona ili elektrona (maksimalna vrijednost ekvivalentne doze za kožu, uprosječena preko  $1\text{cm}^2$ )

**Osobni dozni ekvivalenti** definirani su kao dozni ekvivalenti za meko tkivo (za četveroelementno ICRU tkivo) na dubinama od 10 mm, 3 mm i 0,07 mm, unutar tijela ispod definirane točke na površini tijela. Za  $H_p(10)$  ta točka podudara se s položajem dozimetra na tijelu.

Zaštitne veličine se zasnivaju na veličini prosječne apsorbirane doze u volumenu ciljanog organa ili tkiva, od određenog tipa zračenja. Učinak određenog tipa zračenja (koje upada na tijelo) je opisan preko težinskog faktora za zračenje [ICRP 2007]. Taj faktor se zasniva na procjeni relativne biološke učinkovitosti (RBE) određenog tipa zračenja s obzirom na stohastičke efekte. Radijacijski težinski faktori za različite tipove zračenja su dani u Tablici 3.1. Sve navedene vrijednosti se odnose na zračenje koje upada na tijelo ili u slučaju izvora unutar tijela, emitira se iz izvora.

Množenjem prosječne apsorbirane doze s težinskim faktorom za zračenje dobiva se ekvivalentna doza,  $H_T$ , za organ ili tkivo T od određenog tipa zračenja R.

**Tablica 3.1.** Težinski faktori za zračenje za različite tipove zračenja (izvor: ICRP Publication 103 [ICRP 2007]).

TIP ZRAČENJA R	RADIJACIJSKI TEŽINSKI FAKTOR $w_R$
fotoni	1
elektroni i muoni	1
protoni i nabijeni pioni	2
alfa čestice, fisijski fragmenti, teški ioni	20
neutroni	kontinuirana krivulja kao funkcija energije neutrona

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3.1)$$

Za određivanje cjelokupnog štetnog utjecaja koristi se efektivna doza, E, koja se dobiva sumiranjem svih ekvivalentnih doza za sve izložene organe i tkiva pomnoženih odgovarajućim težinskim faktorima za tkiva koji su dani u ICRP 103.

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3.1)$$

**Tablica 3.2.** Težinski faktori za tkiva i organe prema ICRP 103.

TKIVO	$w_T$	$\Sigma w_T$
koštana srž, debelo crijevo, pluća, želudac, dojka, preostala tkiva*	0,12	0,72
gonade	0,08	0,08
mokraćni mjehur, jednjak, jetra, štitnjača	0,04	0,16
površina kosti, mozak, žlijezde slinovnice, koža	0,01	0,04
	<b>Ukupno</b>	<b>1,00</b>
*preostala tkiva: žlijezde, ekstratorakalno područje, žučni mjehur, srce, bubrezi, limfni čvorovi, mišići, usna sluznica, gušterača, prostata, tanko crijevo, slezena, nadbubrežna žlijezda, maternica		

Težinski faktori za tkiva  $w_T$  uzimaju u obzir relativne efekte zračenja na različite organe i tkiva i ovise o tzv. radiosenzitivnosti tih organa i tkiva. Aktualne preporučene vrijednosti za  $w_T$  prema ICRP 103 prikazane su u Tablici 3.2.

Efektivna doza ovisi još i o geometriji polja zračenja (smjeru upadnog zračenja).

#### 4. OSOBNI DOZIMETRIJSKI NADZOR

Svrha osobne dozimetrije je određivanje osobnih doza za profesionalno izložene pojedince u cilju ograničenja ili kontrole pojavnosti učinaka na zdravlje tih pojedinaca.

Efekti ionizirajućeg zračenja na zdravlje mogu se svrstati u dvije općenite kategorije [Europska komisija, 2009]:

- deterministički efekti (oštećenje tkiva) kao posljedica uništenja ili oštećenja stanica prilikom ozračivanja visokim dozama
- stohastički efekti (karcinom ili nasljedni efekti) koji uključuju ili razvoj karcinoma kod izloženih pojedinaca zbog mutacije somatskih stanica ili nasljedne bolesti u njihovom potomstvu zbog mutacije reproduktivnih stanica. Tu također treba uključiti efekte na embrij ili fetus i ostale bolesti osim karcinoma.

