

REVIEW

UDC 614.876:800.935

EKVIVALENTNA DOZA ILI DOZNI EKVIVALENT?

Z. FRANIĆ

*Institut za medicinska istraživanja i
medicinu rada, Zagreb, Hrvatska*

Primljeno 3. svibnja 1993.

U hrvatskom jeziku za neke fizičke veličine iz područja dozimetrije zračenja nema preciznih naziva. Stoga su u upotrebi engleski nazivi ili samo matematičke formule. Situacija je nepovoljna i zato što je na hrvatskom jeziku iz tog područja objavljen veoma malen broj udžbenika, priručnika i drugih radova. U ovom je radu dan pregled dozimetrijskih veličina i njihovih definicija te pregled naziva dozimetrijskih jedinica u odgovarajućoj literaturi.

Ustanovljeno je da je terminologija neujednačena i neprecizna, osobito nakon novih preporuka Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (ICRP) kojima su uvedeni novi koncepti nekih dozimetrijskih veličina. Također, terminologija u hrvatskom jeziku još nije potpuno jezično zaživjela. Nastojeći postići što veću preciznost definicije autor predlaže hrvatske nazive za nekoliko dozimetrijskih veličina.

Ključne riječi:

dozimetrijske veličine, preporuke Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (ICRP), terminologija

Ne uči svatko strani jezik zato da bi na njemu samo tečno konverzirao, već i zbog informacija iz pisanih izvora, što se osobito odnosi na stručnjake i znanstvenike najrazličitijih profila. Otežavajuća okolnost dvojezične leksikografije jest to što u našoj kulturi ne postoji tradicija dobrih, ažurnih jednojezičnih rječnika. Nadalje, žilav jezični unitarizam unutar bivše jugoslavenske zajednice pokušao je diskreditirati čak i tehničke rječnike (1). Uz to, kako su se jezikom često bavili ljudi koji nisu bili najstručniji ni u jezičnim ni u znanstvenim pitanjima, neki ne baš najbolje odabrani termini ušli su u Službeni list bivše SFRJ te tako postali zakonski propisani. Stoga i nije čudno da su se u nekim strukama hrvatski znanstvenici u međusobnom komuniciranju služili engleskim terminima ili, na primjer, ako je moguće, samo formulama. Međutim, po tome kolika se briga posvećuje pravilnosti i ljepoti književnog jezika prosuđuje se i opći stupanj kulture pojedinih naroda. Paziti na pravilnost jezičnog izraza nije dužnost samo jezičnih stručnjaka, filologa, nego i svakog školovanog čovjeka (2). Često u jeziku na koji se prevodi, u ovom je slučaju to hrvatski, ne postoji precizan prijevod nekog termina. Tada treba postići što veću preciznost definicije, ali to mora biti u duhu

hrvatskog jezika. Neke termine i nije moguće prevesti bez detaljnog poznavanja problematike i bez poznavanja odgovarajućih formula. To je osobito prisutno u području zaštite od zračenja (osobito u dozimetriji) za koje se javnost izuzetno počela zanimati nakon nuklearne nesreće u Čornobilju.

DOZIMETRIJA

Kada je riječ o energiji koju je neko tijelo primilo prilikom prolaska ionizirajućeg zračenja, u literaturi susrećemo razne termine: doza, apsorbirana doza, brzina apsorbirane doze, dozni ekvivalent, ekvivalentna doza, brzina doznog ekvivalenta - samo su neki. Ova raznolikost dozimetrijskih veličina, kao i raznolikost jedinica kojima se energija u ovakvim slučajevima izražava, često dovode u zabunu čak i neke stručnjake. Koncepti, filozofija i veličine u području zaštite od zračenja (dozimetrijske veličine) u cijelom se svijetu zasnivaju na preporukama koje oblikuju i izdaju Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (International Commission on Radiological Protection - ICRP) i Međunarodna komisija o radijacijskim jedinicama i mjerenjima (International Commission on Radiation Units and Measurements - ICRU). Najnovija saznanja i preporuke o dozimetrijskim veličinama dani su u publikaciji *Međunarodne komisije za radiološku zaštitu* broj 60 (3), čime su se donekle promijenile preporuke iz publikacije broj 26 (4). Nadalje, *Međunarodna agencija za atomsku energiju* (International Atomic Energy Agency - IAEA) izdala je i rječnik termina iz zaštite od zračenja s usporednim prijevodima na engleski, francuski, španjolski i ruski jezik (5). Međutim, prilikom prevođenja na ondašnji tzv. srpskohrvatski jezik došlo je ne samo do terminološke neujednačenosti već i do nepreciznosti. Termin mora biti usklađen i s hrvatskim jezičnim sustavom, i s pojmom na koji se odnosi, kako bi se izbjegle višeznačnost i nepreciznost, što nije bilo poštovano. Iako su kraći nazivi bolji od dugih, katkad je opisne nazive nemoguće izbjeći. Stoga je pri prevođenju potrebno poznavati fizički koncept, kao i matematičke formule kojima su neka fizička veličina i njezina mjerna jedinica definirane.

Dozimetrija je mjerenje doze zračenja i njezinih posljedica u tvari. Doza (grč. δοσις: davanje) jest količina nečega što ulazi u organizam (osobito se odnosi na lijekove i otrove). Za zračenje se također upotrebljava riječ doza, i to iz povijesnih razloga, iako bi možda neki drugi termin bio prikladniji i unosio manje zabune.

Učinci zračenja na žive organizme dijele se po pogibli na stohastičke (slučajne) i nestohastičke.

Stohastički učinci zračenja jesu oni čija je vjerojatnost pojavljivanja proporcionalna dozi bez praga, tj. ne postoji neka minimalna doza ispod koje se takvi učinci ne pojavljuju. Dakle veza između primljene doze i učinka zračenja slučajna je. Takvi učinci, npr. genetska oštećenja i pojava raka, zakasnili su godinama, pa i desecima godina. Vjerojatnost da se takvi učinci pojave izražava se kao rizik koji je proporcionalan primljenoj dozi.

