U N I V E R Z I T E T U N I Š U
Prirodno-matematički fakultet
Departman za fiziku

Vesna M. Manić

ODREĐIVANJE DOZE GAMA ZRAČENJA IZ PRIRODNIH RADIONUKLIDA U GRAĐEVINSKIM MATERIJALIMA

– doktorska disertacija –

Niš, 2013. godine

U N I V E R Z I T E T U N I Š U
Prirodno-matematički fakultet
Departman za fiziku

Vesna M. Manić

ODREĐIVANJE DOZE GAMA ZRAČENJA IZ PRIRODNIH RADIONUKLIDA U GRAĐEVINSKIM MATERIJALIMA

- doktorska disertacija -

Niš, 2013. godine

Zahvaljujem mentoru, prof. dr Dragoslavu Nikeziću, na vrednim i inspirativnim sugestijama, stručnom usmeravanju i angažovanju u toku izrade ove disertacije.

Zahvaljujem doc. dr Dragani Krstić na spremnosti za saradnju, savetima i razumevanju.

Zahvaljujem prof. dr Zoranu Pavloviću na interesovanju za napredak rada, korisnim diskusijama i literaturi.

Zahvaljujem osoblju Odseka za zaštitu od zračenja, Zavoda za zdravstvenu zaštitu radnika "Niš", u Nišu, na dragocenoj pomoći u realizaciji eksperimentalnog dela rada.

Zahvaljujem dr Ljubomiru Jociću, AeroSpace co., LA, USA, na ljubaznosti i trudu oko pribavljanja važne literature.

Zahvaljujem koleginicama i kolegama sa Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, na svestranoj pomoći i prijateljstvu.

Zahvaljujem svojoj porodici na podršci, strpljenju i ljubavi.

Прилог 4/1

ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
НИШ

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, **РБР**:	
Идентификациони број, **ИБР**:	
Тип документације, **ТД**:	монографска
Тип записа, **ТЗ**:	текстуални / графички
Врста рада, **ВР**:	докторска дисертација
Аутор, **АУ**:	Весна М. Манић
Ментор, **МН**:	Драгослав Р. Никезић
Наслов рада, **НР**:	Одређивање дозе гама зрачења из природних радионуклида у грађевинским материјалима
Језик публикације, **ЈП**:	српски
Језик извода, **ЈИ**:	енглески
Земља публиковања, **ЗП**:	Србија
Уже географско подручје, **УГП**:	Србија
Година, **ГО**:	2013. год.
Издавач, **ИЗ**:	ауторски репринт
Место и адреса, **МА**:	Ниш, Вишеградска 33.
Физички опис рада, **ФО**: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	6 погл/ 184 стр/ 292 цит/ 54 таб/ 2 сл/ 23 граф/ 2 прил
Научна област, **НО**:	физика
Научна дисциплина, **НД**:	радијациона физика
Предметна одредница/Кључне речи, **ПО**:	гама зрачење, доза, природни радионуклиди
УДК	331.435:539.166+539.163:691
Чува се, **ЧУ**:	библиотека
Важна напомена, **ВН**:	Мерења су извршена на Одсеку за заштиту од зрачења, ЗЗЗР "Ниш", Ниш
Извод, **ИЗ**:	Прорачун специфичних јачина апсорбоване дозе у ваздуху, које потичу од гама зрачења природних радионуклида у грађевинским материјалима, извршен је point kernel техником. Примењен је (Г-П) облик фактора нагомилавања, као и апроксимација дозе за низ радионуклида. Размотрен је утицај варијације конструкционих параметара. Израчунате су дозиметријске величине у заштити од зрачења и операционе величине. Методом гама-спектроскопије обављена су мерења концентрације активности ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K за узорке грађевинских материјала у области града Ниша. Премашај дозе у односу на локални терестријални фон, за сваки узорак, мањи је од границе дозе 1 mSv y^{-1}. Средње вредности јачине апсорбоване дозе и годишње ефективне дозе по члану популације обухваћене истраживањем, једнаке су 55.6 nGy h^{-1} и 0.285 mSv y^{-1}, респективно.
Датум прихватања теме, **ДП**:	28.11.2011. год.
Датум одбране, **ДО**:	
Чланови комисије, **КО**: Председник:	
Члан:	
Члан, ментор:	

ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
НИШ

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, **ANO**:	
Identification number, **INO**:	
Document type, **DT**:	monograph
Type of record, **TR**:	textual / graphic
Contents code, **CC**:	doctoral dissertation
Author, **AU**:	Vesna M. Manić
Mentor, **MN**:	Dragoslav R. Nikezić
Title, **TI**:	Determination of dose rate due to gamma radiation from natural radionuclides in building materials
Language of text, **LT**:	Serbian
Language of abstract, **LA**:	English
Country of publication, **CP**:	Serbia
Locality of publication, **LP**:	Serbia
Publication year, **PY**:	2013
Publisher, **PB**:	author's reprint
Publication place, **PP**:	Niš, Višegradska 33.
Physical description, **PD**: (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6 ch/ 184 p/ 292 ref/ 54 tab/ 2 pict/ 23 graph/ 2 app
Scientific field, **SF**:	physics
Scientific discipline, **SD**:	radiation physics
Subject/Key words, **S/KW**:	gamma dose, natural radionuclides, building materials
UC	331.435:539.166+539.163:691
Holding data, **HD**:	library
Note, **N**:	Measurements were performed at the Department for radiation protection of ZZZR "Niš", Niš
Abstract, **AB**:	The specific absorbed dose rates in indoor air corresponding to gamma radiation from natural radionuclides in building materials were calculated by point kernel technique. The (G-P) functional form of buildup factor as well as radionuclide's point dose rate approximation were used. Effects of construction parameters' variation were considered. The quantities in radiation protection and operational quantities normalized to "air kerma free in air" (conversion coefficients), for room geometry exposure, were also computed. Measurements of activity concentrations of 226Ra, 232Th and 40K, for the samples of building materials collected in the area of Niš, were performed by the gamma-spectrometry. For each material, the excess of gamma dose rate with respect to that received from the local terrestrial radiation is lower than 1 mSv y^{-1} dose limit. The average indoor absorbed dose rate and associated annual individual effective dose for the population of Niš were estimated to be 55.6 nGy h^{-1} and 0.285 mSv y^{-1}, respectively.
Accepted by the Scientific Board on, **ASB**:	
Defended on, **DE**:	
Defended Board, **DB**: President:	
Member:	
Member, Mentor:	

Sadržaj

1. Uvod
   1.1. Opšta razmatranja ---------- 1
   1.2. Predmet i cilj istraživanja ---------- 3
   1.3. Struktura disertacije ---------- 5
2. Teorijske osnove
   2.1. Osnovni pojmovi i definicije u radijacionoj dozimetriji ---------- 7
      2.1.1. Definicija jonizujućeg zračenja; izvori jonizujućeg zračenja ---------- 7
      2.1.2. Dozimetrijske veličine ---------- 9
   2.2. Radioaktivnost građevinskih materijala – izvor gama zračenja ---------- 15
      2.2.1. Radioaktivnost stena i minerala ---------- 16
      2.2.2. Vrste građevinskih materijala ---------- 18
   2.3. Osnovi proračuna dozimetrijskih veličina ---------- 21
      2.3.1. Opšta razmatranja ---------- 21
      2.3.2. Metod faktora nagomilavanja ---------- 24
3. Metod
   3.1. Proračun dozimetrijskih veličina ---------- 30
      3.1.1. Apsorbovana doza u vazduhu ---------- 30
      3.1.2. Ekvivalentna i efektivna doza ---------- 40
      3.1.3. Operacione dozimetrijske veličine ---------- 41
      3.1.4. Korišćeni kompjuterski programi ---------- 44
   3.2. Metod merenja koncentracije aktivnosti radionuklida ---------- 44
      3.2.1. Materijali ---------- 44
      3.2.2. Oprema za merenje sadržaja radionuklida ---------- 45
      3.2.3. Izračunavanje koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida ---------- 48
      3.2.4. Obezbeđenje kvaliteta merenja ---------- 51
4. Rezultati
   4.1. Rezultati proračuna dozimetrijskih veličina ---------- 52
      4.1.1. Apsorbovana doza ---------- 52
      4.1.2. Ekvivalentna doza u tkivima i organima; Efektivna doza ---------- 73
      4.1.3. Operacione dozimetrijske veličine ---------- 75

4.2. Rezultati merenja i određivanja doza ---------- 78
4.2.1. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima 78
4.2.2. Apsorbovana doza u vazduhu i efektivna doza za izlaganje u prostoriji ------ 81

5. Diskusija rezultata
5.1. Diskusija rezultata proračuna dozimetrijskih veličina ---------- 93
5.1.1. Apsorbovana doza ---------- 93
5.1.2. Ekvivalentna doza u tkivima i organima; efektivna doza ---------- 101
5.1.3. Operacione dozimetrijske veličine ---------- 103
5.2. Diskusija rezultata merenja i određivanja doza ---------- 108
5.2.1. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima 108
5.2.2. Apsorbovana doza u vazduhu i efektivna doza za izlaganje u prostoriji ------ 112

6. Zaključak ---------- 120

Literatura ---------- 123

Dodatak
Dodatak 1. Tabele ---------- 139
Dodatak 2. Kompjuterski programi ---------- 152

1. Uvod

1.1. Opšta razmatranja

Prirodni radioaktivni elementi su integralni deo životne sredine, vazduha, hrane, organizama. Izloženost prirodnoj radioaktivnosti je, zato, stalna i neizbežna karakteristika života na Zemlji (*Kaul* 2005). Tipovi i nivoi izlaganja, međutim, variraju od fona do značajne ozračenosti u određenim uslovima (*Markkanen* 2010). Kako jonizujuće zračenje, interakcijom sa biološkim tkivom, može da "prouzrokuje štetne posledice po život i zdravlje ljudi" (*Sl. Glasnik RS* 2009), prema "linearnom - bez praga" modelu zavisnosti radijacionog rizika od vrednosti doze, svaki nivo zračenja u životnoj sredini podrazumeva izvesni zdravstveni rizik (*ICRP* 1991, *Deitze* 2005, *World Nuclear Association* 2011). Kvantifikacija nivoa ozračenosti različitim prirodnim izvorima zato predstavlja neophodni segment zaštite od jonizujućeg zračenja.

Najveći doprinos spoljašnjoj ozračenosti prirodnim izvorima jonizujućeg zračenja predstavlja izlaganje γ- zračenju unutar zatvorenog prostora (*UNSCEAR* 2000, 2010), koje potiče od dezintegracije radioaktivnih elemenata iz nizova ^{238}U i ^{232}Th, kao i ^{40}K, u građevinskim materijalima. Sirovine prirodnog porekla - iz Zemljine kore, u njihovom sastavu, su prirodno radioaktivni materijali (NORM - akronim od: "Naturally Occurring Radioactive Materials") sa različitim sadržajem primordijalnih radionuklida, uslovljenog prvenstveno geološkim procesima u formiranju minerala i stena iz kojih se dobijaju ovi materijali (*NCRP* 1994, *EC* 2000, *IAEA* 2003). Zračenje građevinskih materijala posebno je značajno u urbanim sredinama, gde se oko 80% vremena provodi u zatvorenim prostorijama (*UNSCEAR* 2000), koje pružaju delimičnu zaštitu od izloženosti kosmičkom zračenju i zračenju tla (*Turtiainen* 2008, *de Jong and van Dijk* 2008). Građevinski materijali, međutim, izvor su dodatnog izlaganja usled ekshalacije ^{222}Rn, što treba uzeti u obzir pri proceni ukupne doze u zatvorenim prostorijama (*Nero and Nazaroff* 1984, *Nikezić* 1990, *Khan* 1994, *Cozmuta* 2001). Ovaj izvor radona često predstavlja manje značajnu komponentu ozračivanja u odnosu na druge izvore ^{222}Rn (*Markkanen* 1995, *IAEA* 2004, *Stoulos* 2004, *Manić et al.* 2006).

Tehnološkim postupcima prerade i određenim načinima korišćenja materijala koji sadrže prirodne radionuklide (NORM), dobijaju se materijali povećane prirodne radioaktivnosti (TENORM - akronim od: "Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials") (*NEA-OECD* 1979, *Haquin* 2008). Ovi sekundarni, uglavnom otpadni produkti

rezultat su industrijskih aktivnosti, vezanih za: obradu minerala, eksploataciju i hemijsku preradu ruda, proizvodnju fosfata, korišćenje fosilnih goriva za proizvodnju električne energije, eksploataciju nafte i gasa itd. (*NUREG* 1994, *Kaul* 2005). Zbog pogodnosti eksploatacije, sniženja troškova proizvodnje, kao i sastava koji omogućuje dobijanje finalnih proizvoda odgovarajućih osobina, TENORM materijali koriste se u građevinskoj industriji (*EC* 2000, *El Afifi et al.* 2006). Na ovaj način, čuvaju se prirodni resursi i rešava problem deponovanja industrijskog otpada, ali, istovremeno, povećava se nivo izlaganja jonizujućem zračenju.

U cilju minimiziranja radijacionog rizika, sistem zaštite od jonizujućeg zračenja, preporučen od strane vodeće međunarodne organizacije (*ICRP* 1991), implementiran je u zakonodavstvu mnogih država, kao i u Zakonu Republike Srbije (*Sl. Glasnik RS* 2009, *Pravilnik* 2011a, 2011b). Limitiranje profesionalnog izlaganja za sve relevantne delatnosti, i izlaganja stanovništva, prema konceptu dozimetrijskih veličina u zaštiti od zračenja, uključuje ograničenje vrednosti individualnih doza - efektivne i ekvivalentne doze za pojedine organe i tkiva (*ICRP* 1991, *NCRP* 1993). Tako, izlaganje uzrokovano zračenjem građevinskih materijala, čiji povišeni sadržaj elemenata iz nizova ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K predstavlja rezultat delatnosti, posebno u slučaju TENORM materijala u njihovom sastavu, podleže kriterijumu za granice doza (*EC* 1999, *STUK* 2010). Tretirajući, međutim, građevinske materijale kao NORM, granične vrednosti doze označavaju nivoe intervencije. Na bazi dozimetrijskog, izveden je i jednostavan kriterijum bezbedne upotrebljivosti građevinskih materijala - indeks koncentracije aktivnosti, tzv. gama-indeks (*Markkanen* 1995, *EC* 1999).

Direktno merenje doze unutar građevinskog objekta može biti onemogućeno ili nepraktično iz različitih razloga, zbog broja radionuklida ili uslova ozračivanja (*UNSCEAR* 2000). Procenu izlaganja u prostorijama često je potrebno izvršiti pre upotrebe građevinskih materijala, odnosno početka izgradnje. Stoga, uobičajena je primena matematičkih modela i kompjuterskih programa, kojima se doze u prostorijama određuju na osnovu poznatih koncentracija aktivnosti radionuklida u materijalima. Problem transporta γ- zračenja, koji pri tom treba rešiti, obuhvata generisanje, apsorpciju i rasejanje fotona u građevinskim materijalima, kao i slabljenje zračenja i depoziciju njegove energije u vazduhu ili tkivima i organima, zavisno od tehnike izračunavanja (*Bell and Glasstone* 1974, *Shultis and Faw* 2000, 2005).

Monte Carlo metodom, u čijoj je osnovi simulacija stohastičkog kretanja fotona, postiže se realistično modelovanje spoljašnjeg ozračivanja i u slučajevima kompleksne geometrije ili heterogenog sastava materijala (*Koblinger* 1978, *Al-Jundi et al.* 2009, *Krstic and Nikezic* 2009). Međutim, za jednostavnije oblike, kojima se najčešće mogu aproksimirati uslovi izlaganja u prostoriji, i homogene sredine, proračun doze efikasno se obavlja primenom *point kernel* tehnika numeričke integracije po zapremini materijala - volumetrijskog izvora zračenja (*Stranden* 1979, *Mustonen* 1984, *Mirza et al.* 1991, *Maduar and Hiromoto* 2004, *Ademola and Farai* 2005, *Manić et al.* 2012). Po ovom metodu, doprinos rasejanog fotonskog zračenja uključuje se pomoću faktora nagomilavanja (*buildup* faktora), izraženih analitičkim aproksimacijama (*Taylor* 1954, *Berger* 1956, *Harima et al.* 1986, 1991), koje sa različitim stepenom tačnosti interpoliraju rezultate transportnih izračunavanja (*Goldstein and Wilkins* 1954, *Eisenhauer and Simmons* 1975, *Takeuchi and Tanaka* 1981). Proračunate specifične jačine apsorbovane doze za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, omogućavaju određivanje ukupne apsorbovane doze za vazduh u prostoriji, korišćenjem vrednosti koncentracija aktivnosti ovih elemenata u građevinskim materijalima, izmerenih najčešće metodom gama-spektroskopije (*Knoll* 2000, *Brix et al.* 2005, *Gilmor* 2008).

Na osnovu raspodele specifične jačine apsorbovane doze (aproksimirane kerma vazduha *free in air*) po energijama prirodnih radionuklida, primenom konverzionih koeficijenata (*ICRP* 1996), mogu se dobiti i ekvivalentne doze za tkiva i organe, kao i efektivna doza, koje odgovaraju spoljašnjem ozračivanju građevinskim materijalima. Takođe, omogućena je procena vrednosti i "merljivih", operacionih dozimetrijskih veličina (*ICRP* 1991, *ICRU* 1992, 1993). Konverzioni koeficijenti, pritom, računaju se korišćenjem odgovarajućih modela ljudskog tela, antropomorfnih ili geometrijskih fantoma, uz pretpostavku određene, idealizovane geometrije izlaganja (*Yamaguchi* 1994, *Zankl et al.* 1997, *Pelliccioni* 2000, *Krstić* 2006, *Han et al.* 2006, *Krstić and Nikezić* 2006, 2007).

1.2. Predmet i cilj istraživanja

Uopšteno, cilj ove disertacije definisan je njenom temom: određivanje vrednosti dozimetrijskih veličina koje karakterišu izlaganje gama zračenju radioaktivnih elemenata u građevinskim materijalima. U svrhu realizacije teme, predmet istraživanja obuhvata dve komplementne celine: teorijski i eksperimentalni deo. Teorijski deo rada odnosi se na proračun vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze za uslove ozračivanja u prostoriji, odgovarajućih konverzionih koeficijenata za efektivnu dozu i ekvivaletne doze za tkiva i organe, kao i za operacione dozimetrijske veličine. Predmet eksperimentalnog istraživanja predstavlja merenje koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u građevinskim materijalima korišćenim u jugoistočnom delu Republike Srbije, prvenstveno onih koji potiču, ili se mogu nabaviti na teritoriji okruga grada Niša.

Proračun

Specifične jačine apsorbovane doze u prostoriji, koje potiču od zračenja ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, određene su karakteristikama građevinskih materijala i konstrukcionim parametrima prostorije. Međutim, i za tačku detekcije u centru standardne prostorije (*Koblinger* 1978), definisanih dimenzija i vrste materijala, publikovane su različite vrednosti ovih veličina (*Koblinger* 1978, 1984, *Stranden* 1979, *Mustonen* 1984, *Mirza et al.* 1991, *Markkanen* 1995, *Ahmad et al.* 1998, *Maduar and Hiromoto* 2004, *Ademola and Farai* 2005, *Anjum et al.* 2007, *de Jong and van Dijk* 2008, *Allam* 2009, *Krstic and Nikezic* 2009, *Moharram et al.* 2012, *Manić et al.* 2012). Razlike u rezultatima, koje dostižu značajne procentualne iznose (više od 50%), potiču od drugačijih tehnika proračuna i korišćenih aproksimacija.

U slučaju primene metoda faktora nagomilavanja, izbor funkcionalnog oblika, kao i baze podataka za odgovarajuće parametre, u velikoj meri može doprineti opaženim varijacijama specifičnih jačina doze. Na osnovu uvida u dostupne literaturne podatke, dosadašnja izračunavanja ovom metodom vršena su upotrebom faktora nagomilavanja *Taylor*-ove (1954) ili *Berger*-ove (1956) forme. Ovi izrazi, međutim, fituju rezultate transportnih proračuna za beton sa relativnim odstupanjima koja, na energijama zračenja primordijalnih radionuklida, premašuju 11% (*Trubey* 1966, *Trubey and Harima* 1987). U cilju dobijanja rezultata veće tačnosti, u disertaciji je proračun specifičnih jačina apsorbovane doze u prostoriji izvršen pomoću parametarskog oblika faktora nagomilavanja u aproksimaciji geometrijske progresije, tzv. (G-P) ili *Harima* formule (*Harima* 1993, *Harima et al.* 1986, 1991), koji do sada nije primenjen za ovakva izračunavanja. Naime, ovaj funkcionalni oblik sa izrazitom preciznošću (*Trubey* 1991, *Shultis and Faw* 2005) reprodukuje podatke dobijene rešavanjem problema transporta fotona za različite elemente i energije zračenja (*ANSI/ANS-6.4.3* 1991), pri čemu je maksimalno odstupanje od originalnih podataka za beton jednako 2.9% (*Eisenhauer and Simmons* 1975).

Izračunavanje specifičnih jačina apsorbovane doze za građevinske materijale specificiranog hemijskog sastava, drugačijeg od betona, kao i njihove kombinacije (*Markkanen* 1995, *Turtiainen et al.* 2008, *Moharram et al.* 2012), vršeno je u malom broju istraživanja. Pored toga, evidentirani su različiti uticaji promene sastava sredine – od zanemarljivog, do oko 18% razlike u vrednostima doze (*Koblinger* 1978, *Allam* 2009). Stoga, cilj disertacije je i proračun doza koje potiču od radionuklida u cigli, koja je pored betona, najčešće korišćeni strukturni materijal, kao i doprinosa keramičkih pločica, prekrivnog konstrukcionog materijala u širokoj upotrebi, u prostorijama sa jednim ili kombinacijama ovih građevinskih materijala. Kako faktori nagomilavanja koji se odnose na hemijski sastav navedenih materijala nisu publikovani, zadatak disertacije je i određivanje odgovarajućih (G-P) parametara.

Efekti promene dimenzija i debljine zidova prostorije, različitog položaja tačke detekcije, kao i prisustva prozora i vrata u prostoriji, istraženi su delimično u ograničenom broju radova (*Risica et al.* 2001, *van der Graaf* 2001, *Maduar and Hiromoto* 2004, *Allam* 2009). U cilju kompletnijeg sagledavanja ovih uticaja, predmet proučavanja disertacije predstavlja i određivanje specifičnih jačina apsorbovane doze za slučajeve varijacije navedenih parametara, kao i nalaženje odgovarajućeg analitičkog oblika za fitovanje opaženih zavisnosti. Pošto takav proračun podrazumeva obavljanje velikog broja numeričkih integracija, cilj disertacije je, takođe, izvođenje novog, jednostavnijeg oblika doze tačkastog izvora, na bazi koncepta faktora nagomilavanja za niz radionuklida, pogodnog za obimnija izračunavanja, koji, s druge strane, ima preciznost omogućenu *Harima* formulom.

Prema pregledu literature, proračun publikovanih konverzionih koeficijenata za ambijentalni dozni ekvivalent vršen je jedino primenom *Monte Carlo* simulacija (*ICRU* 1992, *Ferrari and Pelliccioni* 1994, *Pelliccioni* 2000, *Lima et al.* 2004). Osnovne postavke ovog problema, oblik geometrijskog fantoma i model polja, omogućavaju, međutim, korišćenje metoda faktora nagomilavanja u izračunavanju. Zato, jedan od ciljeva disertacije je prikaz primene ovog metoda u aproksimativnom određivanju koeficijenata koji povezuju ambijentalni dozni ekvivalent na različitim energijama zračenja i odgovarajućih vrednosti kerma vazduha *free in air*. Osim toga, cilj teorijskog dela rada je i izračunavanje ekvivalentne doze za tkiva i organe (numerički jednakih srednjoj apsorbovanoj dozi), kao i efektivne doze, koji se odnose na geometriju ozračivanja u prostoriji, korišćenjem odgovarajućih literaturnih podataka (*Zankl et al.* 1997, *Lee et al*. 2007) za konverzione koeficijente.

Merenja

Veliki broj istraživanja u proteklim decenijama posvećen je određivanju radioaktivnosti građevinskih materijala (*Krisiuk et al.* 1971, *Stranden* 1976, *Beretka and Mathew* 1985, *Othman and Mahrouka* 1994, *Mustonen et al.* 1999, *Kumar et al.* 1999, *Amrani and Tahtat* 2001, *Kovler et al.* 2002, *Ahmed* 2005, *Hizem et al.* 2005, *Righi and Bruzzi* 2006, *Turhan et al.* 2008, *Brígido Flores et al.* 2008, *Ravisankar et al.* 2012, *Gharbi et al.* 2012, *Trevisi* 2012). Međutim, primena dozimetrijskog kriterijuma za ograničenje izlaganja zračenju unutar prostorija, koja podrazumeva kontrolu sadržaja prirodnih radionuklida u ovim materijalima, nameće potrebu permanentnih i sveobuhvatnih ispitivanja. Naime, sadržaj radioaktivnih elemenata, izmeren u građevinskim materijalima koji su u upotrebi u različitim delovima sveta, kao i u zemljama Evropske Unije, varira u značajnoj meri i u materijalima iste vrste (*EC* 1999, *UNSCEAR* 2000, *STUK* 2010, *Nuccetelli* 2012).

Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u pojedinim građevinskim materijalima, koji potiču ili se koriste na teritoriji Republike Srbije, publikovane u određenom broju referenci (*Nikezić* 1990, *Popovic et al.* 1996, *Pavlić et al.* 2000, *Popović and Todorović* 2006, *Krstić et al.* 2007, *Ujić et al.* 2010, *Manić et al.* 2012), takođe pripadaju širokom opsegu vrednosti. Ova istraživanja uglavnom su izvršena za manji broj uzoraka koji reprezentuju određenu vrstu

materijala, a podaci koji detaljnije karakterišu poreklo uzoraka, prvenstveno proizvođače finalnih produkata, najčešće su izostavljeni. Pored toga, iako izrazito visoke koncentracije ^{222}Rn, izmerene u okolini grada Niša (*Manić et al.* 2006, *Žunić et al.* 2006, *Nikolov et al.* 2012), ukazuju na veliki sadržaj ^{226}Ra u tlu, što može rezultovati povećanim sadržajem ovog elementa u lokalnim sirovinama i konstrukcionim proizvodima, mali broj studija odnosi se na radioaktivnost građevinskih materijala u ovom delu jugoistočne Srbije (*Krstić et al.* 2007). Zato, u cilju određivanja odgovarajućih vrednosti doza, zadatak disertacije predstavlja sistematsko ispitivanje koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima na teritoriji grada Niša i njegove okoline, koje uključuje merenja većeg broja uzoraka poreklom iz Srbije ili iz uvoza, uz specifikaciju odgovarajućih proizvođača.

Korišćenje gama indeksa, kao kriterijum upotrebljivosti građevinskih materijala, podrazumeva računanje povećanja apsorbovane doze u prostoriji, u odnosu na dozu određenu srednjim vrednostima (za Evropu) aktivnosti primordijalnih radionuklida u tlu (*Markkanen* 1995, *EC* 1999). Obzirom na drugačije koncentracije aktivnosti terestrijalnih radionuklida na različitim lokacijama, cilj disertacije je i izvođenje izraza za gama indeks u kome je uračunat srednji sadržaj radionuklida u zemljištu za okrug grada Niša, kao i odgovarajuće specifične jačine apsorbovane doze za zračenje zemljišta, izračunate u ovom istraživanju za idealizovanu geometriju tla metodom faktora nagomilavanja.

1.3. Struktura disertacije

Ova disertacija sastoji se iz šest glava. Njihov sadržaj je usklađen sa potrebom predstavljanja ciljeva rada, opisa glavnih aspekata predmeta i metodologije istraživanja, prikaza i diskutovanja rezultata i zaključaka disertacije.

Prva glava, “Uvod“, obuhvata tri poglavlja. Pored opštih razmatranja predmeta istraživanja, datih u prvom poglavlju, u ovoj glavi obrazloženi su ciljevi rada, preciziran je sadržaj disertacije, kao i njena struktura, odnosno podela sadržaja po glavama.

U okviru prvog poglavlja druge glave, “Teorijske osnove“, predstavljeni su osnovni pojmovi i definicije u radijacionoj dozimetriji, date su definicije i glavne karakteristike jonizujućeg zračenja i njegovih izvora, definicije i objašnjenja dozimetrijskih veličina i granica doza. Poglavlje “Radioaktivnost građevinskih materijala – izvor gama zračenja“ odnosi se na opis radioaktivnosti stena i minerala, i osobina građevinskih materijala različitih vrsta, NORM i TENORM tipa. “Osnovi proračuna dozimetrijskih veličina“ je treće poglavlje, u kome se nalaze opšta razmatranja: određivanje jačine doze pomoću fluksa zračenja, integralni oblik transportne jednačine za fotone, neophodna za realizaciju proračuna u disertaciji. U ovom poglavlju je dat i prikaz metoda faktora nagomilavanja i osnovnih aproksimativnih tehnika koje podrazumeva korišćenje ovog metoda.

Glava “Metod“ precizira način određivanja vrednosti dozimetrijskih veličina u disertaciji. Prvo poglavlje prikazuje postavke proračuna specifičnih jačina apsorbovane doze u prostoriji i karakterizaciju izvora zračenja i apsorpcione sredine: specifikaciju strukture energetskih grupa za ^{238}U i ^{232}Th, kao i određivanje linearnog koeficijenta slabljenja i koeficijenta apsorpcije energije iz literaturnih podataka. Predstavljena je i primena aproksimativnih metoda u izračunavanju parametara (G-P) faktora nagomilavanja, za energetske grupe primordijalnih radionuklida i faktora nagomilavanja u slučaju slojeva materijala. Takođe, uveden je koncept faktora nagomilavanja za zračenje niza radionuklida i odgovarajuće doze tačkastog izvora, a prikazan je i metod proračuna ambijentalnog doznog ekvivalenta i dozimetrijskih veličina u zaštiti od zračenja. U drugom poglavlju, koje se odnosi na

eksperimentalni deo disertacije: “Merenje koncentracije aktivnosti radionuklida“, opisan je način uzorkovanja građevinskih materijala i pripreme uzoraka za merenja. Navedene su glavne karakteristike korišćenog gama-spektrometra, objašnjen metod kalibracije uređaja i obavljanja kontrole kvaliteta ispitivanja. Na ovom mestu, predstavljeno je i određivanje koncentracije aktivnosti na osnovu odbroja u pikovima u spektru, kao i procena nesigurnosti merenja i granica detekcije.

Četvrta glava sadrži rezultate disertacije. Prvo poglavlje odnosi se na rezultate proračuna svih razmatranih dozimetrijskih veličina, koji su predstavljeni grafički, tabelarno i/ili u vidu izraza dobijenih fitovanjem. U ovom poglavlju, dati su rezultati primene različitih oblika faktora nagomilavanja, kao i jačine doze za niz radionuklida. Podaci dobijeni izračunavanjem specifičnih jačina apsorbovane doze prikazani su za standardnu prostoriju, kao i u zavisnosti od pojedinih parametara, u slučaju primene jednog ili kombinacije slojeva materijala. Pored toga, predstavljeni su konverzioni koeficijenti određeni za dozimetrijske veličine u zaštiti od zračenja i za operacione veličine. Drugo poglavlje obuhvata rezultate merenja koncentracija aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u različitim građevinskim materijalima. Dat je prikaz i odgovarajućih apsorbovanih i efektivnih doza, kao i vrednosti gama indeksa, koje odgovaraju ispitivanim materijalima, određenih pomoću izračunatih konverzionih koeficijenata. Za različite modele prostorija, izvršena je procena srednjih vrednosti jačine apsorbovane i efektivne doze za stanovništvo u oblasti grada Niša i okoline.

Diskusija rezultata nalazi se u petoj glavi rada. Prvo poglavlje odnosi se na diskusiju rezultata izračunavanja jačine doza i upoređivanje sa podacima dobijenim proračunima, publikovanim u različitim referencama. Pritom, uključene su sve dozimetrijske veličine, razmotrene u prethodnim glavama rada. Diskusija rezultata merenja sadržaja radionuklida u građevinskim materijalima data je u drugom poglavlju. Dobijene koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K upoređene su sa literaturnim vrednostima, izmerenim za građevinske materijale iste vrste koji se koriste u drugim državama, kao i za prethodno ispitivane materijale u Srbiji. Diskutovani su rezultati za odgovarajuće jačine apsorbovane i efektivne doze, određene za pojedinačne materijale, kao i srednje vrednosti ovih veličina za populaciju na teritoriji grada Niša.

Poslednja, šesta glava je zaključak disertacije. U ovoj glavi istaknuti su najvažniji rezultati disertacije i prikazani osnovni zaključci istraživanja. Takođe, dati su predlozi za dalji rad na ovoj temi.

2. Teorijske osnove

2.1. Osnovni pojmovi i definicije u radijacionoj dozimetriji

2.1.1. Definicija jonizujućeg zračenja; izvori jonizujućeg zračenja

Po opštoj definiciji (*Knoll* 2000), čestično ili elektromagnetno zračenje je jonizujuće ukoliko je njegova energija veća od minimalne vrednosti, potrebne za jonizaciju atoma i molekula u materijalu. Vrednost energije jonizacije zavisi od vrste materijala sa kojim zračenje interaguje: za alkalne metale energija jonizacije iznosi nekoliko eV (1 eV = $1.602 \cdot 10^{-19}$ J), jonizacioni potencijal atoma helijuma je 24.5 eV (*Podgorsak* 2005), dok je za raskidanje veze C-C atoma potrebno oko 5 eV (*Cox and Ang* 2010). Tako, granica između nejonizujućeg i jonizujućeg zračenja nije jasno određena jedinstvenom energijom, već postoji izvesna prelazna oblast (*Klewe-Nebenius* 2005). U pojedinim kategorizacijama, prag energije jonizujućeg zračenja je energija potrebna za proizvodnju jednog jonskog para u vazduhu, približno 34 eV (*Greening* 1981, *Ranger* 1999). Ipak, pošto je od prvenstvenog značaja interakcija jonizujućeg zračenja sa živim organizmima, kao donja granica energetskog spektra jonizujućeg zračenja najčešće se navodi vrednost 10 eV (*Knoll* 2000), koja je približna najnižoj energiji jonizacije atoma vodonika i kiseonika (14 eV).

Najveće vrednosti energije, do 10^{20} eV, pripadaju spektru prirodnog jonizujućeg zračenja kosmičkog porekla. Primarno - galaktičko i solarno kosmičko zračenje (uglavnom protoni), kaskadnim interakcijama sa atomima i molekulima atmosfere, proizvodi sekundarno zračenje: elementarne čestice (π- i μ- mezone, elektrone, protone, neutrone), kosmogene radionuklide (^{3}H, ^{7}Be, ^{10}Be, ^{14}C) i elektromagnetno zračenje – fotone, energije reda do 10^{8} eV (*UNSCEAR* 2000, *Kaul* 2005).

Druga komponenta prirodnog jonizujućeg zračenja potiče od radionuklida u Zemljinoj kori, sintetizovanih u toku stvaranja svemira, koji su, usled migracije kroz vodu i atmosferu, prisutni u skoro svim geološkim materijalima, kao i u biosferi (*NUREG* 1994, *Minty* 1997). U skladu s vrednošću vremena poluraspada, $T_{1/2}$, reda starosti Zemlje, najzastupljeniji su primordijalni radionuklidi: ^{238}U ($T_{1/2} = 4.47 \cdot 10^{9}$ god), ^{232}Th ($T_{1/2} = 1.4 \cdot 10^{10}$ god) i ^{40}K ($T_{1/2} = 1.28 \cdot 10^{9}$ god), kao i produkti njihovog raspada – radionuklidi kraćeg $T_{1/2}$ (reda od 10^{-6} s do 10^{4} – 10^{5} god) (*The Health Physics and Radiological Health Handbook* 1992). Izloženost

jonizujućem zračenju ostalih prirodnih radionuklida, ^{87}Rb, ^{138}La, ^{147}Sm, ^{176}Lu, kao i zračenju niza drugog izotopa uranijuma (izotopske obilnosti 0.72 %), ^{235}U ($T_{1/2}$ = 7.13·10^{8} god), zanemarljiva je zbog male zastupljenosti ovih elemenata (*UNSCEAR* 2000), ili niske vrednosti energije emisije (za ^{87}Rb).

Fotonsko, γ- zračenje zemaljskog porekla (energije do oko 2.62 MeV), pored kosmičkog zračenja, predstavlja osnovni faktor spoljašnjeg ozračivanja (*UNSCEAR* 2010). Gama zraci se emituju nakon radioaktivnog raspada, prilikom deekscitacije jezgra – produkta dezintegracije (*Friedlander et al.* 1981). Pored toga, gama zračenje može nastati i u drugim procesima, na primer u anihilaciji elektron-pozitron, pri čemu se generišu dva gama kvanta energije 511 keV. Moguća je i trofotonska anihilacija, ali se događa sa malom verovatnoćom.

Za većinu prirodnih terestrijalnih radionuklida karakterističan je α ili β^{-} radioaktivni raspad, a mogu biti prisutne i obe grane raspada (sa različitom verovatnoćom) (*Gilmor* 2008). Ova pojava, bifurkacija, postoji u svim prirodnim radioaktivnim nizovima. Tako, jezgro ^{212}Bi iz niza ^{232}Th dezintegriše se α- raspadom u ^{208}Tl (verovatnoća 35.93%), a β^{-} raspadom u ^{212}Po (verovatnoća 64.07%). Radionuklidi ^{208}Tl i ^{212}Po transformišu se u stabilno jezgro ^{208}Pb, β^{-}, tj. α- raspadom, respektivno. Za jezgra u nizu ^{238}U koja takođe ispoljavaju navedenu bifurkaciju, verovatnoća jednog tipa raspada znatno je veća od verovatnoće drugog, odnosno iznosi preko 99.9% za: α- raspad ^{218}Po i β^{-} raspad ^{214}Bi, kao i za β^{-} raspad ^{210}Bi (*Friedlander et al.* 1981, *The Health Physics and Radiological Health Handbook* 1992).

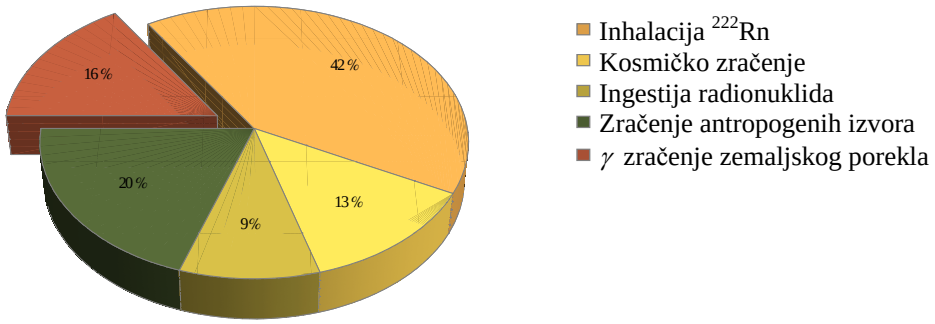
U neizobarnom, α- raspadu, uzrokovanom delovanjem jake nuklearne sile, α čestica, koja napušta jezgro tunelovanjem kroz potencijalnu barijeru, ima diskretne vrednosti energije, najčešće u opsegu (4 – 6) MeV (do 8.8 MeV, za prirodne radionuklide). Pri izobarnom beta raspadu emituje se elektron (β^{-}) ili pozitron (β^{+}) (slaba interakcija), koji energiju dezintegracije (Q) deli sa antineutrinom ili neutrinom (elektronskim), tako da je energetski spektar beta čestica kontinualan: $E \leq Q$. Za prirodne radionuklide je: Q < 3.3 MeV (*Knoll* 2000, *Gilmor* 2008). Jezra nastala nakon alfa ili beta raspada su obično u pobudjenom stanju, odakle se deekscituju emisijom gama zračenja, a moguće su i neradijacione deekscitacije. Za oba tipa raspada, energije izračenih fotona definisane su vrednostima ekscitacionih energija jezgra produkta ili njihovom razlikom, u slučaju kaskadne deekscitacije (*Klewe-Nebenius* 2005). Verovatnoća emitovanja γ- zračenja date energije, zavisi od tipa i multipletnosti prelaza (E1, E2, ..., M1, M2, ...), određenih vrednostima angularnog momenta i parnošću stanja između kojih se vrši prelaz, i zakonima održanja ovih veličina, tj. selekcionim pravilima (*Friedlander et al.* 1981, *McParland* 2010).

Za većinu prirodnih radionuklida, srednji život jezgra u pobuđenom stanju kraći je od 10^{-12} s (*Gilmor* 2008), tj. iznosi oko 10^{-13} s - 10^{-16} s (*Ivanović i Vučić* 1991), tako da se γ- zračenje (ili konverzioni elektroni, pri neradijacionoj deekcitaciji), emituje gotovo odmah posle α ili β raspada i karakteriše se vrednošću $T_{1/2}$ pretka (*Klewe-Nebenius* 2005). Međutim, u slučaju kada selekciona pravila ”zabranjuju” trenutni γ- prelaz, pobuđeno jezgro može se naći u metastabilnom stanju, koje ima sopstveni $T_{1/2}$ (*Gilmor* 2008, *McParland* 2010), iz kog se deekscituje izomernim prelazom (na primer, izomer ^{234}Pa, iz radioaktivnog niza ^{238}U). Pojedini prirodni radionuklidi, pored α ili β^{-}, imaju i granu raspada drugim mehanizmom dezintegracije, koja takođe rezultuje γ- emisijom [^{40}K: zahvat elektrona, ^{238}U: spontana fisija (sa znatno manjom verovatnoćom)] (*The Health Physics and Radiological Health Handbook* 1992).

Doprinos spoljašnjem ozračivanju, koji potiče od čestičnog zračenja emitovanog iz prirodnih izvora, zbog znatno manje prodornosti (okarakterisane dometom čestice), zanemarljiv je u odnosu na izlaganje γ- zračenju (*Kaul* 2005). Usled mnogostruko većih iznosa linearnog

transfera energije (*LET*) (*Greening* 1981), depozicija energije naelektrisanih čestica (prvenstveno α- zračenja) je, pak, glavni mehanizam unutrašnjeg ozračivanja prirodnim izvorima, unetih u organizam inhalacijom ili ingestijom (*UNSCEAR* 2000, *Markkanen* 2010). Dominatnu komponentu ovog tipa ozračivanja, pritom, predstavlja inhalacija ^{222}Rn (kao i ^{220}Rn, ali u znatno manjoj meri, zbog manje vrednosti $T_{1/2}$), ekshaliranog prvenstveno iz tla i građevinskih materijala procesima difuzije i advekcije (prethodno emaniranog iz mineralnih zrna u pore materijala uzmakom nakon α-raspada ^{226}Ra, ili difuzijom) (*Nikezić* 1990, *Stoulos et al.* 2004, *Kovler et al.* 2005).

Grafički prikaz doprinosa pojedinih prirodnih izvora ukupnom izlaganju jonizujućem zračenju dat je na Slici 2.1, na kojoj je predstavljen i udeo antropogenih izvora [medicinska terapija i dijagnostika (dominantno učešće), nuklearne probe, energetika, itd]. Odgovarajući procentualni udeli dobijeni su na osnovu srednjih vrednosti efektivnih doza za svetsku populaciju [publikovanih u *UNSCEAR* (2000, 2010)], tako da, u nekim slučajevima, doprinos izvora određene vrste višestruko premašuje navedenu vrednost. Naime, na pojedinim lokacijama, koncentracija ^{222}Rn u zatvorenim prostorijama veća je 100 i više puta od prosečnog nivoa (*Sohrabi* 2000, *Manić et al.* 2006, *Žunić et al.* 2006). Takođe, u određenim oblastima izuzetno visok sadržaj prirodnih radionuklida u tlu rezultuje i preko 1000 puta većim nivoima doza od srednje vrednosti (svet) za terestrijalno zračenje (*Sohrabi* 2000, *Kaul* 2005, *UNSCEAR* 2010).



Slika 2.1. Raspodela doprinosa izvora jonizujućeg zračenja ukupnom izlaganju - na osnovu podataka u *UNSCEAR* (2000, 2010); srednja godišnja efektivna doza koja potiče od svih prirodnih izvora: 2.4 mSv y^{-1}

2.1.2. Dozimetrijske veličine

2.1.2.1. *Fizičke veličine*

Jonizacija i ekscitacija atoma materijala izloženog γ– zračenju, odvija se u dve faze. Prvo, interakcijama zračenja (fotona) sa atomima materijala, oslobađaju se primarne naelektrisane čestice (elektroni, kao i pozitroni), a one, u drugoj fazi, direktnom *Coulomb*-ovom interakcijom, generišu sekundarne naelektrisane čestice (prvenstveno elektrone), koje vrše dalju jonizaciju sredine (*Hubbell* 1969, *Greening* 1981, *Podgorsak* 2005).

Dominantni mehanizmi apsorpcije i rasejanja fotona u materijalu, koji određuju verovatnoću interakcije po jedinici puta (linearni koeficijent slabljenja, μ), su: fotoefekat, *Compton*-ov efekat, proizvodnja parova i *Rayleigh*-jevo rasejanje (*Hubbell* 1999, *Deitze* 2005).

Makroskopski efikasni presek (maseni koeficijent slabljenja, μ/ρ) određen je zbirom efikasnih preseka za ove interakcije (umnoženim sa N_A/M, N_A – *Avogadro*-v broj, M – atomska masa materijala), koji na različit način zavise od energije fotona i atomskog broja sredine (*Hubbell* 1969, *Knoll* 2000, *NIST* 2004).

Za razliku od fotona, koji svu energiju mogu da izgube u samo jednoj ili u nekoliko interakcija, za zaustavljanje naelektrisane čestice, energije reda MeV, potrebno je više od 10^4 sudara (*Klewe-Nebenius* 2005, *Boman* 2007). Mehanizmi skretanja i usporavanja primarnih elektrona su elastično rasejanje i neelastično rasejanje na atomu, kojim transferuju kinetičku energiju sekundarnim česticama. Ovi procesi mogu da rezultuju jonizacijom ili ekscitacijom atoma. Mogući su i radijacioni procesi, tj. neelastično rasejanje u *Coulomb*-ovom polju jezgra, koje rezultuje emisijom zakočnog zračenja (*Hensel et al.* 2006, *Vassilev* 2010).

Energija $\mathrm{d}\varepsilon$ koju, navedenim mehanizmima, jonizujuće zračenje predaje elementu zapremine sredine, dV, je veličina stohastičke prirode, određena zbirom energetskih depozita iz pojedinačnih interakcija (*Deitze* 2005). Srednja energija, $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$, predata datoj zapremini je, međutim, nestohastička veličina (*Greening* 1981), koja se može izraziti preko jednačine balansa energije:

$$\mathrm{d}\bar{\varepsilon} = \mathrm{d}\varepsilon_{in} - \mathrm{d}\varepsilon_{out} + \mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{m}} . \tag{2.1}$$

U ovom izrazu, $\mathrm{d}\varepsilon_{in}$ označava zbir energija svih čestica (naelektrisanih i neutralnih) koje stižu u dV, $\mathrm{d}\varepsilon_{out}$ je energija čestica koje napuštaju dV, a $\mathrm{d}\varepsilon_{m}$ predstavlja ukupnu energiju određenu promenom mase mirovanja u dV (*Greening* 1981, *Boman* 2007).

Apsorbovana doza, D, osnovna fizička veličina u radijacionoj dozimetriji, relevantna za sve tipove jonizujućeg zračenja, definisana je kao srednja vrednost energije, $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$, koju jonizujuće zračenje deponuje u elementu zapremine dV materijala, mase dm, tj. data je izrazom (*ICRU* 1980, 1998):

$$D = \frac{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}}{\mathrm{d}m}, \tag{2.2}$$

gde je srednja energija, $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$, data jednačinom (2.1). Veličina $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$ predstavlja, zapravo, srednju vrednost dela kinetičke energije naelektrisanih čestica, generisanih interakcijama fotona, koji se predaje masi dm (u dV) sredine, i manifestuje u vidu jonizacije, ekscitacije, hemijskih promena i toplote (*Shultis and Faw* 2005). Pritom, pored dela kinetičke energije naelektrisanih čestica oslobođenih zračenjem u dm, $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$, generalno, sadrži i deo neto kinetičke energije, unete kretanjem sekundarnih elektrona u zapreminu dV i van nje (*Hubbell* 1969).

Apsorbovana doza data jednačinom (2.2) je definisana u tački materijala. U zaštiti od zračenja primenjuje se srednja vrednost apsorbovane doze u organu ili tkivu, pri čemu se raspodela apsorbovane doze usrednjava po datom organu.

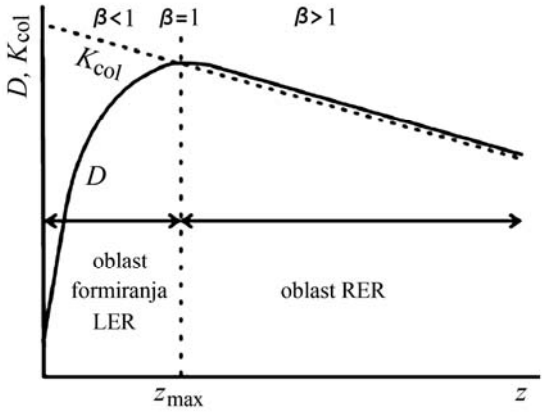
Jedinica za apsorbovanu dozu je J kg^{-1} i nosi specijalni naziv, Gray, sa skraćenicom Gy.

Kerma, K (jedinica: Gy), je nestohastička dozimetrijska veličina, i definiše se kao količnik sume inicijalnih kinetičkih energija, dE_{tr}, svih naelektrisanih čestica, oslobođenih indirektno jonizujućim zračenjem u elementu zapremine dV materijala, i mase tog elementa zapremine (*ICRU* 1980, 1998), odnosno:

$$K = \frac{\mathrm{d}E_{\mathrm{tr}}}{\mathrm{d}m} . \tag{2.3}$$

Za razliku od apsorbovane doze, koja podrazumeva depoziciju energije jonizujućeg zračenja u dV (dm), kerma se odnosi samo na prvu fazu ovog procesa, transfer energije naelektrisanim

česticama u dV, koje deo kinetičke energije mogu deponovati van ovog elementa zapremine, a takođe, deo energije (frakciju g) mogu izgubiti radijativnim putem (*Attix* 1986). Zato, u određenoj tački u materijalu, D i K, uopšteno, imaju različite vrednosti (*Greening* 1981), što je prikazano na Slici 2.2. (*Podgorsak* 2005). Ovde je data zavisnost apsorbovane doze i kolizionog dela kerma, $K_{col} = K\ (1 - g)$, od rastojanja koje γ- zračenje prelazi u materijalu (pretpostavljen je paralelni monohromatski zrak, normalan na površinu sredine). Inače, K_{col} je očekivana vrednost neto energije fotona koja je transferovana naelektrisanim česticama u datoj tački, isključujući radijativni gubitak energije, kao i energiju koju čestice međusobno razmenjuju (*Podgorsak* 2005).



Slika 2.2. Apsorbovana doza (D) i kolizioni deo kerma (K_{col})
u zavisnosti od rastojanja z u materijalu, $\beta = D/K_{col}$ (*Podgorsak* 2005)

Zavisnost K_{col} od rastojanja, z, primarno je određena promenom fluksa fotona, tako da ova veličina ima maksimalnu vrednost na površini ozračenog materijala i opada sa z u skladu sa slabljenjem zračenja. Apsorbovana doza, međutim, čija vrednost zavisi od formiranja fluksa naelektrisanih čestica, maksimum, $D = K_{col}$, dostiže na određenom rastojanju z_{max}, potrebnom za uspostavljanje lokalne elektronske ravnoteže (LER, na Slici 2.2) (*Attix* 1986, *Podgorsak* 2005).

Na većim dubinama, gde je odnos između apsorbovane doze i kolizionog dela kerma dat približnom relacijom: $D(z)/K_{col}(z) = \mu_e/(\mu_e - \mu_p)$ (μ_e i μ_p su linearni koeficijenti slabljenja elektrona, tj. fotona, respektivno), prisutna je tzv. relativna elektronska ravnoteža, kada su kerma i apsorbovana doza strogo proporcionalne (oblast RER na Slici 2.2) (*Greening* 1981). U slučaju zanemarljive atenuacije fotona na rastojanjima reda maksimalnog dometa elektrona [reda $5\mu_e^{-1}$ (*Greening* 1981)], fluks elektrona, kao i apsorbovana doza dostižu punu maksimalnu vrednost (koja se održava i na većim distancama) i uspostavlja se kompletna ravnoteža naelektrisanih čestica (*Whit*e 1959, *Hubbell* 1969), pri kojoj važi (*Podgorsak* 2005):

$$D = K(1 - g)\,. \tag{2.4}$$

Izlaganje, X, ili ekspoziciona doza (jedinica: C kg^{-1}), veličina koja se odnosi samo na fotone, prema definiciji (*ICRU* 1980, 1998), predstavlja količnik:

$$X = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}m}\,, \tag{2.5}$$

gde je dQ apsolutna vrednost ukupnog naelektrisanja jona jednog znaka, proizvedenih u vazduhu kada su svi elektroni i pozitroni, oslobođeni ili stvoreni fotonima u vazduhu mase dm, zaustavljeni u vazduhu. Izlaganje predstavlja jonizacioni ekvivalent kolizionog dela kerma vazduha, K_a, odnosno, važi relacija: $K_a = X(W_a / e)/(1-g)$, u kojoj je sa W_a označena srednja energija za proizvodnju jonskog para u vazduhu (33,97 eV) (*Podgorsak* 2005). U slučaju uspostavljene ravnoteže elektrona, apsorbovana doza u vazduhu, D_a, takođe je direktno proporcionalna izlaganju: $D_a = X(W_a / e)$ (*Greening* 1981).

2.1.2.2. *Veličine u zaštiti od zračenja*

Koncept dozimetrijskih veličina u zaštiti od zračenja podrazumeva ljudsko telo kao receptor energije jonizujućeg zračenja. Pored srednje vrednosti energije deponovane u tkivu (organu), za kvantifikovanje zdravstvenog rizika, ove veličine uzimaju u obzir i biološku efektivnost zračenja, kao i različitu osetljivost tkiva na zračenje (*ICRP* 1991, 2003, *ICRU* 1992).

Srednja apsorbovana doza u tkivu ili organu, D_T, je osnovna veličina u zaštiti od zračenja koja predstavlja apsorbovanu dozu usrednjenu po zapremini tkiva ili organa. Korelacija ove veličine sa radijacionim rizikom bazirana je na konceptu da linearna zavisnost doza – efekat, (kao i aditivnost doza), predstavlja odgovarajuću aproksimaciju za procenu rizika i u opsegu niskih vrednosti doza (*Deitze* 2005).

Ekvivalentna doza u tkivu ili organu, H_T, definisana je izrazom (*ICRP* 1991, 2003):

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} , \tag{2.6}$$

u kome $D_{T,R}$ označava srednju apsorbovanu dozu u tkivu ili organu T, izloženom jonizujućem zračenju tipa R. Parametar w_R je radijacioni težinski faktor, određen relativnom biološkom efektivnošću zračenja, koja je specificirana odnosom apsorbovanih doza jonizujućeg zračenja datog tipa i fotonskog zračenja odgovarajuće energije, koje proizvodi iste biološke efekte.

U slučaju spoljašnjeg ozračivanja, vrednost w_R, jedinstveno data parametrima incidentnog zračenja, jednaka je relativnoj biološkoj efektivnosti usrednjenoj za sva tkiva, što podrazumeva da se lokalne varijacije u kvalitetu zračenja (generisanje zračenja drugačijeg tipa) ne uzimaju eksplicitno u obzir (*Durham* 2007, *Noz and Maguire* 2007). Ovakav pristup omogućava sumiranje doprinosa različitih tipova spoljašnjeg zračenja (izraz 2.6), za razliku od koncepta pređašnje veličine - doznog ekvivalenta (*ICRP* 1977): $H = Q\,N\,D$, gde varijacija tipa i energije zračenja uključuje odgovarajuće usrednjavanje faktora kvaliteta, Q, koji odražava relativnu biološku efektivnost zračenja (N je proizvod svih ostalih težinskih faktora koji mogu modifikovati biološke efekte zračenja) (*Greening* 1981). Radijacioni težinski faktor za X- i γ– zračenje svih energija jednak je 1, kao i u slučaju elektrona (izuzev za *Auger*-ove elektrone, emitovane iz atoma koji su vezani za DNA), dok ostalim tipovima zračenja pripada veća vrednost w_R (od 2 do 20) (*ICRP* 1991, 2003).

Jedinica za ekvivalentnu dozu je Sievert, 1 Sv = J kg^{-1}.

Efektivna doza, E (jedinica: Sv), je težinska suma ekvivalentnih doza u tkivima i organima (*ICRP* 1991):

$$E = \sum_T w_T H_T , \qquad \sum_T w_T = 1 , \tag{2.7}$$

gde w_T predstavlja tkivni težinski faktor, koji karakteriše relativnu osetljivost različitih tkiva u odnosu na stohastičke efekte, koji rezultuju iz izlaganja jonizujućem zračenju [indukovanje kancera ili genetskih defekata (*Deitze* 2005)]; H_T je ekvivalentna doza u tkivu ili organu T.

Analogno, efektivna doza proizvedena ozračivanjem pojedinog tkiva, jednaka je dozi uniformno ozračenog tela, kojoj odgovara ista verovatnoća pojave stohastičkih efekata, kao u slučaju konkretnog parcijalnog ozračivanja (*Durham* 2007). Vrednosti w_T, primenljive za celu populaciju, procenjene za 14 tkiva i organa najosetljivijih na izlaganje zračenju, kao i za "ostatak", koji obuhvata 14 određenih tkiva i organa (*ICRP* 2007), date su u Tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Tkivni težinski faktori, w_T (*ICRP* 2007)

Tkiva i organi	w_T	$\sum w_T$
Crvena koštana srž, debelo crevo, pluća, želudac, grudi, Ostatak*	0.12	0.72
Gonade	0.08	0.08
Bešika, jednjak, jetra, tiroida	0.04	0.16
Površina kosti, mozak, pljuvačne žlezde, koža	0.01	0.04
	Ukupno	1.00

*Ostatak: adrenalne žlezde, ekstratoraksni region (ET), žučna kesa, srce, bubrezi, limfatični čvorovi, mišići, oralna mukoza, pankreas, prostata, mala creva, slezina, timus, uterus/cerviks

Kako ekvivalentna doza u tkivu ili organu, kao i efektivna doza, nisu merljive, za njihovo određivanje u praktičnim primenama koriste se konverzioni koeficijenti, (H_T/K_a, tj. E/K_a), koji predstavljaju normalizovane vrednosti ovih veličina u odnosu na odgovarajuću vrednost kerma vazduha *free in air* (*Paretzke and Petoussi-Hensß* 2005). Inače, za određivanje svih dozimetrijskih veličina, takođe se primenjuju konverzioni koeficijenti, izračunati uobičajeno u odnosu na fluks incidentnog zračenja, za diskretne vrednosti energija, ili koncentraciju aktivnosti radionuklida – izvora zračenja (*Eckerman and Ryman* 1993, *Yamaguchi* 1994, *Sato et al.* 1995, *Ferrari et al.* 1996, *Pelliccioni* 2000). Vrednosti konverzionih koeficijenata uglavnom se odnose na idealizovane geometrije polja spoljašnjeg zračenja, kojima se, u određivanju dozimetrijskih veličina, simuliraju uslovi profesionalnog izlaganja ili ozračenosti izvorima u životnoj sredini. Pritom, za preciziranu geometriju izlaganja, ekvivalentna i efektivna doza računaju se korišćenjem modela ljudskog tela – antropomorfnog fantoma, u osnovi tipa MIRD ili ORNL [matematičkim izrazima opisuju se površine koje definišu organ (*Snyder et al.* 1978, *Eckerman et al.* 1996)] ili voksel (modelovanje vokselima, na osnovu CT ili MR tomografije) (*Saito et al.* 1998, *Schlattl et al*. 2007, *Xu and Eckerman* 2010).

2.1.2.3. *Operacione veličine*

Za procenu vrednosti veličina u zaštiti od zračenja, koncipirane su opreracione dozimetrijske veličine (*ICRU* 1985, 1992, 1993), koje povezuju nivo spoljašnjeg ozračivanja sa vrednošću efektivne doze, odnosno ekvivalentne doze u koži ili očnom sočivu. U odnosu na vrednosti operacionih veličina, vrši se kalibracija monitoring instrumenata – dozimetara za kontrolu nivoa zračenja u radnom (tj. životnom) prostoru, ili individualnog izlaganja (*McDonald* 1996, *Paretzke and Petoussi-Hensß* 2005, *Scarlat* 2008).

Definicije operacionih veličina baziraju se na vrednosti doznog ekvivalenta *H*, u određenoj tački unutar geometrijskog fantoma - *ICRU* sfere, prečnika 30 cm (ili drugih *ICRU* fantoma: ploče, cilindara), ispunjene "tkivom", gustine 1 g/cm^3, sastava: 76,2 % O; 11,1 % C; 10,1 % H; 2,6 % N, koja adekvatno aproksimira rasejanje i slabljenje zračenja u ljudskom telu. Pored toga, koristi se model "širokog" polja zračenja, koji podrazumeva homogeno ozračivanje *ICRU* sfere, kao i "upravljeno" polje, suprotno specificiranom radijus vektoru sfere (*Shultis and Faw* 2000, *Vernli* 2004, *Deitze* 2005).

Ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(d)$, u tački realnog polja zračenja, je dozni ekvivalent koji bi bio proizveden odgovarajućim "upravljenim" i "širokim" radijacionim poljem u *ICRU* sferi na dubini *d*, na radijus vektoru suprotnom pravcu upadnog zračenja (*ICRU* 1993, *ICRP* 1991). Novija definicija (*ICRU* 2001) ambijentalnog doznog ekvivalenta podrazumeva veličinu $H^*(10)$ (d = 10 mm), koja se odnosi samo na prodorno zračenje (za zračenje niske prodornosti odgovarajuća, analogno definisana, operaciona veličina je *usmereni dozni ekvivalent*, $H'(d,\vec{\Omega})$, d = 0,07 mm, ili, retko, d = 3 mm).

Kao rezultat imaginarnog usmeravanja i proširenja radijacionog polja, vrednost $H^*(10)$ postaje nezavisna od ugaone raspodele zračenja u stvarnom polju, i obezbeđuje konzervativnu procenu efektivne doze. Zato, i očitavanje dozimetra, pri merenju $H^*(10)$ u određenom prostoru, treba da bude izotropno, u idealnom slučaju (*Deitze* 2005, *Scarlat* 2008).

Personalni dozni ekvivalent, $H_p(d)$, predstavlja dozni ekvivalent u mekom tkivu, na dubini *d* ispod specificirane tačke na ljudskom telu (*ICRU* 1992, 1993). U slučaju prodornog zračenja, za koje se vrši monitoring efektivne doze, *d* ima vrednost 10 mm, dok je za zračenje niske prodornosti preporučena vrednost d = 0.07 mm, koja odgovara merenju ekvivalentne doze za kožu (pri monitoringu doze za očno sočivo d = 3 mm) (*Wernli* 2004).

Usled individualnih varijacija $H_p(d)$, kao i proizvoljne pozicije referentne tačke, za potrebe kalibracije ličnih dozimetara definicija $H_p(d)$ je proširena, tako da obuhvata i dozne ekvivalente u *ICRU* tkivu. Za prodorno zračenje, čiji se monitornig obavlja dozimetrom postavljenim na trup tela, odgovarajući geometrijski fantom za izračunavanje personalnog doznog ekvivalenta, $H_p(10)$, je *ICRU* ploča, dimenzija: 30 cm x 30 cm x 15 cm (*ICRU* 1992, *Deitze* 2005, *Paretzke and Petoussi-Hensß* 2005).

2.1.2.4. *Granice doza*

Sistem zaštite od zračenja zasnovan je na principima: opravdanosti delatnosti, optimizacije zaštite, i granica doza i rizika (*ICRP* 1991, *Sl. Glasnik RS* 2009). Po prvom principu, korisni efekti delatnosti u kojoj se primenjuje jonizujuće zračenje, treba da nadmašuju štetnost zračenja. Optimizacija zaštite podrazumeva primenu principa ALARA, po kom idividualne doze, broj izloženih osoba, kao i verovatnoću izlaganja, treba sniziti na objektivno mogući nivo, uzevši u obzir društvene i ekonomske faktore (ALARA je akronim: "all doses should be kept As Low As Reasonably Achievable").

Princip granica doza bazira se na ograničavanju radijacionog rizika, određenog verovatnoćom pojave stohastičkih zdravstvenih efekata, kao i njihove ozbiljnosti (najveća je za kancer, 1) (*ICRP* 1991). Pritom, usvojen je "linearni - bez praga" model zavisnosti radijacionog rizika od vrednosti doze, gde je linearnost funkcije u oblasti visokih vrednosti doza, ekstrapolirana i u opsegu niskih doza (u odsustvu relevantnih podataka). Vrednost faktora rizika za izazivanje fatalnog kancera (štetnost), procenjena ovim modelom, za profesionalno izložena lica i stanovništvo iznosi $4\cdot10^{-2}$ Sv^{-1}, tj. $5\cdot10^{-2}$ Sv^{-1}, respektivno, dok je verovatnoća pojave ozbiljnih genetskih efekata niža od somatskih (oko $1\cdot10^{-2}$ Sv^{-1}) (*ICRP* 1991, *NCRP* 1993). Prema novijoj publikaciji *ICRP* (2007), verovatnoća pojave fatalnog kancera za stanovništvo ima manju vrednost: $4\cdot10^{-2}$ Sv^{-1}, a faktor rizika za nastanak bilo kog kancera je $4.1\cdot10^{-2}$ Sv^{-1} (odrasli), tj. $5.5\cdot10^{-2}$ Sv^{-1} (sve starosne grupe). Inače, iako po linearnom modelu, svako zračenje može uzrokovati stohastičke efekte, izlaganje kome odgovara doza ispod 1/100 vrednosti normalnog prirodnog nivoa zračenja, izuzima se iz koncepta radiološke zaštite (*ICRP* 1991) [granična vrednost koja se često koristi je 10 μSv (*Deitze* 2005, *NEA-OECD* 2011)].

U Tabeli 2.2. prikazane su granice godišnjih doza, tzv. primarne granice, preporučene za profesionalno izlaganje i izlaganje stanovništva, u vidu efektivne doze (na osnovu faktora rizika za stohastičke efekte) i ekvivalentnih doza za pojedine organe (određenih determinističkim efektima) (*ICRP* 1991, 2007, *NCRP* 1993, *IAEA* 1996, *NEA-OECD* 2011). Granice izlaganja za stanovništvo odnose se na jonizujuća zračenja koja potiču od izvora u kontrolisanoj praksi, pri čemu se doze izlaganja ovim izvorima određuju proračunom koji odgovara najizloženijem pojedincu iz relevantne grupe stanovništva (*Pravilnik* 2011a).

Tabela 2.2. Granice godišnjih doza; odnose se na zbir doze spoljašnjeg i očekivane doze unutrašnjeg izlaganja (*ICRP* 1991, 2007, *Pravilnik* 2011a)

	Profesionalno izlaganje	Izlaganje lica na školovanju - praksi, starosti 16-18 god.	Izlaganje stanovništva
Efektivna doza (mSv)	20, usrednjeno za 5 uzastopnih godina; 50 u jednoj godini[a]	6	1, usrednjeno za 5 uzastopnih godina; 5 u jednoj godini[b]
Ekvivalentna doza za očno sočivo (mSv)	150	50 (*ICRP* 1991); 45 (*Pravilnik* 2011a)	15
Ekvivalentna doza za delove ekstremiteta[c] i kožu[d] (mSv)	500	150	50

[a] Uz uslov da srednja efektivna doza za 5 uzastopnih godina ne prelazi 20 mSv/god;
[b] Uz uslov da srednja efektivna doza za 5 uzastopnih godina ne prelazi 1 mSv/god;
[c] Delovi ekstremiteta podrazumevaju: šake, podlaktice, stopala, gležnjeve;
[d] Usrednjena po površini 1 cm^2 bilo kog dela kože;

Zaštita od jonizujućeg zračenja pri povećanom izlaganju stanovništva prirodnim izvorima (^{222}Rn i ostali prirodni radionuklidi zemaljskog porekla, kosmičko zračenje), kao i usled kontaminacije prethodnim aktivnostima ili akcidentima, nije obuhvaćena sistemom granica doza. Za ove slučajeve uspostavljeni su nivoi intervencije, koji definišu vrednosti doza ili koncentracije radionuklida, kada se preduzimaju odgovarajuće mere smanjenja izlaganja (*ICRP* 1993, 1994). Granice doza nisu preporučene ni za medicinsko izlaganje, jer se podrazumeva da radioterapija ili dijagnostički tretman treba uvek da obezbedi direktnu dobit (pozitivnu neto korist) po pacijenta (*ICRP* 1991, 2007).

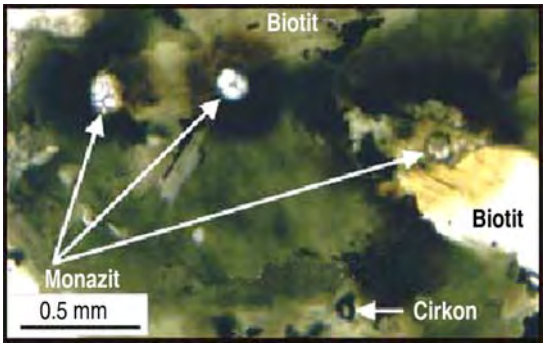
2.2. Radioaktivnost građevinskih materijala – izvor gama zračenja

Većina građevinskih materijala, kao i sirovina za njihovu proizvodnju, dobija se eksploatacijom stenskog materijala iz odgovarajućih nalazišta u površinskom sloju Zemljine kore. Zbog toga, po sadržaju prirodnih radioaktivnih elemenata, građevinski materijali odražavaju geološko poreklo svojih mineralnih konstituenata (*NCRP* 1994, *EC* 1999, *Haquin* 2008). U proizvodnji građevinskih materijala koriste se i određene sirovine sa tehnološki povećanim sadržajem prirodnih radionuklida, koje mogu znatno doprineti povećanju njihove radioaktivnosti (*EPA* 2008, *IAEA* 2011).

2.2.1. Radioaktivnost stena i minerala

Prirodni radionuklidi, ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, nalaze se u svim stenama Zemljine kore i omotača: magmatskim, sedimentnim i metamorfnim, sa najvećim prisustvom u perifernom delu litosfere, u granitnoj ljusci, na dubini 10 - 15 km (*Smislov* 1974). Primarno, koncentracija radionuklida u stenama određena je kristalizacijom minerala u procesu hlađenja prasilikatnog rastopa – magme, u kojoj su radioaktivni elementi prvobitno bili ravnomerno zastupljeni. Tokom ovog procesa, najpre se formiraju produkti sa dominantnim sadržajem Fe i Mg, koji se nalaze u osnovi sastava baznih magmatskih stena (bazalt, gabro, diorit), dok atomi i joni ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, kao i lantanidi, u najvećoj meri ostaju u tečnoj fazi rastopa (*Faure* 1986).

Daljom diferencijacijom magme stvaraju se kisele magmatske stene (granit, liparit), u kojima glavne komponente čine jedinjenja Si i Al (*Egidi and Hull* 1999). Atomi ^{238}U i ^{232}Th (kao i ^{40}K) nisu kompatibilni sa kristalnim rešetkama ovih minerala (*IAEA* 2003), a, zbog nedovoljne količine, uglavnom imaju slabu tendenciju ka formiranju minerala u kojima bi bili glavne komponente. Zato, u poslednjoj fazi frakcione kristalizacije magme, zajedno sa mineralima kiselih magmatskih stena, formiraju se mešoviti, kao i raznovrsni aksesorni (minorni) minerali, koji sadrže ^{238}U i ^{232}Th: cirkon, monazit, ksenotim, alanit, apatit, sijena (*Bea et al.* 1999, *Krishnaswami* 1999) [kao primer, na Slici 2.3. prikazan je uzorak granita sa primesama monazita i cirkona (*IAEA* 2003)]. Većina ovih minerala zajednička je za oba radionuklida, jer je, usled sličnih kristalohemijskih osobina jona U^{4+} i Th^{4+}, geohemijska aktivnost ovih aktinida u rastopu magme koherentna (*Vesić* 1987, *IAEA* 2003). Iako se najveći procenat ^{40}K nalazi u petrogenim silikatnim mineralima: nizu feldspata, feldspatoidima i liskunima (biotit i muskovit) (*Mittlefehldt* 1999), prisustvo ^{40}K u magmatskim stenama proporcionalno je sadržaju ^{238}U i ^{232}Th (*Vesić* 1987).



Slika 2.3. Granit, u kome α- zračenje ^{238}U i ^{232}Th iz monazita i cirkona uzrokuje oštećenje kristalne rešetke biotita (tamni krugovi oko mineralnih zrna) (*IAEA* 2003)

Sadržaj radionuklida u stenama dodatno uslovljavaju hidrotermalni, pneumatolitski i drugi postmagmatski, kao i hipergeni procesi, koji se odvijaju u daljem toku tektonskog ciklusa. (*Vesić* 1987). U hidrotermalnim i hipergenim uslovima migracione osobine ^{238}U i ^{232}Th znatno se razlikuju, obzirom da uranijum oksiduje u valentno stanje U^{6+}, što omogućuje njegovu veliku pokretljivost i formiranje različitih jedinjenja (*Langmuir and Hermans* 1980, *Grahovac* 1986, *Gavrilescu* et al. 2009).

Separacijom od glavnih minerala polazne magmatske stene, pri nastanku klastičnih sedimentnih stena, dobijaju se hemijski stabilni aksesorni minerali (sa koncentrisanim

radionuklidima), često u vidu malih izdvojenih zrna. U procesu formiranja stena amorfnim taloženjem iz rastvora ili taloženjem nerastvornih organskih ostataka, ^{238}U i ^{232}Th iz aksesornih minerala mogu biti transferovani u slojeve minerala gline, koji se, raspadanjem stene, odvajaju od glavnih minerala (*Bell* 1963, *Egidi and Hull* 1999). Sedimentacijom produkata raspadanja, izdvajaju se glavni tipovi sedimentnih stena sa različitom koncentracijom ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, koje, uopšteno, pored osnovnih minerala magmatskih stena (kvarc, feldspat, liskun, amfiboli, pirokseni), sadrže i: kalcit, dolomit, magnezit, aragonit, siderit, minerale gline.

Zbog velikog udela minerala gline, kao i organskog materijala, najvišu radioaktivnost pokazujuju škriljci (*Grahovac* 1986), a najmanji sadržaj radionuklida imaju karbonatne stene: krečnjak, dolomit, kamena so (*Vesić* 1987, *NCRP* 1994). Zastupljenost radioaktivnih elemenata u metamorfnoj steni (orto- ili para- tipa) određena je sastavom odgovarajućeg protolita, kao i mobilnošću ^{238}U u vodenim rastvorima (u kojima formira varijetete minerala: silikate, fosfate, karbonate, sulfate itd) (*Bell* 1963, *Grahovac* 1986, *Gavrilescu* et al. 2009).

U Tabeli 2.3. (*EPA* 1993, *NCRP* 1994), prikazana je koncentracija aktivnosti (u Bq/kg) ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u nekim osnovnim tipovima stena. Odgovarajući maseni udeo elementa u steni dobija se konverzijom: 1 % K (10^{-2} g K /1 g stenskog materijala) = 313 Bq/kg ^{40}K, 1 ppm U (10^{-6} g U /1 g stenske mase) = 12.35 Bq/kg ^{238}U (ili ^{226}Ra), 1 ppm Th = 4.06 Bq/kg ^{232}Th (*IAEA* 1989).

Tabela 2.3. Opseg i srednja vrednost koncentracije aktivnosti ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u tipičnim stenama i zemljištu (*EPA* 1993, *NCRP* 1994)

Tip stene	*A* (Bq/kg)		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Magmatske stene			
Bazne	7	7	70-400
Kisele	50	60	1100-1500
Bazalt-srednji sastav	7-10	10-15	300
Granit-srednji sastav	40	70	>1000
Sedimentne stene			
Škriljci	40	50	800
Peščari			
Kvarcni čisti	<10	<8	<300
Kvarcni prljavi	40	10-25	400
Arkoz	10-25	<8	600-900
Pesak sa plaža	40	25	<300
Karbonati	25	8	70
Metamorfne stene			
Mermer	20-30	20	40-200
Sve stene			
Opseg	7-60	7-80	700-1500
Zemljina kora -srednja vrednost	36	44	850
Zemljište	22	37	400

2.2.2. Vrste građevinskih materijala

U osnovi, sve vrste stena predstavljaju resurse za dobijanje građevinskih materijala i sirovina za njihovu proizvodnju. Pojedini tradicionalni građevinski materijali, dobijaju se mehaničkom obradom stenske mase nakon ekstrakcije iz ležišta (konstrukcioni - građevinski kamen, sirovine – pesak, šljunak, krečni kamen). Industrijskom ili manufakturnom proizvodnjom, dobijaju se konstrukcioni materijali najšire primene u građevinarstvu: beton, cigla, gas-beton (strukturni materijali), kao i građevinska keramika i keramičke pločice (prekrivni materijali). Hidraulička i vazdušna veziva: cement, gips, kreč, proizvedena tehnološkim postupcima različite složenosti, koriste se za *in situ* pravljenje masa sa vezivnom ili prekrivnom funkcijom (malter), ili kao materijal u sastavu nosećih strukturnih, kao i prekrivnih materijala.

2.2.2.1. *NORM*

Varijeteti mineraloškog sastava stena rezultuju drugačijim sadržajem prirodnih radionuklida u različitim vrstama građevinskih materijala. Pritom, u zavisnosti od lokaliteta ležišta (prvenstveno), radioaktivnost NORM građevinskih materijala iste vrste može imati značajno različite vrednosti.

Najveća koncentracija radioaktivnih elemenata, generalno, nalazi se u granitu, čiji sastav čine: kvarc, feldspat, liskun i drugi petrogeni minerali. Zbog svoje trajnosti i čvrstoće, granit se koristi kao strukturni ili prekrivni konstrukcioni materijal, za spoljašnju ili unutrašnju upotrebu (*Kogel et al.* 2006). Kao građevinski kamen, koriste se i druge magmatske stene (diorit, gabro, bazalt), kao i travertin, krečnjak, dolomit i, najčešće, mermer (*Muravljov* 1995), sa prosečno nižim sadržajem radionuklida (*NCRP* 1994).

Osnovni sirovinski materijali, pesak i šljunak, pripadaju nevezanim klastičnim sedimentnim stenama (*Dugal* 2008). Veličina zrna peska (0.05 mm – 2 mm), u kome preovlađuju minerali otporni na mehaničke uticaje: kvarc, muskovit, granat, turmalin, određuje njegovu primarnu upotrebu: u proizvodnji betona i cigli ili maltera. Uopšteno, pesak ne sadrži znatne količine radioaktivnih elemenata, koji se prvenstveno nalaze u aksesornim mineralima, cirkonu i apatitu, premda prisustvo feldspata na pojedinim lokalitetima može doprineti većoj koncentraciji ^{40}K (*Egidi and Hull* 1999). Šljunak, koji se najčešće primenjuje kao agregat u betonu (ili za nasipanje), ima heterogeni litološki i granulometrijski sastav, jer se fragmenti stena sakupljaju s velikog prostora (*Muravljov* 1995). Kao i u pesku, sadržaj radionuklida uglavnom zavisi od zastupljenosti aksesornih minerala.

U proizvodnji cementa, glavnog vezivnog strukturnog materijala, kao sirovinski materijali koriste se krečnjak (ili dolomit), koji se u osnovi sastoji od $CaCO_3$, i materijal čiji većinski sadržaj čine SiO_2 i Al_2O_3 (glina, uglavnom u sastavu laporca) (*Oates* 1998, *Chang* 2001). Procesom sinterovanja dobija se cementni klinker, smeša silikata i aluminata kalcijuma, kome se, pre mlevenja, uobičajeno dodaje retarder hidratacije - gips ($CaSO_4$) (*Muravljov* 1995). U toku hidratacije cementa u betonskoj masi, stvaraju se amorfna (C-S-H gel) i kristalna jedinjenja (etringit), istovremeno formirajući sistem pora različite veličine u očvrsloj strukturi (*Manić et al.* 1997, *Manić et al.* 1998).

U opštem slučaju, klinker, kao i cement bez dodataka, ne karakterišu značajne koncentracije radionuklida, u skladu s radioaktivnošću minerala sedimentnih stena u sastavu sirovina. Primarni karbonatni minerali u krečnjaku - kalcit, ili dolomitu - mineral dolomit [kao i gips u gipsanom kamenu (sadri) ili anhidritu], formirani hemijskom sedimentacijom, ne sadrže radioaktivne elemente (*Bell* 1963, *Egidi and Hull* 1999). Sadržaj radionuklida u ovim materijalima potiče od prisustva nekarbonatnih konstituenata: aksesornih minerala, minerala gline, kalcijum-fosfata (u morskom apatitu) i različitih organskih derivata, koji, zbog

rastvorljivosti ^{40}K i inertnosti ^{232}Th, mogu u većoj meri doprineti koncentraciji ^{238}U (*Bell* 1963). Nabrojanim mehanizmima simultanog taloženja sa karbonatnim mineralima, radionuklidi su zastupljeni i u laporcu, vezanom klastičnom sedimentu mešovitog sastava (karbonati i glina), sa izraženijim učešćem adsorpcije u slojevima gline.

Osnovna masa za proizvodnju građevinske keramike (cigla, blokovi, crep, pregradne ploče, sve vrste zidnih i podnih pločica), izgrađena je od opekarskih i keramičkih glina – poluvezanih sedimenata klastičnog ili hemijskog porekla (*Tecilović-Stevanović* 1990). Ovi materijali, pored najzastupljenijeg minerala kaolinita, sadrže i druge minerale gline, kao i: kvarc, kalcit, feldspat, muskovit, pirit, koji su prisutni u: kvarcnom pesku, ilovači, laporcu, lesu (*Kogel* 2006). Smeše koje se koriste za dobijanje porcelana imaju visoki procenat kaolinita, dok se za proizvodnju cigle (opeka i blokova) uglavnom koristi glinoviti materijal u kome se, osim gline, nalaze i krečnjak i pesak (*Tecilović-Stevanović* 1990).

Pored prisustva u aksesornim mineralima: cirkonu, apatitu, monazitu, kao i materijalima karbonatnih stena (*Bell* 1963), značajni doprinos sadržaju radionuklida u građevinskoj keramici, potiče od supstitucije izmenljivih katjona u slojevima, i adsorpcije u međuslojevima minerala gline. Zbog velike specifične površine i kapaciteta jonske izmene, ove osobine izražene su kod vermikulita i smektita, prilično manje kod ilita, dok kaolinit ispoljava slab afinitet ka izmeni jona (*Corrado* 2004). Stoga, za keramičke materijale koji sadrže većinski procenat kaolinita, nisu tipične bitnije koncentracije radionuklida, za razliku od vrednosti koje se mogu javiti u materijalima mešovitog sastava (različiti minerali gline), koji se koriste u proizvodnji cigle. Posebno, pošto je ^{40}K sastavni element feldspata i, konsekventno, muskovita i ilita, u čijem međuslojnom prostoru je slabo izmenljiv, u ilovači (i cigli) mogu biti prisutne veće koncentracije ovog radionuklida.

2.2.2.2. *TENORM*

Upotrebom sekundarnih, otpadnih industrijskih proizvoda, koji pripadaju TENORM materijalima, u proizvodnji građevinskih materijala, nastaju uslovi za dodatnu i pojačanu ozračenost u zatvorenim prostorijama. Materijali ove kategorije, koji se najčešće primenjuju u građevinskim materijalima, su: fosfogips, leteći pepeo, šljaka iz visokih peći (zgura), šljaka od uglja, crveno blato, kao i cirkonski pesak (*NEA-OECD* 1979, *EC* 2000, *Haquin* 2008).

Fosfogips je sporedni produkt proizvodnje fosforne kiseline mokrim postupkom, gde se pored sumporne kiseline, koriste kalcijum-fosfatne rude, u kojima je, usled zamene kalcijuma uranijumom u apatitu, prisutan veliki procenat ^{238}U (500 Bq/kg - 7000 Bq/kg), kao i ^{226}Ra (700 Bq/kg -3000 Bq/kg) (*De Voto and Stevens* 1979). Zbog rastvorljivosti jona U^{6+}, koji grade komplekse sa sulfatima, oko 70% ^{238}U (i ^{232}Th) iz minerala ostaje u fosfornoj kiselini, dok (80 – 100)% alkalnih jona Ra^{2+}, koji nemaju afinitet ka stvaranju kompleksa (*Kirby and Salutsky* 1964), iz rude prelazi u fosfogips (*EPA* 2008). Stoga, primenom fosfogipsa kao zamene NORM gipsa u cementu, u smeši za izradu pregradnih ploča (*Rajković i dr.* 2007), ili kao sirovinskog materijala u proizvodnji cementa, radioaktivnost dobijenih građevinskih materijala se može mnogostruko uvećati (*Papastefanou et al.* 2005).

Spaljivanjem uglja u termoelektranama, stvaraju se velike količine otpada (oko 10% mase): šljaka se akumulira na dnu bojlera, dok kolektori sakupljaju leteći pepeo (*IAEA* 2011). Ovi materijali koriste se kao dodatak cementu (zamenjuju do 35 % običnog Portland cementa), jer, osim ekonomičnosti, popunjavanjem pora produktima pucolanske reakcije, doprinose povećanoj kasnoj čvrstoći betona (*Papadakis* 2000) [upotrebljavaju se i za ispunjavanje struktura - podloga za puteve, podova (*Haquin* 2008)]. Zastupljenost radionuklida u uglju, koja, prosečno, ne premašuje sadržaj u tlu (^{238}U: 22 Bq/kg, ^{232}Th: 18 Bq/kg) (*Egidi and Hull* 1999), uglavnom je određena mehanizmima izgradnje kompleksnih jedinjenja U^{4+} i U^{6+} sa

organskim supstancama (humusom), koje preovlađuju u sastavu ovog fitogenog sedimenta (*Bell* 1963). Kako je u proizvodima sagorevanja uglja koncentracija radionuklida, prvenstveno ^{238}U (i ^{226}Ra), 2-5 puta veća od sadržaja u uglju (*Pandit et al.* 2011), upotreba ovih produkata u proizvodnji građevinskih materijala doprinosi povećanoj spoljašnjoj izloženosti (*Papaefthymiou and Gouseti* 2008), umanjujući, međutim, emanaciju ^{222}Rn, smanjenjem poroznosti hidratisanih cementnih materijala (*Kovler et al*. 2005).

Šljaka iz visokih peći (zgura), otpadni materijal u proizvodnji metala, čiji sastav čine oksidi Si, Al, Ca, Fe, u staklastoj formi, takođe pokazuje izrazita pucolanska svojstva u cementnim materijalima (betonu), gde se koristi kao zamena do 35% običnog Portland cementa (*NEA-OECD* 1979, *IAEA* 2011). Zbog zastupljenosti primordijalnih radionuklida u metalnim rudama [u pojedinim i do 10000 Bq/kg ^{238}U, kao i ^{232}Th (*IAEA* 2011)], uglavnom taloženjem aksesornih minerala iz hidrotermalnih rastvora (*Vesić* 1987), radioaktivnost betona sa dodatkom šljake može biti uvećana (*UNSCEAR* 2000).

Kao otpadni produkt u proizvodnji aluminijuma iz boksita, *Bayer*-ovim postupkom, nastaje crveno blato, koje se sastoji iz oksida gvožđa, titanijma i silicijuma, elemenata koji su izomorfni sa uranijumom i torijumom, čija koncentracija u crvenom blatu dostiže vrednosti 700 Bq/kg i 1000 Bq/kg, respektivno (*EPA* 2008). Zato, opeke u čijem sastavu je ovaj materijal u proseku sadrže 2-3 puta veći procenat radionuklida od standardnih (*NEA-OECD* 1979).

Visoke koncentracije ^{232}Th, i, posebno, ^{238}U, nalaze se u cirkonijumskoj rudi, čiji su osnovni minerali cirkon ($ZrSiO_4$) i badelit (ZrO_2), kao i u sedimentu odgovarajućih magmatskih stena - cirkonskom pesku, gde je prisutno do oko 4000 Bq/kg ^{232}Th, odnosno 30000 Bq/kg ^{238}U (*CLS* 1999, *EC* 2000). Ovi materijali koriste se u keramičkoj industriji, u proizvodnji glazura za zidne i podne pločice (kao i za vatrostalne opeke, glazure za belu keramiku), koje, zbog toga, mogu imati značajnije prisustvo radioaktivnih elemenata. Pigmenti na bazi TiO_2, poreklom iz titanijumske rude, u kojoj može naći do oko 1600 Bq/kg ^{226}Ra (*EC* 2000), takođe doprinose povećanju sadržaja radionuklida u keramičkim proizvodima u kojima se primenjuju (*CLS* 1999).

Tipične vrednosti sadržaja prirodnih radionuklida u pojedinim vrstama građevinskih materijala date su u Tabeli 2.4. Opseg koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K prikazan u tabeli, odnosi se na NORM strukturne (noseće i vezivne), kao i prekrivne materijale u najčešćoj upotrebi (*Haquin* 2008).

Tabela 2.4. Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u uobičajenim konstrukcionim građevinskim materijalima (*Haquin* 2008)

Vrsta građevinskog materijala	*A* (Bq/kg)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Strukturni materijali			
Beton	18-67	3-43	16-1100
Cigla	7-140	8-127	227-1140
Gas-beton	10-60	6-66	51-870
Gips	1-67	0.5-190	22-804
Cement	13-107	7-62	48-564
Prekrivni materijali			
Građevinska keramika	25-193	29-66	320-1049
Keramičke pločice	33-61	45-66	476-788

2.3. Osnovi proračuna dozimetrijskih veličina

2.3.1. Opšta razmatranja

2.3.1.1. *Određivanje jačine doze pomoću fluksa zračenja*

Apsorpcija energije gama zračenja u materijalnoj sredini vrši se interakcijama primarnih i sekundarnih elektrona, stvorenih zračenjem, sa atomima sredine, prvenstveno neelastičnim (*Møller*-ovim) rasejanjem (*Hensel et al.* 2006, *Boman* 2007). Pri višim energijama, rasejanje generisanih sekundarnih elektrona (delta zraka) predstavlja novi izvor naelektrisanih čestica u materijalu (*Greening* 1981). Jačina doze $\dot{D}(\vec{r},E_0)$, u tački detekcije $\vec{r}$, koja potiče od fotona izračenih iz izvora sa energijom E_0 i fluksom $\Phi(\vec{r},E)$, računa se kao konvolucija raspodele fluksa elektrona u toj tački $\vec{r}$, $\Psi_e(\vec{r},E)$, i odgovarajuće funkcije odziva $R_e(\vec{r},E)$:

$$\dot{D}(\vec{r},E_0)=\int_{E<E_0} R_e(\vec{r},E)\Psi_e(\vec{r},E)\mathrm{d}E\,. \tag{2.8}$$

Jačina doze u određenoj fizičkoj zapremini *V*, kao što je organ ili tkivo antropomorfnog fantoma, određuje se dosta složenijim oblikom funkcije $\dot{D}(V,E_0)$ (*Shultis and Faw* 2005).

Funkcija odziva u tački $\vec{r}$, $R_e(\vec{r},E)$, izražava se preko makroskopskog efikasnog preseka za depoziciju energije elektrona, kada su u pitanju interakcije koje dovode do velikog gubitka energije elektrona (tzv. katastrofalne interakcije) (*Vassiliev et al.* 2010). U slučaju kaskadnog prenosa energije (u mnoštvu sudara, malim iznosima), gubitak energije elektrona je kontinualan i adekvatan parametar kvantifikacije deponovanja energije u funkciji odziva je zaustavna moć sredine za elektrone (*Hensel et al.* 2006, *Boman* 2007).

Za određivanje vrednosti jačine doze koja potiče od gama zračenja, potrebno je, prema jednačini (2.8), proračunati raspodelu fluksa elektrona po energiji, $\Psi_e(\vec{r},E)$, što podrazumeva simultano rešavanje problema transporta fotona i elektrona kroz sredinu. U transportnim proračunima koriste se dva osnovna pristupa: 1) **deterministički**, u kome se rešavaju kuplovane jednačine, linearna *Boltzmann*-ova transportna jednačina za fotone i *Boltzmann-Fokker-Planck*-ova transportna jednačina za elektrone (kao i jednačina za jačinu doze) i 2) **stohastički** *Monte Carlo* metod, gde se simulira kretanje čestica obe vrste kroz materiju (*Gifford et al.* 2007, *Vassiliev et al.* 2010).