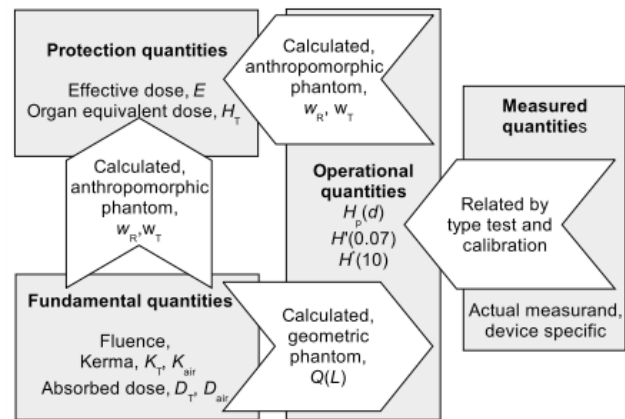
Veličine koje se koriste za procjenu ovih učinaka su:

- efektivna doza,  $E$ , za stohastičke efekte. Dozni limit za efektivnu dozu je dan tako da deterministički efekti neće nastupiti za tkiva i organe koji su uključeni u definiciju efektivne doze.
- ekvivalentna doza,  $H_T$ , za kožu, očnu leću i ekstremitete za determinističke efekte

Apsorbirana doza u točki promatranog organa je fizikalna veličina, dok ekvivalentna i efektivna doza uključuju težinske faktore koji su zasnovani na prihvaćenim radiobiološkim činjenicama. Vrijednosti težinskih faktora su probrane između velikih količina radiobioloških podataka i uključuju pojednostavljenja koja su prihvatljiva u zaštiti od zračenja. Težinski faktori su srednje vrijednosti koje predstavljaju prosjek velikog broja ljudi oba spola.

Kod određivanja efektivne doze ono što se procjenjuje je realna situacija izloženosti neke osobe (tip zračenja, geometrija polja, zaštitna sredstva) i ne uključuje karakteristike pojedinog spola ili bilo koje individualne karakteristike osobe kojoj se ta doza određuje (starost, fizička građa, tjelesna masa). Na taj način efektivna doza ustvari predstavlja veličinu koja daje vrijednost koju bi primila bilo koja osoba u istim uvjetima izlaganja.

S obzirom da zaštitne veličine nije moguće direktno mjeriti onda se za njihovo izračunavanje koriste operativne veličine. Shema koja prikazuje veze između tih veličina dana je na Slici 4.1.

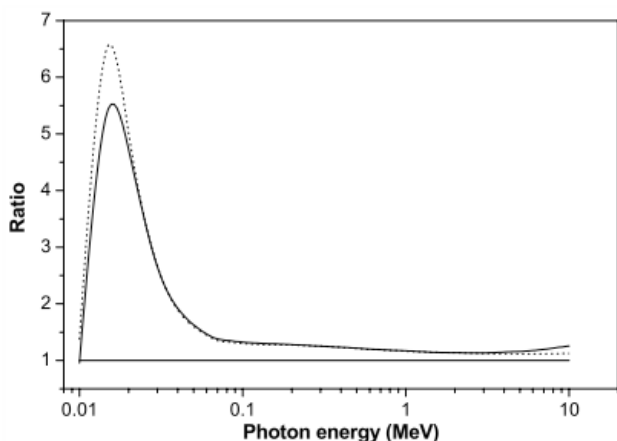


**Slika 4.1.** Mjerna shema koja prikazuje odnose mjernih, fundamentalnih i zaštitnih veličina u području zaštite od zračenja (izvor: European Commission, *Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation, Radiation Protection NO 160.* (EC Luxembourg) (2009)).