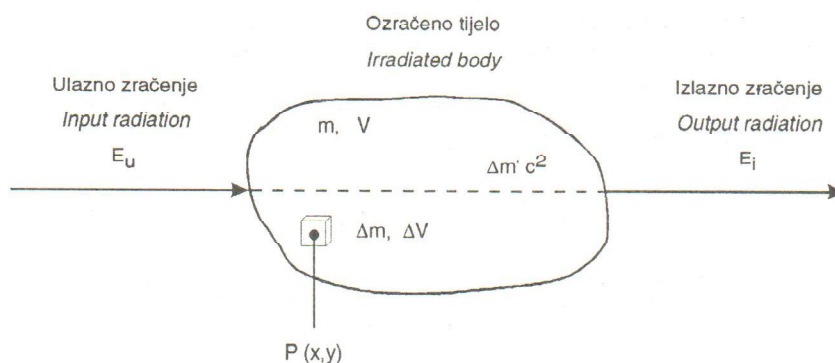
Nestohastički učinci pojavljuju se samo ako je primljena dostatno velika doza (postoji prag, odnosno minimalna doza ispod koje se takvi učinci ne pojavljuju). Stoga se za nestohastičke učinke može propisati sigurnosna granica. Nestohastički učinci jesu nemaligne ozljede kože, smanjenje broja stanica u koštanoj srži, zamućenje očne leće itd.

OSNOVNE DOZIMETRIJSKE VELIČINE

Dozimetrijske veličine u užem smislu obuhvaćaju one fizičke veličine koje opisuju međudjelovanje zračenja i tvari, a u širem smislu tu se ubrajaju i one veličine koje karakteriziraju upadni snop zračenja (npr. broj čestica i energiju koju one prenose). Zračenje predaje ozračenoj tvari energiju, zbog čega se mijenjaju i svojstva zračenja i svojstva ozračene tvari. Stoga se dozimetrijske veličine izvode iz energije.

Apsorbirana doza (absorbed dose)

Prolaskom kroz neku tvar zračenje gubi energiju, predajući je atomima i molekulama, zbog čega se mijenjaju svojstva i zračenja i ozračene tvari (slika):



Slika. Model za definiranje dozimetrijskih veličina
Figure. Model for defining dosimetric quantities

Apsorbirana energija, tj. energija predana ozračenoj tvari pokazatelj je učinka zračenja, pa je ona i polazna dozimetrijska veličina (3, 6). Apsorbirana doza, D , jest omjer predane energije (delivered energy), E_D , koju je zračenje predalo nekoj tvari i mase m te tvari:

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m} \quad /1/$$

Jedinica apsorbirane doze jest Gray (1 Gy = 1 Jkg⁻¹). Predana energija E_D jest razlika ukupne energije E_u svih čestica koje su ušle u promatrani element tvari i energije E_i svih čestica koje su ga napustile, umanjena za defekt mase (energijski ekvivalent mase Δm'c², koji je u skladu s teorijom relativnosti ekvivalentan oslobođenoj energiji vezanja) ako je zbog nuklearnih međudjelovanja i međudjelovanja elementarnih čestica došlo do povećanja ozračenog tijela za Δm':

$$E_D = E_u - E_i - \Delta m'c^2 \quad /2/$$

Jedinica predane energije jest Joule (J).

Apsorbirana doza može biti definirana i u nekoj točki:

$$D(P) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta E_D}{\Delta m} \quad /3/$$

Faktor kvalitete (quality factor)

Učinak zračenja, odnosno vjerojatnost stohastičkih efekata ne ovisi samo o predanoj energiji, nego i o vrsti zračenja te o ozračenoj tvari. Stoga jednaka apsorbirana doza različitih vrsta i energijskih područja zračenja uzrokuje u istoj tvari različite učinke. Da bi se procijenio učinak zračenja s obzirom na sveukupne okolnosti, apsorbirana doza korigira se tzv. faktorima modifikacije. Takav težinski faktor, faktor kvalitete, označavao se kao Q. Faktor kvalitete Q definiran je kao funkcija linearnog prijenosa energije, LET odnosno L_∞, (linear energy transfer), mjerom gustoće ionizacije duž traga ionizirajuće čestice u vodi u točki koja se promatra. Interpolirane vrijednosti mogu se izvesti iz tablice 1 (4, 6):

Tablica 1. Ovisnost L_∞-Q
Table 1 Relationship L_∞-Q

Linearni prijenos energije L _∞ u vodi Linear energy transfer L _∞ in water (keV/μm)	Faktor kvalitete Q Quality factor Q
≤ 3,5	1
3,5 ... 7	1 ... 2
1 ... 23	2 ... 5
23 ... 53	5 ... 10
53 ... 175	10 ... 20
≥ 175	20

Za spektar zračenja apsorbirana doza prouzrokovana je česticama različitih vrijednosti L_∞, pa se za nj računa efektivna vrijednost \bar{Q} u točki koja se promatra. Kada razdioba L_∞ u svim točkama volumena koji promatramo nije poznata, dopuštena je upotreba aproksimativnih vrijednosti za \bar{Q} , a vrijednosti \bar{Q} (i za vanjsko i za unutrašnje ozračivanje) navedene su na tablici 2 (4, 6).

Tablica 2. Faktor kvalitete zračenja za biološki učinak različitih vrsta zračenja
Table 2. Quality factor for biological effects of various types of radiation

Zračenje Radiation	Faktor kvalitete \bar{Q} Quality factor \bar{Q}
X-zračenje, γ -zračenje, elektroni / X-rays, γ -rays, electrons	1
Termički neutroni / Thermal neutrons	2,3
Brzi neutroni / Fast neutrons	10
Protoni / Protons	10
α -čestice / α particles	10
Teški ioni / Heavy ions	20

U referenci (7) kaže se da se u radiobiologiji faktor kvalitete Q po tradiciji zove faktor RBE, tj. faktor relativne biološke efikasnosti (Relative Biological Effectiveness), što nije sasvim točno. Zapravo relativna biološka efikasnost jedne vrste zračenja u usporedbi s drugom jest inverzni omjer apsorbiranih doza koje uzrokuju isti stupanj biološkog oštećenja (3). Obično je RBE normaliziran prema nekom određenom zračenju (referentno zračenje), najčešće prema rendgenskom zračenju proizvedenom uz napon 200 kV. Naime, većina podataka o djelovanju zračenja dobivena je po primjeru radiologâ profesionalno izloženih X-zrakama energije do 250 kV. Po definiciji sva ionizacijska zračenja koja stvaraju 100 parova iona (ili manje) na putu od 1 μm imaju RBE jednaku jedinici.

