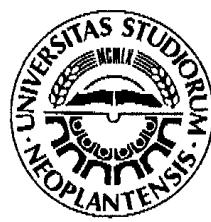




UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Procena doze γ zračenja usled prisustva prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu

- diplomski rad -

Mentor: dr Miodrag Krmar

Kandidat: Katarina Milić

Novi Sad, 2019

Sadržaj

1	Prirodna radioaktivnost.....	6
1.1	Radioaktivni nizovi uranijuma i torijuma	6
2	Radioaktivno zračenje.....	10
2.1	α -raspad	10
2.2	β -raspad	10
2.3	γ -raspad	11
3	Interakcija gama zračenja sa materijom.....	13
3.1	Fotoelektrični efekat.....	13
3.2	Komptonov efekat.....	13
3.3	Stvaranje parova	14
4	Atenuacija gama zračenja	15
4.1	Linearni i maseni atenuacioni koeficijent	15
5	Dozimetrija	17
5.1	Ekspoziciona doza.....	17
5.2	Apsorbovana doza.....	18
5.3	Ekvivalentna doza	19
5.4	Dejstvo zračenja na ćeliju	19
5.5	Dejstvo zračenja na organizam	21
6	Γ konstanta.....	23
6.1	Maseni apsorpcioni koeficijent vazduha	25
6.2	Računanje gama konstante	26
6.3	Tačkasti izvor	32
6.4	Doprinos uranijuma i torijuma	33
6.5	Ekvivalentna aktivnost radijuma	34
7	Neki najprostiji oblici izvora zračenja	35
7.1	Linijski izvor	35
7.2	Površinski izvor.....	35
7.3	Zapreminske izvore	36
7.4	Atenuacioni koeficijent granita	37
7.5	Računanje ekspozicione doze za cilindrični izvor	39
8	Doza od građevinskog materijala.....	41
8.1	Radioaktivnost građevinskog materijala	41
8.2	Aproksimiranje sferom i računanje doze	42
8.3	Zavisnost doze zračenja od debljine i poluprečnika sferne ljuške	44
8.4	Aproksimacija zidova cilindričnim izvorom.....	48
8.5	Računanje zapreminske aktivnosti	51

8.6 Rezultati:	52
9 Zaključak.....	60

Uvod

Prirodni radioaktivni elementi, od kojih su najbrojniji oni iz tri porodice dugoživećih radionuklida ^{238}U , ^{235}U i ^{232}Th su veoma rasprostranjeni u Zemljinoj kori, uglavnom u malim koncentracijama. Mogu se naći u stenama, zemljištu, rastvorenim u vodi, pa čak i u živim organizmima. To znači da su sva živa bića, uključujući i čoveka neprekidno izložena uticaju zračenja koje potiče od okolnih prirodnih struktura. Procenjeno je da je neka srednja doza prirodnog zračenja kojoj je čovek izložen od strane tla i okoline oko 0.48 mSv godišnje. Ovome treba dodati i procenjenih 0.39 mSv godišnje koji potiču od kosmičkog zračenja (Referenca [1] UNSCEAR). Sama činjenica da život na Zemlji postoji, dovoljno ubedljivo govori u prilog tvrdnje da se toliki nivo doze može smatrati bezopasnim. No, kako se građevine u kojima ljudi žive i rade prave od materijala uzetih iz prirode, neminovno je da i u njima budu prisutni prirodni radionuklidi. To znači da se na taj način mogu stvoriti uslovi da u prostoru u kome čovek obitava ukupna doza zračenja kojoj je izložen bude znatno veća od doze koja potiče od prirodnih izvora.

S obzirom da građevinski materijali u sebi sadrže određenu količinu prirodnih radionuklida, da se stanovništvo ne bi nepotrebno izlagalo povišenim dozama zračenja, u velikom broju država je uvedena neka vrsta kontrole nivoa aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu. Načini kontrole radioaktivnosti građevinskog materijala propisani su raznim pravilnicima, od države do države. Da bi se regulativa u toj oblasti na neki način unificirala, pravilnikom IAEA (Referenca [2]) su date osnovne preporuke koje se tiču kontrole i nivoa prisustve radionuklida u građevinskim materijalima. Ova regulativa je usvojena u većini zemalja Evropske unije, kao i kod nas. Uspostavljeni referenti nivo, tj. maksimalna godišnja efektivna doza koji potiče od građevinskog materijala je 1mSv. Ovaj referentni nivo odnosi se isključivo na gama zračenje radionuklida iz građevinskog materijala (isključuje zračenje koje potiče od ^{222}Rn i spoljašnje zračenje). Da bi se postigli uslovi iz preporuke IAEA, neophodno je obezbediti da građevinski materijali sadrže dovoljno niske vrednosti aktivnosti prirodnih radionuklida. Iz tog razloga se vrši kontrola građevinskog materijala. Cilj kontrole radioaktivnosti je smanjenje izlaganja stanovništva ionizujućem zračenju usled upotrebe materijala koji sadrže veće količine prirodnih radioizotopa. Pokazalo se da je najpogodniji metod koji se koristi u te svrhe gama spektroskopija. Kao rezultat gama spektrometrijskih merenja, dobija se koncentracija aktivnosti građevinskog materijala, u $\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$. Da bi se kontrola radiaktivnosti građevinskog materijala što je moguće više pojednostavila, IAEA je propisala i

načine kako se iz dobijenih koncentracija aktivnosti pojedinih prirodnih radionuklida može proceniti ukupna doza zračenja kojoj bi pojedinac smešten u prostoru izgrađenom od takvog materijala bio izložen.

Jedan od često primenjivanih građevinskih materijala je granit. Poseduje izuzetna mehanička svojstva, širok spektar primesa mu daje veoma živopisnu teksturu u širokoj paleti boja. No poznato je da granit može sadržati povišene nivoje prirodnih radionuklida, te se čak i u slučajevima kada se primenjuje kao tanka obloga za zidove može očekivati povišena doza unutar prostorija ukrašenih ovim materijalom.

U ovom radu vršena je procena doze zračenja koje potiče od granitnih ploča. Primenjena je nešto drugačija računska procedura nego što je to preporučeno u dokumentima IAEA i nekim lokalnim pravilnicima Republike Srbije. Tom prilikom se vodilo računa da sve etape računa imaju podlogu u egzaktnim i dobro poznatim matematičkim izrazima i da se maksimalno izbegnu empirijske relacije koje se baziraju na usvojenim koeficientima. Cilj rada je bio da se uporede vrednosti doza koje potiču od prisutnosti prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu (koji ima svojstva granita, u smislu hemijskog sastava, gustine, itd.) izračunate na ovaj način sa dozama koje se mogu dobiti upotrebom konverzionih koeficijenata preuzetim iz IAEA protokola i par sličnih dokumenata

1 Prirodna radioaktivnost

Prirodna radioaktivnost predstavlja spontan proces prilikom koga dolazi do transformacije početnog jezgra u neko drugo, novonastalo jezgro. Ovaj proces odvija se uz emisiju čestica, ili fotona gama zračenja.

Svi prirodni radionuklidi dele se na kratkoživeće i dugoživeće. U prirodi se nalazi ukupno 38 prirodnih radionuklida koji potiču od tri niza i nekolicine radionuklida koji nisu članovi ovih nizova.

Prirodni radionuklidi mogu se svrstati dve kategorije:

- Primodijalni (provobitni), oni potiču od pre nastanka naše planete i
- Kosmogeni, nastali interakcijom kosmičkih zraka sa atmosferom

Primodijalni radionuklidi su prirodni zemaljski - terestrijalni radionuklidi koji predstavljaju najznačajniji izvor jonizujućeg zračenja u životnoj sredini. Samo su radionuklidi sa periodom poluraspada uporedivim sa starošću Zemlje ($4.5 \cdot 10^9$ godina ili duže) i njihovi produkti raspada u značajnoj meri zastupljeni u materijalima u životnoj sredini (stenama, zemljištu, vodi, ljudskom telu). Spoljašnje ozračivanje stanovništva dominatno potiče od gama zračenja nastalog raspadima u radioaktivnim nizovima uranijuma ^{238}U i torijuma ^{232}Th , kao i od kalijuma ^{40}K .

Značajan izvor prirodne radijacije je i kosmičko zračenje. Primarno kosmičko zračenje je galaktičkog i solarnog porekla, a sastoje se nanelektrisanih čestica veoma visoke energije (0,01 – 10 GeV). Do zemljine površine ono veoma retko dospeva pošto nestaje u interakcijama u atmosferi u kojima se stvara sekundarno zračenje i kosmogeni radionuklidi, kao što su ^{14}C i ^{7}Be . Oni transportnim procesima koji se dešavaju u atmosferi šire svoje prisustvo i doprinose ukupnoj prirodnoj radioaktivnosti.

1.1 Radioaktivni nizovi uranijuma i torijuma

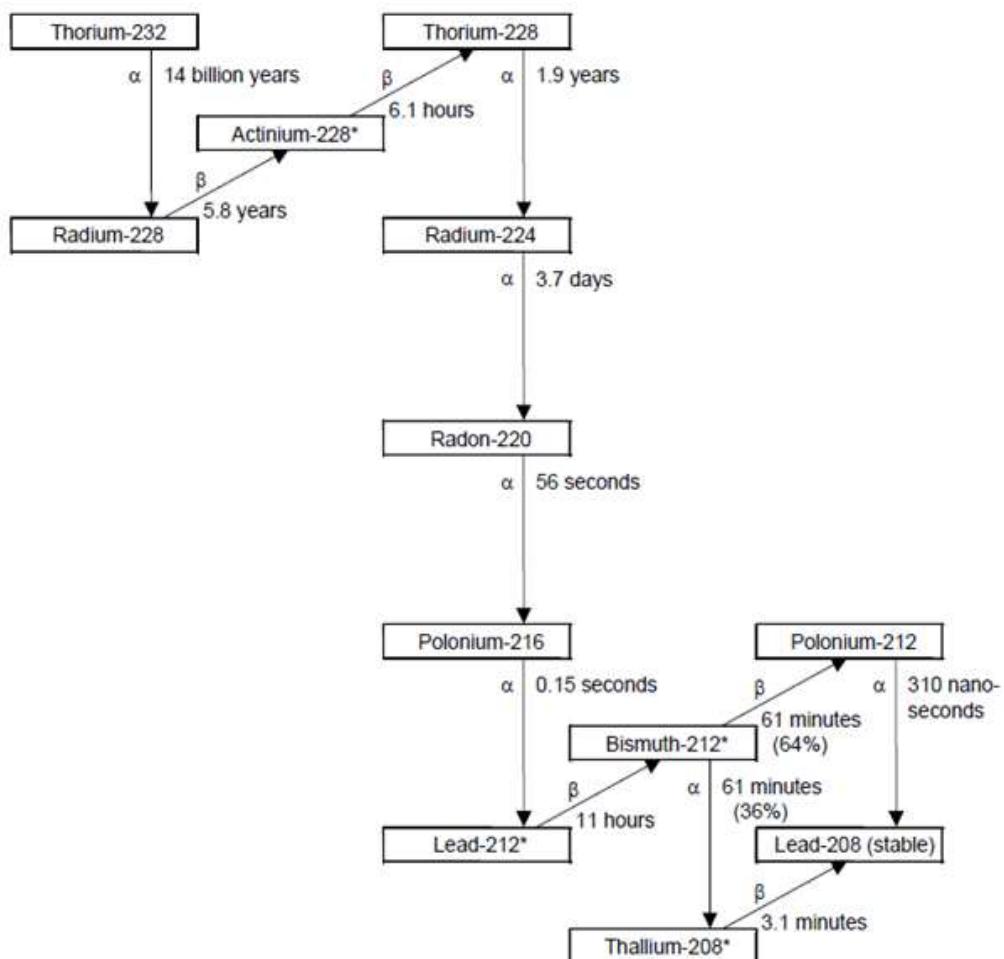
Većina radionuklida koji postoje na Zemlji se mogu grupisati u tri prirodna radioaktivna niza. To su uranijum-radijumski, uranijum-aktinijumski i torijumski niz. Osim ova tri, u laboratorijskim uslovima, je putem nuklearnih reakcija stvoren i četvrti, neptunijumski niz. Prirodni radioaktivni nizovi nastaju raspadom tri radioizotopa ^{235}U , ^{238}U i ^{232}Th koji se zbog svog dugog perioda poluraspada još uvek nalaze u prirodi. Potomci ovih izotopa su takođe

nestabilni pa se raspadaju, stvarajući nova nestabilna lakša jezgra, sve do stabilnog izotopa, na kome se niz završava.

Tabela 1-prirodni radioaktivni nizovi

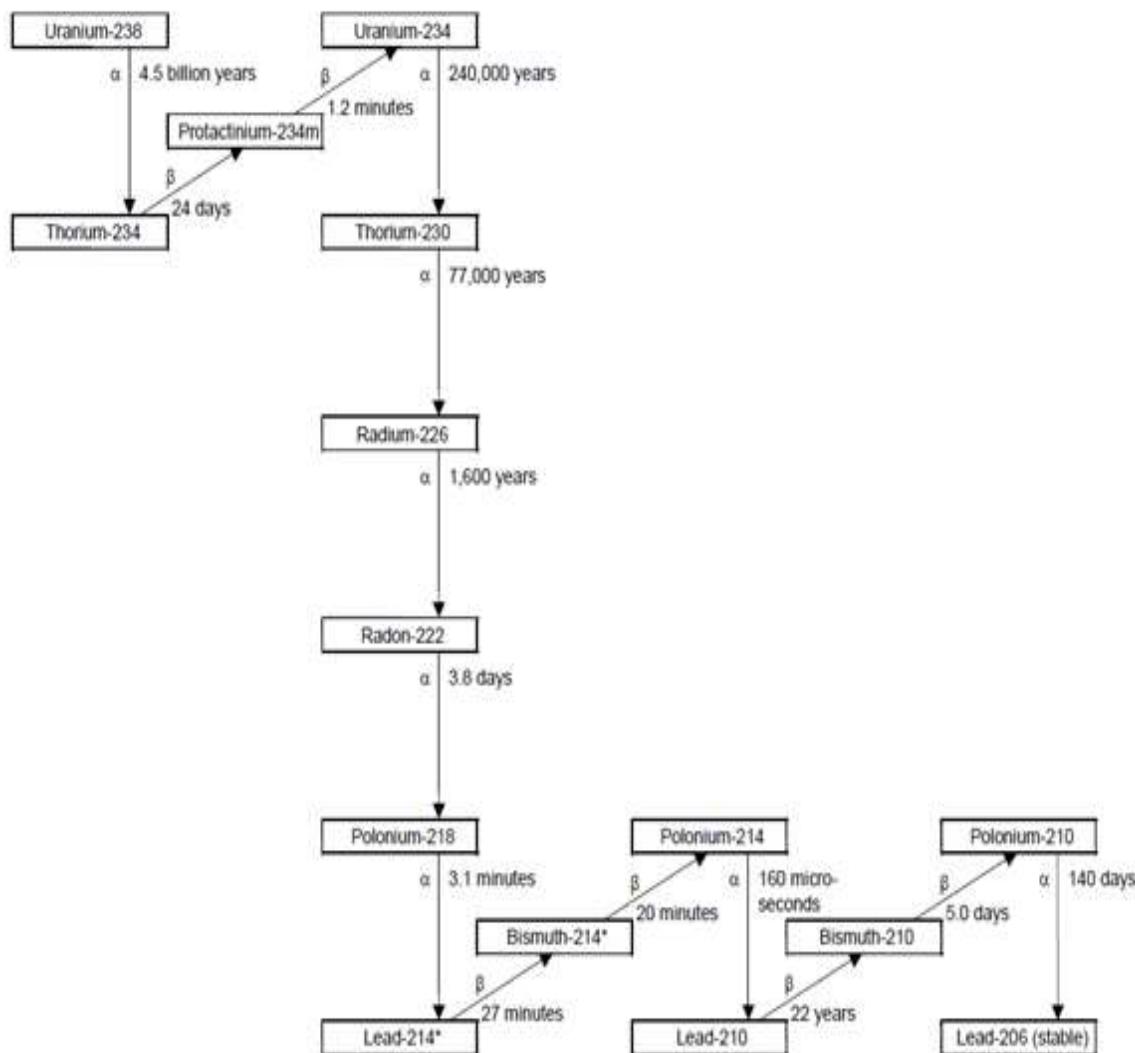
Naziv niza	maseni broj	polazno jezgo	period poluraspada (godina)	krajnji član
torijumov	$4n$	^{232}Th	$1.4 \cdot 10^{10}$	^{208}Pb
uranijum-radijumov	$4n+2$	^{238}U	$4.5 \cdot 10^9$	^{206}Pb
uranijum-aktinijumov	$4n+3$	^{235}U	$7.2 \cdot 10^8$	^{207}Pb

Prvi niz naziva se niz torijuma. Počinje izotopom ^{232}Th , a završava se stabilnim izotopom olova ^{208}Pb . Maseni brojevi članova ovog niza karakterišu se formulom $4n$, gde je n ceo broj između 52 i 58.