Za energije gama zračenja nizova prirodnih radionuklida (E < 3 MeV) transport elektrona je manje značajan, tj. za izračunavanje jačine doze u vazduhu dovoljno je razmotriti problem transporta fotona kroz materiju, odnosno proračunati raspodelu fluksa fotona, $\Phi(\vec{r},E)$ (*Hubbell* 1969, *Rymman et al* 1996). Tada je jačina doze u tački $\vec{r}$, koja potiče od fotona izračenih iz izvora sa energijom E_0:

$$\dot{D}(\vec{r},E_0)=\int_{E\le E_0} R(\vec{r},E)\Phi(\vec{r},E)\mathrm{d}E\,. \tag{2.9}$$

Funkcija odziva, $R(\vec{r},E)$, za lokalnu dozimetrijsku veličinu, tj. jačinu apsorbovane doze u tački $\vec{r}$, data je izrazom (*Shultis and Faw* 2005):

$$R(\vec{r},E)=\sum_i \frac{n_i}{\rho}(\vec{r})\sum_j \sigma_{ji}(\vec{r},E)\varepsilon_{ji}(E)\,, \tag{2.10}$$

gde n_i predstavlja broj atoma vrste *i* po jedinici zapremine sredine (gustine ρ) u kojoj se deponuje energija. Efikasni presek za *j*-ti tip interakcije fotona sa atomima vrste *i* označen je

sa σ_{ji}, dok je ε_{ji} srednja energija, predata sekundarnim naelektrisanim česticama u *j*-toj interakciji čestica sa atomima vrste *i*. Jednačina (2.10) za funkciju odziva važi u slučaju tzv. kerma aproksimacije apsorbovane doze, tj. u uslovima ravnoteže naelektrisanih čestica [kada je ukupna promena kinetičke energije čestica u elementu zapremine d*V* u tački $\vec{r}$, usled njihove migracije kroz d*V*, jednaka nuli (*Hubbell* 1969)]. Međutim, striktno, apsorbovana doza je i u tom slučaju jednaka kermi samo ako se zakočno zračenje i ostali radijacioni gubici energije elektrona, dati članom *g* u jednačini (2.4) (*Podgorsak* 2005), mogu zanemariti (*Greening* 1981, *Deitze* 2005).

Koeficijent depozicije energije u materijalu, μ_d/ρ, koji figuriše u jednostavnijem, uobičajenom obliku funkcije $R(\vec{r},E)$ (*Shultis and Faw* 2005):

$$R(\vec{r},E) = E\left(\frac{\mu_d(\vec{r},E)}{\rho}\right), \tag{2.11}$$

treba da bude konzistentan sa metodom proračuna fluksa fotona, što zapravo i određuje dozimetrijsku veličinu koja se računa (*Hubbell* 1969, *NIST* 2004). Izračunavanje kerme, naime, podrazumeva korišćenje koeficijenta transfera energije, μ_{tr}/ρ, frakcije μ/ρ, određene udelima energije fotona koji su transferovani primarnim naelektrisanim česticama u pojedinim interakcijama u zapremini d*V* (*Abdel-Rahman and Podgorsak* 2010). Pritom, deo energije fotona, nekonvertovan u kinetičku energiju elektrona, "beži" iz d*V* u vidu sekundarnog zračenja (nakon fotoelektričnog i *Compton*-ovog efekta, kao i anihilacije parova), koje na odgovarajući način treba biti uključeno u $\Phi(\vec{r},E)$ (*Hubbell* 1999, *Knoll* 2000). Za konzistentan proračun apsorbovane doze, gde se primenjuje koeficijent apsorpcije energije: $\mu_{en}/\rho = \mu_{tr}/\rho\,(1 - g)$, fluks fotona treba dodatno da obuhvati i "bežanje" zakočnog zračenja iz d*V* (*Hubbell* 1969, 1999).

2.3.1.2. *Transportna jednačina za fotone*

Kao rezultat navedenih interakcija fotona sa atomima sredine, ukoliko gama zračenje, koje je monoenergetski emitovano iz izvora (na energiji E_0), prolazi kroz materijalnu sredinu, fluks zračenja u tački detekcije $\vec{r}$, $\Phi(\vec{r})$ [broj fotona koji u jedinici vremena prolazi kroz sferu jediničnog poprečnog preseka sa centrom u $\vec{r}$, u: foton/(s·m^2)], je zbir dve komponente. Prva od njih, $\Phi_0(\vec{r})$, potiče od primarnih fotona koji iz izvora do tačke detekcije stižu direktno, bez sudara (tj. sa energijom E_0). Druga komponenta je fluks rasejanih fotona, $\Phi_s(\vec{r})$, koji se, u opštem slučaju, sastoji od rasejanih fotona (procesima *Compton*-ovog i *Rayleigh*-ovog rasejanja) i sekundarnih fotona: γ- i X- zraka, stvorenih mehanizmima anihilacije i fluorescencije, kao i zakočnog zračenja. Obzirom da fotoni "rasejanog" fluksa imaju energiju koja pripada kontinuumu: $E \le E_0$, energetski spektar ukupnog fluksa u tački detekcije, $\Phi(\vec{r},E)$, je kontinualan [$\Phi(\vec{r},E)$ je fluks po jedinici energije fotona sa energijama u intervalu (E, E + dE)] (*Hubbell* 1969, *Shultis and Faw* 2005).

Vrednost fluksa gama zračenja u tački detekcije $\vec{r}$, na određenoj energiji spektra *E*, u pravcu $\vec{\Omega}$, tj. $\Phi(\vec{r},E,\vec{\Omega})$, dobija se kao rešenje linearne *Boltzmann*-ove transportne jednačine, koja, u stacionarnom slučaju, opisuje balans fotona u 6-dimenzionalnom prostoru (*Bell and Glasstone* 1974). U integralno-diferencijalnoj formi ove jednačine, za predstavljanje ugaone zavisnosti fluksa i efikasnog preseka za rasejanje fotona uobičajeno se koriste redovi sfernih harmonika i *Legendre*-ovi polinomi (*Kloosterman* 1992, *Mera* 2007, *Gifford et al.* 2007). Numeričko rešavanje jednačine podrazumeva diskretizaciju energije (formalizam multi-grupa), uglova

[uglavnom metodom diskretnih ordinata (S_N metod)], kao i diskretizaciju prostora (metodi konačnih razlika i diferencnih šema) (*Brennan* 1996, *Brunner* 2002, *Stone* 2007).

Integralni oblik *Boltzmann*-ove transportne jednačine za fotone, koji je, konceptualno, osnova i za primenu *Monte Carlo* modela transfera zračenja kroz sredinu, dat je izrazom (2.12) (*Bell and Glasstone* 1974):

$$\Phi(\vec{r},E,\vec{\Omega}) = \int_V \left[S_0(\vec{r}',E,\vec{\Omega}) + \int_{4\pi}\int_E C_\Phi(\vec{r}',E',\vec{\Omega}'\to\vec{r}',E,\vec{\Omega})\Phi(\vec{r}',E',\vec{\Omega}')dE'd\vec{\Omega}' \right]\cdot \\ \cdot T_\Phi(\vec{r}'\to\vec{r},E,\vec{\Omega})d^3\vec{r}' \tag{2.12}$$

Jednačina (2.12) opisuje transport fotona pomoću sekvenci: sudar → prelaz, tj. kada nakon sudara (interakcije) na određenoj lokaciji u materijalu, sledi prelaz fotona do druge tačke sudara. Pri interakciji, menjaju se energija i pravac upadne čestice, dok su u toku prelaza fotona između dve kolizione tačke, ove veličine očuvane (*Vaz* 2009). Ovo su pretpostavke *point kernel* aproksimacije, koje su sadržane u oblicima funkcija gustine verovatnoće (jezgara operatora), tzv. kernelu sudara $C_\Phi(\vec{r}',E',\vec{\Omega}'\to\vec{r}',E,\vec{\Omega})$ i kernelu prelaza $T_\Phi(\vec{r}'\to\vec{r},E,\vec{\Omega})$. Kerneli su određeni izrazima:

$$C_\Phi(\vec{r}',E',\vec{\Omega}'\to\vec{r}',E,\vec{\Omega}) = \mu_s(\vec{r}',E',\vec{\Omega}'\to\vec{r}',E,\vec{\Omega}) \tag{2.13}$$

$$T_\Phi(\vec{r}'\to\vec{r},E,\vec{\Omega}) = \frac{\exp\left[-\int_0^{r'}\mu\left(\vec{r}-r''\vec{\Omega},E\right)dr''\right]}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|^2}\delta\left(\vec{\Omega}-\frac{\vec{r}-\vec{r}'}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|}\right), \tag{2.14}$$

gde $\mu(\vec{r},E,\vec{\Omega})$ i $\mu_s(\vec{r},E',\vec{\Omega}'\to\vec{r},E,\vec{\Omega})$ predstavljaju linearni koeficijent slabljenja i udeo rasejanja fotona (navedenim procesima) u $\mu(\vec{r},E,\vec{\Omega})$, respektivno (*Davis and Marshak* 2006). U integralnom obliku *Boltzmann*-ove transportne jednačine, izraženom preko funkcija kernela u jednačini (2.12), jasno su diferencirane dve pomenute komponente fluksa, "direktni", $\Phi_0(\vec{r},E,\vec{\Omega})$, i "rasejani" fluks, $\Phi_s(\vec{r},E,\vec{\Omega})$. Naime (razmatrajući doprinos elementa zapremine u tački $\vec{r}'$), prvi član jednačine, koji se dobija primenom kernela $T_\Phi(\vec{r}'\to\vec{r},E,\vec{\Omega})$ na funkciju $S_0(\vec{r}',E,\vec{\Omega})$, odnosi se na fluks fotona energije *E*, emitovanih iz tačke $\vec{r}'$ u pravcu $\vec{\Omega}$, koji u novi položaj $\vec{r}$ prelaze bez interakcije (*Inanc* 2002, *Vaz* 2009). Funkcija $S_0(\vec{r}',E,\vec{\Omega})$, koja predstavlja jačinu "primarnog" izvora, označava broj fotona energije *E*, koji izvor iz jedinične zapremine d*V* u tački $\vec{r}'$, emituje u pravcu $\vec{\Omega}$, u jedinici vremena. Evidentno, $S_0(\vec{r}',E,\vec{\Omega}) \neq 0$ samo za: 1) $E = E_0$, kod monohromatskog (E_0) izvora, 2) $E = E_{0i}$, u slučaju diskretnog ulaznog spektra (linije na E_{0i}) i 3) sve energije kontinualnog spektra izvora ("kontinuum E_{0i}"). Drugi član jednačine (5), $\Phi_s(\vec{r},E,\vec{\Omega})$, potiče od fotona koji, rasejanjem u tački $\vec{r}'$, modifikuju energiju i pravac od inicijalnih E' i $\vec{\Omega}'$, do E i $\vec{\Omega}$, respektivno [kolizionim kernelom $C_\Phi(\vec{r}',E',\vec{\Omega}'\to\vec{r}',E,\vec{\Omega})$], i, nakon sudara, prenose se od $\vec{r}'$ do $\vec{r}$ kernelom prelaza, $T_\Phi(\vec{r}'\to\vec{r},E,\vec{\Omega})$ (*Davis and Marshak* 2006).

Proračun fluksa direktnom integracijom *Boltzmann*-ove transportne jednačine (kao i u *Monte Carlo* metodu), podrazumeva prikazivanje fluksa u vidu *von Neumann*-ovog reda, čija *k*-ta komponenta predstavlja doprinos fotona rasejanih *k* puta (*Inanc* 2002). Analognim tretiranjem

izvora fotona, $S(\vec{r}\,',E,\vec{\Omega})$, datog članom u uglastoj zagradi u jednačini (2.12), izračunavanje fluksa vrši se sukcesivnom supstitucijom, tj. metodom iteracije, uz primenu diskretizacije svih promenljivih (*Inanc and Gray* 1997, *Zhou and Inanc* 2003). Pritom, za svaki korak iteracije, integracija po prostornom uglu može se izvršiti u lokalnom koordinatnom sistemu (pomoću *Gauss-Legendre*-ovih kvadratura), bez primene metode diskretnih ordinata i, konsekventno, pojave efekta "zraka" (*Takeuchi and Sasamoto* 1982, *Sasamoto and Takeuchi* 1982).

2.3.2. Metod faktora nagomilavanja

2.3.2.1. *Definicija faktora nagomilavanja. Point kernel aproksimacija*

Kako se, prema prethodnom razmatranju, fluks gama zračenja emitovanog sa energijom E_0 (iz tačke $\vec{r}\,'=0$), nakon prolaska kroz materijalnu sredinu, sastoji iz direktne i rasejane komponente, i dozimetrijska veličina u tački detekcije $\vec{r}$, $\dot{D}(\vec{r},E_0)$ (izlaganje, kerma, apsorbovana doza), data izrazom (2.9), može se raščlaniti na direktni i rasejani deo. Prema definiciji, faktor nagomilavanja dozimetrijske veličine u tački $\vec{r}$, $B(\vec{r},E_0)$, za zračenje sa inicijalnom energijom E_0, je količnik ukupne vrednosti dozimetrijske veličine i njene direktne komponente $\dot{D}_0(\vec{r},E_0)$, odnosno (*Chilton et al.* 1984, *Shultis and Faw* 2000):

$$B(\vec{r},E_0)=\frac{\dot{D}(\vec{r},E_0)}{\dot{D}_0(\vec{r},E_0)}=\frac{\int_{E\le E_0}R(\vec{r},E)\Phi(\vec{r},E)dE}{R(\vec{r},E_0)\Phi_0(\vec{r},E_0)}\,. \tag{2.15}$$

Na osnovu rezultata ranijih eksperimenata, u kojima su dobijeni različiti koeficijenti slabljenja za širok i uzak fotonski snop (*Wyckoff et al.* 1948), faktor nagomilavanja definisan je i kao odnos vrednosti dozimetrijske veličine u uslovima širokog i uskog snopa zračenja.

Korišćenjem konkretne vrednosti faktora nagomilavanja, proračunate za datu energiju fotona (E_0) i određeno rastojanje $|\vec{r}|$, koje zračenje prelazi u datom materijalu do tačke detekcije $\vec{r}$, jačina doze jednostavno se određuje izrazom:

$$\dot{D}(\vec{r},E_0)=B(\vec{r},E_0)\dot{D}_0(\vec{r},E_0)\,, \tag{2.16}$$

koji ukazuje da je za primenu ovog metoda neophodno postojanje direktne komponente fluksa u tački detekcije [u suprotnom, problem se može rešiti pomoću funkcije albeda (*Chilton and Huddleston* 1963)].

Metod faktora nagomilavanja koristi se u *point kernel* aproksimaciji, koja podrazumeva izotropno primarno zračenje tačkastog izvora i homogenost sredine kroz koju se vrši transport fotona (μ ne zavisi od $\vec{r}$) (*Broadhead and Emmett* 1998, *Shultis and Faw* 2000). Fluks ovog zračenja, $\Phi_0(\vec{r},E_0,\vec{\Omega})$, za pojedinačni izvor u položaju $\vec{r}\,'$, predstavlja direktno analitičko rešenje *Boltzmann*-ove transportne jednačine [prvi član jednačine (2.12)]. Kako je, za date $\vec{r}\,'$ i E_0, u slučaju izotropnog izvora, raspodela $S_0(\vec{r}\,',E_0,\vec{\Omega})$ po prostornom uglu određena jednostavnim ugaonim kernelom: $1/4\pi$ (*Davis and Marshak* 2006), jačina doze direktnog gama zračenja u *point kernel* aproksimaciji je data jednačinom (2.17):

$$\dot{D}_0(\vec{r},\vec{r}\,',E_0)=\frac{R(\vec{r},E_0)S_0(\vec{r}\,',E_0)}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}\,'|^2}\exp(-\mu(E_0)|\vec{r}-\vec{r}\,'|)\,. \tag{2.17}$$

U ovom izrazu, jačina izvora, $S_0(\vec{r}', E_0)$, predstavlja broj fotona/(s·cm^3), energije E_0, koje izvor u tački $\vec{r}'$ emituje u svim pravcima. Obzirom da je pravac $\vec{\Omega}$ definisan δ-funkcijom u kernelu prelaza $T_\Phi(\vec{r}' \to \vec{r}, E, \vec{\Omega})$, ugaona zavisnost $\dot{D}_0(\vec{r}, \vec{r}', E_0)$ uključena je preko vektora $\vec{r}'$ i $\vec{r}$.

Proračun jačine doze u slučaju izvora konačne zapremine, *V*, po *point kernel* aproksimaciji, vrši se razlaganjem zapremine na skup efektivnih tačkastih izvora i integracijom pojedinačnih doprinosa (*Broadhead and Emmett* 1998, *Marinković et al.* 2007, *Kalugin* 2010):

$$\dot{D}(\vec{r}, E_0) = \int_V B(\vec{r}, \vec{r}', E_0)\dot{D}_0(\vec{r}, \vec{r}', E_0)\mathrm{d}V \quad .$$

(2.18)

2.3.2.2. *Parametarski oblik faktora nagomilavanja*

Transportnim izračunavanjima, metodom momenata (*Goldstein and Wilkins* 1954), izvršenim za energije od 0.5 do 10 MeV i 8 materijala, u aproksimaciji beskonačne sredine, dobijena je standardna baza podataka za faktore nagomilavanja izlaganja i apsorpcije energije. Korišćenjem ovih vrednosti, kao i rezultata drugih proračuna (*Rockwell* 1956, *Goldstein* 1959), izvedene su interpolacione formule za određivanje faktora nagomilavanja: *Taylor*-ov (1954), *Berger*-ov (1956) i *Capo*-ov (1959) parametarski oblik. Ovi oblici, kojima je izražena funkcionalna zavisnost faktora nagomilavanja od srednjeg slobodnog puta u materijalu (mfp = μr), dati su izrazima (2.19) - (2.21), respektivno:

$$B(\mu r, E_0) = A\exp[-\alpha_1(E_0)\mu r] + (1-A)\exp[-\alpha_2(E_0)\mu r], \tag{2.19}$$

$$B(\mu r, E_0) = 1 + C(E)\mu r \exp[D(E)\mu r], \tag{2.20}$$

$$B(\mu r, E_0) = \sum_{n=0}^{3} \beta_n (\mu r)^n, \tag{2.21}$$

koji sa različitom preciznošću fituju izračunate vrednosti faktora nagomilavanja (*Berger and Spencer* 1959, *Trubey* 1966). U datim formulama, parametri: A, α_1, α_2, C, D i β_n, za određeni materijal, zavise od energije zračenja i, u principu, od vrste dozimetrijske veličine.

U standardu *ANSI/ANS-6.4.3* (1991) publikovane su vrednosti faktora nagomilavanja izlaganja i apsorpcije energije, izračunate metodima: momenata, diskretnih ordinata ili *Monte Carlo*, programima: PALLAS, ASFIT, ANISN, EGS4 ili MCNP. Podaci su tabelirani za 23 hemijska elementa i tri smeše (vazduh, voda i beton), za energije gama zračenja od 15 keV – 15 MeV i diskretne vrednosti srednjeg slobodnog puta, od 0.5 mfp - 40 mfp. Na osnovu transportnih proračuna, direktnom integracijom pomoću metode diskretnih ordinata, [program PALLAS (*Takeuchi and Tanaka* 1981)], dobijen je parametarski oblik faktora nagomilavanja u aproksimaciji geometrijske progresije, tzv. (G-P) ili *Harima* formula (*Harima* 1993, *Harima et al.* 1986, 1991, *Trubey* 1991):

$$\begin{aligned} &B(\mu r, E_0) = 1 + (b-1)\mu r \text{, za } K = 1 \\ &B(\mu r, E_0) = 1 + (b-1)(K^{\mu r} - 1)/(K-1) \text{, } za\ K \neq 1 \\ &K(\mu r, E_0) = c(\mu r)^a + d\,\frac{Tanh(\mu r/X_K - 2) - Tanh(-2)}{1 - Tanh(-2)} \end{aligned} \tag{2.22}$$

koja predstavlja najprecizniji funkcionalni oblik faktora nagomilavanja (*Shultis and Faw* 2005). Parametri b i K imaju fizički smisao, tj. označavaju vrednost faktora nagomilavanja za

mfp = 1, i faktor multiplikacije i promene spektra funkcije jačine doze u odnosu na vrednost za 1mfp, respektivno (*Harima et al*. 1991). Za navedeni opseg energija i vrednosti mfp, parametri (G-P) formule: *a*, *b*, *c*, *d* i X_K, takođe su tabelirani u dokumentu *ANSI/ANS-6.4.3* (1991).

2.3.2.3. *Aproksimativne metode izračunavanja faktora nagomilavanja - (G-P) parametara*

Određivanje faktora nagomilavanja za različite hemijske elemente, energije i vrednosti mfp može se aproksimativno izvršiti interpolacijom adekvatnih izračunatih (tabeliranih) vrednosti, po odgovarajućoj promenljivoj. U osnovi, primenjuje se *Lagrange*-ova interpolacija, kojom se, u opštem slučaju, vrednost funkcije $f(x)$ određuje na osnovu vrednosti $f(x_j)$ u tačkama x_j (j = 1, 2, ..., n) (*Froberg* 1985):

$$f(x) = \sum_{j=1}^{n} \left\{ \prod_{k=1}^{n(k \neq j)} \frac{x - x_k}{x_j - x_k} \right\} f(x_j) \,. \tag{2.23}$$

Po jednom pristupu, direktna interpolacija po energiji primenjuje se na faktore nagomilavanja (*Eisenhauer and Simmons* 1975), koji su glatke funkcije ln$E$, a ne na njihove parametre. Parametri faktora nagomilavanja, neophodni za funkcionalni oblik (zavisnost od μr) koji je pogodan za dalje proračune, dobijaju se zatim interpolacijom faktora nagomilavanja po broju mfp i fitovanjem dobijenih podataka parametarskim oblikom (*Maduar and Hiromoto* 2004). Predloženo je i razvijanje metoda za izračunavanje parametara faktora nagomilavanja rešavanjem sistema interpolacionih jednačina, gde se ovi parametri interpoliraju po energiji (ili atomskom broju) simultano sa fitovanjem po (G-P) formuli (*Yoshida* 2006).

Interpolacija po atomskom broju. Ekvivalentni atomski broj

Za elemente koji nisu obuhvaćeni *ANSI/ANS* standardom (ili drugom relevantnom publikacijom), vrednosti faktora nagomilavanja računaju se interpolacijom (G-P) parametara po atomskom broju (*Sakamoto et al.* 1988) [ili direktnom interpolacijom faktora nagomilavanja, koji su glatke funkcije atomskog broja (*Trubey* 1966)]. Pritom, za jedinjenja i kompozitne materijale prethodno treba odrediti odgovarajući ekvivalentni atomski broj.

Pošto efikasni presek, σ, za svaku interakciju fotona na određenoj energiji, zavisi od atomskog broja Z elementa u kome se interakcija događa, za interakciju u kompozitnom materijalu, σ nije moguće izraziti preko jedinstvenog atomskog broja, već pomoću ekvivalentnog (efektivnog) atomskog broja, Z_{eq}, koji je funkcija energije (*Hine* 1952, *Sidhu et al.* 2012). Ovaj parametar označava da je na datoj energiji efikasni presek interakcije fotona sa kompozitnim materijalom, isti kao za interakciju sa pojedinačnim elementom atomskog broja Z_{eq} (*Hine* 1952). Inače, pošto je atomski efikasni presek datog elementa za *Compton*-ovo rasejanje proporcionalan broju elektrona (*Hubbell* 1968), Z_{eq} kompozitnog materijala približno je jednak srednjoj vrednosti atomskih brojeva konstitutivnih elemenata, sa težinskim faktorima proporcionalnim njihovim masenim udelima u materijalu (*Kurudirek et al.* 2010, *Sidhu et al.* 2012).

Ekvivalentni atomski broj računa se korišćenjem izraza (2.24) (*Brar and Mudahar* 1996, *Manohara et al.* 2010):

$$Z_{eq} = \frac{Z(R_1)\ln\dfrac{R_2}{R} + Z(R_2)\ln\dfrac{R}{R_1}}{\ln\dfrac{R_2}{R_1}} \,, \tag{2.24}$$

zasnovanog na interpolacionoj formuli (2.23). U ovoj formuli, R predstavlja količnik *Compton*-ovog parcijalnog koeficijenta slabljenja, $(\mu/\rho)_C$, i ukupnog koeficijenta slabljenja, $(\mu/\rho)_t$, za kompozitni materijal sa ekvivalentnim atomskim brojem Z_{eq}. Parametri R_1 i R_2, za koje važi: $R_1 < R < R_2$, označavaju odgovarajuće količnike za elemente sa atomskim brojevima $Z_1 = Z(R_1)$ i $Z_2 = Z(R_2)$, na datoj energiji.

Za materijal sa ekvivalentnim atomskim brojem Z_{eq}, (G-P) parametri faktora nagomilavanja izračunavaju se *Lagrange*-ovom interpolacijom (2.23) po logaritmu atomskog broja (*Harima* 1983, *Sakamoto et al.* 1988). Analogno proračunu Z_{eq}, (G-P) parametar, u opštem slučaju označen sa $p(Z_{eq})$ [$p = a, b, c, d, X_K$, u jednačini (2.22)], određuje se pomoću parametara $p(Z_1)$ i $p(Z_2)$, gde je: $Z_1 < Z_{eq} < Z_2$, po izrazu:

$$p(Z_{eq}) = \frac{p(Z_1)\ln\frac{Z_2}{Z_{eq}} + p(Z_2)\ln\frac{Z_{eq}}{Z_1}}{\ln\frac{Z_2}{Z_1}}. \tag{2.25}$$

Interpolacija po energiji

Prema *ANSI/ANS-6.4.3* (1991), za energije različite od tabeliranih vrednosti, faktori nagomilavanja određuju se interpolacijom (G-P) parametara po ln$E$, pošto je svaki (G-P) parametar glatka funkcija ove promenljive (*Harima et al.* 1991). U radu *Harima et al.* (1986) predložena je parabolička interpolacija po ln$E$, čija je ispravnost potvrđena poređenjem sa rezultatima dobijenim *Capo*-ovom formom faktora nagomilavanja (*Capo* 1959). Prema ovom metodu, (G-P) parametri: a, b, c, d i X_K, na energiji grupe E_i, jedinstveno označeni sa $p(E_i)$, izračunavaju se po formuli:

$$p(E_i) = \frac{1}{2}\left\{\sum_{l=1}^{3} L(E_l)\,p(E_l) + \sum_{m=2}^{4} L(E_m)\,p(E_m)\right\}$$

$$L(E_l) = \prod_{n=1}^{3(l\neq n)} \frac{\ln\frac{E_i}{E_n}}{\ln\frac{E_l}{E_n}},\ L(E_m) = \prod_{n=2}^{4(m\neq n)} \frac{\ln\frac{E_i}{E_n}}{\ln\frac{E_m}{E_n}}, \tag{2.26}$$

gde su: E_1, E_2, E_3 i E_4 susedne energije, takve da važi: $E_1 < E_2 < E < E_3 < E_4$, za koje su vrednosti (G-P) parametara izračunate (*Yoshida* 2006).

Ekstrapolacija po mfp

Parametarski (G-P) oblik faktora nagomilavanja reprodukuje originalne podatke, dobijene rešavanjem problema transporta fotona u materijalima, do rastojanja 40 mfp (*ANSI/ANS*-6.4.3 1991). Transportnim proračunima [PALLAS (*Takeuchi and Tanaka* 1981)], za neke materijale (uključujući i beton), izračunate su vrednosti faktora nagomilavanja i na većim rastojanjima (do 110 mfp). Takođe, tehnikom invarijantnog utiskivanja (*Shimizu et al.* 2002), kojom su *ANSI/ANS* vrednosti faktora nagomilavanja za beton (do 40 mfp) reprodukovane sa relativnim odstupanjem do 5% (*Shimizu* 2004), izračunate su vrednosti faktora nagomilavanja za više materijala, na rastojanjima do 100 mfp. Pokazano je da se ovi rezultati, kao i oni za još veća rastojanja (do 300 mfp), mogu fitovati (G-P) oblikom faktora nagomilavanja (sa srednjom standardnom devijacijom za 26 materijala do 2.9 %), pri čemu se (G-P) parametri (različiti od *ANSI/ANS* vrednosti) dobijaju rešavanjem sistema interpolacionih jednačina (*Yoshida* 2006).

Ukoliko se za fitovanje rezultata transportnih proračuna za veća rastojanja (do 110 mfp, *Takeuchi and Tanaka* 1981) koriste *ANSI/ANS* (G-P) parametri, izračunati za faktore nagomilavanja do 40 mfp, ekstrapolacijom ovih podataka ne mogu se sasvim tačno reprodukovati osnovni faktori nagomilavanja do 40 mfp (*Harima et al.* 1991). Ovo je posledica činjenice da osetljivost parametra K [(G-P) formula (2.22)] postaje izražena pri porastu rastojanja. Za ekstrapolaciju funkcije $K(E_i, \mu r)$ [sa *ANSI/ANS* (G-P) parametrima] na rastojanjima većim od 40 mfp može se koristiti formula *Sakamoto*-a (*Harima et al.* 1991):

$$K(E_i, \mu r) = 1 + (K_{35} - 1)\left(\frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1}\right)^{\xi(\mu r)}, \text{ za } 0 \le \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} \le 1$$

$$K(E_i, \mu r) = K_{35}\left(\frac{K_{40}}{K_{35}}\right)^{\xi(\mu r)^{fm}}, \text{ za } \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} < 0 \text{ ili } \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} > 1 \tag{2.27}$$

$$\xi(\mu r) = \frac{(\mu r / 35)^{0.1} - 1}{(40/35)^{0.1} - 1},\ fm = 0.8,\ K_{35} = K(E_i, 35), K_{40} = K(E_i, 40)\ .$$

Faktor nagomilavanja za kombinaciju slojeva materijala

Za proračun doze proizvedene gama zračenjem koje na putu do tačke detekcije prolazi kroz više slojeva različitih materijala, koristi se faktor nagomilavanja kombinacije slojeva, B_k, koji zavisi od faktora nagomilavanja za pojedinačne materijale. Kako je ponašanje gama zračenja u višeslojnim sredinama veoma složeno, empirijske formule za B_k, dobijene različitim proračunima, uspešno reprodukuju vrednosti B_k samo za specifične kombinacije materijala, u određenim energetskim opsezima (*Hirayama* 1998). U najjednostavnijoj aproksimaciji *Blizard*-a (*Bünemann and Richter* 1968, *Kalugin* 2010), fotoni "zaboravljaju" prirodu prethodnih materijala, tako da je B_k predstavljen faktorom nagomilavanja poslednjeg sloja, izračunatim za ukupni broj mfp (svih slojeva). Za određivanje faktora nagomilavanja kombinacije dva materijala, debljine x_1 i x_2, u mfp (slojevi su numerisani u pravcu od izvora do detektora), čiji su ekvivalentni atomski brojevi i faktori nagomilavanja: Z_1, B_1 i Z_2, B_2, respektivno, uobičajeno se koristi sledeće pravilo (*Chilton et al.* 1984):

$$B_k(x_1, x_2) = B_2(x_1 + x_2),\ \text{za } Z_1 < Z_2 \tag{2.28.a}$$

$$B_k(x_1, x_2) = B_1(x_1)B_2(x_2),\ \text{za } Z_1 > Z_2\ . \tag{2.28.b}$$

Precizniji izrazi *Kalos*-a (*Goldstein* 1959), dobijeni *Monte Carlo* metodom, koji su u saglasnosti sa rezultatima drugih *Monte Carlo* proračuna (*Bowman and Trubey* 1958), za navedene parametre materijala su:

$$B_k(x_1, x_2) = B_2(x_2) + \left[B_2(x_1 + x_2) - B_2(x_2)\right]\cdot$$
$$\cdot\left\{\frac{B_1(x_1) - 1}{B_2(x_1) - 1}\exp(-1.7x_2) + \frac{(\mu_C / \mu)_1}{(\mu_C / \mu)_2}\left[1 - \exp(-x_2)\right]\right\}, \text{za } Z_1 < Z_2 \tag{2.29.a}$$

$$B_k(x_1, x_2) = B_2(x_2) + \frac{B_1(x_1) - 1}{B_2(x_1) - 1}\left[B_2(x_1 + x_2) - B_2(x_2)\right], \text{za } Z_1 > Z_2\ . \tag{2.29.b}$$

Iako su formule (2.29) izvedene za kombinaciju slojeva: voda - olovo i olovo – voda, respektivno, ovi izrazi mogu se koristiti i kod transporta gama zračenja kroz slojeve drugih materijala (*Lakshminarayanan et al.* 2010).

Grupisanje energija

Kada izvor emituje fotone više različitih energija (ili kontinualan spektar), zbog obimnosti proračuna dozimetrijskih veličina, pogodno je koristiti manji broj vrednosti gama energija za njegovu karakterizaciju, a određuje se i niskoenergetska granica ispod koje se "ulazno" zračenje može zanemariti (*Shultis and Faw* 2005). Zbog toga, primenjuje se tehnika podele spektra izvora na energetske grupe (*Bell and Glasstone* 1974, *Daskalov et al.* 2002), koja se, u opštem slučaju, upotrebljava i pri transportnim proračunima doze. U slučaju metoda faktora nagomilavanja, međutim, podela na grupe odnosi se na ulazni spektar energija (*Mustonen* 1984), tako da monohromatskom izvoru odgovara jedna energetska grupa, dok se pri rešavanju *Boltzmann*-ove jednačine ili *Monte Carlo* problema, vrši podela (često ekvidistantna) "izlaznog" kontinualnog spektra, bez obzira na broj grupa emitovanih fotona od strane izvora (*Close et al.* 1980, *Al-Jundi* 2009).

Za primene u proračunima metodom faktora nagomilavanja, ovom tehnikom, svi fotoni izračeni u određenom opsegu energija - energetskoj grupi *i*, karakterišu se efektivnom energijom – energijom grupe, E_i, koja predstavlja srednju vrednost energije u datom opsegu. Za spektre sa diskretnom raspodelom energija (^{238}U i ^{232}Th), E_i se dobija uzimajući prinose odgovarajućih linija kao težinske faktore, pri čemu je prinos grupe, $Y(E_i)$, zbir prinosa na energijama koje joj pripadaju.

3. Metod

3.1. Proračun dozimetrijskih veličina

3.1.1. Apsorbovana doza u vazduhu

3.1.1.1. *Postavke proračuna*

Apsorbovana doza u vazduhu, kao energetski ekvivalent jonizaciji vazduha u definiciji izlaganja za slučaj ravnoteže naelektrisanih čestica, izračunava se korišćenjem faktora nagomilavanja izlaganja u formuli (2.16). Za određivanje apsorbovane doze u vazduhu, koja potiče od zračenja u građevinskim materijalima, u ovoj disertaciji primenjena je funkcionalna forma ove veličine (u vidu zavisnosti od rastojanja, u mfp, koje zračenje prelazi u materijalu), potrebna za obavljanje integracije doze tačkastih izvora po zapremini izvora zračenja [jednačina (2.18)]. Kao najprecizniji funkcionalni oblik faktora nagomilavanja, korišćen je (G-P) parametarski oblik faktora nagomilavanja izlaganja, tj. *Harima* formula (2.22) (*Harima* 1993, *Harima et al*. 1986, 1991, *Trubey* 1991), sa (G-P) parametrima publikovanim u *ANSI/ANS*-6.4.3 (1991) standardu. Naime, za beton, maksimum odstupanja vrednosti faktora nagomilavanja dobijenih po (G-P) formuli od odgovarajućih rezultata transportnih proračuna, ne prelazi vrednost 2.9 %, štaviše, u opsegu energija koje značajnije doprinose jačini apsorbovane doze (E > 0.1 MeV), odstupanja su manja od 0.68% (*ANSI/ANS-6.4.3* 1991).

Kako, prema uvidu u literaturne podatke, proračuni (G-P) formulom nisu publikovani, radi dodatnog upoređivanja rezultata, jačine apsorbovane doze izračunate su i pomoću *Taylor*-ovog (1954), kao i *Berger*-ovog (1956) parametarskog oblika faktora nagomilavanja, koji su korišćeni u dosadašnjim radovima ostalih autora (*Mirza et al.* 1991, *Markkannen* 1995, *Ademola and Farai* 2005, *Turtiainen et al.* 2008). Parametri *Taylor*-ovog i *Berger*-ovog oblika faktora nagomilavanja, prikazani u Tabeli D.10. dodatka disertacije, dobijeni su direktno, korišćenjem programa SHLDUTIL (*Shultis and Faw* 2002). Za određivanje parametara *Harima* formule primenjene su opisane interpolacione metode.

Jačina izvora

Za proračun jačine apsorbovane doze u vazduhu u prostoriji, koja potiče od gama zračenja iz prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima, korišćen je *point kernel* metod, koji se

podrazumeva kod primene metoda faktora nagomilavanja. Po ovom metodu, zapreminski izvor – zid zapremine V tretiran je kao skup tačkastih izvora gama zračenja, zapremine dV. Takođe, kako se pretpostavlja homogenost materijala po hemijskom sastavu i gustini, svi izvori sadrže identični broj radionuklida i imaju istu masu: $\mathrm{d}m = \rho \mathrm{d}V$. Prema tome, jačina svakog primarnog izvora [$S_0(\vec{r}', E)$, $E = E_0$, u jednačini (2.17)], tj. broj fotona energije E, koje u jedinici vremena emituju radionuklidi sadržani u zapremini dV je:

$$S_0(E) = AY(E)\rho \mathrm{d}V\,. \tag{3.1}$$

U ovom izrazu $Y(E)$ predstavlja verovatnoću emisije, tj. broj fotona energije E emitovanih po jednoj dezintegraciji jezgra (tzv. gama prinos), u (foton/raspad), a A označava koncentraciju aktivnosti tog radionuklida, u (Bq/kg). Kako je u nizovima ^{238}U i ^{232}Th pretpostavljena radioaktivna ravnoteža, veličina A je jednaka za sve članove datog niza, i predstavlja koncentraciju aktivnosti primarnog jezgra, ^{238}U ili ^{232}Th. Naime, iako je određeni stepen neravnoteže nizova verovatan (*Minty* 1997), u proračunima jačine doze usled spoljašnjeg ozračivanja (gama doza), emanacija ^{222}Rn iz građevinskih materijala i drugi uzroci neravnoteže obično se zanemaruju (*Koblinger* 1978, *Stranden* 1979, *Markannen* 1995, *Turtiainen et al.* 2008, *Krstic and Nikezic* 2009). U slučaju radioaktivne ravnoteže, $Y(E)$ je broj fotona emitovanih po dezintegraciji primarnog jezgra (uz uračunavanje odnosa grananja za dati radionuklid).

Specifična jačina apsorbovane doze

Na osnovu definicija i aproksimacija, datih u prethodnim razmatranjima, apsorbovana doza u vazduhu u tački $\vec{r}_d$ u prostoriji, usled gama zračenja primordijalnog radionuklida: ^{238}U, ^{232}Th ili ^{40}K, iz građevinskog materijala zapremine V, određena je jednačinom:

$$\dot{D}(\vec{r}_d)\{^{238}\mathrm{U}, ^{232}\mathrm{Th\ ili}\ ^{40}\mathrm{K}\} = \frac{A\rho}{4\pi}\cdot \sum_{i=1}^{N} E_i Y(E_i)\left(\frac{\mu_{tr}(\vec{r}_d, E_i)}{\rho}\right)\left[\int_V \frac{B(\vec{r}_d, \vec{r}_s, E_i)\exp(-\mu_m(E_i)|\vec{r}_d - \vec{r}_s|_m - \mu_a(E_i)|\vec{r}_d - \vec{r}_s|_a)}{|\vec{r}_d - \vec{r}_s|^2}\mathrm{d}\vec{r}_s\right]. \tag{3.2}$$

Gornja granica sumiranja, N, u izrazu (3.2), označava broj energetskih grupa na koje je podeljen gama spektar radionuklida, $\vec{r}_s$ je vektor položaja tačkastog izvora, indeksi m i a odnose se na građevinski materijal i vazduh, respektivno, dok je značenje ostalih parametara definisano u prethodnom delu disertacije.

Za jediničnu vrednost koncentracije aktivnosti, A ($A = A_{\mathrm{U}}$, A_{Th} ili A_{K}), vrednost $\dot{D}(\vec{r}_d)$ predstavlja specifičnu jačinu apsorbovane doze, $q(\vec{r}_d)$, koja potiče od određenog radionuklida [$q(\vec{r}_d) = q_{\mathrm{U}}(\vec{r}_d), q_{\mathrm{Th}}(\vec{r}_d)$ ili $q_{\mathrm{K}}(\vec{r}_d)$]. Ovaj parametar, koji je za date osobine materijala i geometriju problema, potpuno definisan strukturom spektra radionuklida [specificiranom vrednostima E_i i $Y(E_i)$], predstavlja konverzioni faktor: koncentracija aktivnosti (Bq/kg) → jačina apsorbovane doze (nGy/h). Tako je ukupna jačina apsorbovane doze u vazduhu prostorije određena linearnom kombinacijom:

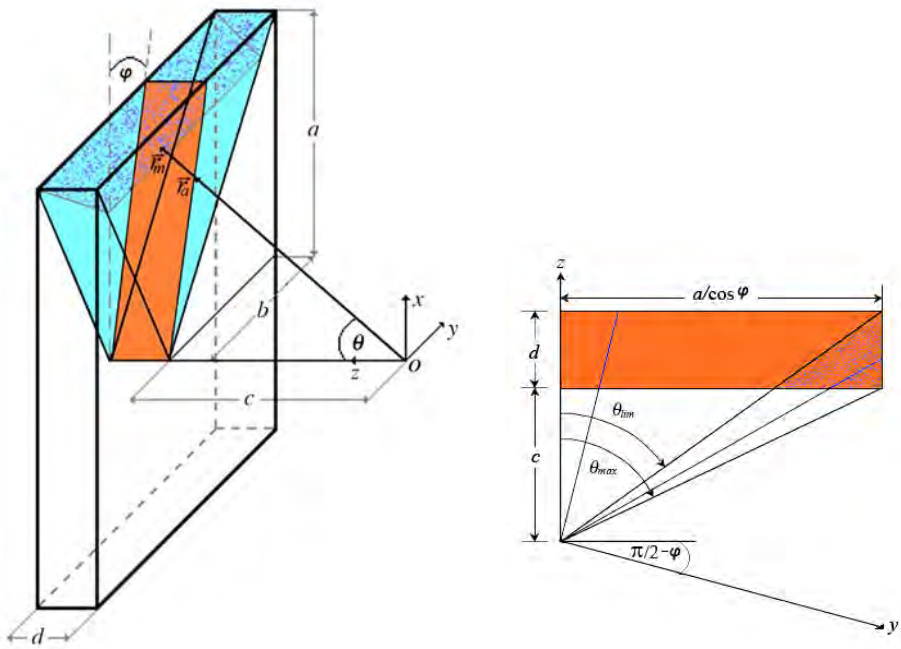
$$\dot{D}(\vec{r}_d) = q_{\mathrm{U}}(\vec{r}_d)A_{\mathrm{U}} + q_{\mathrm{Th}}(\vec{r}_d)A_{\mathrm{Th}} + q_{\mathrm{K}}(\vec{r}_d)A_K\,, \tag{3.3}$$

koja predstavlja standardnu reprezentaciju ove veličine (*EC* 1999, *UNSCEAR* 2000). Na ovaj način, apsorbovana doza u prostoriji se određuje na osnovu izračunatih vrednosti parametara q_{U}, q_{Th} i q_{K} (*UNSCEA*R 2000).

Geometrijski model

Pošto su doza i jačina doze aditivne veličine, specifične jačine apsorbovane doze u vazduhu prostorije dobijaju se sumiranjem odgovarajućih doprinosa gama zračenja iz pojedinih zidova, datih jednačinom (3.2). U ovoj disertaciji, za proračun $q(\vec{r}_d)$ od pojedinačnog zida (ako nije naglašeno drugačije, "zid" je zajednički termin za plafon, pod i zidove), korišćena je tehnika integracije po zapreminskom izvoru zračenja u obliku paralelepipeda, data u radu *Maduar and Hiromoto* (2004), po kojoj se izvor (zid) deli na oblasti koje je moguće opisati funkcionalno zavisnim granicama integracije.

Geometrijske postavke problema, u sfernim koordinatama, prikazane su na Slici 3.1, gde je tačka detekcije izabrana za početak pravougaonog koordinatnog sistema ($|\vec{r}_d| = 0$). Kako se jedino radijalnim ravnima [sadrže vektor $\vec{r} = \vec{r}_s - \vec{r}_d$ ($r = r_s = r_m + r_a$)] izvor može podeliti na oblasti sa nezavisnim doprinosima ukupnoj vrednosti $q(\vec{r}_d)$, korišćenjem ($\vec{z}, \vec{r}$) ravni, zid je raščlanjen na četiri prizme trougaonih osnova, pri čemu se svaka prizma sastoji iz dve oblasti, definisane različitim granicama integracije u jednačini (3.2).



Slika 3.1. Geometrijski model za proračun apsorbovane doze u prostoriji; na osnovu reference *Maduar and Hiromoto* (2004)

U skladu sa opisanom podelom, specifična jačina apsorbovane doze koja potiče od gama zračenja pojedinog radionuklida iz zida zapremine $V = \sum_{j=1}^{4} V_j$, izračunata je prema izrazu:

$$q = \frac{k\rho}{4\pi} \cdot \sum_{i=1}^{N} E_i Y(E_i) \left(\frac{\mu_{tr}(E_i)}{\rho} \right) \sum_{j=1}^{4} \left[I(E_i)_{j1} + I(E_i)_{j2} \right], \tag{3.4}$$

gde sumiranje po j označava sabiranje doprinosa četiri prizme (zapremine V_j), u kojima su izdvojene dve oblasti, j_1 i j_2. Konstanta k je parametar određen konverzijom jedinica, koji za veličine: q u (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), E_i u (MeV), ρ u (g/cm^3), V u (cm^3) i μ_{tr}/ρ u (cm^2/g), ima vrednost: $k = 5.767 \cdot 10^{-1}$. Doprinosi I_1 i I_2 u (3.4), za svaku prizmu, u ovoj disertaciji određeni su po jednačinama:

$$I_1(E_i) = \int_{\varphi=\varphi_{\max 1}}^{\varphi_{\max 2}} \int_{\theta=0}^{\theta_{\lim}(\varphi)} \int_{r=r_a(\theta)}^{r_{\max 1}(\theta)} B[\mu_m(E_i) r_m, E_i] \exp[-\mu_m(E_i) r_m - \mu_a(E_i) r_a] \sin\theta \, \mathrm{d}r \mathrm{d}\theta \mathrm{d}\varphi \,, \tag{3.5}$$

$$I_2(E_i) = \int_{\varphi=\varphi_{\max 1}}^{\varphi_{\max 2}} \int_{\theta=\theta_{\lim}(\varphi)}^{\theta_{\max}(\varphi)} \int_{r=r_a(\theta)}^{r_{\max 2}(\theta)} B[\mu_m(E_i) r_m, E_i] \exp[-\mu_m(E_i) r_m - \mu_a(E_i) r_a] \sin\theta \, \mathrm{d}r \mathrm{d}\theta \mathrm{d}\varphi \,, \tag{3.6}$$

u kojima je korigovan oblik integranda upotrebljen u referenci *Maduar and Hiromoto* (2004) (umesto tamošnje funkcije $\sec\theta$ ovde figuriše $\sin\theta$).

Redosled integracije u ovim jednačinama, tj. korišćenje ugla φ kao generičke promenljive, sugerisan je načinom podele zida (orijentacijom ravni podele). Naime, za određeni (bilo koji) ugao φ, tačkasti izvori pripadaju odgovarajućoj pravougaonoj površini (istaknutoj na Slici 3.1), čije ivice definišu intervale varijacije $\theta(\varphi)$ i r(θ) u jednačinama (3.5) i (3.6). Na osnovu geometrijskih odnosa, prikazanih na Slici 3.1, ove granice integracije, kao i u radu *Maduar and Hiromoto* (2004), predstavljene su sledećim izrazima:

$$\varphi_{\max 1} = \operatorname{arctg}\frac{-(L-b)}{a}, \varphi_{\max 2} = \operatorname{arctg}\frac{b}{a}; \theta_{\lim}(\varphi) = \operatorname{arctg}\frac{a}{(c+d)\cos\varphi}, \ \theta_{\max}(\varphi) = \operatorname{arctg}\frac{a}{c\cos\varphi};$$

$$r_a(\theta) = \frac{c}{\cos\theta}, \ r_{\max 1} = \frac{c+d}{\cos\theta}, \ r_{\max 2} = \frac{a}{\cos\varphi\sin\theta}, \tag{3.7}$$

u kojima rastojanja a, b i c definišu položaj tačke detekcije (koordinatnog početka) u odnosu na zid debljine d i dužine L (u pravcu b). U analogno izvedenim izrazima za granice integracije koje se odnose na oblast sledeće prizme, čiji trougao osnove ima visinu b (pod uglom 90º u odnosu na prikazanu prizmu), parametrima a i b zamenjena su mesta, a umesto dužine L koristi se podatak za visinu zida, H.

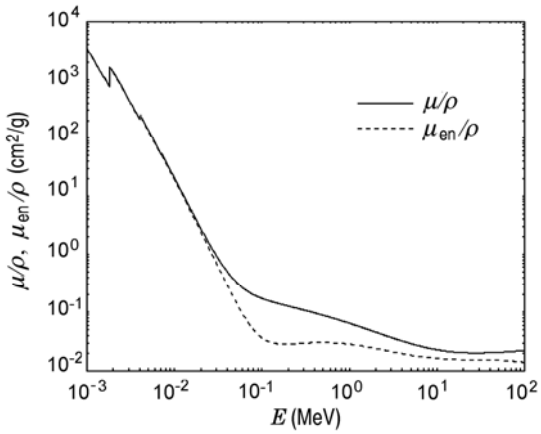
3.1.1.2. *Parametri izvora zračenja i apsorpcione sredine*

Hemijski sastav i gustina građevinskih materijala

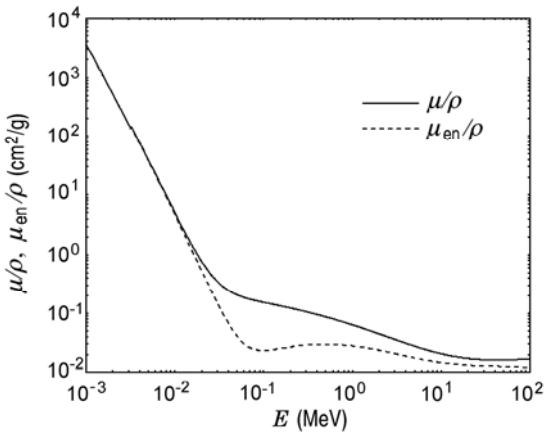
Proračuni specifičnih jačina apsorbovane doze u disertaciji izvršeni su za prostorije u kojima je pretpostavljeno korišćenje tri standardna građevinska materijala: betona, cigle i keramike (pločice). Standardni hemijski sastav i gustina ovih materijala – izvora gama zračenja prikazani su u Tabeli D.1, u kojoj su, takođe, navedene i vrednosti za vazduh - sredinu za koju se vrši proračun apsorbovane energije gama zraka. Podaci o hemijskom sastavu i gustini betona i vazduha uzeti su iz dokumenta *NBS* (*Hubbell* 1969), zbog toga što su oni korišćeni i u proračunu vrednosti faktora nagomilavanja, publikovanih u standardu *ANSI/ANS-6.4.3* (1991). Kako u ovoj referenci ne postoje podaci za ostala dva materijala, kao tipični hemijski sastav crvene cigle korišćen je standardni sastav, objavljen u *Corrosion and chemical resistant masonry materials handbook* (*Sheppard* 1986). Odgovarajući podaci za sastav keramike objavljeni su u radu *Turtiainen et al.* (2008). Radi upoređivanja rezultata disertacije sa publikovanim vrednostima za specifične jačine apsorbovane doze, za gustinu cigle uzeta je literaturna vrednost $\rho = 1.6$ g/cm^3 (*Beck* 1975, *Mustonen* 1984, *The Health Physics and Radiological Health Handbook* 1992), dok je za keramiku: $\rho = 2.5$ g/cm^3 (*Markkanen* 1995).

Energetske grupe

Nizovi prirodnih radionuklida, ^{238}U i ^{232}Th, emituju fotone velikog broja različitih energija, [649 energija za ^{238}U i 318 za ^{232}Th, prema *LBL* (2000)]. Radijativnim mehanizmima gubitka energije (*NIST* 2004), elektroni izračeni β raspadom radionuklida takođe doprinose polaznom spektru izvora gama zračenja (kontinuumom), ali za razmatrane materijale i energije elektrona (*The Health Physics and Radiological Health Handbook* 1992), ovaj doprinos može se zanemariti (kao i doprinos fluorescencije).



a) Beton



b) Vazduh

Slika 3.2. Koeficijenti slabljenja i apsorpcije energije za a) beton i b) vazduh (*NIST* 2004)

Kako su u intervalu (240 – 1800) keV koeficijenti slabljenja zračenja u građevinskim materijalima i u vazduhu, kao i koeficijent apsorpcije energije (transfera energije) u vazduhu, glatke funkcije energije [Slika 3.2. (*NIST* 2004)], za karakterizaciju izvora u ovom opsegu moguće je koristiti i manji broj grupa (*Markkanen* 1995). Naime, K (L, M, ...)- apsorpcione granice fotoefekta, gde se javljaju izraziti skokovi ovih veličina, za materijale sa malim atomskim brojem, nalaze se u oblasti niskih energija (nižih od 5 keV, *Abdel-Rahman and Podgorsak* 2010), koje su, kao zanemarljive, izuzete iz proračuna.

Zračenje prirodnih radionuklida, pri određivanju doze, najčešće se deli na 20 – 30 energetskih grupa (*Mustonen* 1984, *Close et al.* 1980), mada taj broj može biti znatno veći (*Turtiainen et al.* 2008, *Krstic and Nikezic* 2009) ili biti minimalan, kao u izračunavanjima *Markkanen*-a (1995). U ovoj studiji, naime, samo jedna energetska grupa pridružena je spektru ^{238}U, a dve spektru ^{232}Th.

Proračuni doza u ovoj disertaciji izvršeni su za gama linije spektara koje mogu značajnije doprineti vrednosti dozimetrijskih veličina, u opsegu energija do 2435 keV - za ^{238}U, tj. do 2615 keV - za ^{232}Th. Kao niskoenergetska granica, uzeta je vrednost 40 keV, ispod koje, prema *IAEA* (2003), fotoni pripadaju oblasti X- zračenja [zapravo, oblasti γ– i X- zračenja preklapaju se u intervalu od 10 keV do 100 keV (*Klewe-Nebenius* 2005)]. U izračunavanjima, korišćena je podela na energetske grupe koja je publikovana u radu *Mustonen-a* (1984), tako da je gama spektar ^{238}U podeljen je na 24 energetske grupe, a spektar ^{232}Th na 20, dok ^{40}K emituje samo jednu liniju na 1460.8 keV. Vrednosti energija energetskih grupa i odgovarajući gama prinosi (*Mustonen* 1984, *The Health Physics and Radiological Health Handbook* 1992, *Markkanen* 1995) prikazani su u Tabelama D.2.a)-c)

Koeficijent depozicije energije

U standardu *ANSI/ANS-6.4.3* (1991), izvor podataka za faktore nagomilavanja za *NBS* beton bili su proračuni izvršeni metodom momenata (*Eisenhauer and Simmons* 1975), u kojima su, kao mehanizmi stvaranja sekundarnih fotona u materijalu, bili uključeni *Compton*-ovo rasejanje i anihilacija pozitrona (u "mirovanju"), dobijenih u interakciji proizvodnje parova. Kako u proračunima *ANSI/ANS* faktora nagomilavanja za beton nije bio uključen efekt stvaranja i transporta zakočnog zračenja, odgovarajuća dozimetrijska veličina, koja se računa pomoću ovih faktora nagomilavanja je, zapravo, kerma vazduha (*Chilton et al.* 1984). Zato je u funkciji odziva u izrazu (2.9), kao koeficijent depozicije energije (μ_d/ρ), bilo potrebno koristiti koeficijent transfera energije, (μ_{tr}/ρ) (*Shultis and Faw* 2000, *Overcamp* 2009).

Preciznije razmatrano, u izračunavanjima *ANSI/ANS* faktora nagomilavanja, efekat ponovne apsorpcije i rasejanja sekundarnih fotona stvorenih fluorescencijom takođe je bio zanemaren, tj. fotoefekat je tretiran kao potpuno apsorbujući. Tako, odgovarajući koeficijent depozicije energije je tzv. pseudo koeficijent transfera energije (μ_{tr}/ρ)' (*Overcamp* 2009). Međutim, u oblasti energija zračenja nizova ^{238}U i ^{232}Th (kao i ^{40}K), vrednosti ovog koeficijenta mogu se zameniti vrednostima (μ_{tr}/ρ), za uobičajene građevinske materijale (*Chilton et al.* 1984).

Uopšte, u razmatranom opsegu energija, razlike između tri koeficijenta depozicije energije: (μ_{tr}/ρ)', (μ_{tr}/ρ) i (μ_{en}/ρ) - koeficijenta apsorpcije energije, za homogene materijale sa malim rednim brojem, mogu se zanemariti. Dakle, aproksimacija apsorbovane doze u vazduhu [za čiji proračun se koristi koeficijent (μ_{en}/ρ)] veličinom kerma vazduha [koja se računa pomoću (μ_{tr}/ρ)] je adekvatna, zbog zanemarljive proizvodnje zakočnog i fluorescentnog zračenja u građevinskim materijalima (pri uslovima ravnoteže naelektrisanih čestica) (*Takeuchi and Tanaka* 1985).

Koeficijenti depozicije energije, upotrebljeni pri izračunavanju faktora nagomilavanja metodom momenata (*Eisenhauer and Simmons* 1975), su koeficijenti transfera energije, publikovani u dokumentu *NBS* (*Hubbell* 1969). Za energetske grupe ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, ovi parametri za vazduh vrlo su bliski vrednostima koeficijenta apsorpcije energije u novijoj *NBS* (sada *NIST*) bazi podataka *NIST* (2004), prikazanim na Slici 3.2. Koeficijenti transfera energije, u ovoj disertaciji, izračunati su pomoću odgovarajućih tabeliranih vrednosti, korišćenjem *Lagrange*-ove interpolacije (2.23) (*Froberg* 1985) za veličine $\ln\frac{\mu_{tr}}{\rho}(E_i)$, po

logaritmima energije (kao i u radu *Maduar and Hiromoto* 2004). Tako, za *i*-tu energetsku grupu, E_i, $E_1 < E_i < E_2$, koeficijent transfera energije izračunat je iz izraza:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho}(E_i) = \frac{\mu_{tr}}{\rho}(E_1)\exp\left\{\ln\frac{\frac{\mu_{tr}}{\rho}(E_2)}{\frac{\mu_{tr}}{\rho}(E_1)}\cdot\frac{\ln\left(\frac{E}{E_1}\right)}{\ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right)}\right\}. \tag{3.8}$$

Linearni koeficijent slabljenja

U proračunima *ANSI/ANS* faktora nagomilavanja pretpostavljeno je *Compton*-ovo rasejanje na slobodnom elektronu, sa raspodelom verovatnoće datom *Klein-Nishina* formulom (*Knoll* 2000). Pošto je tako izostavljena korekcija u vidu funkcije nekoherentnog rasejanja (usled vezivanja elektrona u atomu), zanemareno je i *Rayleigh*-ovo (koherentno) rasejanje fotona (*Hubbell* 1969). Osim toga, doprinos koherentnog rasejanja slabljenju gama zračenja u materijalima sa malim atomskim brojem, u razmatranom opsegu energija ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, zanemarljiv je u odnosu na ostale doprinose (*Abdel-Rahman and Podgorsak* 2010). Zbog toga, za energije grupa korišćene u disertaciji [Tabele D.2.a)-c)], linearni koeficijenti slabljenja gama zračenja u istraživanim materijalima, određeni su na osnovu vrednosti koje su dobijene bez uračunavanja doprinosa koherentnog rasejanja.

U izračunavanju *ANSI/ANS* (1991) faktora nagomilavanja metodom momenata (*Eisenhauer and Simmons* 1975) korišćeni su koeficijenti slabljenja iz publikacije *NBS* (*Hubbell* 1969). Pored *Lagrange*-ove interpolacije *NBS* podataka, po jednačini analognoj izrazu (3.8), koeficijenti slabljenja za beton u disertaciji su određeni i pomoću programa *XCOM* (*Berger et al.* 2010). Ovom bazom podataka koeficijenti slabljenja dobijaju se na pogodan način, specificiranjem sastava smeše (ili jedinjenja) i energije za koju treba dobiti vrednost μ. Za navedenu operaciju, program *XCOM* u osnovi primenjuje "pravilo smeše" (*Hubbell* 1969), po kome se koeficijent slabljenja kompozita, μ/ρ, približno računa pomoću koeficijenata slabljenja sastavnih elemenata, $(\mu/\rho)_i$, prema težinskim masenim udelima, n_i, po formuli: $\frac{\mu}{\rho} = \sum_i n_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ (*Hubbell* 1969, *Bashter* 1997, *NIST* 2004). Vrednosti koeficijenata slabljenja za beton, dobijene pomoću *NBS* i *XCOM* baza podataka, ne razlikuju se značajno u širokom opsegu energija zračenja ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K (osim za najniže energije). Konsekventno, za standardnu prostoriju (beton), specifične apsorbovane doze, izračunate korišćenjem *NBS* i *XCOM* baza podataka za koeficijente slabljenja, prikazane sa tri značajne cifre, su identične (tj. razlikuju se za manje od 0.1%). Zato su i koeficijenti slabljenja za ciglu i keramiku [prikazani u Tabelama D.2.a)-c)], koji su korišćeni za proračune u disertaciji, za navedene sastave ovih materijala (Tabela D.1), određeni direktno, primenom programa *XCOM* (*Berger et al.* 2010).

3.1.1.3. *Parametri faktora nagomilavanja*

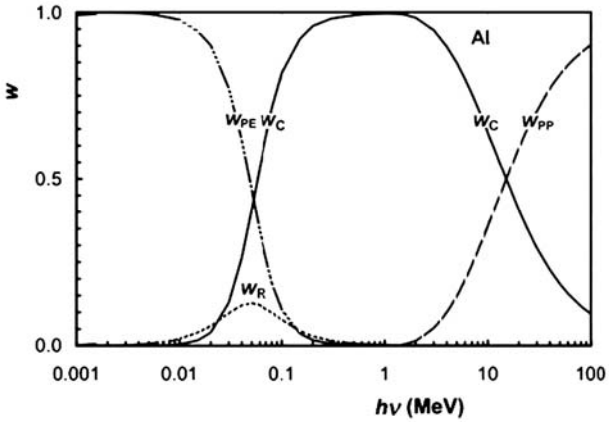
Interpolacija po atomskom broju. Ekvivalentni atomski broj

Pri transferu γ-zračenja u kompozitnim građevinskim materijalima (sastavljenim od elemenata različitih *Z*), u oblasti energija ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, događaju se sva tri glavna mehanizma slabljenja (Slika 3.3, aproksimativno). Zato je, za ove materijale, efikasni presek za *Compton*-ovo rasejanje fotona izražen pomoću ekvivalentnog atomskog broja, Z_{eq}, koji zavisi od

energije (*Hine* 1952, *Brar and Mudahar* 1996, *Singh et al*. 2010, *Manohara et al.* 2010, *Sidhu et al.* 2012).

Ekvivalentni atomski broj, Z_{eq}, za određeni građevinski materijal, u ovoj disertaciji je izračunat po *Goldstein and Wilkins* (1954) metodu, tako što je pomoću programa *XCOM* (2010), na osnovu zadatog sastava građevinskog materijala, određen udeo *Compton*-ovog efekta u ukupnom koeficijentu slabljenja, tj. parametar $R = (\mu/\rho)_C/(\mu/\rho)_t$ u izrazu (2.24), za sve energetske grupe radionuklida. Korišćenjem ovog programa, dobijene su i odgovarajuće vrednosti R_1 i R_2 za elemente u opsegu atomskih brojeva $10 < Z < 20$, u kome su očekivane vrednosti Z_{eq} za materijale u disertaciji. Naime, u ovom intervalu Z nalaze se vrednosti Z_{eq} za najveći broj stena i minerala, konstituenata građevinskih materijala (*IAEA* 2003). Proračun je zatim izvršen pomoću formule (2.24), uzimanjem susednih R_1 i R_2 (i odgovarajućih Z_1 i Z_2), za koje je: $R_1 < R < R_2$.

Vrednosti Z_{eq} za ciglu i keramiku (keramičke pločice), određene u disertaciji, prikazane su u Tabelama D.3.a) i D.4.a). Obzirom da su vrednosti (G-P) parametara faktora nagomilavanja za beton tabelirane u *ANSI/ANS*, nije bilo potrebe računati Z_{eq} za ovaj materijal [osim toga, vrednosti Z_{eq} za *NBS* (*Hubbell* 1969) sastav betona publikovane su u radu *Harima et al.* (1991), kao i u radu *Mann et al.* (2012)]. Uočava se da Z_{eq} za ciglu, kao i keramiku, ne varira u velikoj meri sa porastom energije, što je i karakteristično za materijale sa malim ekvivalentnim atomskim brojem (u koje spadaju građevinski materijali), u oblasti gama energija ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K. Naime, u ovoj oblasti energija, za hemijske elemente u pomenutim materijalima (Tabela D.1), *Compton*-ovo rasejanje je dominantan mehanizam slabljenja [na 2.5 MeV, doprinos proizvodnje parova slabljenju gama zračenja u betonu je 4 % *Compton*-ove komponente (*Cave et al.* 1950)] i Z_{eq} je približno konstanatan (*Manohara et al.* 2008). Na ovo ukazuje i oblik raspodele parametra $w_C(E)$ [udeo *Compton*-ovog rasejanja u slabljenju, $w_C = (\mu/\rho)_C/(\mu/\rho)_t$], prikazan za $_{13}$Al na Slici 3.3 (*Abdel-Rahman and Podgorsak* 2010), koja ilustruje ovu zavisnost za sva tri materijala (beton, ciglu i keramiku), pošto je $Z_{Al} \approx Z_{eq}$. Uočava se široka raspodela $w_C(E)$, sa $w_C \geq 0.9$ u oblasti energija od približno 100 keV do oko 4 MeV [za: 240 keV < E < 1800 keV, $w_C \geq 0.99$ (*XCOM* 2010)].



Slika 3.3. Raspodela udela pojedinih mehanizama slabljenja zračenja u Al, u zavisnosti od energije fotona; w_{PE}, w_R, w_C, w_{PP} su udeli: fotoefekta, *Rayleigh*-ovog rasejanja, *Compton*-ovog rasejanja i proizvodnje parova, respektivno (*Abdel-Rahman and Podgorsak* 2010)

Za materijal sa ekvivalentnim atomskim brojem Z_{eq}, (G-P) parametri faktora nagomilavanja izračunati su interpolacijom po logaritmu atomskog broja, prema formuli (2.25). Vrednosti parametara a, b, c, d i X_K, izračunate u disertaciji za ciglu i keramiku za standardne energije [za koje su u *ANSI/ANS-6.4.3* (1991) navedeni podaci za faktore nagomilavanja i njihove parametre, koji odgovaraju hemijskim elementima i smešama], date su u Tabelama D.3.a) i D.4.a), respektivno. Na osnovu ovih parametara, izračunati su i odgovarajući faktori nagomilavanja izlaganja, za standardne vrednosti mfp [korišćene u *ANSI/ANS-6.4.3* (1991) dokumentu], koji su prikazani u Tabelama D.3.b) (crvena cigla) i D.4.b) (keramika).

Interpolacija po energiji

U ovoj disertaciji, (G-P) parametri: a, b, c, d i X_K, u izrazu (2.22), za energetske grupe ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunati su po interpolacionoj formuli (2.26), na osnovu (G-P) parametara za odgovarajuće susedne energije, koji su publikovani u *ANSI/ANS* standardu. Vrednosti (G-P) parametara za energije primordijalnih radionuklida, određene za *NBS* beton, crvenu ciglu i keramiku, prikazane su Tabelama D.5, D.6. i D.7, a) - c), respektivno. Parametri za ciglu i keramičke pločice izračunati su nakon interpolacije po atomskom broju.

Ekstrapolacija po mfp

Pri izračunavanju doprinosa specifičnoj jačini apsorbovane doze nekoliko najnižih energetskih grupa ^{238}U i ^{232}Th [Tabele D.2.a),b)], u izrazu za faktor nagomilavanja (2.15) primenjena je formula (2.27). Naime, iako je najveća debljina zidova prostorija za koje su vršeni proračuni iznosila 50 cm, u nekim slučajevima, rastojanje koje prelazi gama kvant u građevinskom materijalu (u pitanju je, naravno, direktan zrak) bilo je veće od odgovarajuće vrednosti 40 mfp. Maksimalni put gama kvanta ostvaren je za položaj tačke detekcije (200, 150, 0) (uzimajući centar prostorije za početak koordinatnog sistema), kod proračuna raspodele specifičnih doza u standardnoj prostoriji ($r \approx 136$ cm). U ovom slučaju, za prve 3 energetske grupe oba niza, ^{238}U i ^{232}Th, važi: $\mu_i r > 40$. Kako su u disertaciji, za dobijanje novog funkcionalnog oblika, izvršeni proračuni faktora nagomilavanja i specifičnih apsorbovanih doza do nešto većeg rastojanja, 150 cm, formula (2.27) korišćena je pri proračunu doprinosa prve 4 energetske grupe ^{238}U i prvih 5 energetskih grupa ^{232}Th, jer je za njih, počev od izvesnih vrednosti r $(40/\mu_i)$, bilo ispunjeno: $\mu_i r > 40$.

Faktor nagomilavanja za kombinaciju slojeva materijala

Proračuni specifičnih jačina apsorbovane doze, osim za prostorije sa samo jednim građevinskim materijalom, izvršeni su i za prostorije u kojima je upotrebljena kombinacija slojeva dva materijala. Specifične jačine apsorbovane doze usled zračenja ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunate su za dva slučaja kombinacije slojeva građevinskih materijala: beton – keramičke pločice i cigla – keramika.

U proračunu doze od prvog sloja, za kombinaciju beton – keramičke pločice, korišćen je faktor nagomilavanja izlaganja, B_k, dat formulom *Kalos*-a (2.28.a), kao i njenim preciznijim oblikom (2.29.a). Naime, ekvivalentni atomski broj, Z_1, za prvi sloj - beton *NBS* sastava (*Hubbell* 1969), prikazan u radu *Mann et al.* (2012), u celom opsegu energija radionuklida, veći je od odgovarajućih vrednosti Z_2, određenih u disertaciji za drugi sloj – keramičke pločice. Analogno, za kombinaciju cigla – keramičke pločice, gde važi: $Z_1 < Z_2$ [Tabele D.3.a), D.4.a)], u izračunavanju doze koja potiče od prvog sloja, kao odgovarajući oblik faktora nagomilavanja primenjen je izraz (2.28.b) i (2.29.b), a radi upoređivanja, upotrebljena je i jednostavna forma (2.28.a).

3.1.1.4. *Faktor nagomilavanja za niz radionuklida. Doza niza radionuklida*

Primenom (G-P) oblika faktora nagomilavanja, proračun jačine apsorbovane doze koja potiče od gama zračenja određene energije (metodom opisanim u glavi 2), podrazumeva numeričku integraciju složenih izraza, koja zahteva određeno vreme računara za obavljanje potrebnih operacija. Kada se, radi preciznijeg definisanja spekra radionuklida, koristi veći broj energetskih grupa, i/ili se, radi izvođenja odgovarajuće funkcionalne zavisnosti, izračunavanje jačine doze vrši za varijabilne kombinacije parametara proračuna, utrošak vremena postaje veliki.

Odgovarajućim parametarskim oblikom faktora nagomilavanja, koji se, osim toga, odnosi na spektar celog niza datog primarnog - primordijalnog radionuklida (ne samo na pojedine energije emisije), proračun se može znatno pojednostaviti (ubrzati). Da bi se zadržala tačnost izračunavanja koja se dobija primenom *Harima* formule (*Harima* 1993), jednostavniji funkcionalni oblik faktora nagomilavanja za niz radionuklida, izveden u ovoj disertaciji, određen je na osnovu (G-P) formule (sa *ANSI/ANS* parametrima) za faktore nagomilavanja za pojedine energetske grupe.

Iako je, u parametarskim oblicima, faktor nagomilavanja izražen u vidu funkcije broja μr (mfp, za datu energiju fotona), u slučaju homogene sredine, kakvu pretpostavlja *point kernel* metod, ova zavisnost, zapravo, ekvivalentna je funkciji rastojanja izvora od tačke detekcije, r. Tako, u skladu s definicijom faktora nagomilavanja (*Shultis and Faw* 2000), faktor nagomilavanja za primarni radionuklid, $B(r)$ [$B(r) = B_U(r)$, $B_{Th}(r)$ ili $B_K(r)$] može biti predstavljen u vidu:

$$B(r) = \frac{\dot{D}(r)}{\dot{D}_0(r)} = \frac{\sum_i \dot{D}(r,E_i)}{\sum_i \dot{D}_0(r,E_i)} = \frac{\sum_i B(r,E_i)\dot{D}_0(r,E_i)}{\sum_i \dot{D}_0(r,E_i)} . \tag{3.9}$$

U ovom izrazu, $\dot{D}_0(r,E_i)$ predstavlja jačinu doze direktnog zračenja za energetsku grupu E_i (datu jednačinom 2.17), a $\dot{D}(r,E_i)$ je odgovarajuća ukupna jačina doze tačkastog izvora.

Uobičajeni način proračuna jačine doze koja potiče od volumetrijskog izvora, po *point kernel* metodu, je integracija doze tačkastih izvora po zapremini za svaku energiju emisije, a zatim, sumiranje zapreminskih doprinosa na pojedinim energijama (*Shultis and Faw* 2005). Međutim, kako je opseg ove integracije isti za sve energije (zbog korišćenja zavisnosti od r, a ne od broja mfp), redosled obavljanja operacija sumiranja i integracije može se izmeniti, tj:

$$\begin{aligned}\dot{D}(V) &= \sum_i \int_V B(r,E_i)\dot{D}_0(r,E_i)\mathrm{d}V = \int_V \sum_i B(r,E_i)\dot{D}_0(r,E_i)\mathrm{d}V \\ &= \int_V B(r)\sum_i \dot{D}_0(r,E_i)\mathrm{d}V = \int_V \dot{D}(r)\mathrm{d}V\end{aligned} . \tag{3.10}$$

Dakle, faktor nagomilavanja za niz radionuklida, primenljiv u izračunavanju jačine doze zapreminskog izvora, koristan je ukoliko se fitovanjem rezultata dobijenih izrazom (3.9) može dobiti funkcionalni oblik $B(r)$ pogodan za integraciju u jednačini (3.10).

Jednačina (3.10) uključuje, međutim, i sumiranje "direktnih" doza koje potiču od pojedinih E_i, tako da dalje pojednostavljenje proračuna jačine doze, eliminisanjem potrebe korišćenja parametara energetskih grupa, podrazumeva nalaženje i odgovarajućeg funkcionalnog oblika za "direktnu" dozu niza, $\dot{D}_0(r) = \sum_i \dot{D}_0(r,E_i)$. Raspodela jačine doze, $\dot{D}(r)$ [$\dot{D}(r)\mathrm{d}V$ je jačina doze koja potiče od tačkastog izvora zapremine dV], izražava se, u ovom slučaju, preko proizvoda dve fitujuće funkcije [$B(r)$ i $\dot{D}_0(r)$]. Drugi, direktan način, kojim je u ovoj

disertaciji dobijena funkcija $\dot{D}(r)$, je fitovanje integranda u jednačini (3.10), korišćenjem koncepta faktora nagomilavanja za niz radionuklida. Sva prethodna razmatranja u vezi $\dot{D}(r)$ [$\dot{D}(r) = \dot{D}_{\mathrm{U}}(r)$, $\dot{D}_{\mathrm{Th}}(r)$ ili $\dot{D}_{\mathrm{K}}(r)$], odnose se, naravno, i na raspodelu specifičnih jačina apsorbovane doze, $q(r)$ [$q(r) = q_{\mathrm{U}}(r)$, $q_{\mathrm{Th}}(r)$ ili $q_{\mathrm{K}}(r)$].

3.1.2. Ekvivalentna i efektivna doza

Prema metodu proračuna u disertaciji, apsorbovana doza u prostoriji predstavlja veličinu kerma vazduha *free in air*, jer je računata u polju zračenja radionuklida, koje nije perturbovano prisustvom tela (fantoma). Primenom konverzionih koeficijenata: kerma vazduha *free in air* → ekvivalentna doza, publikovanih za određene energije fotona (*ICRP* 1996, *ICRU* 1998, *Lee et al.* 2007), izračunate su ekvivalentne doze za pojedine organe i tkiva, aritmetički usrednjene za ženski i muški antropomorfni fantom [matematički ORNL model (*Kramer et al.* 1982)]. U proračunu su korišćeni koeficijenti koji se odnose na izotropnu geometriju polja (ISO), kojom je u ovoj disertaciji, kao u referenci *Al-Jundi et al.* (2009), simulirana geometrija polja gama zračenja u prostoriji ["telo uronjeno u oblak radioaktivnog gasa" (*Paretzke and Petoussi-Henss* 2005)].

U idealno izotropnoj geometriji polja gama zračenja, nema specificirane lokacije na koju se odnosi kerma vazduha *free in air*, jer je fluks fotona u polju invarijantan u odnosu na poziciju tačke detekcije (*Zankl et al.* 1997). Za divergentne tačkaste izvore, međutim, određuje se kerma vazduha na visini 1 m iznad tla (mereno duž longitudinalne ose tela), usrednjena po zapremini sfere poluprečnika 10 cm (*Saito et al.* 1998, *Conti et al.* 1999, *Krstic and Nikezic* 2010). Kako polje gama zračenja u prostoriji nije idealno izotropno (zbog geometrije izvora), koeficijenti konverzije u disertaciji proračunati su u odnosu na vrednost kerma vazduha u centru prostorije, usrednjene po sferi poluprečnika 10 cm. Ova vrednost, za jediničnu aktivnost datog radionuklida, $\overline{q}$ $(\overline{q} = \overline{q}_U, \overline{q}_{Th}$ ili $\overline{q}_K)$, dobijena je integracijom po položaju tačke detekcije, (x, y, z), tj:

$$\overline{q} = \frac{1}{V_0} \int_{-R}^{R} \int_{-(R^2-z^2)^{1/2}}^{(R^2-z^2)^{1/2}} \int_{-(R^2-y^2-z^2)^{1/2}}^{(R^2-y^2-z^2)^{1/2}} q(x, y, z)\,dx\,dy\,dz \ , \tag{3.11}$$

gde je V_0 zapremina sfere vazduha. Funkcija $q(x, y, z)$ data je jednačinom (3.4), u kojoj doprinosi I_1 i I_2 zavise od x, y, z, posredstvom zavisnosti granica integracije [u (3.5) i (3.6), respektivno] od parametara $a(x, y, z)$, $b(x, y, z)$ i $c(x, y, z)$ (Slika 3.1), različito definisanih za 24 prizme kojima je modelovan izvor zračenja u prostoriji.

Konverzioni koeficijenti za pojedine energetske grupe ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, dobijeni su *Lagrange*-ovom interpolacijom odgovarajućih ISO vrednosti, izračunatih *Monte Carlo* metodom u radu *Zankl et al.* (1997). U ovoj studiji, ekvivalentna doza [jednaka srednjoj apsorbovanoj dozi u tkivu, radijacioni težinski faktor fotonskog zračenja, w_γ, jednak je 1 (*ICRP* 1991, 2007)] izračunata je u kerma aproksimaciji, tj. bez razmatranja transporta sekundarnih elektrona. Umerena neravnoteža naelektrisanih čestica na graničnim površinama tkivo-kost (u slučajevima crvene koštane srži i tkiva površine kosti), koja ima efekat povećanja deponovane energije zračenja u tkivu, uzeta je u obzir preko odgovarajućih korekcionih faktora (*Zankl et al.* 1997).

Za pojedine organe i tkiva koji figurišu u novijoj *ICRP* (2007) publikaciji, koji nisu obuhvaćeni proračunom u radu *Zankl et al.* (1997), konverzioni koeficijenti su određeni interpolacijom ISO vrednosti, izračunatih u radu *Lee et al.* (2007) za inovirani ORNL fantom

(*Han et al.* 2006). Za tkiva ostatka: ekstratoraksni region i oralnu mukozu, ovi podaci nisu bili dostupni, tako da su konverzioni koeficijenti za "ostatak" procenjeni na osnovu vrednosti za ostalih 12 organa i tkiva. Takođe, kao i u radu *Lee et al.* (2007), usled nedostatka podataka, ekvivalentna doza za limfatične čvorove aproksimirana je vrednošću izračunatom za mišiće.

Na osnovu proračunatih ekvivalentnih doza, u ovoj disertaciji određeni su konverzioni koeficijenti: kerma vazduha *free in air* → ekvivalentna doza, za zračenje radionuklida (nizova) u prostoriji. Korišćenjem vrednosti težinskih faktora w_T za organe i tkiva (Glava 2), koje su publikovane u *ICRP* (2007), dobijeni su, zatim, i odgovarajući konverzioni koeficijenti za efektivnu dozu, kao i sama efektivna doza.

3.1.3. Operacione dozimetrijske veličine

3.1.3.1. *Ambijentalni dozni ekvivalent*

Proračun ambijentalnog doznog ekvivalenta, $H^*(10)$, podrazumeva izlaganje *ICRU* sfere "širokom" polju, jednakim polju u razmatranoj tački, kao i ozračivanje sfere iz jednog pravca (*ICRU* 1993), što se može postići modelovanjem izvora ekvivalentnim ravanskim izvorom čije polje ne zavisi od rastojanja tačke detekcije. "Upravljanje" (usmeravanje) polja, kojim se eliminiše njegova angularna zavisnost, vrši se sabiranjem doprinosa fluksa po svim pravcima realnog ozračivanja date tačke (1 cm ispod površine *ICRU* sfere) (*Deitze* 2005).

Izračunavanje $H^*(10)$ koji, za modelovano polje, u suštini predstavlja apsorbovanu dozu u specificiranoj tački [zbog niskog *LET*-a, $Q_\gamma = 1$ (*Eckerman and Ryman* 1993)], uključuje određivanje raspodele fluksa fotona, $\Phi(E)$, u datoj tački, uobičajeno pomoću *Monte Carlo* simulacija (*ICRU* 1992). Kako metod faktora nagomilavanja, primenjen za izračunavanja u ovoj disertaciji, nije omogućavao nalaženje raspodele $\Phi(E)$, proračuni su bazirani na vrednostima faktora nagomilavanja izlaganja i apsorpcije energije, publikovanim u *ANSI/ANS-6.4.3* (1991). Pritom, da bi osim u zapremini izvora – građevinskog materijala, bilo uzeto u obzir rasejanje fotona i u oblasti *ICRU* tkiva, faktor nagomilavanja u jednačini (3.2), primenjenoj i u proračunu $H^*(10)$, aproksimiran je faktorom nagomilavanja kombinacije odvojenih slojeva, tj:

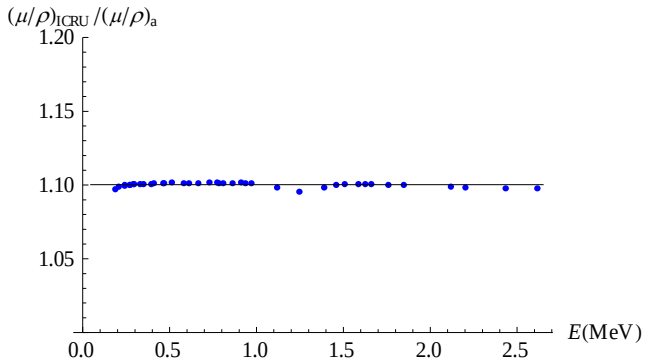
$$B_k(r_\mathrm{m}, r_\mathrm{t}) = B_1(r_\mathrm{m}) B_2(r_\mathrm{t}) . \tag{3.12}$$

U ovom izrazu, B_1 označava faktor nagomilavanja izlaganja za građevinski materijal, B_2 je faktor nagomilavanja apsorpcije energije za *ICRU* tkivo, dok r_t predstavlja put koji direktno zračenje prelazi u *ICRU* sferi.

Slabljenje zračenja u oblasti *ICRU* sfere uračunato je dodatnim članom, $-\mu_t r_t$, u eksponentu podintegralne funkcije u (3.2). Pritom, linearni koeficijent slabljenja, μ_t, koji odgovara hemijskom sastavu *ICRU* tkiva, za energetske grupe radionuklida, dobijen je korišćenjem programa *XCOM* (2010).

Primenjeni metod, koji podrazumeva zamenu koeficijenta apsorpcije (transfera) energije vazduha u izrazu (3.2), koeficijentom apsorpcije energije za *ICRU* tkivo, korektan je u slučaju njihove linearne zavisnosti: $(\mu/\rho)_{\mathrm{ICRU}}(E) = k_{\mathrm{Ia}}\,(\mu/\rho)_{\mathrm{a}}(E)$, gde k_{Ia} ne zavisi od energije gama zračenja. Tada se, naime, jednostavnim izdvajanjem k_{Ia} iz podintegralne funkcije izraza (2.15), pri proračunu faktora nagomilavanja apsorbovane doze u tkivu, dobija odgovarajući faktor nagomilavanja izlaganja [podrazumevajući, naravno, kerma aproksimaciju i zanemarujući neznatne razlike u faktorima nagomilavanja izlaganja (takođe izračunatih u disertaciji) i apsorpcije energije za tkivo]. Na Slici 3.4. prikazana je zavisnost količnika koeficijenata (μ/ρ) (za *ICRU* tkivo i vazduh) od energije, za energetske grupe ^{238}U, ^{232}Th i

^{40}K, koja, očigledno ispunjava traženi uslov, jer se, za energije veće od 150 keV, fituje pravom k_{Ia} = 1.1, uz koeficijent determinisanosti R^2 =0.999998.



Slika 3.4. Odnos koeficijenata $(\mu/\rho)_{en}$ za *ICRU* tkivo i vazduh za energije ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K

Vrednosti $(\mu/\rho)_{ICRU}(E)$ izračunate su *Lagrange*-ovom interpolacijom podataka za *ICRU* tkivo, publikovanih u *ANSI/ANS* (1991), po formuli (3.8). Parametri faktora nagomilavanja apsorpcije energije, za hemijski sastav *ICRU* tkiva, određeni su interpolacijom po atomskom broju i energiji, uz prethodni proračun ekvivalentnog atomskog broja, Z_{eq}. Izračunate vrednosti Z_{eq}, parametara (G-P) forme faktora nagomilavanja apsorpcije energije, kao i faktora nagomilavanja za standardna diskretna rastojanja (u mfp) i energije gama zračenja, prikazane su u Tabelama D.8.a),b). U Tabeli D.9.a)-c) dati su (G-P) parametri faktora nagomilavanja, izračunati za energetske grupe ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, korišćeni u proračunu $H^*(10)$.

Obzirom na izotropnu geometriju, kojom se mogu aproksimirati uslovi izlaganja u prostoriji, određivanje $H^*(10)$ u ovoj disertaciji nije vršeno usmeravanjem polja [integracijom $\Phi(E,\vec{\Omega})$ po svim pravcima] za specificiranu tačku, već je, kao pogodan način računanja, izabrana integracija doze po svim ekvivalentnim tačkama (sfernoj površini poluprečnika r_I = 14 cm, unutar *ICRU* sfere). Pritom, za svaku tačku na "unutrašnjoj sferi", razmotren je doprinos samo onih izvora čiji vektor položaja, $\vec{r}_s$, sadrži radijus vektor *ICRU* sfere koji prolazi kroz posmatranu tačku. Ovim pristupom (u suštini - usrednjavanjem) obezbeđuje se potpuna izotropnost apsorbovane doze (geometrija realnog polja nije idealno izotropna), potrebna za nezavisni odziv idealnog detektora u slobodnom prostoru - prostoriji [čije očitavanje je $H^*(10)$]. Model je takođe adekvatan uzevši u obzir (simultano) i uslove širokog ("proširenog") polja i ozračivanja tačke na dubini 1 cm samo iz jednog pravca, u smeru suprotnom radijus vektoru *ICRU* sfere.

Iako je pretpostavljeno polje homogeno, lokalna apsorbovana doza (dozni ekvivalent, *H*) nije identična u tačkama na površini unutrašnje sfere (r_I = 14 cm), za paralelni snop fotona iz određenog, bilo kog pravca, zbog varijacija u slabljenju i nagomilavanju zračenja u *ICRU* tkivu. Kako metod proračuna u ovoj disertaciji omogućava, zapravo, izračunavanje doze (a ne fluksa), usmeravanje i proširenje polja uključivalo je i otežinjavanje doze u tački (na dubini 1 cm u *ICRU* sferi) različitim doprinosom slabljenja i nagomilavanja. Zbog toga, za r_t nije korišćena vrednost 1 cm, već rastojanje koje fotoni iz specificiranog pravca (paralelni zraci) prelaze u *ICRU* sferi, do tačke prvog preseka sa unutrašnjom sferom, gde je, približno, projekcija r_t na pravac odgovarajućeg radijus vektora jednaka 1 cm (radi upoređivanja, u disertaciji su izvršena izračunavanja i za r_t = 1 cm).

Kako je usrednjavanje rezultata, integracijom po svim mogućim pravcima ozračivanja, podrazumevalo značajni utrošak kompjuterskog vremena, proračun $H^*(10)$ izvršen je za jedan odabrani pravac paralelnog snopa (pravac z – ose, za određeni zid), uz aproksimaciju izotropnosti ovog polja. Zbog specifiranja pravca zračenja (samo za određivanje r_t), doza više nije invarijantna u odnosu na rotaciju koordinatnog sistema, što je pri proračunu doprinosa različitih zidova, kao i prizmi u okviru njih, uzeto u obzir odgovarajućim izrazima za r_t (cm): $1/\sin\theta\cos\varphi$, $1/\sin\theta\sin\varphi$, $1/\cos\theta$ (pravac zračenja poklapa se sa x-, y-, z- osom, respektivno).

Zbog oblika geometrijskog fantoma (ploča), određivanje *personalnog doznog ekvivalenta* metodom faktora nagomilavanja, ne može se izvršiti na tako pogodan način kao izračunavanje $H^*(10)$, jer tačke na istom rastojanju od površine fantoma nisu ekvivalentne. Međutim, pokazano je (*Veinot and Hertel* 2010) da oblik fantoma nema znatniji uticaj na vrednost ove veličine za prodorno zračenje, tako da se $H_p(10)$ za ploču može aproksimirati vrednošću za sferu, što je upravo veličina $H^*(10)$.

3.1.3.2. *Dozni ekvivalent – apsorbovana doza u tački*

Za upoređivanje sa rezultatima proračuna idealizovane veličine $H^*(10)$, u ovoj disertaciji određen je i dozni ekvivalent, kvantitativno jednak stvarnoj apsorbovanoj dozi na određenom položaju u organu (tkivu), modelovanom *ICRU* sferom, gde je, kao i u slučaju $H^*(10)$, odabrana tačka detekcije na udaljenosti 1 cm od površine sfere. Primenjen je opisani koncept proračuna apsorbovane doze, koristeći kao i za $H^*(10)$, faktor nagomilavanja kombinacije slojeva, po izrazu 3.12. Rastojanje koje direktan zrak prelazi u *ICRU* tkivu na putu do tačke detekcije, izabrane za početak koordinatnog sistema, određeno je jednačinama sfere i vektora položaja izvora $\vec{r}_s$, tako da se računa po izrazu:

$$\begin{aligned} r_t(\theta,\varphi) &= -(x_I \sin\theta\cos\varphi + y_I \sin\theta\sin\varphi + z_I \cos\theta) + \\ &[R_I^{\,2} - (x_I^{\,2} + y_I^{\,2} + z_I^{\,2}) + (x_I \sin\theta\cos\varphi + y_I \sin\theta\sin\varphi + z_I \cos\theta)^2]^{1/2}, \end{aligned} \tag{3.13}$$

gde x_I, y_I, z_I označavaju koordinate centra *ICRU* sfere (poluprečnika R_I = 15 cm), u odnosu na izabrani položaj tačke detekcije, takve da važi: $x_I^2 + y_I^2 + z_I^2 = r_I^2$, r_I = 14 cm .

U zavisnosti od orijentacije koordinatnog sistema pridruženog svakom zidu na način prikazan na Slici 3.1 (tačka detekcije je početak svakog od njih – sistem se samo rotira pri prelasku na naredni zid), centar sfere, lociran u centru prostorije, definisan je različitim koordinatama. U preciziranju koordinata x_I, y_I, z_I, takođe je uzeta u obzir rotacija koordinatnog sistema, koju podrazumeva proračun doze za različite prizme – delove istog zida, kao i smer osa (+ ili -), uračunat deljenjenjem opsega integracije u jednačinama 3.5. i 3.6. po uglu φ [(φ_{max1}, 0) i (0, φ_{max2})] za određene prizme.

3.1.3.3. *Efektivni dozni ekvivalent za ICRU sferu*

Vrednost $H^*(10)$ treba da obezbedi konzervativnu procenu efektivne doze za slučaj prodornog zračenja (*Shultis and Faw* 2005). Kako je u disertaciji efektivna doza izračunata samo na osnovu interpoliranih konverzionih koeficijenata – rezultata proračuna drugim metodima (*Zankl et al.* 1997, *Lee et al.* 2007), vrednost ambijentalnog doznog ekvivalenta upoređena je sa srednjom vrednošću apsorbovane doze u *ICRU* sferi. Ova veličina, za fotonsko zračenje, jednaka je efektivnom doznom ekvivalentu (*ICRP* 1977), kao i efektivnoj dozi za telo modelovano geometrijskim fantomom – *ICRU* sferom, pošto, kao jedinom u sferi, *ICRU* tkivu odgovara tkivni težinski faktor 1 (*ICRP* 1991).