Iako su vrijednosti Q i \bar{Q} procijenjene na osnovi RBE, te vrijednosti također vode računa i o tome da su učinci manjih apsorbiranih doza ekstrapolirani od učinaka visokih doza u kojih se štetni učinak može izravno procijeniti. Stoga vrijednosti iz tablica 1. i 2. ne predstavljaju vrijednosti RBE za učinke kao što su stohastički učinci kod niskih doza i nestohastički učinci kod visokih doza. Budući da je Q definiran bez referencije u odnosu na biološki učinak, on ne odgovara niti jednoj određenoj vrijednosti RBE.

Modificirajući faktori (modifying factors)

Posljedice apsorbirane doze u tkivu ovise i o vremenskoj razdiobi doze. Nespecificirani težinski faktori, dakle umnožak svih ostalih modificirajućih faktora označava se kao N . Učinak vremenske razdiobe doze mogao se kompenzirati pomoću vrijednosti modificirajućeg faktora N , ali u praksi je ICRP u slučaju bioloških uzoraka za N preporučio jediničnu vrijednost (3, 4).

Dozni ekvivalent (dose equivalent)

Produkt D , Q i N u točki $P(x,y)$ koju promatramo:

$$H = Q N D(P)$$

/4/

naziva se dozni ekvivalent (H). Dozni ekvivalent (dvostruko ponderirana apsorbirana doza) mjera je učinka apsorbirane doze na tkivo, kako bi se izrazile razlike u biološkom djelovanju različitih vrsta ionizirajućeg zračenja.

H dakle ima jednaku dimenziju (energija po masi) kao i apsorbirana doza (budući da su Q i N bezdimenzijske veličine), pa bi mogao imati i jednaku mjernu jedinicu kao i apsorbirana doza (Jkg^{-1}). D i H općenito imaju različite brojčane iznose, osim u specijalnom slučaju kada su svi faktori modifikacije jednaki jedinici. Da bi se jače razlikovalo kad se radi o jednoj, a kada o drugoj od tih veličina te da bi se izbjegle moguće pogreške kobne za ljudsko zdravlje, odstupilo se od pravila da jednake jedinice imaju i jednake nazive. Naime, apsorbirana doza D se u principu mjeri instrumentom (donekle je izuzetak interna apsorpcijska dozimetrija), a H jest ekvivalent te doze u biološkom tkivu koji se izračuna. Stoga je veličini H u području radiološke zaštite iznimno dana posebna jedinica, Sievert ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ Jkg}^{-1}$).

Drugim riječima, fizička veličina H jest mjera štetnog potencijala apsorbirane doze, odnosno apsorbirana doza povećana odgovarajućim težinskim faktorom (faktor kvalitete). Kako je ekvivalent stvar, čin, pojam ili veličina istog značenja ili praktične vrijednosti, to se taj štetni potencijal apsorbirane doze, odnosno fizička veličina H zove dozni ekvivalent. Zbog same definicije faktora kvalitete Q, veličina dozni ekvivalent ne smije se upotrebljavati za procjenu ranih posljedica velikih ozračenja, koja mogu uključivati ozbiljne nestohastičke učinke.

Međutim, u hrvatskom se jeziku za H uz izraz dozni ekvivalent susreću i nazivi ekvivalentna doza i ekvivalent doze. *Brezinščak* pri nabranjanju definicija zakonitih mjernih jedinica za ionizirajuće zračenje za H navodi oba termina (8), s time da prednost daje izrazu dozni ekvivalent, što se vidi i u naslovu *Brezinščakova* rada (9). M. *Brezinščak* zapravo upotrebljava termin ionizirajuće zračenje. Ispravno bi trebalo biti ili ionizirajuće zračenje (zračenje koje ionizira) ili ionizacijsko zračenje (ukoliko se želi takvo zračenje razlikovati od drugih zračenja). Poblize značenje tih termina raspravljeno je u referenci (10). *Ražnjević* (11) upotrebljava termin dozni ekvivalent, a u zagradi navodi i termin ekvivalentna doza. Međutim, spominje samo brzinu doznog ekvivalenta, a ne i brzinu ekvivalentne doze. U Tehničkoj enciklopediji u članku o nuklearnom zračenju (7) pretežno se upotrebljava termin ekvivalent doze, dok je izraz dozni ekvivalent spomenut samo u zagradi, a ekvivalentna doza u bilješci. *Knapp*, također u Tehničkoj enciklopediji navodi naziv energetska (ekvivalentna) doza (12). U Općoj enciklopediji (13) u članku o zaštiti od ionizirajućeg zračenja *Jakobović* upotrebljava izraz ekvivalentna doza, a u zagradi ima dozni ekvivalent. Isti je autor dosljedan i u svojoj knjizi (14) u kojoj također spominje oba termina. No, u ranijoj knjizi (15) pri definiciji mjerne jedinice Sievert *Jakobović* navodi da je to jedinica za ekvivalentnu energetska dozu. *Feretić* upotrebljava izraz ekvivalentna doza (16). U publikacijama koje prate rad Nuklearne elektrane Krško susreće se samo izraz ekvivalentna doza (17-19). Izraz ekvivalentna doza u upotrebi je i u knjizi »Radijacija i zaštita u medicinskoj dijagnostici« (20). U vrlo ekstenzivnoj tablici međunarodnih mjernih jedinica danj u dodatnom dijelu telefonskog imenika (21) susreće se samo naziv dozni ekvivalent. U brošuri »100 temeljnih pojmova iz nuklearne tehnologije« (22) spominje se samo ekvivalent doze. No isti autori u svom sljedećem radu, »Glosaru nuklearnih termina«, navode ekvivalentnu dozu kao glavnu natuknicu, dok ekvivalent doze stavljaju u zagradu (23). *Paar* u knjizi »Energetska kriza« upotrebljava

izraz ekvivalentna doza (24) te naglašava da će nadalje pod pojmom doza razumijevati ekvivalentnu dozu. U prijevodu znanstvenopopularne knjige o katastrofi čornobiljskog nuklearnog reaktora u upotrebi je izraz ekvivalent doze (25). U udžbeniku »Osnove radijacione dozimetrije i zaštite od zračenja« veličina H zove se ekvivalent doze (26) te se navodi da je stara jedinica za ekvivalent doze rem, što je kratica od engleskog »roentgen-equivalent man« (ekvivalent rendgena za čovjeka).