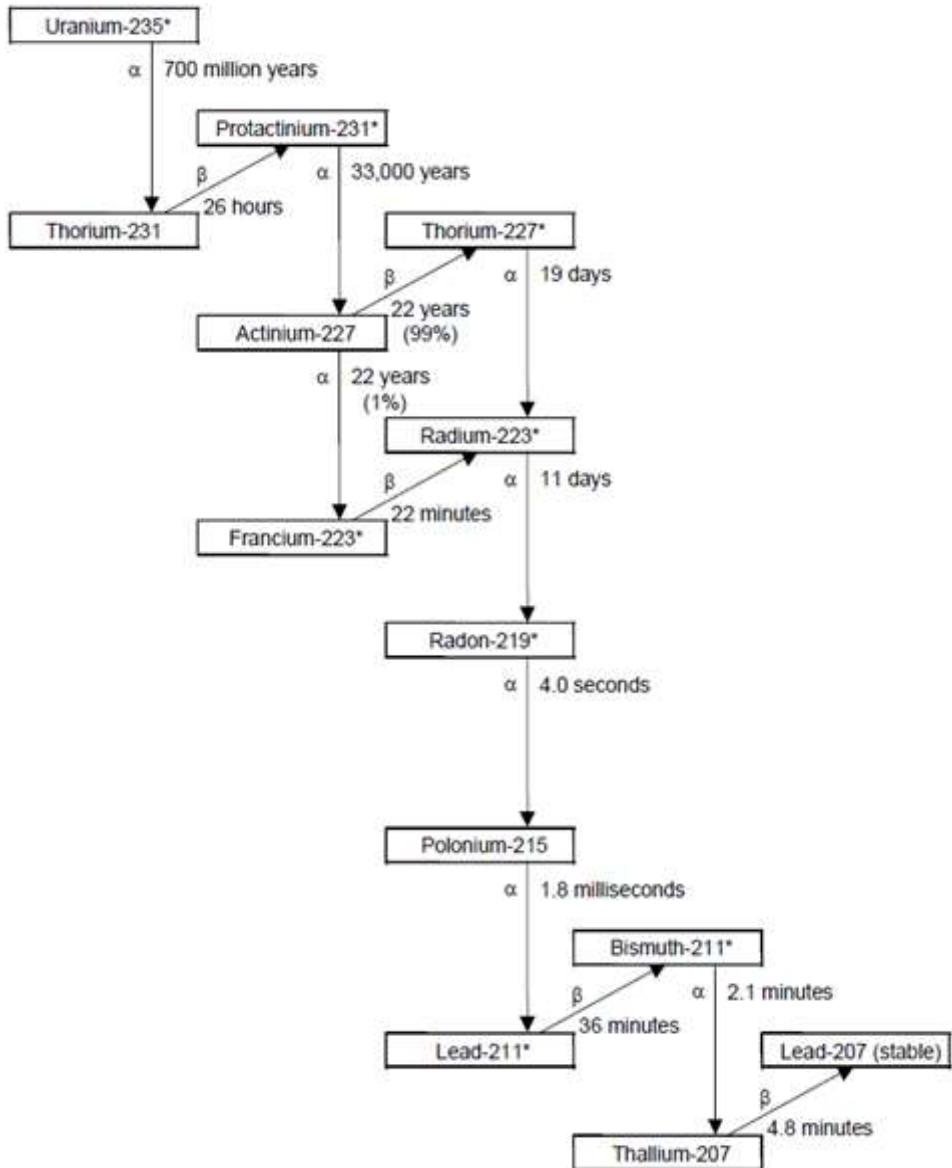
Slika 1-Torijumov niz

Drugi niz – uranijum-radijumski niz (ili niz uranijuma ^{238}U) – počinje izotopom ^{238}U a završava se stabilnim izotopom olova ^{206}Pb . Maseni brojevi svih članova ovog niza predstavljeni su formulom $4n+2$, gde je n ceo pozitivan broj između 51 i 59.



Slika 2-Uranijum-radijumov niz

Treći niz naziva se uranijum-aktinijumski niz (ili niz aktinijuma). Počinje izotopom ^{235}U , a završava se stabilnim izotopom olova ^{207}Pb . Karakteriše se masenim brojevima $4n+3$, gde je n između 51 i 58.

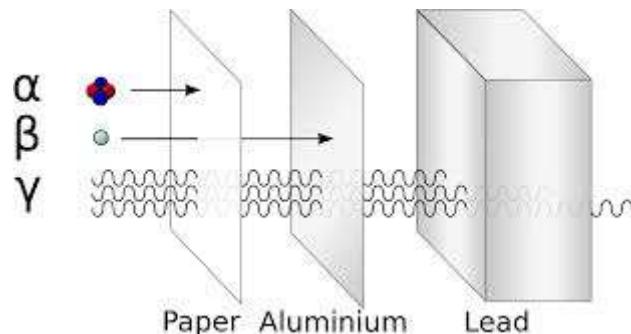


Slika 3-uranijum-aktinijumov niz

Od radionuklida koji ne pripadaju radioaktivnim nizovima, je najznačajniji kalijum ^{40}K , koga u prirodnom kalijumu ima samo 0.0117%, ali pošto je kalijum kao element veoma zastupljen u Zemljinoj kori, prilikom gama spektrometrijskih merenja, neizbežno se detektuje i kalijumova aktivnost koja potiče od prisustva kalijuma u uzorku koji se meri, ili od kalijuma koji se nalazi u objektima koji okružuju detektor.

2 Radioaktivno zračenje

Atomsko jezgro može da emituje tri vrste zračenja: α (alfa), β (beta) i γ (gama) zračenje. Svako zračenje je, u stvari, posledica neke promene u jezgru. Vrsta emitovanog zračenja zavisi od promene u jezgru koja ga je izazvala, takođe, i svaka vrsta zračenja se drugačije ponaša u interakciji sa okolnom supstancijom.



Slika 4- prodornost različitih vrsta radioaktivnog zračenja

2.1 α -raspad

Tokom alfa raspada jezgro emituje alfa česticu.. Ovaj proces se najčešće odvija kod teških elemenata (hemski elementi teži od olova).

α čestice su ogoljena jezgra helijuma. To znači da u svom sastavu imaju dva protona ($2p^+$) i dva neutrona ($2n^0$). To je veoma stabilna formacija i upravo zbog toga nukleoni napuštaju jezgro baš u ovoj kombinaciji. Nakon emisije alfa čestice jezgro se transformiše u potomka koji ima dva protona i četiri nukleona manje od jezgra pretka.

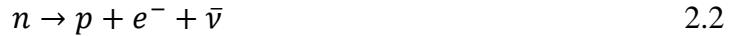


Novonastalo jezgro odgovara elementu koji se u periodnom sistemu nalazi za dva mesta pomereno ka nižim rednim brojevima. Shodno tome reorganizuje se i atomski omotač koji se oslobađa dva elektrona (e^-), kako bi atom potomka bio elektroneutralan. Nakon što izgubi celokupnu energiju, alfa čestica zahvata dva elektrona i transformiše se u jezgra helijuma.

2.2 β -raspad

Beta zračenje je korpuskularne prirode. To znači da se prilikom odvijanja ovog procesa kao produkt reakcije oslobađa beta čestica (brzi elektroni i pozitroni). Raspad protona ili neutrona i elektronski zahvat su tri načina odvijanja beta raspada. U sva tri slučaja dolazi do promene atomskog broja elementa tako da su predak i potomak različiti elementi.

- Elektronski beta raspad (β^- raspad)- Tokom β^- raspada neutron se transformiše u proton, uz emisiju elektrona i antineutrina.



Nakon elektronskog beta raspada atomski broj jezgra pretka uvećan je za jedan, dok je atomski broj ostao nepromenjen.



Prirodni radionuklidi raspadaju se isključivo putem elektronskog beta raspada.

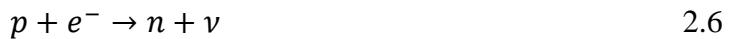
- Pozitronski beta raspad (β^+ raspad)- Tokom β^+ raspada proton se transformiše u neutron, uz emisiju pozitrona i neutrina.



Nakon pozitronskog beta raspada atomski broj jezgra pretka umanjen je za jedan, dok maseni broj ostaje nepromenjen.



- Zahvat elektrona- ili inverzni beta raspad je raspad kod koga je krajnja promena jezgra ista kao kod pozitronskog beta raspada. Jezgro predak zahvata jedak od elektrona iz K (ređe L ljske), pri čemu se jedan proton transformiše u neutron:



Dosadašnja istraživanja pokazuju da se slobodan proton neće raspasti dok je slobodan neutron nestabilan. Unutar nekog jezgra neutron će se raspasti ako proces rezultuje stabilnjom konfiguracijom. Takođe, protoni mogu zahvatiti elektron iz atoma i postati neutroni emitujući neutrino, stvarajući time stabilniji sistem.

2.3 γ -raspad

Gama-raspad je za razliku od alfa i beta-raspada malo specifičniji. Ovde ne dolazi do pravog raspada jezgra na drugo jezgro, već do emisije gama zraka. Gama kvant je elektromagnetsko zračenje malih talasnih dužina (reda veličine od 10^{-8} do 10^{-10} cm).

Nestabilnim jezgrom nazivamo ono jezgro koje se nalazi u pobuđenom stanju. Do emisije gama kvanta dolazi kada jezgro iz pobuđenog energetskog stanja prelazi u osnovno, ili u neko niže energetsko stanje. Prilikom emisije gama zračenja od ukupne energije koja stoji na raspolaganju, jedan deo odlazi na uzmak jegra (mada je za jezgra srednje mase $A=100$ energija uzmaka jezgra tek nekoliko eV, pa je možemo zanemariti). Iz tog razloga za energiju emitovanog fotona uzima da je jednaka razlici energija stanja između kojih se prelaz vrši.

U ovom procesu broj nukleona se ne menja, već se menja energetsko stanje koje čini razliku između jezgra pretka i jezgra potomka..

Gama zračenje je najčešće pratilac alfa i beta raspada i uvek se odvija u jezgru potomku, odnosno u jezgrima koja su ostala u pobuđenom stanju posle alfa ili beta raspada.

Gama zračenje odlikuje se velikom prodornom moći.

3 Interakcija gama zračenja sa materijom

Za razliku od nanelektrisanih čestica, fotonii su električno neutralni i ne gube energiju postepeno putem Kulonove interakcije kao što je to slučaj sa α i β česticama. Ustvari, oni mogu preći određenu udaljenost, pre nego što interaguju. Koliko će daleko foton doći zavisi od statističkih procesa, odnosno verovatnoća interakcije po jedinici pređenog puta. Pri tom foton može biti apsorbovan ili rasejan menjajući svoj smer sa ili bez gubitaka energije.

3.1 Fotoelektrični efekat

Fotoelektrični efekat je process u kojem foton gama zračenja predaje svoju kompletну energiju orbitalnom elektronu atoma mete. Foton tom prilikom prestaje da postoji, a elektron se udalji iz atoma sa energijom:

$$E_e = E_f - E_v \quad 3.1$$

Gde je E_f energija koju je foton posedovao pre interakcije, a E_v energija veze orbitalnog elektrona.

Fotoelektrični efekat moguć je samo na vezanom elektronu. To teoretski znači da se može odigrati na svakom pojedinačnom orbitalnom elektronu, ali se verovatnoća odigravanja ovog procesa razlikuje od elektrona do elektrona. Što je energija veze elektrona bliža energiji fotona – to je elektron čvršće vezan, pa je verovatnoća odigravanja fotoelektričnog procesa na njemu viša.

Efikasni presek za fotoelektrični efekat veoma zavisi od rednog broja materijala i njegova zavisnost od Z i E se može predstaviti kao:

$$\sigma_{fe} \sim \frac{Z^2}{E^2} \text{ za } E_f > E_v^k \quad 3.2$$

$$\sigma_{fe} \sim \frac{Z^5}{E} \text{ za } E_f \gg E_v^k \quad 3.3$$

Gde je E_v^k energija veze K-elektrona.

3.2 Komptonov efekat

Komptonovim rasejanjem naziva se nekoherentno rasejanje fotona na slobodnom elektronu. Ovom prilikom foton elektronu predaje deo svoje energije, a zatim nastavlja da se kreće u drugom pravcu sa manjom energijom.

Energija koju elektron primi prilikom Komptonovog rasejanja iznosi:

$$E_e = E_f - E'_f \quad 3.4$$

Gde je E_f početna energija fotona, a E'_f energija fotona nakon rasejanja.

Totalni efikasni presek za rasejanje na jednom elektronu obrnuto je proporcionalan njegovoj energiji. Ukoliko se posmatra rasejanje na Z elektronu, totalni efikasni presek za Komptonovo rasejanje je oblika:

$$\sigma_{com} \sim \frac{Z}{E} \quad 3.5$$

3.3 Stvaranje parova

U slučaju kada je energija fotona dovoljno velika, moguće je stvaranje parova elektron-pozitron, u kome foton u potpunosti isčeza. Da bi došlo do stvaranja parova energija fotona ne može da bude manja od dvostrukog mirovanja elektrona ($2m_e \cdot c^2$). Elektron i pozitron bivaju emitovani u pravcu kretanja fotona. Energija fotona u ovom slučaju troši se na dvostruku energiju mirovanja elektrona i kinetičku energiju elektrona E_- i pozitrona E_+ :

$$E_f = 2m_e \cdot c^2 + E_+ + E_- \quad 3.6$$

Izraz za efikasni presek za stvaranje elektron-pozitron para je veoma kompleksan i obično se daje za neke specifične energetske intervale u kojima bi se kretala energija upadnog fotona. U energetskom intervalu od praga do $1000 m_e \cdot c^2$ za totalni efikasni presek dobija se:

$$\sigma_{par} \sim Z^2 \cdot \ln \frac{E}{m_e \cdot c^2} \quad 3.7$$

U slučaju da elektron i pozitron imaju dovoljno visoku energiju i oni mogu da vrše jonizaciju. Kada izgubi svoju kinetičku energiju, pozitron doživljava anihilaciju u kontaktu sa elektronom. Obe čestice nestaju u tom procesu, uz emisiju dva fotona od 0.511 MeV -a.

4 Atenuacija gama zračenja

Činjenica da fotoni prilikom interakcije ili potpuno nestanu ili skrenu sa prvobitnog puta iskorišćena je da se opiše njihovo prostiranje kroz neku sredinu. Naime, ako se posmatra uzan snop fotona, njihov broj će se smanjivati sa porastom debljine materijala kroz koji prolaze pošto će ostajati samo oni fotoni koji nisu doživeli nikakvu interakciju. Ako se zamisli tanak sloj ovog materijala debljine dx , može se naći koliki je deo fotona dN nestao iz snopa. dN je srazmerno broju upadnih fotona, N , broju atoma u jedinici zapremine materijala, n , kao i debljini sloja:

$$dN = \sigma \cdot N \cdot dx \cdot n \quad 4.1$$

Koeficijent srazmernosti σ se naziva efikasni presek i prestavlja meru verovatnoće da foton bude uklonjen iz snopa. Proizvod $\sigma \cdot n$ je linearни atenuacioni koeficijent, μ . Razdvajanjem promenljivih dobija se:

$$\frac{dN}{N} = \mu \cdot dx \quad 4.2$$

Odnosno, nakon integracije:

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad 4.3$$

gde je N_0 početni broj fotona, a N broj fotona nakon prolaska kroz sloj materijala debljine x .

Ova relacija se može pomnožiti sa energijom fotona u džulima (monoenergijski snop) i posmatrati ukupna energija koja se prenosi u jedinici vremena, kroz jediničnu površinu materijala, koja je normalna na pravac prostiranja fotona. Tada se dobija atenuacioni zakon u sledećem obliku:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad 4.4$$

gde su I i I_0 intenziteti u $\frac{J}{sm^2}$. I je intenzitet zračenja koje je prošlo kroz sloj materijala debljine x bez interakcije, I_0 je intenzitet upadnog zračenja, a μ je linearni atenuacioni koeficijent.

4.1 Linearni i maseni atenuacioni koeficijent

Linearni atenuacioni koeficijent, μ , koji se javlja u atenuacionom zakonu predstavlja karakteristiku materijala i njime su opisana atenuaciona svojstva tog materijala. On se dobija kao proizvod broja atoma po jedinici zapremine n datog materijala i ukupnog efikasnog preseka, σ :

$$\mu = n \cdot \sigma$$

4.5

Budući da fotoni iz snopa mogu biti uklonjeni putem fotoefekta, Komptonovog efekta i stvaranjem parova, ukupni efikasni presek se može dobiti kao zbir efikasnih preseka za svaku od ovih reakcija:

$$\sigma = \sigma_{fe} + \sigma_{com} + \sigma_{par} \quad 4.6$$

To znači da se linearни atenuacioni koeficijent može se zapisati kao:

$$\mu = n \cdot \sigma_{fe} + n \cdot Z \cdot \sigma_{com} + n \cdot \sigma_{par} \quad 4.7$$

Na osnovu formula 3.2, 3.3, 3.5 i 3.7, imajući na umu zavisnost svakog efikasnog preseka, vidi se da linearni atenuacioni koeficijent zavisi od gustine materijala, rednog broja elemenata koji ga čine i energije fotona. U praksi se koristi još jedna veličina, a to je maseni atenuacioni koeficijent, μ_m ($\frac{cm^2}{g}$), koji ne zavisi od gustine materijala, a dobija se kada se linearni atenuacioni koeficijent podeli sa gustom materijala:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad 4.8$$

Vrednosti za atenuacione koeficijente se dobijaju eksperimentalno za određenu vrstu materijala pri određenim vrednostima energija fotona.

Ukoliko je poznat hemijski sastav materijala, atenuacioni koeficijent se može i izračunati korišćenjem programa Nist XCOM (Referenca [3]), gde je zavisnost atenuacionog koeficijenta od energije data tabelarno i grafički.

5 Dozimetrija

Razvojem nuklearnih tehnologija sve veći broj ljudi je dolazio u kontakt sa ionizujućim zračenjem, pa se postavilo pitanje mogućeg uticaja zračenja na izloženu populaciju. Prve posledice prekomernog ozračivanja postale su vidne već u prvih par godina nakon otkrića radioaktivnosti. Od tog momenta se otvara paralelan prvac izučavanja interakcije zračenja sa materijom, u kojem je naglasak bio na izučavanju efekata koje je zračenje proizvelo u materijalu kroz koji se prostire.

Osnovni mehanizam putem kog zračenje interaguje sa materijom je jonizacija. Prilikom jonizacije postoji verovatnoća da u složenim organskim molekulima nastupe razne hemijske promene, koje kao rezultat mogu promeniti njihove strukture i uticati na mogućnost molekula da obavlja svoje funkcije. To znači da konačan ishod jonizacije bivaju biološke promene koje mogu proizvesti i neke posledice po stanje celog organizma.

Prvi korak u procesu detaljnijeg sagledavanja bioloških promena koje su nastale kao posledica zračenja bilo je uvođenje fizičkih veličina putem kojih bi se dejstvo zračenja moglo kvalitativno i kvantitativno opisati. U tu svrhu uvedeni su pojmovi eksponicione, apsorbovane i ekivalentne doze. Oblast nauke koja se bavi mehanizmima pod kojim dolazi do predaje energije zračenja organskim materijalima, kao i načinima merenja i izračunavanja doze naziva se dozimetrija.

5.1 Eksponiciona doza

Prva veličina koja je trebalo kvantitativno da opiše efekte gama zračenja sa odgovarajućom jedinicom usvojena je tridesetak godina nakon otkrića radioaktivnosti. Ova veličina naziva se eksponiciona doza, a njena jedinica je rendgen (R). Definicija eksponacione doze i njene jedinice je tokom vremena u nekoliko navrata korigovana, sve u skladu sa boljim razumevanjem interakcije zračenja sa materijom. Ono što je zajedničko za sve varijante je to da se koncept radijacione ekspozicije zasniva na prepostavci da je broj stvorenih jonskih parova proporcionalan energiji koju zračenje ostavi u sredini kroz koju se kreće. U primarnim interakcijama fotoni zračenja stvaraju pozitivne jone i elektrone koji takođe mogu vršiti sekundarne ionizacije. Eksponiciona doza se definiše kao odnos naielktrisanja ΔQ koje elektromagnetno zračenje proizvede u u određenoj zapremini i mase Δm vazduha koja se u toj zapremini nalazi:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad 5.1$$

Jedinica za ekspozicionu dozu je rendgen i on odgovara onoj ekspoziciji gama zračenja koja u jednom kubnom centimetru vazduha (koji se nalazi u normalnim uslovima) stvori jednu elektrostatičku (ESU) jedinicu nanelektrisanja. Kako je ESU zamenjena SI jedinicom kulon (C), ekspoziciona doza se izražava u jedinicama Ckg^{-1} .