Na temelju mjerenja korištenjem osobnih dozimetara, koji su poznatih prihvatljivih karakteristika i adekvatno umjereni, izračunavaju se operativne veličine  $H_p(d)$ ,  $H'(0,07)$  i  $H^*(10)$  iz čijih se vrijednosti, a na temelju matematičkih modela procjenjuju zaštitne veličine efektivna doza  $E$  i ekvivalentna doza za tkiva i organe  $H_T$ .

Za fotonske snopove  $H_p(10)$  predstavlja razumnu procjenu efektivne doze  $E$  iako može doći do podcjenjivanja [Siiskonen et al., 2007] što se mora uzeti u obzir osobito kod vrijednosti efektivne doze koja je blizu preporučenim granicama za profesionalno izložene osobe.  $H^*(10)$  će općenito dovesti do precjenjivanja efektivne doze. Za neke energije i geometrije polja to precjenjivanje može biti veliko tako da su informacije o energiji i smjerovima zračenja u radnom prostoru nužne za primjenu odgovarajućih korekcija mjernih rezultata. Naime,  $H^*(10)$  je veličina koja je neovisna o smjeru upadnog zračenja za razliku od efektivne doze. Dosadašnji rezultati zasnovani su na pretpostavci uniformne ozračenosti cijelog tijela, preporučenih konverzijskih koeficijenata danih u literaturi [ICRP 1997a i ICRU 1998]

i ispravnom korištenju osobnih dozimetara. Prikaz omjera  $H_{p,FANTOM}(10,0)$  i  $E(AP)$  za monoenergijske fotone dan je na Slici 4.2.



**Slika 4.2.** Omjer osobnog doznog ekvivalenta,  $H_{p,fantom}(10,0)$  [ICRU 57, ICRP 74] i efektivne doze,  $E(AP)$ , za [ICRP 60, ICRU 57, ICRP 74] (točkasta linija) i preliminarni rezultati izračuna za [ICRP 103, ICRP 110]. (izvor: European Commission, *Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation, Radiation Protection NO 160.* (EC Luxembourg) (2009) )

No iako navedene publikacije daju pregled konverzijskih koeficijenata u ovisnosti o energiji upadnog zračenja, oni ne uključuju specifičnosti pojedinih zanimanja te karakteristike polja zračenja koje umjesto monoenergijskih fotona (kao na Slici 4.2) sadrže i spektar rendgenskog zračenja zajedno s raspršenim zračenjem u „mekšem“ dijelu energijskog spektra. Stoga je tema nekoliko recentnih velikih istraživačkih projekata određivanje konverzijskih koeficijenata za točnije procjenjivanje efektivne doze iz mjernih rezultata u praksi, za specifične načine izlaganja.

### Procjena zaštitnih veličina

Za vrijednosti doza koje su blizu ili iznad doznih granica nužno je potvrditi da mjerenje operativnih veličina osigurava dobru procjenu zaštitnih veličina. Da bi to bilo ispunjeno, potrebno je imati sljedeće relevantne podatke o:

- uniformnosti polja zračenja;

- energiji zračenja;
- prostornoj raspodjeli polja zračenja;
- poziciji i orijentaciji nošenja dozimetra;
- karakteristikama odziva dozimetra.

U nekim situacijama (najčešće akcidentnim ili kada se radnici bez nadzora nađu u polju zračenja a da nisu imali dozimetar) potrebno je iz rezultata dobivenih nadzorom prostora te podataka o kretanju radnika (često karakterizirane pojmom „zauzeća“ ) procijeniti ekvivalentnu dozu za kožu ili ekstremitete, ili čak efektivnu dozu. Tako dobivene vrijednosti efektivne doze sadrže veliku mjeru nesigurnosti i moraju se uzeti samo kao gruba procjena.