Općenito, u znanstvenopopularnim knjigama (27), udžbenicima te zbornicima simpozija i kongresa za zaštitu od zračenja (28, 29), susreće se gotovo isključivo termin ekvivalentna doza kada se radi o autorima sa srpskoga govornog područja. Jedina iznimka, u dostupnoj literaturi, kada autori sa srpskoga govornog područja ne upotrebljavaju naziv ekvivalentna doza jest rad »Dvoparameterska formula slabljenja ekvivalenta doze neutronske zračenja u običnom betonu« (30). Autori s hrvatskoga govornog područja upotrebljavaju jednako valjane termine dozni ekvivalent ili ekvivalent doze, ali često i ekvivalentna doza.

U Zakonu o zaštiti od ionizirajućeg zračenja i o posebnim mjerama sigurnosti pri upotrebi nuklearne energije objavljenom u Službenom listu SFRJ (31) i pripadnim Pravilnicima (32) za veličinu H u upotrebi je naziv ekvivalentna doza. Zakonom o preuzimanju zakona (33) u Republici Hrvatskoj preuzet je Zakon (31) i pripadajući pravilnici; time je u Republici Hrvatskoj za dozni ekvivalent H u zakonskoj upotrebi naziv ekvivalentna doza. U novom prijedlogu Zakona o ionizirajućem zračenju (34) doze se ne spominju već će to biti regulirano posebnim pravilnicima.

Zanimljivo je vidjeti zašto je naziv ekvivalentna doza dobio prednost pred nazivom dozni ekvivalent, odnosno ekvivalent doze. Za dozni ekvivalent IAEA na različitim jezicima navodi nazive (5):

engleski: dose equivalent
francuski: équivalent de dose
španjolski: dosis equivalente
ruski: эквивалентная доза

Ako se doslovno prevede naziv za H s engleskog, francuskog, španjolskog i ruskog jezika, redom dobivamo: dozni ekvivalent, ekvivalent doze, dozni ekvivalent i ekvivalentna doza. Budući da su dozni ekvivalent i ekvivalent doze sinonimi, možemo zaključiti da jedino u ruskom taj termin ima drugačije značenje, budući da bi ekvivalent doze na ruskom bio: эквивалент дозы. (Termin dozni ekvivalent u ruskom jeziku nije prevodiv.) Kako je srpska kulturna tradicija čvrsto povezana s ruskom, nije čudno da je u službenu stručnu i znanstvenu terminologiju na području bivše SFRJ ušao termin ekvivalentna doza.

Efektivni dozni ekvivalent (effective dose equivalent)

To je onaj dozni ekvivalent (ekvivalent doze) koji se koristi kada je tijelo nejednoliko ozračeno, pa se uzima u obzir različita osjetljivost pojedinih organa na zračenje. Definiran je kao zbroj dozni ekvivalenata u pojedinim dijelovima tijela - organima

i tkivima - pomnožen s težinskim faktorima za pojedine dijelove tijela (weighting factors).

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad /5/$$

Težinski faktori opisuju udio štetnosti stohastičkih učinaka što dolazi od tkiva T u odnosu na ukupnu štetnost stohastičkih učinaka pri jednoliko ozračenom cijelom tijelu. Težinski faktori prikazani su na tablici 3 (4, 6).

Tablica 3. Težinski faktori za pojedine dijelove tijela
Table 3 Organ specific weighting factors

Dio tijela Organ or tissue	Težinski faktor w_T Weighting factor w_T
Gonade / Gonads	0,25
Dojke / Breast	0,15
Koštana srž / Red bone marrow	0,12
Pluća / Lung	0,12
Štitnjača / Thyroid	0,03
Pokosnica / Bone surfaces	0,03
Ostalo / Remainder	0,30
Cijelo tijelo / Whole body	1,00

Ekvivalentna doza (equivalent dose)

U preporukama ICRP-a u publikaciji 60 (3) umjesto termina dozni ekvivalent uvedena je ekvivalentna doza koja je jednaka produktu apsorbirane doze usrednjene po nekom organu ili tkivu (dakle ne u točki) i težinskih faktora ozračivanja (radiation weighting factors) koji uzimaju u obzir razne kvalitete primljenog zračenja:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad /6/$$

gdje su

$D_{T,R}$ apsorbirana doza zračenja R, usrednjena po tkivu ili organu T,
 w_R težinski faktor ozračivanja.

Takva ponderirana doza jest striktno doza, te je ICRP gotovo potpuno napustila koncept doznog ekvivalenta (osim u specijalnim slučajevima). Promjena naziva također upućuje i na promjenu od faktora kvalitete u težinske faktore ozračivanja.

Razlog uvođenja ekvivalentne doze umjesto doznog ekvivalenta jest to što je apsorbirana doza usrednjena po nekom volumenu tkiva ili organa bolji pokazatelj kasnijih stohastičkih učinaka. Iako je proces ionizacije diskontinuirani proces, ukupna predana energija u nekoj definiranoj masi biološkog materijala (dakle u

volumenu, a ne u točki) u dobroj je korelaciji s rezultirajućim biološkim učincima. Stoga je uporaba makroskopskih dozimetrijskih veličina empirički opravdana.