Veza između stare i nove jedinice je:

$$1 R = 2.58 \cdot 10^{-4} \frac{C}{kg} \quad 5.2$$

U SI sistemu jedinična je ona ekspozicija koja u kilogramu vazduha proizvede kulon nanelektrisanja jednog znaka.

Brzina ekspozicije se definiše kao količnik ekspozicione doze i vremena ozračivanja Δt :

$$\dot{X} = \frac{X}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta m \Delta t} \quad 5.3$$

Jedinica za brzinu ekspozicione doze je pređen u sekundi (Rs^{-1}), ili kulon po kilogram satu ($Ckg^{-1}h^{-1}$).

U slučaju kada se radi o gama emiterima jednostavnih geometrija, moguće je proceniti ekspozicionu dozu, ili njenu brzinu. Kako se gama zračenje emituje izotropno u svim prostornim pravcima, broj fotona koji prođe kroz određenu površinu opada sa kvadratom rastojanja d . Može se očekivati da će broj fotona, kao i sama ekspoziciona doza biti direktno proporcionalni aktivnosti A posmatranog izvora. U tom slučaju brzina ekspozicione doze se može predstaviti kao:

$$\frac{X}{\Delta t} = \Gamma \frac{A}{d^2} \quad 5.4$$

Gde je A aktivnost izvora, d rastojanje između izvora i mesta za koje se izračunava doza. Veličina Γ naziva se gama konstanta i njena vrednost zavisi od svojstava izotopa koji se raspada (energije i broj fotona koji se emituju nakon raspada). Jedinica za gama konstantu je $Cm^2kg^{-1}h^{-1}MBq^{-1}$.

5.2 Apsorbovana doza

Osnovni nedostatak ekspozicione doze bio je taj da se hemijske i biološke promene na tkivima izloženim zračenju mogu mnogo jednostavnije dovesti u vezu sa energijom koju je zračenje ostavilo tkivu, nego sa količinom nanelektrisanja koje zračenje prilikom svog prolaska kroz tkivo stvara. Shodno tome definisana je nova veličina-apsorbovana doza D . Ova veličina definiše se kao odnos energije ΔE koju zračenje preda određenoj zapremini sredine kroz koju se prostire i mase Δm sadržane u toj zapremini:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad 5.5$$

Apsorbovana energija ΔE se meri u džulima i predstavlja razliku ukupne energije svih jonizujućih čestica koje uđu u posmatranu zapreminu i ukupne energije svih čestica koje iz nje izađu.

Jedinica za apsorbovanu dozu je džul po kilogramu i naziva se grej (Gy). U praksi je ušla i sto puta manja jedinica koja se naziva rad.

Takođe je moguće definisati brzinu apsorbovane doze, kao količnik primljene doze i vremena ozračivanja:

$$\dot{D} = \frac{D}{\Delta t} \quad 5.6$$

i njena jedinica je grej po sekundi (Gys^{-1}).

5.3 Ekvivalenta doza

Primećeno je da različite vrste zračenja imaju različite biološke efikasnosti, što je dovedeno u vezu sa količinom jona koje jedna čestica zračenja proizvede po jedinici puta. Kako broj stvorenih jona u različitim materijalima odgovara različitom utrošku energije, uvedena je veličina linearog energetskog transfera (LET), koja predstavlja srednju energiju koju čestica zračenja ostavi po jedinici puta.

Da bi se različita biološka dejstva raznih vrsta zračenja i numerički izrazila uvodi se ekvivalentna doza kao proizvod apsorbovane doze i faktora kvaliteta:

$$H = QD \quad 5.7$$

Faktor kvaliteta Q je bezdimenziona veličina, a brojna vrednost mu zavisi od specifične jonizacije, ili linearog energetskog transfera. Usvojene vrednosti faktora kvaliteta kreću se od 1 do 20, u zavisnosti od vrste zračenja.

Jedinica za apsorbovanu dozu je sivert (Sv), a kako je faktor kvaliteta bezdimenzina veličina, ona je jednak jedinici za apsorbovanu dozu (Jkg^{-1}).

5.4 Dejstvo zračenja na ćeliju

Proces interakcije zračenja sa živom materijom može se grubo podeliti u tri faze koje se nazivaju fizička, hemijska i biološka. Pod fizičkom fazom se podrazumeva proces jonizacije i ekscitacije kojom prilikom dolazi do stvaranja jona i slobodnih radikalata. U hemijskoj fazi stvoreni joni i slobodni radikali stupaju u različite hemijske reakcije koje dovode do izmene struktura organskih molekula. Nastale hemijske promene mogu da izazovu biološke efekte koji

se posmatraju na nivou funkcionisanja ćelije kao celine, ali i na višim nivoima-izučavanjem fiziologije pojedinih tkiva, kao i celog organizma.

Dejstvo zračenja u konačnoj instanci može da dovede do odumiranja ćelije. Oštećenje lanca DNK ili nekog drugog organskog molekula može da dovede do prekida funkcionisanja ćelije (smrt, sterilizacija, ili inaktivacija ćelije). No, moguće je da ćelija nakon dejstva zračenja zadrži vitalne funkcije, da obavlja sve metaboličke radnje, ali je usled radijacionog oštećenja izgubila sposobnost deobe. Ćelija se takođe smatra deaktiviranom ukoliko uspe da se podeli, ali njeni potomci nemaju tu sposobnost.

Podaci prikljupljeni prilikom proučavanja dejstva zračenja na različitim veštački odgojenim ćelijama pružili su bogatu sistematiku rezultata na osnovu kojih se mogu izvesti zaključci o preživljavanju različitih vrsta ćelija. Ti rezultati najčešće se predstavljaju krivama preživljavanja koje daju zavisnost logaritma frakcije preživelih ćelija od primljene doze zračenja.

Prepostavimo da neki biološki uzorak koji sadrži N ćelija iste vrste biva izložen maloj dozi zračenja dD . Ako je broj uništenih ćelija proporcionalan početnom broju i primljenoj dozi dD :

$$dN = -\frac{1}{D_0} N dD \quad 5.8$$

Dobija se zavisnost broja preživelih ćelija od primljene doze, opisan prostom eksponencijalnom funkcijom:

$$N = N_0 e^{\frac{D}{D_0}} \quad 5.9$$

Gde je D_0 konstanta proporcionalnosti i naziva se srednja letalna doza, a N_0 je početni broj ćelija ozračivane kulture.

Osnovna prepostavka da je broj uništenih ćelija proporcionalan dozi ozračivanja ispravna je samo u slučaju da svaka interakcija upadne čestice zračenja uspe da proizvede takve promene u ćeliji nakon kojih ona u potpunosti prestaje da funkcioniše. Ovakav proces odvija se samo u jednostavnim slučajevima kada ćelija poseduje samo jednu osetljivu strukturu čije radijaciono oštećenje u potpunosti zaustavlja funkcionisanje ćelije.

Na složenije ćelije može se primeniti model koji podrazumeva da u ćeliji postoji nekoliko ciljeva od kojih svaki treba biti pogodjen da bi ćelija prestala da funkcioniše u potpunosti. U ovom slučaju se relativna promena broja preživelih ćelija u nekoj ozračenoj kulturi u zavisnosti od primanjene doze menja po sledećem zakonu:

$$N = N_0 \left[1 - \left(1 - e^{\frac{D}{D_0}} \right)^n \right] \quad 5.10$$

Gde je n broj meta u ćeliji koje dejstvom zračenja moraju biti bar jednom oštećene.

Tokom svog života ćelije doživljavaju deobu-mitozu i primećeno je da je njihova osjetljivost na zračenje u ovom periodu najveća. Uzrok tome je činjenica da svaka novonastala ćelija ima polovinu DNK, tako da njen potencijalno oštećenje ne ostavlja mogućnost reparacije kopiranjem neoštećenog genetskog lanca dvostrukе spirale.

Prilikom izvođenja radiobioloških eksperimenata primećeno je da za sterilizaciju jedne kulture ćelija treba manja doza ako se radijacija izvede jednokratno, nego u slučaju kada se zračenje prekine i nastavi nakon izvesnog vremena. To ukazuje na činjenicu da unutar ćelije postoje mehanizmi oporavka koji do izvesne mere zaleče neke posledice zračenja u periodu između dve ekspozicije.

Eksperimentalno je ustanovljeno da se na preživljavanje ozračenih ćelija može uticati raznim hemijskim jedinjenjima. Postoje hemijski agensi koji umanjuju efekte zračenja-radioprotektori, ali postoje i agensi koji ćelije čine osetljivijim na zračenje-radiosenzibilizatori.

5.5 Dejstvo zračenja na organizam

Živi organizmi predstavljaju složen skup velikog broja različitih tkiva sa mnoštvom veza između njih, tako da poznavanje radiobioloških karakteristika pojedinih ćelija nije dovoljno da bi se stekla slika o efektima zračenja na ceo organizam. Eksperimentalni metod ozračivanja neke populacije organizama i praćenje izazvanih pojava je metod koji je u najvećoj meri primenjivan. Rezultati koji su tom prilikom dobijeni nisu pouzdani kao rezultati dobijeni ozračivanjem kultura ćelija, uglavnom zbog svoje oskudnosti i ograničenosti na mali broj slučajeva.

U zavisnosti od toga u kolikoj meri je neki organizam bio izložen zračenju, efekti se grubo mogu podeliti na determinističke i stohastičke.

Deterministički efekti se pojavljuju nakon što organizam primi velike doze zračenja (reda veličine Gy). Do ovih efekata dolazi samo u slučaju kada doza kojom je jedinka eksponirana prekorači neki prag. Ako je primljena doza ispod vrednosti praga, neće doći do pojave determinističkih efekata. Oni se mogu pojaviti kao različiti simptomi radijacione bolesti (akutni radijacioni sindromi). Akutni radijacioni simptomi mogu se podeliti u tri grupe: hematopoezne, gastrointenstinalne i cerebrovaskularne. Letalna (smrtna doza) predstavlja dozu koja uništi više

od 50% populacije u roku od trideset dana. Doze manje od letalne izazivaju razne, dobro poznate determinističke efekte kod ozračene populacije.

Stohastički efekti se mogu pojaviti nakon izlaganja manjim dozama zračenja. Niske doze mogu da izazovu stohastičke efekte, za koje ne možemo sa sigurnošću tvrditi da li će se i kada pojaviti. Intenzitet ovih efekata ne zavisi od primljene doze, već se smatra da zračenje inicira neko oboljenje, čiji dalji tok zavisi od nekih drugih faktora. No, ukoliko se posmatra neka populacija, sa sigurnošću se može tvrditi da će broj oboljenja biti veći ukoliko je populacija bila izložena većoj dozi zračenja. Izučavanje stohastičkih efekata u većoj meri otežava činjenica da se neki od njih pojavljuju i kod organizama koji nisu bili izloženi zračenju.

Efekti koje zračenje izaziva na organizmima mogu se posmatrati i sa još jednog aspekta, u zavisnosti od toga da li zračenje izaziva posledice na ozračenoj jedinici, ili na njenom potomstvu. Efekti zračenja koji se mogu uočiti na eksponiranom organizmu nazivaju se somatski, dok se efekti koji se uočavaju tek na potomstvu nazivaju genetski. Somatski efekti mogu biti i stohastičke i determinističke, dok su genetski isključivo stohastičke prirode.

Genetski efekti zračenja- prilikom oštećenja DNK moguće su trajne promene na genima, koje se nazivaju mutacije. Ako do mutacija dođe na nekoj od polnih ćelija koje učestvuju u reprodukciji, onda je reč o genetskim mutacijama. Genetske mutacije ostavljaju posledice na potomstvo. Izmenama na nekom od gena može doći do promena osobina koje taj gen određuje, ili čak do potpunog nestanka tog svojstva. Na osnovu postojeće eksperimentalne evidencije, o genetskim promenama se može govoriti kao o stohastičkim efektima zračenja. Nemoguće je utvrditi prag za ove promene, ali postoji jasna linearna zavisnost između učestalosti pojavljivanja genetskih promena kod potomaka i doze koju su preci primili.

Iz tog razloga, kao i zbog svega navedenog u ovom poglavlju, posebna pažnja se poklanja kontroli doze zračenja koju prima stanovništvo.

6 Γ konstanta

Veoma važan faktor prilikom procene doze predstavlja snaga tačkastog izvora po jedinici aktivnosti, računata na nekoj udaljenosti od datog izora. Ova veličina naziva se gama konstanta. Da bi se izračunala gama konstanta, prepostavlja se da tačkasti izvor emituje gama zrake u svim pravcima podjednako (izotropni izvor). Ukoliko je poznata aktivnost izvora (izražena u Bq), kao i energija i broj fotona emitovanih po jednom raspodu, moguće je izračunati gama konstantu. Prilikom računanja, u obzir treba uzeti i apsorpciju zračenja od strane supstance kroz koju zračenje prolazi (skoro uvek se radi o vazduhu), a koja je izražena masenim atenuacionim koeficijentom, kao i apsorpciju u svim materijalima od kojih se sastoji obloga samog izvora, pošto se retko sreću potpuno otvoreni izvori zračenja.

Postoji veliki broj tablica u kojima se mogu naći vrednosti gama konstanti za gotovo sve poznate radionuklide. Ove se tablice daju u različitim sistemima jedinica. Kako je sam proces izračunavanja gama konstante relativno prost, u ovom radu će se upotrebljavati samo one vrednosti izračunate u delu 6.2. Dodatni motiv za to je i činjenica da postoji preko trideset radionuklida koji pripadaju prirodnim nizovima (plus 40K) pa su u ranijim radovima, gde je vršena procena doze građevinskog materijala, vršene aproksimacije tipa značajnog redukovanja broja posmatranih γ -prelaza, ili se čak usvajala neka srednja energija γ zračenja karakteristična za ceo niz. Osnovna ideja ovog rada je bila da se uzmu u obzir svi poznati γ -prelazi radionuklida koji se mogu pronaći u posmatranom materijalu. Gama konstante korišćene u daljem računu nisu tablične, već su računate na dva načina:

1. Za svaku energiju niza ponaosob
2. Za energije usrednjene na intervalima od po 100 keV-a

U prvom slučaju za tačkasti izvor doprinos pojedinačnih γ linija ukupnoj gama konstanti računat je po formuli:

$$\Gamma_i = \frac{E_\gamma \cdot p_\gamma \cdot \mu_\rho}{4\pi} \quad 6.1$$

Ukupna gama konstanta dobijena je kao:

$$\Gamma = \sum \Gamma_i \quad 6.2$$

E_γ - energija γ -prelaza

p_γ - intenzitet γ -prelaza

μ_ρ - maseni apsorpcioni koeficijent vazduha za energiju E_γ

U drugom slučaju za tačkasti izvor, za dobijanje gama konstante jednog intervala od 100 keV korišćena je formula:

$$\Gamma_i = \frac{\overline{E_\gamma} \cdot \overline{\mu_\rho} \cdot \sum p_\gamma}{4\pi} \quad 6.3$$

$\sum p_\gamma$ -zbir intenziteta za svaki energetski opseg (od po 100 keV-a)

$\overline{E_\gamma}$ - srednja energija datog energetskog opsega od 100 keV

$\overline{\mu_\rho}$ - maseni apsorpcioni koeficijent vazduha za energiju $\overline{E_\gamma}$

Na kraju je ukupna gama konstanta dobijena na isti način kao u prvom slučaju:

$$\Gamma = \sum \Gamma_i \quad 6.4$$

Energija svake linije ponaosob, kao i intenziteti istih dobijeni su korišćenjem baze podataka Table of Radioactive Isotopes (Referenca [4]) za svaki od članova uranijumovog i torijumovog niza. Uzete su u obzir sve gama energije od 9 keV naviše. Iz liste su izbačeni oni γ -prelazi koji imaju veoma niske intenzitete, reda veličine 0.001%. Na taj način je dobijeno da u nizu ^{238}U postoji 627 γ -energija koje su uzete u proračun, dok je u nizu ^{232}Th taj broj nešto manji i iznosi 535 γ -prelaza.

Osnovni razlog zbog koga je vršen proračun gama konstante na ova dva načina je da se vidi da li postoji neka razlika između slučaja kada se u proračun uzima svaki od postojećih γ -prelaza i slučaja kada se vrši neko usrednjavanje. U ovom slučaju je usrednjavanje vršeno po intervalima od 100 keV. Na taj način je kompletan spektar γ -zračenja ^{232}Th sveden na 26 različitih γ -energija. U slučaju kada se uzimaju u obzir svi prelazi, niz ^{232}Th ima preko 600 različitih γ -energija.

Poređenja radi, izračunata je i gama konstanta za svaki od nizova (i kalijum) korišćenjem podataka datim u radu Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity (Mika Markkanc, 1995)-u daljem tekstu Referenca [5]. Rezultati prikazani u ovoj referenci su posebno značajni pošto su oni direktno preuzeti i štampani u protokolu IAEA. Ovi su autori sve γ -prelaze niza ^{238}U sveli na jednu srednju energiju i sa njom procenjivali dozimetrijske efekte celog niza ^{238}U . Ovoj jednoj energiji su pripisali ukupan intenzitet svih γ -

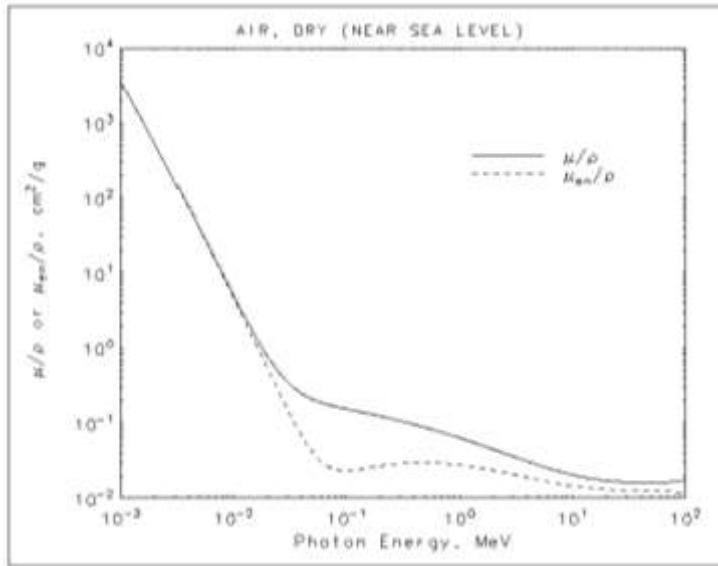
prelaza koji se u nizu ^{238}U mogu detektovati. U slučaju niza ^{232}Th , ovi su autori upotrebili samo dve energije gama zračenja za koje tvrde da u potpunosti mogu reproducovati sve dozimetrijske karakteristike celog niza ^{232}Th . I u ovom slučaju zbir intenziteta ove dve γ -linije je jednak zbiru intenziteta svih prelaza koji se odvijaju u nizu ^{232}Th . Ovde treba napomenuti da su autori Reference [5] izvršili i značajnu redukciju broja γ -linija u oba niza i u obzir uzeli samo nekoliko radioizotopa koji su poznati kao jaki gama emiteri. O kojim se to srednjim energijama radi i kolike su im intenzitete pripisali, videće se iz primera koji slede u delu 6.2.