Proračun je izvršen integracijom doze po svim položajima tačke detekcije u *ICRU* sferi, prema izrazu analognom (3.11). Za razliku od proračuna doze u vazduhu, gde nije bilo

potrebe izdvajati deo trajektorije fotona u sferi od preostalog puta u vazduhu, izračunavanje doze u *ICRU* sferi podrazumevalo je preciziranje r_t, potrebno za određivanje slabljenja i faktora nagomilavanja apsorpcije energije, kao u slučaju $H^*(10)$ i apsorbovane doze u tački. Zbog obimnosti izračunavanja pri integraciji doze tačkastog izvora po 6 promenljivih, složeni (G-P) oblik faktora nagomilavanja zamenjen je odgovarajućim fitujućim funkcijama, dobijenim prethodnim određivanjem zavisnosti faktora nagomilavanja od rastojanja u tkivu (i betonu), za svaku energetsku grupu ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K.

Izračunate vrednosti operacionih veličina za prostoriju, odnose se na jediničnu koncentraciju aktivnosti radionuklida u građevinskom materijalu - *NBS* betonu. Za sve operacione veličine, određeni su i odgovarajući konverzioni koeficijenti, u odnosu na kerma vazduha *free in air*, za energije zračenja radionuklida (tj. energetske grupe), kao i za standardne vrednosti energija.

3.1.4. Korišćeni kompjuterski programi

Proračun specifičnih jačina apsorbovane doze, ambijentalnog doznog ekvivalenta i drugih dozimetrijskih veličina prema opisanim metodima, u ovoj disertaciji izvršen je pomoću kompjuterskih programa, sastavljenih korišćenjem modularnog softverskog sistema *Wolfram Mathematica*®8. Za izračunavanje integrala, datih u opštem slučaju jednačinama (3.2), (3.5) i (3.6), koji nisu mogli biti analitički rešeni, u određenom programu primenjena je numerička integracija. Ovu operaciju odgovarajući algoritam u *Mathematica*8 obavlja "semplovanjem" datog integranda u sukcesivno manjim intervalima, do postizanja tražene preciznosti. U numeričkoj integraciji, radna preciznost podrazumevala je mašinsku preciznost, a rezultat je saopštavan sa ciljnom preciznošću od 6 značajnih cifara (*Mathematica*8 2010).

Sva ostala izračunavanja u ovoj disertaciji, uključujući interpolacije parametara i fitovanja zavisnosti skupova podataka pretpostavljenim parametarskim modelima (prema modelu najmanjih kvadrata, opcijom "NonlinearModelFit" dobijaju se parametri najboljeg fita), obavljena su, takođe, pomoću programa u *Mathematica*8. Programi korišćeni za određivanje q_U, q_{Th} i q_K podrazumevaju varijaciju svih parametara proračuna, čime je omogućeno dobijanje zavisnosti ovih veličina od: dimenzija prostorije, debljine zidova, položaja tačke detekcije u prostoriji, gustine sredine, za različite građevinske materijale i funkcionalne oblike faktora nagomilavanja. Detalji ovih proračuna prikazani su u Dodatku 2 disertacije, u okviru odgovarajućih programa, gde su takođe predstavljeni i programi za izračunavanje operacionih dozimetrijskih veličina (dati su reprezentativni proračuni - uglavnom za niz ^{238}U, koji su u pojedinim programima prikazani objedinjeno).

3.2. Metod merenja koncentracije aktivnosti radionuklida

3.2.1. Materijali

3.2.1.1. *Poreklo i uzorkovanje*

Koncentracije aktivnosti primordijalnih radionuklida, u ovoj disertaciji, izmerene su za 113 uzoraka različitih građevinskih materijala i sirovina za njihovu proizvodnju, nabavljenih prvenstveno sa tržišta okruga grada Niša ($43^\circ 20'$ N, $21^\circ 54'$ E, 201m nadmorske visine), iz maloprodajnih radnji i stovarišta građevinskih materijala. Pojedini uzorci uzeti su sa gradilišta: pesak, šljunak, kreč; po dva uzorka betona i cigle dobijena su posle rušenja delova zidova pri nadogradnji objekata. Nakon grubog čišćenja komadnih uzoraka, građevinski

materijali (mase oko 2 kg) smeštani su u polietilenske kese koje su obeležavane određenim šiframa, a detaljniji podaci o proizvođaču ili mestu uzorkovanja unošeni su u posebnu tabelu. Pored toga, veliki broj proizvoda pribavljen je sa graničnih prelaza Gradina, Preševo i Vrška Čuka, gde se građevinski materijali, koji se uvoze u našu zemlju, uzorkuju po odgovarajućoj proceduri, radi zakonom propisane kontrole sadržaja radionuklida (*Sl. List* 2009, *Pravilnik* 2011b).

Geografsko poreklo pojedinih vrsta ispitivanih materijala (sirovine: pesak, šljunak), kao i manufakturna ili industrijska proizvodnja kreča, cigle i betona, uglavnom je na teritoriji jugoistočne Srbije, dok je određeni broj uzoraka proizveden u drugim delovima zemlje (crep, keramičke podne i zidne pločice, cement, gas-beton). Izvesni uzorci, finalni proizvodi ili komponente u sastavu građevinskih materijala: mermer, granit, perlit, travertin, keramičke pločice, cement, klinker, gips, kaolin, feldspat, potiču iz stranih, u najvećem broju susednih zemalja. Vrste istraživanih materijala i njihovi proizvođači, navedeni su u Tabelama 4.24.a) - e), u okviru prikaza rezultata merenja sadržaja radionuklida.

3.2.1.2. *Priprema za merenje*

Građevinski materijali pribavljeni u obliku komada, površno su oprani, radi uklanjanja eventualnog prisustva drugih materijala, a zatim su, kao i uzorci zemljišta, osušeni u atmosferskim uslovima. Posle manuelnog mehaničkog usitnjavanja, uzorci su mleveni i homogenizovani u mlinu, do granula veličine 3 mm. Mlevenje, pritom, nije vršeno za materijale u praškastom stanju: sitan pesak, cement, gips, perlit, kreč, glinu. Izlaganjem temperaturi od 105° C u peći za sušenje, iz uzoraka je, zatim, otklanjana rezidualna vlaga, a potom su smeštani u Marineli posude od polietilena, zapremine 1 L, čija je masa prethodno izmerena. Nakon merenja mase posude ispunjene materijalom, ona je hermetički zatvorena pomoću pvc izolir trake i označena odgovarajućom šifrom uzorka. Period odležavanja uzoraka u zatvorenim Marineli posudama, pre merenja na gama-spektrometru, radi približnog izjednačavanja koncentracije aktivnosti ^{226}Ra i njegovih potomaka, tj. postizanja sekularne ravnoteže u nizu ovog radionuklida, iznosi najmanje tri nedelje (21 dan).

3.2.2. Oprema za merenje sadržaja radionuklida

3.2.2.1. *Karakteristike gama-spektrometra*

Ispitivanje sadržaja radionuklida u građevinskim materijalima obavljeno je na Odeljenju za zaštitu od zračenja, službe za laboratorijsku dijagnostiku Zavoda za zdravstvenu zaštitu radnika "Niš", Niš. Laboratorija je akreditovana prema standardu SRPS ISO/IEC 17026: 2006, od strane Akreditacionog tela Srbije (ATS) (akreditacioni broj 01-199, dokument 2-01-248/2011, od 17. 11. 2011. god). Za izvesne materijale, merenja su izvršena od strane autora disertacije, a ispitivanja većeg broja uzoraka obavili su stručnjaci ove laboratorije.

Merenja koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, u svim uzorcima, izvršena su pomoću sistema za niskofonsku gama-spektroskopiju sa koaksijalnim detektorom p-tipa od hiperčistog germanijuma (HPGe), proizvođača *Canberra*, USA. Ovaj gama-spektrometar ima sledeće karakteristike:

1. relativna efikasnost u odnosu na standardni 3" x 3" NaI detektor iznosi 25%;
2. puna širina linije energije 1332 keV (^{60}Co) (FWHM – *full with at half of maximum*) je 1.85 keV, odnos odbroja: *Peak*/*Compton* (*Knoll* 2000) jednak je 55:1;
3. digitalna obrada signala, za 8192 kanala, ostvarena je pomoću uređaja DSA 2000, *Canberra*, USA;
4. upotreba softvera *Genie* 2000, *Canberra*, USA, za akviziciju, obradu i analizu gama-

spektara, kao i za obezbeđenje kvaliteta merenja i korišćenje bibliotečkih podataka o gama linijama (*Canberra* 2002);

5. radni režim detektora postignut je inverznom polarizacijom PN diode, jednosmernim naponom od 4000 V, a elektronski šum, koji potiče od struja curenja manjinskih nosilaca naelektrisanja, smanjuje se hlađenjem detektora pomoću sorpcione pumpe do temperature tečnog azota (77 K).

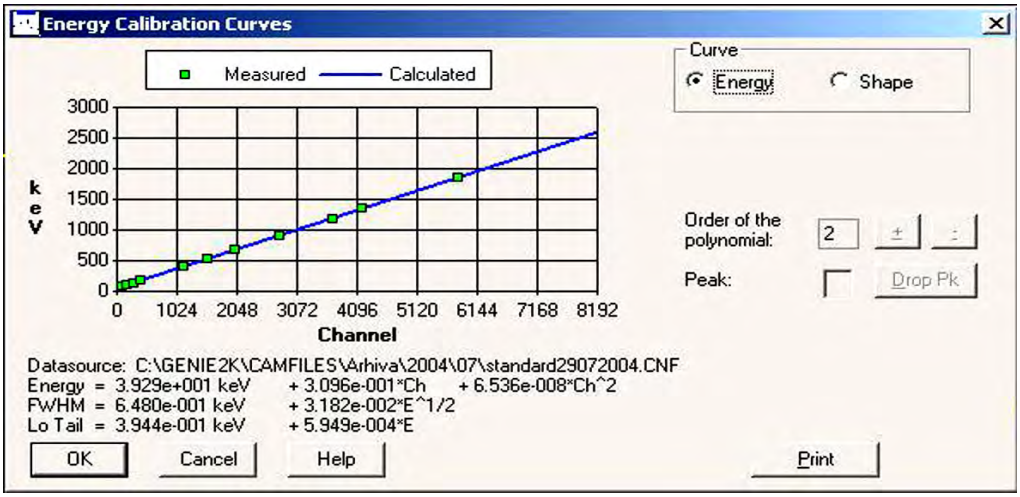
Minimiziranje uticaja spoljašnjeg zračenja realizovano je oblaganjem detektora olovnom zaštitom debljine 10 cm, kao i limovima profila 1 mm, od bakra i čelika, postavljenim sa unutrašnje strane sloja olova, koji apsorbuju fluorescentno zračenje iz ovog sloja (*Gilmor* 2008). Ispod poklopca (olovnih vrata), na gornjoj strani kućišta olovne zaštite, nalazi se pleksiglas debljine 5 mm.

3.2.2.2. *Kalibracija gama-spektrometra za gustinu uzoraka 1 g/cm^3*

Kalibracija gama-spektrometra izvršena je pomoću gama standarda, gustine 1 g/cm^3, u geometriji Marineli posude zapremine 1 litar (Cert. No: 931-OL-004/04 od 07. 01. 2004. god, *Czech Metrological Institute*, Praha, Czech Republic). Ova procedura izvedena je u tri faze, tj. obavljene su kalibracije:

1. energije u funkciji rednog broja kanala,
2. pune širine pika na polovini maksimuma (FWHM) u funkciji energije i
3. efikasnosti detektora u funkciji energije.

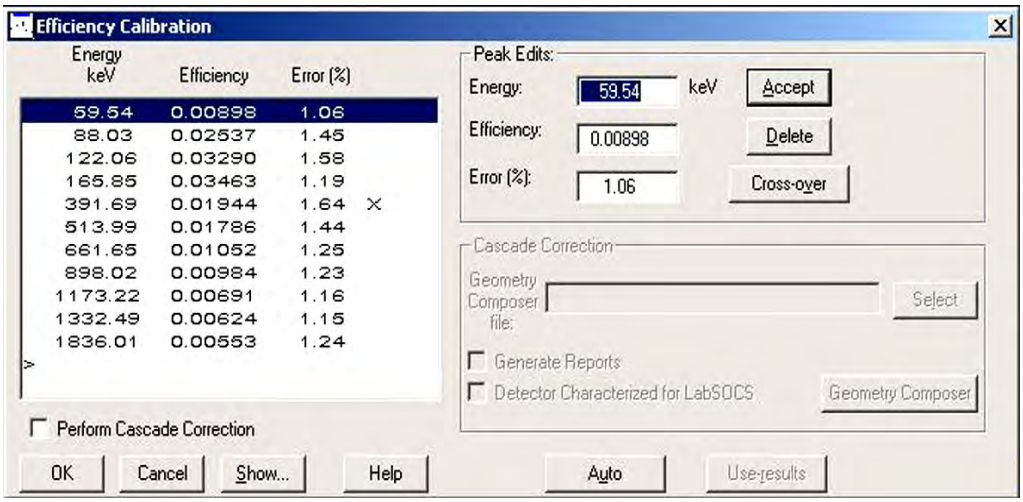
Na Slici 3.5. prikazan je grafik energije u funkciji rednog broja kanala, koji ima linearni karakter, i odgovarajući analitički izraz za ovu zavisnost. Takođe, dat je i izraz za FWHM u funkciji energije. Sa ove slike vidi se izuzetno dobra linearnost zavisnosti energije, jer koeficijent uz kvadratni član rednog broja kanala iznosi 6.536 x 10^{-8}.



Slika 3.5. Kalibracioni grafik i jednačine zavisnosti energije od rednog broja kanala i FWHM od energije.

Na Slici 3.6. dati su podaci za kalibraciju efikasnosti gama-spektrometra u funkciji energije, za pomenuti standard, kao i odstupanja fitujuće krive u odnosu na eksperimentalne vrednosti efikasnosti. Inače, efikasnost je bezdimenziona veličina i predstavlja odnos broja detektovanih fotona na datoj energiji i ukupnog broja fotona koje standardni izvor emituje za zadato vreme

snimanja spektra (*Knoll* 2000, *Gilmor* 2008).



Slika 3.6. Podaci o kalibraciji na efikasnost gama spektrometra, za uzorak gustine 1 g/cm^3 u Marineli posudi zapremine 1 litar.

Sa Slike 3.6. evidentno je da kriva efikasnosti veoma dobro fituje podatke dobijene merenjem, pošto najveće odstupanje ove krive od eksperimentalno određenih vrednosti iznosi 1.64% (obeleženo znakom x). Uračunavajući i mernu nesigurnost za sadržaj radionuklida, jednaku 1.6% za nivo pouzdanosti 95%, koja je data u sertifikatu o standardu, i zanemarujući neodređenosti vremena merenja i podataka za gama prinose linija standarda, neodređenost efikasnosti procenjena je na 2.30 % (statistička neodređenost odbroja pika standarda može se takođe zanemariti).

Kalibracija energije, FWHM i efikasnosti gama-spektrometra, prikazana na Slikama 3.5. i 3.6, za koje je korišćen standard gustine 1 g/cm^3, može se primeniti na merenja radioaktivnosti uzoraka približne vrednosti gustine. Građevinski materijali koji ispunjavaju ovaj uslov su: cement, gips, gips-karton, kreč, i slični uzorci.

3.2.2.3. *Kalibracija (etaloniranje) gama-spektrometra za gustinu uzoraka 1.7 g/cm^3*

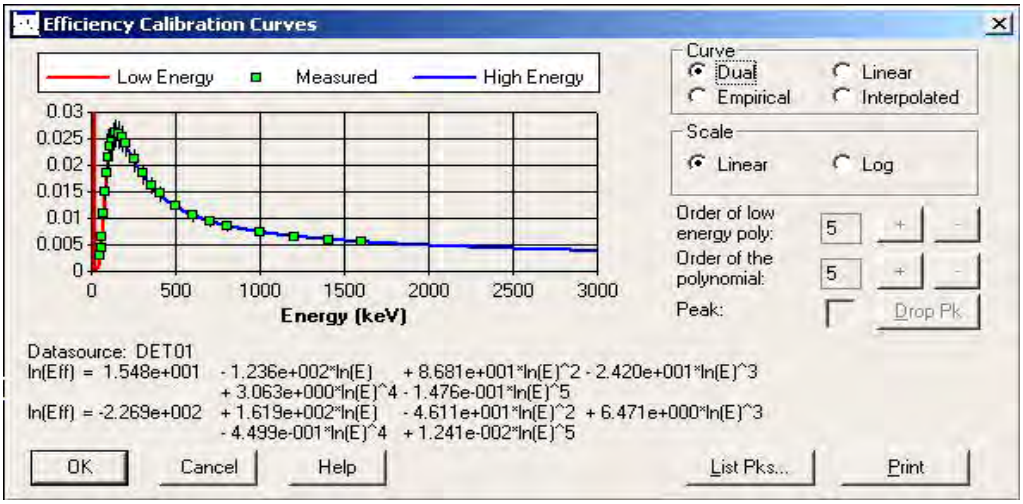
Akreditovana Laboratorija za etaloniranje gama-spektrometara i aktivnosti radioaktivnih izvora - gama emitera, Katedre za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku Prirodno - matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu, izvršila je kalibrisanje (etaloniranje) gama-spektrometra na efikasnost, za uzorke gustine 1.7 g/cm^3.

Kalibracije energije i širine linije preuzete su iz prethodnih procedura, za standard gustine 1 g/cm^3. Etaloniranje je obavljeno metodom *ASTM E 181-98/03 Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides* (*ASTM* 2003), korišćenjem sertifikovanih etalona:

1. ^{152}Eu, Marineli izvor, proizvođača *Framatome anp cerca*, Francuska, Model EU152EGR115, ser. br. 7024514/2, Aktivnost: 32.5 Bq [merna nesigurnost: 5%, pri nivou poverenja 95% (2σ)], karton opreme: SERT.ET.3;
2. ^{241}Am, tačkasti izvor *Standard source*, proizvođač *Framatome anp cerca*, Francuska, Model 9CH03EGSA20, ser. br. 40885/186, Aktivnost: 437 Bq (merna nesigurnost: 3.5%, pri 2σ), karton opreme SERT.ET.4.

Sledljivost kalibracije ostvarena je preko referentnih etalona, sertifikovanih od strane *Chaine Nationale d" Etalonnage BNM-COFRAC* (“COmite FRancais d"ACcreditation“) nacionalnog akreditacionog tela, potpisnika MLA za laboratorije koje vrše etaloniranje u okviru EA (EA-1/08-EA *Multi and Bilateral Agreement Signatories*).

Merna nesigurnost etaloniranja gama-spektrometra iznosi 10%, za nivo poverenja 95%. Ovaj procenat odnosi se na krivu efikasnosti dobijenu za Marineli posudu od polietilena, zapremine 1 L, napunjenu do visine 92 mm, sa matriksom od mlevenog kamena, smeštenu direktno na aluminijumsku “kapu” detektora. Grafički i analitički prikaz zavisnosti efikasnosti od energije gama fotona dat je na Slici 3.7.



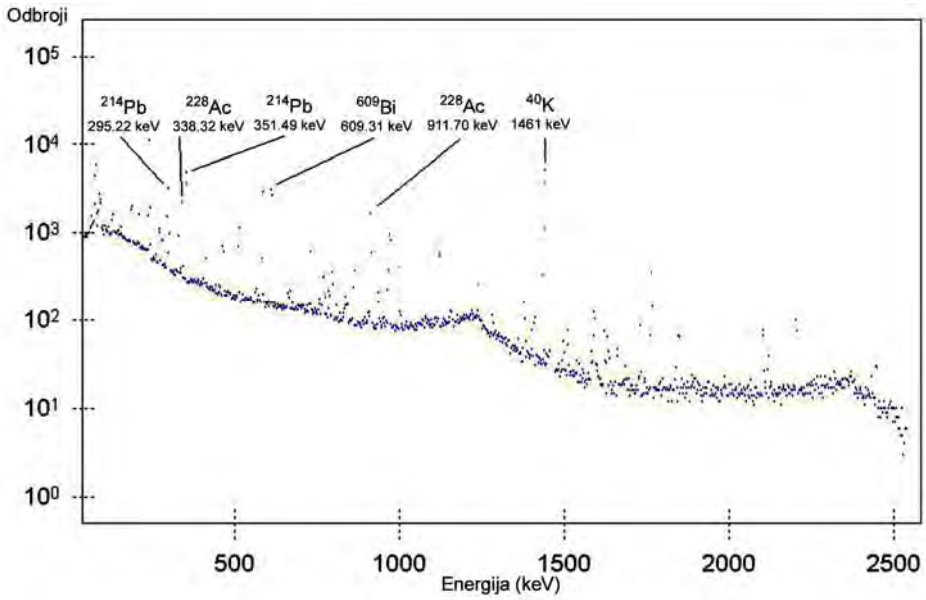
Slika 3.7. Kalibraciona kriva i jednačine zavisnosti efikasnosti od energije, za uzorke gustine 1.70 g/cm^3 u Marineli posudi zapremine jedan litar.

Gustina 1.70 g/cm^3, za koju je rađena kalibracija efikasnosti gama-spektrometra, prikazana na ovoj slici, dobro se slaže sa gustinom većine pripremljenih uzoraka građevinskih materijala, kao što su: razne vrste mlevenog kamena, opeke, klinkera i dr. Pored toga, ova vrednost bliska je gustini uzoraka zemljišta.

3.2.3. Izračunavanje koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida

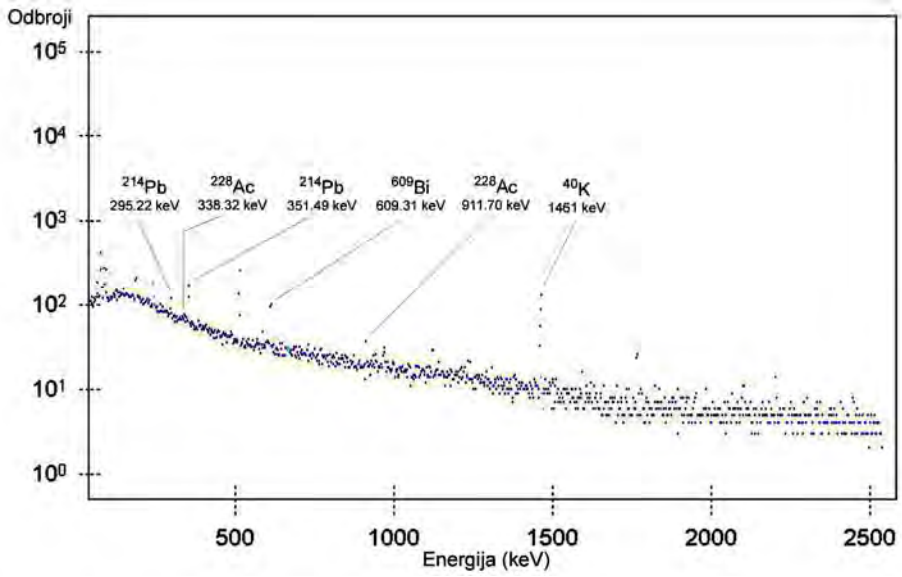
Za određivanje koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u uzorcima građevinskih materijala primenjen je softver *Genie* 2000. Kod merenja ^{226}Ra korišćeni su fotopikovi ^{214}Pb (295 keV i 351 keV) i ^{214}Bi (609 keV i 1120 keV). Koncentracija aktivnosti ^{232}Th određena je na osnovu linija u spektru ^{228}Ac (338 keV i 911 keV), dok je za kvantifikaciju sadržaja ^{40}K korišćen jedini fotopik ovog jezgra, na energiji 1461 keV.

Na Slici 3.8. predstavljen je spektar uzorka cigle, sniman 24 sata. Vrednostima energije označene su najintenzivnije linije, korišćene za izračunavanje koncentracija aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K. Ove linije, inače, najpouzdanije su za određivanje koncentracije aktivnosti navedenih elemenata, jer, osim velikog gama prinosa u odnosu na ostale linije u spektru istih radionuklida, njihove energije se ne preklapaju sa energijama zračenja drugih prirodnih radionuklida.



Slika 3.8. Gama spektar uzorka cigle, vreme snimanja spektra: 24 sata.

Na Slici 3.9. prikazan je spektar osnovnog zračenja (fona), izmeren u toku 24 sata, za uzorak dejonizovane vode [uzorak bez analita – *blank sample* (*Manić* 2005)]. Evidentno je prisustvo istih linija, naznačenih i na Slici 3.8, koje su, međutim, znatno manjeg intenziteta.



Slika 3.9. Gama spektar osnovnog zračenja za uzorak dejonizovane vode, vreme snimanja spektra: 24 sata

Određivanje koncentracija aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K za svaki uzorak, podrazumeva izračunavanje neto odbroja, tj. ”oduzimanje” spektra osnovnog zračenja (fona), snimanog u istom vremenskom intervalu kao i spektar uzorka, od ukupnih odbroja uzorka sa fonom (*Gilmor* 2008). Osnovna formula, po kojoj su softverski izračunate koncentracije aktivnosti, je oblika:

$$A = \frac{N_{\mathrm{p}}}{t \cdot Y \cdot \varepsilon \cdot m}. \tag{3.14}$$

U ovom izrazu, N_{p} označava broj neto odbroja ispod pika, t je vreme snimanja spektra (u s), Y je gama prinos za datu liniju, ε predstavlja efikasnost detektora na toj energiji, a m je masa uzorka (u kg), tako da se koncentracija aktivnosti, A, izražava u Bq/kg. Vremena snimanja spektara uzoraka i spektara osnovnog zračenja, koji su analizirani u ovoj disertaciji, su: 3600 s, 43200 s, 50000 s i 86400 s. Mase uzoraka bile su u opsegu od 900 do 1800 grama, a svi materijali mereni su u Marineli posudama zapremine jedan litar. Merenja su obavljena u skladu sa standardnim metodama *ASTM E* 181-98/03 (2003) i *C* 1402-04 (2004).

Proračun merne nesigurnosti

Kombinovana standardna nesigurnost, $u(A)$, za merenje koncentracije aktivnosti, A, data je formulom (3.15):

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(N_p)}{N_p}\right)^2 + \left(\frac{u(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2}. \tag{3.15}$$

U ovom izrazu $u(N_{\mathrm{p}})/N_{\mathrm{p}}$ predstavlja odnos merne nesigurnosti broja odbroja ispod fotopika date energije u spektru i broja neto odbroja ispod pika koji generiše softver *Genie* 2000 (za standardno podešeni nivo pouzdanosti 68%). Doprinos $u(N_{\mathrm{p}})/N_{\mathrm{p}}$ može se smanjiti dužim snimanjem spektra, čime se postiže bolje statističko definisanje fotopika. Ovaj član ima nižu vrednost pri većem broju odbroja ispod pika, odnosno za uzorak koji ima višu koncentraciju aktivnosti datog radionuklida. Izraz $u(\varepsilon)/\varepsilon$ je odnos ukupne neodređenosti efikasnosti i eksperimentalne ε, za zadatu energiju. Poslednji član ove formule, koji sadrži sistematsku neodređenost merenja mase uzorka, $u(m)$, na etaloniranoj preciznoj vagi, tačnosti 0.1 g, može se zanemariti, jer su mase svih uzoraka pripadale opsegu (900 -1800) g.

Za konkretne uslove etaloniranja, formula (3.15) dobija jednostavniji oblik. Naime, za uzorke gustine 1 g/cm^3 i 1.7 g/cm^3, važe jednačine (3.16.a) i (3.16.b), respektivno:

$$\frac{u(A)}{A}(\%) = \sqrt{\left(\frac{u(N_p)}{N_p} \cdot 100\ \%\right)^2 + (2.3\%)^2}, \tag{3.16.a}$$

$$\frac{u(A)}{A}(\%) = \sqrt{\left(\frac{u(N_p)}{N_p} \cdot 100\ \%\right)^2 + (10\ \%)^2}. \tag{3.16.b}$$

Vrednost člana koji se odnosi na mernu nesigurnost kalibracije efikasnosti, $u(\varepsilon)/\varepsilon$, koja figuriše u formulama (3.16), određena je na osnovu najvećeg odstupanja efikasnosti od fitujuće krive, u celom energetskom opsegu. Inače, ukoliko je radionuklid izmeren na bazi više linija, računata je merna nesigurnost za svaku energiju. Pritom, uz rezultat o izmerenoj koncentraciji aktivnosti ovog radionuklida upisana je vrednost najveće izračunate merne nesigurnosti.

MDA

Minimalna detektibilna koncentracija aktivnosti (*MDA*) radionuklida određena je pomoću softvera *Genie* 2000, u kome je primenjena *Currie*-jeva formula (*Currie* 1968) za granicu detekcije neto odbroja, L_D, zasnovana na aproksimaciji normalne raspodele odbroja i korišćenju *Poisson*-ove statistike za proračun odgovarajuće standardne devijacije, tako da je:

$$MDA = \frac{L_D}{t \cdot Y \cdot \varepsilon \cdot m} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{N_B}}{t \cdot Y \cdot \varepsilon \cdot m} \quad . \tag{3.17}$$

U ovoj formuli N_B predstavlja odbroj osnovnog zračenja u oblasti pika, procenjen softverski na osnovu odbroja sa obe strane pika, a ostali parametri definisani su u izrazu (3.14). Vrednost *MDA*, definisana kao koncentracija aktivnosti radionuklida za koju izmereni neto odbroji pika premašuju kritični nivo, L_C ($L_C = 2.33\sqrt{N_B}$, u *Poisson*-normalnoj aproksimaciji, 5% nivo značajnosti) sa specificiranom verovatnoćom (obično 95%), predstavlja merilo sposobnosti detekcije procesa merenja, ali odražava i karakteristike uzorka (*Manić* 2005, *Manić et al.* 2005). Stoga, iako tretirana kao veličina za *a priori* ocenu mogućnosti detekcije, *MDA* je određena *a posteriori* (nakon merenja uzorka), kao i L_C, u slučaju detektibilnosti samog prisustva radionuklida. U ovoj disertaciji, vrednosti minimalne detektibilne koncentracije aktivnosti navedene su u okviru Tabela 4.24.a)-e), za rezultate niže od odgovarajućih *MDA*, u vidu gornjeg limita koncentracije aktivnosti.

3.2.4. Obezbeđenje kvaliteta merenja

Obezbeđenje kvaliteta (*Quality Assurance*) gama-spektrometrijskog ispitivanja materijala postiže se obavljanjem kontrolnih laboratorijskih procedura. Korišćenjem softverskog paketa S505QA Software, proizvođača *Canberra*, USA, vrši se:

1. pozicioniranje pika u zadati redni broj kanala (*peak centroid*) u spektru standarda, što predstavlja meru stabilnosti pojačanja sistema;
2. kontrola brzine brojanja fona bez uzorka u celom opsegu merenja (8192 kanala), u cilju detektovanja eventualne kontaminacije prostora u kome se nalazi detektor. Setovane granice su od 2 do 3 odbroja u minutu (cpm);
3. provera efikasnosti na energiji 59.54 keV (^{241}Am), kao način detektovanja iznenadnog kvara, koji se manifestuje u vidu smanjene efikasnosti detektora na ovoj energiji;
4. evidencija temperature u laboratoriji;
5. upisivanje relativne vlažnosti u laboratoriji.

Za svaki od navedenih postupaka, u laboratorijskim procedurama naveden je opseg vrednosti kontrolisanog parametra, kao i korektivne mere pri odstupanju od zadatog intervala. Kao referentni materijal za merenja 1. i 3. koristi se standard za kalibraciju gama-spektrometra u Marineli geometriji zapremine 1 l (Cert. No: 931-OL-004/04 od 07. 01. 2004. god, *Czech Metrological Institute*, Praha, Czech Republic).

4. Rezultati

4.1. Rezultati proračuna dozimetrijskih veličina

4.1.1. Apsorbovana doza

4.1.1.1. *Faktori nagomilavanja za niz radionuklida. Doza niza radionuklida*

Određivanje dozimetrijskih veličina u ovoj disertaciji bazirano je prvenstveno na parcijalnim izračunavanjima, koja se odnose na pojedinačne energetske grupe radionuklida – čime su dobijene raspodele ovih veličina po energiji, i sumiranju dobijenih rezultata. Izvesni deo proračuna zasnovan je na korišćenju veličina koje jedinstveno reprezentuju ceo spektar energija određenog primordijalnog radionuklida, dobijenih na osnovu parametara koji karakterišu pojedine energetske grupe.

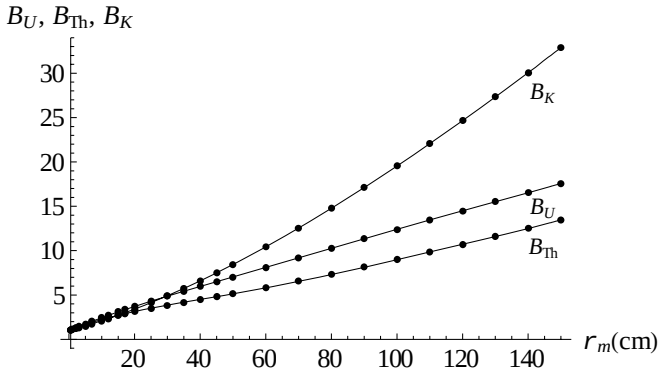
Faktori nagomilavanja

Faktori nagomilavanja izlaganja za zračenje nizova ^{238}U i ^{232}Th, izračunati su prema opisanom metodu - primenom izraza (3.9), za različita rastojanja, r_m, koje zračenje emitovano iz tačkastog izvora (direktan zrak) prelazi u građevinskom materijalu, u opsegu od 0.5 cm do 150 cm (ili od 0.05 cm do 2 cm). U skladu sa transportnim proračunima faktora nagomilavanja izlaganja izvršenim za beskonačnu sredinu (*ANSI/ANS-6.4.3* 1991), tačka detekcije – infinitezimalna zapremina vazduha, nalazi se u materijalu. Za sredinu konačnih dimenzija faktori nagomilavanja uglavnom imaju nešto nižu vrednost, ali u slučaju građevinskih materijala (malih Z_{eq}), razlika se može zanemariti. Tako, ove veličine aproksimiraju faktore nagomilavanja izlaganja i u tački detekcije u vazduhu iza sloja materijala (*free in air*), u kome direktno zračenje tačkastog izvora prelazi rastojanje r_m.

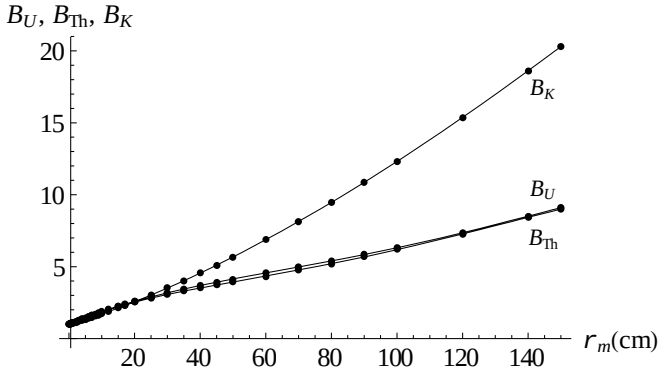
Iako ^{40}K emituje samo jednu gama liniju, zavisnost odgovarajućeg faktora nagomilavanja od dužine puta fotona, određena je i za ovaj radionuklid. Naime, pored eliminacije velikog broja integracija u proračunu doze primenom veličina koje se odnose na niz, pojednostavljenje ovih operacija postiže se korišćenjem jednostavnijeg oblika faktora nagomilavanja [od (G-P) forme (2.22)].

Na Slici 4.1.a) predstavljeni su faktori nagomilavanja izlaganja za nizove primordijalnih radionuklida, koji se odnose na beton, a Slika 4.1.b) prikazuje ove veličine izračunate za

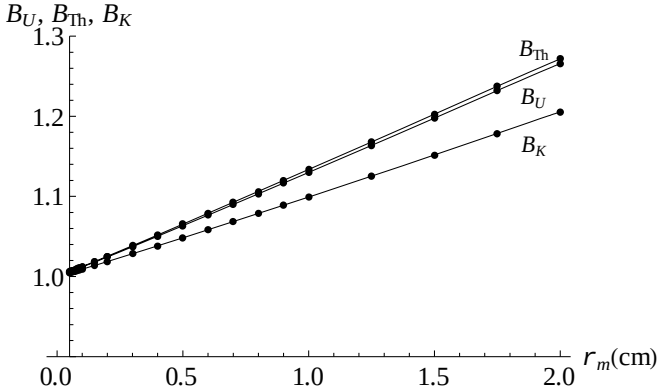
ciglu. Faktori nagomilavanja izlaganja ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, koji odgovaraju transportu zračenja u keramičkim pločicama, dati su na Slici 4.1.c). Na ovim slikama, tačkama su označene vrednosti faktora nagomilavanja izračunate za određene puteve fotona u materijalu, r_m, a krive predstavljaju adekvatne fitujuće funkcije.



Slika 4.1.a) Faktori nagomilavanja izlaganja za nizove ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u betonu



Slika 4.1.b) Faktori nagomilavanja izlaganja za nizove ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u cigli



Slika 4.1.c) Faktori nagomilavanja izlaganja za nizove ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u keramici

Zavisnost faktora nagomilavanja B, od dužine puta zračenja u materijalu r_m (cm), za sve radionuklide i materijale, može se fitovati polinomnom formom, analogno *Capo*-ovom razvoju (2.21):

$$B(r_m) = 1 + a_1 r_m + a_2 r_m^{\ 2} + a_3 r_m^{\ 3} + a_4 r_m^{\ 4} + a_5 r_m^{\ 5} \ . \tag{4.1}$$

Parametri fitujuće funkcije: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, za faktore nagomilavanja izlaganja ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, koji odgovaraju pojedinim materijalima, predstavljeni su u Tabeli 4.1. U tabeli su navedene i vrednosti merila kvaliteta fita - koeficijenta determinisanosti R^2, kao i maksimalne relativne greške (relativno odstupanje), δ(%), izračunate za određeni par podataka originalnog i odgovarajućeg fitujućeg skupa (*Wackerly et al.* 2008).

Tabela 4.1. Parametri faktora nagomilavanja izlaganja za nizove ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, datog funkcijom (4.1), za beton, ciglu i keramiku

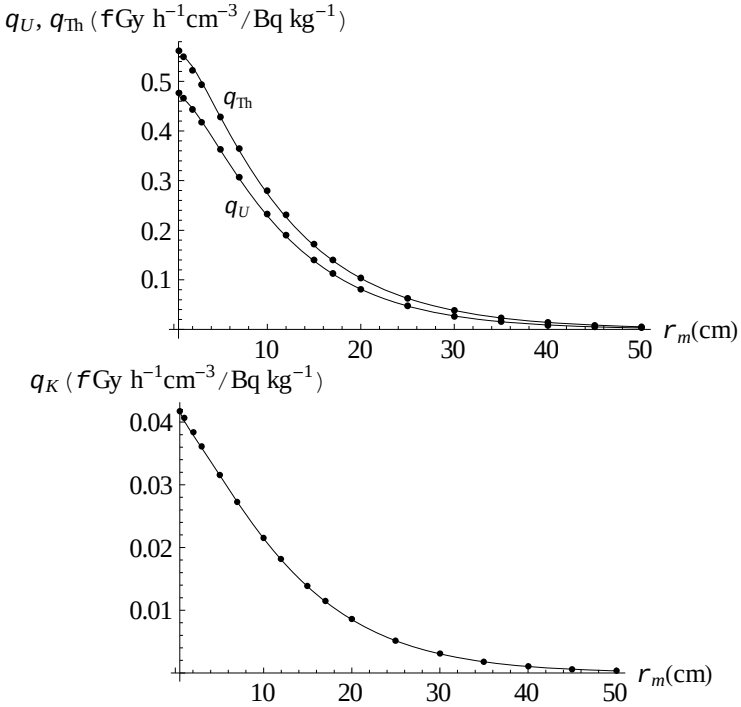
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	δ(%)	R^2
			Beton				
B_U	$1.56787\cdot10^{-1}$	$-1.36646\cdot10^{-3}$	$1.77558\cdot10^{-5}$	$-1.08182\cdot10^{-7}$	$2.45507\cdot10^{-10}$	1.80	0.999998
B_{Th}	$1.47091\cdot10^{-1}$	$-2.64337\cdot10^{-3}$	$3.70104\cdot10^{-5}$	$-2.22688\cdot10^{-7}$	$4.96602\cdot10^{-10}$	1.37	0.999995
B_K	$9.81006\cdot10^{-2}$	$1.18608\cdot10^{-3}$	$-3.74392\cdot10^{-6}$	$6.16321\cdot10^{-9}$	0	0.98	1
			Cigla				
B_U	$9.58748\cdot10^{-2}$	$-9.61485\cdot10^{-4}$	$6.67164\cdot10^{-6}$	$-1.1631\cdot10^{-8}$	$-1.67747\cdot10^{-11}$	1.68	0.999985
B_{Th}	$9.85755\cdot10^{-2}$	$-1.36564\cdot10^{-3}$	$1.43253\cdot10^{-5}$	$-6.3761\cdot10^{-8}$	$1.03692\cdot10^{-10}$	1.53	0.999988
B_K	$6.52221\cdot10^{-2}$	$7.17529\cdot10^{-4}$	$-3.94484\cdot10^{-6}$	$2.02581\cdot10^{-8}$	$-4.70314\cdot10^{-11}$	0.42	1
			Keramičke pločice				
B_U	$1.16717\cdot10^{-1}$	$3.38937\cdot10^{-2}$	$-3.54216\cdot10^{-2}$	$1.83200\cdot10^{-2}$	$-3.52817\cdot10^{-3}$	<0.01	1
B_{Th}	$1.21013\cdot10^{-1}$	$3.29663\cdot10^{-2}$	$-3.47614\cdot10^{-2}$	$1.78451\cdot10^{-2}$	$-3.42640\cdot10^{-3}$	<0.01	1
B_K	$9.00124\cdot10^{-2}$	$2.06879\cdot10^{-2}$	$-1.97000\cdot10^{-2}$	$1.01893\cdot10^{-2}$	$-1.95894\cdot10^{-3}$	<0.01	1

Doza radionuklida

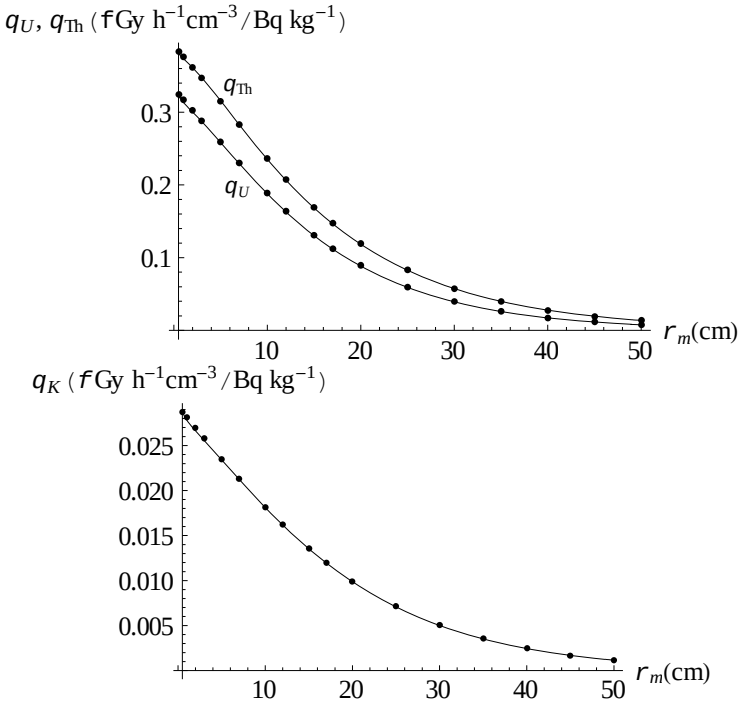
Na osnovu koncepta faktora nagomilavanja za niz radionuklida, uračunavanjem doze direktnog zračenja prema jednačini (3.9), određena je specifična jačina apsorbovane doze (po jedinici zapremine građevinskog materijala, dV), $q(r)$, u tački detekcije na rastojanju r od tačkastog izvora u materijalu. Specifična jačina apsorbovane doze u vazduhu, q_U, q_{Th} ili q_K, usled γ- zračenja određenog radionuklida dobija se integracijom $q(r)$, tj. $q_U(r)$, $q_{Th}(r)$ ili $q_K(r)$, po zapremini građevinskog materijala [izraz (3.10)].

Vrednosti $q(r)$ izračunate su za različita rastojanja koja direktno zračenje ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K prelazi u građevinskom materijalu, r_m, u opsegu (0.5 – 150) cm, za beton i ciglu, odnosno (0.05 – 2) cm, u slučaju keramičkih pločica. Pritom, za sva tri građevinska materijala, dužina puta fotona u vazduhu, r_a ($r = r_m + r_a$), varirana je u opsegu od 10 cm do 600 cm, odabranom u skladu sa položajima tačke detekcije i dimenzijama prostorija u proračunima.

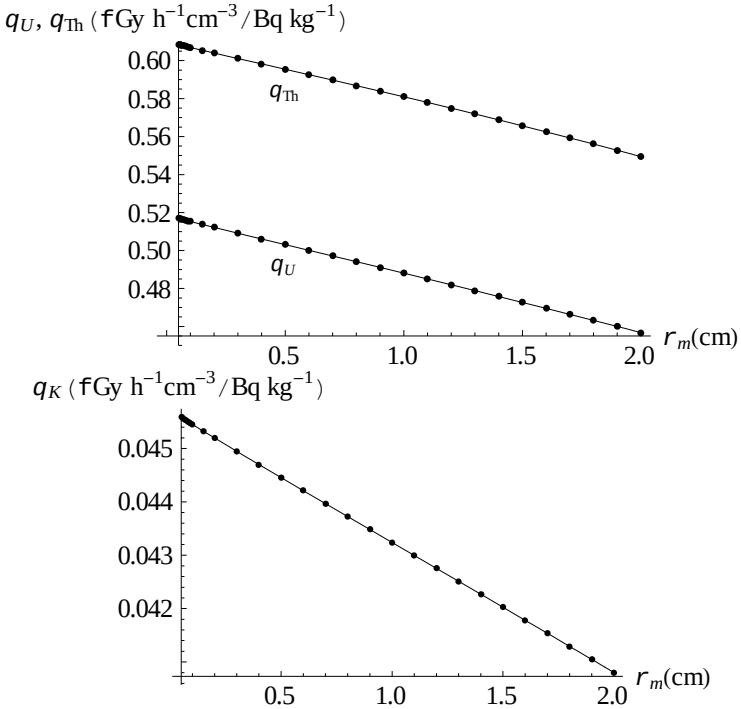
Zavisnost doze tačkastog izvora, indukovane zračenjem niza ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u betonu, cigli i keramici, od vrednosti r_m (cm), pri konstantnom rastojanju r_a = 100 cm, data je na Slikama 4.2.a)-c), respektivno. Zbog velike razlike opsega, zavisnost $q_K(r)$ prikazana je odvojeno od odgovarajućih raspodela za ^{238}U i ^{232}Th. Kao i na Slikama 4.1.a)-c), rezultati proračuna označeni su tačkama, dok krive reprezentuju odgovarajuće fitujuće funkcije.



Slika 4.2.a) Doza radionuklida za tačkasti izvor u betonu



Slika 4.2.b) Doza radionuklida za tačkasti izvor u cigli



Slika 4.2.c) Doza radionuklida za tačkasti izvor u keramičkim pločicama

Prikazane zavisnosti, i, uopšte vrednosti $q(r)$ za sva rastojanja r_a u navedenim granicama, fitovane su funkcijom opšteg oblika:

$$q(r_m, r_a) = \frac{k}{(r_m + r_a)^2} \exp[(a + br_m + cr_m^{\ 2} + dr_m^{\ 3} + er_m^{1/2} + fr_m^{1/3})(1 + gr_a)], \qquad (4.2)$$

u kojoj je parametar k jednak: $1.0790495 \cdot 10^{-1}$ (beton), $0.734672 \cdot 10^{-1}$ (cigla), tj. $1.147925 \cdot 10^{-1}$ (keramika). Za dobijanje $q(r)$ u jedinicama (nGy h^{-1} cm^{-3}/Bq kg^{-1}), rastojanja r_m i r_a treba predstaviti u cm, tako da će doza zapreminskog izvora, q_U, q_{Th} ili q_K, biti izražena u (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1}). Vrednosti parametara a, b, c, d, e, f, g, kao i odgovarajućih R^2 i δ, fitujuće funkcije (4.2), za istraživane materijale, date su u Tabelama 4.2.a)-c).

Tabela 4.2.a) Vrednosti parametara funkcije (4.2), za tačkasti izvor γ- zračenja u betonu

Parametar	$q_U(r)$	$q_{Th}(r)$	$q_K(r)$
a	-3.0373	-3.07387	-5.12848
b	-0.148891	-0.115735	-0.150418
c	$2.19294 \cdot 10^{-4}$	$2.14292 \cdot 10^{-4}$	0
d	$-5.24689 \cdot 10^{-7}$	$-6.77689 \cdot 10^{-7}$	$5.72755 \cdot 10^{-8}$
e	0.705174	0.222984	1.21867
f	-0.642472	0.0108658	-1.50571
g	$5.92764 \cdot 10^{-6}$	$5.90877 \cdot 10^{-6}$	$5.1288 \cdot 10^{-6}$
δ(%)	2.10	2.82	1.91
R^2	0.999999	0.999997	1

Tabela 4.2.b) Vrednosti parametara funkcije (4.2), za tačkasti izvor γ- zračenja u cigli

Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
a	-2.73749	-2.69609	-5.21109
b	-0.139266	-0.121304	-0.0929772
c	$2.76162\cdot10^{-4}$	$3.08355\cdot10^{-4}$	$-4.08489\cdot10^{-5}$
d	$-5.78865\cdot10^{-7}$	$-8.0171\cdot10^{-7}$	$1.35972\cdot10^{-7}$
e	1.16828	0.925306	0.861863
f	-1.42211	-1.06593	-1.10957
g	$9.95092\cdot10^{-6}$	$1.00242\cdot10^{-5}$	$7.42131\cdot10^{-6}$
δ(%)	1.56	1.23	1.15
R^2	0.999998	0.999998	1

Tabela 4.2.c) Vrednosti parametara funkcije (4.2), za tačkasti izvor γ- zračenja u keramici

Parametar	q_U (*r*)	q_{Th} (*r*)	q_K (*r*)
a	-3.09044	-2.92872	-5.52026
b	-0.022917	$-8.98507\cdot10^{-3}$	-0.0261241
c	$-5.62921\cdot10^{-3}$	$-6.77689\cdot10^{-3}$	$-2.59635\cdot10^{-3}$
d	$1.0598\cdot10^{-4}$	$2.02393\cdot10^{-4}$	$-1.89509\cdot10^{-5}$
e	-0.0288343	-0.0322706	-0.0167058
f	0.0177189	0.0204161	0.0103735
g	$2.54563\cdot10^{-5}$	$2.54804\cdot10^{-5}$	$1.13671\cdot10^{-5}$
δ(%)	0.03	0.02	0.02
R^2	1	1	1

4.1.1.2. *Apsorbovana doza u standardnoj prostoriji*

Referentne vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze u vazduhu (q_U, q_{Th} i q_K), indukovane gama zračenjem ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K iz građevinskog materijala, odnose se na centar standardne prostorije definisane dimenzijama: 5 m x 4 m x 2.8 m i debljinom svih zidova *d* = 20 cm (*EC* 1999, *UNSCEAR* 2000). Iako je originalno pretpostavljeni građevinski materijal, u studiji *Koblinger*-a (1978) i *Stranden*-a (1979), bio čist SiO_2 gustine 2.32 g/cm^3, u kasnijim proračunima kao građevinski materijal uglavnom je korišćen beton, gustine 2.32 g/cm^3 ili 2.35 g/cm^3.

Beton

Vrednosti veličina: q_U, q_{Th} i q_K, izračunate pomoću jednačine (3.2), za centar standardne prostorije od betona navedenog sastava (Tabela D1), primenom (G-P) oblika faktora nagomilavanja izlaganja (*Manić et al.* 2012), date su u Tabeli 4.3, u kojoj su navedeni i rezultati integracije doze niza radionuklida, (4.2). Prikazane su i odgovarajuće specifične jačine apsorbovane doze, proračunate korišćenjem *Berger*-ovog, kao i *Taylor*-ovog oblika faktora nagomilavanja.

U Tabeli 4.3. predstavljene su, takođe, specifične jačine apsorbovane doze: q_{U0}, q_{Th0} i q_{K0}, koje odgovaraju direktnom zračenju, određene uslovom da je fluks fotona u tački detekcije $\vec{r}$, $\Phi(\vec{r},E_i)$, za svaku energiju emisije (energetsku grupu E_i), jednak komponenti koja potiče od primarnih fotona, koji direktno stižu u tačku detekcije, tj. $\Phi(\vec{r},E_i)=\Phi_0(\vec{r},E_i)$. Veličine q_{U0}, q_{Th0} i q_{K0} izračunate su izostavljanjem faktora nagomilavanja izlaganja u jednačini (3.2), odnosno, pretpostavljajući: $B(\vec{r},E_i)=1$.

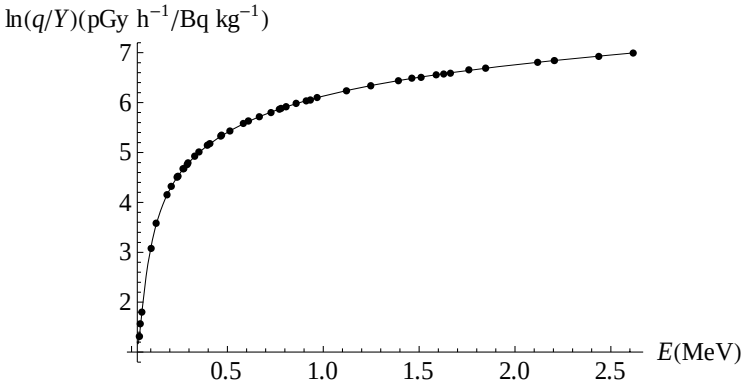
Tabela 4.3. Vrednosti q_U, q_{Th} i q_K, za centar standardne prostorije, izračunate primenom tri oblika faktora nagomilavanja i funkcije (4.2), i q_{U0}, q_{Th0} i q_{K0}, određeni za B = 1

Oblik faktora nagomilavanja	q (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Harima (1983, 1991)	0.757	0.912	0.0700
Berger (1956)	0.842	1.000	0.0763
Taylor (1954)	0.996	1.082	0.0790
Doza radionuklida (4.2)	0.757	0.910	0.0702
Direktno zračenje, B = 1	0.400	0.504	0.0403

Specifične jačine apsorbovane doze u centru standardne prostorije, koje odgovaraju pojedinačnim energijama - energetskim grupama ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, određene u proračunu q_U, q_{Th} i q_K, primenom (G-P) oblika faktora nagomilavanja, predstavljene su tačkama na Slici 4.3. Prikazani podaci odnose se na logaritam doze po jednom emitovanom fotonu na datoj energiji (jedinični gama prinos), čime je omogućeno dobijanje funcionalne zavisnosti ove veličine od energije (linija na Slici 4.3):

$$\begin{aligned}\ln[q/Y(E)] &= 4.494 + 1.636/E + 2.610\ln E - 0.933(\ln E)^2 + \\ &0.266(\ln E)^3 - 0.044(\ln E)^4 + 0.036(\ln E)^5\end{aligned}, \qquad (4.3)$$

koja je slična polinomnoj formi doznog ekvivalenta tačkastog izvora γ-zračenja u funkciji ln$E$ (*Unger and Trubey* 1981). Koeficijent determinisanosti ove fitujuće funkcije je R^2 = 0.999999, a maksimalna relativna greška, 2.43% , dobijena je za podatke na energiji 129 keV.



Slika 4.3. Specifična jačina apsorbovane doze u centru prostorije od betona (po emitovanom fotonu) u zavisnosti od energije; prikazan je logaritam doze, za sve energetske grupe ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K

Cigla; keramičke pločice

Proračun specifičnih jačina apsorbovane doze u prostoriji ekvivalentnoj standardnoj, u kojoj je kao građevinski materijal, umesto betona upotrebljena cigla (parametara navedenih u Tabelama D.1. i D.2), osim korišćenja *Harima* formule (2.22), izvršen je i primenom fitujuće funkcije za dozu radionuklida (4.2), u integrandu (3.2). Pri određivanju doze unutar hipotetičke ”standardne prostorije” sa zidovima od keramike, pretpostavljena debljina svih zidova iznosila je 0.5 cm. Rezultati proračuna za oba slučaja, predstavljeni su u Tabeli 4.4. Radi procene uticaja nagomilavanja zračenja, u ovoj tabeli date su i vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze q_{U0}, q_{Th0} i q_{K0}, koje potiču samo od direktnog zračenja (B = 1).

Tabela 4.4. Specifične jačine apsorbovane doze u standardnoj prostoriji od cigle ili keramičkih pločica

Materijal	Oblik funkcije u proračunu	q (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Cigla	*Harima* (1983, 1991)	0.613	0.770	0.0598
	Doza radionuklida (4.2)	0.614	0.772	0.0598
	Direktno zračenje, B = 1	0.372	0.462	0.0371
Keramičke pločice	*Harima* (1983, 1991)	0.0410	0.0485	0.00363
	Doza radionuklida (4.2)	0.0410	0.0485	0.00363
	Direktno zračenje, B = 1	0.0394	0.0465	0.00353

Kombinacija građevinskih materijala

Primenom faktora nagomilavanja izlaganja za kombinaciju slojeva različitih materijala, B_k, u izrazu (3.2), izračunate su specifične jačine apsorbovane doze u standardnoj prostoriji koje potiču od radionuklida u zidovima od betona, debljine d_1 = 20 cm, prekrivenih slojem keramičkih pločica (d_2 = 0.5 cm). Za iste vrednosti d_1 i d_2, razmotren je i uticaj prisustva prekrivnog sloja od keramike na vrednost doze u prostoriji od cigle. Rezultati proračuna, izvršenih korišćenjem (G-P) oblika faktora nagomilavanja u formulama *Kalos*-a (2.28) i (2.29) za B_k, predstavljeni su u Tabeli 4.5. Prikazane su, takođe, vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze, određene bez uračunavanja efekta nagomilavanja zračenja (B_k = 1).

Tabela 4.5. Doza prvog sloja, u standardnoj prostoriji sa kombinacijom slojeva materijala

Materijali	Oblik faktora nagomilavanja B_k	q (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Beton – keramičke pločice	*Kalos* (2.28.b)	0.736	0.892	0.0685
	Kalos (2.29.b)	0.717	0.870	0.0670
	Dir. zračenje, B_k = 1	0.362	0.460	0.0369
Cigla – keramičke pločice	*Kalos* (2.28.a)	0.579	0.731	0.0571
	Kalos (2.29.a)	0.518	0.657	0.0522
	Kalos (2.28.b)	0.599	0.756	0.0584
	Dir. zračenje, B_k = 1	0.336	0.421	0.0339

Radi verifikacije dobijenih podataka, proračunata je i vrednost doze za slučaj kombinacije dva betonska sloja, 19.5 cm i 0.5 cm, gde je u određivanju doze prvog, donjeg sloja, primenjen koncept faktora nagomilavanja za kombinaciju slojeva. Rezultat (Tabela 4.6) koji se dobija dodavanjem doprinosa drugog sloja (0.00342 nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), izračunatog pomoću nemodifikovanog faktora nagomilavanja [(G-P) oblika], u idealnom slučaju reprodukuje vrednost doze u standardnoj prostoriji (Tabela 4.3). Inače, ovakav postupak verifikacije adekvatan je zbog malih razlika u Z_{eq} razmatranih građevinskih materijala, a kao indikativni, proračuni su obavljeni samo za dozu ^{40}K.

U Tabeli 4.6. data je i specifična jačina apsorbovane doze koja odgovara direktnom zračenju donjeg sloja betona u navedenoj kombinaciji, izračunata pretpostavljajući da faktor nagomilavanja izlaganja B_k ima vrednost 1. Ukupna doza direktnog zračenja za ^{40}K dobijena je dodavanjem odgovarajuće vrednosti za sloj 0.5 cm: q_{K0} = 0.00332 nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}, određene primenom faktora nagomilavanja izlaganja B_2 = 1.

Tabela 4.6. Doza ^{40}K u standardnoj prostoriji, za kombinaciju dva sloja betona

Oblik faktora nagomilavanja, B_k, za prvi sloj	q (^{40}K) (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})	
	Prvi sloj	Ukupno
Kalos (2.28.a)	0.0666	0.0700
Kalos (2.28.b)	0.0677	0.0711
Kalos (2.29.a)	0.0608	0.0644
Kalos (2.29.b)	0.0666	0.0700
Direktno zračenje, B_k = 1	0.0370	0.0403

Rezultati primene izraza (2.28.a) i (2.29.b) (kao i uslova: B_k = 1), za faktor nagomilavanja prvog sloja, figurišu formalno u Tabeli 4.6, pošto je za kombinaciju istih materijala, proračun ukupne doze korišćenjem ovih jednačina, zapravo ekvivalentan podeli granica integracije u (3.2) na opsege koji odgovaraju debljinama pojedinačnih slojeva. Ipak, na osnovu prikazanih vrednosti, zbog bliskih Z_{eq} materijala u slojevima, procenjeno je da ove formule obezbeđuju veću tačnost proračuna i za slojeve različitih materijala, od ostala dva izraza. Zato, dalji proračuni doze u prostorijama sa kombinacijom materijala beton – keramičke pločice, izvršeni su korišćenjem formule (2.29.b) za faktor nagomilavanja zračenja koje emituje sloj betona, dok je u slučaju slojeva cigla – keramičke pločice, upotrebljen izraz (2.28.a) (naravno, relevantnim podacima u Tabeli 4.5, smatraju se rezultati primene ovih formula).

Za određivanje funkcionalnog oblika specifične jačine doze, q_U (r), q_{Th} (r) i q_K (r), koji odgovara tačkastom izvoru u materijalu prvog sloja, vrednosti ove veličine izračunate su za različita rastojanja koje zračenje prelazi u građevinskim materijalima i u vazduhu. Dužina puta fotona u pojedinim sredinama varirana je u opsezima: od 0.5 cm do 150 cm, za prvi sloj kombinacije (beton ili cigla), i od 0.05 cm do 2 cm, za sloj keramičkih pločica, a pređenom putu u vazduhu, r_a, odgovara opseg (10 – 600) cm. Dobijeni skup podataka fitovan je funkcijom (4.4):

$$q(r_{m1}, r_{m2}, r_a) = \frac{k}{(r_{m1} + r_{m2} + r_a)^2} \exp[(a + br_{m1} + cr_{m1}{}^2 + dr_{m1}{}^3 + er_{m1}{}^{1/2} + fr_{m1}{}^{2/3})(1 + gr_{m2})(1 + hr_a)]$$

gde r_{m1} i r_{m2} označavaju rastojanja u prvom i drugom sloju, respektivno, a konstanta k prvog materijala ima vrednosti koje važe za izraz (4.2). Za izračunavanje q_U, q_{Th} ili q_K u (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), sva rastojanja u formuli (4.4) treba izraziti u cm. Parametri funkcije (4.4), za navedene kombinacije građevinskih materijala, koji se odnose na zračenje ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, dati su u Tabelama 4.7.a) i 4.7.b)

Tabela 4.7.a) Parametri fitujuće funkcije za q_i iz prvog sloja kombinacije građevinskih materijala beton – keramičke pločice

Parametar	q_U (r)	q_{Th} (r)	q_K (r)
a	-3.09356	-3.06062	-5.38932
b	-0.186213	-0.107566	-0.206226
c	$2.80113 \cdot 10^{-4}$	$1.85007 \cdot 10^{-4}$	$7.22831 \cdot 10^{-5}$
d	$-6.56813 \cdot 10^{-7}$	$-6.02915 \cdot 10^{-7}$	$-7.95584 \cdot 10^{-8}$
e	-0.350098	0.242077	-0.839932
f	0.505971	-0.0344020	0.875210
g	0.0104875	$9.33183 \cdot 10^{-3}$	$8.11505 \cdot 10^{-3}$
h	$6.63656 \cdot 10^{-6}$	$6.00259 \cdot 10^{-6}$	$5.21312 \cdot 10^{-6}$
R^2	0.999990	0.999991	0.999998

Tabela 4.7.b) Parametri fitujuće funkcije za q_i iz prvog sloja kombinacije građevinskih materijala cigla – keramičke pločice

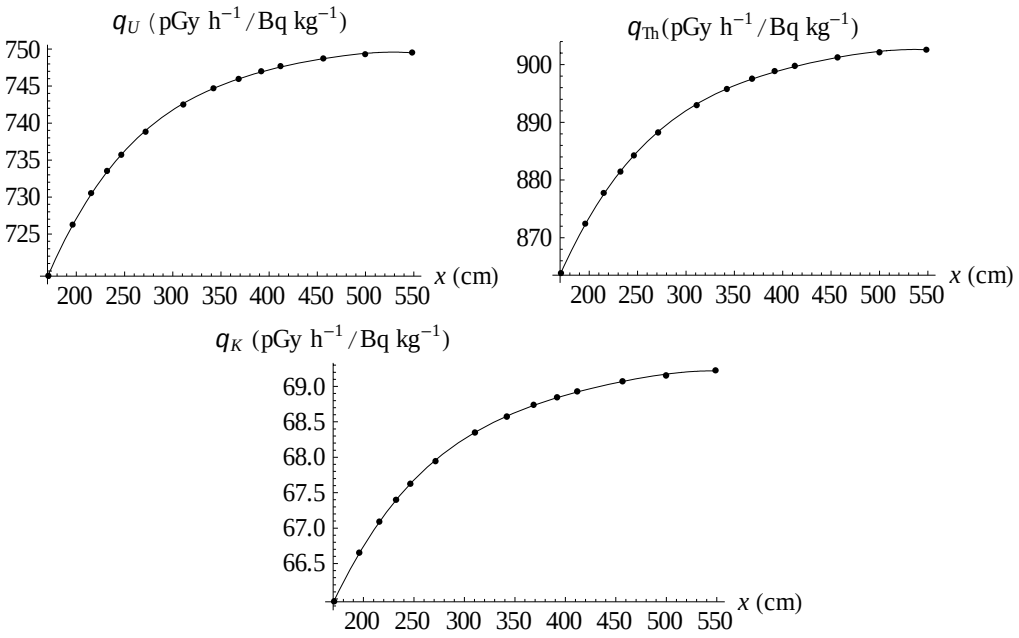
Parametar	$q_U(r)$	$q_{Th}(r)$	$q_K(r)$
a	-3.01176	-2.89259	-5.40977
b	-0.175963	-0.144218	-0.129493
c	$3.02347\cdot10^{-4}$	$3.09182\cdot10^{-4}$	$5.87917\cdot10^{-6}$
d	$-6.09754\cdot10^{-7}$	$-7.74053\cdot10^{-7}$	$4.54791\cdot10^{-8}$
e	-0.654652	-0.425810	-0.599165
f	0.712304	0.511993	0.600057
g	0.0125308	0.0130988	0.0100536
h	$8.63689\cdot10^{-6}$	$9.71329\cdot10^{-6}$	$7.31201\cdot10^{-6}$
R^2	0.999990	0.999991	0.999999

Integracijom funkcija $q_U(r)$, $q_{Th}(r)$ i $q_K(r)$, oblika (4.4), po zapremini prvog sloja materijala u standardnoj prostoriji, dobijaju se jačine doze: 0.721, 0.868 i 0.0671, u (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), za kombinaciju beton – keramičke pločice. Vrednosti doze, koje potiču od ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u sloju cigle, dobijene integracijom (4.4), iznose: 0.560, 0.733 i 0.0573, u (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), respektivno. Odstupanje navedenih rezultata od odgovarajućih podataka u Tabeli 4.5, izračunatih izrazima za faktor nagomilavanja kombinacije materijala, uz primenu (G-P) forme za pojedinačne slojeve, manje je od 0.5%, što ukazuje na adekvatnost fitujuće formule (4.4).

4.1.1.3. *Zavisnost specifičnih jačina apsorbovane doze od različitih relevantnih parametara*

Dimenzije prostorije

Ispitivanje zavisnosti specifičnih jačina doze od dimenzija prostorije izvršeno je proračunom q_U, q_{Th} i q_K za različite paralelepipedne strukture (*Manić et al.* 2012). Kao građevinski materijal, pretpostavljen je beton navedenog, *NBS*, sastava i gustine (Tabela D.1).



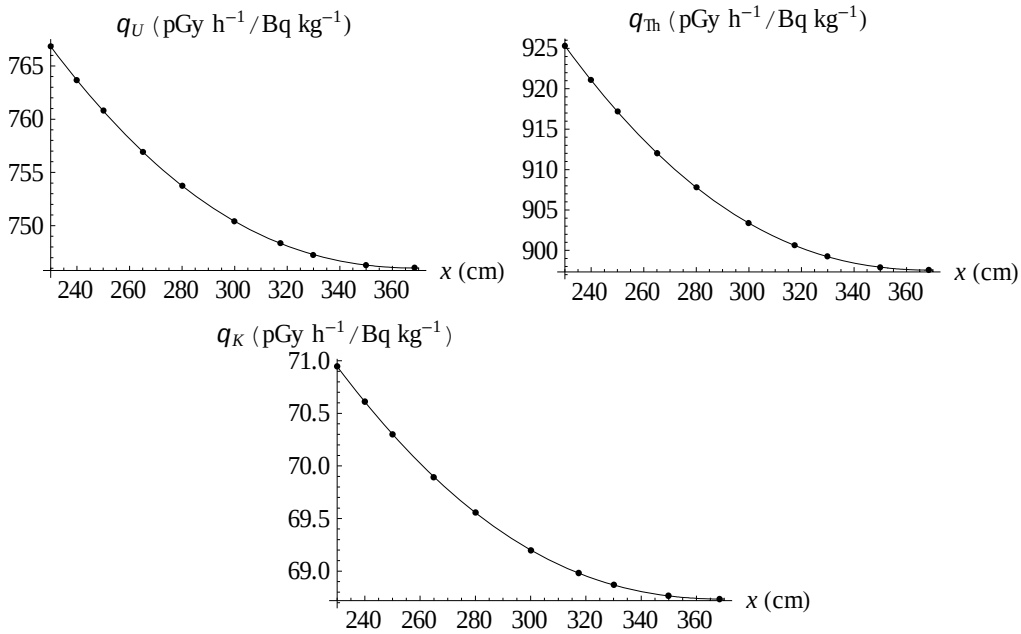
Slika 4.4. Zavisnost jačine doze od dimenzije prostorije $x = V^{1/3}$ (cm), za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K

Pretpostavljena debljina svih zidova iznosila je 20 cm, a kao i kod standardne prostorije, nije bilo predviđeno prisustvo prozora i vrata. Zračenje zidova susednih prostorija takođe je zanemareno. Za dobijanje funkcionalnog oblika q_i (q_U, q_{Th} ili q_K), ova veličina izračunata je u centru prostorija različitih zapremina (V), u opsegu (5 – 185) m^3, variranjem dimenzija prostorije x, y, z (x je najmanja, a z najveća dimenzija), za pojedinačnu zapreminu. Pritom, uglavnom su razmotrene realno prihvatljive kombinacije (x, y, z), sa odnosom dimenzija $x : y : z$ u granicama od 1 : 1 : 1 do 1 : 2 : 3.

Zavisnost doze koja potiče od ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, od dimenzije x, za hipotetički kubični oblik prostorije ($x = V^{1/3}$), predstavljena je na Slici 4.4. (zbog male širine opsega, q_U, q_{Th} i q_K date su na posebnim slikama). Prikazane krive kvalitativno su iste, odnosno mogu se fitovati istim funkcionalnim oblikom – polinomom.

U daljem izvođenju oblika funkcionalne zavisnosti doze od dimenzija prostorije, vrednosti q_U, q_{Th} i q_K izračunate su za različite kombinacije (x, y, z), koje se dobijaju "istezanjem" kubične prostorije u paralelepipedne oblike identične zapremine. Da bi se efekat izrazio funkcijom jedne promenljive, x (izbor je proizvoljan), pretpostavljeno je da su ostale dve dimenzije jednake ($y = z$).

Opisana promena oblika prostorije, tj. smanjivanje x od maksimalne vrednosti $V^{1/3}$ (uz istovremeni rast y, tj. z) odražava se u vidu porasta svih jačina doze. Drugim rečima, ukoliko se pri konstantnoj zapremini prostorije njena površina (površina svih zidova) smanjuje do minimuma - vrednosti za kubičnu prostoriju (pri čemu x raste), svaka od veličina: q_U, q_{Th} i q_K opada. Ove zavisnosti, koje se, za sve zapremine iz ispitivanog opsega, adekvatno fituju polinomnom funkcijom, prikazane su na Slici 4.5. za $V = 50$ m^3 (kao i na Slici 4.4, tačkama su označeni rezultati proračuna, linije predstavljaju fitujuće krive).



Slika 4.5. Zavisnost specifične jačine apsorbovane doze od najmanje dimenzije prostorije, x (cm), za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K; $V = 50$ m^3, $y = z$

Analogno, u opštem slučaju proizvoljne kombinacije dimenzija prostorije, suma kubnih polinoma po x, y i z predstavlja odgovarajuću fitujuću funkciju za sve specifične jačine apsorbovane doze, tj:

$$q = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + b_1 y + b_2 y^2 + b_3 y^3 + c_1 z + c_2 z^2 + c_3 z^3 . \quad (4.5)$$

Dimenzije x, y i z u formuli, treba izraziti u cm, tako da se q_U, q_{Th} i q_K dobijaju u (pGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}). Vrednosti parametara u funkciji (4.5), kao i rezultati za relativnu grešku, δ(%), i koeficijent determinisanosti fita, R^2, prikazani su u Tabeli 4.8.a)

Tabela 4.8.a) Parametri fitujuće funkcije za dozu u prostoriji proizvoljnih dimenzija

Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
a_0	690.299	816.252	61.4686
a_1	-0.482268	-0.603099	-0.0477798
a_2	$1.00018 \cdot 10^{-3}$	$1.20942 \cdot 10^{-3}$	$9.00540 \cdot 10^{-5}$
a_3	$-7.41711 \cdot 10^{-7}$	$-8.76598 \cdot 10^{-7}$	$-5.82820 \cdot 10^{-8}$
b_1	0.553443	0.764372	0.0750573
b_2	$-1.10782 \cdot 10^{-3}$	$-1.59157 \cdot 10^{-3}$	$-1.57251 \cdot 10^{-4}$
b_3	$7.45542 \cdot 10^{-7}$	$1.12854 \cdot 10^{-6}$	$1.10926 \cdot 10^{-7}$
c_1	0.169166	0.241437	0.0127244
c_2	$-1.87233 \cdot 10^{-4}$	$-2.79210 \cdot 10^{-4}$	$-1.09355 \cdot 10^{-5}$
c_3	$9.79737 \cdot 10^{-8}$	$1.40905 \cdot 10^{-7}$	$5.25216 \cdot 10^{-9}$
δ(%)	0.55	0.62	0.54
R^2	0.999994	0.999993	0.999994

Za standardnu prostoriju, specifične jačine apsorbovane doze koje odgovaraju ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunate primenom formule (4.5), iznose 0.759, 0.914 i 0.0701, u (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), respektivno. Ovi rezultati zanemarljivo se razlikuju od odgovarajućih (G-P) vrednosti u Tabeli 4.3, koje predstavljaju podatke originalnog skupa podataka.

Tabela 4.8.b) Minimalne i maksimalne vrednosti q_U, q_{Th} i q_K, relativna odstupanja Δq od vrednosti za standardnu prostoriju, za prostorije sa različitim dimenzijama

Parametri prostorije V, $x : y : z$	q (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}) [Δq (%)]		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Min: 5 m^3, 1 : 1 : 1	0.719 (5.02)	0.864 (5.26)	0.0659 (5.86)
Max: 185 m^3, 1 : 2 : 3	0.783 (3.43)	0.946 (3.73)	0.0727 (3.86)

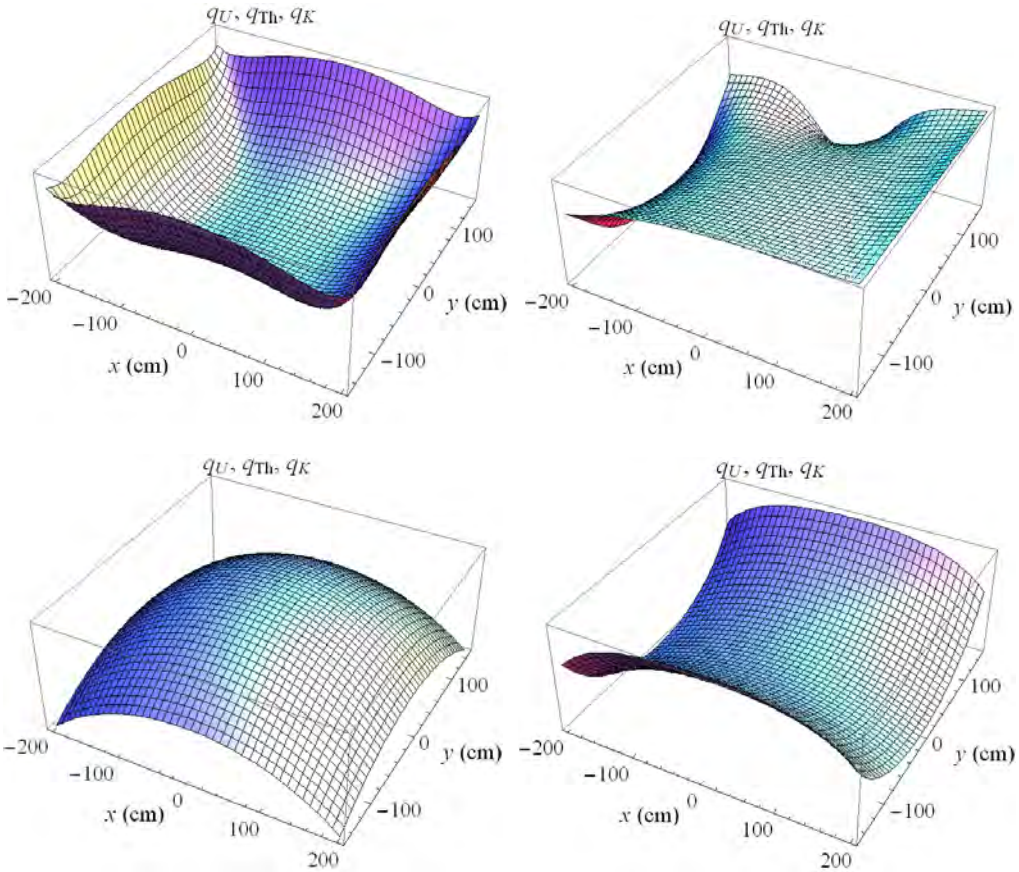
Minimalne i maksimalne vrednosti rezultata proračuna doza, q_U, q_{Th} i q_K (po izrazu 3.2), za prostorije čije dimenzije pripadaju navedenim opsezima, prikazane su Tabeli 4.8.b), gde su data i njihova relativna odstupanja (razlike) u odnosu na podatke za standardnu prostoriju. Ove doze odgovaraju granicama opsega varijacije zapremine i odnosa dimenzija, tako da je minimum q_U, q_{Th} i q_K dobijen za prostoriju sa: V = 5 m^3 i $x : y : z$ = 1 : 1 : 1, dok se maksimalne vrednosti odnose na parametre: V = 185 m^3 i $x : y : z$ = 1 : 2 : 3.

Relativna odstupanja, navedena u tabeli za prostoriju zapremine 5 m^3, predstavljaju ujedno i maksimalne relativne razlike q_U, q_{Th}, q_K i odgovarajućih doza za standardnu prostoriju. Kako su, pak, ove vrednosti određene za kubični oblik prostorije, razmatrajući samo realistične slučajeve, maksimum odstupanja ostvaren je pri uslovu: V = 185 m^3 i $x : y : z$ = 1 : 2 : 3, koji se odnosi na prostoriju širine 6.27 m, dužine 9.41 m i visine 3.14 m (*Manić et al*. 2012).

Položaj tačke detekcije; prisustvo prozora i vrata

Uticaj položaja tačke detekcije na vrednosti q_U, q_{Th} i q_K istražen je izračunavanjem ovih veličina (korišćenjem formule 4.2) u tačkama na polovini visine standardne prostorije, koje formiraju imaginarnu kvadratnu mrežu sa jednim čvorom na svakih 10·10 cm^2, počev od centra prostorije. Minimalno rastojanje tačke detekcije od svakog zida iznosilo je 50 cm. Istovremeno, proračun je izvršen pretpostavljajući i prisustvo prozora, dimenzija 2.5·1.2 m^2, u centru kraćeg zida, kao i vrata, površine 1.0·2.1 m^2, na sredini susednog, dužeg zida, u prostoriji čiji su ostali parametri identični karakteristikama standardne prostorije.

Pošto se rezultati određivanja q_U, q_{Th} i q_K u funkciji položaja tačke detekcije kvalitativno ne razlikuju, raspodele jačina doze koje odgovaraju ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, uopšteno mogu biti reprezentovane jednom zavisnošću. Na Slici 4.6.a),b) dati su grafički prikazi q_U za standardnu prostoriju i ekvivalentni model prostorije sa prozorom i vratima. Slika 4.6.c),d), data ilustrativno, predstavlja raščlanjenu veličinu q_U, odnosno, zbir doza koje potiču od zračenja plafona i poda, kao i doprinos para naspramnih zidova dimenzija 5·2.8 m^2 (koordinatni sistem postavljen je u centar prostorije).



Slika 4.6.a),b),c),d) Raspodela q_U, q_{Th} i q_K na polovini visine standardne prostorije (a) i prostorije sa prozorom i vratima (b); doprinos poda i plafona (c) i para naspramnih zidova (d) ukupnoj dozi u standardnoj prostoriji

Kvantitativne osobine raspodela jačina doze za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, koje odgovaraju standardnoj prostoriji i modelu sa prozorom i vratima, upoređene su u Tabeli 4.9. Navedeni su karakteristični podaci: minimalne i maksimalne vrednosti q_U, q_{Th} i q_K, kao i rezultati za specificirane položaje tačke detekcije (x, y).

Tabela 4.9. Vrednosti q_U, q_{Th} i q_K, u (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), za određene položaje tačke detekcije, sa koordinatama (x, y), u standardnoj prostoriji i prostoriji sa prozorom (pr.) i vratima (vr.)

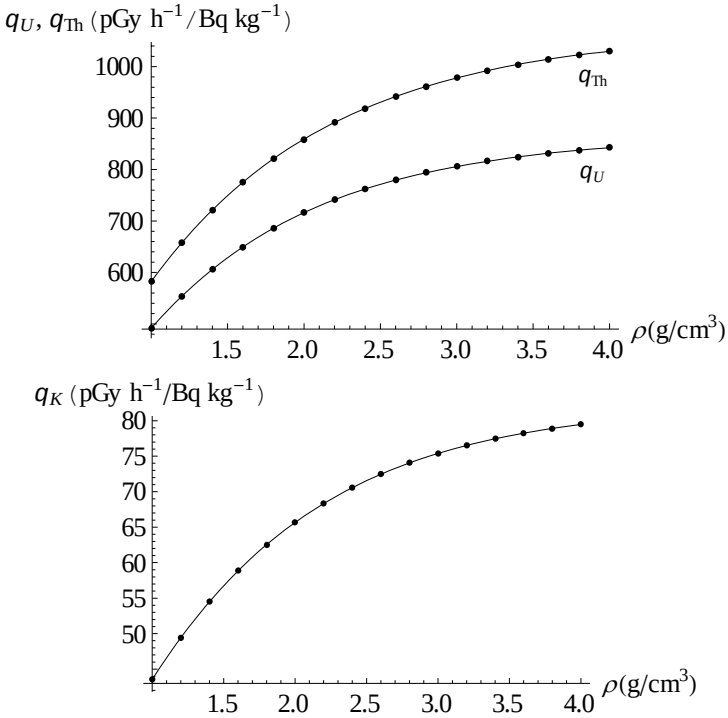
	^{238}U		^{232}Th		^{40}K	
	Standardna prostorija	Prostorija sa pr. i vr.	Standardna prostorija	Prostorija sa pr. i vr.	Standardna prostorija	Prostorija sa pr. i vr.
q_{Min}, (x, y)	0.757 (0,0)	0.579 (-200,10)	0.910 (0,0)	0.700 (-200,10)	0.0702 (0,0)	0.0540 (-200,10)
q_{Max}, (x, y)	0.780 (0,±150)	0.763 (200,-150)	0.941 (0,±150)	0.922 (200,-150)	0.0726 (0,±150)	0.0711 (200,-150)
q(0,0)	0.757	0.709	0.910	0.853	0.0702	0.0658
q(-200,0)	0.778	0.579	0.939	0.700	0.0724	0.0541
q(200,0)	0.778	0.759	0.939	0.916	0.0724	0.0707
q(0,-150)	0.780	0.753	0.941	0.910	0.0726	0.0702
q(0,150)	0.780	0.609	0.941	0.737	0.0726	0.0569
q (-200,150)	0.776	0.700	0.938	0.846	0.0723	0.0652
q (200,150)	0.776	0.763	0.938	0.919	0.0723	0.0708

Prema podacima iz Tabele 4.9, varijacije vrednosti doze unutar standardne prostorije, usled promene položaja tačke detekcije, od centra prostorije do pozicije na rastojanju 50 cm od najbližeg zida, ne premašuju 3.04%, 3.41% i 3.42%, za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, respektivno. U različitim tačkama istraživanog polja, prisustvo prozora i vrata u prostoriji snižava vrednosti q_U, q_{Th} i q_K u drugačijem stepenu: od oko 1.7%, za položaj (200,-150), do približno 25.4%, na mestu (-200,10) (za q_U, slično važi i za q_{Th} i q_K), dok centru prostorije odgovara oko 6.3% umanjenja svih jačina doze. Pritom, pojedinačni udeli prozora i vrata u ovom smanjenju takođe zavise od položaja tačke detekcije: približno su jednaki u položaju (200,-150) i u centru prostorije, velike razlike postižu se u (0,150) (prozor: 2.7%, vrata: 23.6%) i (-200,-150) (prozor: 8.6%, vrata: 0.8%), a maksimalno različiti udeli odnose se na tačku (-200,0) (prozor: 24.0%, vrata: 1.4%). Navedeni procenti određeni su za dozu ^{238}U, slične vrednosti dobijene su i za q_{Th} i q_K.

Gustina materijala

Efekat promene gustine građevinskog materijala (ρ) na vrednost doze koja potiče od ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, u centru standardne prostorije, ispitan je za vrednosti ove veličine u opsegu od 1 g/cm^3 do 4 g/cm^3. Pretpostavljeno je da varijacija ρ nije povezana sa razlikama u hemijskom sastavu materijala, tako da su svi ostali parametri proračuna, koji se odnose na *NBS* beton, nepromenjeni.

Sa Slike 4.7, gde su predstavljeni rezultati izračunavanja q_U, q_{Th} i q_K u funkciji ρ(g/cm^3), evidentan je značajni porast vrednosti doze sa povećanjem gustine materijala, pri čemu je stepen promene izraženiji u oblasti manjih gustina. Naime, za ρ u opsegu od (1-2.5) g/cm^3, q_U, q_{Th} i q_K [u jedinicama (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})] menjaju se u granicama (0.491 – 0.771), (0.582 – 0.931) i (0.0435 – 0.0716), respektivno. Daljim uvećanjem ρ u intervalu iste širine [od (2.5-4) g/cm^3], postiže se znatno manji porast jačina doze, odnosno za ρ = 4 g/cm^3, ove veličine imaju vrednosti: q_U = 0.842, q_{Th} = 1.030 i q_K = 0.0795, u (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}).



Slika 4.7. Zavisnost q_U, q_{Th} i q_K od gustine građevinskog materijala: tačke označavaju rezultate proračuna, linije predstavljaju fitujuće krive

Svaka od zavisnosti prikazanih na Slici 4.7.a),b) fitovana je polinomnom funkcijom:

$$q(\rho) = a + b\rho + c\rho^2 + d\rho^3 + e\rho^4 \ , \tag{4.6}$$

u kojoj je ρ izražena u g/cm^3, a $q(\rho)$, koja upošteno označava q_U, q_{Th} ili q_K, dobija se u jedinicama (pGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}). Parametri fitujuće funkcije, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, kao i podaci za R^2 i δ(%), dati su u Tabeli 4.10. Prikazane sa 3 značajne cifre, vrednosti q_U, q_{Th} i q_K, izračunate primenom formule (4.6) za ρ = 2.35 g/cm^3, poklapaju se sa rezultatima integracije (3.2) [sa (G-P) oblikom faktora nagomilavanja] za standardnu prostoriju.

Tabela 4.10. Parametri fitujuće funkcije za zavisnost doze od gustine materijala

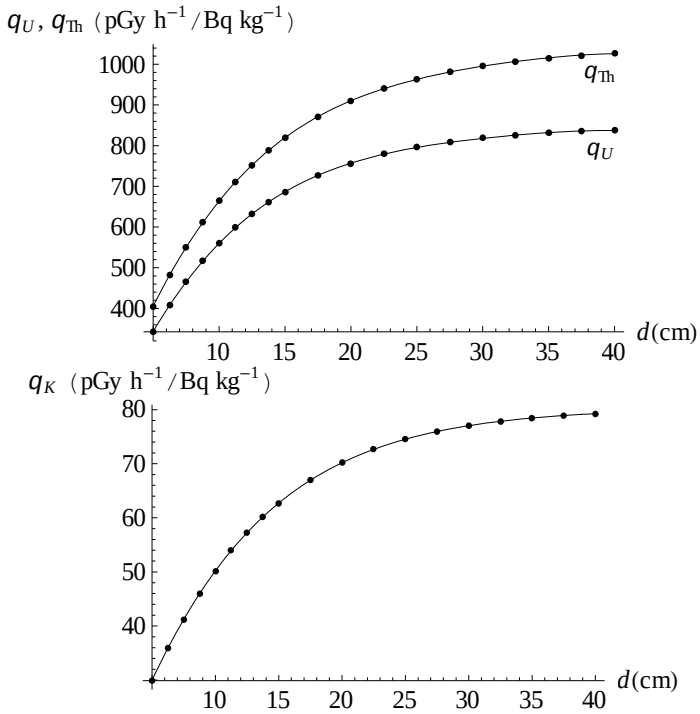
Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
a	-18.4228	-24.5391	-1.97947
b	720.029	849.583	61.9084
c	-249.332	-288.217	-19.0842
d	42.2031	48.9431	2.86906
e	-2.85563	-3.37956	-0.173664
δ(%)	0.03	0.02	<0.01
R^2	1	1	1

Debljina zidova

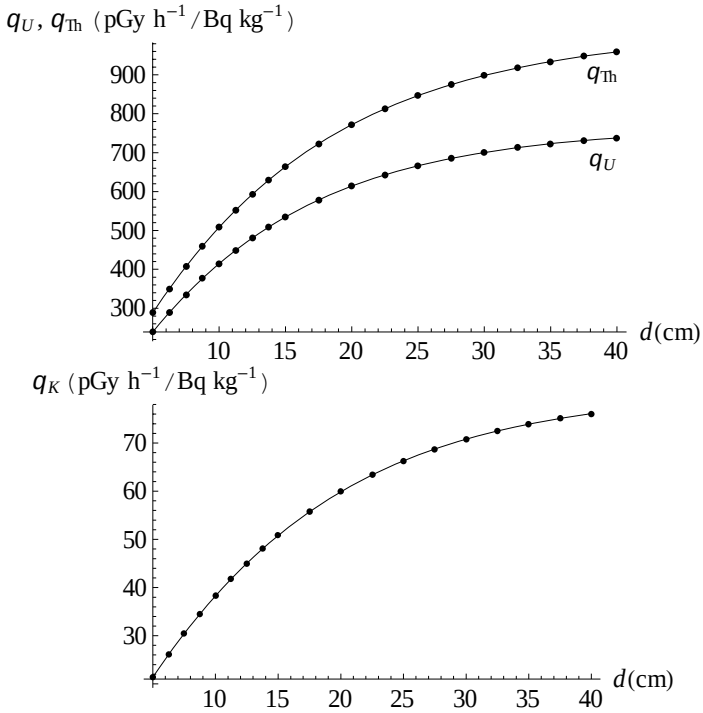
Rezultati proračuna specifične jačine apsorbovane doze za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u prostorijama različitih debljina zidova (*d*) (dimenzija standardne prostorije), izvršenih primenom formule (4.2), za sva tri ispitivana građevinska materijala: beton, ciglu i keramičke pločice, prikazani su na Slici 4.8.a),b),c). Očigledno, varijacijom debljine zidova u opsegu od 5 cm do 40 cm (za beton i ciglu), sve doze, q_U, q_{Th} i q_K, značajno se menjaju u oblasti manjih *d*, dok za veće debljine zidova zavisnost $q(d)$ asimptotski teži izvesnoj konstantnoj vrednosti, kao u slučaju promenljive gustine materijala. Kako su izračunavanja za keramiku obavljena za debljine "zidova" od 0.05 cm do 2 cm, odgovarajući rezultati rastu približno linearno, ne dostižući pomenutu oblast zasićenja. Podaci za q_U, q_{Th} i q_K, koji se odnose na granice istraživanih opsega *d*, predstavljeni su u Tabeli 4.11

Tabela 4.11. Vrednosti doze ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K za određene debljine zidova prostorije

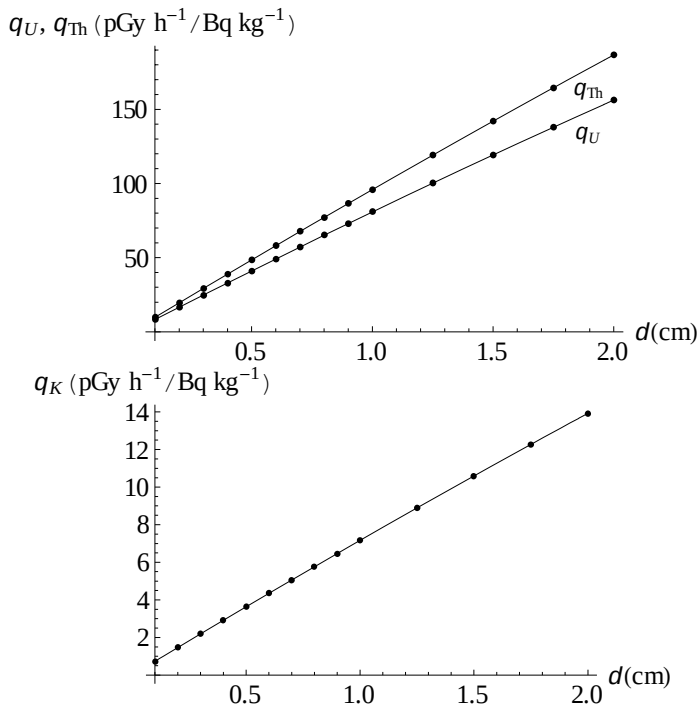
d (cm)	q_U(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})	q_{Th}(nGy h^{-1}/ Bqkg^{-1})	q_K(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})
		Beton	
5	0.342	0.404	0.0299
40	0.838	1.027	0.0793
		Cigla	
5	0.239	0.288	0.0214
40	0.738	0.959	0.0761
		Keramičke pločice	
0.05	0.0831	0.0979	0.00734
2	0.156	0.187	0.0139



Slika 4.8.a) Zavisnost q_U, q_{Th} i q_K od debljine zidova – beton



Slika 4.8.b) Zavisnost q_U, q_{Th} i q_K od debljine zidova – cigla



Slika 4.8.c) Zavisnost q_U, q_{Th} i q_K od debljine zidova – keramičke pločice

Prikazane zavisnosti doze ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K od debljine zidova prostorije od betona ili cigle, kao i kod zavisnosti od gustine, fitovane su polinomom četvrtog stepena:

$$q(d) = a + bd + cd^2 + ed^3 + fd^4, \tag{4.7}$$

gde $q(d)$, za d izraženu u cm, reprezentuje q_U, q_{Th} ili q_K, u jedinicama (pGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), a za keramiku, adekvatni polinom je trećeg stepena (f = 0). Koeficijenti uz različite stepene d u ovoj funkciji, a, b, c, e, f, i odgovarajući parametri R^2 i δ(%), dati su u Tabeli 4.12.a),b),c).