Kako navodi ICRP (3) nije isključeno da će budući razvoj dozimetrije pokazati da je dozimetrijske veličine bolje definirati na osnovi statističkih razdioba ionizacijskih događaja u malome volumenu koji korespondira dimenzijama bioloških entiteta kakvi su stanična jezgra ili molekularna DNA. No opet se radi o nekom definiranom volumenu, a ne točki.

Vrijednost težinskih faktora ozračivanja iz relacije (6) za određenu vrstu energije i zračenja odabrao je ICRP tako da predstavljaju vrijednosti relativne biološke efikasnosti tog zračenja u pogledu induciranja stohastičkih učinaka pri niskim dozama. Stoga su vrijednosti težinskih faktora ozračivanja općenito kompatibilne s faktorom kvalitete Q . Težinski faktori ozračivanja prikazani su na tablici 4 (3).

Tablica 4. Težinski faktori ozračivanja
Table 4 Radiation weighting factors

Vrsta zračenja i energije <i>Type of radiation and energy range</i>	Težinski faktor ozračivanja w_R <i>Radiation weighting factor w_R</i>
Fotoni / <i>Photons</i>	1
Elektroni i mioni svih energija / <i>Electrons and muons, all energies</i>	1
Neutroni, energija / <i>Neutrons, energy</i>	5
< 10 keV	5
10 keV – 100 keV	10
> 100	20
100 keV – 2 MeV	10
> 20 MeV	5
Protoni (bez odbijenih protona) energije > 2 MeV / <i>Protons (other than recoil protons) energy > 2 MeV</i>	5
α -čestice, fisijski fragmenti, teške čestice / <i>α-particles, fission fragments, heavy nuclei</i>	20

Za sve ostale vrste ionizirajućeg zračenja i energija koje nisu uključene u tablicu 4. aproksimacija težinskih faktora ozračivanja može se proračunati iz efektivnih vrijednosti faktora kvalitete \bar{Q} i linearnog prijenosa energije kako to detaljno opisuje ICRP (3).

Težinski faktori ozračivanja w_R ovise o vrsti i energiji zračenja, a neovisni su o tkivu ili organu.

Dakle, veličina definirana relacijom /4/, koja se u literaturi uz dozni ekvivalent i ekvivalent doze neispravno nazivala i ekvivalentna doza, a fizikalno uopće i nije doza, različita je od ekvivalentne doze definirane relacijom /6/.

Efektivna doza (effective dose)

Efektivna doza jest ponderirana ekvivalentna doza, odnosno dvostruko ponderirana apsorbirana doza, a uvedena je iz istih razloga iz kojih se iz doznog ekvivalenta uveo efektivni dozni ekvivalent. Efektivna doza, E , definirana je relacijom:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T \sum_R w_T w_R D_{T,R} \quad /7/$$

Time se napustio dotadašnji efektivni dozni ekvivalent H_E . w_T jesu težinski faktori za pojedina tkiva (tissue weighting factors), a prikazani su na tablici 5 (3).

Tablica 5. Težinski faktori ozračivanja za pojedina tkiva
Table 5 Tissue weighting factors

Dio tijela <i>Tissue or organ</i>	Težinski faktor tkiva w_T <i>Tissue weighting factor, w_T</i>
Gonade / <i>Gonads</i>	0,20
Koštana srž / <i>Red bone marrow</i>	0,12
Debelo crijevo / <i>Colon</i>	0,12
Pluća / <i>Lung</i>	0,12
Želudac / <i>Stomach</i>	0,12
Mjehur / <i>Bladder</i>	0,05
Dojke / <i>Breast</i>	0,05
Jetra / <i>Liver</i>	0,05
Ždrijelo / <i>Oesophagus</i>	0,05
Štitnjača / <i>Thyroid</i>	0,05
Koža / <i>Skin</i>	0,01
Površina kosti / <i>Bone surface</i>	0,01
Ostalo / <i>Remainder</i>	0,05
Cijelo tijelo / <i>Whole body</i>	1,00

Težinski faktori ozračivanja tkiva jesu prošireni faktori iz tablice 2, budući da su se spoznaje iz oblasti radiobiologije u međuvremenu unaprijedile. Normalizirani su na jediničnu vrijednost kako bi jednolika ekvivalentna doza na cijelo tijelo dala numerički jednaku efektivnu dozu.

Za razliku od težinskih faktora ozračivanja w_R , vrijednosti težinskih faktora w_T neovisni su o energiji i vrsti zračenja, nego ovise o organu ili tkivu. Kako navodi ICRP (3) ta su pojednostavnjenja možda samo aproksimacija stvarne biološke situacije, ali je na taj način moguće definirati polje zračenja izvan organizma pomoću dozimetrijskih veličina, bez potrebe specificiranja »organa mete«.

POMOĆNE DOZIMETRIJSKE VELIČINE

U praksi su se za proračunavanje doze primljene u intervalu vremena nakon unosa radioaktivnog materijala u tijelo pokazale korisne neke pomoćne dozimetrijske veličine.

Committed equivalent dose

Koristi se kod jednokratnog unošenja radioaktivnog materijala u organizam i pokazuje ukupnu dozu kojom će pojedinac biti ozračen u sljedećih t godina. Vrijeme t iznosi za odrasle ljude 50 godina, tj. radni vijek, a za djecu $t=70$ godina, tj. životni vijek.

Committed equivalent dose definirana je (3) vremenskim integralom brzine ekvivalentne doze (equivalent dose rate):

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt \quad /8/$$

gdje je t_0 trenutak unošenja radioaktivnog materijala u organizam.

Analogno se pomoću brzine efektivne doze definira i committed effective dose.