Iz formula 6.1 i 6.3 vidljivo je da je jedinica gama konstante $\left[\frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}}\right]$. Da bi gama konstanta bila izražena u jedinici $\left[\frac{\text{mSv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{MBq}}\right]$ neophodno je pomnožiti je koeficijentom $k = 5.76 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{h} \cdot \text{MBq}}$. Ovaj koeficijent dobijen je tako što je MeV pretvoren u J ($1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$), g u kg ($1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}$), cm^2 u m^2 ($1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$), a zatim je sve pomnoženo sa $\left[\frac{\text{h} \cdot \text{MBq}}{\text{h} \cdot \text{MBq}}\right] (3600 \text{ s}) 10^6 \frac{1}{\text{h} \cdot \text{MBq} \cdot \text{s}}).$

6.1 Maseni apsorpcioni koeficijent vazduha

Za izračunavanje masenog apsorpcionog koeficijenta za vazduh korišćen je program Nist XCOM -Referenca [3], uz činjenicu da je smeša za suvi vazduh unapred data softverom (pod opcijom dry air). Korišćenjem tabele koja odgovara grafiku prikazanom na slici 5, metodom interpolacije izračunati su maseni koeficijenti za odgovarajuće energije fotona u opsegu energija za uranijumov niz, torijumov niz i kalijum.

Maseni apsorpcioni koeficijent je izražen u $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$.



Slika 5-zavisnost masenog apsorpcionog koeficijenta vazduha od energije zračenja

Funkcije za izračunavanje masenog apsorpcionog koeficijenta vazduha dobijene interpolacijom tačaka koje daje XCOM i date su jednačinama (6.5-6.8), za svaki energetski interval:

$$0 - 15 \text{ keV}: 0.11847 + 62.42947 \cdot e^{-\frac{E}{0.00384}} \quad 6.5$$

$$15 - 100 \text{ keV}: e^{-3.81141 + 9.42452 \cdot e^{-\frac{E}{0.0184}}} \quad 6.5$$

$$100 - 920 \text{ keV}: 0.01768 + 0.06768 \cdot E - 0.13456 \cdot E^2 + 0.11218 \cdot E^3 - 0.02042 \cdot E^4 \quad 6.7$$

$$920 - 3000 \text{ keV}: 0.0134 + 0.02042 \cdot e^{-\frac{E}{2.84419}} \quad 6.8$$

Apsorpcioni koefcijent vazduha izračunat je za 535γ prelaza torijumovog niza, 627γ prelaza uranijumovog niza i 1γ prelaz za kalijum.

6.2 Računanje gama konstante

Uranijumov niz

- Slučaj 1

U prvom slučaju korišćeni su podaci dati u Referenci [5]. Već je rečeno da se u ovom radu procena brzine apsorbovane doze vrši za svaku γ liniju ponaosob, a zatim sumira. Međutim, sledeći logiku autora Refrence [5] za uranijumov niz može se koristiti procena doze koristeći samo jednu, usrednjenu energiju. Ovo je moguće zato što je apsorpcioni koeficijenti prilično glatka funkcija u intervalu energija od 240 do 1200 keV. Usrednjena γ -energija izračunata je korišćenjem verovatnoće emisije kao faktora ponderisanja.

Verovatnoća emisije dobijena je sumiranjem svih verovatnoća emisije datog niza, a apsorpcioni koeficijent odabran je tako da odgovara usrednjenoj energiji. Ponovimo ovde da autori u Referenci [5] nisu uzeli u obzir sve γ -prelaze niza ^{238}U već samo nekolicinu najintenzivnijih. Podaci koji su korišćeni pri proceni gama konstante su:

Tabela 2- podaci za uranijumov niz dati u Referenci [5]

E(keV)	$p_\gamma (\%)$	$\mu_p (\text{cm}^2 \text{g}^{-1}) \cdot 10^{-5}$
810	2.12	0.0285

Korišćenjem podataka datim u tabeli 2 izračunata je gama konstanta za uranijumov niz.

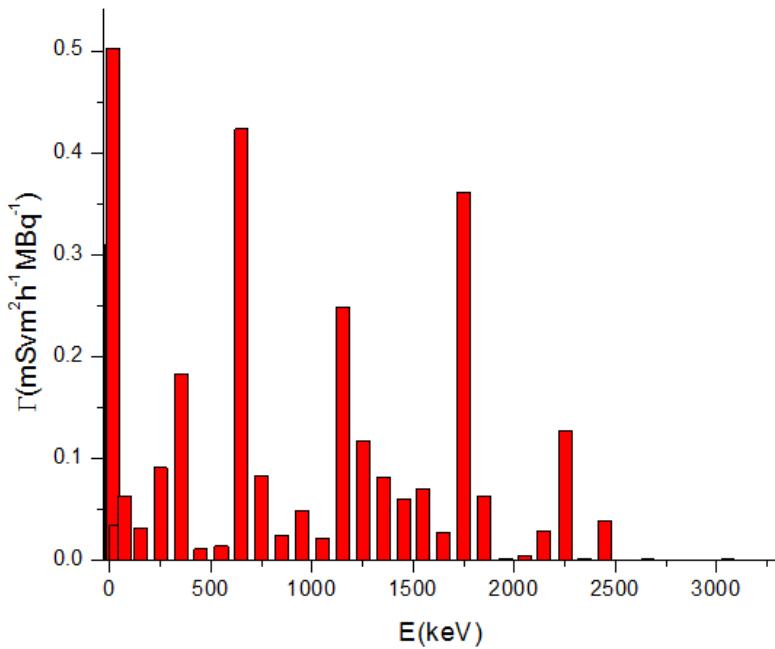
Dobijeni rezultati su predstavljeni u tabeli 3:

Tabela 3- gama konstanta računata korišćenjem jedne energije

E(keV)	$\Gamma (\text{mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}) \cdot 10^{-4}$
810	2.243

- Slučaj 2

U drugom slučaju gama konstanta računata je korišćenjem svih energija uranijumovog niza. Energije su grupisane u intervalima od po 100 keV, a zatim je izračunata srednja energija za svaki od intervala. Gama konstanta za svaki od intervala računata je korišćenjem usrednjene energije, kao i odgovarajućeg apsorpcionog koeficijenta za tu energiju. Verovatnoća emisije dobijena je sumiranjem svih verovatnoća emisije unutar datog intervala energija. U slučaju 2 gama konstanta procenjena je na dva načina: korišćenjem svih energija (od 9 keV) i korišćenjem energija od 40 keV pa naviše. Razlog za odbacivanje niskih energija je njihova mala prodorna moć, što znači da usled samoapsorpcije u građevinskom materijalu određene debljine ove energije neće biti detektovane. Napomenimo ovde da je običaj da se gama konstante računaju i prikazuju u tablicama sa učešćem svih gama prelaza niskih energija, počev od nekoliko keV. Proračun gama konstante bez upotrebe najnižih energija je izvršen i iz još jednog razloga. Naime u Referenci [5] nisu uzimani u obzir niskoenergetski prelazi. U slučaju da želimo izvršiti poređenje sa rezultatima iz Reference [5], izvršen je i proračun gama konstante bez γ -prelaza niskih energija. Dobijeni rezultati su dati u tabeli 4:



Slika 6-doprinos gama konstanti intervala od 100 keV ukupnoj gama konstanti

Tabela 4-gama konstanta računata korišćenjem energija usrednjениh na intervalu od 100 keV

E(keV)	Γ (mSv·m ⁻² ·h ⁻¹ ·MBq ⁻¹)·10 ⁻⁴
9.42-3269.7	3.934
46.539-3269.7	2.230

- Slučaj 3

U trećem slučaju gama konstanta računata je korišćenjem svih energija uranijumovog niza (627 γ -prelaza). Za svaku od energija ponaosob gama konstatna računata je korišćenjem apsorpcionog koeficijenta, kao i verovatnoće emisije koji odgovaraju datoj γ liniji. Ukupna gama konstanta dobijena je sumiranjem gama konstanti za svaku pojedinačnu liniju. U slučaju 3 (kao i u slučaju 2) gama konstanta procenjena je na dva načina: korišćenjem svih energija (od 9 keV) i korišćenjem energija od 40 keV pa naviše. Dobijeni rezultati su dati u tabeli 5:

Tabela 5- gama konstanta računata korišćenjem svih energija

E(keV)	Γ (mSv·m ⁻² ·h ⁻¹ ·MBq ⁻¹)·10 ⁻⁴
9.42-3269.7	3.993
46.539-3269.7	2.213

Torijumov niz

- Slučaj 1

U prvom slučaju korišćeni su podaci dati u Referenci [5]. Postupak je isti kao i u slučaju 1 za uranijumov niz. Međutim, za torijumov niz može se koristiti procena doze za dve energije. Prva energija dobijena je usrednjavanjem, dok je energija od 2615 keV tretiana posebno, jer doprinosi ukupnoj dozi sa oko 40 %. Verovatnoća emisije usrednjene γ -linije dobijena je sumiranjem svih verovatnoća emisije datog niza, izuzimajući prelaz od 2621 keV, a apsorpcioni koeficijent odabran je na osnovu usrednjene energije. Verovatnoća emisije i apsorpcioni koeficijent za γ -liniju od 2615 keV tretirani su zasebno, tako da se ukupna gama konstanta dobija zbirom doprinosa dve gama energije. Napomenimo ovde da su autori u Referenci [5] i u slučaju niza ^{232}Th koristili samo nekolicinu najintenzivnijih prelaza za usrednjavanje i određivanje ukupnog intenziteta. Podaci koji su korišćeni pri proceni gama konstante su:

Tabela 6- podaci za torijumov niz dati u Referenci [5]

E(keV)	p _γ (%)	μ _ρ (cm ² g ⁻¹)·10 ⁻⁵
587	2.05	0.0295
2615	0.356	0.0217

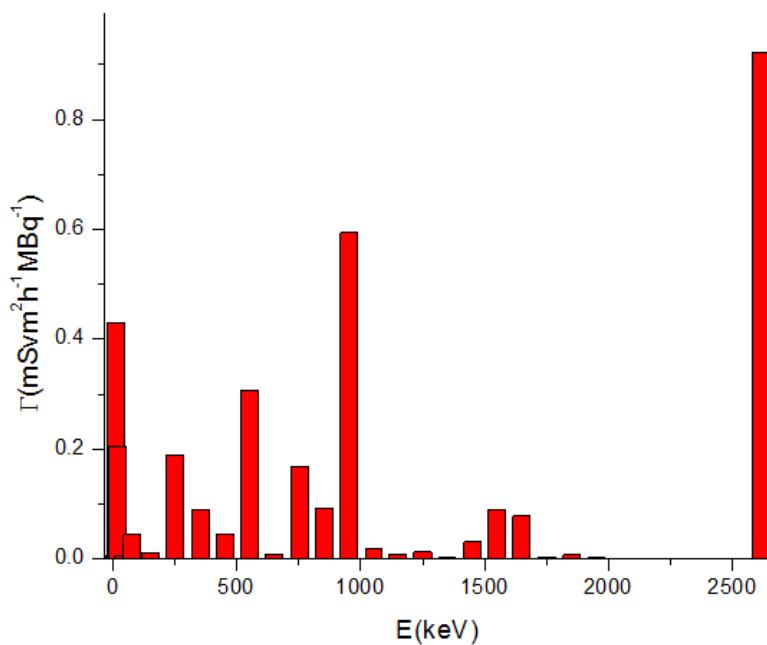
Korišćenjem podataka datih u tabeli 6 izračunata je gama konstanta. Ukupna gama konstanta dobijena je sabiranjem gama konstante dobijene korišćenjem usrednjene energije i gama konstante dobijene korišćenjem energije od 2615 keV. Rezultati su predstavljeni u tabeli 7:

Tabela 7- gama konstanta računata korišćenjem dve energije

E(keV)	Γ(mSv·m ² ·h ⁻¹ ·MBq ⁻¹)·10 ⁻⁴
587.7	1.629
2614.533	0.926
	2.555

- Slučaj 2

U drugom slučaju, prilikom računanja konstante za torijumov niz korišćen je isti postupak kao u slučaju 2 za uranijumov niz. Gama konstanta računata je korišćenjem svih energija torijumovog niza. Energije su grupisane u intervalima od po 100 keV, a zatim je izračunata srednja energija za svaki od intervala. Gama konstanta za svaki od intervala računata je korišćenjem usrednjene energije, kao i odgovarajućeg apsorpcionog koeficijenta za tu energiju. Verovatnoća emisije dobijena je sumiranjem svih verovatnoća emisije unutar datog intervala energija. U slučaju 2 gama konstanta procenjena je na dva načina: korišćenjem svih energija (od 8 keV) i korišćenjem energija od 39 keV pa naviše. Razlog za odbacivanje niskih energija je njihova mala prodorna moć, što znači da usled samoapsorpcije u građevinskom materijalu određene debljine ove energije neće biti detektovane. Dobijeni rezultati su predstavljeni u tabeli 8:



Slika 7- doprinos gama konstanti intervala od 100 keV ukupnoj gama konstanti

Tabela 8- gama konstanta računata korišćenjem energija usrednjениh na intervalu od 100 keV

$E(\text{keV})$	$\Gamma(\text{mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}) \cdot 10^{-4}$
8.953-2614.533	3.667
39.858-2614.534	2.735

- Slučaj 3

U trećem slučaju gama konstanta računata je na isti način kao u slučaju 3 za uranijumov niz, korišćenjem svih energija (535 γ -prelaza) torijumovog niza. Za svaku od energija ponaosob gama konstatna računata je korišćenjem apsorpcionog koeficijenta, kao i verovatnoće emisije koji odgovaraju dатој γ liniji. Ukupna gama konstanta dobijena je sumiranjem gama konstanti za svaku pojedinačnu liniju. U slučaju 3 (kao i u slučaju 2) gama konstanta procenjena je na dva načina: korišćenjem svih energija (od 8 keV) i korišćenjem energija od 39 keV pa naviše. Dobijeni rezultati su dati u tabeli 9:

Tabela 9-gama konstanta računata korišćenjem svih energija

$E(\text{keV})$	$\Gamma(\text{mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}) \cdot 10^{-4}$
8.953-2614.533	3.693
39.858-2614.534	2.712

Kalijum

U kalijumovom slučaju postoji samo jedna energija, pa je račun pojednostavljen.

- Slučaj 1

U prvom slučaju za kalijum korišćeni su podaci dati u Referenci [5]. Kalijum ima samo jednu γ liniju od 1461 keV, pa su za izračunavanje gama konstante upotrebljeni apsorpcioni koeficijent i verovatnoća prelaza koji odgovaraju dатој liniji:

Tabela 10-podaci za kalijum dati u Referenci [5]

$E(\text{keV})$	$p_\gamma (\%)$	$\mu_p (\text{cm}^2 \text{g}^{-1}) \cdot 10^{-5}$
1461	0.107	0.0257

Korišćenjem podataka datih u tabeli 10 izračunata je gama konstanta. Rezultati su dati u tabeli 11:

Tabela 11-gama konstanta računata korišćenjem podataka datih u Referenci [5]

$E(\text{keV})$	$\Gamma(\text{mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}) \cdot 10^{-4}$
1461	0.184

- Slučaj 2

U drugom slučaju, za izračunavanje gama konstante za kalijum korišćen je prelaz od 1460.83 keV, verovatnoće prelaza 0.11 %. Rezultati su predstavljeni u tabeli 12:

Tabela 12- gama konstanta

E(keV)	$\Gamma(\text{mSv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1})\cdot 10^{-4}$
1460.83	0.189

Poređenje:

Ukoliko se rezutati računanja gama konstante tačkastog izvora za sva tri slučaja uporede, vidljivo je da nema značajnih razlika i da se svaki od tri slučaja može ravnopravno primenjivati. Evidentno su srednje vrednosti energija uranijumovog i torijumovog niza, kao i njihovi intenziteti odabrani na taj način da se dobije dobra saglasnost sa stvarnom gama konstantom koja je izračunata sa učešćem svih gama prelaza.

Takođe, pokazano je da za tačkasti izvor postoji velika razlika između rezultata koji su dobijeni uključivanjem niskih energija i rezultata dobijenih zanemarivanjem istih. To znači da se u slučaju kada ne postoji značajna samoapsorpcija u samom izvoru zračenja ili nekim materijalima koji se oko njega nalaze itekako moraju uzeti u obzir i niskoenergetski prelazi. Ovako velika razlika potiče od činjenice da je maseni apsorpcioni koeficient vazduha brzo opadajuća funkcija energije, kao što se može videti sa slike 5. Kako u gama konstanti figuriše proizvod energije masenog apsorpcionog koeficiente vazduha, jasno je da će doprinos niskih energija biti znatno veći nego što je to slučaj sa visokim energijama.

Napomenimo ovde da se procena gama konstante koja je dobijena u Referenci [5] za nizove ^{238}U i ^{232}Th veoma dobro slaže sa vrednostima gama konstante dobijene kada su izostavljene niske energije. Autori u Referenci [5] uopšte nisu uzimali u obzir niskoenergetske prelaze.

6.3 Tačkasti izvor

Tačkastim izvorom može se smatrati onaj izvor čije su dimenzije zanemarljive u odnosu na rastojanje na kom se meri doza zračenja. U ovom slučaju važi pravilo 10x, što znači da ukoliko je rastojanje najmanje deset puta veće od dimenzija izvora, on može biti tretian kao tačkasti.

Izraz za izračunavanje ekspozicione doze koja potiče od tačkastog izvora je:

$$\dot{X} = \frac{A \cdot \Gamma}{r^2} \quad 6.9$$

gde je:

A-aktivnost radionuklida $\left(\frac{Bq}{kg}\right)$

Γ -gama konstanta

r-rastojanje od izvora do detektora zračenja (m)

6.4 Doprinos uranijuma i torijuma

U cilju izračunavanja doprinosa ^{238}U i ^{232}Th ukupnoj dozi zračenja iskorišćene su vrednosti gama konstanti dobijene korišćenjem svih energija uranijuma i torijuma, kao i konstante dobijene korišćenjem podataka datih u Referenci [5].

Doza zračenja za tačkasti izvor računata je po formuli 6.9.