Tabela 4.12.a) Parametri fitujuće funkcije za zavisnost doze od debljine zidova - beton

Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
a	-2.61916	0.415549	-0.893003
b	85.3926	99.2819	7.46974
c	-3.57279	-4.02275	-0.284714
e	$7.12013\cdot10^{-2}$	$7.88878\cdot10^{-2}$	$5.20009\cdot10^{-3}$
f	$-5.53184\cdot10^{-4}$	$-6.08683\cdot10^{-4}$	$-3.74764\cdot10^{-5}$
δ(%)	0.30	0.32	0.05
R^2	0.999999	0.999999	1

Tabela 4.12.b) Parametri fitujuće funkcije za zavisnost doze od debljine zidova - cigla

Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
a	-11.2221	-15.3866	-0.905169
b	58.8976	70.5714	5.07239
c	-1.92248	-2.12755	-0.130961
e	$3.11194\cdot10^{-2}$	$3.24347\cdot10^{-2}$	$1.61939\cdot10^{-3}$
f	$-2.04178\cdot10^{-4}$	$-2.0325\cdot10^{-4}$	$-7.81389\cdot10^{-6}$
δ(%)	0.05	0.07	0.15
R^2	1	1	1

Tabela 4.12.c) Parametri fitujuće funkcije za zavisnost doze od debljine zidova - keramika

Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
a	$9.92966\cdot10^{-3}$	$1.02699\cdot10^{-2}$	$6.75946\cdot10^{-4}$
b	83.2615	98.0069	7.35837
c	-2.32353	-1.91565	-0.190199
e	-0.120684	-0.209211	$4.14516\cdot10^{-3}$
δ(%)	0.02	0.02	0.02
R^2	1	1	1

Kombinacija građevinskih materijala; prostorija 5 x 4 x 2.8 m^3

Kako je, u realnim slučajevima, osnovni građevinski materijal u sastavu poda i plafona najčešće beton (u pitanju je, zapravo, slojevita struktura više materijala), pri čemu zidovi mogu biti od drugačijih materijala, komponenta doze koja potiče od plafona i poda razmotrena je odvojeno od doprinosa zidova. U prostoriji dimenzija 5 m x 4 m x 2.8 m, zavisnost od debljine materijala, d, u opsegu od 5 cm do 40 cm, za obe komponente jačine doze ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K [dobijena integracijom formule (4.2)], kvalitativno se ne razlikuje od odgovarajućih zavisnosti na Slikama 4.8.a) i 4.8.b). Kao i u prethodnom slučaju (uniformni sastav svih zidova prostorije), adekvatna fitujuća funkcija za $q(d)$, u (pGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), ima polinomni oblik, dat formulom (4.7). Svi parametri ove funkcije, za zračenje iz poda i plafona, kao i iz zidova od cigle, dati su u Tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Parametri fitujuće funkcije (4.7) za doprinose q_U, q_{Th} i q_K koji potiču od poda i plafona (beton) i zidova (cigla)

Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
		Pod i plafon - beton	
a	3.66968	5.84419	-0.227586
b	45.5946	53.0688	4.04862
c	-2.00105	-2.25359	-0.164068
e	$4.14421\cdot10^{-2}$	$4.58582\cdot10^{-2}$	$3.16516\cdot10^{-3}$
f	$-3.31608\cdot10^{-4}$	$-3.63735\cdot10^{-4}$	$-2.38867\cdot10^{-5}$
δ(%)	0.44	0.44	0.17
R^2	0.999998	0.999998	1
		Zidovi - cigla	
a	-6.25015	-8.10044	-0.402766
b	26.6441	31.8231	2.26256
c	-0.792587	-0.869676	$-5.14495\cdot10^{-2}$
e	$1.15331\cdot10^{-2}$	$1.17794\cdot10^{-2}$	$5.15956\cdot10^{-4}$
f	$-6.74338\cdot10^{-5}$	$-6.44748\cdot10^{-5}$	$-1.63439\cdot10^{-6}$
δ(%)	0.15	0.15	0.18
R^2	1	1	1

Doprinos veličinama q_U, q_{Th} i q_K u centru prostorije navedenih dimenzija, usled prisustva radionuklida u podu i plafonu, prikazan je u Tabeli 4.14. za debljine betona: 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm i 30 cm. U ovoj tabeli date su i jačine doze koje potiču od ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u zidovima od cigle, istih vrednosti *d*.

Tabela 4.14. Vrednosti q_U, q_{Th} i q_K usled zračenja poda i plafona (beton) i zidova (cigla), za određene debljine građevinskog materijala

d (cm)	q_U(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		q_{Th}(nGy h^{-1}/ Bqkg^{-1})		q_K(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})	
	Plafon i pod - beton	Zidovi - cigla	Plafon i pod - beton	Zidovi - cigla	Plafon i pod - beton	Zidovi - cigla
10	0.298	0.192	0.354	0.234	0.0268	0.0176
15	0.360	0.251	0.431	0.310	0.0330	0.0236
20	0.393	0.291	0.474	0.364	0.0366	0.0281
25	0.411	0.318	0.499	0.403	0.0386	0.0314
30	0.421	0.337	0.514	0.430	0.0397	0.0338

Tabela 4.15. Vrednosti q_U, q_{Th} i q_K usled zračenja prvog sloja (debljine *d* date u tabeli) u podu i plafonu (beton) i zidovima (cigla), prekrivenog slojem keramičkih pločica *d* = 0.5 cm

d (cm)	q_U(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})			q_{Th}(nGy h^{-1}/ Bqkg^{-1})			q_K(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		
	Plafon i pod - beton	Zidovi - beton	Zidovi - cigla	Plafon i pod - beton	Zidovi - beton	Zidovi - cigla	Plafon i pod - beton	Zidovi - beton	Zidovi - cigla
10	0.284	0.251	0.183	0.338	0.298	0.225	0.0256	0.0225	0.0170
15	0.342	0.312	0.238	0.410	0.372	0.296	0.0316	0.0285	0.0228
20	0.374	0.347	0.276	0.451	0.417	0.347	0.0349	0.0322	0.0271
25	0.391	0.367	0.301	0.475	0.444	0.383	0.0368	0.0344	0.0302
30	0.400	0.379	0.318	0.489	0.461	0.408	0.0378	0.0357	0.0324

Varijacija debljine bilo kog sloja u kombinacijama dva građevinska materijala, rezultuje promenama doze prvog (donjeg) sloja, u različitim iznosima. U Tabeli 4.15. date su vrednosti q_U, q_{Th} i q_K za pojedine debljine materijala prvog sloja, beton ili ciglu, prekrivenog keramičkim pločicama sa d = 0.5 cm, izračunate primenom fitujuće formule (4.4) u integraciji (3.2). Pritom, doprinos zračenja plafona i poda ukupnoj dozi u prostoriji, prikazan je odvojeno od odgovarajućeg doprinosa zidova. Dodatno, u Tabeli 4.16, predstavljene su vrednosti doze za pod debljine 15 cm, kao i 20 cm, prekriven slojem pločica različitih d.

Tabela 4.16. Vrednosti q_U, q_{Th} i q_K usled zračenja poda (beton), debljine 15 cm i 20 cm, prekrivenog slojem keramičkih pločica (debljine d date u tabeli)

d (cm)	q_U(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		q_{Th}(nGy h^{-1}/ Bqkg^{-1})		q_K(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})	
	d_1 = 15 cm	d_1 = 20 cm	d_1 = 15 cm	d_1 = 20 cm	d_1 = 15 cm	d_1 = 20 cm
0.3	0.173	0.189	0.207	0.228	0.0160	0.0177
0.7	0.169	0.185	0.203	0.223	0.0155	0.0172
1	0.166	0.181	0.200	0.220	0.0152	0.0168
1.5	0.161	0.176	0.195	0.214	0.0146	0.0162
2	0.157	0.171	0.190	0.209	0.0141	0.0156

Kombinacija građevinskih materijala; prostorija 2.5 x 3 x 2.5 m^3

Rezultati proračuna specifičnih jačina apsorbovane doze, u prostoriji 2.5 m x 3 m x 2.5 m, za vrednosti debljine zidova 15 cm i 20 cm, dati su u Tabeli 4.17. Pretpostavljeno je korišćenje keramičkih pločica debljine 0.5 cm, kao prekrivnog materijala poda i polovine ukupne površine zidova, a rezultati su prikazani za dve varijante građevinskog materijala zidova: beton i ciglu. Razmotreni slučaj odabran je kao karakteristični primer prostorije manjih dimenzija od standardne, u kojoj se, osim toga, koriste sva tri građevinska materijala.

Tabela 4.17. Vrednosti q_U, q_{Th} i q_K koje potiču od zračenja poda, plafona i zidova u prostoriji 2.5 m x 3 m x 2.5 m, za dve debljine betona i cigle: 15 cm i 20 cm i sloj 0.5 cm keramičkih pločica na polovini površine

Materijali	q_U(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		q_{Th}(nGy h^{-1}/ Bqkg^{-1})		q_K(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})	
	15 cm	20 cm	15 cm	20 cm	15 cm	20 cm
1. Pod: beton + pločice						
a) Beton, I sloj	0.117	0.129	0.140	0.155	0.0107	0.0120
b) Pločice (0.5 cm)	0.00731		0.00863		0.000645	
2. Plafon: beton	0.123	0.135	0.146	0.163	0.0112	0.0125
3.A) Zidovi: cigla + pločice						
a) Cigla, I sloj	0.154	0.177	0.191	0.223	0.0147	0.0173
b) Pločice (0.5 cm)	0.0123		0.0146		0.001090	
c) Cigla	0.162	0.187	0.201	0.234	0.0153	0.0181
3.B) Zidovi: beton +pločice						
a) Beton, I sloj	0.200	0.222	0.239	0.267	0.0184	0.0206
b) Pločice (0.5 cm)	0.0123		0.0146		0.001090	
c) Beton	0.210	0.233	0.250	0.279	0.0191	0.0215

Prostorija proizvoljnih dimenzija i debljine pojedinačnih zidova

Na osnovu vrednosti doza za pojedinačne zidove, izračunatih za varijetete njihovih dimenzija, debljine i rastojanja tačke detekcije (oko $3{\cdot}10^4$ kombinacija), primenom simboličke forme nelinearnog fitovanja u *Mathematica8*, izveden je analitički izraz za određivanje q_U, q_{Th} i q_K u prostorijama različitih dimenzija i proizvoljne debljine svakog zida. Pritom, širina (W) i

dužina (L) prostorije pripadale su istom intervalu, (250 – 1000) cm, visina (H) birana je u granicama od 250 cm do 400 cm, dok se debljina zidova nalazila u opsegu (10 – 30) cm. Odnos između dimenzija prostorije: (W : L), (H : W) i (H : L) menjan je od (1 : 1), za svaku relaciju, do (1 : 2), (1 : 2) i (1 : 3), respektivno. Svi proračuni obavljeni su za tačke detekcije na pravcu koji prolazi kroz centar zida, normalno na njegovu površinu, radi usklađivanja podataka pri određivanju ukupne jačine doze u centru prostorije.

Opšti oblik zavisnosti ispitan je sukcesivnom varijacijom parametara i nalaženjem fitujućih formula za posebne slučajeve. Kako je jačina doze koja potiče od zida invarijantna u odnosu na njegovu rotaciju oko normale koja sadrži tačku detekcije, pretpostavljena je simetrična funkcija u odnosu na dimenzije zida. Kombinacijom izraza, dobijena je formula (4.8) za dozu u centru prostorije (L, W, H), usled zračenja ^{238}U, ^{232}Th ili ^{40}K, iz pojedinačnog zida:

$$q_{zid}(x,y,z,d) = c_1 + \left(c_2 + c_3 d + c_4 d^2 + c_5 d^3 + c_6 d^4\right)\cdot \left[c_7 + c_8(x+y) + c_9(x+y)^{3/4} + c_{10}(x^2+y^2)^{1/2} + c_{11}(x^2+y^2)^{1/4} + c_{12}(x^3+y^3)^{1/4}\right]\cdot \left(c_{13} + \frac{c_{14}}{z} + \frac{c_{15}}{z^2} + \frac{c_{16}}{z^3} + \frac{c_{17}}{z^4}\right), \quad (4.8)$$

u kojoj d označava debljinu zida, x i y su njegove dimenzije, definisane parom brojeva iz skupa (W, L, H), a treća promenljiva, z, jednaka je preostaloj dimenziji prostorije. Za izračunavanje doze u (pGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), sve promenljive, x, y, z i d, u ovoj jednačini treba da budu izražene u cm. Sumiranjem rezultata za sve mogućnosti (x, y, z), uzevši, pri tom u obzir i odgovarajuće debljine zidova d, određuje se ukupna doza u prostoriji: $q_{U,Th,K} = \sum_{i=1}^{6} q_{zid}^{i}$.

Tabela 4.18. Vrednosti parametara fitujuće formule (4.8) za q_U, q_{Th} i q_K koji odgovaraju pojedinačnom zidu

Parametar	q_U	q_{Th}	q_K
c_1	-103.098	-121.161	-10.1179
c_2	$1.86390\cdot10^{5}$	$3.03635\cdot10^{5}$	$3.48356\cdot10^{5}$
c_3	$2.30057\cdot10^{4}$	$3.12512\cdot10^{4}$	$3.46197\cdot10^{4}$
c_4	$-9.26356\cdot10^{2}$	$-9.44183\cdot10^{2}$	$-9.66327\cdot10^{2}$
c_5	17.3449	9.03224	6.34465
c_6	$-1.20909\cdot10^{-1}$	$3.18805\cdot10^{-2}$	$8.17248\cdot10^{-2}$
c_7	$6.7656\cdot10^{-3}$	$6.17963\cdot10^{-3}$	$8.19885\cdot10^{-3}$
c_8	$-2.63172\cdot10^{-5}$	$-2.82437\cdot10^{-5}$	$-3.38455\cdot10^{-5}$
c_9	$3.4745\cdot10^{-4}$	$3.92562\cdot10^{-4}$	$4.40597\cdot10^{-4}$
c_{10}	$-5.18739\cdot10^{-6}$	$-9.69835\cdot10^{-6}$	$-6.99186\cdot10^{-6}$
c_{11}	$-1.65435\cdot10^{-3}$	$-1.75864\cdot10^{-3}$	$-2.117\cdot10^{-3}$
c_{12}	$1.02374\cdot10^{-4}$	$1.16499\cdot10^{-4}$	$1.36897\cdot10^{-4}$
c_{13}	$2.17559\cdot10^{-2}$	$2.40294\cdot10^{-2}$	$7.21019\cdot10^{-4}$
c_{14}	33.2027	2.33179	1.86494
c_{15}	$-3.24982\cdot10^{3}$	$9.43579\cdot10^{3}$	$-3.08344\cdot10^{2}$
c_{16}	$1.68997\cdot10^{5}$	$-2.69549\cdot10^{6}$	$35631.1\cdot10^{4}$
c_{17}	$-2.80693\cdot10^{5}$	$2.39245\cdot10^{8}$	$-1.59807\cdot10^{6}$
R^2	0.999246	0.999557	0.999412
δ_1 (%)	2.51	4.23	3.90
δ_2 (%)	3.85	4.79	4.68
δ_3 (%)	5.35	5.28	6.42

Parametri $c_1 - c_{17}$ u izrazu (4.8), koeficijenti determinisanosti, R^2, i maksimalne relativne greške fita, δ(%), dobijene analizom odstupanja rezultata primene formule (4.8) od podataka originalnog skupa, izračunatih integracijom (3.10), za q_U, q_{Th} i q_K, date su u Tabeli 4.18. Vrednosti δ, označene sa δ_1, δ_2 i δ_3 u ovoj tabeli, predstavljaju maksimalne relativne razlike koje odgovaraju slučajevima: 1) jednake debljine zidova u prostoriji; 2) proizvoljne debljine svakog zida u prostoriji i 3) pojedinačnih zidova. Za *W*, *L*, *H* izražene u cm, tabelirane razlike određene su za: 1) (*W*, *L*, *H*) = (600, 900, 350), *d* = 10 cm; 2) (*W*, *L*, *H*) = (600, 900, 350), *d* (pod i plafon) = 30 cm, *d* (zidovi) = 10 cm (za realnije kombinacije debljina, δ_2 se redukuje na 3.5%) i 3) pod (plafon) u prostoriji: (*W*, *L*, *H*) = (500, 750, 250), *d* = 10 cm (za procenu δ_3 uzete su u obzir samo doze zračenja poda, tj. plafona).

Vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze, izračunate po fitujućoj formuli (4.8) za primere prostorija od betona, prikazane su u Tabeli 4.19. U tabeli su date i odgovarajuće relativne greške u odnosu na rezultate numeričke integracije (3.10), izvršene korišćenjem izraza (4.2) za dozu radionuklida.

Tabela 4.19. Jačine doze q_U, q_{Th} i q_K, u (pGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), u centru prostorija sa dimenzijama (*W*, *L*, *H*) (cm), izračunate formulom (4.8). Debljine zidova: $(W, H)_1$, $(W, H)_2$, $(L, H)_1$, $(L, H)_2$ označene su sa: d_1, d_2, d_3, d_4 (cm). Za sve prostorije, debljine poda i plafona su: $d_5 = d_6 = 15$ cm [osim za standardnu: (*W*, *L*, *H*) = (400, 500, 280), *d* = 20 cm]. Relativne greške: δ (q_U), δ (q_{Th}) i δ (q_K), u (%), određene su u odnosu na vrednosti dobijene integracijom (3.10).

(*W*, *L*, *H*) (cm)	d_1, d_2, d_3, d_4 (cm) $d_5 = d_6 = 15$ cm	q_U	δ (q_U) (%)	q_{Th}	δ (q_{Th}) (%)	q_K	δ (q_K) (%)
250, 250, 250	15, 15, 15, 15	623	1.66	773	1.98	60.2	0.06
300, 300, 250	15, 20, 15, 20	696	1.05	821	0.27	63.1	0.05
280, 350, 250	10, 15, 10, 20	649	0.39	763	1.03	58.3	0.90
300, 400, 250	15, 20, 10, 15	668	0.80	791	0.05	60.4	0.00
400, 400, 250	10, 15, 10, 15	667	0.27	770	0.81	58.8	0.89
350, 450, 280	10, 20, 15, 20	686	0.03	822	0.22	62.8	0.11
350, 500, 260	10, 15, 10, 20	664	0.41	790	0.79	60.3	0.87
500, 500, 250	15, 20, 10, 15	693	0.04	824	0.56	63.6	0.12
450, 550, 280	10, 20, 10, 20	677	0.44	809	0.58	62.2	0.24
400, 600, 300	15, 20, 10, 15	687	0.30	810	0.38	62.2	0.66
450, 700, 300	20, 20, 15, 20	724	0.41	868	0.52	67.2	1.10
500, 750, 250	15, 20, 15, 20	738	1.52	879	0.72	68.3	1.78
500, 800, 300	10, 20, 10, 20	691	0.68	822	1.23	63.4	0.71
700, 800, 350	15, 20, 15, 20	709	1.78	845	2.16	65.5	1.65
600, 900, 350	10, 15, 10, 20	672	2.77	797	3.50	61.4	3.20
600, 900, 400	15, 20, 15, 20	698	2.78	830	3.46	64.4	2.52
500, 1000, 333.333	10, 15, 15, 20	700	2.13	831	3.07	64.2	2.54
500, 1000, 400	15, 20, 15, 20	703	2.43	788	3.02	64.8	2.35
Stand. prostorija	$t_1 - t_6$ =20 cm	756	0.13	915	0.55	70.7	0.71

4.1.2. Ekvivalentna doza u tkivima i organima; Efektivna doza

Interpolacijom konverzionih koeficijenata H_T/K_a, publikovanih u radovima *Zankl et al.* (1997) i *Lee et al.* (2007), koji se odnose na izotropnu geometriju polja γ-zračenja, za 45 energetskih grupa ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, u ovoj disertaciji proračunate su ekvivalentne doze za 14 specificiranih organa i ”ostatak” odraslog antropomorfnog fantoma, koje odgovaraju zračenju nizova radionuklida. Na osnovu tkivnih težinskih faktora (*ICRP* 2007), w_T, prema definiciji

(2.7), određena je i odgovarajuća efektivna doza. Pritom, korišćena je raspodela specifične apsorbovane doze po energijama (koja aproksimira kerma vazduha *free in air*), izračunata za standardnu prostoriju, čiji je logaritamski oblik dat na Slici 4.3. Rezultati dobijeni za veličine H_T i E prikazani su u Tabeli 4.20.a), dok su u Tabeli 4.20.b) predstavljeni konverzioni koeficijenti H_T/K_a i E/K_a, u (Sv Gy^{-1}), za zračenje ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, određeni pomoću odgovarajućih q_U, q_{Th} i q_K. Vrednosti H_T i H_T/K_a, izračunate za pojedine organe i tkiva ”ostatka”, prikazane su u Tabelama D.11.a),b), u dodatku disertacije.

Tabela 4.20.a) Ekvivalentna doza organa i tkiva *ICRP* (2007) i odgovarajuća efektivna doza, usled izlaganja γ- zračenju prirodnih radionuklida u standardnoj prostoriji

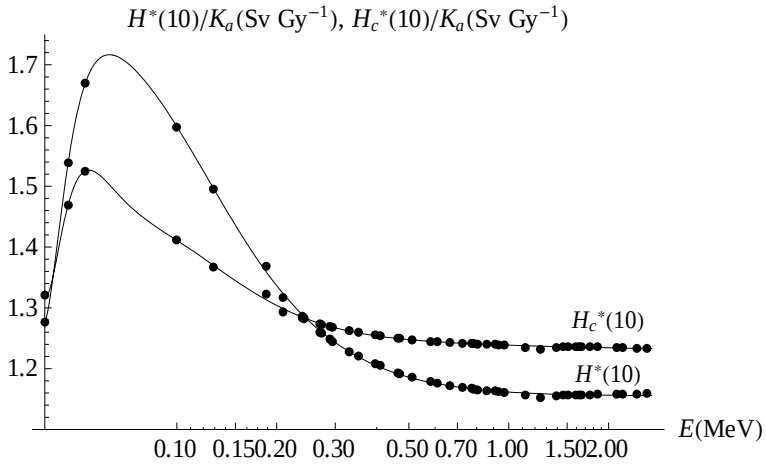
Organ/Tkivo	Ekvivalentna doza, H_T (nSv h^{-1}/Bq kg^{-1})		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Crvena koštana srž	0.544	0.668	0.0514
Debelo crevo	0.511	0.630	0.0488
Pluća	0.584	0.714	0.0552
Želudac	0.540	0.665	0.0514
Grudi	0.632	0.769	0.0592
Gonade	0.548	0.670	0.0521
Bešika	0.523	0.644	0.0502
Jednjak	0.532	0.653	0.0509
Jetra	0.546	0.670	0.0519
Tiroida	0.595	0.727	0.0559
Površina kosti	0.565	0.692	0.0526
Mozak	0.628	0.766	0.0593
Pljuvačne žlezde	0.561	0.687	0.0531
Koža	0.655	0.795	0.0612
Ostatak	0.529	0.650	0.0503
Efektivna doza	0.556	0.682	0.0527

Tabela 4.20.b) Konverzioni koeficijenti za ekvivalentnu dozu organa i tkiva *ICRP* (2007), kao i za efektivnu dozu, usled izlaganja γ- zračenju prirodnih radionuklida u standardnoj prostoriji

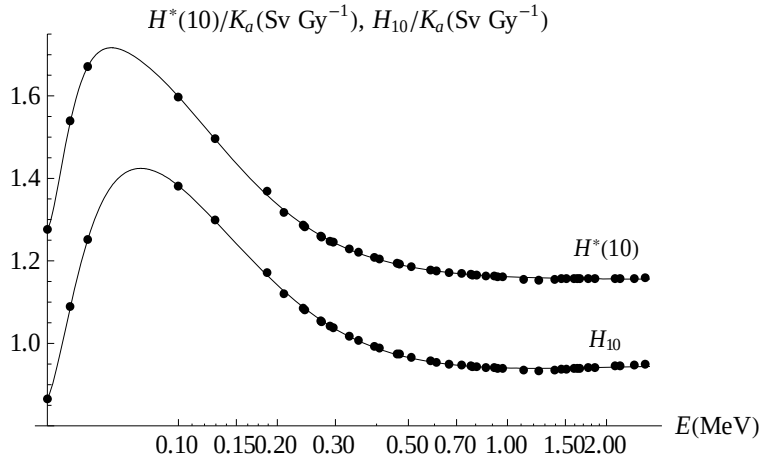
Organ/Tkivo	Konverzioni koeficijenti, H_T/K_a (Sv Gy^{-1})		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Crvena koštana srž	0.719	0.732	0.734
Debelo crevo	0.675	0.691	0.697
Pluća	0.771	0.783	0.789
Želudac	0.713	0.729	0.734
Grudi	0.835	0.843	0.846
Gonade	0.724	0.735	0.744
Bešika	0.691	0.706	0.717
Jednjak	0.703	0.716	0.727
Jetra	0.721	0.735	0.741
Tiroida	0.786	0.797	0.799
Površina kosti	0.746	0.759	0.751
Mozak	0.830	0.840	0.847
Pljuvačne žlezde	0.741	0.753	0.759
Koža	0.865	0.872	0.874
Ostatak	0.699	0.713	0.719
Efektivna doza	0.734	0.748	0.753

4.1.3. Operacione dozimetrijske veličine

Opisanom metodom "upravljanja i proširenja doze", izračunate su vrednosti ambijentalnog doznog ekvivalenta u centru standardne prostorije, za zračenje energetskih grupa ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K. Kako se ova veličina (kao i ostale) uobičajeno predstavlja u obliku konverzionog koeficijenta koji daje vezu sa kerma vazduha *free in air*, rezultati proračuna dati su u vidu zavisnosti $H^*(10)/K_a$ od energije, E, koja je prikazana na Slici 4.9. Na slici se nalazi i zavisnost konverzionog koeficijenta za ambijentalni dozni ekvivalent, $H_c^*(10)/K_a$, od energije radionuklida, dobijena pri uslovu da direktno zračenje iz svih pravaca u *ICRU* tkivu prelazi rastojanje r_t = 1 cm (polje nije upravljeno). Očigledno, diferenciranje vrednosti $H^*(10)/K_a$, tj. $H_c^*(10)/K_a$, koje odgovaraju oblastima nižih i viših energija znatno je izraženije u prvom slučaju.

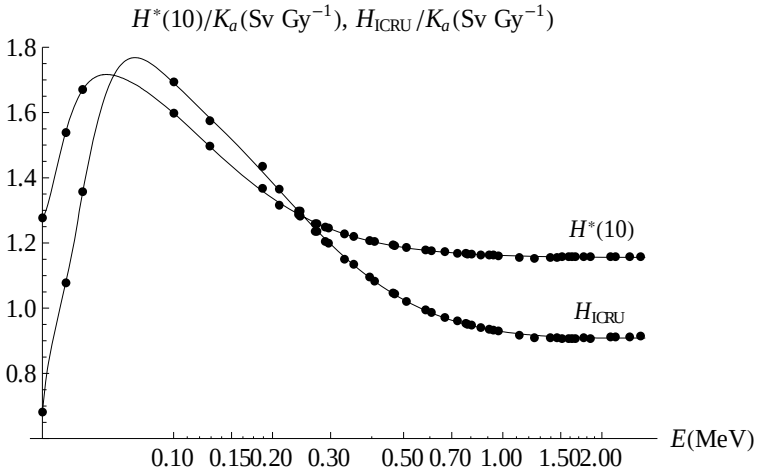


Slika 4.9. Konverzioni koeficijent za ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(10)/K_a$; dva načina proračuna



Slika 4.10. Konverzioni koeficijenti za ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(10)/K_a$ i dozni ekvivalent u tački 1 cm ispod površine *ICRU* sfere, H_{10}/K_a

Slike 4.10. i 4.11. predstavljaju rezultate proračuna doznog ekvivalenta - apsorbovane doze u tački na rastojanju 1 cm od površine *ICRU* sfere, označene u ovoj disertaciji sa H_{10}, kao i efektivnog doznog ekvivalenta – srednje apsorbovane doze u *ICRU* sferi, H_{ICRU}, respektivno. Na istim slikama ovi konverzioni koeficijenti upoređeni su sa već prikazanom zavisnošću $H^*(10)/K_a$ od energije.



Slika 4.11. Konverzioni koeficijenti za za ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(10)/K_a$ i efektivni dozni ekvivalent za *ICRU* sferu, H_{ICRU}/K_a

Uočava se sličan oblik krivih H_{10}/K_a i $H^*(10)/K_a$, sa nižim vrednostima doznog ekvivalenta u celom opsegu energija, tako da je, aproksimativno od 0.5 MeV, količnik $H^*(10)/H_{10}$ konstantan (oko 1.23). Pri porastu energije, varijacije koeficijenta H_{ICRU}/K_a naglašenije su od odgovarajućih promena $H^*(10)/K_a$: u delu niskoenergetske oblasti, vrednosti efektivnog doznog ekvivalenta premašuju $H^*(10)$, za više energije odnos je obrnut, a približno stalan količnik ovih veličina (oko 1.27) postiže se u oblasti $E > 1$ MeV.

Vrednost energije kojoj odgovara maksimalni koeficijent konverzije takođe se razlikuje: za $H^*(10)/K_a$ ona iznosi 63 keV, u slučaju $H_c^*(10)/K_a$ nalazi se na 54 keV, dok je položaj maksimuma H_{10}/K_a, kao i H_{ICRU}/K_a, pomeren ka nešto višim energijama, 77 keV i 76 keV, respektivno. Ovi podaci dobijeni su na osnovu maksimuma fitujućih funkcija (datih linijama na svim slikama), koje imaju opšti oblik:

$$f(E) = \sum_{n=0}^{7} a_n E^{-n} , \tag{4.9}$$

gde $f(E)$ označava bilo koji od razmatranih konverzionih koeficijenata, a E se izražava u MeV. U Tabeli 4.21. navedeni su parametri fitujuće formule (4.9), a_n, R^2 i δ(%), koji konkretizuju zavisnosti koeficijenata $H^*(10)/K_a$, $H_c^*(10)/K_a$, H_{10}/K_a i H_{ICRU}/K_a od E, čije vrednosti za pojedine energije su prikazane u Tabeli 4.22.

U proračunu operacione dozimetrijske veličine za zračenje niza radionuklida, sumirane su vrednosti date veličine izračunate za pojedine energetske grupe, a odgovarajući konverzioni koeficijent određen je kao količnik dobijenog zbira i kerma radionuklida (u pitanju su, naravno, vrednosti kerma za jediničnu koncentraciju aktivnosti radionuklida, tj. q_{U}, q_{Th} ili q_{K}). Vrednosti $H^*(10)$, H_{10} i H_{ICRU}, kao i $H^*(10)/K_a$, H_{10}/K_a i H_{ICRU}/K_a, izračunate na ovaj način za γ- zračenje nizova ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, predstavljene su u Tabeli 4.23. Navedene su i vrednosti

ambijentalnog doznog ekvivalenta $H_c^*(10)$ i konverzionog koeficijenta $H_c^*(10)/K_a$, izračunate za fiksnu dužinu trajektorije zračenja u tkivu (r_t = 1 cm).

Tabela 4.21. Parametri fitujuće funkcije za zavisnost konverzionih koeficijenata $H^*(10)/K_a$, $H_c^*(10)/K_a$, H_{10}/K_a i H_{ICRU}/K_a, od energije zračenja

Parametar	$H^*(10)/K_a$ (Sv Gy^{-1})	$H_c^*(10)/K_a$ (Sv Gy^{-1})	H_{10}/K_a (Sv Gy^{-1})	H_{ICRU}/K_a (Sv Gy^{-1})
a_0	1.15601	1.22909	0.956081	0.923356
a_1	$-4.50921\cdot10^{-3}$	$1.28563\cdot10^{-2}$	$-4.33742\cdot10^{-2}$	$-7.2955\cdot10^{-2}$
a_2	$9.98562\cdot10^{-3}$	$-5.5253\cdot10^{-3}$	$318565\cdot10^{-2}$	$9.68421\cdot10^{-2}$
a_3	$2.05802\cdot10^{-4}$	$2.56896\cdot10^{-3}$	$-4.44061\cdot10^{-3}$	$-2.15609\cdot10^{-2}$
a_4	$-1.83984\cdot10^{-4}$	$-3.9379\cdot10^{-4}$	$3.12605\cdot10^{-4}$	$2.34367\cdot10^{-3}$
a_5	$1.64882\cdot10^{-5}$	$2.79201\cdot10^{-5}$	$-1.24221\cdot10^{-5}$	$-1.35314\cdot10^{-4}$
a_6	$-6.07903\cdot10^{-7}$	$-9.36912\cdot10^{-7}$	$2.49283\cdot10^{-7}$	$3.91428\cdot10^{-6}$
a_7	$8.19869\cdot10^{-9}$	$1.19585\cdot10^{-8}$	$-1.83397\cdot10^{-9}$	$-4.45262\cdot10^{-8}$
δ(%)	0.65	<0.01	0.67	0.60
R^2	0.999996	0.999998	0.999992	0.999984

Tabela 4.22. Vrednosti konverzionih koeficijenata $H^*(10)/K_a$, $H_c^*(10)/K_a$, H_{10}/K_a i H_{ICRU}/K_a, za pojedine energije γ- zračenja

Energija (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv Gy^{-1})	$H_c^*(10)/K_a$ (Sv Gy^{-1})	H_{10}/K_a (Sv Gy^{-1})	H_{ICRU}/K_a (Sv Gy^{-1})
0.040	1.28	1.32	0.87	0.68
0.050	1.62	1.51	1.18	1.22
0.060	1.71	1.51	1.36	1.60
0.080	1.67	1.45	1.42	1.76
0.100	1.60	1.41	1.38	1.69
0.150	1.44	1.34	1.24	1.52
0.200	1.34	1.30	1.14	1.38
0.300	1.24	1.27	1.03	1.20
0.400	1.20	1.25	0.99	1.09
0.500	1.19	1.25	0.97	1.03
0.600	1.18	1.24	0.95	0.99
0.800	1.17	1.24	0.94	0.95
1	1.16	1.24	0.94	0.93
1.5	1.16	1.24	0.94	0.91
2	1.16	1.23	0.94	0.91
3	1.15	1.23	0.95	0.91

Tabela 4.23. $H^*(10)$, $H_c^*(10)$, H_{10}, H_{ICRU} u (nSv h^{-1}/Bq kg^{-1}), $H^*(10)/K_a$, $H_c^*(10)/K_a$, H_{10}/K_a, H_{ICRU}/K_a, u (Sv Gy^{-1}) za zračenje primordijalnih radionuklida

	$H^*(10)$	$H_c^*(10)$	H_{10}	H_{ICRU}	$H^*(10)/K_a$	$H_c^*(10)/K_a$	H_{10}/K_a	H_{ICRU}/K_a
	(nSv h^{-1}/Bq kg^{-1})				(Sv Gy^{-1})			
^{238}U	0.887	0.940	0.722	0.742	1.17	1.24	0.954	0.980
^{232}Th	1.070	1.132	0.874	0.878	1.17	1.24	0.958	0.963
^{40}K	0.0809	0.0865	0.0656	0.0635	1.15	1.24	0.937	0.908

4.2. Rezultati merenja i određivanja doza

4.2.1. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima

Rezultati ispitivanja koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida: ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u građevinskim materijalima (ukupno 113 uzoraka), nabavljenim na teritoriji okruga grada Niša i sa graničnih prelaza, predstavljeni su u Tabelama 4.24. a) – e). Radi preglednosti, u tabelama su grupisani podaci za uzorke koji pripadaju osnovnim vrstama građevinskih materijala: sirovine, vezivni strukturni, noseći strukturni i prekrivni konstrukcioni materijali. Za svaki uzorak, precizirano je odgovarajuće poreklo: lokalitet nalazišta ili naziv proizvođača. U Tabeli 4.25. prikazani su opsezi i srednje vrednosti sadržaja ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u pojedinim vrstama materijala, kao i pripadajuće standardne devijacije, računate u slučajevima merenja 5 ili više uzoraka iste vrste.

Tabela 4.24.a) Koncentracija aktivnosti, *A* (Bq/kg), prirodnih radionuklida u sirovinskim građevinskim materijalima

Vrsta sirovine	Poreklo sirovine/Naziv proizvodjača	*A* (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Pesak	Južna Morava, Doljevac (Niš)	11±1	15±2	332±35
	Južna Morava (Niš)	12±1	13±2	357±36
	Nišava, Dolac (Niš)	12±1	15±2	348±38
	Gradilište BO, Niš	12±1	18±2	323±35
	Dunav (pesak “Dunavac“)	13±1	19±2	382±40
Kvarcni pesak	Rgotina (Zaječar)	7±1	<2	182±20
	“Vitex-Hermes“, Aspropyrgos, Grčka	2±0.2	<1	23±3
Šljunak	Južna Morava, Doljevac (Niš)	16±2	13±1	354±36
	Nišava, Dolac (Niš)	14±1	17±2	305±32
	Gradilište BO, Niš	26±3	12±1	341±36
Feldspat	“Gotica“, Strumica, Makedonija	46±3	70±4	167±9
	“Ogražden“, Strumica, Makedonija	26±2	70±4	47±3
	“Glass Trading“, Strumica, Makedonija	20±1	42±3	52±6
Kaolin	“Neven“ LTD, Ruse, Bugarska	12±0.7	36±2	243±13
	“Imerys Minerals LTD“, V. Britanija	52±3	43±2	232±12
Bentonit	“Union Alfa“, Skopje, Makedonija	24±2	64±4	540±28
Glina - sušena	“Colorobbia“, Firenze, Italija	36±4	47±5	270±29
Dolomit	“Vitex-Hermes“, Aspropyrgos, Grčka	<1	<1	8±1
Kamen	“Sokolov Treyd“, Bugarska	16±2	39±4	547±59
peščar	“Sokolov Treyd“, Bugarska	30±4	38±4	1282±131
od škriljaca	“Gugulanovi LTD“, Kardjali, Bugarska	20±2	8±1	747±75
Cirkobit	“Industrie Bitoss“, Sovigliana, Italija	2891±310	493±51	47±5

Tabela 4.24.b) Koncentracija aktivnosti, *A* (Bq/kg), prirodnih radionuklida u vezivnim strukturnim građevinskim materijalima

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	*A* (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Cement	Portland cement I, “Holcim“, Srbija	20±1	16±1	45±2
	Portland cement II (SR), “Holcim“, Srbija	43±2	19±1	197±11
	Beli cement “Titan“, Solun, Grčka	16±1	19±1	120±6
	Beli cement “Titan“, Atina, Grčka	18±1	14±0.7	47±3
	Beli cement “BA Apostolos & Son“ Grčka	17±1	15±1	53±3

	Beli cement “Devnja cement“ Bugarska	20±1	9±0.5	18±1
Klinker	“Holcim“, Bugarska	18±2	20±2	263±29
Kreč	Krečana Mali Krčimir (Niš)	<1	<2	<3
	Krečana Jelašnica (Niš)	2±0.2	<1	<2
	Gradilište NH1, Niš	4±0.2	<1	13±0.7
Gips	“Gips - Koshava“ AD, Bugarska	10±0.5	5±0.3	48±3
	“Komar“ DD, Donji Vakuf, Bosna	7±0.4	3±0.2	59±3
	“Košava“AD, Bugarska	9±0.5	2±0.1	24±1
	“Knauf Radika“, Debar, Makedonija	5±0.3	<1	12±0.6
pečeni	“Digips“, Debar, Makedonija	7±0.4	<2	7±0.4
drobljeni	“Knauf Radika“, Debar, Makedonija	4±0.2	<2	<2
Alabaster gips	“Knauf Radika“, Debar, Makedonija	5±0.3	<2	30±2
Perlit	“S & B Industrial Minerals“, Atina, Grčka	58±3	69±4	1068±52
Talk	“Ionian Kalk“, Piree, Grčka	4±0.2	<2	24±1
	“Vitex-Hermes“, Aspropyrgos, Grčka	5±0.3	<1	21±1

Tabela 4.24.c) Koncentracija aktivnosti, *A* (Bq/kg), prirodnih radionuklida u nosećim strukturnim građevinskim materijalima (Opekarski proizvodi)

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	*A* (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Puna cigla	Ciglana “Ćele Kula“, Niš	32±3	40±5	532±56
	Ciglana “Čila“, Lalinac (Niš)	28±3	39±4	465±48
	Ciglana Knežica (Niš)	40±4	45±5	580±61
	“Jovica Todorović“, Guberevac (Niš)	34±4	41±5	547±56
	Ciglana “Mića“, Niš	35±4	48±5	530±55
	Ciglana Negotin	33±4	29±3	418±51
	Ciglana Pančevo (okolina)	42±5	52±6	519±53
	Gradilište NH1, Niš	30±3	41±5	488±51
	Gradilište NH2, Niš	34±4	45±5	462±48
“Trokanalka“	“Toza Marković“, Kikinda	31±4	39±5	544±58
Blokovi – cigla	(fert monta) “Ćele Kula“, Niš	29±4	44±6	479±49
	(giter) “Ćele Kula“, Niš	27±3	39±4	464±48
	“Euro Atlantic“, Bojnik	24±3	41±5	460±48
	(giter) “Vojvoda Prijezda“, Stalać	30±3	41±4	485±50
	“Rad“, Vlasotince	29±3	38±5	429±44
	“Gitarić“, Ciglana “Salaš“, Zaječar	7±1	11±1	108±12
	(monta) Ciglana “Salaš“, Zaječar	6±1	11±1	112±12
	“Mladost“, Mala Plana	26±3	39±4	412±42
	“Progres“, Velika Plana	37±4	50±5	462±48
	(fert) “Opeka“, Smederevska Palanka	39±4	54±6	583±61
	(giter) “Naša Sloga“, Kovin	29±3	33±4	453±47
	“Sloga“, Petrovaradin	36±4	47±5	456±50
	(giter) “Igma“, Uljma	41±5	48±5	536±59
	“Izop“, Vojvodina	35±4	46±5	506±54
Silikatna cigla	“Rapid“, Apatin	45±5	7±1	162±17
Fasadna cigla	“Zorka“ Šabac	40±5	55±6	620±63
	Ciglana Negotin	25±3	32±3	383±42
Vatrostalna cigla	“Magnohrom“, Kraljevo	3±0.3	<1	12±1

Tabela 4.24.d) Koncentracija aktivnosti, *A* (Bq/kg), prirodnih radionuklida u nosećim strukturnim građevinskim materijalima (Beton, Gas-beton, Gips-karton)

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	*A* (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Beton (*Manić et al.* 2012)	"GMG Trejd", Gadžin Han (Niš)	8±1	8±1	157±17
	"Braća Maljković", Malča (Niš)	20±2	16±2	313±34
	"Šilo Prom", Belotinac (Niš)	17±2	9±1	252±25
	"Fagrem", Aleksinac	32±3	24±3	207±24
	"Cuki", Paraćin	12±1	10±1	221±24
	"Invest Gradnja Co", Kragujevac	17±2	12±2	298±35
	Gradilište NH1, Niš	10±1	14±2	268±29
	Gradilište NH2, Niš	28±3	20±2	290±31
	(za spoljnu upotrebu) "Arhibet", Niš	45±5	54±6	110±12
Gas-beton	"Xella", Vreoci	12±0.6	<1	90±5
	Gradilište KE, Niš	36±2	<2	148±8
Gips-karton	"Delta build", Niš	4±0.2	<2	32±2

Tabela 4.24.e) Koncentracija aktivnosti, *A* (Bq/kg), prirodnih radionuklida u prekrivnim građevinskim materijalima

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	*A* (Bq/kg)		
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Keramičke pločice	(zidne) "Polet", Bečej	48±5	57±6	746±81
	(podne) "Polet", Bečej	50±6	57±6	696±73
	"Toza Markovic", Kikinda	43±5	49±6	556±58
	"Keramika Kanjiža", Kanjiža	66±7	65±7	729±75
	(podne) "Zorka keramika", Šabac	75±8	58±6	720±81
	"Keramika-Vojnić", Hrvatska	41±5	35±4	619±62
	"Martex", Slovenija	30±3	38±4	423±44
	(zidne) "KAI Group", Bugarska	41±5	39±5	253±28
	(podne1) "KAI Group", Bugarska	45±5	60±7	443±45
	(podne2) "KAI Group", Bugarska	32±4	52±6	195±21
	(zidne) "Prima", Španija	54±6	59±6	940±100
	(podne) "Pamisa", Španija	48±5	55±6	870±90
	"Gemma", Egipat	32±4	47±5	607±62
Granitna pločica	(podne) "Emil Ceramica Group", Italija	34±4	38±5	403±45
Crep	"Mladost", Leskovac	32±4	44±5	503±58
	"Tondach - Potisje Kanjiža", Kanjiža	38±4	45±5	484±52
	"Toza Marković", Kikinda	43±5	58±6	737±75
	("biber") "Toza Marković", Kikinda	38±4	33±4	821±87
Granit	"Granit", Jablanica, Bosna i Hercegovina	<2	<2	70±8
	"Mermeren komb.", Prilep, Makedonija	23±3	33±4	560±59
	"Krin DOO", Prilep, Makedonija	61±7	67±9	1143±133
	"Pirin Mramor", Sandanski, Bugarska	31±3	47±5	812±83
	"Pavlidis", Drama, Grčka	12±1	16±2	214±27
	"Pavlidis", Drama, Grčka	12±1	19±2	997±100
	"Asan Insaat", Ankara, Turska	16±2	15±2	327±35
	vrsta "New Imperial Red", Kina	89±9	110±10	730±75
Mermer	(lomljeni) "Šumadija granit" Aranđelovac	2±0.2	<2	<3
	"Mermeren komb.", Prilep, Makedonija	<2	<2	6±0.7
	"Predsednik", Vratsa, Bugarska	11±1	2±0.3	33±4
	"Komuru Cuoglu Mermer", Turska	3±0.4	<1	3±0.3
Travertin	"Feranex", Vaduz, Turska	10±1	28±3	208±22

Tabela 4.25. Opsezi, ($A_{Min} - A_{Max}$) (Bq/kg), i vrednosti koncentracija aktivnosti, $\overline{A} \pm \sigma$, prirodnih radionuklida u pojedinim vrstama građevinskih materijala; $\overline{A}$ (Bq/kg) i σ (Bq/kg) označavaju odgovarajuću srednju vrednost i standardnu devijaciju, respektivno

Vrsta materijala	($A_{Min} - A_{Max}$) (Bq/kg), $\overline{A}$ (Bq/kg) ± σ (Bq/kg)					
	^{226}Ra		^{232}Th		^{40}K	
Poreklo: Srbija						
Pesak	(11 – 13)	12±0.9	(13 – 19)	16±2	(323 – 382)	348±23
Šljunak	(14 – 26)	19	(12 – 17)	14	(305 – 354)	333
Portland cement	(20 – 43)	32	(16 – 19)	18	(45 – 197)	121
Kreč	(0 - 4)	2	(0 - 2)	2	(0 - 13)	6
Cigla - puna	(28 – 42)	34±4	(29 – 52)	42±6	(418 – 580)	505±50
Cigla - blok	(6 – 41)	28±10	(11 – 54)	39±12	(108 – 583)	433±138
Cigla (svi proizvodi)	(6 – 42)	31±9	(11 – 54)	40±11	(108 – 583)	460±117
Beton	(8 – 32)	18±8	(8 – 24)	14±6	(157 – 313)	251±53
Gas-beton	(12 – 36)	24	(0 – 2)	1	(90 – 148)	119
Keramičke pločice	(43 – 75)	56±14	(49 – 65)	57±6	(556 – 746)	689±77
Crep	(32 – 43)	38	(33 – 58)	45	(503 – 821)	636
Mermer		2		1		2
Poreklo: Uvoz						
Kamen	(16 – 30)	22	(8 – 39)	28	(547 – 1282)	859
Feldspat	(20 – 46)	31	(42 – 70)	61	(47 – 167)	89
Cement, beli	(16 – 20)	18	(9 – 19)	14	(18 – 120)	60
Gips	(4 – 10)	7±2	(1 – 5)	2±1	(2 – 59)	26±21
Keramičke pločice	(30 – 54)	40±9	(35 – 60)	48±10	(195 – 940)	544±268
Granit	(0 – 89)	31±29	(0 – 110)	39±35	(70 – 1143)	607±382
Mermer	(0 – 11)	5	(0 – 2)	2	(3 – 33)	14
Keram. pločice (sve)	(30 – 75)	46±13	(35 - 65)	52±9	(195 – 940)	600±222

4.2.2. Apsorbovana doza u vazduhu i efektivna doza za izlaganje u prostoriji

4.2.2.1. *Doze od pojedinačnih građevinskih materijala*

Vrednosti apsorbovane doze u vazduhu, koje odgovaraju γ- zračenju nizova ^{238}U (^{226}Ra) i ^{232}Th, kao i ^{40}K, iz istraživanih građevinskih materijala, predstavljene su u Tabelama 4.26. a) – e). Ovi rezultati dobijeni su pomoću izraza (3.3), korišćenjem specifičnih jačina apsorbovane doze (q_U, q_{Th} i q_K) za prostoriju 5 x 4 x 2.8 m^3, izračunatih u ovoj disertaciji, i izmerenih koncentracija radionuklida, datih podacima u Tabelama 4.24. a) - e).

Za građevinske materijale: beton (prvih 6 uzoraka - blokovi, ostala 2 - puni beton), puna cigla i sve vrste blokova od opeke, primenjeni su q_U, q_{Th} i q_K prikazani u Tabeli 4.14, koji se odnose na upotrebu u konstrukciji zidova debljine 20 cm, a za blokove od cigle (fert monta, kanalice) razmotrena je primena i u plafonu debljine 15 cm. Pritom, prisustvo šupljina i kanala u zapremini blokova uključeno je u minimalnom procentualnom udelu, 30%. U slučaju keramičkih pločica, za q_U, q_{Th} i q_K uzeti su rezultati iz Tabele 4.4. za debljinu "zidova" 0.5 cm, umanjeni za vrednosti koje odgovaraju pločicama na plafonu [tj: q_U = 0.0294, q_{Th} = 0.0342, q_K = 0.00260, u (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1})]. Za ostale prekrivne materijale: granit, mermer, travertin, korišćeni su podaci dobijeni za debljinu sloja keramičkih pločica d = 2 cm, dati u Tabeli 4.11, izuzimajući takođe komponentu doze koja potiče od "plafona" [q_U = 0.109, q_{Th} = 0.118, q_K = 0.0097, u (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1})].

Gas-beton i gips-karton tretirani su kao materijali sa gustinom cigle, koji se upotrebljavaju za izradu zidova debljine 20 cm i 10 cm, respektivno (Tabela 4.14), a za crep, fasadnu i vatrostalnu ciglu odgovarajuća doza određena je pretpostavljajući da udeo ovih materijala u ukupnoj građevinskoj masi iznosi: $w_m = 0.1$, tj. $w_m = 0.05$ (crep). Na osnovu pretpostavljenog masenog udela (*Ahmad et al.* 1998, *Tzortzis et al.* 2003, *Brígido Flores et al.* 2008), približno su izračunate i jačine apsorbovane doze za sirovinske i vezivne strukturne materijale. Korišćenjem podataka (*Cement & Concrete* 2012) za uobičajeni (srednji) sadržaj peska, šljunka i cementa u betonu: 35%, 50% i 15%, respektivno, doze za ove materijale određene su primenom otežinjenih q_U, q_{Th} i q_K, za prostoriju čiji zidovi imaju debljinu 20 cm, dok je debljina poda i plafona $d = 15$ cm, sa $w_m = 0.5$ za plafon (Tabela 4.14). Dodatni sadržaj peska i cementa, u odnosu 1:1, u podnom betonu - "košuljici" debljine 2 cm, takođe je uzet u obzir [$q_U = 0.0413$, $q_{Th} = 0.0486$, $q_K = 0.00362$, u jedinicama (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1})], kao i 50% peska u sloju maltera iste debljine, koji se nanosi preko zidova.

Jačine apsorbovane doze koje slede iz upotrebe kreča, perlita i gipsa u prekrivnom sloju (malteru, glet-masi ili gipsanim pločama), u maksimalnoj količini 50% odnosno 100%, izračunate su aproksimiranjem ovog sloja betonom debljine 2 cm, isključujući doprinos poda [$q_U = 0.107$, $q_{Th} = 0.128$, $q_K = 0.00958$, u jedinicama (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1})]. Pored toga, za kreč (i pesak) dodat je iznos koji odgovara malteru za zidanje - spajanje nosećih strukturnih elemenata [parametri za betonske zidove, 20 cm, $w_m = 0.05$ (kreč), $w_m = 0.1$ (pesak)], kao i doza koja sledi iz primene u proizvodnji pregradnih zidova na bazi ovog materijala ($w_m = 0.30$). Izlaganje zračenju zidova od gips-kartona debljine 10 cm, uračunato je kao dodatna komponenta doze za gips ($w_m = 1$).

Feldspat, kaolin, glina nespecificiranog tipa, razmotreni su kao jedini materijali (100%) u sastavu keramičkih pločica debljine 2 cm (bez doprinosa plafona), dok je određivanje doze za dolomit i kamen zasnovano na pretpostavci maksimalnog korišćenja - u vidu građevinskog kamena i primeni parametara za zidove standardne prostorije. Doza koja odgovara cirkobitu, koji se koristi za pripremu glazura u industriji keramičkih proizvoda, procenjena je na osnovu količine od 1% u keramičkim pločicama debljine 2 cm, a bentonit je tretiran kao dodatak cementu, u iznosu 5% (*Manić et al*. 1997).

Za određivanje jačina efektivne doze koje potiču od gama zračenja ^{238}U (^{226}Ra), ^{232}Th i ^{40}K u istraživanim građevinskim materijalima, prikazanim u Tabelama 4.26.a)-e), primenjen je podatak *UNSCEAR*-a (2000) za faktor "zauzetosti" prostorije, odnosno procenat vremena boravka u zatvorenom prostoru: $f = 0.8$. Pritom, za konverzione koeficijente E/K_a, korišćeni su rezultati proračuna u disertaciji (Tabela 4.20.b), zaokrugljeni na jedinstvenu vrednost $E/K_a = 0.740$ Sv Gy^{-1} (za jednostavnije izračunavanje), tako da je efektivna doza data izrazom:

$$E(\mathrm{mSv\,y^{-1}}) = D(\mathrm{nGy\,h^{-1}}) \cdot 8760(\mathrm{h\,y^{-1}}) \cdot 0.8 \cdot 0.740(\mathrm{Sv\,Gy^{-1}}) \cdot 10^{-6}\,. \qquad (4.10)$$

U Tabelama 4.26.a)-e) dati su rezultati za efektivnu dozu koji premašuju 10 μSv, obzirom da je sa aspekta zaštite od zračenja izlaganje nižem nivou doze zanemarljivo (*NEA-OECD* 2011), i nije obuhvaćeno odgovarajućim regulativama (*ICRP* 1991, 2007). Tabela 4.27. prikazuje srednje vrednosti jačine apsorbovane doze, kao i odgovarajuće jačine efektivne doze, koje potiču od pojedinih vrsta građevinskih materijala, predstavljenih u Tabeli 4.25. Na ovom mestu, prikazane su i vrednosti dobijene za granit i mermer pri upotrebi u vidu strukturnih materijala (zidovi), gustine keramičkih pločica.

Tabela 4.26.a) Jačina apsorbovane doze, D(nGy h^{-1}), i jačina efektivne doze, E(mSv y^{-1}), za izlaganje gama zračenju iz sirovinskih građevinskih materijala

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	D (nGy h^{-1})	E(mSv y^{-1})
Pesak	Južna Morava, Doljevac (Niš)	18.5±2.1	0.096±0.01
	Južna Morava (Niš)	18.8±2.1	0.097±0.01
	Nišava, Dolac (Niš)	19.3±2.1	0.10±0.01
	Gradilište BO, Niš	19.7±2.1	0.10±0.01
	Dunav (pesak "Dunavac")	22.0±2.2	0.11±0.01
Kvarcni pesak	Rgotina (Zaječar)	8.11±0.96	0.042±0.005
	"Vitex-Hermes", Aspropyrgos, Grčka	1.65±0.2	<0.01
Šljunak	Južna Morava, Doljevac (Niš)	20.3±2.1	0.11±0.01
	Nišava, Dolac (Niš)	19.8±2.0	0.10±0.01
	Gradilište BO, Niš	22.7±2.4	0.12±0.01
Feldspat	"Gotica", Strumica, Makedonija	14.9±0.89	0.077±0.005
	"Ogražden", Strumica, Makedonija	11.6±0.72	0.060±0.004
	"Glass Trading", Strumica, Makedonija	7.64±0.52	0.040±0.003
Kaolin	"Neven" LTD, Ruse, Bugarska	7.91±0.44	0.041±0.002
	"Imerys Minerals LTD", V. Britanija	13.0±0.68	0.067±0.004
Bentonit	"Union Alfa", Skopje, Makedonija	<1	<0.01
Glina - sušena	"Colorobbia", Firenze, Italija	12.1±1.3	0.063±0.007
Dolomit	"Vitex-Hermes", Aspropyrgos, Grčka	<1.07	<0.01
Kamen	"Sokolov Treyd", Bugarska	41.2±4.4	0.21±0.02
peščar	"Sokolov Treyd", Bugarska	70.4±7.6	0.36±0.04
od škriljaca	"Gugulanovi LTD", Kardjali, Bugarska	35.7±3.7	0.18±0.02
Cirkobit	"Industrie Bitoss", Sovigliana, Italija	3.74±0.40	0.019±0.002

Tabela 4.26.b) Jačina apsorbovane doze, D(nGy h^{-1}), i jačina efektivne doze, E(mSv y^{-1}), za izlaganje gama zračenju iz vezivnih strukturnih materijala

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	D (nGy h^{-1})	E(mSv y^{-1})
Cement	Portland cement I, "Holcim", Srbija	5.00±0.28	0.026±0.001
	Portland cement II (SR), "Holcim", Srbija	9.68±0.49	0.050±0.002
	Beli cement "Titan", Solun, Grčka	5.75±0.32	0.030±0.002
	Beli cement "Titan", Atina, Grčka	4.52±0.24	0.024±0.001
	Beli cement "BA Apostolos & Son" Grčka	4.60±0.24	0.024±0.001
	Beli cement "Devnja cement" Bugarska	3.75±0.20	0.019±0.001
Klinker	"Holcim", Bugarska	7.62±0.81	0.039±0.004
Kreč	Krečana Mali Krčimir (Niš)	<1	<0.01
	Krečana Jelašnica (Niš)	<1	<0.01
	Gradilište NH1, Niš	<1	<0.01
Gips	"Gips - Koshava" AD, Bugarska	6.10±0.34	0.032±0.002
	"Komar" DD, Donji Vakuf, Bosna	4.78±0.27	0.025±0.001
	"Košava"AD, Bugarska	4.07±0.21	0.021±0.001
	"Knauf Radika", Debar, Makedonija	2.18±0.14	0.011±0.0007
pečeni	"Digips", Debar, Makedonija	3.01±0.20	0.016±0.001
drobljeni	"Knauf Radika", Debar, Makedonija	1.97±0.14	0.010±0.0007
Alabaster gips	"Knauf Radika", Debar, Makedonija	3.03±0.22	0.016±0.001
Perlit	"S & B Industrial Minerals", Atina, Grčka	35.0±1.84	0.18±0.010
Talk	"Ionian Kalk", Piree, Grčka	1.27±0.079	<0.01
	"Vitex-Hermes", Aspropyrgos, Grčka	1.20±0.076	<0.01

Tabela 4.26.c) Jačina apsorbovane doze, D(nGy h^{-1}), i jačina efektivne doze, E(mSv y^{-1}), za izlaganje gama zračenju iz opekarskih građevinskih materijala

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	D (nGy h^{-1})	E(mSv y^{-1})
Puna cigla	Ciglana "Ćele Kula", Niš	38.8±4.3	0.20±0.02
	Ciglana "Čila", Lalinac (Niš)	35.4±3.7	0.18±0.02
	Ciglana Knežica (Niš)	44.3±4.7	0.23±0.02
	"Jovica Todorović", Guberevac (Niš)	40.2±4.6	0.21±0.02
	Ciglana "Mića", Niš	42.6±4.5	0.22±0.02
	Ciglana Negotin	31.9±3.7	0.16±0.02
	Ciglana Pančevo (okolina)	45.7±5.1	0.24±0.03
	Gradilište NH1, Niš	37.4±5.1	0.19±0.03
	Gradilište NH2, Niš	39.3±4.3	0.20±0.02
"Trokanalka"	"Toza Marković", Kikinda	30.9±3.7	0.16±0.02
Blokovi – cigla	(fert monta) "Ćele Kula", Niš	30.4±3.8	0.16±0.02
	(giter) "Ćele Kula", Niš	28.1±2.9	0.15±0.02
	"Euro Atlantic", Bojnik	27.9±3.2	0.14±0.02
	(giter) "Vojvoda Prijezda", Stalać	29.9±3.0	0.15±0.02
	"Rad", Vlasotince	27.5±3.2	0.14±0.02
	"Gitarić", Ciglana "Salaš", Zaječar	7.28±0.80	0.038±0.004
	(monta) Ciglana "Salaš", Zaječar	7.14±0.80	0.037±0.004
	"Mladost", Mala Plana	26.7±2.8	0.14±0.01
	"Progres", Velika Plana	33.6±3.5	0.17±0.02
	(fert) "Opeka", Smederevska Palanka	38.0±4.1	0.20±0.02
	(giter) "Naša Sloga", Kovin	26.6±2.9	0.14±0.02
	"Sloga", Petrovaradin	32.4±3.5	0.17±0.02
	(giter) "Igma", Uljma	35.7±4.0	0.18±0.02
	"Izop", Vojvodina	33.0±3.6	0.17±0.02
Silikatna cigla	"Rapid", Apatin	20.2±2.3	0.10±0.01
Fasadna cigla	"Zorka" Šabac	10.4±1.1	0.054±0.006
	Ciglana Negotin	6.29±0.67	0.033±0.003
Vatrostalna cigla	"Magnohrom", Kraljevo	<1	<0.01

Tabela 4.26.d) Jačina apsorbovane doze, D(nGy h^{-1}), i jačina efektivne doze, E(mSv y^{-1}), za izlaganje gama zračenju iz: betona, gas-betona i gips-kartona

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	D (nGy h^{-1})	E(mSv y^{-1})
Beton	"GMG Trejd", Gadžin Han (Niš)	8.19±0.98	0.042±0.005
	"Braća Maljković", Malča (Niš)	17.3±1.9	0.090±0.01
	"Šilo Prom", Belotinac (Niš)	13.0±1.4	0.067±0.007
	"Fagrem", Aleksinac	20.4±2.2	0.11±0.01
	"Cuki", Paraćin	11.3±1.1	0.058±0.006
	"Invest Gradnja Co", Kragujevac	14.5±2.0	0.078±0.01
	Gradilište NH1, Niš	18.7±2.2	0.097±0.01
	Gradilište NH2, Niš	28.6±3.0	0.15±0.02
	(za spoljnu upotrebu) "Arhibet", Niš	19.7±2.2	0.024±0.003
Gas-beton	"Xella", Vreoci	6.38±0.35	0.033±0.002
	Gradilište KE, Niš	15.4±0.88	0.080±0.005
Gips-karton	"Delta build", Niš	<1.80	<0.01

Tabela 4.26.e) Jačina apsorbovane doze, D(nGy h^{-1}), i jačina efektivne doze, E(mSv y^{-1}), za izlaganje gama zračenju iz prekrivnih konstrukcionih materijala

Vrsta materijala	Poreklo /Naziv proizvodjača	D (nGy h^{-1})	E(mSv y^{-1})
Keramičke pločice	(zidne) "Polet", Bečej	5.30±0.56	0.027±0.003
	(podne) "Polet", Bečej	5.23±0.57	0.027±0.003
	"Toza Markovic", Kikinda	4.39±0.50	0.023±0.003
	"Keramika Kanjiža", Kanjiža	6.06±0.64	0.031±0.003
	(podne) "Zorka keramika", Šabac	6.06±0.65	0.031±0.003
	"Keramika-Vojnić", Hrvatska	4.01±0.44	0.021±0.002
	"Martex", Slovenija	3.28±0.34	0.017±0.002
	(zidne) "KAI Group", Bugarska	3.20±0.39	0.017±0.002
	(podne1) "KAI Group", Bugarska	4.53±0.50	0.023±0.003
	(podne2) "KAI Group", Bugarska	3.23±0.38	0.017±0.002
	(zidne) "Prima", Španija	6.05±0.64	0.031±0.003
	(podne) "Pamisa", Španija	5.55±0.59	0.029±0.003
	"Gemma", Egipat	4.13±0.45	0.021±0.002
Granitna pločica	(podna) "Emil Ceramica Group", Italija	3.35±0.41	0.017±0.002
Crep	"Mladost", Leskovac	2.75±0.32	0.014±0.002
	"Tondach - Potisje Kanjiža", Kanjiža	2.86±0.31	0.015±0.002
	"Toza Marković", Kikinda	3.78±0.40	0.020±0.002
	("biber") "Toza Marković", Kikinda	3.20±0.35	0.017±0.002
Granit	"Granit", Jablanica, Bosna i Hercegovina	<1.13	<0.01
	"Mermeren komb.", Prilep, Makedonija	11.8±1.37	0.061±0.007
	"Krin DOO", Prilep, Makedonija	25.7±3.1	0.13±0.02
	"Pirin Mramor", Sandanski, Bugarska	16.8±1.7	0.087±0.009
	"Pavlidis", Drama, Grčka	5.28±0.61	0.027±0.003
	"Pavlidis", Drama, Grčka	13.2±1.3	0.069±0.007
	"Asan Insaat", Ankara, Turska	6.69±0.79	0.035±0.004
	vrsta "New Imperial Red", Kina	29.8±2.89	0.15±0.02
Mermer	(lomljeni) "Šumadija granit" Aranđelovac	<1	<0.01
	"Mermeren komb.", Prilep, Makedonija	<1	<0.01
	"Predsednik", Vratsa, Bugarska	1.76±0.18	<0.01
	"Komuru Cuoglu Mermer", Turska	<1	<0.01
Travertin	"Feranex", Vaduz, Turska	6.42±0.67	0.033±0.004

Tabela 4.27. Opsezi, ($D_{Min} - D_{Max}$) (nGy h^{-1}), ($E_{Min} - E_{Max}$) (mSv y^{-1}), jačine apsorbovane doze, $\overline{D} \pm \sigma$ (nGy h^{-1}), i jačine efektivne doze, $\overline{E} \pm \sigma$ (mSv y^{-1}), za izlaganje gama zračenju iz pojedinih vrsta građevinskih materijala; prikazane su srednje vrednosti doza i odgovarajuće standardne devijacije

Vrsta materijala	($D_{Min} - D_{Max}$) (nGy h^{-1})	$\overline{D} \pm \sigma$ (nGy h^{-1})	($E_{Min} - E_{Max}$) (mSv y^{-1})	$\overline{E} \pm \sigma$ (mSv y^{-1})
Poreklo: Srbija				
Pesak	(18.5 – 22.0)	19.7±1.4	(0.096 - 0.11)	0.10±0.006
Šljunak	(19.8 – 22.7)	20.9	(0.10 – 0.12)	0.11
Portland cement	(5.00 – 9.68)	7.34	(0.026 – 0.050)	0.038
Kreč		<1		<0.01
Cigla - puna	(31.9 – 45.7)	39.4±4.3	(0.16 – 0.24)	0.20±0.02
Cigla - blok	(7.14 – 38.0)	27.7±8.9	(0.037 – 0.20)	0.14±0.05
Cigla (svi proizvodi)	(7.14 – 45.7)	32.1±9.5	(0.037 – 0.24)	0.17±0.05
Beton	(8.19 – 28.6)	16.5±6.3	(0.042 – 0.15)	0.086±0.03
Gas-beton	(6.38 – 15.4)	10.9	(0.033 – 0.080)	0.056
Keramičke pločice	(4.39 – 6.06)	5.41±0.69	(0.023 – 0.031)	0.028±0.003

Crep	(2.75 – 3.78)	3.15	(0.014 – 0.02)	0.016
Mermer		<1		<0.01
Poreklo: Uvoz				
Kamen	(35.7– 70.4)	49.1	(0.18 – 0.36)	0.25
Feldspat	(7.64 – 14.9)	11.4	(0.040 – 0.077)	0.059
Cement, beli	(3.75 – 5.75)	4.96	(0.019 – 0.024)	0.026
Gips	(1.97 – 6.10)	3.59±1.5	(0.010 – 0.032)	0.019±0.008
Keramičke pločice	(3.20 – 6.05)	4.15±1.0	(0.017 – 0.031)	0.021±0.005
Granit - prekrivanje	(0 - 29.8)	13.8±10	(0 – 0.15)	0.071±0.05
- zidovi	(4.19 – 111.7)	51.5±37.2	(0.022 – 0.58)	0.27±0.19
Mermer - prekrivanje		<1		<0.01
- zidovi	(1.81 – 6.36)	2.96	(0 – 0.033)	0.015
Keram. pločice (sve)	(3.2 – 6.06)	4.60±11	(0.017 – 0.031)	0.024±0.006

4.2.2.2. *Premašaj doze za pojedinačne građevinske materijale u odnosu na zračenje tla*

Primena dozimetrijskog kriterijuma u zaštiti od jonizujućeg zračenja podrazumeva ograničenje izlaganja stanovništva, limitiranjem individualne godišnje efektivne doze do vrednosti 1 mSv (Tabela 2.1). Kako granice doze uzimaju u obzir ozračivanje koje je rezultat delatnosti (*Pravilnik* 2011a), izlaganje γ- zračenju građevinskih materijala koje podleže navedenom kriterijumu, odnosi se na povećanje nivoa doze u odnosu na terestrijalni fon, tj. zračenje prirodnih radionuklida iz lokalnog okruženja (*STUK* 2010). Prema preporuci Evropske Komisije (*EC* 1999), adekvatnija granica "premašaja doze" tla usled zračenja građevinskih materijala je u opsegu (0.3 – 1) mSv y^{-1}, zavisno od konkretnih okolnosti – u skladu sa principom ALARA (*ICRP* 1991), tako da pojedine članice Evropske Unije primenjuju ovaj kriterijum (*Haquin* 2008). Stoga, za istraživane građevinske materijale, jačine efektivne doze upoređene su sa obe granične vrednosti, 0.3 mSv y^{-1} i 1 mSv y^{-1}.

Grad Niš

Za određivanje efektivne doze u spoljašnjoj sredini, koja potiče od primordijalnih radionuklida u zemljištu, u radu *Manić et al.* (2012), korišćeni su podaci za koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, dati u izveštaju: *Agencija* (2011). Međutim, pošto su novija istraživanja (*ZZZR* 2012) izvršena za znatno veći broj uzoraka površinskog tla (preko 120), sa preciziranih lokacija u gradu Nišu i okolnim mestima, u disertaciji su korišćeni rezultati ove studije, prema kojima srednje koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K za tlo iznose: 18.4 Bq/kg, 25.9 Bq/kg i 412 Bq/kg, respektivno.

Specifične jačine apsorbovane doze za prirodne radionuklide u zemljištu izračunate su u disertaciji modelovanjem tla slojem kvadratne osnove: 80 m x 80 m, debljine d = 1 m, kao u *Monte Carlo* proračunu (program MC) rada *Clouvas et al*. (2000). Za gustinu tla uzeta je vrednost 1.6 g/cm^3 (*UNSCEAR* 2000), odnosno zemljište je tretirano kao homogeni materijal identičan crvenoj cigli (*Beck et al*. 1972). Tako, u proračunu apsorbovane doze na standardnoj visini 1 m od tla, primenjen je izraz (4.2), sa parametrima koji se odnose na dozu radionuklida za ciglu (Tabela 4.2.b), a izračunavanja su izvršena prema opisanom metodu određivanja doze za zid [na ovaj način je, inače, određena i doza koja odgovara "Arhibet" betonskim kockama za spoljašnju upotrebu (d = 6 cm, površina 10m x 10m, f = 0.2)].

Specifične jačine apsorbovane doze, q_U, q_{Th} i q_K, dobijene za zemljište, imaju vrednosti: 0.394, 0.528 i 0.0414, respektivno, u jedinicama (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), tako da odgovarajuća jačina apsorbovane doze na otvorenom prostoru iznosi: D_t = 38.0 nGy h^{-1}. Proračunom vrednosti efektivne doze za spoljašnju sredinu, E_t, za faktor "zauzetosti" prostorije (0.8), i korišćenjem konverzionog koeficijenata $E/K_a \approx 0.7$ Sv Gy^{-1}, određenog za geometrijske

uslove zračenja svakog primordijalnog radionuklida iz tla (*Zankl et al.* 1997, *UNSCEAR* 2000), dobija se: E_t = 0.186 mSv y^{-1}. Upoređujući podatke za jačine efektivne doze koje odgovaraju pojedinim građevinskim materijalima, u Tabelama 4.26.a)-e), sa izračunatom E_t, očigledno je da mali broj uzoraka premašuje terestrijalni fon: 8 opeka proizvedenih u Srbiji, 2 vrste građevinskog kamena poreklom iz Bugarske, kao i 4 uzorka granita iz različitih zemalja - za slučaj primene u vidu strukturnih materijala. Pritom, za opeke, kamen i 2 granita, iznosi premašaja znatno su niži od 0.3 mSv y^{-1}, dok su razlike u odnosu na fon za ostala 2 uzorka granita veće od ove granice doze za 31% i 3%.

Niška Banja

Izmerene koncentracije ^{222}Rn u prostorijama na teritoriji Niške Banje, kao i količine radionuklida u sprašenom uzorku tla, koje služi za pripremu blata za peloido-terapiju (*Manić et al.* 2006), ukazuju na mogućnost povećanog prisustva ^{226}Ra u zemljištu. Većina podataka izveštaja *ZZZR* (2006), koji se odnose na područje pripadajuće opštine (15 merenja), ne odražava ovu tendenciju. Ipak, ispitivanjem tla u centru mesta [1 uzorak u *ZZZR* (2006)] dobijena je oko 40% veća koncentracija aktivnosti ^{226}Ra od navedene srednje vrednosti za nišku oblast, dok sadržaji ^{232}Th i ^{40}K ne odstupaju značajnije od srednjih vrednosti.

Stoga, radi detaljnijeg istraživanja radioaktivnosti zemljišta u samom naselju, u disertaciji su obavljena dodatna merenja koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida na 7 lokaliteta, biranih tako da, prema rezultatima za koncentraciju ^{222}Rn u radu *Manić et al.* (2006), pripadaju oblastima sa očekivanim prosečnim, kao i povećanim sadržajem ^{226}Ra (lokacije 4, 5, 6 i 7). Rezultati ovih merenja prikazani su u Tabeli 4.28, u kojoj su dati i raniji podaci za uzorak tla.

Tabela 4.28. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K za zemljište u Niškoj Banji

Lokacija uzorkovanja tla	*A* (Bq/kg)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
1. Centar, “Terme“	20±2	27±3	380±39
2. Centar, “Radon” (sediment)	573±58	<2	106±12
3. a) Staza iznad “Zelengore“	33±4	46±5	451±49
b) Staza iznad “Zelengore“ (sediment)	24±3	8±1	85±12
4. Centar, “EPS”	147±15	18±3	334±36
5. “Školska česma”	107±11	14±2	231±25
6. Obdanište	36±4	28±3	395±41
7. Naselje “Ženeva“	53±6	26±3	390±42
8. Tlo (sediment) (*Manić et al.* 2006)	259±6	13±0.6	219±4
Opseg vrednosti	24±3 - 573±58	2 - 46±5	85±12 - 451±49
Srednja vrednost i standardna devijacija	139±180	20±13	288±133

Jačina apsorbovane doze, kao i jačina efektivne doze (ekvivalentna boravku u prostoriji), izračunate na osnovu srednjih vrednosti *A* u Tabeli 4.28, jednake su: D_t = 77.4 nGy h^{-1} (±64.3 nGy h^{-1}) i E_t = 0.380 mSv y^{-1} (±0.315 mSv y^{-1}) respektivno. Izuzevši iz ovog proračuna podatke za uzorke sedimenata, dobijaju se vrednosti: D_t = 55.0 nGy h^{-1} (±14.9 nGy h^{-1}) i E_t = 0.270 mSv y^{-1} (±0.073 mSv y^{-1}).

Evidentno [Tabele 4.26.a)-e)], za prvi način tretiranja fona, jedino upotreba granita (2 vrste) kao strukturnog materijala rezultuje efektivnom dozom većom od E_t, za iznos manji od granice doze 0.3 mSv y^{-1}. Izostavljanjem rezultata za sedimente u određivanju E_t, još jedan granit i uzorak kamena peščara premašuju dozu koja odgovara terestrijalnom fonu, pri čemu

su iznosi premašaja manji od 0.3 mSv y^{-1}, osim u slučaju granita "New Imperial Red" za koji je odgovarajuća vrednost neznatno viša od ove granice doze (i dosta niža od 1 mSv y^{-1}).

4.2.2.3. *Indeks koncentracije aktivnosti*

Parametar pogodan za monitoring u praksi, kojim se ispunjenost dozimetrijskog kriterijuma za upotrebljivost građevinskog materijala ispituje na osnovu vrednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida, je indeks koncentracije aktivnosti, I (gama-indeks) (*EC* 1999). Izraz za gama-indeks u disertaciji izveden je ekvivalentno metodu prikazanom u publikaciji *Markkanen* (1995). Primenjene su, međutim, specifične jačine apsorbovane doze ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunate za beton pomoću (G-P) faktora nagomilavanja (Tabela 4.3), kao i navedena vrednost jačine apsorbovane doze u lokalnoj spoljašnjoj sredini (38.0 nGy h^{-1}), a osim toga, i konverzioni koeficijenti E/K_a određeni u disertaciji.

Zaokrugljivanjem izračunatih graničnih vrednosti koncentracija aktivnosti [309, 253 i 3264, u (Bq kg^{-1}), za ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, respektivno] na najbliže brojeve deljive sa 50 [u *EC* (1999) – deljive sa 100], dobijena je formula:

$$I = \frac{A_{\mathrm{Ra}}}{300\ \mathrm{Bq/kg}} + \frac{A_{\mathrm{Th}}}{250\ \mathrm{Bq/kg}} + \frac{A_{\mathrm{K}}}{3250\ \mathrm{Bq/kg}}, \tag{4.11}$$

pri čemu granici doze 1 mSv y^{-1} odgovara uslov: $I \leq 1$, dok je kriterijum: $I \leq 0.4$ izveden za limit 0.3 mSv y^{-1}. Iako izvedeni na osnovu parametara za beton, ovi uslovi, prema konceptu *EC* (1999), aproksimativno važe i za ostale materijale koji se koriste u celokupnoj zapremini građevinske konstrukcije.

Tabela 4.29. Opseg, ($I_{\mathrm{Min}} - I_{\mathrm{Max}}$), srednja vrednost i odgovarajuća standardna devijacija, $\bar{I} \pm \sigma$, indeksa koncentracije aktivnosti, za pojedine vrste građevinskih materijala

Vrsta materijala	($I_{\mathrm{Min}} - I_{\mathrm{Max}}$)	$\bar{I} \pm \sigma$
Poreklo: Srbija		
Pesak	(0.199±0.022 – 0.237±0.024)	0.211±0.015
Šljunak	(0.208±0.021 – 0.240±0.025)	0.221
Portland cement	(0.144±0.079 - 0.280±0.014)	0.212
Kreč	(0.0113±0.0011 – 0.0213±0.0013)	0.0150
Cigla - puna	(0.355±0.041 – 0.508±0.057)	0.438±0.048
Cigla - blok	(0.0985±0.011 – 0.525±0.056)	0.383±0.12
Cigla (svi proizvodi)	(0.0985±0.011 – 0.525±0.056)	0.396±0.11
Beton	(0.107±0.013 – 0.266±0.029)	0.194±0.056
Gas-beton	(0.0717±0.0039 – 0.174±0.0099)	0.123
Keramičke pločice	(0.510±0.058 – 0.704±0.074)	0.629±0.080
Crep	(0.437±0.051 – 0.602±0.064)	0.502
Mermer	0.0156	0.0156
Poreklo: Uvoz		
Kamen	(0.00980±0.0010 – 0.646±0.070)	0.341
Feldspat	(0.251±0.017 – 0.485±0.029)	0.372
Cement, beli	(0.108±0.0056 – 0.221±0.024)	0.152±0.044
Gips	(0.0219±0.0015 – 0.0681±0.0038)	0.040±0.017
Keramičke pločice	(0.370±0.045 – 0.705±0.075)	0.483±0.12
Granit	(0.0362±0.0039 – 0.961±0.093)	0.444±0.321
Mermer	(0.0149±0.0018 – 0.0548±0.0058)	0.0288
Perlit	0.798	0.798
Cirkobit	11.62	11.62
Keramičke pločice (sve)	(0.370±0.045 – 0.705±0.075)	0.535±0.13

Proračunom gama-indeksa pomoću specifičnih apsorbovanih doza za keramičke pločice debljine 2 cm, za navedene granice doze dobijeni su uslovi: $I \leq 5$ i $I \leq 2$, respektivno. Ovi uslovi (približno) predstavljaju kriterijume za sve materijale ograničene upotrebe.

Primenom izraza (4.11) izračunati su indeksi koncentracije aktivnosti za istraživane materijale. U Tabeli 4.29. prikazani su opsezi dobijenih rezultata, kao i odgovarajuće srednje vrednosti i standardne devijacije.

4.2.2.4. *Doza u prostoriji; premašaj doze*

Vrednosti u Tabelama 4.26.a)-e) predstavljaju doze koje karakterišu uobičajenu upotrebu pojedinih materijala u izgradnji (ukoliko se uopšte koriste), ali ne i ukupno izlaganje zračenju građevinskih materijala, koje međutim, treba uzeti u obzir prilikom primene dozimetrijskih kriterijuma. Određivanje ukupne doze za izlaganje unutar prostorije podrazumeva sumiranje udela pojedinih materijala, što se precizno može obaviti samo u konkretnom slučaju, poznavanjem svih parametara konstrukcije.

Procena prosečne individualne doze za stanovništvo na području grada Niša i okoline, u disertaciji je izvršena pretpostavljajući dva osnovna modela prostorije, koji aproksimativno opisuju uslove izlaganja u zatvorenom prostoru na ovoj teritoriji. Prostorije su dimenzija 5 x 4 x 2.8 m^3 [zapravo, prosečna visina jednaka je 2.5 m, ali, kako ova razlika nema značajniji uticaj na vrednosti doza (Poglavlje 4.1.1.3), radi pojednostavljenja, korišćene su dimenzije standardne prostorije], sa betonskim podom i opisanom strukturom plafona, debljine d = 15 cm. Debljina svih zidova iznosi 20 cm, pri čemu prvi model podrazumeva zidove od betona ili gas-betona, a drugi upotrebu cigle ili kamena. Za oba modela, razmotrena je i varijanta sa podom i zidovima na kojima se nalazi sloj pločica (0.5 cm), kao i poda prekrivenog drugim materijalom (2 cm), gde su za specifične apsorbovane doze prvog sloja uzete vrednosti iz Tabele 4.15, odnosno 4.16, dobijene pomoću faktora nagomilavanja za kombinaciju materijala. U proračunu su korišćeni udeli u ukupnoj apsorbovanoj dozi za pojedine vrste građevinskih materijala dati u Tabeli 4.27, a u slučaju potrebe ponovnog izračunavanja doprinosa određenog materijala, za koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K uzete su odgovarajuće vrednosti iz Tabele 4.25.

Određivanje doze izvršeno je na osnovu podatka da oko 71% stanovništva grada Niša pripada užoj gradskoj sredini (*Gradska stambena agencija Niš* 2006). U disertaciji je procenjeno da približno 20% ove populacije stanuje u porodičnim kućama, koje u oko 70% slučajeva imaju dva nivoa: prizemni, sa betonskim podom debljine 20 cm i sprat čiji pod ima konstrukciju plafona debljine 15 cm. Zidovi oba nivoa najčešće su od cigle: puna cigla (25%) i blokovi (65%), ali i od betonskih blokova (10%). U svim kućama upotrebljene su keramičke pločice, a primenjenost ostalih prekrivnih materijala (mermer, granit, travertin) je oko 10%, što je procenjeno i za stanove u zgradama za kolektivno stanovanje. Za izlaganje ovim materijalima, težinski faktor f u izrazu za jačinu efektivne doze, ima vrednost: $f \approx 0.1$ (keramičke pločice), odnosno: $f \approx 0.2$ (ostali prekrivni materijali).

Približno jednaki procenti stanovništva odgovaraju zgradama sa zidovima od betona i cigle, pri čemu je većina betonskih zgrada od punog betona, dok su blokovi prisutni u oko 20% slučajeva. Za oko 15% populacije u zgradama, zidovi su izgrađeni od gas-betona, a 5% udela pripada korišćenju građevinskog kamena (tretiranog kao materijal gustine betona). U okolnim mestima koja pripadaju gradu, najzastupljenije su porodične kuće sa zidovima od cigle (85%), ima i građevinskog kamena (10%), kao i betonskih blokova (5%), pri čemu je upotreba pune cigle i blokova od opeke približno izjednačena. Takođe, pretpostavljen je isti broj objekata sa jednim ili dva nivoa.

Tabela 4.30.a) Opsezi i srednje vrednosti jačine apsorbovane i efektivne doze za stanovništvo na teritoriji grada Niša i okoline; prostorija sa betonskim zidovima

Model A (zidovi od betona ili gas-betona)	D (nGy h^{-1})		
	a) Puni beton	b) Beton - blok	c) Gas - beton
I Pod 20 cm, plafon 15 cm			
Osnovni model [D(0)]	(44.95-56.61)	(32.85-57.39)	(31.91-47.23)
	49.31	42.90	39.05
Sa pločicama, 0.5 cm [D(1)]	(46.79-60.84)	(35.19-61.67)	(34.15-51.61)
	52.81	46.26	42.35
Sa prekrivnim slojem 2 cm [D(2)]	(45.95-61.23)	(31.49-59.16)	(30.55-48.99)
	49.65	43.02	39.17
Efektivna doza, E_{I} (mSv y^{-1})	(0.234-0.296)	(0.171-0.300)	(0.166-0.248)
[0.680D(0)+0.1D(1)+0.020D(2)]·0.74·8760	0.259	0.224	0.204
II Pod 15 cm, plafon 15 cm			
Osnovni model [D(0)]	(43.88-55.27)	(31.78-56.05)	(30.84-45.89)
	48.34	41.71	37.87
Sa pločicama, 0.5 cm [D(1)]	(45.69-59.59)	(34.19-60.50)	(33.15-50.36)
	51.70	45.15	41.23
Sa prekrivnim slojem 2 cm [D(2)]	(44.38-59.13)	(30.51-57.88)	(29.57-47.72)
	48.54	41.91	38.07
Efektivna doza, E_{II} (mSv y^{-1})	(0.228-0.290)	(0.166-0.293)	(0.161-0.241)
[0.680D(0)+0.1D(1)+0.020D(2)]·0.74·8760	0.252	0.218	0.198
Efektivna doza, E (mSv y^{-1})	(0.230-0.292)	(0.170-0.296)	(0.163-0.244)
0.395·E_{I} + 0.605·E_{II}	0.255	0.221	0.201

Tabela 4.30.b) Opsezi i srednje vrednosti jačine apsorbovane i efektivne doze za stanovništvo na teritoriji grada Niša i okoline; prostorija sa zidovima od cigle ili kamena

Model B (zidovi od cigle ili kamena)	D (nGy h^{-1})		
	a) Puna cigla	b) Cigla - blok	c) Kamen
I Pod 20 cm, plafon 15 cm			
Osnovni model [D(0)]	(57.43-77.53)	(31.62-68.60)	(61.13-102.03)
	67.52	54.62	77.11
Sa pločicama, 0.5 cm [D(1)]	(58.68-80.89)	(32.90-67.66)	(62.33-106.24)
	69.79	54.01	79.11
Sa prekrivnim slojem 2 cm [D(2)]	(56.07-79.11)	(30.08-70.36)	(59.77-103.80)
	67.65	54.74	77.23
Efektivna doza, E_{I} (mSv y^{-1})	(0.298-0.404)	(0.165-0.355)	(0.317-0.531)
[0.680D(0)+0.1D(1)+0.020D(2)]·0.74·8760	0.351	0.283	0.401
II Pod 15 cm, plafon 15 cm			
Osnovni model [D(0)]	(56.36-75.19)	(30.37-67.26)	(60.06-100.70)
	66.34	53.44	75.93
Sa pločicama, 0.5 cm [D(1)]	(57.68-79.64)	(31.90-66.40)	(61.23-103.29)
	68.68	53.44	78.01
Sa prekrivnim slojem 2 cm [D(2)]	(55.09-78.02)	(28.90-69.09)	(58.79-102.53)
	66.54	53.64	76.13
Efektivna doza, E_{II} (mSv y^{-1})	(0.293-0.397)	(0.158-0.348)	(0.312-0.524)
[0.680D(0)+0.1D(1)+0.020D(2)]·0.74·8760	0.345	0.277	0.395
Efektivna doza, E (mSv y^{-1})	(0.295-0.400)	(0.161-0.351)	(0.314-0.527)
0.395·E_{I} + 0.605·E_{II}	0.348	0.279	0.397

Rezultati izračunavanja jačina apsorbovane doze za opisane modele prostorija, predstavljeni su u Tabelama 4.30.a),b), u kojima su takođe prikazane i odgovarajuće vrednosti efektivne doze. Usrednjavanjem ovih rezultata, u skladu sa težinskim koeficijentima za pojedine modele, određenim iz navedenih podataka, dobijena je i jačina efektivne doze po članu populacije na teritoriji grada Niša i okoline.

Srednja vrednost apsorbovane doze za prostorije sa zidovima od betona ili gas-betona je 44.40 nGy h^{-1}, dok je u slučaju zidova od cigle ili kamena vrednost ove veličine jednaka 66.74 nGy h^{-1}, tako da je srednja apsorbovana doza za sve razmatrane prostorije: D = 55.57 nGy h^{-1}. Uračunavajući zastupljenost varijanti u okviru modela, jačina apsorbovane doze, usrednjena po članu populacije, gotovo je identična prethodnom rezultatu, tj. jednaka je: 55.58 nGy h^{-1}, a minimalna i maksimalna vrednost ove veličine iznose: 40.98 nGy h^{-1} i 67.64 nGy h^{-1}, respektivno.

Efektivna doza, prema navedenim težinskim faktorima za dva modela prostorije, pripada opsegu: (0.209-0.348) mSv y^{-1}, a njena srednja vrednost je: E = 0.285 mSv y^{-1}. Ovaj podatak, inače, određen je po izrazu:

$$E = 0.18 \cdot E\,(\text{puni beton}) + 0.075 \cdot E\,(\text{beton blok}) + 0.09 \cdot E\,(\text{gas-beton}) + 0.18 \cdot E\,(\text{puna cigla}) + 0.42 \cdot E\,(\text{cigla blok}) + 0.055 \cdot E\,(\text{kamen}).$$

Dobijeni rezultat manji je od limita 0.3 mSv y^{-1}, tako da premašaj srednje efektivne doze (po stanovniku) u odnosu na odgovarajuću dozu za zračenje primordijalnih radionuklida na otvorenom prostoru, E_t = 0.186 mSv y^{-1}, očigledno ispunjava oba dozimetrijska kriterijuma. Doze koje odgovaraju pojedinačnim slučajevima prostorija sa zidovima od betona ili gas-betona, takođe su niže od 0.3 mSv y^{-1}, dok model prostorije sa zidovima od cigle ili kamena za izvesne građevinske materijale premašuje datu vrednost. Za ove materijale, međutim, razlika doze u odnosu na fon spoljašnje sredine nije veća od limita 0.3 mSv y^{-1}, osim za građevinski kamen (peščar), gde odgovarajući premašaj iznosi: 0.345 mSv y^{-1} (još uvek u okviru granice doze, 1 mSv y^{-1}).