### Određivanje operativnih veličina korištenjem osobnih dozimetara

Pri određivanju efektivne doze za čitavo tijelo mjerenjem osobnog doznog ekvivalenta  $H_p(10)$  osnovna je pretpostavka položaja nošenja dozimetra na onom dijelu tijela koji se može smatrati najizloženijim zračenju. No često je teško odrediti koji je to dio tijela i ponekad je potrebno više od jednog dozimetra za procjenu efektivne doze ili doze za kožu. To se dešava u slučajevima kada se radi o poljima zračenja koja su izrazito prostorno neuniformna ili kod nošenja zaštitne olovne pregače.

Za fotone  $H_p(10)$  se to može odrediti korištenjem dozimetra s jednim detektorom čiji je energijski odziv izlaznog signala prihvatljivo proporcionalan apsorbiranoj dozi za tkivo u željenom energijskom rasponu, a detektor je onda prekriven materijalom čija debljina odgovara 10 mm mekog tkiva. Takav dozimetar mora registrirati i zračenje povratno raspršeno iz tijela i omogućiti mjerenje doznog

<sup>1</sup> eng. occupancy – faktor zauzeća - definira se kao udio vremena u 8 radnih sati dnevno (ili 2000 h godišnje) koje osoba provede unutar nekog prostora. Faktori zauzeća dani su u [NCRP 2004]

ekvivalenta u mekom tkivu na definiranoj dubini u tijelu u blizini položaja nošenja.

U slučaju aktivnih elektroničkih dozimetara, izlazni signal mora biti proporcionalan s  $H_p(10)$ , s odgovarajućom neovisnosti o energiji i upadnom kutu s malim ili nikakvim doprinosima od povratnog raspršenog zračenja [Europska komisija, 2009].

### **Tipovi osobnih dozimetara i njihove osobine**

U praktičnim situacijama zadaća osobnih dozimetara je određivanje željene operativne veličine s prihvatljivom razinom točnosti za dano polje zračenja. Takvo polje zračenja može imati različite kutove upada, energija od nekoliko keV do nekoliko MeV-a ili više, a najčešće je praktički nemoguće odrediti i energijsku i kutnu distribuciju na samom položaju radnika. U takvim situacijama smatra se da je dozimetar prikladan ako mu je odgovor unutar prihvatljivih granica za veliki raspon energija i upadne kutove. Iako postoji veliki broj publiciranih standarda koji propisuju karakteristike odziva dozimetra nije nužno da dozimetrijski sustav zadovoljava sve zahtjeve dane normativnim dokumentima (ISO ili IEC standardima). Dozimetrijski sustavi se mogu kreirati da zadovoljavaju specifične zahtjeve svojih korisnika i ono što je najnužnije je da se kvaliteta i točnost nekog dozimetrijskog sustava ispituje preko sudjelovanja u nacionalnim i internacionalnim interkomparacijama te da se dobiveni rezultati objave.

Izbor osobnog dozimetra i dozimetrijskog sustava propisan je u nacionalnom zakonodavstvu i uvelike ovisi o tome što nude stručni tehnički servisi za provedbu osobnog dozimetrijskog nadzora. U Republici Hrvatskoj za zakonsku rutinsku osobnu dozimetriju trenutno se koriste termoluminiscentni dozimetri (TLD), a do prije nekoliko godina u uporabi su bili i filmski dozimetri.

Za provedbu rutinske osobne dozimetrije izbor osobnog dozimetra ne ovisi samo o tipu zračenja nego i o informaciji koja se,

osim  $H_p(10)$  želi dobiti. Tako su u ponudi za fotonska zračenja:

- dozimetri za mjerenje fotonskog ili fotonsko/elektronskog zračenja pri čemu se određuje samo  $H_p(10)$  – nediskriminirajući dozimetri. Za takve primjene, i širok spektar energija zračenja, koriste se TLD, optički stimulirani luminiscentni dozimetri (OSL), radiofotoluminiscentni dozimetri (RPL), stakleni ili filmski dozimetri, pod uvjetom da posjeduju prihvatljiv energijski odziv. Mogu se koristiti i aktivni osobni elektronički dozimetri, ali se mora voditi računa o nižem pragu za fotonske energije;
- dozimetri za mjerenje fotonskog ili fotonsko/elektronskog zračenja diskriminirajućeg tipa koji osim podataka o  $H_p(10)$  mogu dati indicaciju o energiji zračenja i o prisutnosti drugih tipova zračenja osim fotona. Npr. takve nam informacije mogu dati TL dozimetri s 4 elementa, s različitim TL elementima i njihovim filtracijama;
- dozimetri fotonskog ili fotonsko/elektronskog zračenja za određivanje  $H_p(0,07)$  i  $H_p(10)$ . Oni se koriste u slučajevima kada je jako vjerojatan doprinos niskoenergijskih fotona ili elektrona. U takvim se uvjetima mogu koristiti TLD-ovi, OSL-ovi, RPL-ovi, filmski dozimetri s dva ili više elemenata ili filmova ispod filtra različitog sastava i debljine, ili odgovarajući AEPD-ovi;
- Dozimetri za ekstremitete za određivanje  $H_p(0,07)$  za fotonsko/elektronsko zračenje. U dozimetriji ekstremiteta, najčešće ruku, uobičajeno se koriste termoluminiscentni dozimetri s jednim elementom koji se stavlja na prst koji je najizloženiji zračenju u smjeru prema izvoru zračenja;
- Aktivni osobni elektronički dozimetri (AEPD) bi se trebali koristiti kada je nužno kontrolirati individualnu izloženost na dnevnoj bazi ili u situacijama kada polje zračenja kojem je izložen radnik iz nekog razloga značajno ili neočekivano poraste.



## Preporučene granične doze za osobe profesionalno izložene zračenju

Kao što je već navedeno, osnovna zadaća provođenja osobnog dozimetrijskog nadzora je određivanje osobne doze u cilju ograničenja ili kontrole pojave štetnih utjecaja na zdravlje pojedinca kao posljedica izlaganja ionizirajućem zračenju. Preporučene granične doze za efektivnu dozu su određene tako da se smatra da neće doći do determinističkih efekata u tkivima i organima koji su uključeni u definiciju efektivne doze (Tablica 2.2)

Preporučene granične doze, dane u Tablici 2.4, ne uključuju doze od medicinske izloženosti tijekom dijagnostike ili liječenja tih izloženih radnika.

Tablica 4.1. Preporučene granične doze prema BSS-u [Council of the European Union 1996]

zaštitna veličina	izloženi radnici (stariji od 18 godina)	osobe na obuci i studenti (dob 16-18 godina)	javnost
efektivna doza	100 mSv tijekom uzastopnih 5 godina, ali maksimalno 50 mSv tijekom jedne godine	6 mSv godišnje	1 mSv godišnje u posebnim slučajevima može se dozvoliti i viša doza unutar 1 godine pri čemu prosjek 5 uzastopnih godina ne smije prijeći 1mSv/godinu
ekvivalentna doza za očnu leću	150 mSv	50 mSv	15 mSv
ekvivalentna doza za kožu, šake, podlaktice, stopala, gležnjeve	500 mSv	150 mSv	50 Sv

## 5. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

Osobno ozračenje radnika koji su u svom radu profesionalno izloženi vrlo niskim dozama raspršenog rendgenskog zračenja uobičajeno se mjeri korištenjem pasivnih filmskih ili termoluminiscentnih dozimetara. Učinci ionizirajućeg zračenja ne ovise samo o dozi koju je primila profesionalno izložena osoba već i o brzini doze tijekom tog izlaganja. Standardna osobna dozimetrija korištenjem pasivnih dozimetara ne pruža uvid u takve specifičnosti već daje samo dozu akumuliranu u dozimetru tijekom mjernog razdoblja dok podaci o brzini doze, ukupnom trajanju izloženosti zračenja te vremenskoj raspodjeli doze ostaju nepoznati. To je bio razlog razvijanja osobnog dozimetra koji bi omogućio uvid u takve mjerne podatke a istovremeno bio pouzdan osobni dozimetar za određivanje osobnog doznog ekvivalenta Hp(10).