U prvom slučaju, računate su doze koje potiču od uranijuma i torijuma, pri čemu je uzeto da su aktivnosti uranijuma i torijuma jednake i iznose:

$$A_i = 100 \frac{Bq}{kg}$$

Dok je za rastojanje na kom je merena doza uzeto:

$$r = 3m$$

- U slučaju korišćenja svih energija pri dobijanju gama konstante dobijene su sledeće vrednosti:

Tabela 13-odnos doza uranijuma i torijuma, tačkasti izvor za aktivnost od $100 \frac{Bq}{kg}$

	$\Gamma(\text{mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}) \cdot 10^{-4}$	$X(\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1})$	$X_{\text{Th}}/X_{\text{U}}$
^{238}U	2.213	0.002	1.226
^{232}Th	2.712	0.003	

- U slučaju korišćenja podataka datih u Referenci [5] dobijene su vrednosti:

Tabela 14-odnos doza uranijuma i torijuma, tačkasti izvor za aktivnost od $100 \frac{Bq}{kg}$

	$\Gamma(\text{mSv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}) \cdot 10^{-4}$	$X(\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1})$	$X_{\text{Th}}/X_{\text{U}}$
^{238}U	2.243	0.002	1.139
^{232}Th	2.555	0.003	

U slučaju korišćenja jedinične aktivnosti $100 \frac{Bq}{kg}$ doprinos uranijuma ukupnoj dozi zračenja manji je od doprinosa torijuma. Takođe, primetna su i manja neslaganja (oko 7%) između rezultata dobijenih korišćenjem svih energija uranijumovog i torijumovog niza i rezultata dobijenih korišćenjem samo jedne energije uranijumovog i dve energije torijumovog niza.

6.5 Ekvivalentna aktivnost radijuma

Ekvivalentna aktivnost radijuma koristi se da bi se uporedila specifična aktivnost materijala koji sadrže različite količine ^{238}U , ^{232}Th i ^{40}K i matematički je definisana kao:

$$Ra_{eq} \left(\frac{Bq}{kg} \right) = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.77A_K \quad 6.10$$

Gde su A_{Ra} , A_{Th} , A_K aktivnosti uranijuma, torijuma i kalijuma respektivno. Ovom relacijom pretpostavljano je da $10 \frac{Bq}{kg}$ ^{238}U , $7 \frac{Bq}{kg}$ ^{232}Th i $130 \frac{Bq}{kg}$ ^{40}K proizvode jednaku dozu gama zračenja.

Prepostavka ekvivalentne aktivnosti radijuma je da je odnos efekata koje proizvode torijum i uranijum $\frac{10}{7}$, što daje 1.43.

Prilikom računanja doprinosa uranijuma i torijuma korišćenjem podataka dobijenim u ovom radu, pokazano je da je odnos efekata torijuma i uranijuma 1.23, a korišćenjem podataka datim u Referenci [5] ovaj odnos je još niži i iznosi 1.14.

Rezultati dobijeni u ovom radu otvaraju pitanje opravdanosti radijumske jedinice definisane formulom 6.10.

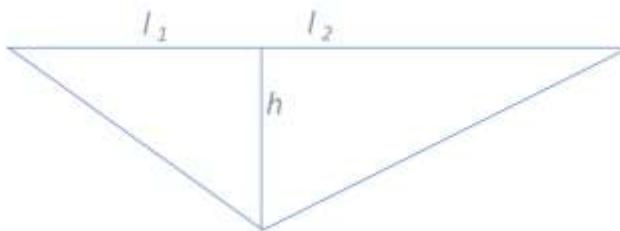
7 Neki najprostiji oblici izvora zračenja

7.1 Linijski izvor

Geometrija tačkastog izvora nije pogodna za rešavanje svih problema, pa je ponekad potrebno pristupiti kompleksnijem načinu rešavanja istih. Kompleksniji metod za procenu doze uključio bi posmatranje linijskog izvora (jednodimenzioni izvor konačne dužine). Na primer, prilikom proticanja radioaktivne tečnosti kroz izvor oblika cevi, ovakva geometrija bila bi pogodna za procenu zračenja. Ukoliko je rastojanje na kome se doza meri zanemarivo u odnosu na poluprečnik izvora, tada izvor može biti tretiran kao linijski (uobičajeno se koristi pravilo 10x-to znači da rastojanje mora biti bar 10 puta veće od poluprečnika izvora). Međutim, važno je napomenuti da ukoliko je dato rastojanje deset puta veće i od dužine izvora, tada se izvor ponovo može smatrati tačkastim.

Za linijski izvor gama zračenja linijske aktivnosti $C_l \left(\frac{Bq}{m} \right)$ i dužine $L(m)$ (podeljene na dužine l_1, l_2), izraz za procenu doze na rastojanju $h(m)$ ima sledeći oblik:

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot C_l}{h} \left(\tan^{-1} \frac{l_1}{h} + \tan^{-1} \frac{l_2}{h} \right) \quad 7.1$$

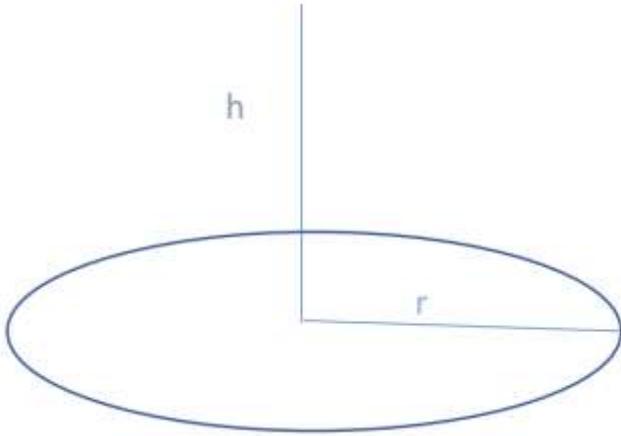


Slika 8-linijski izvor

7.2 Površinski izvor

Tanki dvodimenzioni izvor naziva se površinskim. Površinskim izvorom se može smatrati tečnost prosuta po podu, koja u sebi sadrži rastvoren radionuklid. U slučaju tankog izvora kružnog oblika poluprečnika $r (m)$ i površinskog koncentracije $C_a \left(\frac{Bq}{m^2} \right)$, ekspozicionala doza računata na rastojanju $h (m)$ direktno iznad centra izvora data je izrazom:

$$\dot{X} = \pi \cdot \Gamma \cdot C_a \cdot \ln \left(\frac{r^2 + h^2}{h^2} \right) \quad 7.2$$



Slika 9-površinski izvor

7.3 Zapreminski izvor

Neke situacije moraju biti tretirane kao trodimenzione. Jedan od načina da se proceni ekspoziciona doza zapreminskog izvora je da se on svede na niz površinskih izvora. Na primer, razmatra se izvor debljine d i zapreminske koncentracije $C_v \left(\frac{Bq}{m^3} \right)$. Ukoliko je linearni atenuacioni koeficijent materijala μ , veza između ekvivalentne površinske koncentracije C_a i zapreminske koncentracije C_v data je kao:

$$dC_a = C_v \cdot dx \cdot e^{-\mu x} \quad 7.3$$

$$C_a = \int_0^d C_v \cdot dx \cdot e^{-\mu x} = \frac{C_v}{\mu} (1 - e^{-\mu d}) \quad 7.4$$

Iraz 7.4 je posebno značajan pošto uračunava samoapsorpciju u samom uzorku.

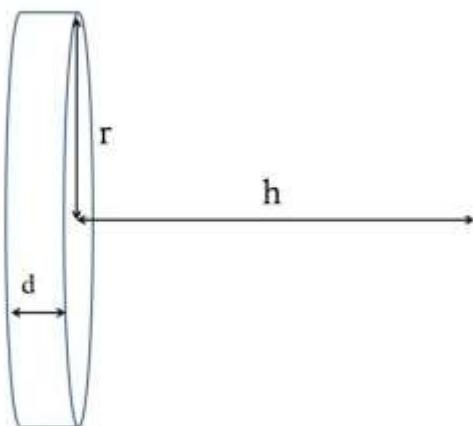
Koristeći gornji izraz, ekspoziciona doza za izvor oblika cilindra može se izračunati kao:

$$\hat{X} = \frac{\pi \cdot \Gamma \cdot C_v \cdot (1 - e^{-\mu d})}{\mu} \cdot \ln \frac{r^2 + h^2}{h^2} \quad 7.5$$

h (m) – rastojanje od izvora do tačke merenja

r (m) – poluprečnik cilindričnog izvora debljine d

$\mu(cm^{-1})$ -atenuacioni koeficijent materijala od kog je izvor načinjen



Slika 10-izvor oblika cilindra

7.4 Atenuacioni koeficijent granita

Kako je osnovni zadatak ovog rada da se proceni efektivna doza gama zračenja u prostoriji kojoj su zidovi obloženi granitnim pločama, za dalji račun su nam potrebne vrednosti linearног atenuacionog koeficijenta granita za sve energije koje se posmatraju. Ovaj koeficijent dobijen je korišćenjem programa XCOM-Referenca [3] koji se može naći na službenom sajtu Nacionalnog instituta za standard NIST. Osnovni zahtev ovog programa je da se poznaje hemijski sastav materijala čiji se atenuacioni koeficient računa. Poznato je da se usrednjeni sastav granita može predstaviti kao smeša jedinjenja prikazanih u tabeli 15:

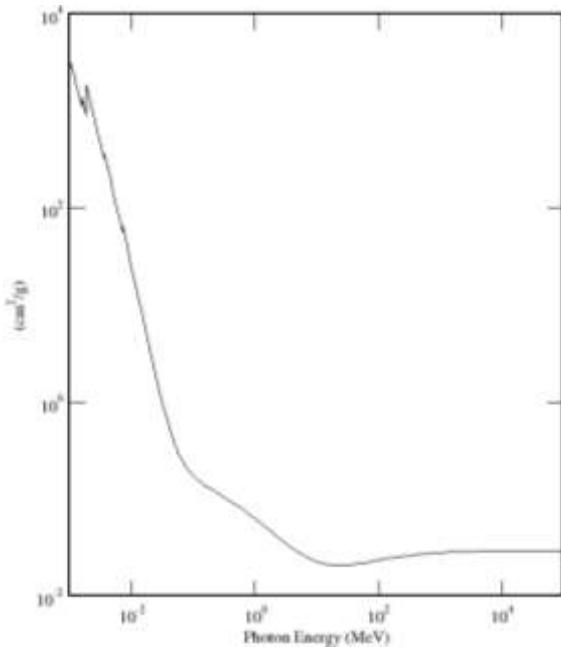
Tabela 15-sastav granita

Jedinjenje	Procentualni udio (%)
SiO_2	72.04
Al_2O_3	14.42
K_2O	4.12
Na_2O	3.69
CaO	1.82
FeO	1.68
Fe_2O_3	1.22
MgO	0.71
TiO_2	0.3
P_2O_5	0.12
MnO	0.05

Kada se unesu sva jedinjenja, kao i njihovih procentualni udeli u sastavu granita dobija se tabela i grafik zavisnosti masenog atenuacionog koeficijenta od energije fotona. Atenuacioni koeficijent izražen je u $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$. Kako se može uzeti da je gustina granita $2.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, što je vrednost

koja se nalazi i u IAEA preporuci, veoma je jednostavno izračunati linearne atenuacione koeficijente granita.

Korišćenjem podataka dobijenih XCOM programom, čiji je grafički prikaz dat na slici 16, metodom interpolacije izračunati su maseni koeficijenti za odgovarajuće energije fotona u odgovarajućem opsegu energija za uranijum , torijum i kalijum.



Slika 11-zavisnost linearne atenuacione koeficijente granita od energije zračenja

Funkcije za izračunavanje linearne atenuacione koeficijente za granit date su jednačinama (7.6-7.8) za svaki energetski interval:

$$0 - 50 \text{ keV}: e^{\left(-0.6081 + 8.37747 \cdot e^{-\frac{E}{0.01786}} \right)} \quad 7.6$$

$$50 - 200 \text{ keV}: e^{\left(-1.1329 + 3.71915 \cdot e^{-\frac{E}{0.03753}} \right)} \quad 7.7$$

$$200 - 1000 \text{ keV}: e^{\left(-2.13234 + 1.2943 \cdot e^{-\frac{E}{0.715}} \right)} \quad 7.8$$

$$> 1000 \text{ keV}: e^{\left(-2.60885 + 1.44641 \cdot e^{-\frac{E}{1.70193}} \right)} \quad 7.8$$

Atenuacioni koeficijent za granit izračunat je za 535 γ -prelaza torijumovog niza, 627 γ -prelaza uranijumovog niza i 1 γ -prelaz za kalijum.

7.5 Računanje ekspozicione doze za cilindrični izvor

Da bi se ustanovilo do koje mere niske energije imaju uticaja na dozu u slučaju debelog cilindričnog izvora, doza je računata za izvor poluprečnika 2m (dok je debljina izvora promenljiva), na rastojanju od 3m. Prilikom računanja doze korišćena je formula 7.5 za izračunavanje doprinosa svake pojedinačne energije ukupnoj dozi. Kako se u slučaju uranijumove i torijumove serije posmatra veliki broj energetskih prelaza, ukupna doza se izračunava sumiranjem doprinosa svih postojećih energija. Korišćen je sledeći izraz za ukupnu dozu:

$$\dot{H} = \frac{c_v}{4} \sum E_{\gamma i} p_{\gamma i} \mu_{\rho i} \frac{1-e^{\mu_i d}}{\mu_i} \ln \frac{r^2+h^2}{h^2} \quad 7.9$$

Za aktivnost izvora uzeta je vrednost od $310 \frac{Bq}{kg}$ (torijumov niz). Radi poređenje izračunate su doze za sve energije datog niza, kao i za samo dve energije (kao što je to urađeno u Referenci [5]). Rezultati su predstavljeni tabelarno:

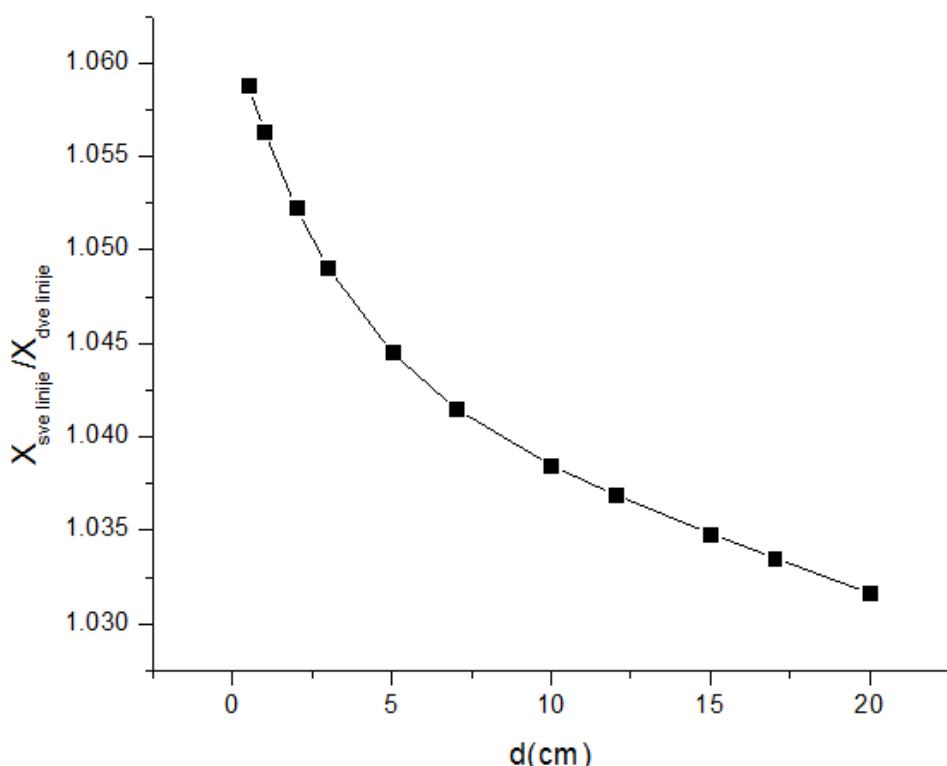
Tabela 16-eksppciona doza cilindričnog izvora

d (cm)	sve energije		dve energije
	X(mSV)-sa niskim E	X (mSv)-bez niskih E	X (mSv)
0.5	0.009	0.008	0.008
1	0.017	0.016	0.015
2	0.030	0.030	0.029
3	0.042	0.042	0.040
5	0.061	0.061	0.058
7	0.075	0.075	0.072
10	0.090	0.090	0.086
12	0.097	0.097	0.093
15	0.105	0.104	0.101
17	0.108	0.108	0.105
20	0.113	0.112	0.109

Ukoliko se uporede rezultati dobijeni korišćenjem svih energija, sa i bez zanemarivanja niskih energija, primećuje se da je na malim debljinama ova razlika primetna, ali već pri debljinama od 2 cm ova razlika gotovo isčezava usled efekata samoapsorpcije (efekti samoapsorpcije rastu sa porastom debljine materijala). Odavde se jasno vidi da niske energije nemaju značajnog doprinosa ukupnoj dozi kod zidova od granita kojima je debljina veća od nekoliko centimetara.

Ovde je potrebno rešiti još jednu nedoumicu. Pokazalo se da aproksimacija sa dve energije kojima je zamjenjen kompletan energetski spektar gama zračenja radionuklida torijumovog niza predstavlja dosta dobru aproksimaciju kada se računa gama konstanta tačkastog izvora kod koga se samoapsorpcija ne uzima u obzir. Ova aproksimacija je dobra samo u slučaju kada se

ne posmatraju niske energije. Kako se prodorne moći različitih energija gama zračenja mogu veoma razlikovati, neophodno je videti da li se sa povećanjem debljine izvora dobija neka razlika u procenjenoj dozi kada su sve energije uzete u obzir i kada se upotrebljavaju samo dve energije. Usled razlika u prodornoj moći, moguće je očekivati neku razliku između ova dva slučaja usled samoapsorpcije. Poređenjem rezultata dobijenih korišćenjem svih energija i rezultata dobijenih korišćenjem dve energije dobijena je grafička zavisnost prikazana na slici 12:



Slika 12 odnos ekspozicione doze cilindričnog izvora pri korišćenju svih i ekspozicione doze pri korišćenju samo dve energije

Iz dobijenih rezultata zaključuje se da se razlika između vrednosti doza dobijenih korišćenjem svih energija iz torijumovog niza i korišćenjem samo dve usrednjene energije pojavljuje, ali je ona veoma mala (na većim debljinama je reda veličine 3%). To znači da se model sa dve usrednjene energije može koristiti za opisivanje realnih slučajeva, a da se tom prilikom ne gubi informacija.

8 Doza od građevinskog materijala

8.1 Radioaktivnost građevinskog materijala

Svi građevinski materijali sadrže određenu količinu radionuklida. Materijali dobijeni od stena i kamena uglavnom sadrže prirodne radionuklide uranijumovog i torijumovog niza, kao i radioaktivni izotop ^{40}K . Izloženost radijaciji koja potiče od građevinskog materijala može se podeliti na unutrašnju i spoljašnju. Spoljna je uzrokovana direktnim gama zračenjem, a pri povišenim vrednostima radionuklida u građevinskom materijalu može produkovati doze i do nekoliko mSva^{-1} . Unutrašnja izloženost radijaciji uzrokovana je udisanjem radona (^{222}Rn), torona (^{220}Rn), kao i njihovih kratkoživećih izotopa.