Doza direktnog zračenja

Za sve opisane modele prostorija, određene su i srednje vrednosti jačine apsorbovane doze (D_0) i jačine efektivne doze (E_0), koje potiču od direktnog zračenja. U proračunu su korišćene specifične jačine apsorbovane doze, q_{U0}, q_{Th0} i q_{K0}, prikazane u Tabeli 4.31, izračunate za parametre koji odgovaraju pretpostavljenim načinima upotrebe pojedinih materijala, navedenim u poglavlju 4.2.2.1.

Tabela 4.31. Specifične jačine apsorbovane doze, q_{U0}, q_{Th0} i q_{K0}, za betonski pod i zidove od cigle i betona debljine d_1, prekrivene slojem keramike debljine d

d (cm)	q_{U0}(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		q_{Th0}(nGy h^{-1}/ Bqkg^{-1})		q_{K0}(nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})	
	Betonski pod debljine d_1					
	d_1 = 15 cm	d_1 = 20 cm	d_1 = 15 cm	d_1 = 20 cm	d_1 = 15 cm	d_1 = 20 cm
0	0.0986	0.103	0.123	0.130	0.00988	0.0104
0.5	0.0885	0.0924	0.112	0.118	0.00899	0.00944
2	0.0795	0.0866	0.0836	0.109	0.00680	0.00876
	Zid debljine d_1 = 20 cm					
	Beton	Cigla	Beton	Cigla	Beton	Cigla
0	0.194	0.179	0.244	0.222	0.0195	0.0178
0.5	0.177	0.163	0.224	0.203	0.0181	0.0170

Tabela 4.32. Srednje vrednosti jačine apsorbovane i efektivne doze, koje potiču od direktnog γ– zračenja u prostoriji, za stanovništvo na teritoriji grada Niša i okoline

Model prostorije	Puni beton	Beton - blok	Gas - beton	Puna cigla	Cigla - blok	Kamen
			I Pod 20 cm, plafon 15 cm			
$D_0(0)$ (nGy h^{-1})	30.66	27.04	25.51	43.24	33.73	46.68
$D_0(1)$ (nGy h^{-1})	33.69	29.99	28.61	45.10	36.26	48.15
$D_0(2)$ (nGy h^{-1})	32.83	29.21	27.68	45.41	35.90	48.85
E_{0I} (mSv y^{-1})	0.161	0.142	0.135	0.226	0.177	0.243
			II Pod 15 cm, plafon 15 cm			
$D_0(0)$ (nGy h^{-1})	30.38	26.39	24.86	42.59	33.08	46.03
$D_0(1)$ (nGy h^{-1})	32.47	29.70	28.32	44.81	35.97	47.86
$D_0(2)$ (nGy h^{-1})	30.81	28.10	26.57	44.30	34.79	47.74
E_{0II} (mSv y^{-1})	0.159	0.139	0.131	0.222	0.174	0.240
E_0 (mSv y^{-1})	0.160	0.140	0.133	0.224	0.175	0.241

Prema rezultatima u Tabeli 4.32, srednja vrednost D_0 za sve razmatrane prostorije, iznosi 35.65 nGy h^{-1}, dok apsorbovana doza, usrednjena prema navedenim težinskim faktorima za zastupljenost varijanti prostorija, ima vrednost 34.75 nGy h^{-1}. Odgovarajuća srednja vrednost efektivne doze direktnog zračenja po članu populacije jednaka je E_0 = 0.178 mSv y^{-1}. Razlike dobijenih rezultata od vrednosti doza određenih na osnovu podataka u Tabelama 4.30.a),b), odražavaju doprinos efekta nagomilavanja zračenja srednjoj jačini doze u prostoriji: povećanje apsorbovane doze za 20.83 nGy h^{-1} (59.9%) i efektivne doze za 0.107 mSv y^{-1} (60.1%). Tako, u ukupnoj srednjoj vrednosti efektivne doze, 0.285 mSv y^{-1}, komponenta koja potiče od direktnog zračenja ima udeo 62.5%.

5. Diskusija rezultata

5.1. Diskusija rezultata proračuna dozimetrijskih veličina

5.1.1. Apsorbovana doza

5.1.1.1. *Faktor nagomilavanja za niz radionuklida; doza radionuklida*

Validnost fitujuće formule (4.1), za faktor nagomilavanja izlaganja za zračenje ^{40}K u betonu, proverena je izračunavanjem koeficijenta korelacije i pojedinačnih relativnih razlika za dva skupa rezultata: podatke *ANSI/ANS-6.4.3* (1991), interpolirane po *Lagrange*-ovoj formuli (2.23) za energiju 1.4608 MeV, i vrednosti funkcije (4.1), za rastojanja r_m koja odgovaraju *ANSI/ANS* opsegu mfp od 0.5 do 40. Koeficijent korelacije, 0.999997 (R^2 = 0.999994), određen po odgovarajućem izrazu u *Wackerly et al.* (2008), i maksimalno odstupanje, 1.8%, potvrđuju adekvatnost izraza za $B(r_m)$. Kako vrednosti faktora nagomilavanja za nizove radioaktivnih elemenata nisu publikovane, rezultati ovakve aproksimacije za ^{238}U i ^{232}Th nisu mogli biti upoređeni sa literaturnim podacima. Međutim, specifične jačine apsorbovane doze u standardnoj prostoriji, q_U i q_{Th}, dobijene na osnovu fitujućih izraza (4.2) za dozu radionuklida, izvedenih prema konceptu faktora nagomilavanja za nizove, indirektno potvrđuju validnost formule (4.1), obzirom na gotovo identične rezultate za q_U i q_{Th}, izračunate primenom (G-P) formule (Tabela 4.3).

Adekvatnost primenjene metode proverena je i na osnovu podataka za specifičnu gama - konstantu, Γ, koja predstavlja apsorbovanu dozu u vazduhu na rastojanju 1 m od tačkastog izvora zračenja radionuklida jedinične koncentracije aktivnosti A (*Unger and Trubey* 1981, *Knoll* 2000). Naime, u kerma aproksimaciji, za pretpostavljenu uniformnu raspodelu jačine izvora u materijalu, čija je aktivnost u dV jednaka $A\rho$dV, ova veličina može se odrediti po izrazu: $\Gamma = (1/\rho)\, q(r_m, r_a)\, (r_m + r_a)^2$, za $r_a = 100$ cm, u limitu $r_m \rightarrow 0$ cm.

Vrednosti Γ za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunate korišćenjem jednačine (4.2) za dozu tačkastog izvora, $q(r_m, r_a)$, koja odgovara svakom od ispitivanih materijala, prikazane su u Tabeli 5.1. Predstavljeni su i rezultati dobijeni na osnovu definicije Γ-konstante, izračunati iz podataka koji karakterišu pojedine energetske grupe ovih radionuklida, prema formuli: $\Gamma = 1/(4\pi)\sum_i Y_i E_i (\mu_{tr}/\rho)_i$.

Tabela 5.1. Vrednosti Γ- konstante za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunate primenom funkcije (4.2), i na osnovu definicije, tj. podataka za energetski spektar radionuklida

Metod proračuna		Γ (nGy h^{-1} m^2/Bq)		
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K
$q(r_m, r_a)$	Beton	$0.200\cdot10^{-3}$	$0.233\cdot10^{-3}$	$0.178\cdot10^{-4}$
	Cigla	$0.202\cdot10^{-3}$	$0.238\cdot10^{-3}$	$0.180\cdot10^{-4}$
	Keramika	$0.201\cdot10^{-3}$	$0.238\cdot10^{-3}$	$0.178\cdot10^{-4}$
Definicija		$0.209\cdot10^{-3}$	$0.245\cdot10^{-3}$	$0.184\cdot10^{-4}$

Za sve materijale, formula (4.2) reprodukuje Γ-konstante sa relativnom greškom manjom od 4.9 %, a rezultati za ^{238}U i ^{40}K bliski su i odgovarajućim literaturnim podacima: $\Gamma(^{226}\text{Ra}) = 0.198\cdot10^{-3}$ (*NCRP* 1991), $\Gamma(^{40}\text{K}) = 0.185\cdot10^{-4}$ (*Tschurlovits et al.* 1992), respektivno, u jedinicama (nGy h^{-1} m^2/Bq). Odstupanja od tačne vrednosti (tj. rezultata u poslednjoj vrsti tabele) potiču od činjenice da su proračuni zapravo izvršeni za r_m = 0.5 cm, zato što vrednost $q(r)$ pri r_m = 0 cm, nije bila uključena u skup podataka za dobijanje fitujuće funkcije (4.2), zbog neophodnosti definisanja izvora zračenja konačne zapremine. Usled toga, efekat nagomilavanja, kao i slabljenje zračenja u građevinskom materijalu i u vazduhu, koji nisu obuhvaćeni definicijom Γ- konstante, nisu bili isključeni iz određivanja ove veličine.

5.1.1.2. *Doza u standardnoj prostoriji*

Beton

Poređenje rezultata proračuna specifične jačine apsorbovane doze u standardnoj prostoriji za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, dobijenih u ovoj disertaciji i podataka publikovanih u literaturi, prikazano je u Tabeli 5.2. Kako je doprinos energetskih grupa koje odgovaraju prethodnicima ^{226}Ra u nizu ^{238}U zanemarljiv, u pogledu jačine doze, ovi radionuklidi tretirani su kao isto jezgro, ^{238}U.

Tabela 5.2. Literaturni rezultati i rezultati ove disertacije za specifične jačine apsorbovane doze za ^{238}U (^{226}Ra), ^{232}Th i ^{40}K u standardnoj prostoriji

Materijal, ρ(g/cm^3)	q (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})			Referenca
	^{238}U (^{226}Ra)	^{232}Th	^{40}K	
SiO_2, 2.32	0.79	0.89	0.070	*Koblinger* 1978, 1984
SiO_2, 2.32	0.79	0.96	0.070	*Stranden* 1979
Beton, 2.35	0.922	1.10	0.0806	*Mustonen* 1984
Beton, 2.35	1.21	1.29	0.10	*Mirza et al.* 1991
Beton, 2.32	0.908	1.06	0.0767	*Markkanen* 1995
Beton, 2.35	0.954	1.208	0.081	*Ahmad et al.* 1998
Beton, 2.35	0.70	0.92	0.072	*Maduar and Hiromoto* 2004
Beton, 2.32	0.914	1.24	0.0834	*Ademola and Farai* 2005
Beton, 2.30	1.08	1.22	0.09	*Anjum et al.* 2007
Beton, 2.35	0.90	1.10	0.080	*de Jong and van Dijk* 2008
Beton, 2.32	0.983	1.367	0.099	*Allam* 2009
SiO_2, 2.35	1.476; 0.711	1.074; 0.949	0.0769	*Krstic and Nikezic* 2009
Beton, 2.35	0.87	1.02	0.111	*Moharram et al.* 2012
Beton, 2.35	0.757	0.912	0.0700	*Ova disertacija*

Prema podacima u Tabeli 5.2, veličine q_U, q_{Th} i q_K, određene pomoću (G-P) formule (2.22) za faktor nagomilavanja izlaganja (*Manić et al.* 2012), kao i izraza (4.2) za dozu radionuklida, imaju niže vrednosti od većine odgovarajućih litearaturnih rezultata. Rezultati primene

Taylor-ovog (2.19), kao i *Berger*-ovog (2.20) parametarskog oblika faktora nagomilavanja, nalaze se približno na sredini opsega navedenih literaturnih podataka.

Razlike između vrednosti q_U, q_{Th} i q_K, dobijenih korišćenjem (G-P), *Taylor*-ovog i *Berger*-ovog parametarskog oblika faktora nagomilavanja, uzrokovane su različitom tačnošću fitovanja podataka transportnih proračuna pojedinim formama. Kako je naglašeno, za beton, maksimalno odstupanje koje daje *Harima* formula je 2.9% (*ANSI/ANS-6.4.3*, 1991), dok je u slučaju druga dva oblika, navedeni procenat približno jednak srednjoj devijaciji za fitovanje do rastojanja 20 mfp (*Trubey* 1966). Uopšte, za materijale sa malim ekvivalentnim atomskim brojem, Z_{eq}, pri niskim energijama γ- zračenja, primenom *Taylor*-ove, kao i *Berger*-ove forme, mogu se dobiti rezultati nedovoljne tačnosti (*Trubey and Harima* 1987). Naime, maksimalne relativne greške, koje se odnose na fit do 20 mfp, određene za ove oblike faktora nagomilavanja, na energijama 0.5 MeV, 1 MeV, 2 MeV i 3 MeV, iznose (*Trubey* 1966): 7.5%, 11.1%, 4.9% i 4.3% (*Taylor*-ov oblik), odnosno 12%, 11%, 5% i 5% (*Berger*-ov oblik), što može objasniti varijacije vrednosti doze u Tabeli 4.3.

Generalno, razlike literaturnih rezultata prikazanih u Tabeli 5.2. od doza u disertaciji, potiču od drugačijih metoda proračuna (*Monte Carlo* ili faktori nagomilavanja, determinističko rešavanje *Boltzmann*-ove transportne jednačine nije vršeno za ovaj problem), tj. od izbora forme faktora nagomilavanja i tehnike numeričke integracije, u slučaju primene ovog metoda. Pored toga, korišćenje različitih baza podataka za karakterizaciju izvora zračenja i apsorpcione sredine, kao i način grupisanja linija u spektru ^{238}U i ^{232}Th, mogu znatno uticati na varijacije izračunatih vrednosti. Ovo je, naime, pokazano u radu *Krstic and Nikezic* (2009), gde je uračunavanjem doprinosa kompletnog spektra energija ^{238}U (i ^{232}Th), dobijena znatno veća doza od vrednosti koja odgovara limitiranom broju linija (prvi i drugi podatak u tabeli, respektivno). U slučaju ^{40}K, koji emituje γ- zračenje jedne energije, glavne razlike, očigledno, mogu se pripisati metodu proračuna.

U odnosu na predstavljene podatke, doze dobijene u disertaciji primenom *Harima* formule, najmanje odstupaju od rezultata *Monte Carlo* izračunavanja *Koblinger*-a (1978, 1984): 3.95%, 2.20% i 0%, za q_U, q_{Th} i q_K, respektivno. Slične relativne razlike odgovaraju i jačinama doze, određenim metodom faktora nagomilavanja u radu *Stranden* (1979), u kome su za prezentaciju spektra ^{238}U korišćene 4 energetske grupe [za razliku od 24 grupe za ^{238}U (i 20 za ^{232}Th), u *Koblinger* (1978, 1984) i u disertaciji]. Razlike u odnosu na rezultate proračuna u radu *Krstic and Nikezic* (2009), sprovedenih sa manjim brojem linija spektara [identičnih energetskim grupama tabeliranim u publikaciji *Markkanen* (1995)], za q_U, q_{Th} nisu velike: 6.07% i 4.06%, dok je odstupanje za q_K: 9.86%.

Iako je tehnika numeričke integracije u disertaciji ekvivalentna načinu proračuna u referenci *Maduar and Hiromoto* (2004), vrednosti dobijene za q_U razlikuju se za 7.89%. U ovom radu, naime, parametarski oblik faktora nagomilavanja izveden je fitovanjem rezultata dvostruke interpolacije podataka za beton, publikovanih u *Takeuchi and Tanaka* (1985), dok je (G-P) forma, korišćena u disertaciji, bazirana na vrednostima iz reference *Eisenhauer and Simmons* (1975). Kako su, međutim, za doze ^{232}Th i ^{40}K, procentualne razlike znatno niže: 1.10% i 2.86%, respektivno, zaključuje se da drugačije baze podataka za faktore nagomilavanja, kao i za koeficijente (μ_{tr}/ρ) i (μ/ρ), delimično utiču na dobijene varijacije, dok odabir energetskih grupa (posebno ^{238}U) predstavlja dodatni uzrok odstupanja.

Rezultati proračuna *Markkanen*-a (1995), obavljenih za srednju energiju zračenja ^{238}U i dve energetske grupe ^{232}Th (vrednosti energija 23, tj. 26 grupa, otežinjene su odgovarajućim γ-prinosima), ne odstupaju bitnije od ostalih podataka u tabeli. U odnosu na vrednosti q_U, q_{Th} i q_K, određenih u ovoj studiji pomoću *Berger*-ovog oblika faktora nagomilavanja, doze izračunate u disertaciji primenom ove forme, razlikuju se za: 7.84%, 6.00% i 0.52%,

respektivno. Slične procentualne razlike važe i za doze dobijene u radu *Mustonen*-a (1984) [kao i u referenci *de Jong and van Dijk* (2008), *Monte Carlo* simulacijom], gde je, takođe, korišćen *Berger*-ov faktor nagomilavanja u aproksimaciji do 7 mfp, parametara objavljenih u *Trubey* (1966). Kako je u disertaciji primenjena struktura energetskih spektara koja je data u ovom radu (skoro identična), odstupanja su posledica drugačijih vrednosti (μ_{tr}/ρ) i (μ/ρ), kao i metoda integracije po zapremini izvora.

Iako su u referenci *Ademola* (2005) korišćeni parametri energetskih grupa, kao i koeficijenti slabljenja i apsorpcije energije, specificirani u *Mustonen* (1984), razlike između rezultata ovih radova dostižu 12.7%, za q_{Th}. Ovakvo neslaganje može poticati od različitih baza podataka za parametre *Berger*-ovog faktora nagomilavanja [*Chilton et al.* (1984), za rad *Ademola* (2005)], kao i preciznosti tehnike proračuna. Za istu formu faktora nagomilavanja, odstupanje q_{Th} od vrednosti ove doze u disertaciji je značajno, iznosi 24%, dok su odgovarajući procenti za q_U i q_K niži: 8.55% i 9.31%, respektivno. Rezultati primene *Berger*-ovog parametarskog oblika u radu *Moharram et al.* (2012), u slučaju q_U i q_{Th}, ne razlikuju se bitno od podataka u Tabeli 4.3 koji se odnose na ovaj faktor nagomilavanja: 3.33% i 2.00%. Nasuprot, doza ^{40}K nije u saglasnosti sa q_K disertacije (45.2%), kao ni sa vrednostima određenim u ostalim referencama.

Proračun doza u radu *Mirza et al.* (1991), izvršen je programom INGRE, u kome je optimalni izbor "mreže" za diskretizaciju zapremine izvora rezultat kompromisa između tačnosti i kompjuterskog vremena. Publikovani rezultati u velikoj meri su drugačiji od podataka u disertaciji, dobijenih primenom *Harima* formule. Razlike su istaknute i u odnosu na vrednosti određene *Taylor*-ovim oblikom faktora nagomilavanja, koji je korišćen u pomenutom radu: za q_U, q_{Th} i q_K, jednake su 21.5%, 19.22% i 26.6%, respektivno. Za ovaj oblik faktora nagomilavanja, znatno manji iznosi odstupanja: 4.22%, 11.6% i 2.53%, odgovaraju jačinama doza ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, respektivno, dobijenim u referenci *Ahmad et al.* (1998) pomoću modifikovanog programa INGRE, pri čemu veliki udeo u razlikama potiče od drugačijih parametara proračuna. Naime, izračunavanja u ovom radu odnose se na tačku detekcije koja je 60 cm udaljena od poda, pretpostavljene debljine 50 cm, a, za ovakvu izmenu parametara prostorije, promene doza [računate (G-P) formom] iznose oko 5%. Zato, izuzimajući oblik faktora nagomilavanja, rezultati proračuna u radu *Ahmad et al.* (1998), zapravo su u saglasnosti sa izračunavanjima u disertaciji, ukazujući na ekvivalentnost primenjenih metoda.

Rezultati pojednostavljenog koncepta gama konstante, korišćenog u radu *Allam* (2009) u kombinaciji sa *Monte Carlo* metodom integracije, u velikoj meri se razlikuju od podataka određenih (G-P) formulom: 29.9%, 49.9% i 41.4%, za q_U, q_{Th} i q_K, respektivno, kao i od vrednosti *Koblinger*-a (1984). Doze koje odgovaraju nizovima ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, dobijene hibridnom tehnikom proračuna, predstavljenom u *Anjum et al.* (2007), takođe značajno odstupaju od rezultata primene *Harima* formule, datih u Tabeli 4.3: 42.7%, 33.8% i 28.6%, respektivno. U navedenom radu, međutim, umesto koeficijenata apsorpcije energije za vazduh, upotrebljeni su koeficijenti koji odgovaraju "tkivu" (bez specifikacije), tako da, iako autori nisu pravili razliku prilikom upoređivanja sa podacima drugih referenci, ove procente treba ipak umanjiti približno 1.5 puta. Dobijena odstupanja vrednosti doza, pored varijacija u izboru parametara energetskih grupa radionuklida i koeficijenata slabljenja i apsorpcije energije u sredini, uglavnom bi se mogla pripisati konceptualnim razlikama u metodima izračunavanja.

Cigla , keramičke pločice; gustina materijala

Proračun specifične jačine apsorbovane doze, u kome je, osim za beton (ili SiO_2), uzet u obzir konkretni hemijski sastav i drugih građevinskih materijala, vršen je u malom broju istraživanja. Upoređivanjem podataka za prostorije sa zidovima od SiO_2, betona i gipsa, dobijenih u radu *Koblinger* (1978), pokazano je da izbor materijala, za nepromenjene

koncentracije aktivnosti radionuklida, nema veliki uticaj na vrednost doze. Značajan je, ipak, efekat promene gustine, tako da su u izračunavanjima gde su pretpostavljeni različiti materijali, uglavnom primenjeni podaci koji se odnose na beton, a kao jedini parametar za specifikaciju određenog materijala, korišćena je njegova gustina (*Markkanen* 1995, *van der Graaf* 2001). Tako, u studiji *Mustonen*-a (1984), različitost materijala izražena je jednostavnom varijacijom koeficijenta slabljenja: $\mu = \mu_B(\rho/\rho_B)$ (indeksom B označeni su parametri za beton). Publikovana su, međutim, ukupna izlaganja u prostoriji, bez mogućnosti izdvajanja doprinosa pojedinih radionuklida i upoređivanja sa rezultatima disertacije. U referenci *Allam* (2009), istaknuto je, pak, da hemijski sastav materijala može imati znatniji efekt na q_U, q_{Th} i q_K. Pretpostavljajući istu gustinu, ρ = 2.32 g/cm^3, betona, cigle i krečnog kamena, razlike između doza ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, određene u ovom radu za prostoriju 5 x 4 x 2.8 m^3, pri promeni materijala: beton → cigla, dostižu: 8%, 6% i 6%, odnosno: 6%, 9% i 18%, respektivno, pri zameni betona krečnim kamenom.

Prema rezultatima disertacije u Tabeli 4.4, odstupanja q_U, q_{Th} i q_K za prostoriju od cigle, od doza za standardnu prostoriju (beton), nisu zanemarljiva; iznose: 18.9%, 15.6% i 14.6%, respektivno. Za keramičke pločice, relativne razlike u odnosu na odgovarajuće podatke za "prostoriju" od betona iste debljine zidova (0.5 cm), jednake su: 10.1%, 12.4% i 5.51%. U oba slučaja, varijacije q_U, q_{Th} i q_K u najvećoj meri potiču od promene vrednosti gustine materijala. Naime, maseni koeficijenti slabljenja, (μ/ρ), kao i faktori nagomilavanja izlaganja, koji odgovaraju hemijskom sastavu cigle i keramičkih pločica, evidentnije odstupaju od podataka za beton uglavnom u oblasti niskih energija, gde je udeo fotoefekta (sa izraženom zavisnošću od Z_{eq}) u ukupnom koeficijentu slabljenja značajniji. Relativne razlike između ovih veličina, za najveći broj energetskih grupa ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, i rastojanja kraća od 20 mfp (dovoljna za integraciju pri višim energijama), manje su od 5%.

Provera uticaja hemijskog sastava izvršena je i upoređivanjem doza za dati građevinski materijal, i vrednosti izračunatih za beton čija je gustina, po pretpostavci, jednaka gustini istraživanog materijala. Odstupanja podataka za ciglu od q_U, q_{Th} i q_K koji karakterišu beton gustine 1.6 g/cm^3 su: 5.86% 0.39% i 1.84%, respektivno, a rezultati za keramičke pločice, koji se odnose na debljinu "zidova" 2 cm, razlikuju se od odgovarajućih doza za beton iste gustine (2.5 g/cm^3) i dimenzije zidova, u iznosu: 3.85, 0% i 0%. Očigledno, gustina građevinskog materijala je parametar sa dominantnim efektom na vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze, tako da se ove veličine, za materijale bliskog ekvivalentnog atomskog broja, mogu aproksimirati vrednostima za beton specificirane gustine, i jednostavno izračunati pomoću izraza (4.6) dobijenog fitovanjem.

Kombinacija materijala

Prema podacima u Tabelama 4.4. i 4.5, prisustvo sloja keramičkih pločica, debljine d = 0.5 cm, na zidovima standardne prostorije (beton, 20 cm), umanjuje vrednosti doza koje potiču od ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, u iznosu: 5.28%, 4.60% i 4.29%, respektivno. Za prostoriju od cigle istih dimenzija, odgovarajuće relativne promene (smanjenje) q_U, q_{Th} i q_K, zbog veće razlike u gustinama materijala, neznatno su povećane: 5.55%, 5.06%, 4.52%, respektivno.

U proceni ukupnog doprinosa drugog, prekrivnog sloja, doze koje potiču od keramičkih pločica, date u Tabeli 4.4, treba umanjiti za navedene iznose (*Markkanen* 1995). Kako su, uopšteno, koncentracije aktivnosti radionuklida u drugačijim materijalima različite, uticaj prisustva sloja keramičkih pločica može se jedino razmotriti izračunavanjem konkretnih vrednosti apsorbovane doze (qA), koje odgovaraju pojedinačnim slojevima. Pretpostavljajući, u najjednostavnijem slučaju, identične koncentracije aktivnosti u svim materijalima, povećanje doze ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, uzrokovano slojem (0.5 cm) keramičkih pločica postavljenog preko betona ili cigle (20 cm), jednako je: 1, 6.5 i 0.63, u (pGy h^{-1}/Bq kg^{-1}),

odnosno 7, 9.5 i 0.93, u (pGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), respektivno (reda veličine 1%). Za veću debljinu keramičkih pločica, promene doze ipak mogu biti značajnije, posebno ukoliko je u ovom sloju povećana i koncentracija aktivnosti radionuklida.

U studiji *Markkanen*-a (1995) pokazano je da keramičkim pločicama, gustine 2.5 g/cm^3 i debljine 4 cm, na zidovima prostorije dimenzija 12 x 7 x 2.8 m^3, odgovaraju q_U, q_{Th} i q_K koje predstavljaju oko 35% vrednosti za zidove od betona debljine 20 cm. Smanjenje specifičnih jačina apsorbovane doze (q) za sloj betona, usled prekrivanja keramičkim pločicama debljine 4 cm, približno je jednako 29%. Međutim, uzevši u obzir koncentracije aktivnosti ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u betonu i keramičkim pločicama, pretpostavljene u navedenom radu, dobijeno je ukupno povećanje apsorbovanih doza (D) u iznosu oko 40%. Za identične parametre prostorije, pri maksimalnoj debljini sloja keramike, 2 cm, proračunom u disertaciji određeno je povećanje doze ≈ 24%.

Prema referenci *Turtiainen et al.* (2008), gde su koeficijenti slabljenja i parametri *Berger*-ovog faktora nagomilavanja za keramičke pločice izvedeni na osnovu odgovarajućeg hemijskog sastava i gustine, faktor slabljenja koji karakteriše smanjenje doze materijala prisustvom sloja 2 cm keramičkih pločica, ima srednju vrednost 0.84, a za dozu koja potiče od betonskog poda debljine 12 cm, jednak je 0.83. Slabljenje, izračunato u ovoj disertaciji pomoću izraza 4.4, za betonski pod u prostoriji identičnih dimenzija (5 x 4 x 2.8 m^3), ne menja se značajnije sa debljinom sloja betona, za: 12 cm, 15 cm i 20 cm iznosi približno 0.85 - 0.88.

Proračunima u radu *Moharram et al.* (2012), izvršenim za različite kombinacije slojeva u prostoriji 5 x 4 x 2.8 m^3, pokazano je da q_U, q_{Th} i q_K mogu znatnije da se menjaju, u zavisnosti od izbora građevinskih materijala i debljine pojedinačnih slojeva, tako da izračunate apsorbovane doze pripadaju opsegu od 5 nGy h^{-1} do 71 nGy h^{-1}. Dobijene vrednosti, međutim, odnose se na varijetet slučajeva koji ne omogućavaju procenu promene specifične jačine doze usled prisustva dodatnog, prekrivnog sloja, kao ni upoređivanje sa metodom proračuna i rezultatima disertacije.

Uticaj nagomilavanja zračenja na vrednost doze

Prema podacima u Tabeli 4.3, specifične jačine apsorbovane doze, q_{U0}, q_{Th0} i q_{K0}, za standardnu prostoriju od betona, dobijene izostavljanjem faktora nagomilavanja iz jednačine (3.2), niže su od q_U, q_{Th} i q_K za 47.2%, 44.7 i 42.4%, respektivno. Odgovarajući doprinosi rasejanog zračenja ukupnim vrednostima jačine doze q_U, q_{Th} i q_K, za prostoriju od cigle (zidovi - 20 cm), jednaki su: 39.3%, 40.0% i 38.0%, respektivno, a za prostoriju od keramičkih pločica ("zidovi" – 0.5 cm) ovi udeli iznose: 3.90%, 4.12% i 2.75%, respektivno.

Uticaj debljine sloja na efekat nagomilavanja zračenja, predstavljen je u Tabeli 5.3, gde su date vrednosti q_K i q_{K0} za prostoriju 5 x 4 x 2.8 m^3 od betona, debljine "zidova" d_2 = 0.5 cm, 1 cm i 2 cm. Očigledno, povećanjem debljine zidova, zbog porasta verovatnoće rasejanja fotona, relativni doprinos rasejanog zračenja, $\Delta q_K = (q_K - q_{K0})/q_{K0}$, postaje veći.

U Tabeli 5.3. prikazan je i uticaj izostavljanja nagomilavanja zračenja u prekrivnom materijalu debljine d_2, na jačinu doze koja potiče od prvog sloja [q_K(I)], debljine d_1, kao i na ukupnu dozu kombinacije [$q_K = q_K(I) + q_K(II)$], gde je, kao i u Tabeli 4.6, pretpostavljeno da su oba sloja od betona. Efekat je razmotren korišćenjem dva oblika faktora nagomilavanja u izrazu (3.2): $B_k = B_1(d_1)$ i $B_k = B_1(d_1 + d_2)$, koji odgovaraju zanemarivanju i uključivanju nagomilavanja zračenja u drugom sloju, respektivno. Uočava se da usled zanemarivanja nagomilavanja u drugom, prekrivnom sloju, jačina doze prvog sloja smanjuje se u većem procentu od odgovarajuće jačine doze prekrivnog sloja. Pritom, u razmotrenom opsegu d_1 i d_2, razlike između ovih promena postaju manje pri povećanju debljine drugog sloja, d_2.

Tabela 5.3. Jačine doze q_K i q_{K0} (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}) u prostoriji od betona debljine d_2 (cm); jačine doze q_K i q_{K0}' (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}) za sloj betona d_1 (cm), prekriven betonskim slojem d_2 (cm); odgovarajući udeli rasejanog zračenja, Δq_K (%)

	q_K (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), II sloj				q_K (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1}), I sloj			I + II sloj
d_2(cm)	q_K (II)	q_{K0} (II)	Δq_K (II)	d_1(cm)	q_K (I)	q_{K0}' (I)	Δq_K (I)	Δq_K(I+II)
0.5	3.42	3.32	2.92 %	19.5	66.66	63.94	4.08 %	3.91 %
1	6.75	6.37	5.63 %	19	63.30	58.35	7.82 %	7.54 %
2	13.12	11.7	10.82 %	18	56.92	48.6	14.62 %	13.86 %

5.1.1.3. *Zavisnost specifičnih jačina apsorbovane doze od parametara proračuna*

Dimenzije prostorije

Porast vrednosti jačina doze ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K pri povećanju zapremine kubične prostorije, prikazan na Slici 4.4. u vidu zavisnosti q_U, q_{Th} i q_K od dimenzije prostorije $x = V^{1/3}$, odražava efekte promene zapremine građevinskog materijala, kao i rastojanja zidova od tačke detekcije. Očigledno, kada se V povećava, odgovarajući porast broja tačkastih izvora koji utiče na povećanje doza, preovlađuje nad suprotnim efektom, uzrokovanim udaljavanjem izvora zračenja od tačke detekcije [u skladu sa jednačinom (3.2)].

Analiza rezultata proračuna q_U, q_{Th} i q_K za prostorije različitih dimenzija, u istraživanom opsegu zapremina V, ukazuje ipak, da se povećanjem zapremine prostorije ne dobija *a priori* porast vrednosti ovih veličina. Naime, za različite V, promene doze pri varijaciji kombinacija dimenzija (x, y, z) pripadaju opsezima koji se preklapaju. Tako, za prostoriju sa manjom zapreminom, ukoliko kombinacija njenih dimenzija znatnije odstupa od kubičnog oblika u odnosu na prostoriju veće zapremine, mogu se dobiti više vrednosti q_U, q_{Th} i q_K (*Manić et al.* 2012). Na primer, jačine doze za prostoriju sa V = 15 m^3 i odnosom dimenzija $x : y : z$ = 1.5 : 2.5 : 4.0, veće su od odgovarajućih rezultata za standardnu prostoriju (V = 56 m^3, $x : y : z$ = 2.8 : 4.0 : 5.0), koje su niže od podataka izračunatih za V = 50 m^3 i $x : y : z$ = 2.5 : 4.0 : 5.0.

Maksimalne promene q_U, q_{Th} i q_K u odnosu na vrednosti za standardnu prostoriju, određene za varijaciju zapremine prostorije u opsegu od 5 m^3 do 185 m^3 i relaciju dimenzija $x : y : z$ u granicama od 1 : 1 : 1 do 1 : 2 : 3, niže su od 6% za svaku dozu. Kako istraživani opsezi dimenzija obuhvataju najveći broj slučajeva u realnoj izgradnji, specifične jačine apsorbovane doze u prostorijama različitih dimenzija, adekvatno su aproksimirane odgovarajućim vrednostima za standardnu prostoriju. Za preciznije određivanje q_U, q_{Th} i q_K u realnim betonskim strukturama, pogodna je formula (4.5) (*Manić et al.* 2012), čija je primena, međutim, ograničena na prostorije sa debljinom svih zidova jednakom 20 cm. Formula (4.8) predstavlja sveobuhvatniji analitički izraz koji se odnosi na prostorije različitih dimenzija i debljine pojedinačnih zidova.

Literaturni podaci za doze u prostorijama varijabilnih dimenzija potvrđuju rezultate proračuna u disertaciji. Štaviše, vrednosti koje odgovaraju modelima ”sferne” i pravougaone prostorije pokazuju da, osim veličine, ni oblik prostorije nema značajniji uticaj na specifične jačine doze (*Koblinger* 1978, 1984).

U radu *Risica et al.* (2001) publikovane su relativne promene apsorbovane doze u odnosu na vrednost u standardnoj prostoriji, izračunate korišćenjem parametara reference *Markkanen* (1995), uz pretpostavku jednakih koncentracija aktivnosti ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K. Za prostorije visine 2.8 m, u kojima ostale dve dimenzije imaju vrednosti u intervalu od 2 m do 10 m,

formirajući pravougaone i kvadratne oblike osnove, dobijeno je maksimalno odstupanje 6%. Ovaj procenat određen je za prostoriju veće zapremine (oko 280 m^3) od granice opsega proračuna u disertaciji, V = 185 m^3, kojoj, prema grafiku prikazanom u navedenom radu, odgovara razlika oko 4%, kao i u disertaciji.

Rezultati izračunavanja doza za prostorije različitih zapremina, dati u referenci *Maduar and Hiromoto* (2004), takođe su u saglasnosti sa podacima u disertaciji. Prema ovom radu, naime, varijaciji dužine u opsegu od 1.5 m do 4 m, pri konstantnoj visini (2.8 m) i širini (4 m) prostorije, odgovara sniženje q_U, q_{Th} i q_K oko 5%. Promenom dužine od 4 m do 10 m doze se povećavaju približno 2%, tako da je ukupna promena svake od ovih veličina, u celom opsegu simulacije, < 5%. Opisana zavisnost u skladu je sa razmotrenim efektom odstupanja od kubične geometrije prostorije.

Položaj tačke detekcije; prisustvo prozora i vrata

Sa Slike 4.6.a), očigledno je da pomeranje tačke detekcije po površini na polovini visine standardne prostorije, nema značajniji uticaj na jačine doze. U velikom delu ove površi, do rastojanja 1 m od najbližeg zida, promene q_U, q_{Th} i q_K su zanemarljive (manje od 1%), a udaljenosti 50 cm odgovara povećanje rezultata oko 3.4% u odnosu na minimalne vrednosti, izračunate u centru prostorije [i približavanje podu (plafonu) rezultuje povišenim q_U, q_{Th} i q_K (za rastojanje 50 cm ≈ 2.8%)]. Ovaj efekat dobijen je kompenzovanjem povećanja doze, uzrokovanog približavanjem tačke detekcije jednom zidu – izvoru zračenja, istovremenim smanjenjem usled udaljavanja od drugog, suprotnog zida. Obzirom na pojedinačne udele u raspodeli doze, date na Slikama 4.6.c),d), doprinos zidova, veći za tačke udaljenije od centra, evidentno nadmašuje doze zračenja plafona i poda, koje u sredini prostorije imaju maksimum (zanemarujući prisustvo susednih prostorija).

Proračunom *Monte Carlo* metodom, u radu *Koblinger* (1978), takođe je dobijena neznatna promena jačine doze pri pomeranju tačke detekcije od središta ka zidovima ili uglovima standardne prostorije, kao i u referenci *Al-Jundi et al.* (2009), gde izračunata odstupanja q_U, q_{Th} i q_K iznose 2% – 3%. Na rastojanju 1 m od dužeg zida, jačine doze veće su oko 3% od vrednosti u centru prostorije 12 x 6 x 2.5 m^3, korišćene kao tipični model u proračunu *Mustonen*-a (1984). Razlike između najniže vrednosti apsorbovane doze u centru prostorije i rezultata za ostale lokacije, određene u radu *Turtiainen et al.* (2008), dostižu 26% (srednja vrednost 16%), usled drugačije debljine zidova, plafona i poda, kao i koncentracije aktivnosti ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u razmatranim građevinskim materijalima.

Prema zavisnosti q_U, q_{Th} i q_K od koordinata tačke detekcije, prikazanoj u radu *Maduar and Hiromoto* (2004), promenom položaja od centra standardne prostorije do rastojanja 10 cm od zida 4 x 2.8 m^2, ove veličine povećavaju se do 8%. Odgovarajuće promene doza ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunate u disertaciji: 5.94%, 6.92%, 6.84%, respektivno, u skladu su sa navedenim podatkom. Porast doze oko 10%, usled približavanja tačke detekcije dužem zidu prostorije do rastojanja 1 m, prikazan je u *Risica et al.* (2001), kao i u radu *Allam* (2009), gde je za razmak 50 cm, određeno povećanje doza oko 17%, koje, međutim, nije potvrđeno u disertaciji.

U modelovanju prostorija, prozori i vrata često se izostavljaju (*Markkanen* 1995, *Maduar and Hiromoto* 2004), što kombinacijom suprotnih efekata: umanjenje zapremine izvora - izostavljanje dela zaštite od zračenja susednih prostorija kao i tla, kao konačan rezultat daje premašaj doze do 10%, u odnosu na dozu u prostoriji sa ovim elementima (*Koblinger* 1978). Proračuni u kojima je prisustvo prozora i vrata ipak uzeto u obzir, uglavnom su izvršeni uz istovremenu varijaciju većeg broja parametara u odnosu na standardnu prostoriju (*Mustonen* 1984, *Turtiainen et al.* 2008, *Al-Jundi et al.* 2009). Na taj način, uticaj uključivanja ovih elemenata na vrednosti doza nije bilo moguće izdvojiti od efekata promene ostalih

promenljivih. Po radu *Risica et al.* (2001), na primer, prisustvom vrata, 1.5 x 2 m^2, na zidu debljine 80 cm (zidovi od tufa), apsorbovana doza u centru prostorije smanjuje se oko 6%. U disertaciji je ovaj procenat približno jednak ukupnom umanjenju specifičnih jačina doze usled izdvajanja delova zidova koji odgovaraju položajima prozora i vrata. Kako se, međutim, izračunavanja disertacije odnose na parametre standardne prostorije, upoređivanje sa rezultatom navedenog rada nije adekvatno.

Debljina zidova

Na osnovu krivih prikazanih na Slici 4.8.a),b),c), i podataka u Tabelama 4.11, 4.14, 4.15. i 4.16, promena debljine zidova ima znatni uticaj na specifične jačine apsorbovane doze u prostorijama od betona, kao i u slučajevima primene drugih građevinskih materijala i njihove kombinacije. Naime, varijaciji debljine *d*, betonskih zidova prostorije 5 x 4 x 2.8 m^3, u opsegu (5 – 20) cm odgovara relativni porast doza ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K: 54.8%, 55.6% i 57.4%, respektivno, a povećanjem *d* od 20 cm do 40 cm, ove veličine menjaju se u iznosu: 10.7%, 12.9% i 13.0%, respektivno. Primetna je, takođe, i tendencija ka saturaciji zavisnosti, odnosno smanjenje stepena promene pri većim vrednostima debljine, koje je uzrokovano suprotnim efektima povećanja broja tačkastih izvora i izraženije samoapsorpcije, tj. slabljenja zračenja u materijalu.

Razmotreni uticaj debljine zidova kvalitativno je u saglasnosti sa rezultatima proračuna u referenci *Risica et al.* (2001), gde je za promenu debljine betona od 5 cm do 20 cm, u prostoriji 5 x 4 x 2.8 m^3, dobijeno povećanje doza približno jednako 30%. Za debljinu zidova u intervalu (20 – 40) cm, u navedenom radu, određena je procentualna razlika oko 5%, a daljim porastom *d* promene doza su zanemarljive. Zavisnost q_U, q_{Th} i q_K od debljine zidova, data u radu *Maduar and Hiromoto* (2004), u skladu je sa tokom funkcije $q(d)$ na Slici 4.8. Takođe, relativne promene doza ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, određene sa grafika u ovom radu (oko 60% i 15%, za dva razmatrana intervala *d*), bliske su vrednostima izračunatim u disertaciji.

Prostorija proizvoljnih dimenzija i debljine pojedinačnih zidova

Funkcija (4.8), za pojednostavljeno računanje specifičnih jačina apsorbovane doze u prostoriji sa proizvoljnim dimenzijama i debljine pojedinačnih zidova, izvedena je primenom izraza (4.2) za dozu radionuklida u integraciji (3.10). Zato, dobijena formula odnosi se na slučajeve gde je dužina puta fotona u vazduhu: $r_a \leq 600$ cm, tj. primenljiva je na prostorije čije dimenzije: *W*, *L* i *H* (u cm), ispunjavaju uslov: $(W^2 + L^2 + H^2)^{1/2}/2 \leq 600$ cm (uopšteno, analogna relacija važi i za parametre u proračunu doze zračenja zida *x*, *y*, *z*). Opsezi dimenzija i kombinacija njihovih odnosa, kao i interval debljine zidova, upotrebljeni u proračunu, omogućavaju, ipak, korišćenje formule (4.8) za određivanje ukupnih q_U, q_{Th} i q_K (koje potiču od svih zidova) u najvećem broju realnih prostorija, kao i pojedinačnih doprinosa plafona i poda (Tabela 4.19).

5.1.2. Ekvivalentna doza u tkivima i organima; efektivna doza

Iako su konverzioni koeficijenti za ekvivalentnu dozu, za najveći broj tkiva i organa, H_T/K_a, izračunati primenom interpolacije vrednosti u referenci *Zankl et al.* (1997), rezultati disertacije razlikuju se od odgovarajućih podataka za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, saopštenih u istom radu. Naime, proračun u disertaciji podrazumevao je izotropni model zračenja u prostoriji, tako da su korišćeni konverzioni koeficijenti dati za ISO geometriju, dok je u pomenutom radu za izračunavanje H_T/K_a koji potiču od primordijalnih radionuklida, primenjena aproksimacija polubeskonačnog zapreminskog izvora zračenja u tlu (*Petoussi-Hensß et al.* 1991). Podaci za H_T/K_a i E/K_a, dobijeni za terestrijalno zračenje (*ICRP* 1996, *Zankl et al.*

1997, *Paretzke and Petoussi-Hensß* 2005), prikazani su u Tabeli 5.4, u kojoj su takođe dati rezultati proračuna konverzionih koeficijenata koji odgovaraju nizovima ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, za prostoriju dimenzija 4 x 4 x 3 m^3 od betona različite gustine, publikovani u radu *Al-Jundi et al.* (2009), kao i rezultati disertacije.

Tabela 5.4. Konverzioni koeficijenti za ekvivalentnu dozu organa i tkiva, H_T/K_a (Sv Gy^{-1}) i efektivnu dozu, E/K_a (Sv Gy^{-1}), za zračenje ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, koje potiče iz tla (*Zankl et al.* 1997) i u prostoriji (*Al-Jundi et al.* 2009), upoređeni sa rezultatima ove disertacije

	Konverzioni koeficijenti, H_T/K_a (Sv Gy^{-1})								
Organ/Tkivo	^{238}U			^{232}Th			^{40}K		
	Zankl et al. 1997	*Al-Jundi et al.* 2009	*Ova disertacija*	*Zankl et al.* 1997	*Al-Jundi et al.* 2009	*Ova disertacija*	*Zankl et al.* 1997	*Al-Jundi et al.* 2009	*Ova disertacija*
Crvena košt. srž	0.656	0.690	0.719	0.680	0.720	0.732	0.687	0.710	0.734
Debelo crevo	0.627	0.648	0.675	0.655	0.677	0.691	0.659	0.667	0.697
Pluća	0.709	0.746	0.771	0.732	0.774	0.783	0.740	0.768	0.789
Želudac	0.660	0.690	0.713	0.671	0.720	0.729	0.684	0.710	0.734
Grudi	0.796	0.817	0.835	0.816	0.839	0.843	0.817	0.840	0.846
Gonade	0.682	0.704	0.724	0.681	0.720	0.735	0.738	0.725	0.744
Bešika	0.648	0.662	0.691	0.681	0.699	0.706	0.692	0.696	0.717
Jednjak	0.608	0.676	0.703	0.635	0.699	0.716	0.638	0.696	0.727
Jetra	0.658	0.704	0.721	0.684	0.731	0.735	0.692	0.725	0.741
Tiroida	0.659	0.761	0.786	0.776	0.796	0.797	0.731	0.783	0.799
Površina kosti	0.770	0.746	0.746	0.792	0.817	0.759	0.764	0.768	0.751
Mozak	0.689	0.803	0.830	0.715	0.828	0.840	0.727	0.826	0.847
Pljuvačne žlezde	-	-	0.741	-	-	0.753	-	-	0.759
Koža	0.849	0.845	0.865	0.863	0.871	0.872	0.861	0.870	0.874
Ostatak	0.646	-	0.699	0.681	-	0.713	0.688	-	0.719
E/K_a (Sv Gy^{-1})	0.672	0.704	0.734	0.695	0.731	0.748	0.709	0.725	0.753

Očigledno, skoro svi konverzioni koeficijenti određeni u disertaciji (osim za površinu kosti) imaju veće vrednosti od rezultata *Monte Carlo* proračuna u Tabeli 5.4. Pored drugačije geometrije izvora zračenja, navedena odstupanja potiču i od različitih aproksimacija i tehnika proračuna u određivanju specifičnih jačina apsorbovane doze, pošto je izračunavanje H_T/K_a uključivalo otežinjavanje q_U, q_{Th} i q_K, za pojedine energetske grupe radionuklida, odgovarajućim (interpoliranim) konverzionim koeficijentima.

U radu *Al-Jundi et al.* (2009), *Monte Carlo* metod primenjen je samo za dobijanje vrednosti apsorbovane doze u tački detekcije u vazduhu, proračunom raspodele fluksa fotona po energetskim grupama, a ekvivalentne doze u tkivima i organima izračunate su pomoću konverzionih koeficijenata interpoliranih iz odgovarajućih podataka *ICRP* (1996) za ISO geometriju, kao i u disertaciji. Zato, procentualne razlike u odnosu na rezultate ovog rada za koeficijente ekvivalentne doze, H_T/K_a, prvenstveno su određene drugačijim metodom proračuna raspodele specifičnih jačina apsorbovane doze po energijama γ- zračenja radionuklida, i pretpostavljenim modelom prostorije.

Relativne razlike konverzionih koeficijenata za efektivnu dozu, E/K_a, za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, određenih u disertaciji, u odnosu na podatke u referenci *Zankl et al.* (1997), jednake su 8.45%, 7.09% i 6.21%, respektivno. Odgovarajuće razlike od E/K_a za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, saopštenih u radu *Al-Jundi et al.* (2009), iznose: 4.09%, 2.27% i 3.72%, respektivno. Ova odstupanja delimično su uzrokovana korišćenjem različitih skupova tkiva i organa osetljivih na izlaganje

zračenju, drugačijih tkivnih težinskih faktora, w_T, u proračunu efektivne doze. Naime, određivanje E/K_a u disertaciji izvršeno je u skladu sa preporukama *ICRP* (2007), dok su u navedenim referencama proračuni zasnovani na tkivnim težinskim faktorima datim u starijoj publikaciji *ICRP* (1991). Konverzioni koeficijenti za efektivnu dozu za: ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunati u disertaciji primenom w_T za tkiva i organe iz reference *ICRP* (1991), iznose: 0.729, 0.742 i 0.749, u (Sv Gy^{-1}), respektivno. Kako su razlike ovih vrednosti od konverzionih koeficijenata određenih prema *ICRP* (2007) manje od 1%, odstupanja rezultata disertacije od literaturnih podataka za E/K_a uzrokovana su opisanim razlikama u proračunu H_T/K_a.

Efektivne doze koje potiču od primordijalnih radionuklida, izračunate u radu *Krstic and Nikezic* (2009) za ORNL fantom *Monte Carlo* programom, u velikoj meri poklapaju se sa podacima u referenci *Zankl et al.* (1997), tako da su ove doze, kao i konverzioni koeficijenti predloženi od strane *UNSCEAR* (2000) (jednaki 0.7 za sve radionuklide), takođe niže od vrednosti u Tabeli 4.20. Rezultati navedenog rada: 0.672, 0.693 i 0.672, u (Sv Gy^{-1}), za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, respektivno, odnose se na proračun za standardnu prostoriju. Stoga odstupanja u odnosu na E/K_a određene u disertaciji, mogu se pripisati drugačijim korišćenim tkivnim težinskim faktorima, razlikama ostalih parametara izračunavanja (struktura energetskih grupa, koeficijenti slabljenja i apsorpcije energije, itd), kao i samoj tehnici proračuna.

5.1.3. Operacione dozimetrijske veličine

5.1.3.1. *Ambijentalni dozni ekvivalent*

Vrednosti konverzionog koeficijenta za ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(10)/K_a$, za različite energije zračenja, izračunate metodom faktora nagomilavanja, u Tabeli 5.5. upoređene su sa literaturnim podacima, dobijenim *Monte Carlo* proračunima. U tabeli su prikazani referentni podaci, dati u *ICRU* (1992), tj. *ICRP* (1996), kao i rezultati proračuna $H^*(10)/K_a$, publikovani u radu *Lima et al.* (2004). Radi upoređivanja sa rezultatima disertacije, predstavljene su i vrednosti koeficijenta personalnog doznog ekvivalenta $H_p(10)/K_a$, određene u radu *Veinot and Hertel* (2012), koje, prema autorima, zbog minornih razlika, mogu adekvatno aproksimirati $H^*(10)/K_a$.

Tabela 5.5. Konverzioni koeficijenti za $H^*(10)/K_a$ - podaci iz literature i rezultati disertacije

E (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv Gy^{-1})			
	ICRU (1992), *ICRP* (1996)	*Lima et al.* (2004)	$H_p(10)/K_a$, *Veinot and Hertel* (2012)	*Ova disertacija*
0.040	1.47	1.45	1.524	1.28
0.050	1.67	1.65	1.746	1.62
0.060	1.74	1.78	1.884	1.71
0.080	1.72	1.75	1.894	1.67
0.100	1.65	1.64	1.799	1.60
0.150	1.49	1.47	1.572	1.44
0.200	1.40	1.42	1.456	1.34
0.300	1.31	1.29	1.337	1.24
0.400	1.26	1.25	1.285	1.20
0.500	1.23	1.22	1.257	1.19
0.600	1.21	1.20	1.215	1.18
0.800	1.19	1.19	1.207	1.17
1	1.17	1.16	1.178	1.16
1.5	1.15	1.13	1.173	1.16
2	1.14	1.13	1.150	1.16
3	1.13	1.12	1.100	1.15

U oblasti energija E < 1.5 MeV, konverzioni koeficijenti izračunati u disertaciji, imaju niže vrednosti od odgovarajućih *ICRU* (1992) podataka, pri čemu je, izuzimajući početnu energiju opsega (40 keV), najveće relativno odstupanje 5.34%. Slična relacija važi i za poređenje sa rezultatima druga dva *Monte Carlo* proračuna, data u Tabeli 5.5.

Na osnovu rezultata eksperimentalnog određivanja ambijentalnog doznog ekvivalenta za terestrijalno γ- zračenje pomoću NaI(Tl) scintilacionog detektora, *Yi et al.* (1997) prezentovali su izraz: $H^*(10)$ (nSv h^{-1}) = 1.21·K_a (nGy h^{-1}) + 1.26. Za specificiranje koeficijenta $H^*(10)/K_a$, kome u opsegu energija od 300 keV do 3 MeV odgovara merena vrednost 1.20 ± 10%, predložena je efektivna energija E = 600 keV, na kojoj je $H^*(10)/K_a$ = 1.21. Rezultati proračuna $H^*(10)/K_a$ u ovoj disertaciji, evidentno se uklapaju u eksperimentalno dobijeni model (npr, na 600 keV, $H^*(10)/K_a$ = 1.18). Pritom, konverzioni koeficijenti izračunati korišćenjem fiksnog rastojanja r_t = 1 cm (dati na Slici 4.9), u još većoj meri podržavaju opaženi trend: na 300 keV, $H_c^*(10)/K_a$ je oko 1.26, energiji 600 keV odgovara koeficijent 1.24, koji pri porastu energije opada do vrednosti 1.23, na 3 MeV. Ipak, treba naglasiti da je samo pitanje ”merljivosti” operacionih veličina diskutabilno, jer, zapravo, instrument se kalibriše u odnosu na neku od ovih veličina korišćenjem unapred izračunatih, uglavnom referentnih (*ICRU* 1992, *ICRP* 1996), konverzionih koeficijenata (*Pelliccioni* 2000). U citiranoj referenci, metod kalibracije podrazumevao je primenu koeficijenata dobijenih *Monte Carlo* tehnikom, koji daju vezu između jačine signala instrumenta na datoj energiji i vrednosti K_a, kao i $H^*(10)$.

Vrednost $H^*(10)/K_a$ za ^{238}U, upoređena je i sa rezultatom koji se dobija izračunavanjem pomoću gama - konstante $\Gamma^*(10)$, uvedene tako da je na rastojanju r od tačkastog izvora: $H^*(10) = (1/r^2)A\Gamma^*(10)$, za radionuklid koncentracije aktivnosti A (*Harima et al.* 2005). U skladu sa analognom definicijom gama - konstante Γ (*Unger and Trubey* 1981), sledi da je: $H^*(10)/K_a = \Gamma^*(10)/\Gamma$. Tako, aproksimirajući $\Gamma^*(10)$ za ^{238}U odgovarajućim podatkom za ^{226}Ra, navedenim u *Harima et al.* (2005): $\Gamma^*(10)$ = 0.251·10^{-3} (nSv h^{-1} m^2/ Bq), dobija se: $H^*(10)/K_a$ = 0.251·10^{-3}/0.2091·10^{-3} (Sv Gy^{-1}) = 1.20 (Sv Gy^{-1}), što se neznatno (2.6%) razlikuje od vrednosti 1.17 (Sv Gy^{-1}), izračunate u disertaciji, a potvrđuje ekperimentalno određeni rezultat reference *Yi et al.* (1997).

Razlike između podataka dobijenih u disertaciji i rezultata *ICRU* (1992) potiču od različitog metoda proračuna $H^*(10)$, pri čemu najveća odstupanja mogu biti posledica aproksimacije ukupnog faktora nagomilavanja izrazom (3.12) za faktor nagomilavanja slojeva. Naime, doza u tkivu, $D_t(E_0)$, u tački r_t, proizvedena zračenjem tačkastog izvora u betonu na energiji E_0, može se prikazati kao suma doza, $D_t(E)$, koje odgovaraju ”upadnom” fluksu u r_t (nakon rasejanja u betonu) na energijama $E \le E_0$ [II izraz jednačine (5.1)]. Primenjujući koncept faktora nagomilavanja, doprinos svake pojedinačne energije, E, prikazuje se u vidu proizvoda faktora nagomilavanja apsorpcije energije u tkivu, $B_2(E)$, i doze direktnog zračenja, $D_{0t}(E)$ (III izraz). Standardno, doza direktnog zračenja na E predstavlja proizvod funkcije odziva, $R(E) = E(\mu/\rho)_t$, i fluksa zračenja u tkivu, $\Phi_t(E)$ (IV izraz), koji se dobija primenom kernela prelaza (2.14) na jačinu izvora, energije E, na površini sfere [zanemarujući $\exp(\mu_a r_t)$, ekvivalentno je proizvodu fluksa u vazduhu za položaj r_t, $\Phi_a(E)$, i atenuacionog člana, $\exp(-\mu_t r_t)$, V izraz (5.1)]. Za linearnu vezu koeficijenata apsorpcije (transfera) energije u tkivu i vazduhu, pokazanu u glavi 3, dobija se poslednji izraz jednačine (5.1). Imajući u vidu jednačinu (5.2) (*Shultis and Faw* 2005) za dozu u vazduhu u tački r_t, doza u *ICRU* tkivu (proizvedena tačkastim izvorom na E_0) data je oblikom: $B_k(E_0)D_0(E_0)\exp[-\mu_t(E_0)r_t]$, ukoliko se za sve energije zračenja rasejanog u tkivu, $B_2(E)\exp[-\mu_t(E)r_t]$ u jednačini (5.1) može aproksimirati vrednošću $B_2(E_0)\exp[-\mu_t(E_0)\, r_t]$.

$$D_{\mathrm{t}}(E_0) = \int_{E \le E_0} D_{\mathrm{t}}(E)\mathrm{d}E = \int_{E \le E_0} B_2(E) D_{0\mathrm{t}}(E)\mathrm{d}E =$$

$$\int_{E \le E_0} B_2(E)(\mu/\rho)_{\mathrm{t}} E\Phi_{\mathrm{t}}(E)\mathrm{d}E = \int_{E \le E_0} B_2(E)(\mu/\rho)_{\mathrm{t}} E \exp(-\mu_{\mathrm{t}} r_{\mathrm{t}})\Phi_{\mathrm{a}}(E)\mathrm{d}E \tag{5.1}$$

$$= k \int_{E \le E_0} B_2(E)(\mu/\rho)_{\mathrm{a}} E \exp(-\mu_{\mathrm{t}} r_{\mathrm{t}})\Phi_{\mathrm{a}}(E)\mathrm{d}E$$

$$D_{\mathrm{a}}(E_0) = \int_{E \le E_0} (\mu/\rho)_{\mathrm{a}} E\Phi_{\mathrm{a}}(E)\mathrm{d}E = B_1(E_0) D_0(E_0) \tag{5.2}$$

Za precizni proračun doze, u ovakvom slučaju rasejanja u dve sredine, neophodno je, dakle, dobijanje raspodele fluksa fotona po energijama rasejanog zračenja u tkivu, što podrazumeva rešavanje kompleksnog transportnog problema. Međutim, metodom faktora nagomilavanja, primenjenom u disertaciji, koji predstavlja uobičajenu korisnu aproksimaciju u proračunu dozimetrijskih veličina (*Trubey* 1991), vrednosti $H^*(10)$ određene su na jednostavan način, pri čemu su dobijena neznatna odstupanja od referentnih *ICRU* (1992) podataka.

Prethodno razmatranje ukazuje i na mogućnost primene hibridnog metoda za određivanje operacionih dozimetrijskih veličina, koji, pored transportnih proračuna, uključuje i koncept faktora nagomilavanja, ne umanjujući tačnost izračunavanja [kao hibridni metod, uglavnom se koristi kombinacija *Monte Carlo* i determinističkog metoda (*Anjum et al.* 2007)]. Rešavanjem *Boltzmann*-ove transportne jednačine, na primer, problem određivanja efektivne doze raščlanjuje se na proračun raspodele fluksa (koji potiče iz zapreminskog izvora) na površini u vazduhu koja obavija fantom (fantom se uklanja), cilindričnog oblika za antropomorfni model, a zatim se razmatra transport dobijenog upadnog zračenja ponovnim unošenjem fantoma u prostor (*Eckerman and Ryman* 1993). Prema izrazu (5.1), ovakvo izračunavanje u slučaju geometrijskih fantoma (za operacione veličine), očigledno se može delimično pojednostaviti, zadržavanjem transportne jednačine za određivanje raspodele $\Phi_{\mathrm{a}}(E)$ (adekvatna površina za *ICRU* sferu je sfera), ali korišćenjem metoda faktora nagomilavanja [tj. veličine $B_2(E)$] za proračun doze u *ICRU* tkivu.

5.1.3.2. *Upoređivanje izračunatih vrednosti operacionih dozimetrijskih veličina*

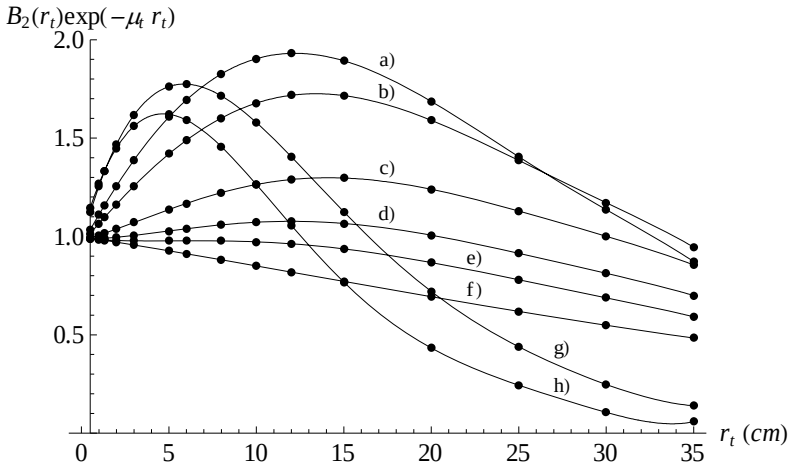
Izračunavanja dozimetrijskih veličina *Monte Carlo* programom FLUKA (*Ferrari and Pelliccioni* 1994, *Pelliccioni* 2000) daju konverzioni faktor: fluks → ambijentalni dozni ekvivalent (kao i konverzioni faktor za efektivnu dozu), tako da se ovi rezultati ne mogu direktno uporediti sa podacima predstavljenim u Tabeli 5.5. Ipak, izvesni zaključci ovih opsežnih istraživanja (sprovedenih za sve tipove zračenja i energije do 10 TeV), mogu se primeniti i na prikazane rezultate ove disertacije. Primarno, uočeno je da za pojedine upadne energije zračenja, dozni ekvivalent na određenoj dubini u *ICRU* tkivu (*ICRU* 1985) može dati potcenjenu vrednost efektivne doze, tako da, za dobijanje odgovarajuće vrednosti $H^*(10)$, treba odrediti dozni ekvivalent na ostalim položajima u fantomu. U opsegu energija zračenja ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, maksimalne vrednosti doznog ekvivalenta uglavnom su izračunate za rastojanja duž prečnika sfere (suprotno pravcu polja) različita od 1 cm, pri čemu su razlike u odnosu na vrednosti $H^*(10)$ manje od 6% (na 60 keV) (*Pelliccioni* 2000).

Obzirom na zavisnost efektivnog doznog ekvivalenta, H_{ICRU}, od energije, datu na Slici 4.11, očigledno je da $H^*(10)$ ne predstavlja konzervativnu vrednost doze pri svim energijama, za geometrijski model fantoma (u opsegu od oko 70 keV do približno 250 keV). Kako su ove veličine dobijene integracijom doznih ekvivalenata, H, u oblasti različitih r_{t}, može se zaključiti da u oblasti integracije postoje rastojanja za koja je dozni ekvivalent veći od $H^*(10)$

(barem za energije u navedenom opsegu, gde je ovakav odnos evidentan). Iako, naravno, srednja vrednost doznog ekvivalenta nije jednaka H izračunatom za srednje rastojanje, $\bar{r}_t$, u opsegu integracije, uopšteno kvalitativno ponašanje pojedinih veličina u zavisnosti od E, kao i približni odnosi između njih, mogu se razmotriti na osnovu vrednosti H za odgovarajuća srednja rastojanja. Pritom, za tačkasti izvor, ove relacije određene su vrednostima funkcije $B_2(r_t)\exp(-\mu_t r_t)$ u položajima $\bar{r}_t$, koje su na Slici 5.1. predstavljene za nekoliko energetskih grupa ^{238}U i ^{232}Th.

Uočava se da u oblasti nižih energija, srednjem rastojanju u proračunu $H^*(10)$ (oko 2 cm), odgovaraju vrednosti H veće od rezultata za $H_c^*(10)$ (pri r_t = 1cm), dok je $H_c^*(10) > H^*(10)$, za energije veće od oko 400 keV, što je u skladu sa odnosom ovih veličina datim na Slici 4.9 (manja odstupanja od relacija na Slici 5.1, prisutna su u intervalu 250 keV - 400 keV). Za obe veličine važi: H(53 keV) > H(100 keV), pri čemu je dozni ekvivalent na 100 keV veći od vrednosti H na ostalim, višim energijama, kako prikazuje i Slika 4.9.

Opsegu integracije H pri izračunavanju H_{ICRU} odgovara srednja dužina puta fotona u *ICRU* tkivu $\bar{r}_t \approx 11$ cm, čime se može objasniti tok krive na Slici 4.11. Naime, prema Slici 5.1, na ovom rastojanju je $H > H^*(10)$ ($\bar{r}_t \approx 2$ cm), za E = 100 keV, a dozni ekvivalent na 100 keV premašuje vrednosti H i za sva ostala rastojanja i energije radionuklida, što je u saglasnosti sa različitim položajima maksimuma odgovarajućih funkcija na Slici 4.11. U intervalu E gde je $H_{\mathrm{ICRU}} > H^*(10)$ (Slika 4.11), ispunjeno je: H (11 cm) > H (2 cm) (Slika 5.1), dok u oblasti viših energija, počev od oko 400 keV, važi obrnuta relacija, koja je takođe usklađena sa odnosom vrednosti doznih ekvivalenata za navedene srednje dužine puta fotona.



Slika 5.1. Vrednosti funkcije $B_2(r_t)\exp(-\mu_t r_t)$ u zavisnosti od rastojanja r_t u *ICRU* tkivu za: a) 100 keV b) 129 keV c) 209 keV d) 295 keV e) 395 keV f) 2435 keV g) 53 keV h) 47 keV

Usrednjavanjem rastojanja koje zračenje prelazi u *ICRU* sferi, po oblasti integracije korišćene u proračunu doznog ekvivalenta H_{10}, dobija se $\bar{r}_t \approx 10$ cm. Relacije između H(10 cm) na različitim energijama (Slika 5.1): H(100 keV) > H(129 keV) > H(53 keV) > H(209 keV), prate opšte karakteristike funkcije H_{10}, date na Slici 4.10. Međutim, upoređivanjem vrednosti doznih ekvivalenata na navedenim srednjim rastojanjima za pojedine energije, ne dobija se korektan opis ni kvalitativnih razlika u odnosu na $H^*(10)$. Takođe, iako je rezultat za $\bar{r}_t$ blizak srednjem rastojanju određenom za H_{ICRU}, vrednosti dve dozimetrijske veličine prilično se

razlikuju, tako da primenjeni metod upoređivanja (na osnovu $\bar{r}_t$) ne može reprodukovati opažena odstupanja. U osnovi efekta je različita raspodela "semplovanja" pojedinih dužina r_t pri integraciji H u proračunu H_{10} i H_{ICRU}. Naime, oblasti integracije u proračunu obe veličine skoro su iste: za H_{ICRU}, zračenje prelazi sva moguća rastojanja u sferi (0 cm – 30 cm), a pri određivanju H_{10} nedostaju delovi opsega (0-1) cm i (29-30) cm. Međutim, u izračunavanju H_{ICRU}, tačkama detekcije u velikom delu sfere (oko 81% zapremine), odgovaraju vrednosti r_t koje pripadaju intervalu užem od opsega r_t za H_{10}, koji, približavanjem tačke detekcije centru sfere, teži jedinstvenoj vrednosti (15 cm), što na adekvatan način reflektuje podatke za H_{ICRU}. U slučaju doznog ekvivalenta H_{10}, dobijeni rezultati mogli bi se tretirati kao linearna kombinacija doprinosa koji odgovaraju dužinama 1 cm, 15 cm i 29 cm.

U prethodnom razmatranju, treba imati u vidu da proračun ambijentalnog doznog ekvivalenta uključuje upravljeno i prošireno polje, dok određivanje doznih ekvivalenata podrazumeva realno polje u tački. Ipak, nevezano za geometriju polja, tok funkcije $B_2(r_t)\exp(-\mu_t r_t)$ na specificiranoj energiji pruža uvid u oblik zavisnosti konverzionog koeficijenta za dozni ekvivalent od dužine puta zračenja u *ICRU* sferi, a pretpostavljajući da realno polje odgovara uslovima određivanja $H^*(10)/K_a$, može se sagledati i ponašanje ove veličine. Iako $H^*(10)$ nije maksimalna vrednost doznog ekvivalenta za sve energije [npr. za E = 186 keV, maksimum $H^*(r_t)$ veći je za oko 8.9% od $H^*(10)$, što premašuje odstupanje od 4.6%, za E = 150 keV, dobijeno *Monte Carlo* metodom (*Pelliccioni* 2000)], prema rezultatima u Tabeli 4.23, za nizove radionuklida ova veličina ima veću vrednost od H_{ICRU}, usled dominantnog doprinosa $H^*(10)$ na višim energijama zračenja ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K.

Upoređivanje operacionih veličina sa literaturnim rezultatima za efektivnu dozu

Vrednosti $H^*(10)$ za zračenje ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K [0.887, 1.070 i 0.0809, u (nSv h^{-1}/Bq kg^{-1}), respektivno] znatno su veće od odgovarajućih rezultata za efektivnu dozu, E u standardnoj prostoriji [0.556, 0.682 i 0.0527, u (nSv h^{-1}/Bq kg^{-1}), respektivno], tako da u odnosu na E za nizove radionuklida, ambijentalni dozni ekvivalent određen u disertaciji, predstavlja konzervativnu veličinu. Ova relacija takođe se dobija i pri upoređivanju $H^*(10)$ sa podacima za efektivnu dozu koja odgovara odraslom antropomorfnom fantomu, u polju zračenja primordijalnih radionuklida, publikovanim u literaturi (*ICRP* 1996, *Zankl et al.* 1997, *Saito et al.* 1998, *Krstic and Nikezic* 2009, 2010).

Uprkos razlikama u modelima fantoma (*Cristy and Eckerman* 1987), efektivni dozni ekvivalent za *ICRU* sferu, za nizove radionuklida (H_{ICRU} u Tabeli 4.23), mogao bi se, u gruboj aproksimaciji, uporediti sa efektivnom dozom izračunatom za novorođenče (bebu do 1 godine). Naime, vrednosti konverzionog koeficijenta E/K_a koje odgovaraju ovoj starosnoj grupi, u oblasti energija od 0.1 MeV do 3 MeV za terestrijalno zračenje, prema *Monte Carlo* istraživanjima u radu *Conti et al.* (1999), pripadaju opsegu od 1.02 Sv Gy^{-1} do 1.10 Sv Gy^{-1}. Takođe, prema podacima datim u referenci *Petoussi-Hensß et al.* (1991), za izvore zračenja ravnomerno distribuirane u plitkom sloju tla (ravanski model), u istoj oblasti energija (kojoj pripadaju energetske grupe ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K), E/K_a nalazi se u intervalu od 0.986 Sv Gy^{-1} do 1.033 Sv Gy^{-1}. Zračenju tla kao zapreminskom izvoru, po izotropnom modelu, odgovara E/K_a čija vrednost, 0.9 (*Petoussi-Hensß et al.* 1991, *UNSCEAR* 2000), približno jednaka za sva tri radionuklida, ne odstupa značajno od H_{ICRU}/K_a, izračunatog u disertaciji. Razlike u odnosu na odgovarajuće rezultate rada *Krstic and Nikezic* (2009), za geometriju standardne prostorije, koje potiču od drugačijeg metoda izračunavanja, iznose oko: 14.1%, 13.8% i 9.4 %, za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, respektivno.

5.2. Diskusija rezultata merenja i određivanja doza

5.2.1. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima

5.2.1.1. *Sadržaj radionuklida u pojedinim vrstama materijala*

Rezultati merenja sadržaja ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u istraživanim uzorcima, dati u Tabelama 4.24.a)-e) (sumarno u Tabeli 4.25), variraju u zavisnosti od vrste građevinskog materijala. Očigledno, mogu se izdvojiti opsezi vrednosti koncentracije aktivnosti, karakteristični za dati tip materijala. Ipak, diverzitet rezultata prisutan je i u okviru iste vrste, uzrokovan različitim poreklom – lokalitetom nalazišta sirovine i/ili tehnologijom proizvodnje materijala.

Srednje koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u pesku i šljunku imaju slične vrednosti, koje se ne razlikuju značajnije za pojedinačne uzorke. Radioaktivnost ovih sirovina rečnog porekla u skladu je sa prosečnim sadržajem ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u nevezanim klastičnim sedimentima (Tabela 2.2), kojima nisu svojstveni izrazito visoki nivoi koncentracije radionuklida (uvećana koncentracija mogla bi se očekivati u morskim sedimentima) (*Bell* 1963). Niža aktivnost ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, izmerena u kvarcnom pesku, uobičajena je za ovaj materijal, usled dominantnog prisustva minerala kvarca koji ne sadrži radioaktivne elemente.

Građevinski materijali dobijeni iz karbonatnih stena: kreč, gips, dolomit i talk (kreda), po sadržaju radionuklida odražavaju način formiranja glavnih minerala u svom sastavu: hemijskom sedimentacijom iz prezasićenih rastvora (*Vesić* 1987, *NCRP* 1994). Za ove uzorke izmerene su niske aktivnosti radionuklida, u većem broju slučajeva - ispod granice detekcije (Tabele 4.24), tipično za materijale karbonatne osnove. Uzorci mermera takođe imaju veoma male količine radioaktivnih elemenata, što može ukazivati na sedimentnu prirodu protolitnih stena (*Egidi and Hull* 1999). U odnosu na nabrojane materijale, građevinski kamen odlikuje se većim sadržajem radionuklida, prvenstveno ^{40}K (i preko 1000 Bq kg^{-1}), usled zastupljenosti ovog elementa u glavnim stenskim mineralima, feldspatu i liskunu ili mineralima gline (*Mittlefehldt* 1999). Posebno, pojedini analizirani uzorci granita predstavljaju NORM materijale povećane radioaktivnosti, uzrokovane prisustvom aksesornih minerala, kristalizovanih simultano sa mineralima kiselih magmatskih stena (*IAEA* 2003).

Rezultati za opekarske strukturne elemente: pune cigle i različite blokove (kao i za crep), grupisani su u relativno uskim opsezima - standardne devijacije su oko 30%. Izuzetak predstavljaju dva bloka proizvođača iz istočne Srbije, za koje su izmerene znatno niže aktivnosti sva tri radionuklida u odnosu na ostale uzorke, koje su, međutim, karakteristične za opeke od "peskovite gline" (*El-Tahawy and Higgy* 1995). Bliske vrednosti rezultata reflektuju sličnost sastava osnovnih sirovinskih, glinovitih materijala, upotrebljenih u produktima različitih proizvođača, dok su iznosi izmerenih aktivnosti u najvećoj meri određeni mehanizmima koncentrisanja radionuklida (^{238}U i ^{232}Th) u slojevima glina (*Bell* 1963), kao i njihovim kompozitnim osobinama (prisustvom ^{40}K u osnovnoj strukturi).

Iako se za proizvodnju keramičkih pločica, u osnovi, koriste sirovine koje se primenjuju i u opekama: glina, kvarcni pesak, vrednosti svih koncentracija aktivnosti za pločice (Tabela 4.24) veće su za oko (30-50)%. Razlike u odnosu na odgovarajuće nivoe u cigli i varijacije u okviru ovog tipa prekrivnih materijala, osim drugačijeg udela pojedinih minerala gline kao i primesa, mogu biti posledica prisustva treće sirovinske komponente: feldspata - nosioca alkalija, koje snižavaju temperaturu pečenja keramike. Pored toga, pigmentni materijali u glazuri keramičkih proizvoda često su na bazi cirkonijumskih minerala, koji imaju visoke koncentracije aktivnosti radionuklida (*UNSCEAR* 2000). Za jedan od ovih TENORM materijala, cirkobit, u disertaciji je evidentiran izrazito veliki sadržaj ^{226}Ra, kao i ^{232}Th, usled izomorfne supstitucije cirkonijuma jonima uranijuma i torijuma.

Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u belom cementu niže su od rezultata za obični Portland cement (tip I), najverovatnije usled drugačijeg sastava sirovina klinkera, prvenstveno alumino-silikatne komponente (glinoviti materijal). Sulfatno-rezistentni Portland cement tipa II, kompozit, koji po deklaraciji sadrži do 35% dodataka - veštačkih pucolana (silikatni leteći pepeo) i krečnjaka, u skladu sa povećanom radioaktivnošću TENORM materijala, ima višu koncentraciju aktivnosti ^{226}Ra od ostalih uzoraka.

Rezultati ispitivanja betonskih blokova ne pokazuju znatnije prisustvo radionuklida u ovim materijalima. Očigledna je različita radioaktivnost pojedinih uzoraka, koja odražava varijacije sadržaja ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u pesku, šljunku, cementu i dodacima. Kao TENORM dodatak, u betonskim blokovima sa najvišom aktivnošću ^{226}Ra, korišćena je šljaka od uglja. Inače, još jedan TENORM analiziran u disertaciji je perlit, materijal dobijen iz alumino-silikatne rude vulkanskog porekla, koji, prema rezultatima u Tabeli 4.24, ima povišene aktivnosti svih radionuklida u odnosu na većinu ostalih ispitivanih građevinskih materijala.

5.2.1.2. *Upoređivanje sa literaturnim podacima*

Radi poređenja sa rezultatima merenja koncentracija aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, dobijenim za građevinske materijale u ovoj disertaciji, u Tabelama 5.6.a)–d), predstavljene su literaturne vrednosti ovih veličina i odgovarajuće vrednosti iz Tabele 4.25. Obzirom na mnoštvo publikovanih rezultata, prikazani su reprezentativni podaci, koji se odnose na sadržaj radionuklida u materijalima korišćenim u različitim delovima sveta, a dati su i rezultati dosadašnjih istraživanja radioaktivnosti građevinskih materijala na teritoriji Republike Srbije.

Tabela 5.6.a) Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u pesku i šljunku različitog geografskog porekla

Sirovine	Zemlja porekla	Aktivnost radionuklida *A* (Bq/kg)			Referenca
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Pesak	Alžir	12	7	74	*Amrani and Tahtat* (2001)
	Australija	52	48	115	*Beretka and Mathew* (1985)
	Brazil	10	12	51	*Malanca et al*. (1995)
	Egipat	33	27	385	*Medhat* (2009)
	Grčka	18	17	367	*Stoulos et al.* (2003)
	Indija	9	52	66	*Kumar et al.* (2003)
	Kina	41	22	302	*Xinwei* (2005)
	Kuba	17	16	208	*Brigido Flores et al.* (2008)
	Turska	23	26	527	*Turhan et al.* (2008)
	USA	37	33	18	*Ingersoll* (1983)
	Srbija (kvarcni)	5	4	84	*Popović and Todorović* (2006)
	Srbija (Dunav)	8	7	300	*Radenković et al.* (2009)
	Srbija	12	16	348	*Ova disertacija*
Šljunak	Alžir	24	10	259	*Amrani and Tahtat* (2001)
	Brazil	7	24	205	*Malanca et al*. (1995)
	Egipat	10	5	159	*Medhat* (2009)
	Izrael	15	3	50	*Kovler et al.* (2002)
	Kina	29	20	287	*Xinwei* (2005)
	Kuba	20	13	134	*Brigido Flores et al.* (2008)
	Tunis	5	5	88	*Gharbi et al.* (2012)
	Turska	22	26	482	*Turhan et al.* (2008)
	Srbija	12	1	43	*Popović and Todorović* (2006)
	Srbija	19	14	333	*Ova disertacija*

Tabela 5.6.b) Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u vezivnim strukturnim materijalima u pojedinim zemljama

Vezivni materijali	Zemlja porekla	Aktivnost radionuklida *A* (Bq/kg)			Referenca
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Cement	Alžir	41	27	422	*Amrani and Tahtat* (2001)
	Australija	52	48	115	*Beretka and Mathew* (1985)
	Brazil	62	58	564	*Malanca et al.* (1993)
	Egipat	48	22	220	*Medhat* (2009)
	Grčka	15-25	8-16	141-320	*Papastefanou et al.* (2005)
	Indija	46	42	36	*Kumar et al.* (2003)
	Kina	68	52	173	*Xinwei* (2005)
	Kuba	23	11	467	*Brigido Flores et al.* (2008)
	Tunis	44	12	130	*Gharbi et al.* (2012)
	Turska	18-82	8-49	62-476	*Turhan et al.* (2008)
	Velika Britanija	22	7	141	*NEA-OECD* (1979)
	Srbija	49	17	238	*Popović and Todorović* (2006)
	Srbija	65	16	188	*Ujić et al.* (2010)
	Srbija	32	18	121	*Ova disertacija*
Gips	Alžir	50	21	275	*Amrani and Tahtat* (2001)
	Egipat	39	25	226	*Medhat* (2009)
	Indija	8	-	27	*Kumar et al.* (2003)
	Izrael	10	6	51	*Kovler et al.* (2002)
	Kina	65	49	161	*Xinwei* (2005)
	Tunis	6	4	28	*Gharbi et al.* (2012)
	Turska	5	5	59	*Turhan et al.* (2008)
	Srbija	10	2	14	*Ujić et al.* (2010)
	Srbija	7	2	26	*Ova disertacija*

Tabela 5.6.c) Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u nosećim strukturnim materijalima u pojedinim zemljama

Strukturni materijali	Zemlja porekla	Aktivnost radionuklida *A* (Bq/kg)			Referenca
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Beton	Australija	15	41	200	*Beretka and Mathew* (1985)
	Egipat	19	8	76	*Sharaf et al.* (1999)
	Finska	33	34	800	*Mustonen* (1984)
	Grčka	8-54	8-25	140-583	*Papastefanou et al.* (2005)
	Holandija	15	16	130	*Ackers et al.* (1985)
	Hong Kong	83	74	776	*Ng et al.* (1995)
	Indija	21	16	178	*Sahoo et al.* (2007)
	Italija	19	24	457	*Battaglia et al.* (1985)
	Kuba	25	12	595	*Brigido Flores et al.* (2008)
	Nigerija	16	40	243	*Ademola and Farai* (2005)
	Turska	16	9	150	*Turhan et al.* (2008)
	USA	22	11	350	*Parades et al.* (1987)
	Srbija (gas-b.)	9	5	121	*Popović and Todorović* (2006)
	Srbija	17	16	278	*Ujić et al.* (2010)
	Srbija	18	14	251	*Ova disertacija*
Cigla	Alžir	65	51	675	*Amrani and Tahtat* (2001)
	Australija	41	89	681	*Beretka and Mathew* (1985)
	Brazil	47	120	322	*Malanca et al.* (1995)

	Egipat	30	21	289	*Medhat* (2009)
	Finska	80	62	990	*Mustonen* (1984)
	Grčka	73	41	676	*Pakou et al.* (1994)
	Holandija	39	41	560	*Ackers et al.* (1985)
	Indija	16	12	60	*Sahoo et al.* (2007)
	Iran	33	30	700	*Fathivand et al.* (2007)
	Kina	59	50	714	*Xinwei* (2005)
	Kuba	57	12	857	*Brígido Flores et al.* (2008)
	Nemačka	59	67	673	*NEA-OECD* (1979)
	Pakistan	24	43	509	*Khan et al.* (2010)
	Tunis	46	51	631	*Gharbi et al.* (2012)
	Turska	31	37	776	*Turhan et al.* (2008)
	Srbija	34	43	579	*Krstić et al.* (2007)
	Srbija	62	57	717	*Ujić et al.* (2010)
	Srbija	31	40	460	*Ova disertacija*

Tabela 5.6.d) Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u prekrivnim konstrukcionim materijalima u pojedinim zemljama

Prekrivni materijali	Zemlja porekla	Aktivnost radionuklida *A* (Bq/kg)			Referenca
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Keramika	Alžir	55	41	410	*Amrani and Tahtat* (2001)
	Egipat	52	33	450	*Medhat* (2009)
	Grčka	55	41	488	*Pakou et al.* (1994)
	Indija	28	64	24	*Kumar et al.* (2003)
	Italija	114	55	506	*Righi et al.* (2009)
	Izrael	46	48	776	*Kovler et al.* (2002)
	Kina	91	87	768	*Xinwei* (2004)
	Sirija	59	40	292	*Othman and Mahrouka* (1994)
	Turska	40-105	45-88	290-1044	*Turhan et al.* (2008)
	Srbija	50-79	43-71	620-1049	*Krstić et al.* (2007)
	Srbija	46	52	600	*Ova disertacija*
Granit	Austrija	25	55	911	*Sorantin and Steger* (1984)
	Egipat	65	60	920	*Medhat* (2009)
	Grčka	67	95	1200	*Pavlidou et al.* (2006)
	Hong Kong	180	122	1248	*Ng et al.* (1995)
	Indija	125	82	112	*Kumar et al.* (2003)
	Kipar	1-588	1-906	50-1606	*Tsortsis et al.* (2003)
	Turska	68	77	915	*Turhan et al.* (2008)
	Srbija	31	39	607	*Ova disertacija*
Mermer	Alžir	23	18	310	*Amrani and Tahtat* (2001)
	Austrija	2	7	27	*Sorantin and Steger* (1984)
	Egipat	14	3	7	*Moharram et al.* (2012)
	Indija	12	3	10	*Sahoo et al.* (2007)
	Pakistan	8	3	26	*Aslam et al.* (2002)
	Sirija	18	1	4	*Othman and Mahrouka* (1994)
	Turska	8	6	58	*Turhan and Varinlioğlu.* (2008)
	Srbija	5-37	5-19	9-31	*Krstić et al.* (2007)
	Srbija	2-7	<1	64	*Ujić et al.* (2010)
	Srbija	5	2	14	*Ova disertacija*

Prema podacima navedenih istraživanja [Tabele 5.6.a)-d)], koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, izmerene za materijale u disertaciji, očigledno ne odstupaju od opsega vrednosti

koji odgovaraju materijalima iste vrste u različitim delovima sveta. Pritom, za većinu materijala, rezultati merenja pripadaju srednjem ili donjem delu ovih opsega. Takođe, sadržaji prirodnih radionuklida u pojedinim uzorcima, prema publikaciji *EC* (1999), nisu veći od srednjih vrednosti određenih za materijale u zemljama Evropske Unije (EU). Naime, usrednjene po broju stanovnika, tipične koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K za beton koji se koristi u EU jednake su: 40, 30 i 400, u Bq/kg, a za crvenu ciglu odgovarajući podaci su: 50, 50, 670, u Bq/kg, respektivno, što u oba slučaja premašuje srednje vrednosti, kao i većinu rezultata za beton i ciglu, datih u Tabeli 4.25. i Tabelama 4.24.a)-e). Radioaktivnost izmerena u disertaciji za gips, i, posebno, gas-beton, znatno je niža od navedenih prosečnih aktivnosti radionuklida za ove materijale u EU, a jedino dva uzorka građevinskog kamena iz uvoza, imaju veći procenat ^{40}K od srednjeg sadržaja za uzorke EU.

Generalno, koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K određene u disertaciji, ne razlikuju se značajno od prethodno publikovanih rezultata za materijale u Srbiji. Srednja koncentracija aktivnosti ^{40}K za ciglu niža je za oko 25% od vrednosti koja se dobija na osnovu podataka u radu *Krstić et al.* (2007), dok se srednje aktivnosti ^{226}Ra i ^{232}Th gotovo poklapaju sa rezultatima ovog rada. Sadržaj ^{226}Ra i ^{232}Th u keramičkim pločicama takođe je sličan, a za ^{40}K u disertaciji su dobijene i vrednosti niže od donje granice opsega aktivnosti ^{40}K u navedenom radu. U referenci *Nikezić* (1990), za većinu materijala (posebno za "šljako-blokove") određene su više koncentracije aktivnosti ^{226}Ra od izmerenih u disertaciji, za ^{232}Th (tj. ^{228}Ac) rezultati se manje razlikuju (približno su jednaki u slučajevima merenja peska i šljunka), dok su odgovarajuće vrednosti za ^{40}K u cigli, gipsu i cementu bliske rezultatima datim u Tabeli 4.25. Opažena odstupanja u slučaju uzoraka cementa i betona, mogu poticati od različitih TENORM sadržaja u ovim materijalima.

U radu *Ujić et al.* (2010) takođe je publikovana veća aktivnost ^{226}Ra za cement (oko 50%), kao i za ciglu, gde srednja relativna razlika iznosi 32%, a rezultati za: betonske blokove, gips i mermer približni su vrednostima u disertaciji. U slučaju gas-betona, saopštena koncentracija aktivnosti ^{226}Ra niža je za oko 66% od podatka u Tabeli 4.25; suprotno tome, za ^{232}Th dobijen je rezultat veći za 50%, dok je sadržaj ^{40}K sličan vrednosti u tabeli. Kako u ovom radu proizvođači ispitivanih materijala nisu specificirani (kao ni tip cementa), a pored toga, vršena su ispitivanja samo jednog uzorka cementa i 3 uzorka cigle (i betonskih blokova), navedene varijacije za ciglu i cement mogu biti pripisane različitom poreklu uzoraka. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K dobijene u disertaciji, ne odstupaju u većoj meri od srednjih rezultata za građevinske materijale, sirovine i finalne produkte, proizvedene u Srbiji '80-tih i '90-tih godina prošlog veka, prikazanih u *Popović and Todorović* (2006). Podaci za cement u ovoj referenci, razlikuju se za približno 15% od vrednosti za Portland cement tipa II; pesak i šljunak imaju oko 40% niži sadržaj ^{40}K, koji je u kreču viši do 3 puta od koncentracije aktivnosti navedene u Tabeli 4.25. Rezultati dati za glinu, korišćenu u keramičkoj industriji '90-tih godina, bliski su opsegu podataka za keramičke pločice analizirane u disertaciji.

5.2.2. Apsorbovana doza u vazduhu i efektivna doza za izlaganje u prostoriji

5.2.2.1. *Doze za pojedinačne građevinske materijale*

Vrednosti doza za uzorke, prikazane u Tabelama 4.26.a)-e), tj. 4.27, izračunate su na osnovu uobičajenih udela (gornje granice, aproksimativno) ovih materijala u ukupnoj građevinskoj masi, pretpostavljajući upotrebu u prostoriji dimenzija 5 x 4 x 2.8 m^3. Pritom, uzeta je u obzir različita gustina materijala, kao i debljina sloja za pojedinačne primene. Na ovaj način, doprinos datog materijala izlaganju u prostoriji sagledan je realnije u odnosu na procene doze izvršene primenom specifičnih apsorbovanih doza za beton, datih u *UNSCEAR* (2000), uz pretpostavku 100% udela svakog materijala u zidovima debljine 20 cm. Metod u disertaciji

svakako je adekvatniji i u poređenju sa određivanjem doza u prostoriji pomoću vrednosti q_U, q_{Th} i q_K za izlaganje zračenju tla, takođe publikovanih u *UNSCEAR* (2000), usled nezanemarljivih razlika u geometrijskim uslovima ozračivanja. Pored toga, u mnogim radovima jačine doze za prekrivne materijale dobijene su pomoću izraza *EC* (1999), izvedenog za sloj keramike (na svim zidovima) debljine 3 cm. Pretpostavljena vrednost može aproksimirati debljinu prekrivnih ploča od mermera, granita ili drugog građevinskog kamena, ali, u najvećem broju slučajeva, znatno premašuje debljinu keramičkih pločica.