Ranije je ICRP veličinu committed effective dose equivalent izvodio iz brzine efektivnog doznog ekvivalenta ($H_E = \Delta H / \Delta T$), te označavao s $H_{E,50}$ (za vrijeme integriranja uzimalo se točno 50 godina):

$$H_{E,50} = \int_{t_0}^{t_0 + 50} \dot{H}_E(t) dt \quad /9/$$

U drugim jezicima veličina $H_{E,50}$ nazivala se (5):

engleski: committed effective dose equivalent,

francuski: équivalent de dose efficace engagé

španjolski: dosis equivalente efectiva integrada durante 50 años

ruski: полувексовая ожидаемая эффективная эквивалентная доза

Kako se ta veličina u praksi vrlo rijetko upotrebljava, osim u vrlo specifičnim proračunima, u dostupnoj literaturi hrvatskoga govornog područja ona se spominje vrlo rijetko, naprimjer u radu (35), te je bila prevedena opisno: efektivni ekvivalent doze integriran kroz period od 50 godina, uz navođenje i engleskog naziva.

U dostupnoj srpskoj literaturi $H_{E,50}$ spominje se samo u udžbenicima ili u preglednim radovima. Bojović je tu veličinu pokušao prevesti s vezana ekvivalentna doza (36). Interesantno je da u definiciji Bojović objašnjava vezanu ekvivalentnu dozu kao ekvivalent doze (a ne kao ekvivalentnu dozu, što prije dosljedno upotrebljava) koji će se akumulirati u čovjeku tijekom intervala od 50 godina (maksimalan radni vijek). Zašto vezana? Bojović objašnjava to ovako: »Ova doza vezana je za čoveka pošto nastaje zračenjem radioaktivnih materijala koji se posle unošenja deponuju i ostaju vezani u čovečijem telu«. No ideja za takav prijevod možda je dobivena iz činjenice da glagol commit ima za sinonim glagol bind, što znači vezati, svezati.

Naziv te veličine u zakonu SFRJ (31, 32) bio je očekivana ekvivalentna doza. Očito je to opisni prijevod s ruskog jezika (ожидаемая = očekivana), ali bi ispravan naziv trebao biti očekivani dozni ekvivalent.

U referenci (23) se pod drugim značenjem za natuknicu očekivana doza navodi committed dose kao ukupna efektivna ili ekvivalentna doza koju će pojedinac primiti zbog unosa radioaktivne tvari u tijelo.

Za veličinu committed equivalent dose kako je definira ICRP u publikaciji 60 (3) po mome mišljenju najpogodniji naziv na hrvatskom jeziku mogao bi se izvesti pomoću španjolskog (dosis equivalente efectiva integrada durante 50 años), uvažavajući da je dozni evivalent postao ekvivalentna doza: integralna ekvivalentna doza za radni vijek. (Ako je vrijeme integracije u jednadžbi /8/ 70 godina, onda: integralna ekvivalentna doza za životni vijek.) Tako bi se u samome nazivu znalo o čemu se radi, dok očekivana doza u sebi ne sadržava informaciju o integralu.

Analogno: integralna efektivna doza za radni (životni) vijek.

Dose commitment

Kao opći slučaj integralne ekvivalentne doze za radni vijek može se smatrati veličina:

$$H_{C,T} = \int_0^{\infty} \dot{H}_T(t) dt \quad /10/$$

Ona se koristi kod kontinuiranog izlaganja zračenju pojedinca tijekom neodređenog razdoblja. (Umjesto pojedinca, može se raditi i o grupi, kritičnoj populaciji ili čitavom svjetskom stanovništvu ako se radi o dozi koju će tijekom vremena primiti generacije ljudi.

Prije se ta veličina označavala kao $H_{E,C}$, a nazivala se (5)

engleski: effective dose equivalent commitment

francuski: engagement d'équivalent de dose efficace

španjolski: compromiso dosis equivalente efectiva

ruski: ожидаемая эффективная эквивалентная доза

Bojović prevodi taj termin s uslovna (komitmentna) doza i kaže: »Slobodan prevod za naziv ove doze je načinjen posmatrajući njezino fizičko značenje i okolnosti, odnosno uslove u kojima se ona mora uzeti u obzir« (36).

Marković također upotrebljava termin komitmentna doza što je izuzetno nespretan poluprijevod s engleskog jezika (37). U radu (27) upotrebljava se termin angažovana efektivna ekvivalentna doza, što je isto tako neprihvatljivo.

Nazivi komitmentna doza i angažovana doza nemaju nikakvog izgleda da zažive u jezičnoj praksi, vjerojatno čak ni u srpskom jeziku.

Miklavžič je za dose equivalent commitment predlagao naziv predviđena doza (38), što nije ispravno, budući da dose equivalent nije doza, nego ekvivalent doze. U još dvjema dostupnim referencama sa slovenskoga govornog područja dose equivalent commitment prevodi se kao predviđena doza (39, 40).

Interesantno da se u referenci (23) i dose commitment prevodi kao očekivana doza (isto kao i committed dose). Također se navodi: ako se očekivana doza

računa samo do nekog odabranog trenutka, tada se naziva nepotpuna očekivana doza. Nepotpuna stoga što su truncated dose i incomplete dose sinonimi. Npr. u (5): truncated (incomplete) dose equivalent commitment.

Za dose commitment kako je definiran u referenci (3) naziv predviđena doza bio bi prihvatljiv i u hrvatskom jeziku. No, u tom bi slučaju za committed equivalent dose trebao biti u hrvatskom jeziku usvojen naziv očekivana ekvivalentna doza.

U zakonu (31, 32) nije bio definiran naziv za tu veličinu.

Kao opći slučaj integralne ekvivalentne doze za radni vijek po mome mišljenju najpogodniji prijevod bi dose commitment = integralna ekvivalentna doza, te analogno effective dose commitment = integralna efektivna doza.