Svrha kontrolisanja radioaktivnosti u građevinskom materijalu jeste da se smanji izloženost stanovništva radijaciji koja je uzrokovana povišenim sadržajem prirodnih radionuklida u istom. To znači da je potrebno smanjiti dozu zračenja koja potiče od ovih materijala što je više moguće. Budući da je nemoguće potpuno eliminisati zračenje koje potiče od građevinskog materijala, kontrola treba da propiše dozvoljene granice aktivnosti i zabrani upotrebu materijala koji prekoračuju dozvoljene vrednosti.

Kontrola radioaktivnost u građevinskom materijalu zasniva se na dva kriterijuma:

- Dozni kriterijum za kontrolu – Kontrole treba da budu zasnovane na kriterijumu doze koji se utvrđuje uzimajući u obzir ukupne nacionalne okolnosti. U okviru Evropske unije, za zaštitu od zračenja stanovništva treba uzimati u obzir godišnju dozu od 1 mSv kao gornju granicu. Veće doze treba prihvati samo u nekim veoma izuzetnim slučajevima, kada se materijali koriste lokalno. U Evropskoj uniji se preporučuje da kontrole treba da budu zasnovane na godišnjoj dozi u opsegu 0.3 mSv - 1 mSv .
- Izuzetak - Građevinski materijali treba da budu izuzeti od svih ograničenja koja se tiču njihove radioaktivnosti, ako gama radijacija koja potiče iz njih ne povećava godišnju efektivnu dozu više od 0.3 mSv .

8.2 Aproksimiranje sferom i računanje doze

Standardna soba koja je korišćena u proračunima ima dimenzije 5m x 4m x 2.8 m (dva zida dimenzija 5x2.8, dva zida dimenzija 4x2.8 i pod i plafon dimenzija 5x4). Debljina unutrašnjeg sloja (obloge) je 3 cm.

Prvi deo računa podrazumeva računanje količine materijala koja je sadržana u zidovima sobe. Korišćeni materijal je granit.

Zapremina materijala u zidovima računata je po formuli:

$$V = 2 \cdot (V_{4x5} + V_{2.8x5} + V_{2.8x4}) \quad 8.1$$

Dobijena zapremina materijala je:

$$V = 2 \cdot (0.6 + 0.42 + 0.336) = 2.712 m^3$$

Gustina granita je $\rho = 2600 \frac{kg}{m^3}$,

pa je ukupna količina materijala (granita) sadržana u zidovima sobe računata po formuli:

$$m = V \cdot \rho \quad 8.3$$

i iznosi:

$$m = 7051.2 kg = 7.05 t$$

U najjednostavnijem slučaju, soba je aproksimirana sferom koja u sebi sadrži istu količinu materijala kao i zidovi. Uslov je da zidovi sfere budu iste debljine kao i zidovi u sobi ($d=3cm$).

$$\begin{aligned} m_{zidova} &= m_{sfere} = 7.05 t \\ V_{zidova} \cdot \rho &= V_{sfere} \cdot \rho \\ V_{sfere} &= 4\pi \cdot r^2 \cdot d \\ V_{sobe} &= 4\pi \cdot r^2 \cdot d \end{aligned} \quad 8.4$$

Odakle se dobija poluprečnik sferne ljske debljine 3cm:

$$r = 2.68 m$$

Dakle, soba datih dimenzija može se aproksimirati sferom poluprečnika r koja u sebi sadrži istu količinu materijala. U ovom slučaju korišćena je formula za zapreminu sferne ljske debljine d : $V_{sfere} = 4\pi r^2 d$.

Da bi se izračunala doza zračenja, sfera je podeljena na kockice dimenzija 3x3x3 cm. Kockice ovih dimenzija mogu se smatrati tačkastim izvorom (u odnosu na rastojanje 2.68 m). Površina, zapremina i masa pojedinačne kockice date su jednačinama:

$$P_k = a^2 = 9 \cdot 10^{-4} m^2 \quad 8.5$$

$$V_k = a^3 = 27 \cdot 10^{-6} m^3 \quad 8.6$$

$$m_k = V_k \cdot \rho = 0.0702 kg \quad 8.7$$

Broj kockica koji se može smestiti u sferu iznosi:

$$n_k = \frac{P_{sfere}}{P_{kockice}} = 100444 \quad 8.8$$

Prilikom računanja doze korišćene su gama konstante izračunate u poglavlju 6.2 (korišćenjem svih γ -prelaza).

Doza Uranijum

Za izračunavanje brzine doze koja potiče od jedne kockice korišćena je formula:

$$\dot{X}_k = \frac{A_i \cdot m_k}{r^2} \sum_i \Gamma_i \quad 8.9$$

A za izračunavanje ukupne brzine doze koja potiče od svih kockica:

$$\dot{X} = n_k \cdot \dot{X}_k = \frac{A_i \cdot m_k \cdot n_k}{r^2} \sum_i \Gamma_i \quad 8.10$$

gde je $A_i = 500 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ – aktivnost uranijuma, m - masa korišćenog materijala, r^2 - poluprečnik sfere, a $\Gamma_i = 3.993 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mSv m}^2}{\text{h MBq}}$ – gama konstanta uranijumovog niza , izračunata u poglavlju 6.2.

Dobijena je vrednost:

$$\dot{X} = 1.96 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$$

Doza torijum

Isti postupak ponovljen je za izračunavanje brzine doze koja potiče od raspada torijumovog niza i korišćenjem formule 8.10 dobijena je vrednost:

$$\dot{X} = \frac{A_i \cdot m_k \cdot n_k}{r^2} \sum_i \Gamma_i = 1.12 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$$

Pri čemu je $A_i = 310 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$, a $\Gamma_i = 3.693 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mSv m}^2}{\text{h MBq}}$.

Doza kalijum

Prilikom izračunavanja brzine doze koja potiče od raspada kalijuma ponovljen je postupak korišćen za uranijumov i torijumov niz. Korišćenjem jednačine 8.10 dobijena je vrednost:

$$\dot{X} = \frac{A_i \cdot m_k \cdot n_k}{r^2} \cdot \Gamma = 0.47 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$$

Pri čemu je $A_i = 4000 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$, a $\Gamma = 1.189 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mSv m}^2}{\text{h MBq}}$.

Vrednosti koncentracija aktivnosti za uranijum od $A_i = 500 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$, torijum od $A_i = 310 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ i kalijum od $A_i = 4000 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ su uzete iz dokumenta Uputstvo o postupanju prilikom kontrole građevinskog materijala na grenicama Republike Srbije (Referenca [6]).Ove će se vrednosti koristiti u daljem tekstu da bi se konačno mogle uporediti doze koje smo izračunali sa dozama

koje su navedene u službenim dokumentima, a dobijene su računskim putem koji je propisan od strane IAEA.

Ukupna godišnja doza

Ukupna godišnja doza koja potiče od sfernog izvora debljine 3 cm i poluprečnika 2.68 m dobijena je sabiranjem doprinosa uranijumovog niza, torijumovog niza i kalijuma i množenjem dobijene vrednosti sa 7000 h. Dobijena je vrednost:

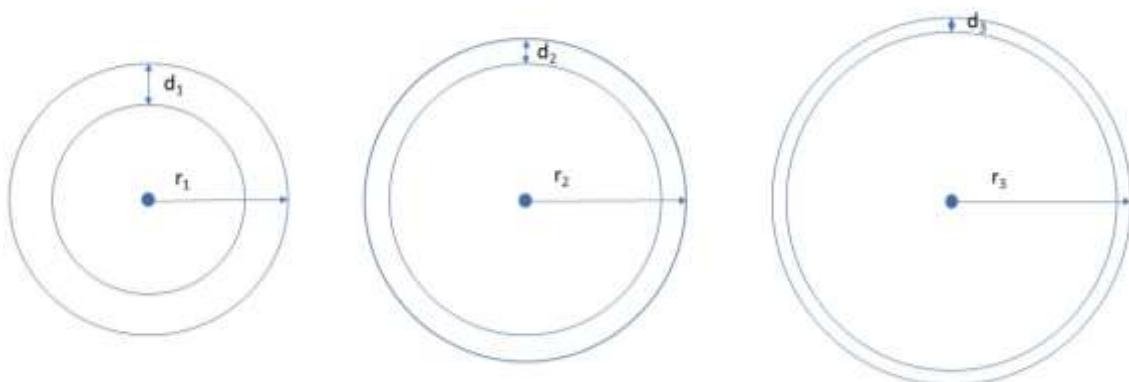
$$X_u = (\dot{X}_U + \dot{X}_{Th} + \dot{X}_K) * 7000 \text{ h} = 2.48 \text{ mSv}$$

8.3 Zavisnost doze zračenja od debljine i poluprečnika sferne ljske

U cilju prikazivanja zavisnosti doze zračenja od debljine i poluprečnika sferne ljske, posmatraju se dva slučaja. U oba slučaja doza je računata za uranijumov niz ($A_i = 500 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$).

Slučaj 1:

Prvi slučaj podrazumeva tri sfere, različitih debljina i različitih poluprečnika. Poluprečnici sfernih ljsaka su 1.7 m, 2 m i 2.5 m respektivno. Polazna prepostavka je da je debljina sfere najmanjeg poluprečnika 5 cm, kao i da je masa materijala sadržanog u sve tri sfere jednaka.



Slika 13-izvor sfernog oblika različitih debljina i poluprečnika

1. Zapremina prve (najmanje) sfere računata je korišćenjem formule 8.4:

$$V_1 = 4\pi \cdot r^2 \cdot d = 1.82 \text{ m}^3$$

a njena masa korišćenjem formule 8.3:

$$m_1 = V_1 \cdot \rho = 4732 \text{ kg}$$

Sfera je podeljena na kockice dimenzija 5x5x5 cm. Površina, zapremina i masa pojedinačne kockice date su jednačinama 8.5-8.7:

$$P_k = a^2 = 25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_k = a^3 = 125 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_k = V_k \cdot \rho = 0.325 \text{ kg}$$

Broj kockica koji se može smestiti u sferu 1 dat je jednačinom 8.8 i iznosi:

$$n_k = \frac{P_{sfere}}{P_k} = 14538$$

Korišćenjem formule 8.10 dobijena je ukupna brzina doze za sferu 1:

$$\dot{X} = \frac{A_i \cdot m_k \cdot n_k}{r_1^2} \sum_i \Gamma_i = 3.264 \cdot 10^{-4} \frac{mSv}{h}$$

2. Iz uslova da su mase materijala u sfernim ljkuskama jednake dobijena je debljina druge sfere:

$$m_1 = m_2 = 4732 \text{ kg}$$

$$V_1 = V_2$$

$$d_2 = 0.036 \text{ m}$$

U drugom slučaju sfera je podeljena na kockice dimenzija 3.6x3.6x3.6 cm. Površina, zapremina i masa jedne kockice dobijeni su korišćenjem formula 8.5-8.7:

$$P_k = a^2 = 12.96 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_k = a^3 = 47 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_k = V_k \cdot \rho = 0.121 \text{ kg}$$

Broj kockica koji se može smestiti u sferu 2 izračunat je korišćenjem formule 8.8 i iznosi:

$$n_k = \frac{P_{sfere}}{P_k} = 38788$$

Korišćenjem jednačine 8.10 dobijena je ukupna brzina doze za sferu 2:

$$\dot{X} = \frac{A_i \cdot m_k \cdot n_k}{r_2^2} \sum_i \Gamma_i = 2.343 \cdot 10^{-4} \frac{mSv}{h}$$

3. Isti uslovi korišćeni su i za treću sferu:

$$m_1 = m_3 = 4732 \text{ kg}$$

$$V_1 = V_3$$

$$d_3 = 0.023 \text{ m}$$

U trećem slučaju sfera je podeljena na kockice dimenzija 2.3x2.3x2.3 cm. Površina, zapremina i masa jedne kockice dobijeni su korišćenjem formula 8.5-8.7:

$$P_k = a^2 = 5.29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_k = a^3 = 122 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_k = V_k \cdot \rho = 0.032 \text{ kg}$$

Broj kockica koji se može smestiti u sferu 3 dobijen je koričćenjem formule 8.8 i iznosi:

$$n_k = \frac{P_{sfere}}{P_k} = 148468$$

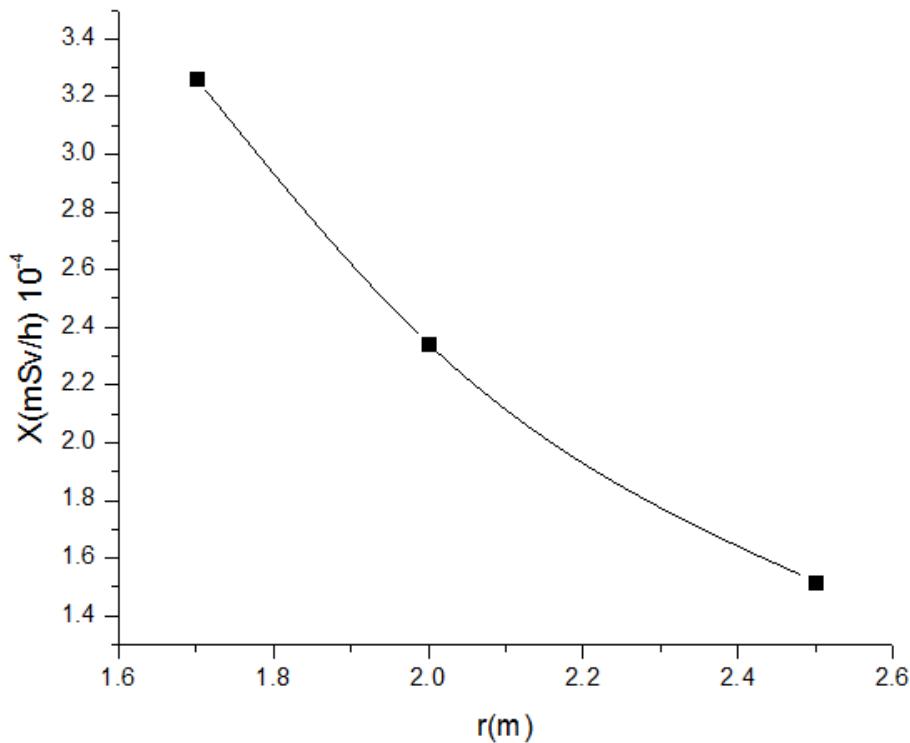
Korišćenjem formule 8.10 dobijena je brzina doze za sferu 3:

$$\dot{X} = \frac{A_i \cdot m}{r_3^2} \sum_i \Gamma_i = 1.518 \cdot 10^{-4} \frac{mSv}{h}$$

Zaključuje se da se povećanjem dimenzija sfernog izvora, uz uslov konstante mase, smanjuje i doza zračenja. Evidentno je da u jednom ovakvom slučaju efekat distance može znatno da smanji ukupnu dozu zračenja bez obzira što je količina materijala koja sadrži aktivne radionuklide u sva tri slučaja jednaka.

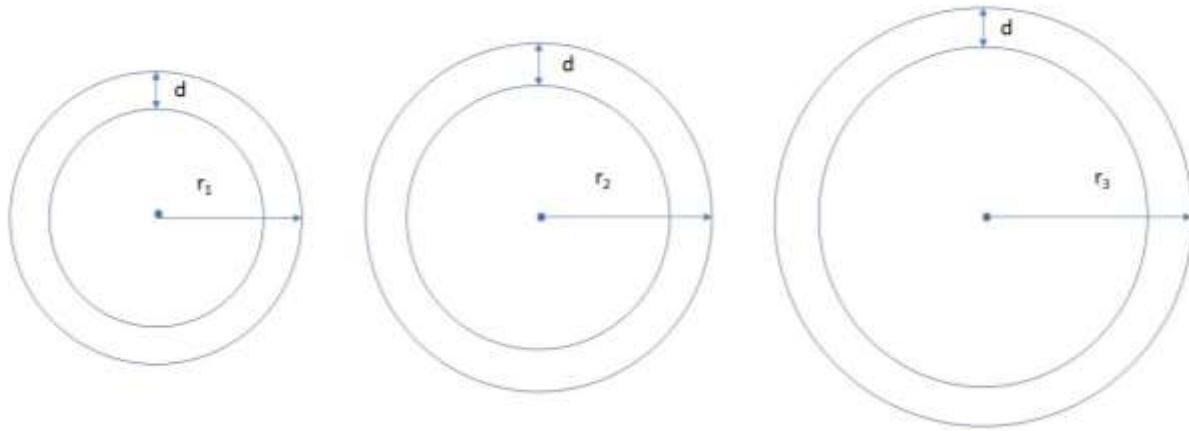
Tabela 17- brzina doze računata za sferne izvore različitih debljina i poluprečnika

	r (m)	d (cm)	m (kg)	m _k (kg)	n _k	X (mSv/h)
Sfera 1	1.7	5	4732	0.325	14538	$3.793 \cdot 10^{-4}$
Sfera 2	2	3.6	4732	0.121	38788	$2.722 \cdot 10^{-4}$
Sfera 3	2.5	2.3	4732	0.032	148468	$1.764 \cdot 10^{-4}$



Slika 14- zavisnost brzine doze sfernog izvora promenljive debljine od poluprečnika sfere

Slučaj 2:



Slika 15-izvori sfernog oblika istih debljina, a različitih poluprečnika

U ovom slučaju ponovo se posmatraju tri sfere različitih poluprečnika, ali debljina zidova sfere je ista i iznosi 3cm. Poluprečnici sfera 1.5 m, 2 m i 3 m.

$$d_1 = d_2 = d_3 = 3 \text{ cm}$$

U ovom slučaju će se u sfernim ljkuskama nalaziti različita količina materijala.

Zapremina svake od sfera računata je po formuli 8.4.

Svaka od sfera podeljena je na kockice dimenzija 3x3x3 cm, čija je površina, zapremina i masa data jednačinama 8.5-8.7.