Usled manjih udela materijala u masi konstrukcije, i nižih vrednosti specifičnih apsorbovanih doza izračunatih u disertaciji od q_U, q_{Th} i q_K datih u *EC* (1999), kao i *UNSCEAR* (2000), rezultati za jačine doze koje potiču od pojedinih uzoraka, niži su od odgovarajućih podataka u određenom broju radova (izuzimajući, naravno, uticaj razlika u aktivnostima radionuklida). Tako, u referenci *Turhan et al.* (2008) srednje apsorbovane doze (i efektivne doze) za istraživane strukturne materijale imaju 2 - 12 puta veće vrednosti od rezultata u Tabeli 4.27, zavisno od masenog udela materijala korišćenog u disertaciji, a doze za ciglu publikovane u *Ali et al.* (1996), više su za oko 50%. Primenom specifičnih apsorbovanih doza za tlo, u radovima *El Afifi et al.* (2006) i *El-Taher* (2009), određene su 10, tj. 6 puta veće vrednosti za cement, dok su za mermer iznosi viši 5 i više puta, kao i u radu *Tufail et al.* (2000). Prema podacima u *Tzortzis et al.* (2003), doza koja potiče od granita, upotrebljenog za polovinu građevinske mase, veća je 2.2 puta od rezultata u Tabeli 4.27 (koji se odnosi na granit kao strukturni materijal), a odgovarajuća doza u radu *El Afifi et al.* (2006) viša je 2.6 puta. U aproksimaciji geometrije zračenja tla, podaci koji odgovaraju keramičkim pločicama, dobijeni u referencama *Sahoo et al.* (2007) i *Turhan and Varinlioğlu* (2012), premašuju rezutate u disertaciji 25 i 5 puta, respektivno, dok je vrednost određena u radu *Medhat* (2009) veća za oko 150%.

U referencama u kojima su odgovarajući udeli pojedinačnih materijala u građevinskoj masi uzeti u obzir, uglavnom su publikovane ukupne vrednosti doze u prostoriji. Ipak, rezultati disertacije mogu se uporediti sa dozama dobijenim u radu *Mustonen* (1984) (za prostoriju 12 x 6 x 2.5 m^3). Naime, doza za zidove od cigle, 42.9 nGy h^{-1}, slična je srednjoj vrednosti za punu opeku, datoj u Tabeli 4.27 (39.4 nGy h^{-1}), a podatak za gas-beton, 11.2 nGy h^{-1}, poklapa se sa rezultatom disertacije (10.9 nGy h^{-1}). Apsorbovana doza koja odgovara betonu, 31.1 nGy h^{-1}, bliska je gornjoj granici opsega za ovaj materijal u disertaciji, 28.6 nGy h^{-1}. U radu *Ademola and Farai* (2005) određene su efektivne doze koje potiču od betonskih blokova u prostoriji 3.6 x 3.6 x 3 m^3, čiji opseg, (0.21 – 0.40) mSv y^{-1}, obuhvata veće vrednosti od podataka za beton u Tabeli 4.27 (do 0.15 mSv y^{-1}). Odstupanja u rezultatima potiču od viših aktivnosti ^{232}Th, kao i od većih specifičnih apsorbovanih doza, određenih u pomenutom radu.

5.2.2.2. *Premašaj doze za pojedinačne materijale u odnosu na zračenje tla*

Doza osnovnog zračenja tla

Za izlaganje zračenju primordijalnih radionuklida prisutnih u tlu, apsorbovana doza određena u disertaciji - 38 nGy h^{-1}, manja je od terestrijalne doze usrednjene za populaciju Zemlje, koja iznosi 58 nGy h^{-1} (direktna merenja), tj. 54 nGy h^{-1} (proračunom, na osnovu koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida) (*UNSCEAR* 2000, 2010). Vrednost doze data u disertaciji, takođe je niža i od odgovarajućeg srednjeg podatka za Evropu, 50 nGy h^{-1} (*EC* 1999).

Srednja vrednost apsorbovane doze koja odgovara aktivnostima radionuklida za tlo u naselju Niška Banja, dobijena na osnovu svih podataka u Tabeli 4.28 (77.4 nGy h^{-1}), pripada opsegu većih doza (od 70 do 200 nGy h^{-1}), kojima je izloženo manje od 30% svetske populacije (*UNSCEAR* 2000). Bez uračunavanja uzoraka sedimenata doza za teritoriju ovog mesta nalazi se u intervalu srednjih vrednosti, (50 – 59) nGy h^{-1}, za najveći procenat stanovništva Zemlje.

Obe doze, za oblast grada Niša i područje Niške Banje, niže su u odnosu na srednju vrednost za terestrijalno zračenje, 62.8 nGy h^{-1}, određenu za populaciju Republike Srbije u radu *Dragović et al.* (2007). U ovoj referenci, inače, kao opseg apsorbovane doze koja odgovara zračenju tla u Srbiji, prezentovan je interval (16.9-125) nGy h^{-1}.

Uopšteno, drugačije vrednosti apsorbovane doze dobijene su usled varijacije sadržaja ^{238}U (^{226}Ra), ^{232}Th i ^{40}K u zemljištu, koji su na pojedinim lokalitetima značajno različiti od vrednosti za teritoriju grada Niša i okoline. Tako, prema novijim podacima *UNSCEAR*-a (2010) za svetsku populaciju, srednje koncentracije aktivnosti ^{226}Ra i ^{232}Th u tlu, 32 Bq/kg i 45 Bq/kg, respektivno, veće su za 42% od rezultata za zemljište Niša, dok je aktivnost ^{40}K, 412 Bq/kg, identična srednjoj izmerenoj vrednosti za ovo područje (*ZZZR* 2012). Inače, podaci *ZZZR* (2012), slični su ranije datim srednjim aktivnostima ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K za svet: 25, 25 i 370 (*UNSCEAR* 1982), tj. 22, 37 i 400 (*NCRP* 1994), u (Bq/kg), respektivno.

Pored nejednakih sadržaja radionuklida, razlike u vrednostima doze potiču i od drugačijih specifičnih jačina apsorbovane doze, primenjenih za određivanje ove veličine. Naime, q_U, q_{Th} i q_K, izračunati u disertaciji za zračenje tla, niži su od odgovarajućih parametara u *UNSCEAR* (2010) za 17.3%, 14.4% i 0.7%, respektivno. Radi upoređivanja sa rezultatima disertacije, ove vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze za terestrijalno zračenje, dobijene u radu *Saito and Jacob* (1995), kao i podaci iz drugih referenci, prikazani su u Tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Literaturne vrednosti specifičnih jačina apsorbovane doze za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u zemljištu (na 1 m visine od površine tla)

Referenca	q (nGy h^{-1}/ Bq kg^{-1})		
	^{238}U (^{226}Ra)	^{232}Th	^{40}K
Beck (1972)	0.430	0.666	0.0422
Saito and Jacob (1995)	0.462	0.604	0.0417
Markkanen (1995)	0.470	0.572	0.0421
Clouvas et al. (2000) - MCNP	0.381	0.517	0.0378
Clouvas et al. (2000) - MC	0.387	0.524	0.0381
Clouvas et al. (2000) - GEANT	0.400	0.544	0.0400
Ova disertacija	0.394	0.528	0.0414

Očigledno, q_U, q_{Th} i q_K određeni u disertaciji, najbliži su odgovarajućim parametrima dobijenim pomoću *Monte Carlo* programa MC, u radu *Clouvas et al.* (2000). Ipak, u ovim izračunavanjima pretpostavljena gustina zemljišta iznosi 1.3 g/cm^3, tako da je sličnost rezultata zapravo posledica dvostrukih razlika: u tehnici proračuna i korišćenim vrednostima relevantnih parametara. Razlike, zatim, nisu znatne i u odnosu na rezultate primene metoda faktora nagomilavanja u istraživanju *Markkanen*-a (1995), pri čemu odstupanja, kao i u slučaju proračuna q_U, q_{Th} i q_K za prostoriju, potiču od različite strukture energetskih spektara ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, i upotrebe drugačijeg funkcionalnog oblika faktora nagomilavanja.

Premašaj doze

Prema uvidu u publikovane podatke, premašaj parcijalnih efektivnih doza (koje odgovaraju učešću određenih materijala u masi izvora zračenja), u odnosu na efektivnu dozu za izlaganje u spoljašnjoj sredini gotovo nije razmatran u dosadašnjim istraživanjima. Uglavnom su date efektivne doze za zračenje pojedinih građevinskih materijala u prostoriji, bez upoređivanja sa odgovarajućim spoljašnjim ekvivalentom.

Približne vrednosti premašaja, za korišćenje materijala u standardnoj prostoriji, određene su jedino u referencama *Markkanen* (1995) (beton i pločice), i *EC* (1999) (beton), za terestrijalni

fon 71 nSv h^{-1} i 50 nSv h^{-1}, respektivno. Rezultat za beton znatno je niži od granice doze 1 mSv y^{-1}, a zračenje pločica ne prelazi ni limit 0.3 mSv y^{-1} (*Markkanen* 1995). Po *EC* (1999), upotreba betona sa manjim sadržajem radionuklida rezultuje dozom koja je niža od spoljašnjeg fona, kao i većina rezultata disertacije za uzorke ove vrste. Pretpostavljajući prostoriju sa svim zidovima, podom i plafonom od betona, srednjim nivoima aktivnosti [40, 30, 400, u (Bq/kg), za ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, respektivno] odgovara doza veća za 0.25 mSv y^{-1} od vrednosti za zračenje zemljišta, a izostavljanjem doprinosa plafona premašaj iznosi 0.10 mSv y^{-1}. Na osnovu ovih podataka *EC* (1999), sledi da doza koja odgovara upotrebi betona u zidovima nije veća od fona ni za srednje koncentracije aktivnosti radionuklida, što je kvalitativno u skladu sa podacima u Tabeli 4.27.

Podaci o razlici doze u prostoriji i vrednosti spoljašnjeg fona, za osnovne građevinske materijale u EU, implicitno su sadržani i u referenci *Nuccetelli et al.* (2012). Zračenje zidova od cigle u 10 zemalja (35.3% populacije) premašuje odgovarajuću dozu tla, a srednje doze za zidove od betona više su od fona u 9 članica EU, sa 49.4% stanovništva. Ni u jednom slučaju premašaj doze nije veći od granične vrednosti 0.3 mSv y^{-1}, što je saglasno rezultatima disertacije za primenu ova dva materijala (inače, prema broju uzoraka, 33.3 % cigli i 12.5% betonskih blokova u disertaciji, rezultuje dozom većom od terestrijalnog fona).

5.2.2.3. *Indeks koncentracije aktivnosti (gama - indeks)*

Prema dokumentu *EC* (1999), gama-indeks je definisan izrazom:

$$I = \frac{A_{\mathrm{Ra}}}{300\ \mathrm{Bq/kg}} + \frac{A_{\mathrm{Th}}}{200\ \mathrm{Bq/kg}} + \frac{A_{\mathrm{K}}}{3000\ \mathrm{Bq/kg}}, \tag{5.3}$$

koji se razlikuje od izraza (4.11), izvedenog u disertaciji. Naime, jednačina (5.3) dobijena je korišćenjem specifičnih jačina apsorbovane doze ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, izračunatih u radu *Mustonen* (1984). Primenjena je, takođe, srednja vrednost apsorbovane doze u spoljašnjoj sredini, 50 nGy h^{-1}, određena prema srednjim koncentracijama terestrijalnih radionuklida za stanovništvo u Evropi (*Markkanen* 1995), a, pored toga i konverzioni faktor E/K_a = 0.7 Sv Gy^{-1}, za zračenje radionuklida iz zemljišta (*UNSCEAR* 1993).

Za granicu doze 1 mSv y^{-1}, gama-indeks (4.11) dopušta upotrebu građevinskih materijala nešto viših koncentracija radionuklida - oko 13%, u odnosu na standardni izraz (5.3). S druge strane, uslov za granicu doze 0.3 mSv y^{-1} [$I < 0.4$, izraz (4.11)] restriktivniji je u odnosu na kriterijum *EC* (1999), $I < 0.5$ [prema (5.3)]. U slučaju materijala ograničene upotrebe, nepromenjen uslov odgovara dozi 0.3 mSv y^{-1}, a za granicu 1 mSv y^{-1} maksimalna vrednost I niža je oko 20% od vrednosti *EC* (1999).

Vrednosti gama-indeksa za istraživane materijale

Rezultati u Tabeli 4.29. koji ispunjavaju kriterijum za vrednost gama-indeksa, najčešće se odnose na građevinske materijale kod kojih je ispunjen i odgovarajući dozimetrijski uslov upotrebljivosti (granice doze), pošto je u oba slučaja korišćen podatak za lokalni terestrijalni fon. Pritom, verovatna je netačnost iskaza u suprotnom smeru, jer su za izvođenje izraza (4.11) primenjene specifične apsorbovane doze za standardnu prostoriju. Tako, podaci u Tabeli 4.29. uglavnom predstavljaju gornje limite I za materijale manje gustine od vrednosti za beton, kao i za one koji se ne koriste u celokupnoj zapremini građevinske konstrukcije. Pošto najveći broj materijala pripada grupi sa nižim faktorom iskorišćenosti, ovaj kriterijum zapravo obezbeđuje konzervativnu procenu ispunjenosti dozimetrijskog uslova.

Evidentno, za sve ispitivane uzorke je $I < 1$, osim za cirkobit kome odgovara $I = 11.6$ (Tabela 4.29). Dakle, na osnovu vrednosti gama-indeksa izračunatih pomoću formule (4.11), izuzev

cirkobita, svi materijali ispunjavaju dozimetrijski uslov određen graničnom vrednošću 1 mSv y^{-1}, i sa stanovišta zaštite od zračenja, mogu se koristiti u punom iznosu (100% udela). Međutim, pošto izraz *EC* (1999) daje vrednosti *I* veće od rezultata u disertaciji za oko 13%, primenom (5.3), za uzorak granita "New Imperial Red", dobija se $I = 1.09$, tako da njegova upotreba u vidu strukturnog materijala, prema *Pravilniku* (2011b), ne bi bila dozvoljena. S druge strane, ovaj granit može se koristiti kao prekrivni unutrašnji građevinski materijal ($I < 6$) ili u eksterijeru, kao i u niskogradnji – za popločavanje ili nasipanje (*STUK* 2010). Za uzorak cirkobita vrednost *I* prelazi sve limite gama-indeksa za konstrukcione materijale, ali, obzirom na uobičajeni sadržaj u glaziranim pločicama i znatno niži udeo u ukupnoj građevinskoj masi, za ovaj materijal kriterijum *I* prilično je neusklađen sa dozimetrijskim uslovom, koji dopušta njegovo korišćenje u navedenom iznosu.

Relacija $I < 0.4$ ne važi za veći broj uzoraka cigle (16), sve keramičke pločice domaće proizvodnje (5) i polovinu uzoraka pločica iz uvoza (5) kao i granita (4), sve uzorke crepa (4), po 1 uzorak: građevinskog kamena, feldspata, fasadne cigle, betona, bentonita, perlita. Prema kiterijumu vrednosti *I*, dakle, efektivna doza za 41 materijal premašuje dozu koja odgovara zračenju prirodnih radionuklida iz tla u oblasti Niša, za iznos veći od 0.3 mSv y^{-1}. Kako, na osnovu rezultata dobijenih za realnije udele i gustine materijala, terestrijalni fon premašuju samo 2 uzorka granita, restriktivnost kriterijuma gama-indeksa je očigledna. Zato, identično tvrđenju *EC* (1999), ovaj parametar može biti primenjen jedino kao identifikator potencijalnih izvora povećanih doza, a za ograničenje korišćenja ili eliminisanje materijala iz upotrebe u građevinarstvu potrebna je odgovarajuća provera ispunjenosti dozimetrijskog uslova.

Pošto u izrazu za gama-indeks, kao jedine promenljive figurišu koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, uz izvesna nevelika odstupanja, diskusija u vezi vrednosti ovog parametra za pojedine građevinske materijale prikazane u referencama, uglavnom se svodi na prethodno razmatranje sadržaja radionuklida. Pritom, publikovani opsezi literaturnih podataka za *I* (*Sorantin and Steger* 1984, *El-Tahawy and Higgy* 1995, *Krstić et al.* 2007, *Papaefthymiou* 2008, *Gharbi et al.* 2012, *Ravisankar et al.* 2012), odgovaraju vrednostima dobijenim u disertaciji u većoj meri od rezultata određivanja doza za pojedinačne uzorke.

5.2.2.4. *Srednja doza u prostoriji*

Upoređivanje sa rezultatima merenja

Srednja apsorbovana doza, određena u disertaciji za modele prostorije sa zidovima od cigle i betona, upoređena je sa rezultatima direktnih merenja, obavljenih dozimetrom kompanije *Ludlum measurements inc*. Za 3 lokacije na otvorenom prostoru u Nišu, usrednjavanjem 100 očitavanja instrumenta dobijen je podatak za ambijentalni dozni ekvivalent $H^*(10) = 0.115$ μSv h^{-1}. Merenjima u prostoriji sa zidovima od cigle odgovara rezultat: 0.159 μSv h^{-1}, a u betonskoj zgradi je: 0.175 μSv h^{-1}. Primenom konverzionog koeficijenta $H^*(10)/K_a \approx 1.17$ Sv Gy^{-1}, izračunatog u disertaciji za zračenje prirodnih radionuklida, određena je apsorbovana doza za izlaganje u spoljašnjoj sredini: $D = 98.3$ nGy h^{-1}. Izdvajanjem odgovarajuće terestrijalne komponente za grad Niš (38.0 nGy h^{-1}), procenjen je doprinos kosmičkog zračenja: 60.3 nGy h^{-1}. Rezultati merenja u zatvorenom prostoru, izraženi u (nGy h^{-1}) i umanjeni za ovaj član, daju vrednost apsorbovane doze koja potiče od građevinskih materijala: 75.60 nGy h^{-1}, za prostoriju sa zidovima od cigle (pod i plafon su od betona), odnosno: 89.27 nGy h^{-1}, za zatvoreni prostor (hodnik) u betonskoj zgradi.

Iako opisani način daje grubu procenu doze, rezultat u Tabeli 4.30.b), za prostoriju od pune cigle bez prekrivnog sloja (koja modeluje prostoriju u kojoj je izvršeno merenje), ne razlikuje se značajno - 12.0%, od doze određene merenjem. Pošto je doza koja odgovara upotrebljenoj punoj opeki (proizvođač: "Ćele Kula" Niš), gotovo identična srednjoj vrednosti za punu ciglu

(primenjenoj u proračunima), odstupanja mogu poticati od veće debljine zidova (u proseku - 25 cm), od vrednosti d = 20 cm, korišćene za podatke u Tabeli 4.30. Znatno veće razlike između "izmerene" i izračunate apsorbovane doze u slučaju betonske strukture, pored nepreciznosti metoda, mogu biti posledica prisustva veće građevinske mase (deblji spoljni zidovi, stepenište), kao i korišćenja prekrivnog sloja teraco betona sa mogućim višim sadržajem radionuklida.

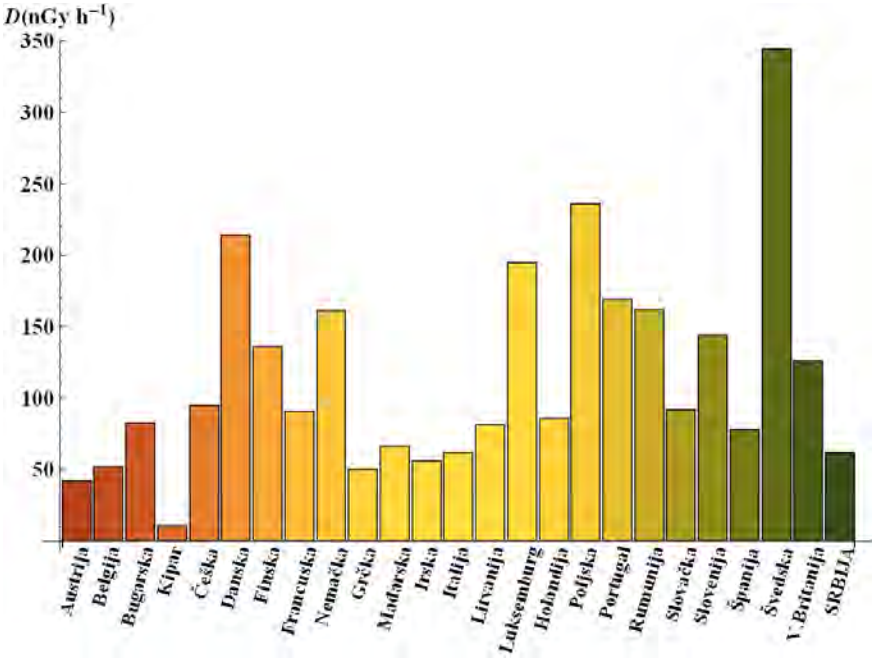
Upoređivanje sa literaturnim podacima

Apsorbovana doza u zatvorenom prostoru usrednjena za svetsku populaciju iznosi 84 nGy h^{-1}, odnosno 81 nGy h^{-1}, za stanovništvo Evrope (*UNSCEAR* 2000). Pritom, srednje vrednosti za pojedine zemlje nalaze se u opsegu (20 – 200) nGy h^{-1}, kome pripada i rezultat disertacije, 56 nGy h^{-1}. Konsekventno, individualna efektivna doza za područje grada Niša (0.285 mSv y^{-1}) je srazmerno niža od srednje doze za svet (0.41 mSv y^{-1}), što važi i za ukupnu efektivnu dozu za γ-zračenje primordijalnih radionuklida (0.332 mSv y^{-1}) u poređenju sa podatkom za stanovništvo Zemlje (0.48 mSv y^{-1}). Ipak, odnos između apsorbovane doze u prostoriji i u spoljašnjoj sredini za područje grada Niša, jednak 1.46, veoma dobro se slaže sa odgovarajućim svetskim prosekom - 1.4 [interval od 0.6 do 2.3, po *UNSCEAR*-u (2000)].

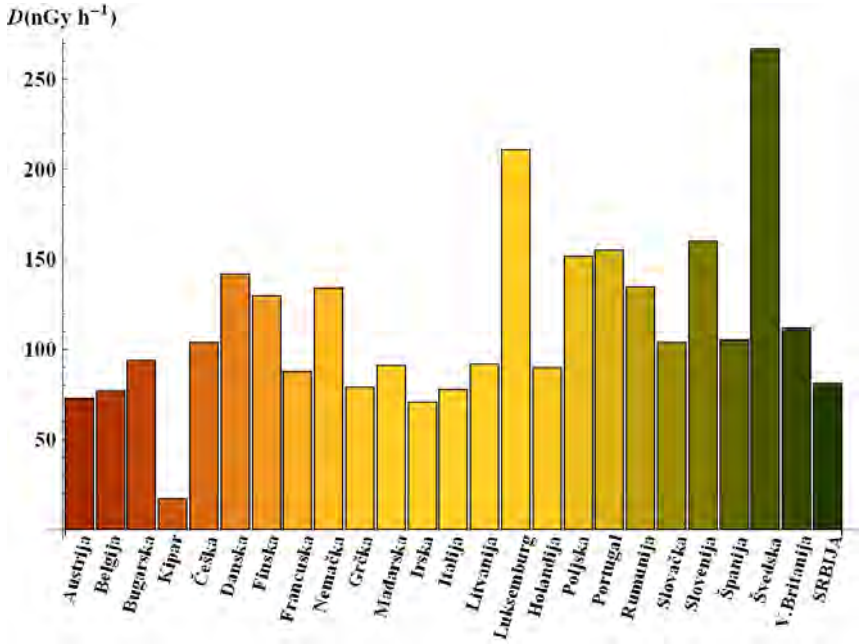
Vrednosti doza za približno realne uslove izlaganja u stambenom prostoru date su u nekolicini radova. Razmotreni su, pritom, modeli prostorija koji reprezentuju specifičnost konkretne nacionalne izgradnje. Tako, u radu *Brigido Flores et al.* (2008) za tipične dimenzije prostorija na Kubi: 3.8 x 4.8 x 3.0 m^3, u kojima su u većinskom procentu korišćeni beton ili cigla, srednje jačine apsorbovane doze jednake su: 78 nGy h^{-1}, tj. 47 nGy h^{-1}, respektivno. Odgovarajuće efektivne doze za odrasle, otežinjene prema procenjenoj raspodeli populacije, 0.400 i 0.240, u (mSv y^{-1}), respektivno, razlikuju se 1.57, odnosno 0.69 puta, od rezultata u Tabeli 4.30. Ipak, zahvaljujući značajnom učešću trećeg konstrukcionog materijala - drveta, srednja efektivna doza niža je 2.28 puta od vrednosti doze u disertaciji.

U Jordanu, prema referenci *Ahmad et al.* (1998), karakteristična je upotreba punog betona, betonskih blokova i kamena; prosečna prostorija ima dimenzije 4 x 4 x 3 m^3, a debljina poda i plafona iznosi 50 cm i 30 cm, respektivno. Zbog veće ukupne mase građevinskog materijala, jačine apsorbovane doze, dobijene za primenu punog betona i betonskih blokova, veće su za 44%, tj. 77%, respektivno, od odgovarajućih podataka u Tabeli 4.30, dok je vrednost koja se odnosi na "kamene" kuće, 84.7 nGy h^{-1}, bliska rezultatu disertacije (u skladu sa sadržajem radionuklida). Kako je u pomenutom radu korišćen konverzioni faktor E/K_a = 0.68 Sv Gy^{-1}, srednja efektivna doza određena za populaciju obuhvaćenu studijom, približno 0.260 mSv y^{-1}, skoro je identična vrednosti dobijenoj u disertaciji, što važi i za ukupnu efektivnu dozu (u prostoriji i na otvorenom).

Srednja apsorbovana doza za stambeni prostor u Egiptu, izračunata u *Turtiainen et al.* (2008) primenom modela prostorije: 5 x 4 x 2.8 m^3, debljine poda i plafona 12 cm (25 cm za zidove), za upotrebu crvene cigle, iznosi 48 nGy h^{-1}. U ovom radu određene su i doze za slučajeve prekrivanja zidova slojem keramičkih pločica debljine 2 cm, tako da je za prostoriju od crvene cigle dobijeno: 59 nGy h^{-1}. Navedene vrednosti niže su za oko 28%, tj. 13%, od doza u Tabeli 4.30, zbog različite koncentracije aktivnosti radionuklida u ispitivanim materijalima, kao i efektivna doza, usrednjena za stanovništvo prema udelima različitih materijala u prosečnoj prostoriji, jednaka 0.210 mSv y^{-1}. Premašaj ove vrednosti u odnosu na efektivnu dozu koja odgovara terestrijalnom zračenju, usrednjenoj prema demografskim podacima (28 nGy h^{-1}), niži je od odgovarajućeg rezultata u disertaciji za 40%, usled drugačijih nivoa fona. Za populaciju Egipta, u istraživanju *Moharram et al.* (2012), određen je opseg srednjih efektivnih doza: (0.025 - 0.345) mSv y^{-1} za izlaganje u prostorijama sa različitim materijalima i njihovim kombinacijama, kome pripada veći broj podataka u Tabeli 4.30.



Slika 5.2.a) Srednje apsorbovane doze u standardnoj prostoriji sa zidovima od betona u zemljama EU (*Nuccetelli et al.* 2012), i odgovarajući rezultat disertacije



Slika 5.2.b) Srednje apsorbovane doze u standardnoj prostoriji sa zidovima od cigle u zemljama EU (*Nuccetelli et al.* 2012), i odgovarajući rezultat disertacije

Srednje apsorbovane doze u standardnoj prostoriji sa zidovima od cigle ili betona, izračunate u radu *Nuccetelli et al.* (2012) za članice EU, više su od vrednosti prikazanih u Tabeli 4.30. za najveći broj zemalja. Odstupanje je najverovatnije posledica viših aktivnosti radionuklida izmerenih u materijalima EU, koje međutim, premašuju stvarne vrednosti, obzirom da su uglavnom određene ispitivanjem uzoraka za koje je očekivana povećana radioaktivnost (za potrebe radijacione zaštite). Zato, prema autorima studije, dobijeni rezultati pružaju "grubi opis situacije u EU" i "nisu statistički reprezentativni za zemlje članice".

Na Slikama 5.2.a),b) prikazane su srednje apsorbovane doze za dve varijante prostorija (zidovi od betona i zidovi od cigle) za evropske zemlje, kao i rezultati iz Tabele 4.30 (Srbija). Pritom, radi adekvatnijeg upoređivanja, predstavljene su maksimalne vrednosti određene u disertaciji za ove modele. Evidentno, primena istraživanih građevinskih materijala ne rezultuje dozom višom od proseka za uslove izlaganja stanovništva ostalog dela Evrope; štaviše, doze koje odgovaraju ovim materijalima pripadaju donjem opsegu vrednosti za EU.

Prema podacima za srednju apsorbovanu dozu, u referenci *Nuccetelli et al.* (2012) procenjeni su i premašaji individualne efektivne doze u odnosu na terestrijalni fon. Pokazano je da za 62% od ukupnog broja ispitanih uzoraka betona, ova razlika je veća od 0.3 mSv y^{-1}, a 5% betona uzrokuje premašaj veći i od granice doze 1 mSv y^{-1}. Korišćenjem cigle, u 82% i 0% slučajeva, doza u prostoriji ima vrednost koja se razlikuje od fona za više od 0.3 mSv y^{-1}, tj. 1 mSv y^{-1}, respektivno. Nasuprot, u skladu sa nižim sadržajem radionuklida, svi uzorci betona i cigle analizirani u disertaciji ispunjavaju oba dozimetrijska uslova.

6. Zaključak

Specifične jačine apsorbovane doze u vazduhu koje odgovaraju γ- zračenju ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K (q_U, q_{Th} i q_K), izračunate u disertaciji korišćenjem funkcionalnog oblika faktora nagomilavanja izlaganja, (G-P) forme, za standardnu prostoriju jednake su: 0.757, 0.912 i 0.070, u (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), respektivno. Upotrebom *Taylor*-ovog, kao i *Berger*-ovog oblika faktora nagomilavanja, određene su više vrednosti, koje, kao i prethodne, pripadaju opsezima q_U, q_{Th} i q_K, definisanim dosadašnjim rezultatima drugih autora. Proračun doza može se jednostavnije izvršiti primenom koncepta faktora nagomilavanja za niz radionuklida i odgovarajućih izraza za dozu tačkastog izvora, dobijenih u disertaciji pomoću parametara *Harima* formule. Vrednosti specifične gama - konstante potvrđuju validnost korišćenih aproksimacija.

Na osnovu proračuna specifičnih jačina apsorbovane doze za prostorije u kojima su upotrebljeni građevinski materijali: beton, cigla ili keramičke pločice, pokazano je da promena hemijskog sastava nema veliki uticaj na ove veličine, za razliku od efekta varijacije gustine materijala, kao i debljine zidova prostorije. Povećanje gustine betona od 1.6 g/cm^3 do 2.35 g/cm^3 uzrokuje porast doza u iznosu oko 16%; promenom debljine zidova u intervalu (10 - 30) cm, dobijaju se približno 40% veće vrednosti doza.

Za različite zapremine i kombinacije dimenzija prostorije, q_U, q_{Th} i q_K nalaze se u granicama koje se razlikuju do 6% od odgovarajućih vrednosti za standardnu prostoriju. Fitujuća formula, izvedena u disertaciji, koja omogućava analitičko izračunavanje doza za različite dimenzije i debljine pojedinačnih zidova, primenljiva je za najveći broj realnih prostorija.

Pomeranjem tačke detekcije od centra standardne prostorije do rastojanja 0.5 m od najbližeg zida, specifične jačine apsorbovane doze povećavaju se do 3.5%. Izostavljanjem delova zidova koji odgovaraju uobičajenim dimenzijama vrata i prozora, vrednosti doza u centru prostorije snižavaju se za približno 6.3%.

U slučaju prekrivanja osnovnog građevinskog materijala, betona ili cigle, slojem keramičkih pločica, smanjenje doza koje potiču od prvog sloja, izračunatih korišćenjem izraza za faktor nagomilavanja kombinacije materijala, u malom procentu zavisi od odnosa pripadajućih ekvivalentnih atomskih brojeva. Prisustvo keramičkih pločica debljine 0.5 cm umanjuje jačine doze donjeg materijala za oko 5%, dok 2 cm prekrivnog sloja rezultuje približno 20% nižim

dozama. Neto efekt prekrivnog materijala primarno je definisan odgovarajućim sadržajem radionuklida.

Konverzioni koeficijenti za efektivnu dozu, određeni u odnosu na kerma vazduha *free in air*, K_a, za zračenje ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K u prostoriji, izračunate u disertaciji, iznose 0.734, 0.748 i 0.753, u (Sv Gy^{-1}), respektivno. U proseku, rezultati su za oko 6% viši od referentne *UNSCEAR* (2000) vrednosti za izlaganje u spoljašnjoj sredini.

Ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(10)$, može se aproksimativno izračunati primenom faktora nagomilavanja apsorpcije energije za *ICRU* tkivo, metodom prikazanom u disertaciji. Konverzioni koeficijent $H^*(10)/K_a$, za zračenje primordijalnih radionuklida, jednak je 1.17. Rezultati za efektivni dozni ekvivalent, H_{ICRU}, ukazuju na nekonzervativnost $H^*(10)$ u opsegu energija od 70 keV do oko 250 keV u slučaju geometrijskog modela fantoma, u skladu sa podacima dobijenim za dozni ekvivalent na različitim položajima u *ICRU* sferi. Adekvatnom promenom parametara tkiva i granica integracije, program za izračunavanje H_{ICRU} postaje primenljiv i za proračun ekvivalentnih doza za organe i tkiva antropomorfnog fantoma, u prvom redu za one koji se mogu modelovati analognim elipsoidnim oblikom.

Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K u građevinskim materijalima koji se koriste u jugoistočnom delu Srbije, prvenstveno u oblasti grada Niša, uglavnom pripadaju srednjem ili donjem delu opsega podataka za materijale iste vrste u različitim delovima sveta. U velikom broju slučajeva, koncentracije aktivnosti radionuklida izmerene u disertaciji, nisu više od odgovarajućih srednjih vrednosti za Evropsku Uniju. Sadržaji ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K ne razlikuju se značajno od prethodno publikovanih rezultata za građevinske materijale u Srbiji. Radioaktivnost ispitivanih uzoraka u najvećoj meri određena je mehanizmima deponovanja radionuklida u NORM materijalima; prisustvo TENORM materijala nije izraženo.

Srednja apsorbovana doza koja odgovara zračenju prirodnih radionuklida u zemljištu na teritoriji grada Niša i okoline iznosi 38 nGy h^{-1}, dok je za tlo na užem području naselja Niška Banja dobijena preliminarna vrednost 55 nGy h^{-1}. Specifične jačine apsorbovane doze za izlaganje na otvorenom prostoru, izračunate metodom faktora nagomilavanja, jednake su: 0.394, 0.528 i 0.0414, u jedinicama (nGy h^{-1}/Bq kg^{-1}), za ^{238}U, ^{232}Th i ^{40}K, respektivno.

Apsorbovane doze za pojedinačne materijale, određene na osnovu približno realnog učešća u ukupnoj građevinskoj masi, u proseku su niže od rezultata većeg broja referenci u kojima su pretpostavljeni 100% parcijalni udeli. Svaki materijal ispunjava dozimetrijski uslov definisan graničnom vrednošću efektivne doze 1mSv y^{-1}; samo dva uzorka uvoznog granita rezultuju dozom koja premašuje terestrijalni fon za više od 0.3 mSv y^{-1}.

Za granicu doze 1mSv y^{-1}, formula za indeks koncentracije aktivnosti, *I*, data u disertaciji, dopušta upotrebu materijala sa oko 13% višim aktivnostima radionuklida od vrednosti koje figurišu u originalnom izrazu Evropske Komisije (*EC* 1999). Parametar *I* predstavlja restriktivniji kriterijum mogućnosti korišćenja građevinskih materijala u odnosu na primenu dozimetrijskih uslova, prema kom oko 36% analiziranih uzoraka premašuje granicu doze 0.3 mSv y^{-1}.

U oblasti Niša i okolnih mesta, srednja apsorbovana doza određena prema prosečnim udelima pojedinih materijala, za model prostorije od betona ili gas betona iznosi: D = 44.40 nGy h^{-1}, dok je u slučaju upotrebe cigle ili kamena: D = 66.74 nGy h^{-1}. U skladu sa zastupljenošću svih varijanti oba modela, srednja apsorbovana doza jednaka je 55.58 nGy h^{-1}. Efektivna doza, usrednjena po članu populacije obuhvaćene istraživanjem, pripada opsegu (0.209-0.348) mSv y^{-1}, pri čemu je njena srednja vrednost: E = 0.285 mSv y^{-1}, u kojoj direktno zračenje ima udeo 62.5%. Obe doze niže su od odgovarajućih srednjih vrednosti za stanovništvo sveta.

Vrednosti apsorbovane i efektivne doze, prikazane u disertaciji, određene su za spoljašnje ozračivanje u modelima prostorija kojima su reprezentovani najčešći realni uslovi izlaganja u stambenom prostoru u oblasti grada Niša. Slična raspodela procentualnog učešća materijala prisutna je, međutim, i u građevinskim konstrukcijama u ostalim delovima Srbije. Pored toga, ispitivani uzorci uglavnom se nalaze na širem tržištu, tako da su i srednje koncentracije radionuklida u materijalima na prostoru države, verovatno bliske vrednostima dobijenim u disertaciji. Tako, rezultati disertacije predstavljaju i približnu procenu srednjih vrednosti doza za individualno izlaganje na teritoriji Republike Srbije.

U daljem radu na temi ove disertacije, proračuni jačina doze u prostoriji, koje potiču od γ-zračenja prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima, mogu biti prošireni uzimanjem u obzir i doprinosa zračenja iz susednih prostorija. Osim toga, rezultate teorijskog modela moguće je uporediti sa podacima direktnih dozimetrijskih merenja u prostorijama sa različitim građevinskim materijalima i u spoljašnjoj sredini.

Proračuni i merenja obavljena u disertaciji mogu biti deo i obimnije studije izlaganja jonizujućem zračenju prirodnog porekla u regionu Niša. Ova istraživanja uključivala bi detaljnije proučavanje spoljašnjeg izlaganja terestrijalnom zračenju, prvenstveno za Nišku Banju, gde su izmerene visoke koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u tlu. Za procenu unutrašnjeg ozračivanja, merenja ^{222}Rn u zatvorenim prostorijama koja su preliminarno izvršena na izvesnim lokacijama u gradu Nišu (*Manić i dr*. 2005), potrebno je kompletirati ispitivanjima na većem broju destinacija. Takođe, određivanjem sadržaja radionuklida u vodi za piće i namirnicama, može se odrediti i odgovarajući doprinos ingestije ukupnoj jačini doze.

Literatura

1. Abdel-Rahman W and Podgorsak EB (2010) Energy transfer and energy absorption in photon interactions with matter revisited: A step-by-step illustrated approach *Radiat. Phys. Chem.* **79** 552-566
2. Ackers JG, Den Boer JF, De Jong P and Wolschrijin RA (1985) Radiation and radon exhalation rates of building materials in the Netherlands *Sci. Total Environ.* **45** 155-165
3. Ademola JA and Farai IP (2005) Annual effective dose due to natural radionuclides in building blocks in eight cities of southwestern Nigeria *Radiat. Prot. Dosim*. **114** 524-526
4. Agencija (2011) Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije *Izveštaj o nivou izlaganja stanovništva jonizujućim zračenjima iz životne sredine u Republici Srbiji u 2010. godini* Beograd www.srbatom.gov.rs
5. Ahmad N, Hussein AJA and Aslam (1998) Radiation doses in Jordanian dwellings due to natural radioactivity in construction materials and soil *J. Environ. Radioact*. **41** 127-136
6. Ahmed NK (2005) Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt *J. Environ. Radioact.* **83** 91-99
7. Ali S, Tufail M, Jamil K, Ahmad A and Khan HA (1996) Gamma-ray activity and dose rate of brick samples from some areas of North West Frontier Province (NWFP), Pakistan *Sci. Total Environ.* **187** 247-252
8. Al-Jundi J, Ulanovsky A and Prohl G (2009) Doses of external exposure in Jordan house due to gamma-emitting natural radionuclides in building materials *J. Environ. Radioact.* **100** 841-846
9. Allam KA (2009) New model for dwelling dose calculation using Monte Carlo integration *Radiat. Prot. Dosim*. **133** 153-157
10. Amrani D and Tahtat M (2001) Natural radioactivity in Algerian building materials *Appl. Radiat. Isot.* **50** 253-261
11. Anjum MZ, Mirza SM, Tufail M, Mirza NM and Yasin Z (2008) *Natural radioactivity in building materials: dose determination in dwellings using hybrid Monte Carlo – deterministic approach* International conference on nuclear data for science and technology 2007, CEA, published by EDP Sciences

12. ANSI/ANS-6.4.3-1991 (1991) American National Standards Institute. American Nuclear Society. *Gamma-ray attenuation coefficients and buildup factors for engineering materials* La Grange Park, Ilinois, USA
13. Aslam M, Orfi SD, Khan K and Jabbar A (2002) Radiological significance of Pakistani marble used for construction of dwellings *Radioanal. Nucl. Chem.* **253** 483-487
14. ASTM E 181 – 98/03 (2003) *Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides* ASTM International, USA
15. Attix EH (1986) *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry* Wiley, New York
16. Bashter II (1997) Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes *Ann. Nucl. Energy* **24** 1389-1401
17. Battaglia A, Bazzano E and Bonfanti G (1985) Indoor dose in Milano (Italy) *Sci. Total Environ.* **45** 365-371
18. Bea F (1999) *Uranium* in *Encyclopedia of Geochemistry* ed. by Marshall CP and Fairbridge RW, Kluwer Academic Publishers, London
19. Beck HL (1975) *The physics of environmental gamma radiation fields* in: *The natural radiation environment II* Oak Ridge, United States Atomic Energy Commission
20. Beck HL, DeCampo J and Gogolak C (1972) *In sity Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry* U.S. DOE, Environmental Measurements Lab., Report HASL-258, New York
21. Bell JG and Glasstone S (1974) *Теорија јадерних реакторов* Москва, Атомиздат (prevod sa engleskog)
22. Bell KG (1963) *Uranium in carbonate rocks* Geological Survey professional paper 474 – A, Geological Survey (U.S.)
23. Berger MJ (1956) *USNRDL Reviews and Lectures* **29** U.S. Naval Radiological Defense Laboratory
24. Berger MJ and Spencer LV (1959) Some radiological applications of gamma-ray transport theory *Radiat. Research* **10** 552-570
25. Berger MJ, Hubbell JH, Seltzer SM, Chang J, Coursey JS, Sukumar R, Zucker DS, and Olsen K (2010) *XCOM: Photon Cross Section Database* (version 1.5). Available: http://physics.nist.gov/xcom. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
26. Beretka J and Mathew PJ (1985) Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-product *Health Phys.* **48** 87-95
27. Boman E (2007) *Radiotherapy forward and inverse problem applying Boltzmann transport equation* Doctoral dissertation, Department of Physics, University of Kuopio
28. Bowman LA and Trubey DK (1958) *Stratified slab gamma-ray dose rate buildup factors for lead and water shields* USAEC Report ORNL-CF 58-1-41, Oak Ridge National Laboratory
29. Brar GS and Mudahar GS (1996) Energy dependence of the energy absorption buildup factor of HCO-materials *Radiat. Phys. Chem.* **47** 795-799
30. Brenan CR (1996) *Characteristic spatial quadratures for discrete ordinates neutral particle transport on arbitrary tetrahedral meshes* Dissertation, AFIT/DS/ENP/96-01
31. Brígido Flores O, Montalván Estrada A, Rosa Suárez R, Tomás Zerquera J and Hernández Pérez A (2008) Natural radionuclide content in building materials and gamma dose rate in dwellings in Cuba *J. Environ. Radioact.* **99** 1834-1837
32. Brix G, Dalheimer A, Deitze G, Doerfel HR and Weiss W (2005) *Measuring techniques* in *Radiological protection* ed. by Kaul A and Becker D, Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies **4,** Springer

33. Broadhead BL and Emmett MB (1998) *Quads: A multidimensional point-kernel analysis module.* ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R6 Washington DC, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards NUREG/CR-0200 (S5) **1**
34. Brunner TA (2002) *Forms of approximate radiation transport* Sandia Report SAND2002-1778, Sandia National Laboratories, California
35. Bünemann D and Richter G (1968) *Multilayered Shields* in *Engineering Compendium on Radiation Shielding* I ed. Jaeger RG, Springer-Verlag
36. C 1402-04 (2004) *Standard Guide for High-Resolution Gamma – Ray Spectrometry of Soil Samples* ASTM International, USA
37. Canberra (2002) *Genie 2000 Operations Manual* Canberra Industries Inc, Meriden USA
38. Capo MA (1958) *Polynomial approximation of gamma-ray buildup factors for a point isotropic source* USAEC Report APEX-510
39. Cave L, Corner J and Liston RHA (1950) The scattering of gamma-rays in extended media I. Perpendicular incidence on a plane slab *Proc. of the Royal Soc. of London. Series A, Math. and Phys. Sci.* **204** 223-259
40. Cement & Concrete Basics (2012) www.cement.org/basics/concretebasics
41. Chang LYL (2001) *Industrial mineralogy: Materials, Processes and Uses* Prentice Hall, 1st edition
42. Chilton AB and Huddleston CM (1963) A semi-empirical formula for differential dose albedo for gamma rays on concrete *Nucl. Sci. Eng.* **17** 419-424
43. Chilton AB, Shultis JK and Faw RE (1984) *Principles of radiation shielding* Prentice Hall, Inc.
44. Close DA, Evans ML and Jain M (1980) *Gamma-ray spectral calculations for uranium borehole logging* Los Alamos Scientific Laboratory, Informal Report LA-84
45. Clouvas A, Xanthos S, Antonopoulos-Domis M and Silva J (2000) Monte Carlo calculation of dose conversion factors for external exposure to photon emitters in soil *Health Phys.* **78** 295-302
46. CLS (1999) *Evaluation of guidelines for exposures to technologically enhanced naturally occuring radioactive materials* Commission of Life Sciences, The National Academic Press
47. Conti CC, Bertelli L and Lopes RT (1999) Age-dependent dose in organs per unit air kerma free-in-air: conversion coefficients for environmental exposure *Radiat. Prot. Dosim.* **86** 39-44
48. Corrado KA (2004) *Introduction: Clay structure, surface acidity and catalysis* in *Handbook of layered materials* by Dutt PK, Auerbach SM and Carrado KA, CRC Press, ISBN: 978-0-8247-5349-8
49. Cox JD and Ang KK (2010) *Radiation Oncology: Rationale, Technique, Results* 9th ed. Philadelphia ISBN 978-0-323-04971-9
50. Cozmuta I (2001) *Radon generation and transport, A journey through matter* Dissertation, Rijksuniversiteit Groningen, ISBN: 973-8133-8-6
51. Cristy M and Eckerman KF (1987) *Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources. Part I. Methods* Report No. ORNL/TM-8381/V1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
52. Currie LA (1968) Limits for qualitative detection and quantitative determination *Anal. Chem.* **40** 586-593
53. Daskalov GM, Baker RS, Rogers DWO and Williamson JF (2002) Multigroup discrete ordinates modeling of ^{125}I 6702 seed dose distributions using a broad energy-group cross section representation *Med. Phys.* **29** 113-124

54. Davis AB and Marshak A (2006) *3D radiative transfer in the cloudy atmospheres* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
55. Deitze G (2005) *Radiological quantities and units* in *Radiological protection* ed. by Kaul A and Becker D, Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies **4,** Springer
56. de Jong P and van Dijk JWE (2008) Calculation of the indoor gamma dose rate distribution due to building materials in the Netherlands *Radiat. Prot. Dosim.* **132** 381-389
57. de Jong P and van Dijk W (2008) Modeling gamma radiation dose in dwellings due to building materials *Health Phys.* **94** 33-42
58. de Voto RH and Stevens DN (1979) *Uraniferous phosphates resources and technology and economics of uranium recovery from phosphate resources, United States and free world* Earth Sciences, Inc., U.S. DOE Report GJBX 110 (79)
59. Dragović S, Janković-Mandić Lj, Momčilović M and Onjia A (2007) Population doses from terrestrial gamma exposure in Serbia *Arch. Oncol.* **15** 78-80
60. Duggal SK (2008) *Building materials* New Age International Publishers, New Delhi, 3th edition
61. Durham J (2007) Concepts, quantities, and dose limits in radiation protection dosimetry *Radiation Measurements* **41** 528-535
62. EC (1999) European Commission *Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Radiation Protection 112* Office for Offical Publications of the European Communities, Luxembourg
63. EC (2000) European Commission, Nuclear Safety and Environment *Natural radionuclide concentrations in materials processed in the chemical industry and the related radiological impact* by Hofmann J, Leicht R, Wingender HJ and Wörner J, Report EUR 19264
64. Eckerman KF, Cristy M and Ryman JC (1996) *The ORNL mathematical phantom series*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
65. Eckerman KF and Ryman JC (1993) *External exposure to radionuclides in air, water and soil* Federal guidance report No. 12, EPA-402-R-93-081
66. Egidi P and Hull C (1999) *Naturally occurring and technologically enhanced naturally occurring radioactive material* Producers, users and proposed regulations, PEP Course 1.A Notes, Health Physics Society, 32th Midyear topical meeting, Albuquerque, New Mexico
67. Eisenhauer CM and Simmons GL (1975) Point isotropic buildup factors in concrete *Nucl. Sci. Eng.* **56** 263-70
68. El Afifi EM, Hilal MA, Khalifa SM and Aly HF (2006) Evaluation of U, Th, K and emanated radon in some NORM and TENORM samples *Radiat. Meas*. **41** 627-633
69. El-Tahawy MS and Higgy RH (1995) Natural radioactivity in different types of bricks fabricated and used in the Cairo region *Appl. Radiat. Isot.* **46** 1401-1406
70. El-Taher A (2009) Gamma spectroscopic analysis and associated radiation hazards of building materials used in Egypt *Radiat. Prot. Dosim.* **138** 166-173
71. EPA (1993) *Diffuse NORM wastes – waste characterization and preliminaryrisk assessement* Prepared by Cohen S and Associates, Inc., and Rogers & Associates Engineering Corp., for the U.S. Environmental Protection Agency Office of radiation and indoor air
72. EPA (2008) *Technologically enhanced naturally occuring radioactive materials from uranium mining* Volume 1: *Mining and reclamation background* U.S. Environmental Protection Agency Office of radiation and indoor air EPA 402-R-08-005

73. Fathivand AA, Amidi J and Najafi A (2007) The natural radioactivity in the bricks used for the construction of the dwelling in Tehran areas of Iran *Radiat. Prot. Dosim.* **123** 391-393
74. Faure G (1986) *Principles of isotope geology* 2th ed. John Wiley & Sons ISBN: 0471864129
75. Ferrari A and Pelliccioni M (1994) On the conversion coefficients from fluence to ambient dose equivalent *Radiat. Prot. Dosim.* **51** 251-255
76. Ferrari A, Pelliccioni M and Pillon M (1996) Fluence to effective dose and effective dose conversion coefficients for photons from 50 keV to 10 GeV *Radiat. Prot. Dosim.* **67** 245-251
77. Friedlander G, Kennedy JW, Macias ES and Miller JM (1981) *Nuclear and radiochemistry* John Wiley & Sons. Inc., 3rd edition
78. Froberg CE (1985) *Numerical mathematics. Theory and computer applictions* The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
79. Gavrilescu M, Pavel LV and Cretescu I (2009) Characterization and remediation of soils contamined with uranium *Journal of Hazardous Materials* **163** 475-510
80. Gharbi F, Oueslati M, Abdelli W, Samaali M and Ben Tekaya M (2012) Exposure to radiation from the natural radioactivity in Tunisian building materials *Radiat. Prot. Dosim.* doi: 10.1093/rpd/ncs045
81. Gifford KA, Horton Jr JL, Wareing TA, Failla G and Mourtada F (2006) Comparison of a finite-element multigroup discrete-ordinates code with Monte Carlo for radiotherapy calculations *Phys. Med. Biol.* **51** 2253-2265
82. Gilmor GR (2008) *Practical gamma-ray spectrometry* John Wiley & Sons Ltd., 2nd edition, ISBN: 978-0-470-86196-7
83. Goldstein H (1959) *Fundamental aspects of reactor shielding* Addison-Wesley Publishing Co; reprinted by Johnson Reprint Corp. (1971)
84. Goldstein H and Wilkins JE (1954) *Calculations of the penetration of gamma-rays* USAEC Report NYO-3075
85. "Gradska stambena agencija" Niš (2006) *Stambena strategija grada Niša* www.ni.rs/uploads/file/Stambena0609.pdf
86. Grahovac ZR (1986) *Uran u aleksinačkom škriljcu* Magistarski rad, Filozofski fakultet u Nišu, Niš
87. Greening JR (1981) *Fundamentals of radiation dosimetry* Adam Hilger Ltd, Techno House, Redcliffe Way, Bristol BS1 6NX
88. Han E, Bolch W and Eckerman K (2006) Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema *Health Phys.* **90** 337-356
89. Haquin G (2008) *Natural radioactivity and radon in building materials* Proc. of 12th Intl. Congress of the Intl. Rad. Prot. Assn., Buenos Aires
90. Harima Y (1983) An approximation of gamma ray buildup factors by modified geometrical progression *Nucl. Sci. Eng.* **83** 299-309
91. Harima Y (1993) An historical review and current status of buildup factor calculations and applications *Radiat. Phys. Chem.* **41** 631-672
92. Harima Y, Hayashi K and Vogt HG (2005) *Shielding against ionizing radiation* in *Radiological protection* ed. by Kaul A and Becker D, Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies **4,** Springer
93. Harima Y, Sakamoto Y, Tanaka S and Kawai M (1986) Validity of the geometric-progression formula in approximating gamma-ray buildup factors *Nucl. Sci. Eng.* **94** 24-35

94. Harima Y, Tanaka S, Sakamoto Y and Hirayama H (1991) Development of new gamma-ray buildup factor and application to shielding calculations *J. Nucl. Sci. Technol*. **28** 74-84
95. Hensel H, Iza-Teran R and Siedow N (2006) Deterministic model for dose calculation in photon radiotherapy *Phys. Med. Biol.* **51** 675-693
96. Higgy R, El-Tahawy MS, Abdel-Fattah AT and Al-Akabawy UA (2000) Radionuclide content of building materials and associated gamma dose rates in Egyptian dwellings *J. Environ. Radioact.* **50** 253-261
97. Hine GJ (1952) The effective atomic numbers of materials for various gamma ray interactions *Phys. Rev.* **85** 725
98. Hirayama H and Shin K (1998) Application of the EGS4 Monte Carlo code to a study of multilayer gamma-ray exposure buildup factors of up to 40 mfp *J. Nucl. Sci. Technol.* **35** 816-829
99. Hizem N, Fredj AB and Ghedira L (2005) determination of natural radioactivity in building materials used in Tunisian dwellings by gamma ray spectrometry *Radiat. Prot. Dosim.* **114** 533-537
100. Hubbell JH (1969) *Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV.* NSRDS-NBS **29** National Bureau of Standards, Washington DC
101. Hubbell JH (1999) Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context *Phys. Med. Biol.* **44** R1-R22, PII: S0031-9155(99)74209-0
102. Hubbell JH and Seltzer SM (2004) *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest*, NIST Standard Reference Database 126, July 2004.
103. IAEA (1989) International Atomic Energy Agency *Construction and use of calibration facilities for radiometric field equipment* Technical Reports Series No. 309, IAEA, Vienna
104. IAEA (1996) International Atomic Energy Agency *International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources* Safety Series No. 115, Vienna
105. IAEA (2003) International Atomic Energy Agency *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data* Vienna, IAEA-TECDOC-1363
106. IAEA (2004) International Atomic Energy Agency *Radiation, People and the Environment* Austria, IAEA/PI/A.75/04-00391
107. IAEA (2011) International Atomic Energy Agency *Exposure of the public from large deposits of mineral residues* Agency, Vienna, IAEA–TECDOC–1660
108. ICRP (1977) International Commission on Radiological Protection *Recommendations of the international commission on radiological protection* ICRP Publication 26, Annals of ICRP **1** (3)
109. ICRP (1991) International Commission on Radiological Protection *1990 Recommendations of the International Commision on Radiological Protection* ICRP Publication 60, Oxford, UK, Pergamon Press
110. ICRP (1993) International Commission on Radiological Protection *Principles for intervention for protection of the public in a radiological emergency* ICRP Publication 63, Edited by ICRP
111. ICRP (1994) International Commission on Radiological Protection *Protection against Radon-222 at home and at work* ICRP Publication 65, Annals of ICRP **23** (2)

112.ICRP (1996) International Commission on Radiological Protection *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation* ICRP Publication 74, Oxford, UK, Pergamon Press
113.ICRP (2003) International Commission on Radiological Protection *Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (w_R)* ICRP Publication 92, Annals of ICRP **33** (4)
114.ICRP (2007) International Commission on Radiological Protection *The 2007 recommendations of the commission on radiological protection* ICRP Publication 103, Annals of ICRP
115.ICRU (1980) International Commission on Radiation Units and Measurements, *Radiation quantities and units* ICRU Report 33, Washington DC ICRU Publications
116.ICRU (1985) International Commission on Radiation Units and Measurements, *Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources* ICRU Report 39, Bethesda, MD, ICRU Publications
117.ICRU (1992) International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 47 *Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations*, Bethesda, MD, ICRU Publications
118.ICRU (1993) International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 51 *Quantities and units in radiation protection dosimetry* Bethesda, MD, ICRU Publications
119.ICRU (1998a) International Commission on Radiation Units and Measurements *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation* ICRU Report 57, Bethesda, MD, ICRU Publications
120.ICRU (1998b) International Commission on Radiation Units and Measurements *Fundamental quantities and units for ionizing radiation* ICRU Report 60, Bethesda MD, ICRU Publications
121.ICRU (2001) International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 66 *Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons* J. ICRU **1** (3)
122.Inanc F (2002) Scattering and its role in radiography simulations *NDT&E International* **35** 581-593
123.Inanc F and Gray JN (1997) Scattering simulations in radiography *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **48** 1299-1305
124.Ingersoll GJ (1983) A survey of radionuclide contents and radon emanation rates in building materials in USA *Health Phys.* **45** 363-368
125.Ivanović DM i Vučić VM (1991) *Atomska i nuklearna fizika* Naučna knjiga, Beograd, petnaesto izdanje ISBN: 86-23-21092-1
126.Kalugin MA (2010) Simulation of the radiation fields from ionizing radiation sources inside the containment in an accident *Physics of Atomic Nuclei* **73** 2198-2202
127.Kaul A (2005) *Exposures from natural and man- made radiation sources* in *Radiological protection* ed. by Kaul A and Becker D, Landolt-B rnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies **4,** Springer
128.Khan AJ (1994) Estimation of dose rate for indoor radon from building materials *Radiat. Environ. Biophys.* **33** 81-84
129.Khan K, Jabbar A, Akhter P, Tufail M and Khan HM (2010) Assessment of primordial radionuclides in Pakistani red bricks and associated radiation doses *Chin. Phys. Lett.* **27** 039301 1-4
130.Kirby HW and Salutsky ML (1964) *The radiochemistry of radium* National Academy of Sciences, National Research Council, Nuclear Science Series, NAS-NS 3057 U.S. Atomic Energy Commission

131.Klewe-Nebenius H (2005) *Physical fundamentals* in *Radiological protection* ed. by Kaul A and Becker D, Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies **4,** Springer
132.Kloosterman JL (1992) Gamma ray buildup factor calculations for iron by the discrete ordinates code XSDRNPM-S *Ann. Nucl. Energy* **19** 105-114
133.Koblinger L (1978) Calculation of exposure rates from gamma sources in walls of dwelling rooms *Health Phys*. **34** 459-463
134.Koblinger L (1984) Mathematical models of external gamma radiation and congruence of measurements *Radiat. Prot. Dosim*. **7** 227-234
135.Kogel JE, Trivedi NC, Barker JM and Kruskowsk ST (2006) *Industrial minerals & rocks*: *Commodities, Markets and Uses* Society of Mining, Metallurgy and Exploration
136.Kovler K, Haquin G, Manasherov V, Ne'eman E and Lavi N (2002) Natural radionuclides in building materials available in Israel *Building Environ.* **37** 531-537
137.Kovler K, Perevalov A, Steiner V and Metzger LA (2005) Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1 – scientific background and testing of the cement and fly ash emanation *J. Environ. Radioactivity* **82** 321-334
138.Kramer R, Zankl M, Williams G and Drexler G (1982) *The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods: Part 1. The male (ADAM) and female (EVA) adult mathematical phantoms* GSF Bericht S-885, Neuherberg: GSF National research center for health and environment
139.Krishnaswami S (1999) *Thorium* in *Encyclopedia of Geochemistry* ed. By Marshall CP and Fairbridge RW, Kluwer Academic Publishers, London
140.Krisiuk EM, Tarasov SI, Shamov VP, Shalak NI, Lisachenko EP and Gomelsky LG (1971) *A study on radioactivity in building materials* Leningrad: Research institute for radiation hygiene
141.Krstić D (2006) *Vertikalna raspodela radionuklida ^{137}Cs u tlu okoline Kragujevca početkom 21. veka i proračun efektivne doze* Doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac
142.Krstić D and Nikezić D (2006) External doses to humans from ^{137}Cs in soil *Health Phys.* **91** 249-257
143.Krstić D and Nikezić D (2007) Input files with ORNL mathematical phantoms of the human body for MCNP-4B *Comp. Phys. Commun.* **176** 33-37
144.Krstić D, Nikezić D, Stevanović N and Vučić D (2007) Radioactivity of some domestic and imported building materials from south eastern Europe *Radiat. Meas*. **42** 1731-1736
145.Krstic D and Nikezic D (2009) Calculation of indoor effective dose factors in ORNL phantoms series due to natural radioactivity in building materials *Health Phys*. **97** 299-302
146.Krstic D and Nikezic D (2010) Calculation of the effective dose from natural radioactivity in soil using MCNP code *Appl. Radiat. Isot.* **68** 946-947
147.Kumar A, Kumar M, Singh B and Singh S (2003) Natural activities of ^{238}U, ^{232}Th and ^{40}K in some Indian building materials *Radiat. Meas.* **36** 465-469
148.Kurudirek M, Aygun M and Erzeneoglu SZ (2010) Chemical composition, effective atomic number and electron density study of trommel sieve waste (TSW), Portland cement, lime, pointing and their admixtures with TSW in different proportions *Appl. Radiat. Isot.* **68** 1006-1011

149.Lakshminarayanan T, Subbaiah KV, Thayalan K and Kannan SE (2010) Suitability of point kernel dose calculation techniques in brachyterapy treatment planning *J. Med. Phys.* **35** 88-99
150.Langmuir D and Hermans JS (1980) The mobility of thorium in natural waters at low temperatures *Geochimica et Cosmochimica Acta* **44** 1753-1766
151.LBL (2000) Lawrence Berkeley Laboratory, *The Berkeley Laboratory Isotopes Projects* (online) Updated 22 May 2000. Available at: http//oe.lbl.gov/education /isotopes.htm
152.Lee C, Lee L, Han EY and Bolch WE (2007) Consideration of the ICRP revised tissue weighting factors on age-dependent values of the effective dose for external photons *Phys. Med. Biol.* **52** 41-58
153.Lima MAF, Silva AX and Crispim VR (2004) Calculation of conversion coefficients for clinical photon spectra using the MCNP code *Radiat. Prot. Dosim.* **111** 9-12
154.Maduar MF and Hiromoto G (2004) Evaluation of indoor gamma radiation dose in dwellings *Radiat. Protect. Dosim.* **111** 221-228
155.Malanca A, Pessina V and Dallara G (1993) Radionuclide content of building materials and gamma dose rates in dwellings of Rio Grade Do Norte, Brazil *Radiat. Prot. Dosim.* **48** 199-203
156.Malanca A, Pessina V, Dallara G, Luce NC and Gaidol L (1995) Natural radioactivity in building materials from Brazilian state of Espirito Santo *Appl. Radiat. Isot.* **46** 1387-1392
157.Manić G (2005) G*ranice detektovanja radionuklida u uzorcima iz životne sredine* Magistarska teza, Fizički fakultet, Beograd
158.Manić G, Radojković B, Manić V i Popović D (2005) *Preliminarno merenje koncentracije radona u stanovima i radnim prostorijama na području grada Niša*, Nacionalna konferencija EKO fizika 2005, Kruševac, 169-171
159.Manić G, Manić V and Vesić D (2005) Detection limits for radioactivity counting *Facta Universitatis, Series: Physics, Chemistry and Technology* **3** 109-114
160.Manić G, Petrović S, Manić V, Popović D and Todorović D (2006) Radon concentrations in a spa in Serbia *Environment International* **32** 533-537
161.Manić V, Manić G, Nikezic D and Krstic D (2012) Calculation of dose rate conversion factors for ^{238}U, ^{232}Th and ^{40}K in concrete structures of various dimensions, with application to Niš, Serbia *Radiat. Prot. Dosim.* **152** 361-368
162.Manić V, Miljković Lj and Đurić-Stanojević B (1997) The ^{1}H T_1 study of the influence of clay addition on Portland cement hydration *Applied Magnetic Resonance* **13** 231-239
163.Manić V, Miljković Lj and Đurić-Stanojević B (1998) ^{1}H T_1 NMR relaxation in hydrating cement pastes *Diffus. Defect Data, Pt. B, Sol. St. Phenomena* **61/62** 343-346
164.Mann KS, Singla J, Kumar V and Sidhu GS (2012) Investigations of mass attenuation coefficients and exposure buildup factors of some low-Z building materials *Ann. Nucl. Energy* **43** 157-166
165.Manohara SR, Hanagodimath SM and Gerward L (2010) Energy absorption buildup factors for thermoluminescent dosimetric materials and their tissue equivalence *Rad. Phys. Chem.* **79** 575-582
166.Manohara SR, Hanagodimath SM, Thind KS and Gerward L (2008) On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV *Nucl. Instr. and Meth. B* **266** 3906-3912

167.Marinković P, Ilić R and Spaić R (2007) A 3-D point-kernel multiple scatter model for parallel-beam SPECT based on a gamma-ray buildup factor *Phys. In Med. And Biol.* **52** 5785-5802
168.Markkanen M (1995) *Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity* Report STUK-B-STO 32, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, Helsinki
169.Markkanen M (2010) *Natural radiation environment and NORM* Third European IRPA Congress 2010, Helsinki, Finland
170.McDonald JC (1996) *Calibration procedures for radiation protection* IRPA9 Ninth International Congress of the International Radiation Protection Association R-12, Vienna, Austria
171.McParland BJ (2010) *Nuclear medicine radiation dosimetry: Advanced theoretical principles* Springer-Verlag, London, ISBN: 978-1-84882-125-5
172.Medhat ME (2009) Assessment of radiation hazards due to natural radioactivity in some building materials used in Egyptian dwellings *Radiat. Prot. Dosim.* **133** 177-185
173.Mera NS (2007) Evolutionary optimization for passive gamma tomography reconstruction of circular inclusions in nuclear waste vaults *Int. J. Numer. Meth. Engng*. **72** 180-196
174.Minty BRS (1997) Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics* **17** 39-50
175.Mirza NM, Ali B, Mirza SM, Tufail M and Ahmad NA (1991) A shape and mesh adaptive computational methodology for gamma-ray dose from volumetric sources *Radiat. Prot. Dosim*. **38** 307-314
176.Mittlefehldt DW (1999) *Potassium* in *Encyclopedia of Geochemistry* ed. By Marshall CP and Fairbridge RW, Kluwer Academic Publishers, London
177.Moharram BM, Suliman MN, Zahran NF, Shennawy SE and El Sayed AR (2012) External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials *Appl. Radiat. Isot.* **70** 241-248
178.Muravljov M (1995) *Građevinski materijali* Beograd
179.Mustonen R (1984) Methods for evaluation of radiation from building materials *Radiat. Protect. Dosim*. **7** 235-238
180.Mustonen R, Pennanen M, Annanmäki M and Oksanen E (1999) *Enhanced radioactivity of building materials. Final report of the contract No 96-ET-003 for the European Commission* Radiation and Nuclear Safety Authority – STUK, Finland 1997; Radiation Protection 96, Luxembourg
181.NCRP (1991) National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) *Report No. 112*
182.NCRP (1993) *Limitation of exposure to ionizing radiation* NCRP Report 116, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda Maryland
183.NCRP (1994) *Exposure of the population in the United States and Canada from natural background radiation* NCRP Report 94, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda Maryland
184.NEA OECD (1979) Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development *Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials* Report by a group of experts of the OECD Nuclear energy agency
185.NEA OECD (2011) Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development *Evolution of ICRP recommendations 1977, 1990 and 2007* ISBN: 978-92-64-99153-8
186.Nero AV and Nazaroff WW (1984) Characterising the source of radon indoors *Radiat. Prot. Dosim.* **7** 23-39

187.Ng CY, Leung JKC and Tso MYW (1995) Modelling exposure to naturally occurring radionuclides in building materials *Radiat. Prot. Dosim.* **59** 43-48
188.Nikezić D (1990) *Doprinos eksperimentalnom i teorijskom proučavanju ozračenosti stanovništva i pojedinaca u zatvorenim prostorijama* Doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet, Institut za fiziku, Kragujevac
189.Nikolov J, Todorovic N, Petrovic Pantic T, Forkapic S, Mrdja D, Bikit I, Krmar M and Veskovic M (2012) Exposure to radon in the radon spa Niška Banja, Serbia *Radiat. Meas.* **47** 443-450
190.Noz ME and Maguire Jr GQ (2007) *Radiation protection in the health sciences* London: World Scientific Publishing Co
191.Nuccetelli C, Risica S, D'Alessandro M and Trevisi R (2012) Natural radioactivity in building material in the European Union: robustness of the activity concentration index *I* and comparision with a room model *J. Radiol. Prot.* **32** 349-358
192.NUREG 1501 (1994) *Background as a residual radioactivity criterion for decommissioning* U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC 20555-001
193.Oates JAH (1998) *Lime and limestone – Chemistry and Technology, Production and Uses* Wiley-VCH, ISBN: 3-527-29527-5
194.Othman I and Mahrouka M (1994) Radionuclide content in some building materials in Syria and their indoor gamma dose rate *Radiat. Prot. Dosim.* **55** 299-304
195.Overcamp TJ (2009) Energy absorption buildup factors and energy conservation *J. Nucl. Sci. Technol.* **46** 479-483
196.Pakou AA, Assimakopoulos PA and Prapidis M (1994) Natural radioactivity and radon emanation factors in building material used in Epirus (north-western Greece) *Sci. Total Environ.* **144** 255-260
197.Pandit GG, Sahu SK and Puranik VD (2011) Natural radionuclides from coal fired thermal power plants-estimation of atmospheric release and inhalation risk *Radioprotection* **46** 173-179
198.Papadakis VG (2000) Effect of fly ash on Portland cement systems Part II. High-calcium fly ash *Cem. Concr. Res.* **30** 1647-1654
199.Papaefthymiou H and Gouseti O (2008) Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece *Radiat. Meas.* **43** 1453-1457
200.Papastefanou C, Stoulos S and Manolopoulou M (2005) The radioactivity of building materials *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry* **266** 367-372
201.Parades CH, Kessler WV, Landolt RR, Zeemer PL and Paustenbach DI (1987) Radionuclide content of and ^{222}Rn emanation from building materials, made from phosphate industry waste product *Health Phys.* **53** 23-29
202.Paretzke HG and Petoussi-Hensß N (2005) *External dosimetry* in *Radiological protection* ed. by Kaul A and Becker D, Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies **4,** Springer
203.Pavlić B, Čonkić Lj, Bikit I, Slivka J, Krmar M and Žikić N (2000) *Estimation of the indoor exposure to external radiation from natural radionuclides in building materials in Vojvodina* Proc. of the fifth International symposium and exhibition on environmental contamination in central and eastern Europe, Prague
204.Pavlidou S, Koroneos A, Papastefanou C, Christofides G, Stoulos S and Vavelides M (2006) Natural radioactivity of granites used as building materials *J. Environ. Radioact.* **89** 48-60

205.Pelliccioni M (2000) Overreview of fluence-to-effevtive dose and flence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the fluka code *Rad. Prot. Dosim.* **88** 279-297
206.Petoussi-*Hensß* N, Jacob P, Zankl M and Saito K (1991) Organ doses for foetuses, babies, children and adults from environmental gamma rays *Radiat. Prot. Dosim.* **37** 31-41
207.Podgorsak EB ed. (2005) *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students* International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna
208.Popović D, Đurić G and Todorović D (1996) Radionuclides in building materials and radon indoor concentrations *Radiat. Prot. Dosim*. **63** 223-225
209.Popović D and Todorović D (2006) Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia *Facta Universitatis, Series: Physics, Chemistry and Technology* **4** 11-20
210.Pravilnik (2011a) Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije *Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima*
211.Pravilnik (2011b) Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije *Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet*
212.Radenković MB, Alshikh MS, Andrić VB and Miljanić ŠS (2009) Radioactivity of sand from several renowned public beaches and assessment of the corresponding environmental risks *J. Serb. Chem. Soc.* **74** 461-470
213.Rajković MB, Lačnjevac ČM, Tošković DV i Stanojević DD (2007) Ispitivanje mogućnosti primene fosfogipsa za izradu pregradnog zida – elementa montažnog objekta *Zaštita materijala* **48** 41-47
214.Ranger NT (1999) Radiation detectors in nuclear medicine *Radiographics* The AAPM/RSNA physics tutorial for residents **19** 481-502
215.Ravisankar R, Vanasundari K, Chandrasekaran A, Rajalakshmi A, Suganya M, Vijayagopal P and Meenakshisundaram V (2012) Measurement of natural radioactivity in building materials of Namakkal, Tamil Nadu, India using gamma-ray spectrometry *Appl. Radiat. Isot.* **70** 699-704
216.Righi S and Bruzzi L (2006) Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings *J. Environ. Radioact.* **88** 158-170
217.Righi S, Guerra R, Jeyapandian M, Verità S and Albertazzi A (2009) Natural radioactivity in Italian ceramic tiles *Radioprotection* **44** 413-419
218.Risica S, Bolzan C and Nuccetelli C (2001) Radioactivity in building materials: room model analysis and experimental methods *Sci. Total. Environ*. **272** 119-126
219.Rockwell T (1956) *Reactor shielding design manual* III Ed, D. Van Nostrand
220.Ryman JC, Eckerman KF, Shultis JK, Faw RE and Dilman LT (1996) *Application of discrete ordinates and Monte Carlo methods to transport of photons from environmental sources* ANS 1996 Radiation Protection and Shielding Division Topical Meeting, DE-AC05-96OR22464, Cape Cod Massachusetts
221.Sahoo BK, Nathwani D, Eappen KP, Ramachandran TV, Gaware JJ and Mayya YS (2007) Estimation of radon emanation factor in Indian building materials *Radiat. Meas.* **42** 1422-1425
222.Saito K and Jacob P (1995) Gamma ray fields in the air due to sources in the ground *Radiat. Prot. Dosim.* **58** 29-45
223.Saito K, Petoussi-Henss N and Zankl M (1998) Calculation of effective dose and its variation from environmental gamma ray sources *Health Phys.* **74** 698–706

224.Sakamoto Y, Tanaka S and Harima Y (1988) Interpolation of gamma-ray buildup factors for point isotropic source with respect to atomic number *Nucl. Sci. Eng.* **100** 33-42
225.Sasamoto N and Takeuchi K (1982) Direct integration method for solving the neutron transport equation in three-dimensional geometry *Nucl. Sci. Eng.* **80** 554-569
226.Sato O, Iwai S, Tanaka S, Uehara T, Sakamoto Y, Yoshizawa N and Furihata S (1995) Calculations of equivalent dose and effective dose conversion coefficients for photons form 1 MeV to 10 GeV *Rad. Prot. Dosim.* **63** 119-130
227.Scarlat F, Scarisoreanu A, Oane M, Badita E and Mitru E (2008) *Determination of ambient dose equivalent at INFLPR 7 MeV linear accelerator* IX Radiation Physics & Protection Conference, Nasr City – Cairo, Egypt, 297-304
228.Schlattl H, Zankl M and Petoussi-Henss N (2007) Organ dose conversion coefficients for voxel models of the reference male and female from idealized photon exposures *Phys. Med. Biol.* **52** 2123-2145
229.Sharaf M, Mansy M, El Sayed A and Abbas E (1999) Natural radioactivity and radon exhalation rates in building materials used in Egypt *Radiat. Meas.* **31** 491-495
230.Sheppard WL (1986) *Corrosion and chemical resistant masonry materials handbook*, Noyes Publications
231.Shimizu A (2002) Calculation of gamma-ray buildup factors up to depths of 100 mfp by the method of invariant embedding (I) *J. Nucl. Sci. Technol* **39** 477
232.Shimizu A, Onda T and Sakamoto Y (2004) Calculation of gamma-ray buildup factors up to depths of 100 mfp by the method of invariant embedding (III), Generation of an improved data set *J. Nucl. Sci. Technol.* **41** 413-424
233.Shultis JK and Faw RE (2000) *Radiation Shielding* American Nuclear Society, La Grange Park, IL
234.Shultis JK and Faw RE (2002) *SHLDUTIL: A code for useful shielding data* American Nuclear Society, La Grange Park, IL
235.Shultis JK and Faw RE (2005) Radiation shielding technology *Health Phys.* **88** 587-612
236.Sidhu BS, Dhaliwal AS, Mann KS and Kahlon KS (2012) Study of mass attenuation cooefficients, effective atomic numbers and electron densities for some low *Z* compounds of dosimetry interest at 59.54 keV incident photon energy *Ann. Nucl. Energy* **42** 153-157
237.Singh S, Ghumman SS, Singh C, Thind KS and Mudahar GS (2010) Buildup of gamma ray photons in flyash concretes: A study *Ann. Nucl. Energy* **37** 681-684
238.*Sl. Glasnik RS* (2009) *Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti*, Službeni Glasnik Republike Srbije br 36/2009 od 15. maja 2009. god.
239.Smislov AA (1974) *Uran i torij bvzemnoi kore* Leningrad
240.Snyder WS, Ford MR and Warner GG (1978) *Estimates of specific absorbed fractions for photon sources uniformly distributed in various organs af a heterogenous phantom* NM/Mird Pamphlet No. 5, Health Physics Division, Oak Ridge National Laboratory
241.Sohrabi M (2000) Environments with elevated radiation levels from natural radioactive substances in: *Restoration of environments with radioactive residues*, Proceedings series STI/PUB/1092, IAEA, Vienna
242.Sorantin H and Steger F (1984) Natural radioactivity of building materials in Austria *Radiat. Prot. Dosim.* **7** 59-61
243.Stone JC (2007) *Adaptive discrete-ordinates algorithms and strategies* Dissertation, Texas A&M University

244.Stoulos S, Manolopoulou M and Papastefanou C (2003) Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece *J. Environ. Radioact.* **69** 225-240
245.Stoulos S, Manolopoulou M and Papastefanou C (2004) Measurement of radon emanation factor from granular samples: effects of additives in cement *Appl. Radiat. Isot.* **60** 49-54
246.Stranden E (1976) Some aspects on radioactivity of building materials *Phys. Norvegica* **8** 167-177
247.Stranden E (1979) Radioactivity of building materials and the gamma radiation in dwellings *Phys. Med. Biol*. **24** 921-930
248.STUK (2010) *The radioactivity of building materials and ash* Guide ST 12.2, Helsinki, ISSN 0789-4554
249.Takeuchi K and Sasamoto N (1982) Fundamental theory of direct integration method for solving the steady-state integral transport equation for radiation shielding calculation *Nucl. Sci. Eng.* **80** 536-553
250.Takeuchi K and Tanaka S (1981) *PALLAS-PL, SP-Br: A code for direct integration of transport equation in one dimensional plane and spherical geometries* Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-M 9695
251.Takeuchi K and Tanaka S (1985) Point isotropic buildup factors of gamma rays, including bremsstrahlung and annihilation radiation for water, concrete, iron and lead *Nucl. Sci. Eng*. **90** 158-164
252.Tanaka T and Suzuku T (1991) *A calculation method of photon dose equivalent based on the revised technical standards of radiological protection*, ORNL/TR-90/29, Oak Ridge National Laboratory
253.Taylor JJ (1954) *Application of gamma ray buildup data to shield design* Bettis Atomic Power Laboratory, WAPD-RM-217
254.Tecilović-Stevanović M (1990) *Osnovi tehnologije keramike* Beograd
255.*The Health Physics and Radiological Health Handbook* (1992) Ed. B. Shleien, Pub. Scinta, Inc. 2421 Homestead Drive, Silver Spring MD 20902, USA
256.Trevisi R, D'Alessandro M, Risica S and Nuccetelli C (2012) Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance *J. Environ. Radioact.* **105** 11-20
257.Trubey DK (1966) *A survey of empirical functions used to fit gamma-ray buildup factors* ORNL/RSIC-10, Oak Ridge National Laboratory
258.Trubey DK (1991) New gamma-ray buildup factor data for point kernel calculations: ANS-6.4.3 standard reference data NUREG/CR-5740
259.Trubey DK and Harima Y (1987) *New buildup factor data for point kernel calculations* DE87 000233, CONF-870405—10, Department of Energy U.S.
260.Tschurlovits M, Leitner A and Daverda G (1992) Dose rate constants for new dose quantities *Radiat. Prot. Dosim.* **42** 77-82
261.Tufail M, Iqbal M and Mirza SM (2000) Radiation doses due to the natural radioactivity in Pakistan marble *Radioprotection* **35** 299-310
262.Turhan Ş, Baykan UN and Şen K (2008) Measurement of the natural radioactivity in building materials used in Ankara and assessment of external doses *J. Radiol. Prot.* **28** 83-91
263.Turhan Ş and Varinlioğlu A (2012) Radioactivity measurement of primordial radionuclides in and dose evaluation from marble and glazed tiles used as covering building materials in Turkey *Radiat. Prot. Dosim.* doi:10.1093/rpd/ncs041

264.Turtiainen T, Salahel-din K, Klemola S and Sihvonen A-P (2008) Collective effective dose received by the population of Egypt from building materials *J. Radiol. Prot.* **28** 223-232
265.Tzortzis M, Tsertos H, Christofides S and Christodoulides G (2003) Gamma radiation measurements and dose rates in commercially-used natural tiling rocks (granites) *J. Environ. Radioactivity* **70** 223-235
266.Ujić P, Čeliković I, Kandić A, Vukanac I, Đurašević M, Dragosavac D and Žunić ZS (2010) Internal exposure from building materials exhaling ^{222}Rn and ^{220}Rn as compared to external exposure due to their natural radioactivity content *Appl. Radiat. Isot*. **68** 201-206
267.Unger LM and Trubey DK (1981) *Specific gamma-ray dose constants for nuclides important to dosimetry and radiological assessment* ORNL/RSIC-45, Oak Ridge Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
268.UNSCEAR (1982) *Sources and effects of ionizing radiation* Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York
269.UNSCEAR (1993) *Sources and effects of ionizing radiation* Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York
270.UNSCEAR (2000) *Sources, effects and risks of ionizing radiation* United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, 2000 Report, United Nations New York
271.UNSCEAR (2010) *Sources, effects and risks of ionizing radiation* United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, 2000 Report, United Nations New York
272.van der Graaf ER, Schaap LEJJ and Bosmans G (2001) Radiation performance index for Dutch dwellings: consequences for some typical situations *Sci. Total Environ.* **272** 151-158
273.Vassiliev ON, Wareing TA, McGhee J, Failla G, Salehpour MR and Mourtada F (2010) Validation of a new grid-based Boltzmann equation solver for dose calculation with photon beams *Phys. Med. Biol.* **55** 581-598
274.Vaz P (2009) Neutron transport simulation (selected topics) *Radiat. Phys. Chem.* doi:10.1016/j.radphyschem.2009.04.022
275.Veinot KG and Hertel NE (2011) Personal dose equivalent conversion coefficients for photons to 1 GeV *Radiat. Prot. Dosim.* **145** 28-35
276.Vesić D (1987) *Mogućnosti gamaspektrometrijskog određivanja urana, torijuma i kalijuma u geološki definisanim uzorcima* Doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet u Beogradu, Beograd
277.Wackerly DD, Mendenhall W and Scheaffer RL (2008) *Mathematical statistics with applications* 7th Edition, Thomson-Brooks/Cole, Belmont CA
278.Wernli C (2004) *External dosimetry: Operational quantities and their measurement* 11th International congress of the international radiation protection association (IRPA), Madrid, Refresher course RC-3b
279.White GN (1959) *Principles of radiation dosimetry* John Wiley & Sons, New York
280.*Wolfram Mathematica*®8 (2010) Wolfram Research, Inc. (*Mathematica*8 Notebook)
281.World Nuclear Association (2011) *Radiation and nuclear energy* http://www.world-nuclear.org/info/inf30.html
282.Wyckoff HO, Kennedy RJ and Bradford WR (1948) *Nucleonics* **3** 62
283.Xinwei L (2004) Radioactivity level in Chinese building ceramic tile *Radiat. Prot. Dosim.* **112** 323-327

284.Xinwei L (2005) Natural radioactivity in some building materials of Xi'an, China *Radiat. Meas.* **40** 94-97
285.Xu XG and Eckerman KF (2010) *Anatomical models for radiation dosimetry* CRC Press, Taylor and Francis Group LLC, ISBN: 978-1-4200-5979-3
286.Yamaguchi Y (1994) Dose conversion coefficients for external photons based on ICRP 1990 recommendations *J. Nucl. Sci. Technol.* **31** 716-725
287.Yi CY, Jun JS, Chai HS, Oh JJ and Yun JY (1997) Measurement of ambient dose equivalent using a NaI(Tl) scintillation detector *Radiat. Prot. Dosim.* **74** 273-278
288.Yoshida Y (2006) Development of fitting methods using geometric progression formulae of gamma-ray buildup factors *J. Nucl. Sci. Technol.* **43** 1446-1457
289.Zankl M, Petoussi-Henß N, Drexler G and Saito K (1997) *The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods Part VII: Organ doses due to parallel and environmental exposure geometries* Institut für Strahlenschutz GSF-Bericht 8/97
290.Zhou C and Inanc F (2003) Integral-transport-based deterministic brachytherapy dose calculations *Phys. Med. Biol.* **48** 73-93
291.ZZZR (2012) Radiološka Laboratorija, Zavod za zdravstvenu zaštitu radnika "Niš" *Konačni izveštaj o praćenju aktivnosti radionuklida u zemljištu i životnoj sredini grada Niša za period 2011/2012 god*, za Upravu za privredu, održivi razvoj i zaštitu životne sredine grada Niša, Niš
292.Žunić ZS et al. (2006) High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niška Banja (Balkan region) *J. Environ. Radioactivity* **89** 249-260

Dodatak 1. Tabele

Tabela D.1. Hemijski sastav i gustina građevinskih materijala i vazduha

Hemijski element	Beton	Cigla	Keramičke pločice	Vazduh
$_{1}$H	0.0056			
$_{6}$C				0.00014
$_{7}$N				0.75519
$_{8}$O	0.4983	0.5135	0.47000	0.23179
$_{11}$Na	0.0171		0.00482	
$_{12}$Mg	0.0024		0.00482	
$_{13}$Al	0.0456	0.1430	0.11000	
$_{14}$Si	0.3158	0.3225	0.33400	
$_{16}$S	0.0012			
$_{19}$K	0.0192		0.01330	
$_{18}$Ar				0.01288
$_{20}$Ca	0.0826		0.05340	
$_{22}$Ti		0.0120	0.00483	
$_{26}$Fe	0.0122	0.0090	0.00483	
ρ (g/cm^3)	2.35	1.60	2.50	0.0012

Tabela D.2.a) Vrednosti energija koje odgovaraju energetskim grupama ^{238}U, gama prinosi, koeficijenti slabljenja u pojedinim materijalima, koeficijenti transfera energije u vazduhu

E(MeV) ^{238}U	$Y(E)$	μ(cm^{-1}) Beton	μ(cm^{-1}) Cigla	μ(cm^{-1}) Keramika	μ(cm^{-1}) Vazduh	μ_{tr}/ρ(cm^2/g) Vazduh
0.047	0.040	$9.577\cdot10^{-1}$	$5.270\cdot10^{-1}$	$9.218\cdot10^{-1}$	$2.456\cdot10^{-4}$	$4.663\cdot10^{-2}$
0.053	0.022	$7.759\cdot10^{-1}$	$4.381\cdot10^{-1}$	$7.522\cdot10^{-1}$	$2.285\cdot10^{-4}$	$3.705\cdot10^{-2}$
0.186	0.040	$3.023\cdot10^{-1}$	$2.005\cdot10^{-1}$	$3.150\cdot10^{-1}$	$1.508\cdot10^{-4}$	$2.633\cdot10^{-2}$
0.242	0.084	$2.730\cdot10^{-1}$	$1.829\cdot10^{-1}$	$2.865\cdot10^{-1}$	$1.376\cdot10^{-4}$	$2.772\cdot10^{-2}$
0.273	0.059	$2.607\cdot10^{-1}$	$1.750\cdot10^{-1}$	$2.742\cdot10^{-1}$	$1.317\cdot10^{-4}$	$2.832\cdot10^{-2}$
0.295	0.207	$2.531\cdot10^{-1}$	$1.702\cdot10^{-1}$	$2.665\cdot10^{-1}$	$1.280\cdot10^{-4}$	$2.870\cdot10^{-2}$
0.352	0.348	$2.365\cdot10^{-1}$	$1.592\cdot10^{-1}$	$2.491\cdot10^{-1}$	$1.199\cdot10^{-4}$	$2.911\cdot10^{-2}$

0.395	0.012	$2.262\cdot10^{-1}$	$1.521\cdot10^{-1}$	$2.381\cdot10^{-1}$	$1.149\cdot10^{-4}$	$2.947\cdot10^{-2}$
0.470	0.021	$2.105\cdot10^{-1}$	$1.418\cdot10^{-1}$	$2.220\cdot10^{-1}$	$1.071\cdot10^{-4}$	$2.964\cdot10^{-2}$
0.609	0.430	$1.884\cdot10^{-1}$	$1.271\cdot10^{-1}$	$1.988\cdot10^{-1}$	$9.595\cdot10^{-5}$	$2.953\cdot10^{-2}$
0.666	0.029	$1.809\cdot10^{-1}$	$1.221\cdot10^{-1}$	$1.911\cdot10^{-1}$	$9.216\cdot10^{-5}$	$2.934\cdot10^{-2}$
0.773	0.077	$1.692\cdot10^{-1}$	$1.142\cdot10^{-1}$	$1.786\cdot10^{-1}$	$8.616\cdot10^{-5}$	$2.895\cdot10^{-2}$
0.806	0.021	$1.660\cdot10^{-1}$	$1.120\cdot10^{-1}$	$1.752\cdot10^{-1}$	$8.454\cdot10^{-5}$	$2.887\cdot10^{-2}$
0.934	0.036	$1.547\cdot10^{-1}$	$1.044\cdot10^{-1}$	$1.634\cdot10^{-1}$	$7.883\cdot10^{-5}$	$2.827\cdot10^{-2}$
1.120	0.156	$1.414\cdot10^{-1}$	$9.554\cdot10^{-2}$	$1.495\cdot10^{-1}$	$7.206\cdot10^{-5}$	$2.728\cdot10^{-2}$
1.246	0.083	$1.340\cdot10^{-1}$	$9.054\cdot10^{-2}$	$1.417\cdot10^{-1}$	$6.828\cdot10^{-5}$	$2.670\cdot10^{-2}$
1.390	0.092	$1.268\cdot10^{-1}$	$8.563\cdot10^{-2}$	$1.340\cdot10^{-1}$	$6.460\cdot10^{-5}$	$2.602\cdot10^{-2}$
1.509	0.037	$1.216\cdot10^{-1}$	$8.210\cdot10^{-2}$	$1.284\cdot10^{-1}$	$6.196\cdot10^{-5}$	$2.564\cdot10^{-2}$
1.661	0.020	$1.158\cdot10^{-1}$	$7.816\cdot10^{-2}$	$1.223\cdot10^{-1}$	$5.890\cdot10^{-5}$	$2.494\cdot10^{-2}$
1.760	0.180	$1.124\cdot10^{-1}$	$7.587\cdot10^{-2}$	$1.188\cdot10^{-1}$	$5.713\cdot10^{-5}$	$2.443\cdot10^{-2}$
1.848	0.027	$1.096\cdot10^{-1}$	$7.400\cdot10^{-2}$	$1.158\cdot10^{-1}$	$5.568\cdot10^{-5}$	$2.411\cdot10^{-2}$
2.118	0.011	$1.023\cdot10^{-1}$	$6.893\cdot10^{-2}$	$1.080\cdot10^{-1}$	$5.178\cdot10^{-5}$	$2.317\cdot10^{-2}$
2.204	0.062	$1.002\cdot10^{-1}$	$6.754\cdot10^{-2}$	$1.058\cdot10^{-1}$	$5.069\cdot10^{-5}$	$2.277\cdot10^{-2}$
2.435	0.024	$9.530\cdot10^{-2}$	$6.418\cdot10^{-2}$	$1.006\cdot10^{-1}$	$4.805\cdot10^{-5}$	$2.214\cdot10^{-2}$

Tabela D.2.b) Vrednosti energija koje odgovaraju energetskim grupama ^{232}Th, gama prinosi, koeficijenti slabljenja u pojedinim materijalima, koeficijenti transfera energije u vazduhu.