ICRU VELIČINE ZA INDIVIDUALNI MONITORING I MONITORING U OKOLIŠU

U zaštiti od zračenja pri mjerenju polja zračenja (u svrhu monitoringa) u specijalnoj su upotrebi još četiri dozimetrijske veličine. Te veličine definirao je ICRU (41), ICRP ih spominje (3), ali će ih detaljnije razmotriti kao dio revizije ICRP publikacije 51 (42). Te veličine definirane su pomoću pojma doznog ekvivalenta u točki, a ne pojmom ekvivalentne doze definirane jednadžbom /6/. To su redom:

a) Veličina koja povezuje vanjsko polje zračenja s efektivnom dozom, pogodna za prodorno zračenje: ambient dose equivalent $H^*(d)$, odnosno okolišni dozni ekvivalent.

b) Veličina koja povezuje vanjsko polje zračenja s efektivnom dozom, pogodna za slabo prodorno zračenje: directional dose equivalent $H'(d)$, odnosno usmjerni dozni ekvivalent.

c) Veličina koja povezuje vanjsko polje zračenja s ekvivalentnom dozom, pogodna za unutrašnje organe i tkiva, ozračene prodornim zračenjem: individual dose equivalent, penetrating, $H_p(d)$, odnosno individualni dozni ekvivalent, prodirući.

d) Veličina koja povezuje vanjsko polje zračenja s ekvivalentnom dozom, pogodna za površinske organe i tkiva ozračene i prodornim i slabije prodornim zračenjem: individual dose equivalent, superficial, $H_s(d)$, odnosno individualni dozni ekvivalent, površinski.

Prve dvije veličine odnose se na monitoring u okolišu, a druge dvije na individualni (osobni) monitoring.

ZAKLJUČNE NAPOMENE

Dozimetrijska veličina za koju se u literaturi (prije preporuka ICRP-a u publikaciji 60) nalaze nazivi ekvivalentna doza, dozni ekvivalent ili ekvivalent doze jest je-

dinstvena veličina dozni ekvivalent za koju se na hrvatskomu govornom području nije trebao upotrebljavati naziv ekvivalentna doza.

No, Zakonom o preuzimanju saveznih zakona iz oblasti zdravstva (33) u Republici Hrvatskoj je u zakonskoj upotrebi naziv veličine H ekvivalentna doza. Ta veličina nije definirana u skladu s preporukama ICRP-a iz publikacije 60 (3), koje još nisu u hrvatskom zakonodavstvu uvažene, nego u skladu s preporukama ICRP-a iz publikacije 26 (4).

Ekvivalentna doza (odnosno apsorbirana doza ponderirana faktorima w_R) kako je definira ICRP u publikaciji 60 jest konceptualno nova dozimetrijska veličina čime se ne samo pojednostavnjuje dotadašnji dozni ekvivalent (dvostruko ponderirana apsorbirana doza faktorima Q i N) nego i napušta upotreba faktora kvalitete i modificirajućeg faktora N. Ipak, ICRP dopušta (ako je to potrebno) aditivnost, doznog ekvivalenta iz relacije /4/ i ekvivalentne doze definirane relacijom /6/ bez preračunavanja doznog ekvivalenta u ekvivalentnu dozu. Aditivnost vrijedi i za efektivni dozni ekvivalent definiran relacijom (5) i efektivnu dozu definiranu relacijom /7/. No treba naglasiti da je razlog aditivnosti ne taj što se radi o istim veličinama, već to što bi preračunavanje doznog ekvivalenta iz ranijih radova i publikacija u ekvivalentnu dozu definiranu u /3/ bilo gotovo nemoguće.

Umjesto zaključka, recimo da bi Ministarstvo znanosti Republike Hrvatske neizostavno moralo imati i jezikoslovca, koji bi usko surađivao sa stručnjacima i znanstvenicima raznih struka, a osobito bi morao obratiti pozornost na »Glasilo zavoda«, periodični bilten Državnog zavoda za normizaciju Republike Hrvatske, koji bi se uz normizaciju i mjeriteljstvo trebao baviti i nazivljem. Pri objašnjavanju dozimetrijskih jedinica i njihovu preuzimanju iz ICRP-ovih publikacija u hrvatske zakone, trebalo bi uvažavati i mišljenje strukovnog društva kao što je Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja - HDZZ (Zagreb, Ksaverska cesta 2, odnosno Bijenčka cesta 54).

LITERATURA

1. Babić S. Hrvatski jezik u političkom vrtlogu. Zagreb: Vlastito izdanje, 1990.
2. Gortan V. Briga za pravilan književni jezik. Jezik 1957;4.
3. *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*. Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon Press, 1990.
4. *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*. Publication 26: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon Press, 1977.
5. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. Radiation Protection Glossary, Safety Series No. 76. Vienna: IAEA, 1986.
6. *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*. ICRP Publication 42: A Compilation of the Major Concepts and Quantities in Use by ICRP. Oxford: Pergamon Press, 1984.
7. Ilaković K, Turk M. Nuklearno zračenje. U: Tehnička enciklopedija. Zagreb: Leksikografski zavod »Miroslav Krleža« 1984;9:535-59.