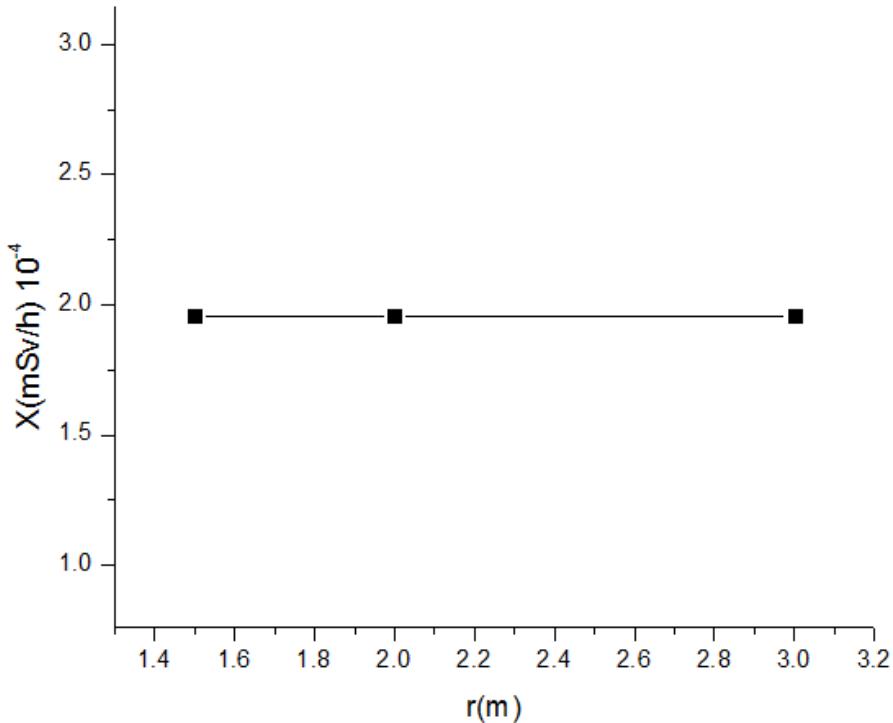
A brzina doze korišćenjem formule 8.10:

$$\dot{X}_i = \frac{A_i \cdot n_{ki} \cdot m_k}{r_i^2} \sum_i \Gamma_i$$

Tabela 18- brzina doze računata za sferne izvore istih debljina, a različitih poluprečnika

	r (m)	d (cm)	m (kg)	m_k (kg)	n_k	X (mSv/h)
Sfera 1	1.5	3	2205.4	0.0702	31411	$2.274 \cdot 10^{-4}$
Sfera 2	2	3	3920.7	0.0702	55855	$2.274 \cdot 10^{-4}$
Sfera 3	3	3	8821.6	0.0702	125666	$2.274 \cdot 10^{-4}$

U ovom slučaju ekspozicionala doza ostaje ista, iako se menja poluprečnik sferne ljkuske.



Slika 16-zavisnost brzine doze sfernog izvora konstantne debljine od poluprečnika sfere

Iz dobijenih rezultata za oba slučaja izvodi se zaključak da se sa povećanjem dimenzija sfere doza ne smanjuje, uz uslov da je debljina zidova ostala ista. Ovo se objašnjava time što i distanca i količina materijala rastu sa poluprečnikom sfere po funkciji R^2 . Na ovaj je način pokazano da veličina unutrašnjeg prostora ne igra značajnu ulogu ukoliko je debljina zida jednaka. To znači da možemo očekivati jednaku dozu u prostorijama različitih veličina pod uslovom da je debljina zidova u svim slučajevima jednaka.

Važno je napomenuti da prilikom procene doze od sfernog izvora samoapsorpcija nije korišćena, već je materijal smatran savršeno prozirnim za sopstveno zračenje.

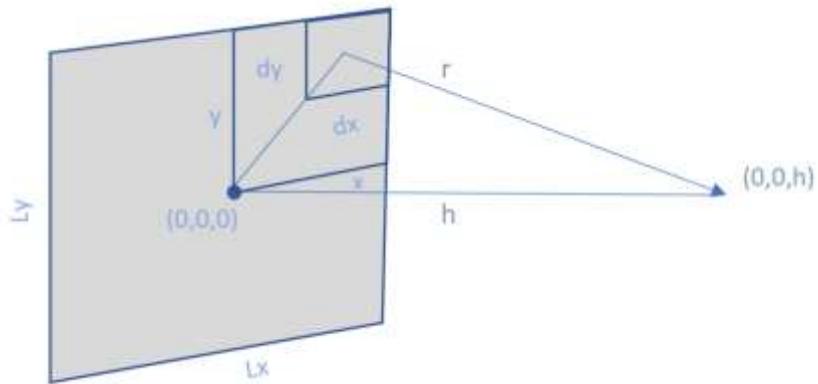
8.4 Aproksimacija zidova cilindričnim izvorom

U Referenci [5] doza je računata korišćenjem svega četiri energije (dve energije ^{232}Th , jedna energija ^{238}U i jedna energija ^{40}K), metodom integracije svih tačaka zida. U slučaju korišćenja svih energija (1200 linija), metod integracije bi bio previše komplikovan, pa je iz tog razloga u ovom radu iskorišćen analitički izraz za dozu. Budući da je poznat samo analitički izraz za dozu koja potiče od kružnog zida (cilindrični izvor) što je dato jednačinom 7.9, potrebno je pronaći uslove pod kojim bi doza koja potiče od jednog pločastog izvora pravougaone površine bila jednak dozi koju dobijamo od pločastog zida iste debljine ali kružne površine. Dodatni uslov koji se ovde postavlja je da je količina materijala u oba zida, pravougaone i kružne

površine, jednaka. Kako su debljine oba zida jednake, jasno je da pravougaonik i krug moraju imati jednake površine. Da bi doze koje ova dva zida proizvode u nekoj posmatranoj tački bile jednake, jedini parameter koji se može menjati u računu je distanca kružnog zida h .

Kako doza zračenja zavisi obrnuto od kvadrata rastojanja, da bismo izjednačili doze ova dva zida, pravougaonog i kružnog, neophodno je pronaći rastojanje h na kome će doza od kružnog zida biti jednaka dozi koja se dobija od pravougaonog zida u zadatoj geometriji standardne sobe. Ovo se postiže izjednačavanjem površinskog integrala $\int \frac{1}{r^2}$ za kružni i pravougaoni zid. U ovom slučaju sa r je označena distanca od proizvoljne tačke zida do tačke u kojoj se računa doza zračenja. Na ovaj način se praktično sabira veličina $\frac{1}{r^2}$ za sve tačke zida, što je proporcionalno ukupnoj dozi koja potiče od svih tih tačaka. Budući da su debljine i količine materijale oba zida jednake, izjednačavanje $\int \frac{1}{r^2}$ može se postići samo pronalaženjem odgovarajuće distance h .

Posmatra se pravougaoni izvor zračenja (zid standardne sobe) dužine L_x i visine L_y . Površina ovakvog izvora iznosi $S = L_x \cdot L_y$. Izvor je podeljen na male segmente površine $ds = dx \cdot dy$, a zatim je računato rastojanje od centra datog segmenta do tačke merenja (r). Centralna tačka zida proizvoljno je postavljena u koordinantni početak.



Slika 17-zid standardne sobe podeljen na jedinične segmente

$$r^2 = x^2 + y^2 + h^2 \quad 8.11$$

Da bismo odredili funkciju $\frac{1}{r^2}$ u nekoj proizvoljnoj tački $(0,0,h)$ posmatramo integral:

$$I_1 = \int \frac{ds}{r^2} = \int \frac{dxdy}{x^2+y^2+h^2} = \int dy \int \frac{dx}{x^2+y^2+h^2} \quad 8.12$$

Rešenje ovog integrala se može aproksimirati sumom:

$$I = \sum_i \frac{dxdy}{r_i^2} \quad 8.13$$

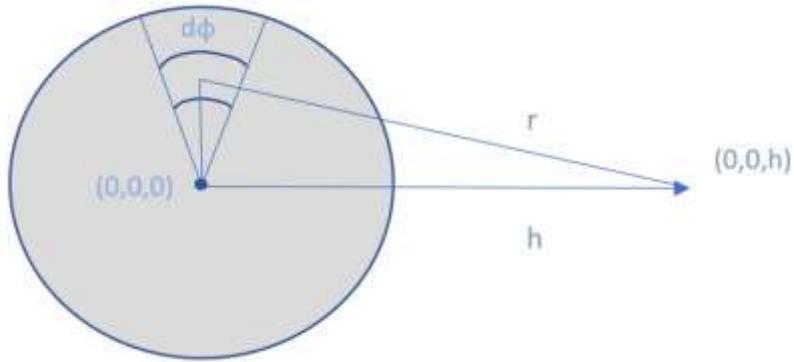
Sada se posmatra cilindrični izvor. Budući da su zid i cilindar iste debljine (3 cm), da bi uslov o istoj količini materijala u oba izvora bio ispunjen, potrebno je izjednačiti površine pravougaonog izvora (zida) i osnovice cilindričnog izvora, pošto su im debljine jednake.

$$S_z = S_c \quad 8.14$$

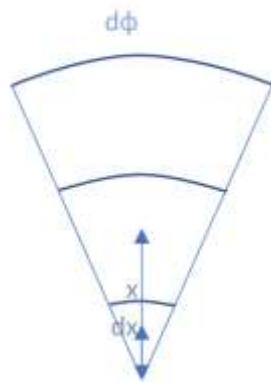
$$L_x \cdot L_y = \pi \cdot r_c^2 \quad 8.15$$

Iz ove jednakosti proizilazi izraz za izračunavanje poluprečnika osnove cilindra:

$$r_c = \sqrt{\frac{L_x \cdot L_y}{\pi}} \quad 8.16$$



Slika 18-cilindrični izvor podeljen na jedinične segmente



Slika 19-segment cilindričnog izvora zahvaćen jediničnim uglom $d\varphi$

Cilindrični izvor, je takođe podeljen na segmente zahvaćene uglom $d\varphi$.

Potrebno je odrediti rastojanje iz centra segmenta ($x, 0, 0$) do tačke merenja ($0, 0, h$).

Površina segmenta je:

$$s = (x + dx) \cdot d\varphi - x \cdot d\varphi$$

8.17

A traženo rastojanje::

$$r^2 = x^2 + h^2$$

Željeno rastojanje određuje se iz uslova o jednakosti funkcije $\frac{1}{r^2}$ cilindričnog izvora i zida. U slučaju cilindričnog izvora doza u proizvoljnoj tački (0,0,h) određuje se preko integrala:

$$I_2 = \int \frac{ds}{r^2} = \int \frac{ds}{x^2+h^2} \quad 8.19$$

Da bismo postigli jednakost doza zida i cilindričnog izvora u tački (0,0,h) izjednačavamo integrale::

$$I_1 = I_2 \quad 8.20$$

To se postiže menjanjem rastojanja h kod cilindričnog izvora. Za prvih nekoliko vrednosti h $I_1 > I_2$. Kada za određenu vrednost h dobijemo vrednost $I_1 < I_2$, uzimamo srednju vrednost h između dve granične vrednosti (veće i manje), a zatim računamo rastojanje r .

Za standardnu sobu datih dimenzija dobijeni rezultati su predstavljeni tabelarno:

Tabela 19-dimenzije cilindričnog izvora i rastojanje od izvora do tačke merenja za odgovarajuće zidove standardne sobe

	dimenzije (m)	poluprečnik cilindra (m)	rastojanje (m)
Zid 1	4x2.8	1.89	2.53
Zid 2	5x2.8	2.11	2.06
Pod/plafon	4x5	2.52	1.42

Možemo videti da se rastojanja kružnih zidova od centralne tačke veoma malo razlikuju od rastojanja te tačke od pravougaonih zidova. Razlika je tek nekoliko centimetara. Na ovaj način je postignuto da se u posmatranoj tački dobija jednaka doza od kružnih i pravougaonih zidova jednake površine.

8.5 Računanje zapreminske aktivnosti

Za procenu doze korišćenjem analitičkog izraza datog jednačinom 7.9 neophodno je poznavanje zapreminske aktivnosti. Za granitni uzorak koji u sebi sadrži kalijum, kao i radionuklide iz uranijumovog i torijumovog niza zapreminska aktivnost računata je na sledeći način:

Razmatran je jedinični uzorak granita mase $m = 1 \text{ kg}$.

Gustina granita je $\rho = 2600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Zapremina uzorka granita od jednog kilograma računata je po formuli: $V = \frac{m}{\rho}$ i iznosi $3.846 \cdot 10^{-4} m^3$.

Zapreminska aktivnost predstavlja aktivnost izvora po jedinici zapremine i računata je po formuli:

$$C_v = \frac{A}{V} \quad 8.21$$

gde je A aktivnost, a V zapremina uzorka.

Zapreminska aktivnost uranijuma

Aktivnost uranijuma je $A = 500 \frac{Bq}{kg}$.

Zapreminska aktivnost uranijuma iznosi:

$$C_v = \frac{A}{V} = 1.3 \frac{MBq}{m^3}$$

Zapreminska aktivnost torijuma

Aktivnost torijuma je $A = 310 \frac{Bq}{kg}$.

Zapreminska aktivnost torijuma iznosi:

$$C_v = \frac{A}{V} = 0.806 \frac{MBq}{m^3}$$

Zapreminska aktivnost kalijuma:

Aktivnost kalijuma je $A = 4000 \frac{Bq}{kg}$.

Zapreminska aktivnost kalijuma iznosi:

$$C_v = \frac{A}{V} = 10.4 \frac{MBq}{m^3}$$

8.6 Rezultati:

Ekspozicionala doza računata je korišćenjem analitičkog izraza 7.9 za nizove uranijuma, torijuma, kao i za kalijum.

- Prilikom procene doze korišćenjem svih energija računat je proizvod:

$$E_i \cdot p_\gamma^i \cdot \left(\frac{\mu_m}{\rho}\right)_i \cdot \frac{1-e^{-\mu_i \cdot d}}{\mu_i} \quad 8.22$$

Proizvod dat jednačinom 8.22 izračunat je za sve γ -prelaze, a potom sumiran i pomnožen sa $\frac{h^2+r^2}{h^2}$ (čija vrednost zavisi od dimenzija odgovarajućeg cilindričnog zida). Tako je dobijen proizvod:

$$\left(\sum_i E_i \cdot p_\gamma^i \cdot \left(\frac{\mu_m}{\rho}\right)_i \cdot \frac{1-e^{-\mu_i \cdot d}}{\mu_i} \right) \cdot \frac{h^2+r^2}{h^2} \quad 8.23$$

za svaki od cilindričnih zidova ponaosob.

Na kraju je proizvod dat jednačinom 8.23 sumiran za svih šest zidova standardne sobe, pomnožen zapreminske aktivnošću C_v , kao i konstantom $k' = 1.44 \cdot 10^{-4} \frac{1}{h \cdot MBq}$ ($k' = \pi \cdot \frac{k}{4\pi} \cdot 10^{-2}$) kako bi se dobila doza izražena u jedinici $\left[\frac{mSv}{h}\right]$:

$$\sum_{j=1}^6 \left[\left(\sum_i E_i \cdot p_\gamma^i \cdot \left(\frac{\mu_m}{\rho}\right)_i \cdot \frac{1-e^{-\mu_i \cdot d}}{\mu_i} \right) \cdot \frac{h^2+r^2}{h^2} \right]_j \cdot C_v \cdot k' \left[\frac{mSv}{h}\right] \quad 8.24$$

Ukupna godišnja doza dobijena je množenjem vrednosti dobijenih jednačinom 8.24 sa 7000 h:

$$\sum_{j=1}^6 \left[\left(\sum_i E_i \cdot p_\gamma^i \cdot \left(\frac{\mu_m}{\rho}\right)_i \cdot \frac{1-e^{-\mu_i \cdot d}}{\mu_i} \right) \cdot \frac{h^2+r^2}{h^2} \right]_j \cdot C_v \cdot k' \cdot 7000 h [mSv] \quad 8.25$$

- Prilikom procene doze korišćenjem energija usrednjениh na intervalu od 100 keV računat je proizvod:

$$\bar{E}_i \cdot (\sum p_\gamma^i) \cdot \left(\frac{\mu_m}{\rho}\right)_i \cdot \frac{1-e^{-\bar{\mu}_i}}{\bar{\mu}_i} \quad 8.26$$

Dalji postupak procene ukupne godišnje doze za usrednjene energije identičan je postupku korišćenom prilikom upotrebe svih energija.

Na ovaj način dobijena je procena godišnje doze koja potiče od uranijumovog niza, torijumovog niza i kalijuma ponaosob.

Prilikom procene doze za uranijumov i torijumov niz račun je urađen sa uključivanjem niskih energija i sa zanemarivanjem istih, kako bi se video uticaj samoapsorpcije na vrednost doze. Očekivano je da sa porastom debljine materijala rastu i efekti samoapsorpcije, što rezultira manjom razlikom između pomenutih rezultata.

Radi poređenja, izračunata je i doza korišćenjem podataka prikazanim u Referenci [5.], ali i podataka prikazanim u Hamiltonovom radu (u daljem tekstu Referenca [7]). Referenca [7] je značajna jer daje prvu procenu doze, sa pretpostavkom da je usrednjena energija za uranijumov, torijumov niz i kalijum jednaka i iznosi 1 MeV.

Rezultati su predstavljeni tabelarno za svaki od nizova, kao i za kalijum:

Uranijumov niz

Tabela 20-eksponcione doze za uranijumov niz bez doprinosa niskih energija

Debljina zida (cm)	X(mSv)-sve energije	X(mSv)- po 100 keV-a	X(mSv)-Referenca [5]	X(mSv)-Referenca [7]
0	0.327	0.330	0.331	0.409
0.5	0.156	0.159	0.159	0.196
1	0.299	0.304	0.305	0.377
2	0.550	0.557	0.564	0.697
3	0.761	0.771	0.783	0.968
5	1.092	1.106	1.126	1.394
7	1.332	1.350	1.372	1.700
10	1.578	1.600	1.617	2.006
12	1.690	1.715	1.724	2.141
15	1.808	1.835	1.831	2.276
17	1.862	1.891	1.878	2.335
20	1.921	1.950	1.924	2.394

Tabela 21-eksponcione doze za uranijumov niz sa doprinosom niskih energija

Debljina zida (cm)	X(mSv)-sve energije	X(mSv)- po 100 keV-a
0	0.590	0.581
0.5	0.168	0.170
1	0.311	0.314
2	0.562	0.568
3	0.773	0.781
5	1.104	1.117
7	1.344	1.360
10	1.590	1.611
12	1.702	1.725
15	1.819	1.845
17	1.874	1.901
20	1.932	1.961

Ukoliko se uporede rezultati iz tabela 20 i 21 vidljivo je da sa porastom debljine materijala rastu i efekti samoapsorpcije, pa će se i razlika između dobijenih vrednosti smanjivati. Na debljinama od 3 cm ova razlika je 1.5 %. To znači da se u realnom slučaju, kada se procenjuje vrednost doze od granitnih ploča debljine 3 cm, može upotrebiti račun sa zanemarivanjem niskih energija. Takođe se može videti da se procena doze u slučaju kada se kompletan spektar energija uranijumovog niza zameni srednjim energijom veoma dobro slaže sa dozom

izračunatom sa svim energijama. Recimo za debljinu granitne obloge od tri centimetra, ta je razlika manja od 3%.