Aktivni osobni elektronički dozimetri imaju i imat će sve širu primjenu u osobnoj dozimetriji. Posebno su se pokazali korisnima kod identifikacije trenutka izlaganja u situacijama kada je izložen radnik primio višu dozu od očekivane za to radno mjesto ili način rada. Tada se iz vremenskog prikaza primanja doze može rekonstruirati vrijeme, a onda i mjesto kada je radnik bio izložen povećanoj brzini doze. Identifikacija izvanrednog ozračivanja omogućava uvođenje dodatnih mjera zaštite od zračenja te dodatno doprinosi ALARA principu.

## 6. LITERATURA

[1] Council of the European Union. Directive 2013/59/Euroatom of 5 December 2013 Basic Safety Standards (2014)

- [2] **European Commission**. Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation, Radiation Protection NO 160. (EC Luxembourg) (2009)
- [3] International Atomic Energy Agency **IAEA**. Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation, Safety Series. Safety Guide RS-G-1.3, IAEA, ILO, Vienna (1999a)
- [4] International Atomic Energy Agency **IAEA**. International Basic Safety Standards for Protection from Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, (Vienna: IAEA) (1996).
- [5] International Atomic Energy Agency **IAEA**. Radiation Protection Safety in Industrial Radiography. Safety Reports Series No. 13. IAEA, Vienna (1999b)
- [6] International Commission on Radiation Units and Measurements. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation. **ICRU** Report 57 (Bethesda, MD: ICRU) (1998)
- [7] International Commission on Radiation Units and Measurements. Fundamental Quantities and Units for Ionising Radiation. **ICRU** report No. 85, Journal of the ICRU Vol 11 No.1 (Oxford University Press) (2011)
- [8] International Commission on Radiation Units and Measurements. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. **ICRU** report No. 51, (ICRU Bethesda) (1993)
- [9] International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations. **ICRP** Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3) (Oxford, UK, Pergamon Press Elsevier Science Ltd) (1990)
- [10] International Commission on Radiological Protection. Adult Reference Computational Phantoms. **ICRP** Publication 110. Ann. ICRP (2009)
- [11] International Commission on Radiological Protection. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. **ICRP** Publication 85. Ann ICRP 30(2). (Oxford, UK, Pergamon Press, Elsevier Science Ltd) (2000)
- [12] International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. **ICRP** Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4) (1997a)
- [13] International Commission on Radiological Protection. Data for Use in Protection Against External Radiation. **ICRP** Publication 51. Ann. ICRP 17(2-3) (Oxford: Pergamon Press) (1987)
- [14] International Commission on Radiological Protection. General Principles for the Radiation Protection of Workers. **ICRP** Publication No. 75, Pergamon Press, Oxford and New York (1997b)
- [15] International Commission on Radiological Protection. General Principles for the Radiation International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **ICRP** Publication 103. Ann. ICRP (2007)
- [16] International Organization for Standardization. X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of energy and angle of incidence. International Standard ISO 4037-3. **ISO** (1999)
- [17] International Organization for Standardization. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy -- Part 1: Radiation characteristics and production methods. International Standard ISO 4037-1. **ISO** (1996)
- [18] **Järvinen**, H., Bulls, N., Clerinx, P., Jansen, J., Miljanić, S., Nikodemova, D., Ranogajec-Komor, M. and d'Errico, F.. Overview of double dosimetry procedures for the effective dose to the interventional radiology staff. Radiat. Prot. Dosimetry 131 (1): 80-86 (2008) i tamo navedena literatura
- [19] **Kramer**, R., Zankl, M., Williams, G. and Drexler, G. The calculation of Dose from external Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods Part I, The Male (Adam) and female (Eva) Adult Mathematical Phantoms. GSF-Bericht No. 5-885 (1982)
- [20] **Marović**, G. i sur. IMI CRZ-92. Praćenje stanja radioaktivnosti u Republici Hrvatskoj. Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb (2012)
- [21] **ORAMED** projekt (2008-2011), suradnički projekt podržan od Europske komisije unutar 7. okvirnog programa, <http://www.oramed-fp7.eu/>, pristup 1. ožujka 2012.
- [202] **Panasonic**. TL Badge Technical Data. (1985)
- [22] **Pelowitz** DB. MCNPX™ User's manual, version 2.5.0. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA. (2005)
- [23] **Prlic**, I. et al. Digital Dosemeter