E(MeV) ^{232}Th	$Y(E)$	μ(cm^{-1}) Beton	μ(cm^{-1}) Cigla	μ(cm^{-1}) Keramika	μ(cm^{-1}) Vazduh	μ_{tr}/ρ (cm^2/g) Vazduh
0.040	0.015	$13.136\cdot10^{-1}$	$7.109\cdot10^{-1}$	$12.73\cdot10^{-1}$	$2.748\cdot10^{-4}$	$6.690\cdot10^{-2}$
0.100	0.023	$3.995\cdot10^{-1}$	$2.547\cdot10^{-1}$	$4.072\cdot10^{-1}$	$1.812\cdot10^{-4}$	$2.340\cdot10^{-2}$
0.129	0.034	$3.536\cdot10^{-1}$	$2.286\cdot10^{-1}$	$3.615\cdot10^{-1}$	$1.681\cdot10^{-4}$	$2.439\cdot10^{-2}$
0.209	0.045	$2.888\cdot10^{-1}$	$1.926\cdot10^{-1}$	$3.020\cdot10^{-1}$	$1.452\cdot10^{-4}$	$2.701\cdot10^{-2}$
0.239	0.450	$2.744\cdot10^{-1}$	$1.837\cdot10^{-1}$	$2.880\cdot10^{-1}$	$1.383\cdot10^{-4}$	$2.760\cdot10^{-2}$
0.270	0.032	$2.618\cdot10^{-1}$	$1.758\cdot10^{-1}$	$2.752\cdot10^{-1}$	$1.322\cdot10^{-4}$	$2.824\cdot10^{-2}$
0.289	0.057	$2.551\cdot10^{-1}$	$1.715\cdot10^{-1}$	$2.685\cdot10^{-1}$	$1.290\cdot10^{-4}$	$2.861\cdot10^{-2}$
0.331	0.190	$2.421\cdot10^{-1}$	$1.629\cdot10^{-1}$	$2.550\cdot10^{-1}$	$1.226\cdot10^{-4}$	$2.901\cdot10^{-2}$
0.409	0.019	$2.230\cdot10^{-1}$	$1.500\cdot10^{-1}$	$2.348\cdot10^{-1}$	$1.133\cdot10^{-4}$	$2.952\cdot10^{-2}$
0.463	0.046	$2.118\cdot10^{-1}$	$1.427\cdot10^{-1}$	$2.233\cdot10^{-1}$	$1.077\cdot10^{-4}$	$2.960\cdot10^{-2}$
0.511	0.086	$2.032\cdot10^{-1}$	$1.370\cdot10^{-1}$	$2.144\cdot10^{-1}$	$1.034\cdot10^{-4}$	$2.967\cdot10^{-2}$
0.583	0.300	$1.920\cdot10^{-1}$	$1.295\cdot10^{-1}$	$2.026\cdot10^{-1}$	$9.779\cdot10^{-5}$	$2.958\cdot10^{-2}$
0.727	0.072	$1.739\cdot10^{-1}$	$1.174\cdot10^{-1}$	$1.837\cdot10^{-1}$	$8.858\cdot10^{-5}$	$2.909\cdot10^{-2}$
0.782	0.091	$1.683\cdot10^{-1}$	$1.136\cdot10^{-1}$	$1.777\cdot10^{-1}$	$8.572\cdot10^{-5}$	$2.891\cdot10^{-2}$
0.860	0.051	$1.609\cdot10^{-1}$	$1.086\cdot10^{-1}$	$1.700\cdot10^{-1}$	$8.198\cdot10^{-5}$	$2.858\cdot10^{-2}$
0.911	0.260	$1.565\cdot10^{-1}$	$1.060\cdot10^{-1}$	$1.654\cdot10^{-1}$	$7.977\cdot10^{-5}$	$2.831\cdot10^{-2}$
0.969	0.166	$1.520\cdot10^{-1}$	$1.026\cdot10^{-1}$	$1.605\cdot10^{-1}$	$7.747\cdot10^{-5}$	$2.808\cdot10^{-2}$
1.588	0.066	$1.185\cdot10^{-1}$	$7.998\cdot10^{-2}$	$1.252\cdot10^{-1}$	$6.032\cdot10^{-5}$	$2.519\cdot10^{-2}$
1.626	0.041	$1.170\cdot10^{-1}$	$7.901\cdot10^{-2}$	$1.236\cdot10^{-1}$	$5.957\cdot10^{-5}$	$2.499\cdot10^{-2}$
2.615	0.352	$9.190\cdot10^{-2}$	$6.190\cdot10^{-2}$	$9.700\cdot10^{-2}$	$4.624\cdot10^{-5}$	$2.157\cdot10^{-2}$

Tabela D.2.c) Vrednost energije γ- fotona iz raspada ^{40}K, verovatnoća emisije, koeficijenti slabljenja u pojedinim materijalima, koeficijent transfera energije u vazduhu.

E(MeV) ^{40}K	$Y(E)$	μ(cm^{-1}) Beton	μ(cm^{-1}) Cigla	μ(cm^{-1}) Keramika	μ(cm^{-1}) Vazduh	μ_{tr}/ρ(cm^2/g) Vazduh
1.4608	0.1067	$1.237\cdot10^{-1}$	$8.347\cdot10^{-2}$	$1.306\cdot10^{-1}$	$6.299\cdot10^{-5}$	$2.577\cdot10^{-2}$

Tabela D.3.a) Cigla: Ekvivalentni atomski broj (Z_{eq}), određen interpolacijom po koeficijentu slabljenja i (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja, izračunati interpolacijom po atomskom broju

E (MeV)	Z_{eq}	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
0.03	12.07	1.283	0.447	0.190	16.24	-0.1022
0.04	12.13	1.598	0.550	0.146	13.85	-0.0775
0.05	12.18	2.037	0.639	0.120	13.68	-0.0626
0.06	12.21	2.407	0.773	0.078	13.65	-0.0567
0.08	12.24	2.873	1.011	0.012	13.69	-0.0238
0.10	12.28	3.028	1.195	-0.028	13.99	-0.0080
0.15	12.32	2.981	1.422	-0.069	14.56	0.0116
0.20	12.35	2.822	1.508	-0.083	14.25	0.0169
0.30	12.39	2.578	1.542	-0.090	14.17	0.0206
0.40	12.44	2.422	1.522	-0.089	14.60	0.0215
0.50	12.49	2.301	1.490	-0.086	14.53	0.0215
0.60	12.53	2.208	1.460	-0.083	14.91	0.0236
0.80	12.56	2.089	1.391	-0.074	13.69	0.0215
1.00	11.99	2.004	1.350	-0.069	15.69	0.0235
1.50	11.29	1.875	1.234	-0.049	15.00	0.0168
2.00	11.13	1.794	1.154	-0.034	14.66	0.0120
3.00	11.01	1.684	1.056	-0.011	10.53	0.0009
4.00	11.00	1.606	0.992	0.006	12.86	-0.0089

Tabela D.3.b) Cigla: Faktori nagomilavanja izlaganja, izračunati pomoću interpoliranih (G-P) parametara

	Energija (MeV)								
R(mfp)	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.1	0.15	0.2	0.3
0.5	1.17	1.35	1.59	1.76	1.94	1.96	1.89	1.80	1.69
1	1.28	1.60	2.04	2.41	2.87	3.03	2.98	2.82	2.58
2	1.43	1.96	2.76	3.55	4.78	5.40	5.67	5.42	4.86
3	1.52	2.23	3.34	4.59	6.76	8.10	9.04	8.78	7.86
4	1.60	2.45	3.85	5.56	8.81	11.12	13.13	12.99	11.63
5	1.66	2.64	4.31	6.49	10.95	14.46	17.99	18.12	16.25
6	1.71	2.81	4.74	7.40	13.19	18.15	23.69	24.24	21.78
7	1.76	2.96	5.15	8.30	15.53	22.19	30.28	31.46	28.31
8	1.80	3.10	5.55	9.20	17.99	26.60	37.82	39.86	35.92
10	1.88	3.37	6.32	11.02	23.28	36.58	56.02	60.56	54.65
15	2.07	3.98	8.23	15.88	38.90	69.00	122.69	139.45	125.50
20	2.24	4.50	10.13	21.10	58.12	113.30	226.50	267.25	238.44
25	2.38	4.90	11.88	26.16	80.30	170.08	377.74	459.88	405.99
30	2.49	5.20	13.40	30.71	104.56	239.06	588.67	737.18	643.89
35	2.57	5.47	14.97	35.31	131.60	320.47	868.45	1112.52	959.86
40	2.65	5.81	17.01	41.22	164.10	416.12	1214.89	1576.98	1337.98

	Energija (MeV)								
R(mfp)	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.5	2	3	4
0.5	1.62	1.58	1.54	1.49	1.46	1.41	1.38	1.34	1.30
1	2.42	2.30	2.21	2.09	2.00	1.88	1.79	1.68	1.61
2	4.46	4.13	3.87	3.53	3.30	2.92	2.69	2.40	2.21
3	7.09	6.46	5.96	5.28	4.83	4.10	3.66	3.14	2.81

4	10.37	9.31	8.49	7.33	6.60	5.39	4.69	3.90	3.42
5	14.34	12.71	11.46	9.68	8.60	6.79	5.78	4.69	4.04
6	19.06	16.70	14.90	12.34	10.81	8.29	6.91	5.48	4.66
7	24.55	21.29	18.81	15.29	13.23	9.89	8.09	6.30	5.28
8	30.89	26.51	23.21	18.54	15.85	11.57	9.31	7.13	5.92
10	46.23	38.92	33.49	25.90	21.66	15.16	11.85	8.83	7.20
15	102.05	82.19	67.98	49.17	39.07	25.20	18.63	13.28	10.55
20	186.44	144.26	115.23	79.09	59.84	36.40	25.83	17.98	14.02
25	305.32	227.74	176.40	116.22	83.61	48.63	33.41	22.87	17.54
30	466.56	336.30	253.91	161.30	110.84	62.02	41.42	27.89	21.04
35	672.99	469.60	347.90	212.29	141.50	76.37	49.71	32.96	24.61
40	911.90	616.93	451.19	263.21	173.54	90.65	57.79	38.03	28.41

Tabela D.4.a) Keramika: Ekvivalentni atomski broj (Z_{eq}), određen interpolacijom po koeficijentu slabljenja i (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja, izračunati interpolacijom po atomskom broju

E (MeV)	Z_{eq}	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
0.03	12.79	1.236	0.427	0.196	14.95	-0.1038
0.04	12.85	1.500	0.511	0.163	14.84	-0.0873
0.05	12.90	1.797	0.663	0.102	16.13	-0.0509
0.06	12.94	2.205	0.703	0.102	13.02	-0.0579
0.08	12.99	2.643	0.925	0.035	13.00	-0.0350
0.10	13.02	2.842	1.108	-0.008	12.99	-0.0189
0.15	13.02	2.874	1.355	-0.058	21.49	0.0068
0.20	13.05	2.758	1.451	-0.073	16.54	0.0105
0.30	13.15	2.536	1.504	-0.084	16.32	0.0166
0.40	13.15	2.396	1.494	-0.084	16.35	0.0185
0.50	13.16	2.281	1.471	-0.082	16.39	0.0192
0.60	13.20	2.193	1.443	-0.080	17.37	0.0224
0.80	13.47	2.067	1.384	-0.072	15.78	0.0206
1.00	12.91	1.995	1.337	-0.066	15.84	0.0217
1.50	11.93	1.868	1.233	-0.049	14.57	0.0168
2.00	11.67	1.790	1.155	-0.033	15.57	0.0112
3.00	11.49	1.679	1.060	-0.010	13.48	-0.0006
4.00	11.48	1.602	0.994	0.006	12.94	-0.0090

Tabela D.4.b) Keramika: Faktori nagomilavanja izlaganja, izračunati pomoću interpoliranih (G-P) parametara

	Energija (MeV)								
R(mfp)	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.1	0.15	0.2	0.3
0.5	1.15	1.30	1.45	1.67	1.84	1.90	1.86	1.79	1.68
1	1.24	1.50	1.80	2.40	2.64	2.84	2.87	2.76	2.54
2	1.35	1.79	2.36	3.11	4.20	4.87	5.31	5.18	4.72
3	1.43	1.99	2.83	3.90	5.74	7.09	8.29	8.27	7.53
4	1.48	2.15	3.22	4.61	7.29	9.49	11.81	12.05	11.03
5	1.53	2.29	3.58	5.27	8.86	12.10	15.92	16.60	15.27
6	1.57	2.42	3.91	5.91	10.47	14.92	20.64	21.98	20.31
7	1.60	2.53	4.21	6.54	12.13	17.96	26.00	28.25	26.21
8	1.63	2.63	4.50	7.16	13.84	21.24	32.05	35.49	33.03

10	1.69	2.82	5.05	8.41	17.46	28.54	46.35	53.14	49.65
15	1.82	3.27	6.35	11.66	27.84	51.64	96.54	119.07	111.13
20	1.93	3.66	7.61	15.10	40.04	82.21	170.56	223.16	205.71
25	2.02	3.98	8.80	18.44	53.29	119.67	271.77	374.36	339.05
30	2.07	4.22	9.85	21.63	67.07	163.24	402.85	582.44	517.91
35	2.12	4.41	10.77	25.29	82.70	214.62	566.01	856.44	748.00
40	2.17	4.63	11.68	30.42	102.83	278.12	762.84	1198.72	1026.05

	Energija (MeV)								
R(mfp)	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.5	2	3	4
0.5	1.62	1.57	1.53	1.48	1.46	1.41	1.38	1.33	1.30
1	2.40	2.28	2.19	2.07	2.00	1.87	1.79	1.68	1.60
2	4.36	4.06	3.82	3.47	3.27	2.90	2.68	2.39	2.20
3	6.89	6.32	5.85	5.18	4.77	4.07	3.65	3.14	2.81
4	10.01	9.07	8.30	7.18	6.50	5.35	4.68	3.91	3.42
5	13.76	12.35	11.16	9.47	8.44	6.74	5.78	4.70	4.03
6	18.18	16.18	14.46	12.06	10.59	8.22	6.93	5.52	4.65
7	23.32	20.58	18.19	14.93	12.95	9.79	8.12	6.36	5.28
8	29.22	25.58	22.38	18.10	15.50	11.45	9.36	7.22	5.92
10	43.46	37.47	32.13	25.30	21.15	14.99	11.97	9.00	7.22
15	94.77	78.92	64.51	48.06	38.14	24.87	19.02	13.78	10.62
20	171.10	138.05	107.83	77.03	58.55	35.87	26.65	18.98	14.20
25	275.57	215.98	161.53	111.94	82.04	47.93	34.78	24.55	17.85
30	412.40	314.77	226.08	153.30	108.98	61.18	43.47	30.43	21.52
35	585.13	435.98	302.43	201.11	139.43	75.27	52.66	36.58	25.30
40	789.99	575.84	389.14	252.62	171.61	89.07	62.01	42.99	29.35

Tabela D.5.a) Beton: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energetske grupe ^{238}U, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) U^{238}	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
0.047	1.644	0.592	0.129	15.76	-0.0680
0.053	1.858	0.638	0.116	14.58	-0.0597
0.186	2.750	1.406	-0.066	15.98	0.0073
0.242	2.629	1.471	-0.077	18.69	0.0146
0.273	2.570	1.486	-0.081	17.81	0.0158
0.295	2.531	1.491	-0.082	16.84	0.0161
0.352	2.438	1.498	-0.084	16.13	0.0182
0.395	2.378	1.495	-0.085	15.97	0.0193
0.470	2.298	1.476	-0.083	16.10	0.0196
0.609	2.186	1.431	-0.078	17.06	0.0199
0.666	2.147	1.414	-0.076	17.22	0.0202
0.773	2.081	1.392	-0.074	15.33	0.0202
0.806	2.063	1.385	-0.073	15.01	0.0202
0.934	2.007	1.349	-0.068	15.19	0.0197
1.120	1.943	1.301	-0.060	15.88	0.0185
1.246	1.909	1.270	-0.055	16.55	0.0176
1.390	1.871	1.247	-0.051	16.37	0.0169
1.509	1.846	1.225	-0.047	16.41	0.0159

1.661	1.819	1.200	-0.042	16.35	0.0145
1.760	1.806	1.186	-0.040	15.44	0.0129
1.848	1.794	1.174	-0.037	15.06	0.0119
2.118	1.762	1.140	-0.030	13.77	0.0085
2.204	1.752	1.120	-0.028	13.33	0.0075
2.435	1.725	1.105	-0.022	12.04	0.0052

Tabela D.5.b) Beton: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energetske grupe ^{232}Th, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) Th^{232}	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
0.040	1.455	0.493	0.171	14.53	-0.0925
0.100	2.766	1.069	0.001	12.64	-0.0251
0.129	2.841	1.235	-0.0034	8.98	-0.0118
0.209	2.697	1.441	-0.0720	18.73	0.0119
0.239	2.635	1.469	-0.0771	18.74	0.0144
0.270	2.576	1.485	-0.0803	17.92	0.0157
0.289	2.541	1.490	-0.0815	17.13	0.0160
0.331	2.470	1.497	-0.0837	16.28	0.0175
0.409	2.362	1.492	-0.0849	15.96	0.0194
0.463	2.305	1.478	-0.0834	16.07	0.0196
0.511	2.262	1.462	-0.0815	16.37	0.0195
0.583	2.204	1.439	-0.0787	16.93	0.0198
0.727	2.107	1.403	-0.0749	15.79	0.0202
0.782	2.076	1.390	-0.0735	15.25	0.0202
0.860	2.038	1.369	-0.0707	15.07	0.0200
0.911	2.016	1.356	-0.0690	15.14	0.0198
0.969	1.993	1.340	-0.0663	15.28	0.0195
1.588	1.832	1.212	-0.0442	16.39	0.0152
1.626	1.825	1.206	-0.0430	16.38	0.0149
2.615	1.706	1.087	-0.0182	11.404	0.0033

Tabela D.5.c) Beton: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energiju gama zračenja ^{40}K, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) K^{40}	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
1.4608	1.855	1.234	-0.048	16.40	0.0163

Tabela D.6.a) Cigla: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energetske grupe ^{238}U, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{238}U	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
0.047	1.906	0.610	0.128	13.65	-0.0661
0.053	2.158	0.678	0.108	13.66	-0.0610
0.186	2.868	1.492	-0.080	14.35	0.0160
0.242	2.707	1.535	-0.088	14.14	0.0191
0.273	2.634	1.542	-0.089	14.13	0.0201
0.295	2.588	1.542	-0.090	14.16	0.0205

0.352	2.490	1.535	-0.090	14.42	0.0212
0.395	2.429	1.524	-0.089	14.58	0.0215
0.470	2.334	1.500	-0.087	14.54	0.0214
0.609	2.201	1.456	-0.082	14.90	0.0235
0.666	2.162	1.435	-0.080	14.83	0.0229
0.773	2.102	1.399	-0.075	14.78	0.0218
0.806	2.086	1.390	-0.074	14.81	0.0216
0.934	2.029	1.363	-0.071	15.41	0.0229
1.120	1.965	1.320	-0.064	15.64	0.0223
1.246	1.931	1.290	-0.059	15.49	0.0207
1.390	1.897	1.258	-0.053	15.24	0.0186
1.509	1.230	1.232	-0.049	15.00	0.0167
1.661	1.183	1.205	-0.044	15.00	0.0152
1.760	1.165	1.189	-0.041	14.94	0.0143
1.848	1.156	1.175	-0.038	14.85	0.0134
2.118	1.778	1.139	-0.031	13.94	0.0107
2.204	1.767	1.129	-0.029	13.47	0.0097
2.435	1.740	1.105	-0.023	12.38	0.0071

Tabela D.6.b) Cigla: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energetske grupe ^{232}Th, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{232}Th	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
0.040	1.598	0.550	0.146	13.85	-0.0775
0.100	3.028	1.195	-0.028	13.99	-0.008
0.129	3.035	1.353	-0.058	14.41	0.0058
0.209	2.795	1.516	-0.084	14.21	0.0175
0.239	2.714	1.534	-0.088	14.14	0.0190
0.270	2.641	1.542	-0.089	14.13	0.0200
0.289	2.600	1.542	-0.090	14.15	0.0204
0.331	2.524	1.538	-0.090	14.33	0.0210
0.409	2.410	1.520	-0.089	14.59	0.0214
0.463	2.342	1.502	-0.087	14.54	0.0214
0.511	2.289	1.487	-0.086	14.57	0.0218
0.583	2.222	1.465	-0.084	14.85	0.0232
0.727	2.126	1.414	-0.077	14.79	0.0223
0.782	2.098	1.397	-0.075	14.78	0.0217
0.860	2.060	1.378	-0.072	15.08	0.0222
0.911	2.038	1.367	-0.071	15.31	0.0227
0.969	2.016	1.356	-0.070	15.56	0.0232
1.588	1.202	1.218	-0.046	15.01	0.0160
1.626	1.192	1.211	-0.045	15.01	0.0156
2.615	1.721	1.088	-0.019	11.68	0.0051

Tabela D.6.c) Cigla: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energiju gama zračenja ^{40}K, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{40}K	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
1.4608	1.883	1.242	-0.051	15.09	0.0174

Tabela D.7.a) Keramika: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energetske grupe ^{238}U, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{238}U	b	c	a	X_k	d
0.047	1.699	0.623	0.117	15.99	-0.0595
0.053	1.925	0.676	0.101	15.21	-0.0522
0.186	2.794	1.432	-0.070	18.03	0.0101
0.242	2.656	1.487	-0.080	15.92	0.0136
0.273	2.589	1.499	-0.082	16.00	0.0153
0.295	2.546	1.504	-0.084	16.25	0.0161
0.352	2.458	1.502	-0.084	16.32	0.0178
0.395	2.402	1.495	-0.084	16.35	0.0184
0.470	2.313	1.479	-0.083	16.31	0.0189
0.609	2.186	1.440	-0.080	17.31	0.0224
0.666	2.144	1.423	-0.077	16.91	0.0220
0.773	2.081	1.392	-0.073	16.02	0.0209
0.806	2.064	1.382	-0.072	15.78	0.0206
0.934	2.016	1.352	-0.068	15.79	0.0214
1.120	1.958	1.309	-0.062	15.42	0.0210
1.246	1.924	1.282	-0.058	15.07	0.0198
1.390	1.891	1.254	-0.053	14.76	0.0182
1.509	1.229	1.231	-0.049	14.59	0.0167
1.661	1.183	1.205	-0.044	14.95	0.0150
1.760	1.165	1.189	-0.040	15.16	0.0139
1.848	1.157	1.176	-0.038	15.32	0.0129
2.118	1.774	1.141	-0.030	15.35	0.0097
2.204	1.763	1.131	-0.027	15.18	0.0086
2.435	1.736	1.108	-0.022	14.71	0.0058

Tabela D.7.b) Keramika: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energetske grupe ^{232}Th, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{232}Th	b	c	a	X_k	d
0.040	1.500	0.511	0.163	14.84	-0.0873
0.100	2.842	1.108	-0.008	12.99	-0.0189
0.129	2.900	1.277	-0.043	18.74	-0.0109
0.209	2.735	1.461	-0.075	16.32	0.0112
0.239	2.663	1.485	-0.079	15.94	0.0134
0.270	2.596	1.499	-0.082	15.98	0.0152
0.289	2.557	1.503	-0.084	16.17	0.0161
0.331	2.488	1.504	-0.084	16.32	0.0174
0.409	2.384	1.492	-0.084	16.32	0.0185
0.463	2.320	1.480	-0.083	16.30	0.0188
0.511	2.270	1.468	-0.082	16.52	0.0196
0.583	2.206	1.448	-0.080	17.24	0.0219
0.727	2.106	1.405	-0.075	16.42	0.0215
0.782	2.076	1.389	-0.073	15.94	0.0208
0.860	2.042	1.369	-0.070	15.77	0.0210
0.911	2.024	1.357	-0.069	15.78	0.0213
0.969	2.004	1.344	-0.067	15.81	0.0216

1.588	1.202	1.217	-0.046	14.79	0.0158
1.626	1.191	1.211	-0.045	14.87	0.0154
2.615	1.716	1.091	-0.018	14.33	0.0036

Tabela D.7.c) Keramika: (G-P) parametri faktora nagomilavanja izlaganja za energiju gama zračenja ^{40}K, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{40}K	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
1.4608	1.876	1.240	-0.050	14.63	0.0173

Tabela D.8.a) *ICRU* tkivo: Ekvivalentni atomski broj (Z_{eq}), određen interpolacijom po koeficijentu slabljenja i (G-P) parametri faktora nagomilavanja apsorpcije energije, izračunati interpolacijom po atomskom broju

E (MeV)	Z_{eq}	*b*	*c*	*a*	X_k	*d*
0.03	7.31	2.537	0.783	0.073	14.59	-0.0404
0.04	7.32	3.728	1.178	-0.030	13.61	0.0069
0.05	7.32	4.651	1.524	-0.093	13.78	0.0383
0.06	7.32	5.008	1.804	-0.135	13.74	0.0604
0.08	7.34	4.924	2.114	-0.173	13.53	0.0771
0.10	7.45	4.646	2.159	-0.177	14.12	0.0770
0.15	7.53	3.843	2.200	-0.179	14.40	0.0724
0.20	7.55	3.365	2.165	-0.176	14.34	0.0734
0.30	7.60	2.878	2.006	-0.162	14.14	0.0640
0.40	7.70	2.641	1.861	-0.146	14.12	0.0578
0.50	7.80	2.476	1.753	-0.133	14.25	0.0531
0.60	7.90	2.367	1.658	-0.120	14.30	0.0478
0.80	7.90	2.213	1.542	-0.100	14.36	0.0400
1.00	7.50	2.106	1.428	-0.086	14.45	0.0351
1.50	7.11	1.932	1.275	-0.060	14.37	0.0257
2.00	7.03	1.835	1.176	-0.040	13.97	0.0171
3.00	7.00	1.708	1.057	-0.013	12.50	0.0042
4.00	7.00	1.629	0.980	0.007	14.32	-0.0070

Tabela D.8.b) *ICRU* tkivo: Faktori nagomilavanja apsorpcije energije, izračunati pomoću interpoliranih (G-P) parametara

	Energija (MeV)								
R(mfp)	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.1	0.15	0.2	0.3
0.5	1.83	2.30	2.60	2.66	2.54	2.42	2.10	1.92	1.75
1	2.54	3.73	4.65	5.01	4.92	4.65	3.84	3.36	2.88
2	3.80	6.88	9.87	11.59	12.28	11.61	9.37	7.90	6.24
3	4.95	10.38	16.59	20.95	23.79	22.66	18.28	15.12	11.33
4	6.02	14.23	24.89	33.43	40.41	38.83	31.52	25.75	18.46
5	7.05	18.42	34.85	49.44	63.23	61.29	50.17	40.60	27.98
6	8.05	22.94	46.54	69.34	93.34	91.25	75.42	60.52	40.22
7	9.05	27.8 1	60.06	93.50	131.86	129.97	108.49	86.41	55.54
8	10.05	33.00	75.45	122.25	179.91	178.69	150.68	119.19	74.21
10	12.06	44.43	112.23	194.72	308.78	311.02	267.57	209.06	122.71
15	17.47	79.21	241.76	475.68	868.72	898.16	808.54	616.31	318.04

20	23.58	123.69	434.92	935.38	1894.6	1979.5	1843.9	1380.9	636.92
25	30.25	179.56	718.61	1674.2	3713.6	3861.6	3667.9	2716.1	1126.4
30	37.20	248.82	1135.3	2869.8	6929.2	7147.9	6845.8	5037.9	1874.6
35	44.72	332.33	1706.1	4635.1	11965	12409	11969	8775.1	2918.2
40	53.97	429.16	2386.7	6781.1	18162	19230	18785	13728	4088.6

	Energija (MeV)								
R(mfp)	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.5	2	3	4
0.5	1.67	1.62	1.58	1.53	1.50	1.43	1.40	1.35	1.32
1	2.64	2.48	2.37	2.21	2.11	1.93	1.84	1.71	1.63
2	5.40	4.84	4.45	3.96	3.59	3.07	2.79	2.45	2.25
3	9.37	8.10	7.24	6.21	5.41	4.37	3.83	3.21	2.86
4	14.70	12.35	10.77	8.97	7.54	5.82	4.95	4.00	3.48
5	21.56	17.65	15.07	12.26	9.97	7.39	6.13	4.80	4.09
6	30.10	24.09	20.18	16.09	12.69	9.07	7.36	5.61	4.70
7	40.44	31.69	26.10	20.48	15.69	10.86	8.65	6.44	5.31
8	52.69	40.51	32.85	25.42	18.94	12.73	9.97	7.27	5.93
10	83.26	61.86	48.82	36.97	26.17	16.72	12.73	8.97	7.17
15	196.87	136.53	102.35	75.38	47.64	27.66	20.04	13.34	10.30
20	366.78	240.85	173.94	127.38	72.92	39.52	27.78	17.84	13.49
25	609.16	381.00	266.62	195.98	102.24	52.39	36.02	22.48	16.68
30	955.70	571.16	388.06	287.36	136.96	66.66	44.88	27.24	19.83
35	1409.1	809.91	536.36	402.49	176.05	81.85	54.06	31.98	22.93
40	1887.0	1054.2	686.03	527.59	213.84	96.16	62.75	36.59	26.08

Tabela D.9.a) *ICRU* tkivo: (G-P) parametri faktora nagomilavanja apsorpcije energije, linearni koeficijent slabljenja i koeficijent apsorpcije energije, za energetske grupe ^{238}U, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{238}U	b	c	a	X_k	d	μ (cm^{-1})	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
0.047	4.422	1.426	-0.077	13.70	0.0301	$2.102\cdot10^{-1}$	$4.530\cdot10^{-2}$
0.053	4.802	1.617	-0.108	13.78	0.0460	$1.984\cdot10^{-1}$	$3.723\cdot10^{-2}$
0.186	3.477	2.179	-0.177	14.37	0.0733	$1.374\cdot10^{-1}$	$2.901\cdot10^{-2}$
0.242	3.111	2.102	-0.171	14.24	0.0697	$1.261\cdot10^{-1}$	$3.050\cdot10^{-2}$
0.273	2.974	2.051	-0.166	14.18	0.0667	$1.209\cdot10^{-1}$	$3.107\cdot10^{-2}$
0.295	2.894	2.014	-0.163	14.15	0.0645	$1.176\cdot10^{-1}$	$3.151\cdot10^{-2}$
0.352	2.739	1.927	-0.153	14.11	0.0605	$1.101\cdot10^{-1}$	$3.208\cdot10^{-2}$
0.395	2.650	1.868	-0.147	14.12	0.0581	$1.053\cdot10^{-1}$	$3.243\cdot10^{-2}$
0.470	2.519	1.783	-0.137	14.21	0.0545	$9.819\cdot10^{-2}$	$3.261\cdot10^{-2}$
0.609	2.358	1.652	-0.119	14.30	0.0474	$8.796\cdot10^{-2}$	$3.248\cdot10^{-2}$
0.666	2.309	1.616	-0.113	14.32	0.0448	$8.456\cdot10^{-2}$	$3.224\cdot10^{-2}$
0.773	2.230	1.556	-0.102	14.35	0.0409	$7.904\cdot10^{-2}$	$3.184\cdot10^{-2}$
0.806	2.209	1.538	-0.100	14.36	0.0398	$7.753\cdot10^{-2}$	$3.171\cdot10^{-2}$
0.934	2.138	1.463	-0.090	14.43	0.0366	$7.232\cdot10^{-2}$	$3.102\cdot10^{-2}$
1.120	2.054	1.381	-0.079	14.47	0.0327	$6.616\cdot10^{-2}$	$2.994\cdot10^{-2}$
1.246	2.007	1.340	-0.072	14.46	0.0302	$6.268\cdot10^{-2}$	$2.923\cdot10^{-2}$
1.390	1.962	1.300	-0.065	14.42	0.0276	$5.925\cdot10^{-2}$	$2.852\cdot10^{-2}$
1.509	1.930	1.273	-0.060	14.37	0.0255	$5.678\cdot10^{-2}$	$2.799\cdot10^{-2}$
1.661	1.896	1.239	-0.053	14.28	0.0228	$5.401\cdot10^{-2}$	$2.722\cdot10^{-2}$

1.760	1.876	1.219	-0.049	14.20	0.0210	$5.240\cdot10^{-2}$	$2.677\cdot10^{-2}$
1.848	1.860	1.202	-0.046	14.12	0.0196	$5.106\cdot10^{-2}$	$2.639\cdot10^{-2}$
2.118	1.816	1.158	-0.036	13.65	0.0154	$4.739\cdot10^{-2}$	$2.530\cdot10^{-2}$
2.204	1.803	1.146	-0.034	13.45	0.0142	$4.637\cdot10^{-2}$	$2.497\cdot10^{-2}$
2.435	1.772	1.116	-0.027	13.03	0.0111	$4.393\cdot10^{-2}$	$2.416\cdot10^{-2}$

Tabela D.9.b) *ICRU* tkivo: (G-P) parametri faktora nagomilavanja apsorpcije energije, linearni koeficijent slabljenja i koeficijent apsorpcije energije, za energetske grupe ^{232}Th, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{232}Th	b	c	a	X_k	d	μ (cm^{-1})	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
0.040	3.728	0.783	0.073	14.59	-0.0404	$2.333\cdot10^{-1}$	$6.339\cdot10^{-2}$
0.100	4.646	2.159	-0.177	14.12	0.0770	$1.636\cdot10^{-1}$	$2.495\cdot10^{-2}$
0.129	4.155	2.194	-0.179	14.38	0.0740	$1.529\cdot10^{-1}$	$2.681\cdot10^{-2}$
0.209	3.302	2.152	-0.175	14.32	0.0727	$1.324\cdot10^{-1}$	$2.962\cdot10^{-2}$
0.239	3.127	2.106	-0.171	14.25	0.0700	$1.266\cdot10^{-1}$	$3.033\cdot10^{-2}$
0.270	2.985	2.056	-0.167	14.19	0.0670	$1.214\cdot10^{-1}$	$3.101\cdot10^{-2}$
0.289	2.915	2.024	-0.164	14.16	0.0651	$1.185\cdot10^{-1}$	$3.140\cdot10^{-2}$
0.331	2.790	1.958	-0.157	14.12	0.0618	$1.127\cdot10^{-1}$	$3.190\cdot10^{-2}$
0.409	2.623	1.850	-0.145	14.13	0.0574	$1.038\cdot10^{-1}$	$3.249\cdot10^{-2}$
0.463	2.530	1.790	-0.138	14.20	0.0548	$9.879\cdot10^{-2}$	$3.260\cdot10^{-2}$
0.511	2.462	1.741	-0.131	14.26	0.0525	$9.484\cdot10^{-2}$	$3.265\cdot10^{-2}$
0.583	2.383	1.673	-0.122	14.29	0.0487	$8.965\cdot10^{-2}$	$3.254\cdot10^{-2}$
0.727	2.262	1.580	-0.106	14.34	0.0425	$8.129\cdot10^{-2}$	$3.200\cdot10^{-2}$
0.782	2.224	1.551	-0.102	14.35	0.0406	$7.862\cdot10^{-2}$	$3.181\cdot10^{-2}$
0.860	2.177	1.505	-0.095	14.39	0.0384	$7.521\cdot10^{-2}$	$3.141\cdot10^{-2}$
0.911	2.150	1.476	-0.092	14.42	0.0371	$7.318\cdot10^{-2}$	$3.114\cdot10^{-2}$
0.969	2.120	1.444	-0.088	14.44	0.0358	$7.105\cdot10^{-2}$	$3.085\cdot10^{-2}$
1.588	1.912	1.255	-0.056	14.32	0.0241	$5.529\cdot10^{-2}$	$2.758\cdot10^{-2}$
1.626	1.903	1.246	-0.054	14.30	0.0234	$5.462\cdot10^{-2}$	$2.739\cdot10^{-2}$
2.615	1.749	1.095	-0.022	12.79	0.0088	$4.228\cdot10^{-2}$	$2.360\cdot10^{-2}$

Tabela D.9.c) *ICRU* tkivo: (G-P) parametri faktora nagomilavanja apsorpcije energije, linearni koeficijent slabljenja i koeficijent apsorpcije energije za energiju gama zračenja ^{40}K, izračunati interpolacijom po energiji

E (MeV) ^{40}K	b	c	a	X_k	d	μ (cm^{-1})	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
1.4608	1.942	1.284	-0.062	14.39	0.0264	$5.774\cdot10^{-2}$	$2.821\cdot10^{-2}$

Tabela D.10.a) Parametri *Berger*-ovog i *Taylor*-ovog oblika faktora nagomilavanja izlaganja, za energetske grupe ^{238}U, dobijeni programom SHLDUTIL

E (MeV) ^{238}U	*Berger*		*Taylor*		
	C	D	A	α_1	α_2
0.047	0.45	-0.028	3.456	-0.0210	0.2575
0.053	0.60	-0.020	4.265	-0.0302	0.2338
0.186	2.20	0.062	99.710	-0.0742	-0.0479
0.242	2.12	0.066	89.554	-0.0793	-0.0505
0.273	2.07	0.067	85.710	-0.0802	-0.0506

0.295	2.04	0.067	83.238	-0.0808	0.0506
0.352	1.94	0.064	118.195	-0.0735	-0.0513
0.395	1.88	0.061	143.786	-0.0681	-0.0518
0.470	1.77	0.057	90.227	-0.0682	-0.0417
0.609	1.59	0.049	124.798	-0.0553	-0.0399
0.666	1.53	0.046	110.024	-0.0532	-0.0363
0.773	1.43	0.041	85.424	-0.0499	-0.0302
0.806	1.41	0.040	78.887	-0.0489	-0.0284
0.934	1.31	0.034	61.756	-0.0455	-0.0209
1.120	1.20	0.029	58.800	-0.0394	-0.0161
1.246	1.13	0.026	63.485	-0.0351	-0.0149
1.390	1.07	0.023	68.290	-0.0307	-0.0137
1.509	1.02	0.021	70.874	-0.0277	-0.0125
1.661	0.97	0.019	58.628	-0.0272	-0.0083
1.760	0.95	0.017	51.241	-0.0269	-0.0057
1.848	0.93	0.016	45.016	-0.0266	-0.0035
2.118	0.86	0.013	35.440	-0.0246	0.0005
2.204	0.85	0.012	35.794	-0.0236	0.0009
2.435	0.80	0.011	36.680	-0.0209	0.0018

Tabela D.10.b) Parametri *Berger*-ovog i *Taylor*-ovog oblika faktora nagomilavanja izlaganja, za energetske grupe ^{232}Th, dobijeni programom SHLDUTIL

E (MeV) ^{232}Th	*Berger*		*Taylor*		
	C	*D*	*A*	α_1	α_2
0.040	0.26	-0.035	2.440	-0.0131	0.3378
0.100	1.83	0.028	43.630	-0.0461	0.000
0.129	2.06	0.044	86.437	-0.0568	-0.0253
0.209	2.18	0.065	94.230	-0.0782	-0.0505
0.239	2.13	0.066	89.952	-0.0792	-0.0505
0.270	2.07	0.066	86.062	-0.0801	-0.0506
0.289	2.05	0.067	83.893	-0.0806	-0.0506
0.331	1.98	0.065	104.537	-0.0763	-0.0510
0.409	1.86	0.060	138.804	-0.0676	-0.0505
0.463	1.78	0.057	95.471	-0.0682	-0.0427
0.511	1.71	0.054	75.606	-0.0670	-0.0381
0.583	1.62	0.050	118.010	-0.0576	-0.0401
0.727	1.47	0.043	95.554	-0.0513	-0.0327
0.782	1.43	0.041	83.513	-0.0496	-0.0297
0.860	1.36	0.037	71.349	-0.0474	-0.0251
0.911	1.33	0.035	64.654	-0.0461	-0.0222
0.969	1.29	0.033	57.480	-0.0446	-0.0190
1.588	0.99	0.020	64.363	-0.0274	-0.0103
1.626	0.98	0.019	61.345	-0.0273	-0.0092
2.615	0.77	0.009	37.314	-0.0189	0.0025

Tabela D.10.c) Parametri *Berger*-ovog i *Taylor*-ovog oblika faktora nagomilavanja izlaganja, za energiju zračenja ^{40}K, dobijeni programom SHLDUTIL

E (MeV) ^{40}K	*Berger*		*Taylor*		
	C	*D*	*A*	α_1	α_2
1.460.8	1.04	0.022	70.479	-0.0288	-0.0131

Tabela D.11.a) Ekvivalentna doza organa i tkiva ”ostatka” [*ICRP* (2007)], usled izlaganja γ- zračenju prirodnih radionuklida u standardnoj prostoriji

Organ/Tkivo	Ekvivalentna doza, H_T (nSv h^{-1}/Bq kg^{-1})		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Adrenalne žlezde	0.512	0.632	0.0485
Žučna kesa	0.463	0.573	0.0443
Srce	0.494	0.609	0.0471
Bubrezi	0.547	0.671	0.0520
Mišići	0.589	0.722	0.0556
Pankreas	0.513	0.634	0.0493
Prostata	0.496	0.610	0.0474
Mala creva	0.508	0.626	0.0486
Slezina	0.546	0.669	0.0518
Timus	0.568	0.694	0.0534
Limfatični čvorovi	0.589	0.722	0.0556
Uterus/cerviks	0.483	0.596	0.0463
Ostatak	0.529	0.650	0.0503

Tabela D.11.b) Konverzioni koeficijenti za ekvivalentnu dozu organa i tkiva ”ostatka” [*ICRP* (2007)], usled izlaganja γ- zračenju prirodnih radionuklida u standardnoj prostoriji

Organ/Tkivo	Konverzioni koeficijenti, H_T/K_a (Sv Gy^{-1})		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Adrenalne žlezde	0.676	0.693	0.693
Žučna kesa	0.612	0.628	0.633
Srce	0.653	0.668	0.673
Bubrezi	0.695	0.734	0.743
Mišići	0.778	0.792	0.794
Pankreas	0.678	0.695	0.704
Prostata	0.655	0.669	0.677
Mala creva	0.671	0.686	0.694
Slezina	0.721	0.734	0.740
Timus	0.750	0.761	0.763
Limfatični čvorovi	0.778	0.792	0.794
Uterus/cerviks	0.638	0.654	0.661
Ostatak	0.699	0.713	0.719

Dodatak 2. Kompjuterski programi

Program A. Proračun specifične apsorbovane doze u centru prostorije sa dva građevinska materijala, pomoću tri oblika faktora nagomilavanja za kombinaciju slojeva. Prikazano je izračunavanje q_U za sloj cigle u slučaju kombinacije cigla - keramičke pločice

```
ClearAll[tblU,tblTh,tblK,tbld,de1,de2,a1,a2,b1,b2,c1,c2,g1,g2,d1,d2,a,b,c,a5,b5,c5,A1,B1,C1,B5];

UCigla={{0.047,1.906,0.610,0.128,13.65,-0.0661},{0.053,2.158,0.678,0.108,13.66,-
0.0610},{0.186,2.868,1.492,-0.080,14.35,0.0160},{0.242,2.707,1.535,-
0.088,14.14,0.0191},{0.273,2.634,1.542,-0.089,14.13,0.0201},{0.295,2.588,1.542,-
0.090,14.16,0.0205},{0.352,2.490,1.535,-0.090,14.42,0.0212},{0.395,2.429,1.524,-
0.089,14.58,0.0215},{0.470,2.334,1.500,-0.087,14.54,0.0214},{0.609,2.201,1.456,-
0.082,14.90,0.0235},{0.666,2.162,1.435,-0.080,14.83,0.0229},{0.773,2.102,1.399,-
0.075,14.78,0.0218},{0.806,2.086,1.390,-0.074,14.81,0.0216},{0.934,2.029,1.363,-
0.071,15.41,0.0229},{1.120,1.965,1.320,-0.064,15.64,0.0223},{1.246,1.931,1.290,-
0.059,15.49,0.0207},{1.390,1.897,1.258,-0.053,15.24,0.0186},{1.509,1.230,1.232,-
0.049,15.00,0.0167},{1.661,1.183,1.205,-0.044,15.00,0.0152},{1.760,1.165,1.189,-
0.041,14.94,0.0143},{1.848,1.156,1.175,-0.038,14.85,0.0134},{2.118,1.778,1.139,-
0.031,13.94,0.0107},{2.204,1.767,1.129,-0.029,13.47,0.0097},{2.435,1.740,1.105,-0.023,12.38,0.0071}};

UMiCigla={{0.047`,0.04`,0.52704`,0.9218`,0.0002456`,0.04663`},{0.053`,0.022`,0.43808`,0.7522`,0.0002285`,
0.03705`},{0.186`,0.04`,0.20048`,0.3150`,0.0001508`,0.02633`},{0.242`,0.084`,0.18288`,0.2865`,0.0001376`,0.
02772`},{0.273`,0.059`,0.17504`,0.2742`,0.0001317`,0.02832`},{0.295`,0.207`,0.17024`,0.2665`,0.0001280`,0.
02870`},{0.352`,0.348`,0.15915`,0.2491`,0.0001199`,0.02911`},{0.395`,0.012`,0.15214`,0.2381`,0.0001149`,0.
02947`},{0.47`,0.021`,0.14182`,0.2220`,0.0001071`,0.02964`},{0.609`,0.43`,0.12705`,0.1988`,0.00009595`,0.0
2953`},{0.666`,0.029`,0.12213`,0.1911`,0.00009216`,0.02934`},{0.773`,0.077`,0.11416`,0.1786`,0.00008616`,0
.02895`},{0.806`,0.021`,0.11197`,0.1752`,0.00008454`,0.02887`},{0.934`,0.036`,0.10445`,0.1634`,0.00007883`
,0.02827`},{1.12`,0.156`,0.09554`,0.1495`,0.00007206`,0.02728`},{1.246`,0.083`,0.09054`,0.1417`,0.00006828
`,0.02670`},{1.39`,0.092`,0.08563`,0.1340`,0.00006460`,0.02602`},{1.509`,0.037`,0.0821`,0.1284`,0.00006196`
,0.02564`},{1.661`,0.02`,0.07816`,0.1223`,0.00005890`,0.02494`},{1.76`,0.18`,0.07587`,0.1188`,0.00005713`,0
.02443`},{1.848`,0.027`,0.074`,0.1158`,0.00005568`,0.02411`},{2.118`,0.011`,0.06893`,0.1080`,0.00005178`,0.
02317`},{2.204`,0.062`,0.06754`,0.1058`,0.00005069`,0.02277`},{2.435`,0.024`,0.064176`,0.1006`,0.00004805
`,0.02214`}};
```

```
UmiC={{0.047`,0.1568,0.1565},{0.053`,0.1560,0.1557},{0.186`,0.1232,0.1233},{0.242`,0.1133,0.1134},{0.27
3`,0.1088,0.1089},{0.295`,0.1058,0.1059},{0.352`,0.09916,0.09927},{0.395`,0.09486,0.09497},{0.47`,0.08851,
0.08861},{0.609`,0.07934,0.07943},{0.666`,0.07627,0.07637},{0.773`,0.07131,0.07140},{0.806`,0.06995,0.07
003},{0.934`,0.06525,0.06533},{1.12`,0.05969,0.05977},{1.246`,0.05655,0.05662},{1.39`,0.05342,0.05349},{
1.509`,0.05114,0.05121},{1.661`,0.04857,0.04863},{1.76`,0.04706,0.04712},{1.848`,0.04580,0.04586},{2.118`
,0.04237,0.04242},{2.204`,0.04140,0.04145},{2.435`,0.03905,0.03910}};

UPlocice={{0.047,1.699,0.623,0.117,15.99,-0.0595},{0.053,1.925,0.676,0.101,15.21,-
0.0522},{0.186,2.794,1.432,-0.070,18.03,0.0101},{0.242,2.656,1.487,-
0.080,15.92,0.0136},{0.273,2.589,1.499,-0.082,16.00,0.0153},{0.295,2.546,1.504,-
0.084,16.25,0.0161},{0.352,2.458,1.502,-0.084,16.32,0.0178},{0.395,2.402,1.495,-
0.084,16.35,0.0184},{0.470,2.313,1.479,-0.083,16.31,0.0189},{0.609,2.186,1.440,-
0.080,17.31,0.0224},{0.666,2.144,1.423,-0.077,16.91,0.0220},{0.773,2.081,1.392,-
0.073,16.02,0.0209},{0.806,2.064,1.382,-0.072,15.78,0.0206},{0.934,2.016,1.352,-
0.068,15.79,0.0214},{1.120,1.958,1.309,-0.062,15.42,0.0210},{1.246,1.924,1.282,-
0.058,15.07,0.0198},{1.390,1.891,1.254,-0.053,14.76,0.0182},{1.509,1.229,1.231,-
0.049,14.59,0.0167},{1.661,1.183,1.205,-0.044,14.95,0.0150},{1.760,1.165,1.189,-
0.040,15.16,0.0139},{1.848,1.157,1.176,-0.038,15.32,0.0129},{2.118,1.774,1.141,-
0.030,15.35,0.0097},{2.204,1.763,1.131,-0.027,15.18,0.0086},{2.435,1.736,1.108,-0.022,14.71,0.0058}};

de1 = 20;
tbld = {{0.1},{0.3},{0.5}, {1},{1.5}, {2}};

For [j=3, j<4, j++,
  {
   {de2} = tbld[[j]];

  Dosea=0;
  Doseg=0;
  Dosed=0;

  For [i=1, i<25, i++,
   {

    {En,b1,c1,a1,g1,d1}=UCigla[[i]];
    {En,b2,c2,a2,g2,d2}=UPlocice[[i]];
    {En,Y,mm,mpl,mv,mmm}=UMiCigla[[i]];
    {En,mc1,mc2}=UmiC[[i]];

    Alfa=0;
    alfa=0;
    Gama=0;
    gama=0;
    Delta=0;
    delta=0;

    For[k=1,k<7,k++,
     {

      ClearAll[a,b,c,a5,b5,c5,A1,B1,B5,C1];
      A1=280;
      B1=500;
      C1=400;
      a=(A1/2);
      b=(B1/2);
      c=(C1/2);

      Centar={{a,b,c,B1},{b,a,c,A1},{a,c,b,C1},{c,a,b,A1},{c,b,a,B1},{b,c,a,C1}};
      {a5,b5,c5,B5}=Centar[[k]];
```

```
fa[x_,y_,z_]:=B22[x,y,z]+(B21[x,y,z]-B22[x,y,z])*((((B11[x,y,z]-1)/(B21[x,y,z]-1))*Exp[-
1.7*h[x,y,z]])+(mc1*1.6*mpl/mc2*2.5*mm)*(1-Exp[-h[x,y,z]]));

fg[x_,y_,z_]:=B212[x,y,z];

fd[x_,y_,z_]:=B11[x,y,z]*B22[x,y,z];

B22[x_,y_,z_]:=If[K22[x,y,z]==1,1+(b2-1)*h[x,y,z],1+(b2-1)*(K22[x,y,z]^h[x,y,z]-1)/(K22[x,y,z]-1)];
K22[x_,y_,z_]:=c2*h[x,y,z]^a2+d2*(Tanh[h[x,y,z]/g2-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

B11[x_,y_,z_]:=If[K11[x,y,z]==1,1+(b1-1)*t[x,y,z],1+(b1-1)*(K11[x,y,z]^t[x,y,z]-1)/(K11[x,y,z]-1)];
K11[x_,y_,z_]:=c1*t[x,y,z]^a1+d1*(Tanh[t[x,y,z]/g1-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

B21[x_,y_,z_]:=If[K21[x,y,z]==1,1+(b2-1)*t[x,y,z],1+(b2-1)*(K21[x,y,z]^t[x,y,z]-1)/(K21[x,y,z]-1)];
K21[x_,y_,z_]:=c2*t[x,y,z]^a2+d2*(Tanh[t[x,y,z]/g2-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

B212[x_,y_,z_]:=If[K212[x,y,z]==1,1+(b2-1)*(t[x,y,z]+h[x,y,z]),1+(b2-
1)*(K212[x,y,z]^(t[x,y,z]+h[x,y,z])-1)/(K212[x,y,z]-1)];
K212[x_,y_,z_]:=c2*(t[x,y,z]+h[x,y,z])^a2+d2*(Tanh[(t[x,y,z]+h[x,y,z])/g2-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

t[x_,y_,z_]:=mm*x1[x,y,z];
s[x_,y_,z_]:=mv*x3[x,y,z];
h[x_,y_,z_]:=mpl*x2[x,y,z];

x1[x_,y_,z_]:=x-(c5+de2)/Cos[y];
x2[x_,y_,z_]:=de2/Cos[y];
s[x_,y_,z_]:=mv*x3[x,y,z];
x3[x_,y_,z_]:=c5/Cos[y];

Alfa1=Chop[NIntegrate[4*fa[x,y,z]Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B5-
b5)/a5],ArcTan[b5/a5]},{y,0,ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de1+de2)]},{x,(c5+de2)/Cos[y],(c5+de1+de2)/Cos[y]},Pre
cisionGoal→6]];
alfa1=Chop[NIntegrate[4*fa[x,y,z]Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B5-
b5)/a5],ArcTan[b5/a5]},{y,ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de2)],ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de1+de2)]},{x,a5*Sec[z]/Sin[y]
,(c5+de2)*Sec[y]},PrecisionGoal→6]];

Gama1=Chop[NIntegrate[4*fg[x,y,z]Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B5-
b5)/a5],ArcTan[b5/a5]},{y,0,ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de1+de2)]},{x,(c5+de2)/Cos[y],(c5+de1+de2)/Cos[y]},Pre
cisionGoal→6]];
gama1=Chop[NIntegrate[4*fg[x,y,z]Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B5-
b5)/a5],ArcTan[b5/a5]},{y,ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de2)],ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de1+de2)]},{x,a5*Sec[z]/Sin[y]
,(c5+de2)*Sec[y]},PrecisionGoal→6]];

Delta1=Chop[NIntegrate[4*fd[x,y,z]Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B5-
b5)/a5],ArcTan[b5/a5]},{y,0,ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de1+de2)]},{x,(c5+de2)/Cos[y],(c5+de1+de2)/Cos[y]},Pre
cisionGoal→6]];
delta1=Chop[NIntegrate[4*fd[x,y,z]Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B5-
b5)/a5],ArcTan[b5/a5]},{y,ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de2)],ArcTan[a5*Sec[z]/(c5+de1+de2)]},{x,a5*Sec[z]/Sin[y]
,(c5+de2)*Sec[y]},PrecisionGoal→6]];

Alfa=Alfa1+Alfa;
alfa=alfa1+alfa;
Gama=Gama1+Gama;
gama=gama1+gama;
Delta=Delta1+Delta;
delta=delta1+delta;
}
];
Dosea1=0.734672*10^2*En*mmm*Y*(Alfa+alfa);
Dosea=Dosea+Dosea1;
```

```
    Doseg1=0.734672*10^2*En*mmm*Y*(Gama+gama);
    Doseg=Doseg+Doseg1;
    Dosed1=0.734672*10^2*En*mmm*Y*(Delta+delta);
    Dosed=Dosed+Dosed1;
    }
   ];
  Print [de2," ", Dosea," ",Doseg," ",Dosed];
  }
 ];
```

Program B. Određivanje faktora nagomilavanja i doze radionuklida, ^{238}U, za tačkasti izvor u betonu

```
tblUHarima={{0.047`,1.644`,0.592`,0.129`,15.76`,-0.068`},{0.053`,1.858`,0.638`,0.116`,14.58`,-
0.0597`},{0.186`,2.75`,1.406`,-0.066`,15.98`,0.0073`},{0.242`,2.629`,1.471`,-
0.077`,18.69`,0.0146`},{0.273`,2.57`,1.486`,-0.081`,17.81`,0.0158`},{0.295`,2.531`,1.491`,-
0.082`,16.84`,0.0161`},{0.352`,2.438`,1.498`,-0.084`,16.13`,0.0182`},{0.395`,2.378`,1.495`,-
0.085`,15.97`,0.0193`},{0.47`,2.298`,1.476`,-0.083`,16.1`,0.0196`},{0.609`,2.186`,1.431`,-
0.078`,17.06`,0.0199`},{0.666`,2.147`,1.414`,-0.076`,17.22`,0.0202`},{0.773`,2.081`,1.392`,-
0.074`,15.33`,0.0202`},{0.806`,2.063`,1.385`,-0.073`,15.01`,0.0202`},{0.934`,2.007`,1.349`,-
0.068`,15.19`,0.0197`},{1.12`,1.943`,1.301`,-0.06`,15.88`,0.0185`},{1.246`,1.909`,1.27`,-
0.055`,16.55`,0.0176`},{1.39`,1.871`,1.247`,-0.051`,16.37`,0.0169`},{1.509`,1.846`,1.225`,-
0.047`,16.41`,0.0159`},{1.661`,1.819`,1.2`,-0.042`,16.35`,0.0145`},{1.76`,1.806`,1.186`,-
0.04`,15.44`,0.0129`},{1.848`,1.794`,1.174`,-0.037`,15.06`,0.0119`},{2.118`,1.762`,1.14`,-
0.03`,13.77`,0.0085`},{2.204`,1.752`,1.12`,-0.028`,13.33`,0.0075`},{2.435`,1.725`,1.105`,-
0.022`,12.04`,0.0052`}};

tblUmi={{0.047`,0.04`,0.9577`,0.0002456`,0.04663`},{0.053`,0.022`,0.7759`,0.0002285`,0.03705`},{0.186`,0.0
4`,0.3023`,0.0001508`,0.02633`},{0.242`,0.084`,0.2730`,0.0001376`,0.02772`},{0.273`,0.059`,0.2607`,0.00013
17`,0.02832`},{0.295`,0.207`,0.2531`,0.0001280`,0.02870`},{0.352`,0.348`,0.2365`,0.0001199`,0.02911`},{0.3
95`,0.012`,0.2262`,0.0001149`,0.02947`},{0.47`,0.021`,0.2105`,0.0001071`,0.02964`},{0.609`,0.43`,0.1884`,0.0
0009595`,0.02953`},{0.666`,0.029`,0.1809`,0.00009216`,0.02934`},{0.773`,0.077`,0.1692`,0.00008616`,0.0289
5`},{0.806`,0.021`,0.1660`,0.00008454`,0.02887`},{0.934`,0.036`,0.1547`,0.00007883`,0.02827`},{1.12`,0.156`
,0.1414`,0.00007206`,0.02728`},{1.246`,0.083`,0.1340`,0.00006828`,0.02670`},{1.39`,0.092`,0.1268`,0.000064
60`,0.02602`},{1.509`,0.037`,0.1216`,0.00006196`,0.02564`},{1.661`,0.02`,0.1158`,0.00005890`,0.02494`},{1.
76`,0.18`,0.1124`,0.00005713`,0.02443`},{1.848`,0.027`,0.1096`,0.00005568`,0.02411`},{2.118`,0.011`,0.1023`
,0.00005178`,0.02317`},{2.204`,0.062`,0.1002`,0.00005069`,0.02277`},{2.435`,0.024`,0.09530`,0.00004805`,0.
02214`}};

ClearAll[tblU,tblTh,tblK,Alfi,Gafi];

Alfi={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Gafi={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null
,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Alfi1={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Gafi1={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Alfi2={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Gafi2={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
```

```
tblx1 ={{0.5},{0.7},{1},{1.5},{2},{2.5},{3},{4},{5},{6},
{7},{8},{9} ,{10},{12},{15},{17},{20},{25},{30},{35},{40},{45},{50},{60},{70},{80},{90},{100},{110},{1
20},{130},{140},{150}};
tblx2 =
{{10},{15},{20},{25},{30},{35},{40},{45},{50},{60},{70},{80},{90},{100},{120},{140},{160},{180},{200}
,{220},{240},{260},{280},{300},{320},{340},{360},{380},{400},{420},{440},{460},{480},{500},{550},{60
0}};


For[k=1,k<37,k++,
  {
   {x2}=tblx2[[k]];

   For [j=1, j<35, j++,
    {
      {x1} = tblx1[[j]];

     Jedan=0;
     Dva=0;
     Tri=0;
     Cetiri=0;

     For [i=1,i<25, i++,
      {
       {En,b,c,a,g,d}=tblUHarima[[i]];
       {En,Y,mm,mv,mmm}=tblUmi[[i]];

       f[x1_,x2_]:=If[K[x1,x2]==1,1+(b-1)*t[x1,x2],1+(b-1)*(K[x1,x2]^t[x1,x2]-1)/(K[x1,x2]-1)];
       K[x1_,x2_]:=If[t[x1,x2]≤40,c*t[x1,x2]^a+d*(Tanh[t[x1,x2]/g-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]),KS[x1,x2]];

       KS[x1_,x2_]:=If[0≤((K40[x1,x2]-1)/(K35[x1,x2]-1))≤1,1+(K35[x1,x2]-1)*((K40[x1,x2]-1)/(K35[x1,x2]-
1))^(si[x1,x2]),K35[x1,x2]*(K40[x1,x2]/K35[x1,x2])^((si[x1,x2])^fim)];
       si[x1_,x2_]:=(((t[x1,x2]/35)^0.1)-1)/(((40/35)^0.1)-1);
       fim=0.8;
       K35[x1_,x2_]:=c*35^a+d*(Tanh[35/(g-2)]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);
       K40[x1_,x2_]:=c*40^a+d*(Tanh[40/(g-2)]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

       t[x1_,x2_]:=mm*x1;
       s[x2_]:=mv*x2;

       f1[x1_,x2_]:=f[x1,x2]*Y*En*mmm*Exp[-t[x1,x2]]*Exp[-s[x2]];
       f2[x1_,x2_]:=Y*En*mmm*Exp[-t[x1,x2]]*Exp[-s[x2]];

       Jedan1=f1[x1,x2];
       Dva1=f2[x1,x2];
       Jedan=Jedan+Jedan1;
       Dva=Dva+Dva1;

       f3[x1_,x2_]:=f[x1,x2]*Y*En*mmm*Exp[-t[x1,x2]];
       f4[x1_,x2_]:=Y*En*mmm*Exp[-t[x1,x2]];

       Tri1=f3[x1,x2];
       Cetiri1=f4[x1,x2];
       Tri=Tri+Tri1;
       Cetiri=Cetiri+Cetiri1;
       }
      ];
     BU=Tri/Cetiri;
     tblBU={x1,BU};
```

```
    tblU={x1,x2,Log[Jedan]};
    tbl2U={x1,x2,Log[Dva]};

    Alfi[[j]]=tblU;
    Alfi1[[j]]=tblBU;
    Alfi2[[j]]=tbl2U;
    }
   ];
  Gafi[[k]]={Alfi};
  Gafi1[[k]]={Alfi1};
  Gafi2[[k]]={Alfi2};
  }
 ];
Print[Gafi];
Print[Gafi1];
Print[Gafi2];
```

Program C. Fitovanje logaritma specifične jačine apsorbovane doze tačkastog izvora ^{238}U u cigli

```
DoseU={{0.5`,10,-3.1029452255815984`},{1,10,-3.1151750632543953`},{2,10,-3.141298111117088`},{3,10,-
3.170690985721678`},{4,10,-3.2035733028467823`},{5,10,-3.2398359915161006`},{6,10,-
3.2792651313873598`},{7,10,-3.321612854034255`},{8,10,-3.366626810904074`},{9,10,-
3.4140637029402185`},{10,10,-3.4636954414830816`},{11,10,-3.5153115707974765`},{12,10,-
3.5687197242519355`},{13,10,-3.62374505286399`},{14,10,-3.6802291451813236`},{15,10,-
3.7380287301311363`},{16,10,-3.7970143259716838`},{17,10,-3.857068924174083`},{18,10,-
3.9180867537174735`},{20,10,-4.042638506687277`},{22,10,-4.170007677486333`},{25,10,-
4.365180688167943`},{27,10,-4.497417257132744`},{30,10,-4.698107581698721`},{32,10,-
4.833067867830336`},{35,10,-5.036727625032741`},{37,10,-5.173068516086362`},{40,10,-
5.378098304340914`},{42,10,-5.514977138621278`},{45,10,-5.720376825577416`},{50,10,-
6.062423318257158`},{55,10,-6.403550443675225`},{60,10,-6.743362207394848`},{70,10,-
7.418320283191665`},{80,10,-8.086791508886988`},{90,10,-8.74907852800823`},{100,10,-
9.405762887925416`},{110,10,-10.057493544301886`},{120,10,-10.704906854927758`},{130,10,-
11.348598819983435`},{140,10,-11.989116887997612`},{150,10,-12.62695841389667`},{0.5`,12,-
3.1031037519087663`},{1,12,-3.11533407085463`},{2,12,-3.1414578866041367`},{3,12,-
3.170851312114731`},{4,12,-3.2037339998881595`},{5,12,-3.2399969030849034`},{6,12,-
3.279426119828063`},{7,12,-3.321773797485007`},{8,12,-3.3667876016819918`},{9,12,-
3.4142242462517496`},{10,12,-3.4638556542291092`},{11,12,-3.515471380425758`},{12,12,-
3.568879067665105`},{13,12,-3.623903875400653`},{14,12,-3.680387399682812`},{15,12,-
3.7381863760991134`},{16,12,-3.7971713288157414`},{17,12,-3.8572252545444807`},{18,12,-
3.9182423869159706`},{20,12,-4.042792687519909`},{22,12,-4.1701603511267775`},{25,12,-
4.365331045434721`},{27,12,-4.4975660575066`},{30,12,-4.698254059369203`},{32,12,-
4.833212819269094`},{35,12,-5.0368703380666`},{37,12,-5.173209778248438`},{40,12,-
5.37823746124208`},{42,12,-5.515114942823099`},{45,12,-5.720512680450851`},{50,12,-
6.062556140707539`},{55,12,-6.4036805003106085`},{60,12,-6.743489751112137`},{70,12,-
7.418443480692643`},{80,12,-8.08691112465095`},{90,12,-8.749195171671847`},{100,12,-
9.40587704375397`},{110,12,-10.057605600179276`},{120,12,-10.705017125809837`},{130,12,-
11.348707565406269`},{140,12,-11.989224324686575`},{150,12,-12.627064724740519`},{0.5`,15,-
3.1033415362837173`},{1,15,-3.1155725771272453`},{2,15,-3.1416975447351767`},{3,15,-
3.171091796654678`},{4,15,-3.203975040452108`},{5,15,-3.240238265488517`},{6,15,-
3.2796675975852727`},{7,15,-3.3220152078016305`},{8,15,-3.3670287830336614`},{9,15,-
3.4144650564491115`},{10,15,-3.4640959686251285`},{11,15,-3.515711090194088`},{12,15,-
3.569118078161883`},{13,15,-3.624142104636004`},{14,15,-3.680624776920892`},{15,15,-
3.738422840594462`},{16,15,-3.797406828684645`},{17,15,-3.8574597457640687`},{18,15,-
3.9184758324404485`},{20,15,-4.043023954625104`},{22,15,-4.1703893575774815`},{25,15,-
4.365556577530932`},{27,15,-4.497789254402664`},{30,15,-4.698473772419411`},{32,15,-
```

4.833430243110128`},{35,15,-5.037084404504423`},{37,15,-5.173421668511428`},{40,15,-
5.3784461938067825`},{42,15,-5.515321646462791`},{45,15,-5.720716460276133`},{50,15,-
6.062755372172782`},{55,15,-6.4038755832989604`},{60,15,-6.743681064940583`},{70,15,-
7.41862827555382`},{80,15,-8.087090547178203`},{90,15,-8.749370136255443`},{100,15,-
9.406048276744382`},{110,15,-10.057773683367873`},{120,15,-10.705182531605182`},{130,15,-
11.348870683093713`},{140,15,-11.989385479339916`},{150,15,-12.627224190681769`},{0.5`,17,-
3.1035000557900676`},{1,17,-3.115731577890741`},{2,17,-3.1418573134230665`},{3,17,-
3.171252116315083`},{4,17,-3.2041357308295058`},{5,17,-3.240399170458028`},{6,17,-
3.279828579487667`},{7,17,-3.3221761447731875`},{8,17,-3.367189567391441`},{9,17,-
3.4146255934008654`},{10,17,-3.464256175073927`},{11,17,-3.515870893590378`},{12,17,-
3.5692774154112143`},{13,17,-3.6243009210799384`},{14,17,-3.6807830254036387`},{15,17,-
3.738580480620411`},{16,17,-3.7975638256659203`},{17,17,-3.8576160703532487`},{18,17,-
3.9186314599413836`},{20,17,-4.043178129932859`},{22,17,-4.170542025871436`},{25,17,-
4.3657069297258895`},{27,17,-4.497938049890349`},{30,17,-4.6986202454826556`},{32,17,-
4.833575190126197`},{35,17,-5.037227113387772`},{37,17,-5.173562926700112`},{40,17,-
5.378585346991989`},{42,17,-5.515459447113987`},{45,17,-5.7208523118365`},{50,17,-
6.062888191676138`},{55,17,-6.40400563731478`},{60,17,-6.74380860632795`},{70,17,-
7.418751471201125`},{80,17,-8.087210161450615`},{90,17,-8.749486778703314`},{100,17,-
9.406162431569733`},{110,17,-10.05788573840863`},{120,17,-10.705292801783578`},{130,17,-
11.348979427920813`},{140,17,-11.989492915522083`},{150,17,-12.627330501092924`},{0.5`,20,-
3.1037378299345986`},{1,20,-3.1159700739090295`},{2,20,-3.142096961356072`},{3,20,-
3.171492590756688`},{4,20,-3.204376761398052`},{5,20,-3.240640522963226`},{6,20,-
3.280070047437899`},{7,20,-3.322417545371481`},{8,20,-3.367430739113351`},{9,20,-
3.4148663940589974`},{10,20,-3.4644964800245313`},{11,20,-3.5161105940111432`},{12,20,-
3.5695164166626525`},{13,20,-3.6245391411766104`},{14,20,-3.6810203936140193`},{15,20,-
3.7388169362031287`},{16,20,-3.7977993167410613`},{17,20,-3.8578505529014193`},{18,20,-
3.918864896919928`},{20,20,-4.043409388751147`},{22,20,-4.170771024302809`},{25,20,-
4.365932454214764`},{27,20,-4.498161239457546`},{30,20,-4.698839951622385`},{32,20,-
4.833792607333566`},{35,20,-5.037441173600183`},{37,20,-5.173774811003354`},{40,20,-
5.378794073983075`},{42,20,-5.51566614542805`},{45,20,-5.721056086692468`},{50,20,-
6.063087418721103`},{55,20,-6.404200716374011`},{60,20,-6.743999916661708`},{70,20,-
7.418936263281938`},{80,20,-8.087389581740656`},{90,20,-8.749661741463374`},{100,20,-
9.406333663055403`},{110,20,-10.058053820342332`},{120,20,-10.705458206523438`},{130,20,-
11.349142544714693`},{140,20,-11.98965406941526`},{150,20,-12.627489966385152`},{0.5`,22,-
3.1038963426212076`},{1,22,-3.1161290678368276`},{2,22,-3.1422567232457412`},{3,22,-
3.1716529036852843`},{4,22,-3.2045374451122264`},{5,22,-3.240801421334141`},{6,22,-
3.2802310228026346`},{7,22,-3.3225784758644608`},{8,22,-3.3675915170515895`},{9,22,-
3.4150269246515546`},{10,22,-3.464656680176671`},{11,22,-3.516270391176004`},{12,22,-
3.569675747748702`},{13,22,-3.624697951528369`},{14,22,-3.6811786360785748`},{15,22,-
3.7389745702875983`},{16,22,-3.797956307860102`},{17,22,-3.858006871709928`},{18,22,-
3.9190205187238463`},{20,22,-4.043563558534569`},{22,22,-4.170923687250811`},{25,22,-
4.366082801338429`},{27,22,-4.498310030059579`},{30,22,-4.698986420078897`},{32,22,-
4.833937549927438`},{35,22,-5.0375838783334945`},{37,22,-5.1739160652191`},{40,22,-
5.378933223452751`},{42,22,-5.515803942529033 5`},{45,22,-5.721191934940153`},{50,22,-
6.063220235277778`},{55,22,-6.404330767770569`},{60,22,-6.744127455719413`},{70,22,-
7.419059457075764`},{80,22,-8.087509194521664`},{90,22,-8.74977838269561`},{100,22,-
9.406447816877632`},{110,22,-10.058165874546521`},{120,22,-10.705568475998204`},{130,22,-
11.349251288946105`},{140,22,-11.989761505090668`},{150,22,-12.627596276363642`},{0.5`,25,-
3.1041341065369337`},{1,25,-3.1163675536023514`},{2,25,-3.14249636098212`},{3,25,-
3.171893368029804`},{4,25,-3.2047784656865055`},{5,25,-3.2410427639419663`},{6,25,-
3.2804724809468673`},{7,25,-3.3228198667453532`},{8,25,-3.3678326791446334`},{9,25,-
3.4152677157713267`},{10,25,-3.4648969756827133`},{11,25,-3.5165100822500466`},{12,25,-
3.569914739755636`},{13,25,-3.6249361624871925`},{14,25,-3.6814159952620815`},{15,25,-
3.7392110169585084`},{16,25,-3.798191790142303`},{17,25,-3.858241345587501`},{18,25,-
3.919253947157275`},{20,25,-4.043794809066762`},{22,25,-4.171152677663659`},{25,25,-
4.366308318220762`},{27,25,-4.498533212298689`},{30,25,-4.699206119308905`},{32,25,-
4.8341549605018805`},{35,25,-5.037797932321202`},{37,25,-5.174127943563277`},{40,25,-
5.3791419448708675`},{42,25,-5.516010635518087`},{45,25,-5.72139570482739`},{50,25,-
6.0634194579029765`},{55,25,-6.404525842901129`},{60,25,-6.744318762558873`},{70,25,-
7.419244246376506`},{80,25,-8.087688612574707`},{90,25,-8.7499533436323`},{100,25,-

9.406619046858687`},{110,25,-10.05833395522542`},{120,25,-10.705733879682658`},{130,25,-
11.349414404846483`},{140,25,-11.989922658223728`},{150,25,-12.627755741006892`},{0.5`,30,-
3.1045303660934134`},{1,30,-3.116765016209814`},{2,30,-3.142895743615666`},{3,30,-
3.1722941284761204`},{4,30,-3.205180153319361`},{5,30,-3.2414449884264767`},{6,30,-
3.2808748981138023`},{7,30,-3.323222171924794`},{8,30,-3.368234603129`},{9,30,-
3.4156690215875525`},{10,30,-3.4652974556010987`},{11,30,-3.5169095549122034`},{12,30,-
3.570313047442225`},{13,30,-3.6253331685691323`},{14,30,-3.6818115818664547`},{15,30,-
3.7396050828619734`},{16,30,-3.798584248889738`},{17,30,-3.8586321238236785`},{18,30,-
3.9196429831538526`},{20,30,-4.044180215573306`},{22,30,-4.1715343176613775`},{25,30,-
4.366684169550246`},{27,30,-4.498905172927395`},{30,30,-4.699572275480232`},{32,30,-
4.834517302616303`},{35,30,-5.038154680668655`},{37,30,-5.174481066192337`},{40,30,-
5.379489806471235`},{42,30,-5.516355116733936`},{45,30,-5.7217353146818635`},{50,30,-
6.063751489719261`},{55,30,-6.404850962881062`},{60,30,-6.744637602632731`},{70,30,-
7.419552224838011`},{80,30,-8.087987639680723`},{90,30,-8.75024494276249`},{100,30,-
9.406904428154444`},{110,30,-10.058614088017306`},{120,30,-10.706009551082971`},{130,30,-
11.349686263489186`},{140,30,-11.99019124576541`},{150,30,-12.628021514547063`},{0.5`,32,-
3.104688865143768`},{1,32,-3.1169239964693416`},{2,32,-3.1430554919117095`},{3,32,-
3.1724544279436127`},{4,32,-3.2053408237093595`},{5,32,-3.241605873602286`},{6,32,-
3.2810358604051713`},{7,32,-3.323383089462476`},{8,32,-3.3683953682299435`},{9,32,-
3.4158295394634584`},{10,32,-3.465457643161628`},{11,32,-3.517069339615891`},{12,32,-
3.5704723662033815`},{13,32,-3.625491966738198`},{14,32,-3.68196981229628`},{15,32,-
3.739762705065131`},{16,32,-3.7987412282859534`},{17,32,-3.8587884310724827`},{18,32,-
3.9197985935653734`},{20,32,-4.044334374309686`},{22,32,-4.171686969919089`},{25,32,-
4.366834506532913`},{27,32,-4.499053953759686`},{30,32,-4.699718734724792`},{32,32,-
4.834662236367257`},{35,32,-5.0382973771033015`},{37,32,-5.174622312463574`},{40,32,-
5.379628948511145`},{42,32,-5.516492906735735`},{45,32,-5.721871156305344`},{50,32,-
6.0638843003836005`},{55,32,-6.404981009039991`},{60,32,-6.744765137031894`},{70,32,-
7.4196754149254645`},{80,32,-8.08810724947936`},{90,32,-8.750361581563782`},{100,32,-
9.407018579970686`},{110,32,-10.05872614054856`},{120,32,-10.706119819150633`},{130,32,-
11.349795006529346`},{140,32,-11.9902986804274`},{150,32,-12.628127823660305`},{0.5`,35,-
3.1049266086067266`},{1,35,-3.117162461734021`},{2,35,-3.1432951092590553`},{3,35,-
3.1726948720977326`},{4,35,-3.2055818242985104`},{5,35,-3.2418471964184956`},{6,35,-
3.281277298940331`},{7,35,-3.32362446091135`},{8,35,-3.368636511067939`},{9,35,-
3.4160703115091238`},{10,35,-3.46569791978111`},{11,35,-3.5173090119990174`},{12,35,-
3.570711339723811`},{13,35,-3.6257301594238136`},{14,35,-3.6822071534285175`},{15,35,-
3.7399991339148966`},{16,35,-3.7989766929847364`},{17,35,-3.8590228876113195`},{18,35,-
3.920032004911023`},{20,35,-4.044565608272131`},{22,35,-4.171915944297309`},{25,35,-
4.3670600082045405`},{27,35,-4.499277121344965`},{30,35,-4.699938420137629`},{32,35,-
4.834879633678062`},{35,35,-5.038511418643721`},{37,35,-5.174834178891672`},{40,35,-
5.379837658785255`},{42,35,-5.51669958907663`},{45,35,-5.722074916256855`},{50,35,-
6.06408351417081`},{55,35,-6.405176076314561`},{60,35,-6.7449564368839345`},{70,35,-
7.419860198666941`},{80,35,-8.088286663059066`},{90,35,-8.750536538854222`},{100,35,-
9.407189806942883`},{110,35,-10.058894218718152`},{120,35,-10.706285220724508`},{130,35,-
11.349958120642908`},{140,35,-11.99045983204039`},{150,35,-12.628287287005733`},{0.5`,40,-
3.1053228340795633`},{1,40,-3.1175598901775716`},{2,40,-3.1436944579146315`},{3,40,-
3.1730955988967335`},{4,40,-3.2059834786258454`},{5,40,-3.2422493879197622`},{6,40,-
3.2816796834280813`},{7,40,-3.324026733706569`},{8,40,-3.3690384029629437`},{9,40,-
3.4164715855374923`},{10,40,-3.4660983682241717`},{11,40,-3.5177084535118937`},{12,40,-
3.5711096166017864`},{13,40,-3.6261271350526187`},{14,40,-3.6826027099496454`},{15,40,-
3.7403931701186504`},{16,40,-3.799369122428667`},{17,40,-3.8594136369517886`},{18,40,-
3.9204210124301504`},{20,40,-4.044950987164596`},{22,40,-4.1722975575728`},{25,40,-
4.367435834184966`},{27,40,-4.499649057552702`},{30,40,-4.700304553282358`},{32,40,-
4.83524195368839`},{35,40,-5.038868146247576`},{37,40,-5.175187281662419`},{40,40,-
5.380185501814004`},{42,40,-5.517044052547202`},{45,40,-5.722414509553333`},{50,40,-
6.06441553125848`},{55,40,-6.405501183202375`},{60,40,-6.745275265313135`},{70,40,-
7.420168167863782`},{80,40,-8.0885856827101`},{90,40,-8.750828131907769`},{100,40,-
9.407475183224216`},{110,40,-10.059174347328119`},{120,40,-10.706560888607399`},{130,40,-
11.350229976307757`},{140,40,-11.990728417048755`},{150,40,-12.628553058382975`},{0.5`,45,-
3.105719042514611`},{1,45,-3.1179573015430693`},{2,45,-3.1440937895847396`},{3,45,-
3.1734963088752184`},{4,45,-3.2063851163032564`},{5,45,-3.2426515629320147`},{6,45,-

3.2820820515786804`},{7,45,-3.3244289903119975`},{8,45,-3.3694402788155027`},{9,45,-
3.416872843674109`},{10,45,-3.4664988009317077`},{11,45,-3.518107879452238`},{12,45,-
3.5715078780775427`},{13,45,-3.6265240954569316`},{14,45,-3.6829982514312167`},{15,45,-
3.7407871914746074`},{16,45,-3.7997615372228983`},{17,45,-3.8598043718464528`},{18,45,-
3.920810005712597`},{20,45,-4.045336352252056`},{22,45,-4.172679157489195`},{25,45,-
4.367811647492846`},{27,45,-4.500020981551906`},{30,45,-4.7006706749156795`},{32,45,-
4.835604262648518`},{35,45,-5.039224863481398`},{37,45,-5.175540374505719`},{40,45,-
5.380533335558557`},{42,45,-5.517388507146684`},{45,45,-5.722754094572262`},{50,45,-
6.064747540983128`},{55,45,-6.405826283545256`},{60,45,-6.745594087920985`},{70,45,-
7.420476132429023`},{80,45,-8.088884698634187`},{90,45,-8.751119721923402`},{100,45,-
9.40776055699865`},{110,45,-10.059454473847376`},{120,45,-10.706836554731776`},{130,45,-
11.350501830483836`},{140,45,-11.990997000790593`},{150,45,-12.628818828678861`},{0.5`,50,-
3.106115233914558`},{1,50,-3.118354695833114`},{2,50,-3.144493104271722`},{3,50,-
3.1738970020352806`},{4,50,-3.206786737332636`},{5,50,-3.2430537214569917`},{6,50,-
3.2824844033937546`},{7,50,-3.324831230729183`},{8,50,-3.369842138627108`},{9,50,-
3.4172740859204254`},{10,50,-3.466899217905141`},{11,50,-3.518507289821454`},{12,50,-
3.5719061241524726`},{13,50,-3.6269210406381354`},{14,50,-3.683393777874607`},{15,50,-
3.7411811979841407`},{16,50,-3.8001539373688002`},{17,50,-3.860195092296678`},{18,50,-
3.921198984759726`},{20,50,-4.045721703535865`},{22,50,-4.173060744047837`},{25,50,-
4.3681874481295`},{27,50,-4.500392893343877`},{30,50,-4.701036785038856`},{32,50,-
4.835966560559674`},{35,50,-5.039581570346365`},{37,50,-5.175893457422708`},{40,50,-
5.380881160019991`},{42,50,-5.517732952876109`},{45,50,-5.72309367131461`},{50,50,-
6.065079543345609`},{55,50,-6.40615137734395`},{60,50,-6.745912904708136`},{70,50,-
7.420784092363149`},{80,50,-8.089183710831692`},{90,50,-8.751411308901398`},{100,50,-
9.408045928266398`},{110,50,-10.059734598276084`},{120,50,-10.707112219097766`},{130,50,-
11.350773683171251`},{140,50,-11.991265583265989`},{150,50,-12.629084597893463`},{0.5`,60,-
3.106907565619896`},{1,60,-3.119149433197241`},{2,60,-3.145291682705685`},{3,60,-
3.174698337908509`},{4,60,-3.2075899294548638`},{5,60,-3.2438579890520716`},{6,60,-
3.283289058023836`},{7,60,-3.3256356630050132`},{8,60,-3.3706458101334187`},{9,60,-
3.418076522747963`},{10,60,-3.467700004655398`},{11,60,-3.519306063852125`},{12,60,-
3.5727025701054216`},{13,60,-3.627714885336748`},{14,60,-3.684184785652358`},{15,60,-
3.7419691664694255`},{16,60,-3.800938693721093`},{17,60,-3.860976489869277`},{18,60,-
3.921976900153484`},{20,60,-4.046492364697955`},{22,60,-4.173823877097252`},{25,60,-
4.368939011394424`},{27,60,-4.501136680311328`},{30,60,-4.701768970759821`},{32,60,-
4.836691123239997`},{35,60,-5.040294952974439`},{37,60,-5.176599593482309`},{40,60,-
5.381576781097802`},{42,60,-5.5184218177289175`},{45,60,-5.723772799973422`},{50,60,-
6.065743525987491`},{55,60,-6.406801545311784`},{60,60,-6.746550520822946`},{70,60,-
7.42139999834001`},{80,60,-8.08978172404841`},{90,60,-8.751994473745572`},{100,60,-
9.408616663282666`},{110,60,-10.060294840862506`},{120,60,-10.707663542555112`},{130,60,-
11.35131738408051`},{140,60,-11.991802744417802`},{150,60,-12.6296161330791`},{0.5`,70,-
3.107699829217065`},{1,70,-3.119944102290745`},{2,70,-3.1460901932352607`},{3,70,-
3.1754996065331644`},{4,70,-3.2083930550076563`},{5,70,-3.244662190718909`},{6,70,-
3.2840936473313413`},{7,70,-3.326440030546438`},{8,70,-3.3714494174938046`},{9,70,-
3.4188788960317167`},{10,70,-3.4685007284863367`},{11,70,-3.52010477561515`},{12,70,-
3.573498954471772`},{13,70,-3.628508669159526`},{14,70,-3.684975733293916`},{15,70,-
3.7427570755854895`},{16,70,-3.8017233914965005`},{17,70,-3.8617578296805153`},{18,70,-
3.92275475862233`},{20,70,-4.0472629706617145`},{22,70,-4.174586956731806`},{25,70,-
4.369690523990315`},{27,70,-4.501880418465465`},{30,70,-4.702501110455345`},{32,70,-
4.837415641739203`},{35,70,-5.041008294141215`},{37,70,-5.177305689850326`},{40,70,-
5.3822723650560444`},{42,70,-5.5191106471138855`},{45,70,-5.724451895537499`},{50,70,-
6.066407479190969`},{55,70,-6.40745168711187`},{60,70,-6.747188113662779`},{70,70,-
7.422015885798258`},{80,70,-8.090379722363155`},{90,70,-8.75257762644248`},{100,70,-
9.4091873882747`},{110,70,-10.060855075088698`},{120,70,-10.708214858980481`},{130,70,-
11.351861079036379`},{140,70,-11.992339900504886`},{150,70,-12.63014766394046`},{0.5`,80,-
3.108492024727542`},{1,80,-3.1207387031344074`},{2,80,-3.1468886358791806`},{3,80,-
3.176300807925987`},{4,80,-3.2091961140061387`},{5,80,-3.2454663264714103`},{6,80,-
3.284898171329288`},{7,80,-3.3272443333658366`},{8,80,-3.3722529607201936`},{9,80,-
3.4196812057833017`},{10,80,-3.4693013894093507`},{11,80,-3.5209034251217712`},{12,80,-
3.5742952772626655`},{13,80,-3.6293023921175394`},{14,80,-3.6857666208103033`},{15,80,-
3.743544925343317`},{16,80,-3.8025080307059804`},{17,80,-3.8625391117413264`},{18,80,-

3.9235325601771724`},{20,80,-4.048033521437989`},{22,80,-4.175349982962261`},{25,80,-
4.37044198592775`},{27,80,-4.502624107816696`},{30,80,-4.703233204135521`},{32,80,-
4.838140116067132`},{35,80,-5.041721593856108`},{37,80,-5.178011746535861`},{40,80,-
5.382967911903321`},{42,80,-5.519799441039273`},{45,80,-5.725130958014566`},{50,80,-
6.067071402962884`},{55,80,-6.408101802750202`},{60,80,-6.747825683232848`},{70,80,-
7.422631754741788`},{80,80,-8.090977705778835`},{90,80,-8.753160766994311`},{100,80,-
9.409758103244178`},{110,80,-10.06141530095597`},{120,80,-10.708766168374913`},{130,80,-
11.352404768039698`},{140,80,-11.992877051527934`},{150,80,-12.63067919047812`},{0.5`,90,-
3.1092841521727914`},{1,90,-3.1215332357489993`},{2,90,-3.1476870106561723`},{3,90,-
3.1771019421037114`},{4,90,-3.209999106465434`},{5,90,-3.24627039632348`},{6,90,-
3.2857026300306917`},{7,90,-3.3280485714755894`},{8,90,-3.3730564398245177`},{9,90,-
3.420483452014333`},{10,90,-3.4701019874358385`},{11,90,-3.5217020123832365`},{12,90,-
3.5750915384892434`},{13,90,-3.6300960542218594`},{14,90,-3.6865574482125414`},{15,90,-
3.7443327157538953`},{16,90,-3.8032926113604906`},{17,90,-3.8633203360626434`},{18,90,-
3.924310304828918`},{20,90,-4.048804017037626`},{22,90,-4.17611295579938`},{25,90,-
4.3711933972173025`},{27,90,-4.503367748375427`},{30,90,-4.7039652518104385`},{32,90,-
4.8388645462336255`},{35,90,-5.042434852128531`},{37,90,-5.1787177635480175`},{40,90,-
5.383663421648234`},{42,90,-5.520488199513332`},{45,90,-5.725809987412349`},{50,90,-
6.067735297310076`},{55,90,-6.408751892232773`},{60,90,-6.748463229538362`},{70,90,-
7.4232476051744944`},{80,90,-8.091575674298356`},{90,90,-8.753743895403252`},{100,90,-
9.410328808192773`},{110,90,-10.061975518465628`},{120,90,-10.709317470739451`},{130,90,-
11.352948451091311`},{140,90,-11.993414197487638`},{150,90,-12.631210712692646`},{0.5`,100,-
3.110076211574269`},{1,100,-3.122327700155283`},{2,100,-3.148485317584952`},{3,100,-
3.177903009083069`},{4,100,-3.2108020324006623`},{5,100,-3.2470744002890224`},{6,100,-
3.2865070234485683`},{7,100,-3.3288527448880774`},{8,100,-3.373859854818707`},{9,100,-
3.421285634736428`},{10,100,-3.4709025225771977`},{11,100,-3.522500537410793`},{12,100,-
3.5758877381626517`},{13,100,-3.6308896554835597`},{14,100,-3.687348215511655`},{15,100,-
3.7451204468282118`},{16,100,-3.80407713347099`},{17,100,-3.8641015026553993`},{18,100,-
3.925087992588475`},{20,100,-4.049574457471474`},{22,100,-4.176875875253925`},{25,100,-
4.37194475786955`},{27,100,-4.504111340152068`},{30,100,-4.704697253490189`},{32,100,-
4.839588932248522`},{35,100,-5.043148068967898`},{37,100,-5.179423740895895`},{40,100,-
5.384358894299385`},{42,100,-5.521176922544321`},{45,100,-5.726488987385695`},{50,100,-
6.068399162239384`},{55,100,-6.409401955565573`},{60,100,-6.749100752584529`},{70,100,-
7.423863437100269`},{80,100,-8.09217362792462`},{90,100,-8.754327011671494`},{100,100,-
9.410899503122163`},{110,100,-10.062535727618984`},{120,100,-10.709868766075138`},{130,100,-
11.353492128192064`},{140,100,-11.993951338384688`},{150,100,-12.631742230584617`},{0.5`,120,-
3.1116601263316706`},{1,120,-3.1239164244259188`},{2,120,-3.1500817279727205`},{3,120,-
3.179504941513586`},{4,120,-3.21240768475939`},{5,120,-3.248682210616138`},{6,120,-
3.2881156144858084`},{7,120,-3.330460897670786`},{8,120,-3.375466492524418`},{9,120,-
3.422889809700284`},{10,120,-3.472503404250134`},{11,120,-3.5240974008091794`},{12,120,-
3.5774799528945422`},{13,120,-3.6324766755234013`},{14,120,-3.6889295698446083`},{15,120,-
3.746695731012018`},{16,120,-3.8056460021038028`},{17,120,-3.865663662698972`},{18,120,-
3.9266431974746654`},{20,120,-4.051115172885193`},{22,120,-4.178401554058349 5`},{25,120,-
4.373447327304432`},{27,120,-4.505598377400705`},{30,120,-4.706161118904547`},{32,120,-
4.84103757186288`},{35,120,-5.044574378385102`},{37,120,-5.1808355766352046`},{40,120,-
5.3857497283547975`},{42,120,-5.522554262310089`},{45,120,-5.727846877207213`},{50,120,-
6.069726803871691`},{55,120,-6.410702003805817`},{60,120,-6.750375728919654`},{70,120,-
7.425095045446586`},{80,120,-8.09336949050899`},{90,120,-8.755493207794624`},{100,120,-
9.412040862930029`},{110,120,-10.063656120862017`},{120,120,-10.710971335664114`},{130,120,-
11.354579464544 35`},{140,120,-11.995025604993591`},{150,120,-12.63280525340318`},{0.5`,140,-
3.1132437691711616`},{1,140,-3.1255048761122084`},{2,140,-3.151677867192092`},{3,140,-
3.181106605351297`},{4,140,-3.2140130712032393`},{5,140,-3.250289757563973`},{6,140,-
3.289723944545144`},{7,140,-3.3320687918130294`},{8,140,-3.377072873932807`},{9,140,-
3.4244937307678383`},{10,140,-3.474104034519382`},{11,140,-3.5256940154069483`},{12,140,-
3.5790719215475266`},{13,140,-3.6340634523256847`},{14,140,-3.6905106838973856`},{15,140,-
3.748270777982666`},{16,140,-3.8072146366921187`},{17,140,-3.8672255919595413`},{18,140,-
3.9281981749230326`},{20,140,-4.05265566776594`},{22,140,-4.179927019461642`},{25,140,-
4.374949694316997`},{27,140,-4.507085219645856`},{30,140,-4.7076248004593015`},{32,140,-
4.842486034988902`},{35,140,-5.046000522182998`},{37,140,-5.1822472538265645`},{40,140,-
5.387140414138337`},{42,140,-5.523931460402581`},{45,140,-5.729204638482249`},{50,140,-