U tabelama 20 i 21 prikazane su ukupne godišnje vrednosti efektivne doze koja potiče od svih članova uranijumovog niza (sa i bez doprinosa niskih energija). Međutim, čest je slučaj da se prilikom procene doze zračenja koje potiče od ^{238}U posmatra samo deo uranijumovog niza koji počinje izotopom ^{226}Ra , dok se svi članovi niza ispred radijuma izostavljaju. Postoji nekoliko razloga za takav pristup. Prvi od njih je činjenica da se u nekim slučajevima ne može smatrati da se članovi niza ispred i iza ^{226}Ra nalaze u radioaktivnoj ravnoteži. Čest je slučaj da radioaktivna ravnoteža radionuklida nije održana pre i posle dugoživećeg ^{226}Ra . Za deo niza koji počinje izotopom ^{226}Ra doza je računata korišćenjem svih energija. Rezultati su predstavljeni u tabeli 22:

Tabela 22-eksponicione za doze deo uranijumovog niza od ^{226}Ra

Deblina zida (cm)	X (mSv)
0	0.304
0.5	0.146
1	0.280
2	0.516
3	0.716
5	1.031
7	1.261
10	1.499
12	1.607
15	1.722
17	1.775
20	1.832

Poređenjem rezultata datih u tabeli 20 i tabeli 22 za debljinu zida od 3 cm vidi se da svi radionuklidi iz uranijumovog niza, koji se nalaze ispred ^{226}Ra , doprinose ukupnoj dozi sa svega 7.4 %. Razlog tome je da od ^{238}U do ^{226}Ra ne postoje jaki gama emiteri. To znači da neće doći do većih razlika u rezultatima ukoliko se pri proceni doze iskoristi samo deo uranijumovog niza koji počinje dugoživećim izotopom ^{226}Ra .

Torijumov niz

Tabela 23-ekspozicione doze za torijumov niz bez doprinosa niskih energija

Debljina zida (cm)	X(mSv)-sve energije	X(mSv)- po 100 keV-a	X(mSv)-Referenca [5]	X(mSv)-Referenca [7]
0	0.248	0.251	0.234	0.328
0.5	0.119	0.120	0.113	0.158
1	0.229	0.231	0.217	0.303
2	0.423	0.427	0.402	0.560
3	0.590	0.595	0.562	0.777
5	0.854	0.861	0.818	1.119
7	1.052	1.060	1.010	1.365
10	1.260	1.270	1.214	1.611
12	1.359	1.369	1.311	1.719
15	1.467	1.477	1.418	1.827
17	1.519	1.529	1.470	1.874
20	1.577	1.587	1.528	1.922

Tabela 24-eksponicione doza za torijumov niz sa doprinosom niskih energija

Debljina zida (cm)	X(mSv)-sve energije	X(mSv)- po 100 keV-a
0	0.338	0.336
0.5	0.123	0.123
1	0.232	0.234
2	0.427	0.430
3	0.593	0.598
5	0.858	0.864
7	1.055	1.063
10	1.264	1.273
12	1.363	1.372
15	1.470	1.480
17	1.522	1.533
20	1.580	1.591

Ukoliko se uporede rezultati iz tabela 23 i 24 vidljivo je da sa porastom debljine materijala rastu i efekti samoapsorpcije, pa će se i razlika između dobijenih vrednosti smanjivati. Već na debljinama od 3 cm razlika je 0.5 %. To znači da se u realnom slučaju, kada se procenjuje vrednost doze od granitnih ploča debljine 3 cm može upotrebiti račun sa zanemarivanjem niskih energija. I ovde je veoma značajno primetiti veoma dobru saglasnost doze izračunate upotrebom svih energija torijumovog niza sa dozom koju smo dobili kada su upotrebljene samo dve energije.

Kalijum

Tabela 25-ekspozicione doze za kalijumov niz

Debljina zida	X(mSv)	X(mSv)-Referenca [5]	X(mSv)-Referenca [7]
0	0.223548056	0.21766442	0.150759188
0.5	0.108060823	0.105527069	0.072363668
1	0.209022343	0.204710155	0.139015095
2	0.391482456	0.385546979	0.256949279
3	0.550755825	0.545294585	0.356999362
5	0.81115403	0.811073031	0.513884081
7	1.009575399	1.018475884	0.626795051
10	1.222284313	1.247385256	0.739699659
12	1.322853417	1.358956467	0.789316016
15	1.430664107	1.48209699	0.838929577
17	1.481637168	1.542116103	0.860732444
20	1.5362806	1.608358862	0.882534083

Ukupna doza

Ukupna godišnja doza dobija se sabiranjem godišnjih doza od ^{238}U , ^{323}Th i ^{40}K datih u tabelama 20, 23 i 25:

Tabela 26-ukupna ekspoziciona doza dobijena sabiranjem doprinosa pojedinačih doza uranijumovg niza, torijumovog niza i kalijuma

Debljina zida (cm)	X(mSv)-sve energije	X(mSv)- po 100 keV-a	X(mSv)-Referenca [5]	X(mSv)-Referenca [7]
0	0.799	0.804	0.783	0.888
0.5	0.384	0.387	0.377	0.426
1	0.737	0.744	0.727	0.819
2	1.365	1.376	1.352	1.513
3	1.902	1.916	1.890	2.103
5	2.758	2.779	2.755	3.027
7	3.393	3.419	3.400	3.692
10	4.061	4.092	4.078	4.357
12	4.372	4.407	4.394	4.649
15	4.705	4.743	4.731	4.942
17	4.863	4.902	4.890	5.070
20	5.034	5.074	5.061	5.198

Iz dobijenih rezultata zaključuje se da ukupna godišnja doza, računata korišćenjem formule 7.9, u standardnoj sobi premašuje dozvoljene vrednosti (gornja granica propisana pravilnikom IAEA iznosi 1 mSv). Treba napomenuti da prilikom ovog računa rasejanje nije uključeno. Takođe je veoma indikativno da se upotrebom srednjih energija za uranijumov i torijumov niz, na način kako je to ovde objašnjeno dobijaju vrednosti koje premašuju granicu od 1 mSv godišnje. Dakle, kada se ulazni podaci koncentracija akrivnosti tretiraju putem analitičkih izraza, bez obzira da li se uzimaju sve energije ili samo srednje, godišnja doza u prostoriji koja je obložena sa 3 cm granita prelazi preko 1 mSv.

U protokolu koji je izdala IAEA postoji algoritam na osnovu koga se može izvršiti procena efektivne doze u prostoriji zadatih dimenzija uz uslov da se poznaje nivo prisutnosti radionuklida u građevinskom materijalu. Ovaj je algoritam u potpunosti pojednostavljen i koristi se multiplikativnim parametrima kojima je neophodno pomnožiti izmerene koncentracije tri radionuklida, merene u $\frac{Bq}{kg}$ da bi se sabiranjem doprinosa njih tri dobila ukupna doza koju bi pojedinac primio u toj prostoriji. U IAEA dokumentu se ti koeficijenti nazivaju dozni faktori. Ovi su dozni faktori izračunati za razne debljine zidova i to u dokumentu Radiation protection 112 (Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, 1999 Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection) (Referenca [8]). Do ovih doznih faktora autori su došli Monte'Karlo simulacijama gde su sabrali doprinos svake pojedinačne tačke zida. U proračunu su koristili po jednu energiju za kalijum i uranijumov niz, kao i dve energije za torijumov niz. Takođe je uračunat i efekat samoapsorpcije, ali i doprinos rasejanog zračenja, što u ovom radu nije učinjeno. Radi poređenja, izračunata je i ukupna godišnja doza korišćenjem parametara iz dokumenta. Doza je računata koristeći jednačinu:

$$\dot{X} = (0.12 \cdot A_{Ra} + 0.14 \cdot A_{Th} + 0.0096 \cdot A_K) \cdot 10^{-9} Gy h^{-1} \cdot 0.7 Sv Gy^{-1} \cdot 7000 h \cdot a^{-1} \quad 8.27$$

Koeficijenti koji figurišu u jednačini 8.27 dobijeni su kompjuterski (lista komandi korišćenog programa data je u Referenci [5]). Ovi koeficijenti u slučaju granitnih pločica debljine 3cm iznose 0.12, 0.14 i 0.0096 za uranijum, torijum i kalijum respektivno.

Za aktivnost uranijuma, torijuma i kalijuma i u ovom slučaju uzete su vrednosti $500 \frac{Bq}{kg}$, $310 \frac{Bq}{kg}$ i $4000 \frac{Bq}{kg}$.

Da bi se dobila ukupna godišnja doza u prostoriji sa oblogama od 3 cm granita koji sadrži navedene koncentracije radionuklida, potrebno je sumu pomnožiti sa 7000 sati, koliko je procenjeno da bi neko mogao tokom godine boraviti u toj prostoriji. Ova je vrednost odabrana po dogovoru. Osim toga, suma iz jednačine 8.27 se treba pomnožiti faktorom $0.7 \frac{Sv}{Gy}$. Naime ustanovljeno je da je doza izražena u Sv jednaka 70% apsorbovane doze u vazduhu merene u toj tački. Ovaj faktor nije uziman u obzir u ovom radu.

Koristeći date podatke i formulu 8.27 dobijena je vrednost doze zračenja:

$$\dot{X} = 0.695 mSv$$

Ukoliko se uporede rezultati dobijeni korišćenjem jednačine 8.27 i rezultati dati u tabeli 26 (dobijeni korišćenjem analitičkog izraza za dozu 7.9) dobija se razlika od čak 63%. Ukupna godišnja doza dobijena izrazom 8.27 je manja od ukupne godišnje doze dobijene u ovom radu, a koja iznosi 1.9 mSv godišnje.

Važno je napomenuti da u ovom radu nije korišćeno rasejanje, dok je u Referenci [5] uračunat i doprinos rasejanog zračenja. To znači da je vrednost koja je izračunata u ovom radu manja od stvarne vrednosti za iznos rasejanog zračenja. Ozbiljnija procena doprinosa rasejanog zračenja nije vršena i neke veoma orijetacine pretpostavke bi bile da ona iznosi oko 30% od doze direktnog zračenja koja je izražena u tabeli 26. Takođe, u Referenci [5] je iskorišćen faktor 0.7 za pretvaranje Gy u Sv, dok je u ovom radu taj korak izostavljen. Ukoliko bismo i prihvatali da jedan Gy fotonskog zračenja u vazduhu stvara 0.7 Sv u tkivima u geometriji referentne sobe, i ako sa tom vrednošću pomnožimo vrednost doze koja je prikazana u tabeli 26, dobilo bi se da je i u tom slučaju procena učinjena u ovom radu još uvek veća od onoga što se može naći u preporukama IAEA i dokumentu Radiation protection 112. Naime, veoma je jednostavno ustanoviti da je $1,902 \text{ mSv} \cdot 0.7 = 1.33 \text{ mSv}$, što je još uvek skoro dvostruko više od procene koja se može dobiti ukoliko se sledi preporuka IAEA.

Ovim se otvara pitanje ispravnosti korišćenja izraza 8.27 prilikom procene ukupne doze zračenja u koje potiče od granitnih ploča u standardnoj sobi. Štaviše, postavlja se pitanje do koje je mere način procene doze prepušten dokumentom IAEA upotrebljiv. Ovo otvara potrebu ozbiljnije provere svih doznih koeficijenata koji su publikovani u Radiation protection 112. Evidentno je da se pojednostavljenim putem koji se služi isključivo analitičkim izrazima za izračunavanje doze dobija znatno veća vrednost nego upotrebom koeficijenata koje su autori preporučili nakon MK simulacije.

9 Zaključak

U ovom radu račanata je ekspozicionala doza zračenja koja potiče od granitnih ploča debljine 3 cm ugrađenih u standardnu sobu dimenzija 5x4x2.8 m.. Izračunata je gama konstanta za nizove uranijuma i torijuma, kao i gama konstanta za kalijum. Prilikom računanja gama konstante korišćeno je više pristupa (korišćenjem svih energija prelaza, usrednjavanjem energija u intervalima od po 100 keV, kao i korišćenjem samo jedne usrednjene energije za uranijum i dve energije za torijum) i svaki od datih pristupa dao je približno iste rezultate.

Korišćenjem svih energija uranijumovog i torijumovog niza, ali i usrednjениh energija datih u Referenci [5] (jedna energija za uranijum, dve za torijum) pokazano je da se doprinos uranijuma i torijuma ukupnoj dozi zračenja razlikuje od onog koji je predviđen ekvivalentnom aktivnošću radijuma (10/7), za čak 14 % u slučaju korišćenja svih energija i čak 16 % u slučaju korišćenja usrednjениh energija. Ovim je otvoreno pitanje ispravnosti ekvivalentne aktivnosti radijuma koja daje odnos 10/7.

Računanjem doze od cilindričnog izvora proizvoljne aktivnosti pokazano da se javlja razlika od svega 3% između rezultata dobijenih korišćenjem svih energija i rezultata dobijenih korišćenjem dve energije. To znači da se oba pristupa mogu ravnopravno primenjivati i da se informacija neće gubiti usled samoapsorpcije. Prilikom ovog računa doza je procenjena korišćenjem analitičkog izraza za cilindrični izvor.

Aproksimiranjem zidova standardne sobe sfernim zidom pokazano je da se doza zračenja ne menja ukoliko se ne menja debljina sfernog zida. Ovo se objašnjava time da se prilikom povećanja dimenzija sfernog zida i rastojanje i količina materijala menjaju sa R^2 , pa uz uslov konstantnosti debljine izvora doza zračenja ostaje ista.

Prilikom računanja doze u realnom slučaju korišćen je analitički izraz za cilindrični izvor. To znači da su pravougaoni zidovi standardne sobe morali biti aproksimirani zidovima oblika cilindra, uz uslov da im je debljina i količina materijala ista, kao i da je doza koja potiče od datih zidova ista na nekom rastojanju r . Prateći ove uslove, izračunate su dimenzije cilindričnih zidova koje odgovaraju svakom od zidova standardne sobe ponaosob, kao i traženo rastojanje r . Dobijene vrednosti korišćene su u proceni doze koja potiče granitnih ploča ugrađenih u zidove standardne sobe. Kao što je već napomenuto, procena doze u realnom slučaju vršena je korišćenjem analitičkog izraza datog jednačinom 7.9 za različite debljine cilindričnih zidova. Poređenja radi, doza je računata korišćenjem svih energija, energija usrednjениh po intervalima

od 100 keV, podataka datih u Referenci [5], kao i podataka datih u Referenci [7]. Poređenjem rezultata dobijenih na pomenuta četiri načina pokazano je da nema značajnih razlika i da se svaki od pristupa može ravnopravno primenjivati pri proceni doze zračenja u realnom slučaju. Međutim, svaki od pristupa daje dozu znatno veću od gornje granice propisane pravilnikom IAEA (1 mSV).

U Referenci [5] metodom integracije dobijen je izraz za procenu apsorbovane doze, dat jednačinom 8.27. Ukoliko se upotrebe priloženi koeficijenti i izračuna doza na osnovu datog izraza, dobijena vrednost odstupa od vrednosti dobijenih upotrebom analitičkog izraza. Procena doze korišćenjem datih koeficijenata upotrebljena je i u Pravilniku Republike Srbije, sa tom razlikom što je u Pravilniku zanemaren spoljašnji fon, iako granitne ploče nemaju dovoljnu debljinu da zaustave spoljašnje zračenje. I u ovom slučaju dobijena procena doze znatno je manja od one dobijene u ovom radu, primenom analitičkog izraza. Ovim se otvara pitanje ispravnosti izraza za procenu ukupne godišnje doze, koja potiče od granitnih ploča, iskorišćenom u Pravilniku Republike Srbije.

Važno je napomenuti da prilikom računa u ovom radu nije uključeno rasejanje, faktor za pretvaranje Gy u Sv, kao ni oduzimanje fona spoljašnjeg zračenja, već je ostavljeno za neko dalje istraživanje.

Literatura

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008). *Sources and effects of ionizing radiation*. New York: United Nations (published 2010)
- [2] International atomic energy agency, Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation, Vienna, (2015)
- [3] Table of radioactive isotopes
<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp>
- [4] Nist XCOM
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
- [5] Mika Markkanen, Radiation dose assessment for materials with elevated natural radioactivity, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, (November 1995)
- [6] Uputstvo o postupanju prilikom kontrole građevinskog materijala na graničnim prelazima Republike Srbije, Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, Beograd, (jun 2018)
- [7] E. I. Hamilton, The Relative Radioactivity of Building materials, national Radiological Protection Board, Belmont, Sutton, Surrey, England, (1971)
- [8] European Commission (EC), Radiation protection 112, Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, (1999)
- [9] M.Krmar, Odabрана poglavlja iz nuklearne Fizike, neautorizovana skripta
- [10] M.Krmar, Uvod u nuklearnu Fiziku, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno – matematički fakultet, Departman za Fiziku, Novi Sad (2013)
- [11] J.H. Hubbell, R. L. Bach, J. C. Lamkin, Radiation Field From a Rectangular Source, JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-Co Engineering and Instrumentation, (January 12, 1960)

- [12] Laurie M. Unger, D. K. Trubey, Specific Gama-Ray Dose Constants for Nuclides Important to Dosimetry and Radiological Assessment, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge Tennessee, (May 1982)
- [13] Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja,, Jonizujuća zračenja iz prirode, Institut za nuklearno zračenje “Vinča”, Beograd, (1995)
- [14] Michael G. Stabin, Radiation Protection and Dosimetry, Springer, New York, (2007)

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Diplomski rad

VR

Autor : Katarina Milić

AU

Mentor : dr Miodrag Krmar

MN

Naslov rada: Procena doze gama zračenja usled prisustva prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2019

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet,

Trg Dositeja Obradovica 4,

Novi Sad

MA

Fizički opis rada: 8 poglavlja/ 60 strana/ 14 literaturnih citata/

26 tabela/ 19 slika

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Nuklearna fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: ekspoziciona doza, granit, građevinski materijal

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka Departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

CU

Važna napomena:

Nema

VN

Izvod:

U radu je procenjena ukupna godišnja doza zračenja koja potiče od prirodnih radionuklida u granitnim pločama i rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim u Pravilniku Republike Srbije.

IZ

Datum prihvatanja teme:

Jun, 2019.

DP

Datum odbrane:

24.06.2019.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr Jan Hansman, naučni saradnik

Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu

Član:

dr Goran Štrbac, docent

Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu

Mentor:

dr Miodrag Krmar, vanredni professor

Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu

UNIVERSITY OF NOVI SAD

FACULTY OF SCIENCES

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number :

ANO

Identification number :

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author : Katarina Milić

AU

Mentor : Dr Miodrag Krmar

MN

Title: Estimation of gamma radiation dose due to presence
of natural radionuclides in building materials

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

<i>Country of publication:</i>	Republic of Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year :</i>	2019
PY	
<i>Publisher :</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Sciences, Trg Dositeja Obradovica 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	8/60/14/26/19
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Nuclear physics
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	exposure rate, granite, building materials
SKW	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovica 4
HD	
<i>Note:</i>	None
N	
<i>Abstract:</i>	This paper estimates annual radiation dose caused by

natural radionuclides in granite panels and compares results with the results obtained in Regulations of the Republic of Serbia

AB

Accepted by the Scientific Board: June, 2019.

ASB

Defended on: 24.06.2019.

DE

Thesis defend board:

President: dr Jan Hansman, technical associate,
Faculty of Sciences, Novi Sad

Member : dr Goran Štrbac, assistant professor,
Faculty of Sciences, Novi Sad

Mentor : dr Miodrag Krmar, associate professor,
Faculty of Sciences, Novi Sad

DB