«ALARA OD2» - «Ort» and Personal Dosimetry. Proceedings of International Conference on Occupational Radiation Protection: Protecting Workers against Exposure to Ionizing Radiation (IAEA, ILO, EU, OECD/NEA, WHO); Geneva, Switzerland. IAEA – CN-91; 219.-224. (2002)

[24] Prlic, I., Suric Mihic, M. and Vucic, Z. Active electronic personal dosimeter in interventional radiology. Radiat. Prot. Dosim. 132 (3), 308-312 (2008).

[25] Prlic, I., Suric Mihic, M., Mestrovic, T., Vucic, Z. and Cerovac, Z. «ALARA OD» Active Electronic Personal Dosimeter – implementing a new concept in radiation dosimetry. Book of Abstracts. 10th International Symposium on Radiation Physics. 2006. 17-22 October, Coimbra, Portugal. (2006)

[26] Prlic, I., Suric Mihic, M., Milkovic-Kraus, S., Mestrovic, T. and Vrtar, M.. Characterization of workplaces in interventional radiology using active dosimeters ALARA OD. Radiat. Prot. Dosim. 125 (1-4), 379-382 (2007a).

[27] Prlic, I., Suric Mihic, M., Milkovic-Kraus, S., Mestrovic, T. and Rojnica, F. Characterization of workplaces in Interventional Radiology using Active Dosimeters ALARA OD. Book of Abstracts, IM 2005-European workshop on individual monitoring of ionizing radiation, Vienna, Austria; (2005)

[28] Prlic, I., Suric Mihic, M., Milkovic-Kraus, S., Mestrovic, T. and Vrtar, M. Characterization of workplaces in interventional radiology using active dosimeters ALARA OD. Radiat. Prot. Dosim. 125 (1-4), 379-382 (2007b).

[29] Prlić, I., ALARA d.o.o.. Daljnji tehnološki razvoj i nadogradnja elektronskih dozimetara tipa ALARA. projekt 1998a-

[30] Prlić, I., Ministarstvo unutarnjih poslova Republike Hrvatske. Uspostava elektronske dozimetrije uz rendgen uređaje za kontrolu prtljage i pošiljaka. Projekt 1998b-

[31] Siiskonen, T., Tapiovaara, M., Kosunen, A., Lehtinen M., and Vartiainen E.. Occupational radiation doses in interventional radiology: simulations. Radiat. Prot. Dosimetry 129 (1-3):36-38 (2008)

[32] Suric Mihic, M., Vucic, Z., Prlic, I., Lulic, I. and Mestrovic, T.. Radiation measurements around X-ray cabinet systems. Radiat. Prot. Dosim (2012) doi:10.1093/rpd/ncr410

[33] Surić Mihanović, M. ME – 608 – 001 Određivanje Hp(10) korištenjem termoluminiscentnih dozimetara. Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinica za dozimetriju zračenja i radiobiologiju (2011)

[34] The National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural Shielding design for Medical X-ray Imaging Facilities. Report No. 147. NCRP, Bethesda (2004)

[35] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNCSEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes Vol. I-II. (UN publications, New York) (2000)

[36] Weeks, AR., Pottinger, MP., Clarke, PW. The BNFL legal dosimetry service. 3rd ISOE International Alara symposium, Portoroz (Slovenia) (2002)

AUTORI žele zahvaliti poduzeću Uljanik d.d., posebno Odjelu kontrole i predaje Uljanik Brodogradilišta d.o.o. za aktivno sudjelovanje u istraživačko–stručnom radu.

## NDT week in ZAGREB 7-12. October 2013 MATEST & CERTIFICATION CONFERENCE PROCEEDING