8. *Brezinščak M.* Zakonska metrologija. U: Tehnička enciklopedija. Zagreb: Leksikografski zavod »Miroslav Krleža« 1982;8:496-525.
9. *Brezinščak M.* O definiciji jedinice doznog ekvivalenta sivert. U: Zbornik radova X jugoslavenskog simpozija o mjerenjima i mjernoj opremi. Budva: 1982.
10. *Babić S.* Odgovori na desetak pitanja, Ionizirajuće zračenje ili ionizacijsko zraćenje. Jezik 1989;36(5):158.
11. *Ražnjević K.* Fizikalne veličine i mjerne jedinice međunarodnog SI sustava. Zagreb: Nakladni zavod Znanje, 1985.
12. *Knapp V.* Nuklearna energija. U: Tehnička enciklopedija. Zagreb: Leksikografski zavod »Miroslav Krleža« 1984;9:431-48.
13. *Jakobović Z.* Zaštita od ionizirajućeg zračenja. U: Opća enciklopedija. Zagreb: Leksikografski zavod »Miroslav Krleža« 1988;dopunski svezak:739-44.
14. *Jakobović Z.* Ionizirajuće zračenje i čovjek. Zagreb: Školska knjiga, 1988.
15. *Jakobović Z.* Leksikon mjernih jedinica. Zagreb: Školska knjiga, 1981.
16. *Feretić D.* Uvod u nuklearnu tehnologiju. Zagreb: Školska knjiga, 1992.
17. *Mikuličić D.* Nuklearne elektrane: činjenice za razmišljanje. Zagreb: ZEOH – Zajednica elektroprivrednih organizacija Hrvatske i Samoupravna interesna zajednica potrošača električne energije Hrvatske, 1988.
18. *Mikuličić D, Gradišar Lj, Pavlinić Z.* Činjenice o zračenju. Krško: ATS NE Krško, 1989.
19. Nuklearna elektrana Krško. NEK: Energija i okoliš, Bilten o radu NE Krško i njezinom utjecaju na okoliš br. 9. Zagreb: Ministarstvo industrije, brodogradnje i energetike Republike Hrvatske, 1992.
20. *Hebrang A, Petrović F.* Radijacija i zaštita u medicinskoj dijagnostici. Zagreb: Medicinska knjiga, Beograd-Zagreb, 1987.
21. Telefonski imenik 85/86 područja tranzitne centrale Zagreb (s dodatkom), Zajedničko izdanje PTT prometa Bjelovar, Karlovac, Varaždin i Zagreb. Zagreb: 1985:1074-8.
22. *Lokner V, Levanač I.* 100 temeljnih pojmova iz nuklearne tehnologije. Zagreb: Javno poduzeće za zbrinjavanje radioaktivnog otpada d.o.o., 1992.
23. *Lokner V, Levanač I.* Glosar nuklearnih termina. Zagreb: Agencija za posebni otpad d.o.o., 1993.
24. *Paar V.* Energetska kriza: gdje (ni)je izlaz. Zagreb: Školska knjiga, 1984.
25. *Hawkes N, Lean G, Leigh D, McKie R, Pringle P, Wilson A.* Najgora nesreća na svijetu, Černobil – kraj nuklearnog sna. Zagreb: Globus 1986. (Prevela: Jasenka Planinc)
26. *Paić V, Paić G.* Osnove radijacione dozimetrije i zaštite od zračenja. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1983.
27. *United Nations Environmental Programme (UNEP).* Radijacija, doze, posljedice, rizici, Beograd: Nolit, 1986. (prevela: Ema Časar)
28. Zbornici radova XIII-XVI jugoslavenskog simpozija zaštite od zračenja, Pula 1985, Novi Sad 1987, Priština 1989, Neum 1991.
29. Zbornik radova Prvog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja. Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja 1992.
30. *Simović R, Staničić V, Marinković N.* Dvoparameterska formula slabljenja ekvivalenta doze neutronske zračenja u običnom betonu. U: Zbornik radova XV jugoslavenskog simpozija zaštite od zračenja. Priština: Jugoslavensko društvo za zaštitu od zračenja, 1989.
31. Zakon o zaštiti od ionizirajućih zračenja i o posebnim mjerama sigurnosti pri upotrebi nuklearne energije. Službeni list SFRJ broj 62/1984.
32. Pravilnik o granicama iznad kojih stanovništvo i osobe koje rade s izvorima ionizirajućih zračenja ne smiju biti izloženi ozračenju, o mjerenjima stupnja izloženosti ionizirajućim zračenjima osoba koje rade s izvorima tih zračenja te o provjeri kontaminacije radne okoline. Službeni list SFRJ broj 33/1989.

33. Zakon o preuzimanju saveznih zakona iz oblasti zdravstva koji se u Republici Hrvatskoj primjenjuju kao republički zakoni. Narodne novine, Službeni list Republike Hrvatske, broj 53/1991.
34. Prijedlog zakona o ionizirajućem zračenju. Zagreb: Ministarstvo zdravstva i socijalne skrbi, 1993.
35. Franić Z. Procjena frakcije energije alfa čestica emitiranih iz mineralnog dijela trabekularne kosti, apsorbirane u koštanoj moždini. Arh hig rada toksikol 1989;40:29-36.
36. Bojović P. Zaštita od zračenja – neki važniji pojmovi i principi. U: I. Draganić (ur). Radioaktivni izotopi i zračenja, knjiga I. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke »Boris Kidrič«, Vinča i Centar za permanentno obrazovanje »Škola«, 1981; 232-46.
37. Marković P. Koncepti kolektivne ekvivalentne doze i kolektivne efektivne ekvivalentne doze i njihova primena u zaštiti od zračenja. U: Zbornik radova XIII jugoslavenskog simpozija zaštite od zračenja. Pula: Jugoslavensko društvo za zaštitu od zračenja, 1985; 1-8.
38. Miklavžić U. Osobni kontakt, Ljubljana: Institut Jožef Stefan, 1991.
39. Strokovna komisija za jeдрsko varnost. Intervencijski nivoji za primer jeдрske oziroma radiološke nesreće. Ljubljana: Ministarstvo za okolje in prostor, Republiška uprava za jeдрsko varnost, 1993.
40. Kovač Ž. Dozne omejitve za posameznike iz intervencijskih ekip (predlog). Krško: 1993.
41. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU Report No. 39: Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. Bethesda: 1985.
42. International Commission on Radiological Protection. Data for Use in Protection Against External Radiation, Annals of the ICRP 17(2/3). Oxford: Pergamonn Press, 1987. ICRP Publication 51.

Summary

EQUIVALENT DOSE OR DOSE EQUIVALENT?

In the Croatian language the terms denoting certain physical quantities in the field of radiation protection dosimetry lack precision. Consequently, either the English expressions or mathematical formulas are used instead. The situation is even worse as only a limited number of textbooks, reference books and professional papers are available in the Croatian language. This paper reviews dosimetric quantities and their definitions, and sets forth a survey of the radiation dosimetry terms in literature. The terminology is both non-uniform and imprecise, especially since the latest recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) have introduced new concepts of some dosimetric quantities. Also, Croatian terms for certain dosimetric quantities still have not been fully accepted. Bearing in mind the need for clear and well defined technical terms the author proposes Croatian terms for several dosimetric quantities.

Key terms:

dosimetric quantities, ICRP recommendations, terminology

Requests for reprints:

Dr Z. Franić
Institute for Medical Research
and Occupational Health
2 Ksaverska St., POB 291
41001 Zagreb, Croatia