6.07105432791448`},{55,140,-6.412001947518827`},{60,140,-6.751650612279867`},{70,140,-
7.426326579811857`},{80,140,-8.094565293555164`},{90,140,-8.756659355381197`},{100,140,-
9.413182182681181`},{110,140,-10.064776480695535`},{120,140,-10.712073877150173`},{130,140,-
11.355666777103297`},{140,140,-11.996099851360176`},{150,140,-12.633868258938396`},{0.5`,160,-
3.1148271402639836`},{1,160,-3.1270930553798855`},{2,160,-3.153273735392562`},{3,160,-
3.1827080007298925`},{4,160,-3.215618191853091`},{5,160,-3.2518970412437316`},{6,160,-
3.2913320137307136`},{7,160,-3.3336764274138875`},{8,160,-3.3786789991393764`},{9,160,-
3.426097398032086`},{10,160,-3.4757044134761914`},{11,160,-3.527290381294143`},{12,160,-
3.5806636442108197`},{13,160,-3.635649985979054`},{14,160,-3.6920915577582316`},{15,160,-
3.749845587828109`},{16,160,-3.808783037323659`},{17,160,-3.8687872905246197`},{18,160,-
3.92975292502088`},{20,160,-4.054195942200519`},{22,160,-4.181452271549915`},{25,160,-
4.376451858991845`},{27,160,-4.5085718669707635`},{30,160,-4.709088298235147`},{32,160,-
4.843934321705265`},{35,160,-5.047426500436839`},{37,160,-5.183658772542726`},{40,160,-
5.388530951718758`},{42,160,-5.525308516887776`},{45,160,-5.730562267625405`},{50,160,-
6.0723817344223985`},{55,160,-6.413301786752474`},{60,160,-6.752925402706792`},{70,160,-
7.427558040227183`},{80,160,-8.095761037086342`},{90,160,-8.757825454448701`},{100,160,-
9.414323462389014`},{110,160,-10.06589680713`},{120,160,-10.713176390541635`},{130,160,-
11.356754065875638`},{140,160,-11.99717407748997`},{150,160,-12.634931247194844`},{0.5`,180,-
3.1164102397812012`},{1,180,-3.128680962394526`},{2,180,-3.1548693327235107`},{3,180,-
3.1843091277829902`},{4,180,-3.217223046829788`},{5,180,-3.2535040617666033`},{6,180,-
3.2929398221466606`},{7,180,-3.335283804572454`},{8,180,-3.3802848682396482`},{9,180,-
3.427700811586044`},{10,180,-3.4773045412118386`},{11,180,-3.528886498560837`},{12,180,-
3.582255120973665`},{13,180,-3.6372362765721804`},{14,180,-3.6936721915154163`},{15,180,-
3.751420160636322`},{16,180,-3.8103512040861633`},{17,180,-3.8703487584817378`},{18,180,-
3.931307447855526`},{20,180,-4.055735996275745`},{22,180,-4.182977310409287`},{25,180,-
4.377953821413573`},{27,180,-4.510058319458664`},{30,180,-4.710551612312764`},{32,180,-
4.845382432090636`},{35,180,-5.048852313221861`},{37,180,-5.185070132856419`},{40,180,-
5.38992134116479`},{42,180,-5.526685431831625`},{45,180,-5.731919764698385`},{50,180,-
6.07370902345007`},{55,180,-6.414601521554609`},{60,180,-6.754200100242026`},{70,180,-
7.428789426723651`},{80,180,-8.096956721125721`},{90,180,-8.75899150501461`},{100,180,-
9.415464702066917`},{110,180,-10.067017100175866`},{120,180,-10.714278875846823`},{130,180,-
11.357841330868109`},{140,180,-11.998248283388497`},{150,180,-12.635994218177109`},{0.5`,200,-
3.117993067893707`},{1,200,-3.1302685973215474`},{2,200,-3.1564646593342083`},{3,200,-
3.18590998664414`},{4,200,-3.218827636254137`},{5,200,-3.255110819243764`},{6,200,-
3.294547369897129`},{7,200,-3.3368909233878377`},{8,200,-3.3818904813291675`},{9,200,-
3.429303971522758`},{10,200,-3.4789044178176267`},{11,200,-3.5304823672971293`},{12,200,-
3.5838463519253327`},{13,200,-3.6388223241937605`},{14,200,-3.6952525852572324`},{15,200,-
3.7529944964953015`},{16,200,-3.811919137067392`},{17,200,-3.871909995918442`},{18,200,-
3.9328617435143025`},{20,200,-4.057275830078438`},{22,200,-4.184502136125877`},{25,200,-
4.379455581666774`},{27,200,-4.511544577192784`},{30,200,-4.71201474277282`},{32,200,-
4.84683036622366`},{35,200,-5.050277960613277`},{37,200,-5.186481334840351`},{40,200,-
5.391311582545139`},{42,200,-5.528062205300056`},{45,200,-5.733277129762865`},{50,200,-
6.075036195052095`},{55,200,-6.415901151973052`},{60,200,-6.755474704927153`},{70,200,-
7.430020739332328`},{80,200,-8.098152345696478`},{90,200,-8.760157507096396`},{100,200,-
9.416605901728277`},{110,200,-10.068137359843586`},{120,200,-10.715381333074056`},{130,200,-
11.358928572087443`},{140,200,-11.999322469061283`},{150,200,-12.637057171889769`},{0.5`,220,-
3.119575624772216`},{1,220,-3.1318559603262095`},{2,220,-3.158059715373811`},{3,220,-
3.1875105774468206`},{4,220,-3.220431960246905`},{5,220,-3.2567173137863783`},{6,220,-
3.2961546570862676`},{7,220,-3.3384977839591605`},{8,220,-3.383495838503497`},{9,220,-
3.4309068779352945`},{10,220,-3.4805040433848866`},{11,220,-3.532077987593147`},{12,220,-
3.585437337155119`},{13,220,-3.640408128932517`},{14,220,-3.696832739071997`},{15,220,-
3.754568595493066`},{16,220,-3.813486836355124`},{17,220,-3.8734710029222974`},{18,220,-
3.934415812084558`},{20,220,-4.05881544369543`},{22,220,-4.186026748785812`},{25,220,-
4.38095713983604`},{27,220,-4.513030640256347`},{30,220,-4.713477689695971`},{32,220,-
4.848278124182968`},{35,220,-5.051703442686283`},{37,220,-5.187892378567207`},{40,220,-
5.392701675928486`},{42,220,-5.529438837358974`},{45,220,-5.734634362880494`},{50,220,-
6.0763632492830455`},{55,220,-6.417200678055605`},{60,220,-6.756749216803726`},{70,220,-
7.431251978084266`},{80,220,-8.099347910821784`},{90,220,-8.76132346071152`},{100,220,-
9.417747061386468`},{110,220,-10.069257586143607`},{120,220,-10.716483762231647`},{130,220,-
11.36001578954037`},{140,220,-12.00039663451385`},{150,220,-12.638120108337406`},{0.5`,240,-

3.121157910587272`},{1,240,-3.1334430515736154`},{2,240,-3.1596545009913637`},{3,240,-
3.18911090032444`},{4,240,-3.2220360189288253`},{5,240,-3.2583235455055948`},{6,240,-
3.297761683818227`},{7,240,-3.340104386385559`},{8,240,-3.3851009398582237`},{9,240,-
3.4325095309167493`},{10,240,-3.4821034180049755`},{11,240,-3.5336733595390437`},{12,240,-
3.587028076752349`},{13,240,-3.641993690877197`},{14,240,-3.6984126530480523`},{15,240,-
3.7561424577176563`},{16,240,-3.8150543020371592`},{17,240,-3.875031779580886`},{18,240,-
3.9359696536536535`},{20,240,-4.060354837213563`},{22,240,-4.1875511484752215`},{25,240,-
4.382458496005956`},{27,240,-4.514516508732563`},{30,240,-4.714940453162858`},{32,240,-
4.849725706047175`},{35,240,-5.053128759516054`},{37,240,-5.189303264109651`},{40,240,-
5.39409162138349`},{42,240,-5.530815328074255`},{45,240,-5.7359914641129`},{50,240,-
6.077690186197469`},{55,240,-6.418500099850043`},{60,240,-6.758023635913284`},{70,240,-
7.4324831430105`},{80,240,-8.100543416524793`},{90,240,-8.762489365877432`},{100,240,-
9.418888181054866`},{110,240,-10.070377779086373`},{120,240,-10.717586163327908`},{130,240,-
11.361102983233616`},{140,240,-12.001470779751717`},{150,240,-12.639183027524593`},{0.5`,260,-
3.122739925509243`},{1,260,-3.135029871228712`},{2,260,-3.1612490163357982`},{3,260,-
3.1907109554103372`},{4,260,-3.2236398124205907`},{5,260,-3.2599295145125504`},{6,260,-
3.2993684501971616`},{7,260,-3.341710730766183`},{8,260,-3.386705785488954`},{9,260,-
3.434111930560239`},{10,260,-3.483702541769276`},{11,260,-3.535268483225002`},{12,260,-
3.5886185708063714`},{13,260,-3.6435790101165746`},{14,260,-3.6999923272737623`},{15,260,-
3.7577160832571344`},{16,260,-3.8166215342013143`},{17,260,-3.876592325981805`},{18,260,-
3.937523268308966`},{20,260,-4.061894010719685`},{22,260,-4.189075335280237`},{25,260,-
4.383959650261107`},{27,260,-4.51600218270464`},{30,260,-4.716403033254109`},{32,260,-
4.851173111894878`},{35,260,-5.054553911177742`},{37,260,-5.190713991540323`},{40,260,-
5.395481418978783`},{42,260,-5.5321916775117534`},{45,260,-5.737348433521683`},{50,260,-
6.079017005849887`},{55,260,-6.419799417404119`},{60,260,-6.759297962297342`},{70,260,-
7.433714234142051`},{80,260,-8.10173886282865`},{90,260,-8.763655222611577`},{100,260,-
9.420029260746835`},{110,260,-10.071497938682324`},{120,260,-10.718688536371147`},{130,260,-
11.362190153173906`},{140,260,-12.002544904780404`},{150,260,-12.640245929455912`},{0.5`,280,-
3.1243216697083267`},{1,280,-3.1366164194562867`},{2,280,-3.1628432615559374`},{3,280,-
3.1923107428377824`},{4,280,-3.225243340842861`},{5,280,-3.2615352209183683`},{6,280,-
3.30097495632723`},{7,280,-3.3433168172001966`},{8,280,-3.388310375491314`},{9,280,-
3.435714076958907`},{10,280,-3.4853014147692`},{11,280,-3.53686335874123`},{12,280,-
3.5902088194065644`},{13,280,-3.645164086739449`},{14,280,-3.701571761837516`},{15,280,-
3.7592894721995846`},{16,280,-3.818188532935428`},{17,280,-3.87815264221267`},{18,280,-
3.939076656137885`},{20,280,-4.063432964300659`},{22,280,-4.190599309286998`},{25,280,-
4.3854606026860745`},{27,280,-4.517487662255776`},{30,280,-4.717865430050341`},{32,280,-
4.852620341804661`},{35,280,-5.055978897746484`},{37,280,-5.192124560931845`},{40,280,-
5.396871068782977`},{42,280,-5.533567885737296`},{45,280,-5.738705271168415`},{50,280,-
6.080343708294798`},{55,280,-6.421098630765561`},{60,280,-6.7605721959973915`},{70,280,-
7.434945251509919`},{80,280,-8.102934249756489`},{90,280,-8.76482103093139`},{100,280,-
9.421170300475737`},{110,280,-10.072618064941892`},{120,280,-10.71979088136967`},{130,280,-
11.363277299367962`},{140,280,-12.003619009605428`},{150,280,-12.641308814135934`},{0.5`,300,-
3.1259031433545448`},{1,300,-3.1382026964209744`},{2,300,-3.1644372368004907`},{3,300,-
3.193910262739975`},{4,300,-3.226846604316255`},{5,300,-3.2631406648341588`},{6,300,-
3.302581202312591`},{7,300,-3.3449226457867773`},{8,300,-3.389914709960952`},{9,300,-
3.4373159702059204`},{10,300,-3.486900037096183`},{11,300,-3.5384579861779635`},{12,300,-
3.591798822642331`},{13,300,-3.6467489208346424`},{14,300,-3.7031509568277254`},{15,300,-
3.760862624633111`},{16,300,-3.8197552983273564`},{17,300,-3.8797127283611137`},{18,300,-
3.9406298172278147`},{20,300,-4.064971698043349`},{22,300,-4.192123070581645`},{25,300,-
4.386961353365436`},{27,300,-4.51897294746916`},{30,300,-4.7193276436321545`},{32,300,-
4.854067395855087`},{35,300,-5.057403719297391`},{37,300,-5.193534972356811`},{40,300,-
5.398260570864653`},{42,300,-5.534943952816686`},{45,300,-5.740061977114645`},{50,300,-
6.081670293586673`},{55,300,-6.422397739982075`},{60,300,-6.761846337054906`},{70,300,-
7.436176195145091`},{80,300,-8.10412957733143`},{90,300,-8.7659867908543`},{100,300,-
9.422311300254922`},{110,300,-10.073738157875509`},{120,300,-10.72089319833178`},{130,300,-
11.364364421822504`},{140,300,-12.004693094232305`},{150,300,-12.642371681569234`},{0.5`,320,-
3.1274843466177495`},{1,320,-3.1397887022872513`},{2,320,-3.1660309422180566`},{3,320,-
3.1955095152500452`},{4,320,-3.228449602961357`},{5,320,-3.2647458463710173`},{6,320,-
3.3041871882574094`},{7,320,-3.346528216625118`},{8,320,-3.3915187889935354`},{9,320,-
3.438917610394472`},{10,320,-3.4884984088416897`},{11,320,-3.5400523656254643`},{12,320,-

3.593388580603101`},{13,320,-3.6483335124910052`},{14,320,-3.704729912332826`},{15,320,-
3.762435540645841`},{16,320,-3.8213218304649756`},{17,320,-3.8812725845147833`},{18,320,-
3.942182751666175`},{20,320,-4.066510212034634`},{22,320,-4.193646619250322`},{25,320,-
4.388461902383764`},{27,320,-4.520458038427974`},{30,320,-4.720789674080137`},{32,320,-
4.855514274124705`},{35,320,-5.058828375905559`},{37,320,-5.194945225887798`},{40,320,-
5.399649925292375`},{42,320,-5.536319878815701`},{45,320,-5.741418551421897`},{50,320,-
6.082996761779958`},{55,320,-6.423696745101342`},{60,320,-6.763120385511334`},{70,320,-
7.437407065078537`},{80,320,-8.105324845576577`},{90,320,-8.76715250239772`},{100,320,-
9.423452260097742`},{110,320,-10.074858217493603`},{120,320,-10.721995487265774`},{130,320,-
11.365451520544253`},{140,320,-12.005767158666545`},{150,320,-12.643434531760382`},{0.5`,340,-
3.12906527966762`},{1,340,-3.1413744372194397`},{2,340,-3.1676243779571247`},{3,340,-
3.197108500501055`},{4,340,-3.2300523368987157`},{5,340,-3.2663507656400284`},{6,340,-
3.305792914265851`},{7,340,-3.3481335298144224`},{8,340,-3.3931226126847536`},{9,340,-
3.4405189976177777`},{10,340,-3.4900965300972087`},{11,340,-3.541646497174023`},{12,340,-
3.5949780933783306`},{13,340,-3.649917861797412`},{14,340,-3.7063086284412776`},{15,340,-
3.764008220325922`},{16,340,-3.8228881294361803`},{17,340,-3.8828322107613453`},{18,340,-
3.943735459540398`},{20,340,-4.0680485063614`},{22,340,-4.195169955379179`},{25,340,-
4.389962249825629`},{27,340,-4.521942935215395`},{30,340,-4.722251521474865`},{32,340,-
4.856960976692047`},{35,340,-5.060252867646059`},{37,340,-5.196355321597356`},{40,340,-
5.401039132134679`},{42,340,-5.537695663800094`},{45,340,-5.742774994151667`},{50,340,-
6.084323112929075`},{55,340,-6.424995646171019`},{60,340,-6.764394341408106`},{70,340,-
7.438637861341209`},{80,340,-8.106520054515034`},{90,340,-8.768318165579062`},{100,340,-
9.424593180017535`},{110,340,-10.07597824380659`},{120,340,-10.723097748179947`},{130,340,-
11.36653859553992`},{140,340,-12.006841202913662`},{150,340,-12.644497364713951`},{0.5`,360,-
3.1306459426736644`},{1,360,-3.142959901381706`},{2,360,-3.169217544166072`},{3,360,-
3.1987072186259966`},{4,360,-3.23165480624884`},{5,360,-3.2679554227522623`},{6,360,-
3.3073983804420846`},{7,360,-3.34973858545391`},{8,360,-3.3947261811303147`},{9,360,-
3.442120131969079`},{10,360,-3.4916944009542563`},{11,360,-3.543240380913955`},{12,360,-
3.5965673610575024`},{13,360,-3.651501968842762`},{14,360,-3.707887105241562`},{15,360,-
3.765580663761524`},{16,360,-3.824454195328885`},{17,360,-3.88439160718848`},{18,360,-
3.9452879409379302`},{20,360,-4.069586581110542`},{22,360,-4.196693079054368`},{25,360,-
4.3914623957756005`},{27,360,-4.5234276379145895`},{30,360,-4.723713185896901`},{32,360,-
4.858407503635629`},{35,360,-5.061677194593946`},{37,360,-5.197765259558018`},{40,360,-
5.402428191460077`},{42,360,-5.539071307835592`},{45,360,-5.744131305365425`},{50,360,-
6.08564934708842`},{55,360,-6.42629444323874`},{60,360,-6.765668204786627`},{70,360,-
7.439868583964046`},{80,360,-8.10771520416988`},{90,360,-8.769483780415728`},{100,360,-
9.42573406002764`},{110,360,-10.077098236824893`},{120,360,-10.724199981082595`},{130,360,-
11.367625646816222`},{140,360,-12.007915226979165`},{150,360,-12.645560180434506`},{0.5`,380,-
3.132226335805218`},{1,380,-3.1445450949380622`},{2,380,-3.170810440993167`},{3,380,-
3.200305669757793`},{4,380,-3.2332570111322045`},{5,380,-3.2695598178187755`},{6,380,-
3.309003586890283`},{7,380,-3.351343383642814`},{8,380,-3.3963294944259492`},{9,380,-
3.4437210135416394`},{10,380,-3.493292021504375`},{11,380,-3.5448340169356034`},{12,380,-
3.598156383730126`},{13,380,-3.6530858337159793`},{14,380,-3.709465342822184`},{15,380,-
3.7671528710408366`},{16,380,-3.8260200282310213`},{17,380,-3.8859507738838857`},{18,380,-
3.9468401959462325`},{20,380,-4.071124436368962`},{22,380,-4.198215990362044`},{25,380,-
4.392962340318239`},{27,380,-4.524912146608714`},{30,380,-4.725174667426789`},{32,380,-
4.8598538550339505`},{35,380,-5.0631013568242516`},{37,380,-5.199175039842292`},{40,380,-
5.403817103337057`},{42,380,-5.540446810987899`},{45,380,-5.7454874851246185`},{50,380,-
6.086975464312363`},{55,380,-6.427593136352115`},{60,380,-6.766941975688284`},{70,380,-
7.441099232977966`},{80,380,-8.108910294564188`},{90,380,-8.77064934692511`},{100,380,-
9.426874900141387`},{110,380,-10.078218196558922`},{120,380,-10.725302185982004`},{130,380,-
11.368712674379866`},{140,380,-12.008989230868561`},{150,380,-12.646622978926619`},{0.5`,400,-
3.133806459231447`},{1,400,-3.146130018052366`},{2,400,-3.1724030685865654`},{3,400,-
3.2019038540293`},{4,400,-3.2348589516692465`},{5,400,-3.271163950950612`},{6,400,-
3.3106085337146216`},{7,400,-3.35294792448038`},{8,400,-3.397932552667406`},{9,400,-
3.4453216424287496`},{10,400,-3.4948893918391333`},{11,400,-3.5464274053293376`},{12,400,-
3.5997451614857345`},{13,400,-3.654669456506013`},{14,400,-3.7110433412716732`},{15,400,-
3.768724842252072`},{16,400,-3.827585628230541`},{17,400,-3.8875097109352774`},{18,400,-
3.9483922246527787`},{20,400,-4.072662072223572`},{22,400,-4.199738689388368`},{25,400,-
4.394462083538106`},{27,400,-4.526396461380923`},{30,400,-4.72663596614507`},{32,400,-

4.861300030965493`},{35,400,-5.0645253544119875`},{37,400,-5.200584662522661`},{40,400,-
5.405205867834083`},{42,400,-5.541822173322691`},{45,400,-5.746843533490667`},{50,400,-
6.08830146465525`},{55,400,-6.428891725558731`},{60,400,-6.768215654154441`},{70,400,-
7.442329808413874`},{80,400,-8.11010532572102`},{90,400,-8.771814865124592`},{100,400,-
9.428015700372097`},{110,400,-10.079338123019086`},{120,400,-10.726404362886463`},{130,400,-
11.369799678237563`},{140,400,-12.010063214587356`},{150,400,-12.647685760194854`},{0.5`,420,-
3.1353863131213475`},{1,420,-3.1477146708883215`},{2,420,-3.1739954270943165`},{3,420,-
3.2035017715733023`},{4,420,-3.2364606279803674`},{5,420,-3.272767822258803`},{6,420,-
3.3122132210192787`},{7,420,-3.354552208065868`},{8,420,-3.399535355950456`},{9,420,-
3.4469220187237224`},{10,420,-3.4964865120501245`},{11,420,-3.548020546185553`},{12,420,-
3.6013336944138894`},{13,420,-3.6562528373018375`},{14,420,-3.7126211006785814`},{15,420,-
3.770296577483461`},{16,420,-3.829150995415415`},{17,420,-3.8890684184303854`},{18,420,-
3.9499440271450568`},{20,420,-4.074199488761293`},{22,420,-4.201261176219501`},{25,420,-
4.395961625519757`},{27,420,-4.527880582314357`},{30,420,-4.728097082132259`},{32,420,-
4.862746031508722`},{35,420,-5.065949187432146`},{37,420,-5.2019941276715915`},{40,420,-
5.406594485019595`},{42,420,-5.543197394905621`},{45,420,-5.7481994505249645`},{50,420,-
6.0896273481713985`},{55,420,-6.430190210906149`},{60,420,-6.7694892402264415`},{70,420,-
7.443560310302657`},{80,420,-8.111300297663428`},{90,420,-8.772980335031548`},{100,420,-
9.429156460733088`},{110,420,-10.080458016215792`},{120,420,-10.727506511804252`},{130,420,-
11.370886658396017`},{140,420,-12.011137178141055`},{150,420,-12.648748524243775`},{0.5`,440,-
3.1369658976437442`},{1,440,-3.149299053609477`},{2,440,-3.175587516664358`},{3,440,-
3.205099422522519`},{4,440,-3.2380620401859317`},{5,440,-3.274371431854364`},{6,440,-
3.313817648908434`},{7,440,-3.3561562344985516`},{8,440,-3.401137904370889`},{9,440,-
3.4485221425198955`},{10,440,-3.498083382228969`},{11,440,-3.549613439594672`},{12,440,-
3.6029219826041774`},{13,440,-3.657835976192451`},{14,440,-3.714198621131483`},{15,440,-
3.7718680768232593`},{16,440,-3.8307161298736303`},{17,440,-3.8906268964569564`},{18,440,-
3.951495603510569`},{20,440,-4.075736686069054`},{22,440,-4.2027834509416095`},{25,440,-
4.397460966347744`},{27,440,-4.529364509492153`},{30,440,-4.729558015468867`},{32,440,-
4.864191856742088`},{35,440,-5.067372855959699`},{37,440,-5.203403435361524`},{40,440,-
5.407982954962009`},{42,440,-5.544572475802316`},{45,440,-5.749555236288879`},{50,440,-
6.090953114915106`},{55,440,-6.43148859244191`},{60,440,-6.770762733945607`},{70,440,-
7.444790738675186`},{80,440,-8.112495210414442`},{90,440,-8.774145756663348`},{100,440,-
9.430297181237673`},{110,440,-10.081577876159436`},{120,440,-10.728608632743653`},{130,440,-
11.371973614861933`},{140,440,-12.01221112153516`},{150,440,-12.649811271077947`},{0.5`,450,-
3.1377555889448407`},{1,450,-3.1500911437280728`},{2,450,-3.176383460643939`},{3,450,-
3.2058981480655375`},{4,450,-3.238862647286734`},{5,450,-3.275173138544599`},{6,450,-
3.314619765604756`},{7,450,-3.3569581513136177`},{8,450,-3.401939083037564`},{9,450,-
3.449322109760107`},{10,450,-3.4988817235849745`},{11,450,-3.5504097935348353`},{12,450,-
3.6037160349506236`},{13,450,-3.6586274549511217`},{14,450,-3.714987291777867`},{15,450,-
3.7726537380613956`},{16,450,-3.831498609857743`},{17,450,-3.8914060494469656`},{18,450,-
3.952271306923136`},{20,450,-4.076505202538867`},{22,450,-4.203544508788708`},{25,450,-
4.398210561355535`},{27,450,-4.530106400448663`},{30,450,-4.730288413668357`},{32,450,-
4.864914703642082`},{35,450,-5.068084628562171`},{37,450,-5.204108030181998`},{40,450,-
5.408677134738426`},{42,450,-5.545259963513827`},{45,450,-5.750233079963614`},{50,450,-
6.091615954514254`},{55,450,-6.432137744295267`},{60,450,-6.771399446185783`},{70,450,-
7.445405925302499`},{80,450,-8.113092644600375`},{90,450,-8.77472844938149`},{100,450,-
9.43086752654797`},{110,450,-10.082137793664609`},{120,450,-10.729159682724045`},{130,450,-
11.372517084212284`},{140,450,-12.012748085674083`},{150,450,-12.650342638040929`},{0.5`,500,-
3.141703036691629`},{1,500,-3.154050582717347`},{2,500,-3.180362173225972`},{3,500,-
3.2098907771276046`},{4,500,-3.2428646933723875`},{5,500,-3.2791806914752555`},{6,500,-
3.318629377124746`},{7,500,-3.3609667718727056`},{8,500,-3.405944021414687`},{9,500,-
3.4533209998493497`},{10,500,-3.5028724934892135`},{11,500,-3.554390636044072`},{12,500,-
3.6076853796440895`},{13,500,-3.6625839423233773`},{14,500,-3.7189297496522356`},{15,500,-
3.776581160375943`},{16,500,-3.835410137768495`},{17,500,-3.8953009546031536`},{18,500,-
3.956148976721725`},{20,500,-4.080346963481988`},{22,500,-4.207349003315501`},{25,500,-
4.401957782755186`},{27,500,-4.533815129322932 5`},{30,500,-4.733939720380065`},{32,500,-
4.868528281367237`},{35,500,-5.07164287533613`},{37,500,-5.207630414401412`},{40,500,-
5.412147482014443`},{42,500,-5.548696875030886`},{45,500,-5.753621806571629`},{50,500,-
6.094929715054142`},{55,500,-6.435383114654275`},{60,500,-6.7745826613989815`},{70,500,-
7.4484815830037165`},{80,500,-8.116079593749337`},{90,500,-8.77764173208135`},{100,500,-

9.433719103746018`},{110,500,-10.084937256575943`},{120,500,-10.731914827774279`},{130,500,-
11.375234342171451`},{140,500,-12.015432830814905`},{150,500,-12.652999408337577`},{0.5`,520,-
3.143281545428882`},{1,520,-3.155633886611741`},{2,520,-3.181953188522377`},{3,520,-
3.2114873630234895`},{4,520,-3.244465050358647`},{5,520,-3.2807832553302143`},{6,520,-
3.320232768393763`},{7,520,-3.36256977068717`},{8,520,-3.4075455513429542`},{9,520,-
3.4549201145841764`},{10,520,-3.50446836445619`},{11,520,-3.5559825405695547`},{12,520,-
3.609272689779289`},{13,520,-3.664166114483621`},{14,520,-3.720506315175312`},{15,520,-
3.7781517170323196`},{16,520,-3.8369743422003357`},{17,520,-3.896858515633363`},{18,520,-
3.957699649455457`},{20,520,-4.081883284739361`},{22,520,-4.20887043046324`},{25,520,-
4.403456319813962`},{27,520,-4.535298282309359`},{30,520,-4.735399923919144`},{32,520,-
4.8699734061452995`},{35,520,-5.073065886642563`},{37,520,-5.209039092979318`},{40,520,-
5.413535363668126`},{42,520,-5.55007139383841`},{45,520,-5.754977067867185`},{50,520,-
6.096255015250521`},{55,520,-6.436681081418318`},{60,520,-6.77585578611959`},{70,520,-
7.449711717619613`},{80,520,-8.11727426996492`},{90,520,-8.778806960786023`},{100,520,-
9.434859664957973`},{110,520,-10.08605698361126`},{120,520,-10.733016836882863`},{130,520,-
11.376321203934202`},{140,520,-12.01650669362562`},{150,520,-12.654062086358355`},{0.5`,550,-
3.1456488051011258`},{1,550,-3.1580083375678893`},{2,550,-3.184339208638666`},{3,550,-
3.213881743285757`},{4,550,-3.2468650918050654`},{5,550,-3.2831866114765624`},{6,550,-
3.3226373699025613`},{7,550,-3.364973787709466`},{8,550,-3.409947369296514`},{9,550,-
3.4573183141560877`},{10,550,-3.5068617029847213`},{11,550,-3.5583699342712247`},{12,550,-
3.6116531969672256`},{13,550,-3.666538920014623`},{14,550,-3.7228707162799117`},{15,550,-
3.780507110575721`},{16,550,-3.8393202133385538`},{17,550,-3.899194427775694`},{18,550,-
3.960025235416441`},{20,550,-4.0841873564116185`},{22,550,-4.2111521743152585`},{25,550,-
4.405703749057988`},{27,550,-4.5375226493023`},{30,550,-4.737589887537425`},{32,550,-
4.872140765365868`},{35,550,-5.075200095904249`},{37,550,-5.211151816311662`},{40,550,-
5.415616910729886`},{42,550,-5.552132908898016`},{45,550,-5.7570097142722885`},{50,550,-
6.098242747121982`},{55,550,-6.438627837377347`},{60,550,-6.7777653004385945`},{70,550,-
7.451556781999056`},{80,550,-8.119066173527253`},{90,550,-8.780554713495103`},{100,550,-
9.436570432173923`},{110,550,-10.087736511915368`},{120,550,-10.734669798166378`},{130,550,-
11.377951452219689`},{140,550,-12.018117450095705`},{150,550,-12.65565607115603`},{0.5`,570,-
3.1472266428381985`},{1,570,-3.159590968518815`},{2,570,-3.1859295537120667`},{3,570,-
3.215477664599155`},{4,570,-3.2484647902559`},{5,570,-3.284788522645181`},{6,570,-
3.3242401141305633`},{7,570,-3.366576145069626`},{8,570,-3.411548263446203`},{9,570,-
3.45891679898681`},{10,570,-3.508456950189633`},{11,570,-3.559961221480072`},{12,570,-
3.613239896546822`},{13,570,-3.6681204886923915`},{14,570,-3.724446685692346`},{15,570,-
3.7820770787727707`},{16,570,-3.840883837219488`},{17,570,-3.900751416396701`},{18,570,-
3.961575344091749`},{20,570,-4.085723130844099`},{22,570,-4.212673072429231`},{25,570,-
4.40720178444785`},{27,570,-4.539005319094293`},{30,570,-4.739049635606669`},{32,570,-
4.873585452996149`},{35,570,-5.076622697055875`},{37,570,-5.212560102282319`},{40,570,-
5.417004425258099`},{42,570,-5.55350707693211`},{45,570,-5.758364648272799`},{50,570,-
6.0995677561665`},{55,570,-6.439925545294455`},{60,570,-6.779038194870058`},{70,570,-
7.452786733267286`},{80,570,-8.120260702094932`},{90,570,-8.78171982176112`},{100,570,-
9.437710893935924`},{110,570,-10.088856155967324`},{120,570,-10.735771737447859`},{130,570,-
11.379038254847341`},{140,570,-12.01919126258644`},{150,570,-12.656718706205462`},{0.5`,600,-
3.149592896796081`},{1,600,-3.1619644108214624`},{2,600,-3.1883145691837913`},{3,600,-
3.217871048607606`},{4,600,-3.250863844462221`},{5,600,-3.2871909002819892`},{6,600,-
3.326643745566277`},{7,600,-3.368979200376239`},{8,600,-3.413949128181557`},{9,600,-
3.461314054140854`},{10,600,-3.510849353505367`},{11,600,-3.5623476896314883`},{12,600,-
3.615619488322119`},{13,600,-3.6704923894176478`},{14,600,-3.726810193046908`},{15,600,-
3.784431590041535`},{16,600,-3.8432288379443853`},{17,600,-3.903086470337053`},{18,600,-
3.9639000843756924`},{20,600,-4.088026382686756`},{22,600,-4.214954023134603`},{25,600,-
4.409448461584713`},{27,600,-4.54122896168501`},{30,600,-4.741238916397129`},{32,600,-
4.875752156862229`},{35,600,-5.078756291436113`},{37,600,-5.214672237042632`},{40,600,-
5.419085421951559`},{42,600,-5.555568066138382`},{45,600,-5.760396804022165`},{50,600,-
6.101555051563856`},{55,600,-6.441871913205151`},{60,600,-6.7809473639483455`},{70,600,-
7.4546315227694055`},{80,600,-8.122052384293006`},{90,600,-8.783467393893352`},{100,600,-
9.439421512039143`},{110,600,-10.090535559845`},{120,600,-10.73742459402943`},{130,600,-
11.380668414461528`},{140,600,-12.02080194360229`},{150,600,-12.658312626567463`},{0.5`,600,-
3.149592896796081`},{1,600,-3.1619644108214624`},{2,600,-3.1883145691837913`},{3,600,-
3.217871048607606`},{4,600,-3.250863844462221`},{5,600,-3.2871909002819892`},{6,600,-

```
3.326643745566277`},{7,600,-3.368979200376239`},{8,600,-3.413949128181557`},{9,600,-
3.461314054140854`},{10,600,-3.510849353505367`},{11,600,-3.5623476896314883`},{12,600,-
3.615619488322119`},{13,600,-3.6704923894176478`},{14,600,-3.726810193046908`},{15,600,-
3.784431590041535`},{16,600,-3.8432288379443853`},{17,600,-3.903086470337053`},{18,600,-
3.9639000843756924`},{20,600,-4.088026382686756`},{22,600,-4.214954023134603`},{25,600,-
4.409448461584713`},{27,600,-4.54122896168501`},{30,600,-4.741238916397129`},{32,600,-
4.875752156862229`},{35,600,-5.078756291436113`},{37,600,-5.214672237042632`},{40,600,-
5.419085421951559`},{42,600,-5.555568066138382`},{45,600,-5.760396804022165`},{50,600,-
6.101555051563856`},{55,600,-6.441871913205151`},{60,600,-6.7809473639483455`},{70,600,-
7.4546315227694055`},{80,600,-8.122052384293006`},{90,600,-8.783467393893352`},{100,600,-
9.439421512039143`},{110,600,-10.090535559845`},{120,600,-10.73742459402943`},{130,600,-
11.380668414461528`},{140,600,-12.02080194360229`},{150,600,-12.658312626567463`}};

ClearAll[a,b,c,d,g,h,l,a1,x,y,Laki,Laki1]
Laki=NonlinearModelFit[DoseU,
{(a+b*x+c*x^2+d*x^3+g*x^(1/2)+h*x^(1/3))*(1+a1*y)},{a,b,c,d,g,h,a1},{x,y}]
Laki1=Normal[Laki]
Laki["RSquared"]
Laki["EstimatedVariance"]
Laki["ParameterConfidenceIntervalTable"]

FittedModel[
```

$$\left(-2.73749-1.42211\,x^{1/3}+1.16828\sqrt{x}-0.139266\,x+0.000276162\,x^2-5.78865\times10^{-7}\,x^3\right)\left(1+9.95092\times10^{-6}\,y\right)$$

(-2.73749-1.42211 $x^{1/3}$+1.16828 $\sqrt{x}$ -0.139266 x+0.000276162 x^2-5.78865×10^{-7} x^3) (1+9.95092×10^{-6} y)

0.999998

0.0000653794

{
{, Estimate, Standard Error, Confidence Interval},
{a, -2.73749, 0.00793474, {-2.75306,-2.72193}},
{b, -0.139266, 0.000745568, {-0.140729,-0.137804}},
{c, 0.000276162, 3.29646×10^{-6}, {0.000269696,0.000282627}},
{d, -5.78865×10^{-7}, 9.43786×10^{-9}, {-5.97376×10^{-7},-5.60354×10^{-7}}},
{g, 1.16828, 0.0141041, {1.14061,1.19594}},
{h, -1.42211, 0.0210638, {-1.46342,-1.3808}},
{a1, 9.95092×10^{-6}, 1.65535×10^{-7}, {9.62626×10^{-6},0.0000102756}}
}

Program D. Proračun specifičnih jačina apsorbovane doze u prostoriji pomoću fitujućih funkcija za dozu radionuklida; doza prvog sloja u kombinaciji beton-keramičke pločice

```
ClearAll[tbld,de1,de2,a1,a2,b1,b2,B1,B2,c1,c2];

de2 = 0.5;
tbld = {{10},{12.5},{15},{17.5},{20},{22.5},{25},{27.5},{30}};
GafiU={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
GafiTh={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
GafiK={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};

For [i=1, i<10, i++,
  {
   {de1} = tbld[[i]];
```

```
AlfaU=0;
alfaU=0;
AlfaTh=0;
alfaTh=0;
AlfaK=0;
alfaK=0;

For[j=1,j<7,j++,
 {

  ClearAll[a1,a2,b1,b2,c1,c2,A1,B1,B2,C1];
  A1=280;
  B1=500;
  C1=400;
  a1=(A1/2);
  b1=(B1/2);
  c1=(C1/2);

  Centar={{a1,b1,c1,B1},{b1,a1,c1,A1},{a1,c1,b1,C1},{c1,a1,b1,A1},{c1,b1,a1,B1},{b1,c1,a1,C1}};
  {a2,b2,c2,B2}=Centar[[j]];

  fU[x_,y_,z_]:=Exp[(-3.093564865907957`-0.3500981263290069` Sqrt[(t[x, y, z])] +0.5059706294269162`
(t[x,y,z])^(2/3)-0.18621259234535692` (t[x,y,z])+0.00028011334404800365` (t[x,y,z])^2-6.568128542246098`*^-
7(t[x,y,z])^3) (1+0.010487521972056404` h[x,y,z]) (1+6.636558961627492`*^-6 s[x,y,z])];

  fTh[x_,y_,z_]:=Exp[(-3.0606215429285335`+0.24207669173659566` Sqrt[(t[x, y, z])] -
0.03440196748259265` (t[x,y,z])^(2/3)-0.107566137477851 5` (t[x,y,z])+0.00018500714579709258` (t[x,y,z])^2-
6.029147134426164`*^-7 (t[x,y,z])^3) (1+0.009331826333519172` h[x,y,z]) (1+6.002589939365233`*^-6
s[x,y,z])];

  fK[x_,y_,z_]:=
   Exp[(-5.389324202273055`-0.8399322781499704` Sqrt[(t[x, y, z])] +0.8752105015639067` (t[x,y,z])^(2/3)-
0.20622593131584466` (t[x,y,z])+0.00007228310902711578` (t[x,y,z])^2-7.955844725798465`*^-8 (t[x,y,z])^3)
(1+0.008115054840338894` h[x,y,z]) (1+5.213116697261 5706`*^-6 s[x,y,z])];

  t[x_,y_,z_]:=x-(c2+de2)/Cos[y];
  h[x_,y_,z_]:=de2/Cos[y];
  s[x_,y_,z_]:=c2/Cos[y];

  Alfa1U=Chop[NIntegrate[4*fU[x,y,z]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de1+de2)]},{x,(c2+de2)/Cos[y],(c2+de1+de2)/Cos[y]}]];
  alfa1U=Chop[NIntegrate[4*fU[x,y,z]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de2)],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de1+de2)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y]
,(c2+de2)*Sec[y]}]];

  Alfa1Th=Chop[NIntegrate[4*fTh[x,y,z]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de1+de2)]},{x,(c2+de2)/Cos[y],(c2+de1+de2)/Cos[y]}]];
  alfa1Th=Chop[NIntegrate[4*fTh[x,y,z]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de2)],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de1+de2)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y]
,(c2+de2)*Sec[y]}]];

  Alfa1K=Chop[NIntegrate[4*fK[x,y,z]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de1+de2)]},{x,(c2+de2)/Cos[y],(c2+de1+de2)/Cos[y]}]];
  alfa1K=Chop[NIntegrate[4*fK[x,y,z]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de2)],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+de1+de2)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y]
,(c2+de2)*Sec[y]}]];

  AlfaU=Alfa1U+AlfaU;
```

```
    alfaU=alfa1U+alfaU;
    AlfaTh=Alfa1Th+AlfaTh;
    alfaTh=alfa1Th+alfaTh;
    AlfaK=Alfa1K+AlfaK;
    alfaK=alfa1K+alfaK;
    }
   ];
  DoseU=1.0790495*10^2*(AlfaU+alfaU);
  DoseTh=1.0790495*10^2*(AlfaTh+alfaTh);
  DoseK=1.0790495*10^2*(AlfaK+alfaK);
  tblDU={de1,DoseU};
  tblDTh={de1,DoseTh};
  tblDK={de1,DoseK};
  GafiU [[i]]=tblDU;
  GafiTh [[i]]=tblDTh;
  GafiK [[i]]=tblDK;
  }
 ];
Print[GafiU];
Print[GafiTh];
Print[GafiK];
```

Program E. Zavisnost specifične jačine apsorbovane doze za ^{238}U od gustine materijala

```
ClearAll[tblU,tblTh,tblK,tbld,d1,a1,a2,b1,b2,c1,c2,a3,b3,c3,g2,d2,a,b,c,d,g];

Ubeton={{0.047`,1.644`,0.592`,0.129`,15.76`,-0.068`},{0.053`,1.858`,0.638`,0.116`,14.58`,-
0.0597`},{0.186`,2.75`,1.406`,-0.066`,15.98`,0.0073`},{0.242`,2.629`,1.471`,-
0.077`,18.69`,0.0146`},{0.273`,2.57`,1.486`,-0.081`,17.81`,0.0158`},{0.295`,2.531`,1.491`,-
0.082`,16.84`,0.0161`},{0.352`,2.438`,1.498`,-0.084`,16.13`,0.0182`},{0.395`,2.378`,1.495`,-
0.085`,15.97`,0.0193`},{0.47`,2.298`,1.476`,-0.083`,16.1`,0.0196`},{0.609`,2.186`,1.431`,-
0.078`,17.06`,0.0199`},{0.666`,2.147`,1.414`,-0.076`,17.22`,0.0202`},{0.773`,2.081`,1.392`,-
0.074`,15.33`,0.0202`},{0.806`,2.063`,1.385`,-0.073`,15.01`,0.0202`},{0.934`,2.007`,1.349`,-
0.068`,15.19`,0.0197`},{1.12`,1.943`,1.301`,-0.06`,15.88`,0.0185`},{1.246`,1.909`,1.27`,-
0.055`,16.55`,0.0176`},{1.39`,1.871`,1.247`,-0.051`,16.37`,0.0169`},{1.509`,1.846`,1.225`,-
0.047`,16.41`,0.0159`},{1.661`,1.819`,1.2`,-0.042`,16.35`,0.0145`},{1.76`,1.806`,1.186`,-
0.04`,15.44`,0.0129`},{1.848`,1.794`,1.174`,-0.037`,15.06`,0.0119`},{2.118`,1.762`,1.14`,-
0.03`,13.77`,0.0085`},{2.204`,1.752`,1.12`,-0.028`,13.33`,0.0075`},{2.435`,1.725`,1.105`,-
0.022`,12.04`,0.0052`}};

Umi={{0.047`,0.04`,0.9577`,0.0002456`,0.04663`},{0.053`,0.022`,0.7759`,0.0002285`,0.03705`},{0.186`,0.04`,
0.3023`,0.0001508`,0.02633`},{0.242`,0.084`,0.2730`,0.0001376`,0.02772`},{0.273`,0.059`,0.2607`,0.0001317`
,0.02832`},{0.295`,0.207`,0.2531`,0.0001280`,0.02870`},{0.352`,0.348`,0.2365`,0.0001199`,0.02911`},{0.395`,
0.012`,0.2262`,0.0001149`,0.02947`},{0.47`,0.021`,0.2105`,0.0001071`,0.02964`},{0.609`,0.43`,0.1884`,0.0000
9595`,0.02953`},{0.666`,0.029`,0.1809`,0.00009216`,0.02934`},{0.773`,0.077`,0.1692`,0.00008616`,0.02895`},
{0.806`,0.021`,0.1660`,0.00008454`,0.02887`},{0.934`,0.036`,0.1547`,0.00007883`,0.02827`},{1.12`,0.156`,0.1
414`,0.00007206`,0.02728`},{1.246`,0.083`,0.1340`,0.00006828`,0.02670`},{1.39`,0.092`,0.1268`,0.00006460`,
0.02602`},{1.509`,0.037`,0.1216`,0.00006196`,0.02564`},{1.661`,0.02`,0.1158`,0.00005890`,0.02494`},{1.76`,
0.18`,0.1124`,0.00005713`,0.02443`},{1.848`,0.027`,0.1096`,0.00005568`,0.02411`},{2.118`,0.011`,0.1023`,0.0
0005178`,0.02317`},{2.204`,0.062`,0.1002`,0.00005069`,0.02277`},{2.435`,0.024`,0.09530`,0.00004805`,0.022
14`}};

d1 = 20;

Gust={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
tblro = {{1},{1.2},{1.4},{1.6},{1.8},{2},{2.2},{2.35},{2.4},{2.6},{2.8},{3},{3.2},{3.4},{3.6},{3.8},{4}};
```

```
For [j=1, j<18, j++,
  {
   {ro1} = tblro[[j]];

  Dose=0;

  For [i=1, i<25, i++,
   {

    {En,b2,c2,a2,g2,d2}=Ubeton[[i]];
    {En,Y,mm,mv,mmm}=Umi[[i]];

    Alfa=0;
    alfa=0;

    For[k=1,k<7,k++,
     {

      ClearAll[a,a3,b,b3,c,c3,A1,B1,B2,C1];
      A1=280;
      B1=500;
      C1=400;
      a=(A1/2);
      b=(B1/2);
      c=(C1/2);

      Centar={{a,b,c,B1},{b,a,c,A1},{a,c,b,C1},{c,a,b,A1},{c,b,a,B1},{b,c,a,C1}};
      {a3,b3,c3,B2}=Centar[[k]];

      f[x_,y_]:=If[K[x,y]==1,1+(b2-1)*t[x,y],1+(b2-1)*(K[x,y]^t[x,y]-1)/(K[x,y]-1)];
      K[x_,y_]:=c2*t[x,y]^a2+d2*(Tanh[t[x,y]/g2-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

      t[x_,y_]:=(mm/2.35)*ro1*rm[x,y];
      rm[x_,y_]:=x-c3/Cos[y];
      s[y_]:=mv*rv[y];

      Alfa1=Chop[NIntegrate[4*f[x,y]*Exp[-t[x,y]-s[y]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,0,ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+d1)]},{x,c3/Cos[y],(c3+d1)/Cos[y]}]];
      alfa1=Chop[NIntegrate[4*f[x,y]*Exp[-t[x,y]-s[y]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,ArcTan[a3*Sec[z]/c3],ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+d1)]},{x,a3*Sec[z]/Sin[y],c3*Sec[y]}]
];

      Alfa=Alfa1+Alfa;
      alfa=alfa1+alfa;
      }
     ];
    Dose1=(1/(2.35))*ro1*1.0790495*10^2*En*mmm*Y*(Alfa+alfa);
    Dose=Dose+Dose1;
    }
   ];
  Gus={ro1,Dose};
  Gust[[j]]=Gus;
  }
 ];
Print[Gust];
```

Program F. Raspodela specifične jačine apsorbovane doze za ^{238}U u prostoriji

```
ClearAll[A1,B1,C1,d1,a1,a2,b1,b2,c1,c2,p1,p2,p3,d1,d11,d12,d13,d14,d15,d16,tblp2,tblp3,Med,Lij,Zek,Jez,Vuc
,Lan,Vev,Las];
ClearAll[tblUpol,tblThpol,tblKpol];
Med={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null
,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Lij={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Zek={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Jez={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Vuc={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Lan={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Vev={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Las={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,
Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};

tblp2={{-200},{-190},{-180},{-170},{-160},{-150},{-140},{-130},{-120},{-110},{-100},{-90},{-80},{-70},{-
60},{-50},{-40},{-30},{-20},{-
10},{0},{10},{20},{30},{40},{50},{60},{70},{80},{90},{100},{110},{120},{130},{140},{150},{160},{170},
{180},{190},{200}};
tblp3={{-150},{-140},{-130},{-120},{-110},{-100},{-90},{-80},{-70},{-60},{-50},{-40},{-30},{-20},{-
10},{0},{10},{20},{30},{40},{50},{60},{70},{80},{90},{100},{110},{120},{130},{140},{150}};


For [j=1,j<42, j++,
  {
   {p2} = tblp2[[j]];

   For [k=1,k<32,k++,
    {
     {p3} = tblp3[[k]];
     p1=0;

     (*Svi zidovi*)
     Alfa=0;
     alfa=0;

     For[i=1,i<25,i++,
      {

       ClearAll[a1,a2,b1,b2,c1,c2,d1,A1,B1,B2,C1];
       A1=280;
       B1=500;
       C1=400;
       a1=(A1/2);
       b1=(B1/2);
       c1=(C1/2);
       d11=20;
       d12=20;
       d13=20;
```

```
d14=20;
d15=20;
d16=20;

Polozaj={{a1+p1,b1-p2,c1+p3,B1,d11},{a1-p1,b1-p2,c1+p3,B1,d11},{b1-
p2,a1+p1,c1+p3,A1,d11},{b1+p2,a1+p1,c1+p3,A1,d11},{a1+p1,b1-p2,c1-p3,B1,d12},{a1-p1,b1-p2,c1-
p3,B1,d12},{b1-p2,a1+p1,c1-p3,A1,d12},{b1+p2,a1+p1,c1-p3,A1,d12},{a1+p1,c1-p3,b1+p2,C1,d13},{a1-
p1,c1-p3,b1+p2,C1,d13},{c1-p3,a1+p1,b1+p2,A1,d13},{c1+p3,a1+p1,b1+p2,A1,d13},{a1+p1,c1-p3,b1-
p2,C1,d14},{a1-p1,c1-p3,b1-p2,C1,d14},{c1-p3,a1+p1,b1-p2,A1,d14},{c1+p3,a1+p1,b1-
p2,A1,d14},{b1+p2,c1-p3,a1+p1,C1,d15},{b1-p2,c1-p3,a1+p1,C1,d15},{c1-p3,b1-
p2,a1+p1,B1,d15},{c1+p3,b1-p2,a1+p1,B1,d15},{b1+p2,c1-p3,a1-p1,C1,d16},{b1-p2,c1-p3,a1-
p1,C1,d16},{c1-p3,b1-p2,a1-p1,B1,d16},{c1+p3,b1-p2,a1-p1,B1,d16}};

{a2,b2,c2,B2,d1}=Polozaj[[i]];

f[x_,y_]:=Exp[(-3.0372989215392163`-0.6424718258880475` (s[x,y])^(1/3)+0.7051739003809021`
√(s[x, y]) -0.14889132491937151` (s[x,y])+0.00021929448119290752` (s[x,y])^2-5.246892567931348`*^-7
(s[x,y])^3) (1+5.927641164380769`*^-6 (rv[y]))];

rv[y_]:=c2/Cos[y];
s[x_,y_]:=x-c2/Cos[y];

Alfa1=Chop[NIntegrate[f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,c2/Cos[y],(c2+d1)/Cos[y]},PrecisionGoal→6]];
alfa1=Chop[NIntegrate[f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/c2],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y],c2*Sec[y]},
PrecisionGoal→6]];

Alfa=Alfa1+Alfa;
alfa=alfa1+alfa;

}
];
DoseZ=1.0790495*10^2*(Alfa+alfa);

(*Prozor*)
Gama=0;
gama=0;

For[i=1,i<5,i++,
{

ClearAll[a1,a2,b1,b2,c1,c2,d1,A1,B1,B2,C1];
A1=120;
B1=250;
C1=500;
a1=(A1/2);
b1=(B1/2);
c1=(C1/2);
d1=d13;

Polozaj={{a1+p1,b1-p3,c1+p2,B1},{a1-p1,b1-p3,c1+p2,B1},{b1-
p3,a1+p1,c1+p2,A1},{b1+p3,a1+p1,c1+p2,A1}};

{a2,b2,c2,B2}=Polozaj[[i]];

f[x_,y_]:=Exp[(-3.0372989215392163`-0.6424718258880475` (s[x,y])^(1/3)+0.7051739003809021`
√(s[x, y]) -0.14889132491937151` (s[x,y])+0.00021929448119290752` (s[x,y])^2-5.246892567931348`*^-7
(s[x,y])^3) (1+5.927641164380769`*^-6 (rv[y]))];
```

```
rv[y_]:=c2/Cos[y];
s[x_,y_]:=x-c2/Cos[y];

Gama1=Chop[NIntegrate[f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,c2/Cos[y],(c2+d1)/Cos[y]},PrecisionGoal→6]];
gama1=Chop[NIntegrate[f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/c2],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y],c2*Sec[y]},
PrecisionGoal→6]];

Gama=Gama1+Gama;
gama=gama1+gama;
}
];
DoseW=1.0790495*10^2*(Gama+gama);

(*Vrata*)
Delta=0;
delta=0;

For[i=1,i<5,i++,
{

ClearAll[a1,a2,b1,b2,c1,c2,d1,A1,B1,B2,C1];
A1=280;
B1=100;
C1=400;
a1=(A1/2);
b1=(B1/2);
c1=(C1/2);
d1=d12;

Polozaj={{a1-70+p1,b1-p2,c1-p3,B1},{a1-p1,b1-p2,c1-p3,B1},{b1-p2,a1-70+p1,c1-p3,A1-70},{b1+p2,a1-
70+p1,c1-p3,A1-70}};

{a2,b2,c2,B2}=Polozaj[[i]];

f[x_,y_]:=Exp[(-3.0372989215392163`-0.6424718258880475` (s[x,y])^(1/3)+0.7051739003809021`
√(s[x, y]) -0.14889132491937151` (s[x,y])+0.00021929448119290752` (s[x,y])^2-5.246892567931348`*^-7
(s[x,y])^3) (1+5.927641164380769`*^-6 (rv[y]))];

rv[y_]:=c2/Cos[y];
s[x_,y_]:=x-c2/Cos[y];

Delta1=Chop[NIntegrate[f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,c2/Cos[y],(c2+d1)/Cos[y]},PrecisionGoal→6]];
delta1=Chop[NIntegrate[f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/c2],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y],c2*Sec[y]},
PrecisionGoal→6]];

Delta=Delta1+Delta;
delta=delta1+delta;
}
];
DoseD=1.0790495*10^2*(Delta+delta);

Dose=DoseZ-DoseW-DoseD;
Dose1=DoseW+DoseD;
tblUpolZ={p2,p3,DoseZ};
tblUpol={p2,p3,Dose};
tblUWD={p2,p3,DoseW,DoseD};
```

```
    tblUWD1={p2,p3,Dose1};

    Vuc[[k]]=tblUpolZ;
    Med[[k]]=tblUpol;
    Zek[[k]]=tblUWD;
    Jez[[k]]=tblUWD1;
    }
   ];
  Las[[j]]={Vuc};
  Lij[[j]]={Med};
  Lan[[j]]={Zek};
  Vev[[j]]={Jez};
  }
 ];
Print[Las];
Print[Lij];
Print[Lan];
Print[Vev];
```

Program G. Zavisnost specifične jačine apsorbovane doze, za zračenje ^{238}U iz jednog zida, od dimenzija i rastojanja od zida

```
ClearAll[A1,B1,C1,A2,B2,C2,a1,a2,b1,b2,c1,c2,d1,Alfi,Gafi,Afic,Vivak,tblA,tblB,tblC,tbld,Dose];

Vivak={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Afic={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Alfi={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
Gafi={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null};
tbld={{10},{12.5},{15},{17.5},{20},{22.5},{25},{27.5},{30}};
tblA={{250},{300},{350},{400},{450},{500},{550},{600},{650},{700},{750},{800},{850},{900},{950},{10
00}};
tblB =
{{250},{300},{350},{400},{450},{500},{550},{600},{650},{700},{750},{800},{850},{900},{950},{1000}};
tblC = {{250},{260},{270},{280},{290},{300},{310},{320},{330},{350},{370},{400}};

For[r=1,r<10,r++,

 {
  {d1}=tbld[[r]];

  For[i=1,i<17,i++,

   {
    {A1}=tblA[[i]];
    a1=(A1/2);

    For[k=1,k<13,k++,

     {
      {C1}=tblC[[k]];
      c1=(C1/2);

      For [j=1, j<17, j++,
       {
        {B1} = tblB[[j]];
        b1=(B1/2);
```

```
f[x_,y_]:=Exp[(-3.0372989215392163`-0.6424718258880475` (s[x,y])^(1/3)+0.7051739003809021`
√(s[x, y]) -0.14889132491937151` (s[x,y])+0.00021929448119290752` (s[x,y])^2-5.246892567931348`*^-7
(s[x,y])^3) (1+5.927641164380769`*^-6 (rv[y]))];

rv[y_]:=c1/Cos[y];
s[x_,y_]:=x-c1/Cos[y];

(*ZidI (1,1)*)
a2=a1;
B2=B1;
b2=b1;
c2=c1;
Alfa1=Chop[NIntegrate[2*f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,c2/Cos[y],(c2+d1)/Cos[y]}]];
alfa1=Chop[NIntegrate[2*f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/c2],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y],c2*Sec[y]}]
];

(*ZidI (1,3)*)
a2=b1;
B2=A1;
b2=a1;
c2=c1;
Alfa2=Chop[NIntegrate[2*f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,0,ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,c2/Cos[y],(c2+d1)/Cos[y]}]];
alfa2=Chop[NIntegrate[2*f[x,y]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B2-
b2)/a2],ArcTan[b2/a2]},{y,ArcTan[a2*Sec[z]/c2],ArcTan[a2*Sec[z]/(c2+d1)]},{x,a2*Sec[z]/Sin[y],c2*Sec[y]}]
];

Alfa=Alfa1+Alfa2;
alfa=alfa1+alfa2;
Dose=1.0790495*10^2*(Alfa+alfa);
tblD={d1,A1,B1,C1,Dose};
Alfi[[j]]=tblD;
}
];
Gafi[[k]]={Alfi};
}
];
Afic [[i]]={Gafi};
}
];
Vivak [[r]]={Afic};
}
];
Print[Vivak];
```

Program H. Proračun ambijentalnog doznog ekvivalenta

```
ClearAll[tblU,tblTh,tblK,de1,a1,a2,b1,b2,c1,c2,g1,g2,d1,d2,a,b,c,a3,b3,c3,A1,B1,B3,C1,p,p1,p2,p3,x1,x2,x3];

Ubeton={{0.047`,1.644`,0.592`,0.129`,15.76`,-0.068`},{0.053`,1.858`,0.638`,0.116`,14.58`,-
0.0597`},{0.186`,2.75`,1.406`,-0.066`,15.98`,0.0073`},{0.242`,2.629`,1.471`,-
0.077`,18.69`,0.0146`},{0.273`,2.57`,1.486`,-0.081`,17.81`,0.0158`},{0.295`,2.531`,1.491`,-
0.082`,16.84`,0.0161`},{0.352`,2.438`,1.498`,-0.084`,16.13`,0.0182`},{0.395`,2.378`,1.495`,-
0.085`,15.97`,0.0193`},{0.47`,2.298`,1.476`,-0.083`,16.1`,0.0196`},{0.609`,2.186`,1.431`,-
0.078`,17.06`,0.0199`},{0.666`,2.147`,1.414`,-0.076`,17.22`,0.0202`},{0.773`,2.081`,1.392`,-
0.074`,15.33`,0.0202`},{0.806`,2.063`,1.385`,-0.073`,15.01`,0.0202`},{0.934`,2.007`,1.349`,-
0.068`,15.19`,0.0197`},{1.12`,1.943`,1.301`,-0.06`,15.88`,0.0185`},{1.246`,1.909`,1.27`,-
0.055`,16.55`,0.0176`},{1.39`,1.871`,1.247`,-0.051`,16.37`,0.0169`},{1.509`,1.846`,1.225`,-
0.047`,16.41`,0.0159`},{1.661`,1.819`,1.2`,-0.042`,16.35`,0.0145`},{1.76`,1.806`,1.186`,-
0.04`,15.44`,0.0129`},{1.848`,1.794`,1.174`,-0.037`,15.06`,0.0119`},{2.118`,1.762`,1.14`,-
0.03`,13.77`,0.0085`},{2.204`,1.752`,1.12`,-0.028`,13.33`,0.0075`},{2.435`,1.725`,1.105`,-
0.022`,12.04`,0.0052`}};

Umi={{0.047`,0.04`,0.9577`,0.0002456`},{0.053`,0.022`,0.7759`,0.0002285`},{0.186`,0.04`,0.3023`,0.0001508
`},{0.242`,0.084`,0.2730`,0.0001376`},{0.273`,0.059`,0.2607`,0.0001317`},{0.295`,0.207`,0.2531`,0.0001280`}
,{0.352`,0.348`,0.2365`,0.0001199`},{0.395`,0.012`,0.2262`,0.0001149`},{0.47`,0.021`,0.2105`,0.0001071`},{0
.609`,0.43`,0.1884`,0.00009595`},{0.666`,0.029`,0.1809`,0.00009216`},{0.773`,0.077`,0.1692`,0.00008616`},{
0.806`,0.021`,0.1660`,0.00008454`},{0.934`,0.036`,0.1547`,0.00007883`},{1.12`,0.156`,0.1414`,0.00007206`},
{1.246`,0.083`,0.1340`,0.00006828`},{1.39`,0.092`,0.1268`,0.00006460`},{1.509`,0.037`,0.1216`,0.00006196`}
,{1.661`,0.02`,0.1158`,0.00005890`},{1.76`,0.18`,0.1124`,0.00005713`},{1.848`,0.027`,0.1096`,0.00005568`},{
2.118`,0.011`,0.1023`,0.00005178`},{2.204`,0.062`,0.1002`,0.00005069`},{2.435`,0.024`,0.09530`,0.00004805`
}};

Utiss={{0.047,4.422,1.426,-0.077,13.70,0.0301},{0.053,4.802,1.617,-0.108,13.78,0.0460},{0.186,3.477,2.179,-
0.177,14.37,0.0733},{0.242,3.111,2.102,-0.171,14.24,0.0697},{0.273,2.974,2.051,-
0.166,14.18,0.0667},{0.295,2.894,2.014,-0.163,14.15,0.0645},{0.352,2.739,1.927,-
0.153,14.11,0.0605},{0.395,2.650,1.868,-0.147,14.12,0.0581},{0.47,2.519,1.783,-
0.137,14.21,0.0545},{0.609,2.358,1.652,-0.119,14.30,0.0474},{0.666,2.309,1.616,-
0.113,14.32,0.0448},{0.773,2.230,1.556,-0.102,14.35,0.0409},{0.806,2.209,1.538,-
0.100,14.36,0.0398},{0.934,2.138,1.463,-0.090,14.43,0.0366},{1.12,2.054,1.381,-
0.079,14.47,0.0327},{1.246,2.007,1.340,-0.072,14.46,0.0302},{1.39,1.962,1.300,-
0.065,14.42,0.0276},{1.509,1.930,1.273,-0.060,14.37,0.0255},{1.661,1.896,1.239,-
0.053,14.28,0.0228},{1.76,1.876,1.219,-0.049,14.20,0.0210},{1.848,1.860,1.202,-
0.046,14.12,0.0196},{2.118,1.816,1.158,-0.036,13.65,0.0154},{2.204,1.803,1.146,-
0.034,13.45,0.0142},{2.435,1.772,1.116,-0.027,13.03,0.0111}};

miUTiss={{0.047,0.2102,0.04530},{0.053,0.1984,0.03723},{0.186,0.1374,0.02901},{0.242,0.1261,0.03050},{0
.273,0.1209,0.03107},{0.295,0.1176,0.03151},{0.352,0.1101,0.03208},{0.395,0.1053,0.03243},{0.470,0.09819,
0.03261},{0.609,0.08796,0.03248},{0.666,0.08456,0.03224},{0.773,0.07904,0.03184},{0.806,0.07753,0.03171
},{0.934,0.07232,0.03102},{1.120,0.06616,0.02994},{1.246,0.06268,0.02923},{1.390,0.05925,0.02852},{1.509
,0.05678,0.02799},{1.661,0.05401,0.02722},{1.760,0.05240,0.02677},{1.848,0.05106,0.02639},{2.118,0.04739
,0.02530},{2.204,0.04637,0.02497},{2.435,0.04393,0.02416}};


de1 = 20;
p1=0;
p2=0;
p3=0;
p=15;
```

```
Delfin={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,N
ull,Null,Null,Null};

For [i=1, i<25, i++,
  {
   ClearAll[a1,b1,c1,g1,d1,a2,b2,c2,g2,d2];

   {En,b1,c1,a1,g1,d1}=Ubeton[[i]];
   {En,Y,mm,mv}=Umi[[i]];
   {En,b2,c2,a2,g2,d2}=Utiss[[i]];
   {En,mtis,mmm}=miUTiss[[i]];

   Alfa=0;
   alfa=0;
   Gama=0;
   gama=0;

   For[k=1,k<3,k++,
    {

     ClearAll[a,b,c,a3,b3,c3,A1,B1,C1,B3];
     A1=280;
     B1=500;
     C1=400;
     a=(A1/2);
     b=(B1/2);
     c=(C1/2);

     Polozaj={{a,b,c,B1},{b,a,c,A1},{a,c,b,C1},{c,a,b,A1},{b,c,a,C1},{c,b,a,B1}};
     Polozaj1={{a,b,c,B1},{b,a,c,A1}};
     {a3,b3,c3,B3}=Polozaj1[[k]];

     f[x_,y_,z_]:=B11[x,y,z]*B22[x,y,z];

     B11[x_,y_,z_]:=If[K11[x,y,z]==1,1+(b1-1)*t[x,y,z],1+(b1-1)*(K11[x,y,z]^t[x,y,z]-1)/(K11[x,y,z]-1)];
     K11[x_,y_,z_]:=c1*t[x,y,z]^a1+d1*(Tanh[t[x,y,z]/g1-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

     B22[x_,y_,z_]:=If[K22[x,y,z]==1,1+(b2-1)*h[x,y,z],1+(b2-1)*(K22[x,y,z]^h[x,y,z]-1)/(K22[x,y,z]-1)];
     K22[x_,y_,z_]:=c2*h[x,y,z]^a2+d2*(Tanh[h[x,y,z]/g2-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

     t[x_,y_,z_]:=mm*x1[x,y,z];
     s[x_,y_,z_]:=mv*x2[x,y,z];
     h[x_,y_,z_]:=mtis*x3[x,y,z];

     x1[x_,y_,z_]:=x-c3/Cos[y];
     x2[x_,y_,z_]:=(c3/Cos[y])-15;

     x3[x_,y_,z_]:=1/(Abs[Cos[y]]);

     Alfa1=Re[Chop[Nintegrate[((x/(x-14))^2)*f[x,y,z]*Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B3-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,0,ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+de1)]},{x,c3/Cos[y],(c3+de1)/Cos[y]}]]];
     alfa1=Re[Chop[Nintegrate[((x/(x-14))^2)*f[x,y,z]*Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B3-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,ArcTan[a3*Sec[z]/c3],ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+de1)]},{x,a3*Sec[z]/Sin[y],c3*Sec[y]
}]]];

     Alfa=Alfa1+Alfa;
     alfa=alfa1+alfa;
     }
    ];
```

```
  For[j=1,j<5,j++,
   {

    ClearAll[a,b,c,a3,b3,c3,A1,B1,C1,B3];
    A1=280;
    B1=500;
    C1=400;
    a=(A1/2);
    b=(B1/2);
    c=(C1/2);

    Polozaj={{a,b,c,B1},{b,a,c,A1},{a,c,b,C1},{c,a,b,A1},{b,c,a,C1},{c,b,a,B1}};
    Polozaj2={{a,c,b,C1},{b,c,a,C1},{c,a,b,A1},{c,b,a,B1}};

    {a3,b3,c3,B3}=Polozaj2[[j]];

    f[x_,y_,z_]:=B11[x,y,z]*B22[x,y,z];

    B11[x_,y_,z_]:=If[K11[x,y,z]==1,1+(b1-1)*t[x,y,z],1+(b1-1)*(K11[x,y,z]^t[x,y,z]-1)/(K11[x,y,z]-1)];
    K11[x_,y_,z_]:=c1*t[x,y,z]^a1+d1*(Tanh[t[x,y,z]/g1-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

    B22[x_,y_,z_]:=If[K22[x,y,z]==1,1+(b2-1)*h[x,y,z],1+(b2-1)*(K22[x,y,z]^h[x,y,z]-1)/(K22[x,y,z]-1)];
    K22[x_,y_,z_]:=c2*h[x,y,z]^a2+d2*(Tanh[h[x,y,z]/g2-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

    t[x_,y_,z_]:=mm*x1[x,y,z];
    s[x_,y_,z_]:=mv*x2[x,y,z];
    h[x_,y_,z_]:=mtis*x3[x,y,z];

    x1[x_,y_,z_]:=x-c3/Cos[y];
    x2[x_,y_,z_]:=(c3/Cos[y])-15;

    x3[x_,y_,z_]:=If[j<3, 1/(Abs[Sin[z]*Sin[y]]),1/(Abs[Cos[z]*Sin[y]])];

    Gama1=Re[Chop[Nintegrate[((x/(x-14))^2)*f[x,y,z]*Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B3-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,0,ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+de1)]},{x,c3/Cos[y],(c3+de1)/Cos[y]}]]];
    gama1=Re[Chop[Nintegrate[((x/(x-14))^2)*f[x,y,z]*Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B3-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,ArcTan[a3*Sec[z]/c3],ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+de1)]},{x,a3*Sec[z]/Sin[y],c3*Sec[y]
}]]];

    Gama=Gama1+Gama;
    gama=gama1+gama;
    }
   ];
  Dose=1.0790495*10^2*En*mmm*Y*4*(Alfa+alfa+Gama+gama);
  tblU={En,Dose};
  Delfin[[i]]=tblU;
  }
 ];
Print [Delfin];
```

Program I. Izračunavanje doznog ekvivalenta na rastojanju 1 cm od površine *ICRU* sfere

```
ClearAll[tblU,tblTh,tblK,tbld,de1,de2,a1,a2,b1,b2,c1,c2,g1,g2,d1,d2,a,b,c,a3,b3,c3,A1,B1,B3,C1,p,p1,p2,p3];

Ubeton={{0.047`,1.644`,0.592`,0.129`,15.76`,-0.068`},{0.053`,1.858`,0.638`,0.116`,14.58`,-
0.0597`},{0.186`,2.75`,1.406`,-0.066`,15.98`,0.0073`},{0.242`,2.629`,1.471`,-
0.077`,18.69`,0.0146`},{0.273`,2.57`,1.486`,-0.081`,17.81`,0.0158`},{0.295`,2.531`,1.491`,-
0.082`,16.84`,0.0161`},{0.352`,2.438`,1.498`,-0.084`,16.13`,0.0182`},{0.395`,2.378`,1.495`,-
0.085`,15.97`,0.0193`},{0.47`,2.298`,1.476`,-0.083`,16.1`,0.0196`},{0.609`,2.186`,1.431`,-
0.078`,17.06`,0.0199`},{0.666`,2.147`,1.414`,-0.076`,17.22`,0.0202`},{0.773`,2.081`,1.392`,-
0.074`,15.33`,0.0202`},{0.806`,2.063`,1.385`,-0.073`,15.01`,0.0202`},{0.934`,2.007`,1.349`,-
0.068`,15.19`,0.0197`},{1.12`,1.943`,1.301`,-0.06`,15.88`,0.0185`},{1.246`,1.909`,1.27`,-
0.055`,16.55`,0.0176`},{1.39`,1.871`,1.247`,-0.051`,16.37`,0.0169`},{1.509`,1.846`,1.225`,-
0.047`,16.41`,0.0159`},{1.661`,1.819`,1.2`,-0.042`,16.35`,0.0145`},{1.76`,1.806`,1.186`,-
0.04`,15.44`,0.0129`},{1.848`,1.794`,1.174`,-0.037`,15.06`,0.0119`},{2.118`,1.762`,1.14`,-
0.03`,13.77`,0.0085`},{2.204`,1.752`,1.12`,-0.028`,13.33`,0.0075`},{2.435`,1.725`,1.105`,-
0.022`,12.04`,0.0052`}};

Umi={{0.047`,0.04`,0.9577`,0.0002456`},{0.053`,0.022`,0.7759`,0.0002285`},{0.186`,0.04`,0.3023`,0.0001508
`},{0.242`,0.084`,0.2730`,0.0001376`},{0.273`,0.059`,0.2607`,0.0001317`},{0.295`,0.207`,0.2531`,0.0001280`}
,{0.352`,0.348`,0.2365`,0.0001199`},{0.395`,0.012`,0.2262`,0.0001149`},{0.47`,0.021`,0.2105`,0.0001071`},{0
.609`,0.43`,0.1884`,0.00009595`},{0.666`,0.029`,0.1809`,0.00009216`},{0.773`,0.077`,0.1692`,0.00008616`},{
0.806`,0.021`,0.1660`,0.00008454`},{0.934`,0.036`,0.1547`,0.00007883`},{1.12`,0.156`,0.1414`,0.00007206`},
{1.246`,0.083`,0.1340`,0.00006828`},{1.39`,0.092`,0.1268`,0.00006460`},{1.509`,0.037`,0.1216`,0.00006196`}
,{1.661`,0.02`,0.1158`,0.00005890`},{1.76`,0.18`,0.1124`,0.00005713`},{1.848`,0.027`,0.1096`,0.00005568`},{
2.118`,0.011`,0.1023`,0.00005178`},{2.204`,0.062`,0.1002`,0.00005069`},{2.435`,0.024`,0.09530`,0.00004805`
}};

UTiss={{0.047,4.422,1.426,-0.077,13.70,0.0301},{0.053,4.802,1.617,-0.108,13.78,0.0460},{0.186,3.477,2.179,-
0.177,14.37,0.0733},{0.242,3.111,2.102,-0.171,14.24,0.0697},{0.273,2.974,2.051,-
0.166,14.18,0.0667},{0.295,2.894,2.014,-0.163,14.15,0.0645},{0.352,2.739,1.927,-
0.153,14.11,0.0605},{0.395,2.650,1.868,-0.147,14.12,0.0581},{0.47,2.519,1.783,-
0.137,14.21,0.0545},{0.609,2.358,1.652,-0.119,14.30,0.0474},{0.666,2.309,1.616,-
0.113,14.32,0.0448},{0.773,2.230,1.556,-0.102,14.35,0.0409},{0.806,2.209,1.538,-
0.100,14.36,0.0398},{0.934,2.138,1.463,-0.090,14.43,0.0366},{1.12,2.054,1.381,-
0.079,14.47,0.0327},{1.246,2.007,1.340,-0.072,14.46,0.0302},{1.39,1.962,1.300,-
0.065,14.42,0.0276},{1.509,1.930,1.273,-0.060,14.37,0.0255},{1.661,1.896,1.239,-
0.053,14.28,0.0228},{1.76,1.876,1.219,-0.049,14.20,0.0210},{1.848,1.860,1.202,-
0.046,14.12,0.0196},{2.118,1.816,1.158,-0.036,13.65,0.0154},{2.204,1.803,1.146,-
0.034,13.45,0.0142},{2.435,1.772,1.116,-0.027,13.03,0.0111}};

miUTiss={{0.047,0.2102,0.04530},{0.053,0.1984,0.03723},{0.186,0.1374,0.02901},{0.242,0.1261,0.03050},{0
.273,0.1209,0.03107},{0.295,0.1176,0.03151},{0.352,0.1101,0.03208},{0.395,0.1053,0.03243},{0.470,0.09819,
0.03261},{0.609,0.08796,0.03248},{0.666,0.08456,0.03224},{0.773,0.07904,0.03184},{0.806,0.07753,0.03171
},{0.934,0.07232,0.03102},{1.120,0.06616,0.02994},{1.246,0.06268,0.02923},{1.390,0.05925,0.02852},{1.509
,0.05678,0.02799},{1.661,0.05401,0.02722},{1.760,0.05240,0.02677},{1.848,0.05106,0.02639},{2.118,0.04739
,0.02530},{2.204,0.04637,0.02497},{2.435,0.04393,0.02416}};

de1 = 20;
p=14;
pr=15;

Delfin={Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,Null,N
ull,Null,Null,Null};
```

```
For [i=1, i<25, i++,
  {
   ClearAll[a1,b1,c1,g1,d1,a2,b2,c2,g2,d2,p1,p2,p3];

   {En,b1,c1,a1,g1,d1}=Ubeton[[i]];
   {En,Y,mm,mv}=Umi[[i]];
   {En,b2,c2,a2,g2,d2}=UTiss[[i]];
   {En,mtis,mmm}=miUTiss[[i]];

   Alfa=0;
   alfa=0;
   Gama=0;
   gama=0;
   Delta=0;
   delta=0;

   For[k=1,k<13,k++,
    {

     ClearAll[a,b,c,a3,b3,c3,A1,B1,C1,B3];
     A1=280;
     B1=500;
     C1=400;
     a=(A1/2);
     b=(B1/2);
     c=(C1/2);

     Polozaj={{a,b,c+p,B1},{b,a,c+p,A1},{a,b,c-p,B1},{b,a,c-p,A1},{c-p,a,b,A1},{c+p,a,b,A1},{c-
p,b,a,B1},{c+p,b,a,B1},{a,c-p,b,C1},{b,c-p,a,C1},{a,c+p,b,C1},{b,c+p,a,C1}};

     Tabp={{0,0,p},{0,0,p},{0,0,-p},{0,0,-p},{-p,0,0},{p,0,0},{-p,0,0},{p,0,0},{0,-p,0},{0,-p,0},{0,p,0},{0,p,0}};

     {a3,b3,c3,B3}=Polozaj[[k]];
     {p1,p2,p3}=Tabp[[k]];

     f[x_,y_,z_]:=B11[x,y,z]*B22[x,y,z];

     B11[x_,y_,z_]:=If[K11[x,y,z]==1,1+(b1-1)*t[x,y,z],1+(b1-1)*(K11[x,y,z]^t[x,y,z]-1)/(K11[x,y,z]-1)];
     K11[x_,y_,z_]:=c1*t[x,y,z]^a1+d1*(Tanh[t[x,y,z]/g1-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

     B22[x_,y_,z_]:=If[K22[x,y,z]==1,1+(b2-1)*h[x,y,z],1+(b2-1)*(K22[x,y,z]^h[x,y,z]-1)/(K22[x,y,z]-1)];
     K22[x_,y_,z_]:=c2*h[x,y,z]^a2+d2*(Tanh[h[x,y,z]/g2-2]-Tanh[-2])/(1-Tanh[-2]);

     t[x_,y_,z_]:=mm*x1[x,y,z];
     s[x_,y_,z_]:=mv*x2[x,y,z];
     h[x_,y_,z_]:=mtis*x3[x,y,z];

     x1[x_,y_,z_]:=x-c3/Cos[y];
     x2[x_,y_,z_]:=(c3/Cos[y])-x3[x,y,z];

     x3[x_,y_,z_]:=Abs[-
(p1*Sin[y]*Cos[z]+p2*Sin[y]*Sin[z]+p3*Cos[y])+((p1*Sin[y]*Cos[z]+p2*Sin[y]*Sin[z]+p3*Cos[y])^2+pr^2-
(p1^2+p2^2+p3^2))^(1/2)];

     Alfa1=Re[Chop[NIntegrate[f[x,y,z]*Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B3-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,0,ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+de1)]},{x,c3/Cos[y],(c3+de1)/Cos[y]}]]];
     alfa1=Re[Chop[NIntegrate[f[x,y,z]*Exp[-t[x,y,z]-s[x,y,z]-h[x,y,z]]*Sin[y],{z,ArcTan[-(B3-
b3)/a3],ArcTan[b3/a3]},{y,ArcTan[a3*Sec[z]/c3],ArcTan[a3*Sec[z]/(c3+de1)]},{x,a3*Sec[z]/Sin[y],c3*Sec[y]
}]]];
     Alfa=Alfa1+Alfa;
```

```
    alfa=alfa1+alfa;
    }
   ];

  Dose=1.0790495*10^2*En*mmm*Y*2*(Alfa+alfa);
  tblU={En,Dose};
  Delfin[[i]]=tblU;
  }
 ];
Print [Delfin];
```

Program J. Određivanje srednje apsorbovane doze u *ICRU* sferi

```
ClearAll[de1,a2,b2,c2,o2,v2,B2,p,p1,p2,p3];

miUTiss={{0.047,0.2102,0.04530},{0.053,0.1984,0.03723},{0.186,0.1374,0.02901},{0.242,0.1261,0.03050},{0
.273,0.1209,0.03107},{0.295,0.1176,0.03151},{0.352,0.1101,0.03208},{0.395,0.1053,0.03243},{0.470,0.09819,
0.03261},{0.609,0.08796,0.03248},{0.666,0.08456,0.03224},{0.773,0.07904,0.03184},{0.806,0.07753,0.03171
},{0.934,0.07232,0.03102},{1.120,0.06616,0.02994},{1.246,0.06268,0.02923},{1.390,0.05925,0.02852},{1.509
,0.05678,0.02799},{1.661,0.05401,0.02722},{1.760,0.05240,0.02677},{1.848,0.05106,0.02639},{2.118,0.04739
,0.02530},{2.204,0.04637,0.02497},{2.435,0.04393,0.02416}};
Umi={{0.047`,0.04`,0.9577`,0.0002456`},{0.053`,0.022`,0.7759`,0.0002285`},{0.186`,0.04`,0.3023`,0.0001508
`},{0.242`,0.084`,0.2730`,0.0001376`},{0.273`,0.059`,0.2607`,0.0001317`},{0.295`,0.207`,0.2531`,0.0001280`}
,{0.352`,0.348`,0.2365`,0.0001199`},{0.395`,0.012`,0.2262`,0.0001149`},{0.47`,0.021`,0.2105`,0.0001071`},{0
.609`,0.43`,0.1884`,0.00009595`},{0.666`,0.029`,0.1809`,0.00009216`},{0.773`,0.077`,0.1692`,0.00008616`},{
0.806`,0.021`,0.1660`,0.00008454`},{0.934`,0.036`,0.1547`,0.00007883`},{1.12`,0.156`,0.1414`,0.00007206`},
{1.246`,0.083`,0.1340`,0.00006828`},{1.39`,0.092`,0.1268`,0.00006460`},{1.509`,0.037`,0.1216`,0.00006196`}
,{1.661`,0.02`,0.1158`,0.00005890`},{1.76`,0.18`,0.1124`,0.00005713`},{1.848`,0.027`,0.1096`,0.00005568`},{
2.118`,0.011`,0.1023`,0.00005178`},{2.204`,0.062`,0.1002`,0.00005069`},{2.435`,0.024`,0.09530`,0.00004805`
}};

de1 = 20;
p=15;

(*Za energiju 2435 keV*)
i=24;

{En,Y,mm,mv}=Umi[[i]];
{En,mtis,mmm}=miUTiss[[i]];

(*IZID 500*)

U2435ConB[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=0.9990740530500614`_+0.06324939497213267` *
x1[x,y,z,p1,p2,p3]+0.0006395767399895163` *(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^2-8.967639710793219`*^-6
*(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^3+1.904620439354254`*^-7 *(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^4-1.532830492209317`*^-9
*(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^5;
U2435Tiss[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=0.9995035642709782`_-0.014013703776281139`* x3[x,y,z,p1,p2,p3]-
0.00012148963186428364` *(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^2+2.211367155564452`*^-6
*(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^3+5.224335797415276`*^-8 *(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^4-9.536348082209126`*^-10
*(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^5;

f[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=f1[x,y,z,p1,p2,p3]*f2[x,y,z,p1,p2,p3]*f3[x,y,z,p1,p2,p3];

f1[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=U2435ConB[x,y,z,p1,p2,p3]*Exp[-s[x,y,z,p1,p2,p3]];
f2[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=U2435Tiss[x,y,z,p1,p2,p3];
f3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Exp[-t[x,y,z,p1,p2,p3]];
```

```
t[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=mm*x1[x,y,z,p1,p2,p3];
s[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=mv*x2[x,y,z,p1,p2,p3];

x1[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=x-c2[p3]/Cos[y];
x2[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=(c2[p3]/Cos[y]);

(*Zid 500 prviGornji I (1,1)*)
a2[p1_]:=(280/2)+p1;
B2=500;
b2[p2_]:=(500/2)+p2;
c2[p3_]:=(400/2)+p3;

x3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Abs[-
(p1*Sin[y]*Cos[z]+p2*Sin[y]*Sin[z]+p3*Cos[y])+((p1*Sin[y]*Cos[z]+p2*Sin[y]*Sin[z]+p3*Cos[y])^2+p^2-
(p1^2+p2^2+p3^2))^(1/2)];

Alfa1g=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p2]/a2[p1]]},{y,0,ArcTan[a2[p1]*Sec[z]/(c2[p3]+de1)]},{x,c2[p3]/Cos[y],(c2[p
3]+de1)/Cos[y]}]]];
alfa1g=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p2]/a2[p1]]},{y,ArcTan[a2[p1]*Sec[z]/c2[p3]],ArcTan[a2[p1]*Sec[z]/(c2[p3]+d
e1)]},{x,a2[p1]*Sec[z]/Sin[y],c2[p3]*Sec[y]},PrecisionGoal→3]]];

(*Zid 500 prvi IDesno (1,3)*)
a2[p2_]:=(500/2)+p2;
B2=280;
b2[p1_]:=(280/2)+p1;
c2[p3_]:=(400/2)+p3;

x3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Abs[-
(p1*Sin[y]*Sin[z]+p2*Sin[y]*Cos[z]+p3*Cos[y])+((p1*Sin[y]*Sin[z]+p2*Sin[y]*Cos[z]+p3*Cos[y])^2+p^2-
(p1^2+p2^2+p3^2))^(1/2)];

Alfa1r=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p1]/a2[p2]]},{y,0,ArcTan[a2[p2]*Sec[z]/(c2[p3]+de1)]},{x,c2[p3]/Cos[y],(c2[p
3]+de1)/Cos[y]}]]];
alfa1r=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p1]/a2[p2]]},{y,ArcTan[a2[p2]*Sec[z]/c2[p3]],ArcTan[a2[p2]*Sec[z]/(c2[p3]+d
e1)]},{x,a2[p2]*Sec[z]/Sin[y],c2[p3]*Sec[y]},PrecisionGoal→3]]];

ClearAll[A1,B1,C1,O1,V1,a1,a2,b1,b2,c1,c2,v1,v2,o1,o2];

(*IZID 400*)

U2435ConB[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=0.9990740530500614`_+0.06324939497213267` *
x1[x,y,z,p1,p2,p3]+0.0006395767399895163` *(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^2-8.967639710793219`*^-6
*(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^3+1.904620439354254`*^-7 *(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^4-1.532830492209317`*^-9
*(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^5;
U2435Tiss[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=0.9995035642709782`_-0.014013703776281139`* x3[x,y,z,p1,p2,p3]-
0.00012148963186428364` *(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^2+2.211367155564452`*^-6
*(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^3+5.224335797415276`*^-8 *(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^4-9.536348082209126`*^-10
*(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^5;

f[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=f1[x,y,z,p1,p2,p3]*f2[x,y,z,p1,p2,p3]*f3[x,y,z,p1,p2,p3];

f1[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=U2435ConB[x,y,z,p1,p2,p3]*Exp[-s[x,y,z,p1,p2,p3]];
```

```
f2[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=U2435Tiss[x,y,z,p1,p2,p3];
f3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Exp[-t[x,y,z,p1,p2,p3]];

t[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=mm*x1[x,y,z,p1,p2,p3];
s[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=mv*x2[x,y,z,p1,p2,p3];

x1[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=x-o2[p2]/Cos[y];
x2[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=(o2[p2]/Cos[y]);

(*Zid 400 I Gornji(1,1)*)
a2[p1_]:=(280/2)+p1;
B2=400;
b2[p3_]:=(400/2)+p3;
o2[p2_]:=(500/2)-p2;

x3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Abs[-(p1*Sin[y]*Cos[z]-p2*Cos[y]+p3*Sin[y]*Sin[z])+((p1*Sin[y]*Cos[z]-
p2*Cos[y]+p3*Sin[y]*Sin[z])^2+p^2-(p1^2+p2^2+p3^2))^(1/2)];

Gama1g=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p2,-15,15},{p3,-(225-(p2)^2)^(1/2),(225-
(p2)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p3]/a2[p1]]},{y,0,ArcTan[a2[p1]*Sec[z]/(o2[p2]+de1)]},{x,o2[p2]/Cos[y],(o2[p
2]+de1)/Cos[y]}]]];
gama1g=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p2,-15,15},{p3,-(225-(p2)^2)^(1/2),(225-
(p2)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p3]/a2[p1]]},{y,ArcTan[a2[p1]*Sec[z]/o2[p2]],ArcTan[a2[p1]*Sec[z]/(o2[p2]+d
e1)]},{x,a2[p1]*Sec[z]/Sin[y],o2[p2]*Sec[y]},PrecisionGoal→3]]];

(*Zid 400 I Desno(1,3)*)
a2[p3_]:=(400/2)+p3;
B2=280;
b2[p1_]:=(280/2)+p1;
o2[p2_]:=(500/2)-p2;

x3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Abs[-(p1*Sin[y]*Sin[z]-p2*Cos[y]+p3*Sin[y]*Cos[z])+((p1*Sin[y]*Sin[z]-
p2*Cos[y]+p3*Sin[y]*Cos[z])^2+p^2-(p1^2+p2^2+p3^2))^(1/2)];

Gama1r=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p2,-15,15},{p3,-(225-(p2)^2)^(1/2),(225-
(p2)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p1]/a2[p3]]},{y,0,ArcTan[a2[p3]*Sec[z]/(o2[p2]+de1)]},{x,o2[p2]/Cos[y],(o2[p
2]+de1)/Cos[y]}]]];
gama1r=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p2,-15,15},{p3,-(225-(p2)^2)^(1/2),(225-
(p2)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p1]/a2[p3]]},{y,ArcTan[a2[p3]*Sec[z]/o2[p2]],ArcTan[a2[p3]*Sec[z]/(o2[p2]+d
e1)]},{x,a2[p3]*Sec[z]/Sin[y],o2[p2]*Sec[y]},PrecisionGoal→3]]];

ClearAll[A1,B1,C1,A2,B2,C2,O1,V1,O2,V2,a1,a2,b1,b2,c1,c2,v1,v2,o1,o2];

(*PLAFON*)

U2435ConB[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=0.9990740530500614`_+0.06324939497213267` *
x1[x,y,z,p1,p2,p3]+0.0006395767399895163` *(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^2-8.967639710793219`*^-6
*(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^3+1.904620439354254`*^-7 *(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^4-1.532830492209317`*^-9
*(x1[x,y,z,p1,p2,p3])^5;
U2435Tiss[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=0.9995035642709782`_-0.014013703776281139`* x3[x,y,z,p1,p2,p3]-
0.00012148963186428364` *(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^2+2.211367155564452`*^-6
*(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^3+5.224335797415276`*^-8 *(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^4-9.536348082209126`*^-10
*(x3[x,y,z,p1,p2,p3])^5;

f[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=f1[x,y,z,p1,p2,p3]*f2[x,y,z,p1,p2,p3]*f3[x,y,z,p1,p2,p3];
```

```
f1[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=U2435ConB[x,y,z,p1,p2,p3]*Exp[-s[x,y,z,p1,p2,p3]];
f2[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=U2435Tiss[x,y,z,p1,p2,p3];
f3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Exp[-t[x,y,z,p1,p2,p3]];

t[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=mm*x1[x,y,z,p1,p2,p3];
s[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=mv*x2[x,y,z,p1,p2,p3];

x1[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=x-v2[p1]/Cos[y];
x2[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=(v2[p1]/Cos[y]);

(*Plafon I Gornji(1,1)*)
a2[p3_]:=(500/2)+p3;
B2=400;
b2[p2_]:=(400/2)+p2;
v2[p1_]:=(280/2)-p1;

x3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Abs[-(-p1*Cos[y]+p2*Sin[y]*Sin[z]+p3*Sin[y]*Cos[z])+((-
p1*Cos[y]+p2*Sin[y]*Sin[z]+p3*Sin[y]*Cos[z])^2+p^2-(p1^2+p2^2+p3^2))^(1/2)];

Zeta1g=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p2]/a2[p3]]},{y,0,ArcTan[a2[p3]*Sec[z]/(v2[p1]+de1)]},{x,v2[p1]/Cos[y],(v2[p
1]+de1)/Cos[y]}]]];
zeta1g=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p2]/a2[p3]]},{y,ArcTan[a2[p3]*Sec[z]/v2[p1]],ArcTan[a2[p3]*Sec[z]/(v2[p1]+d
e1)]},{x,a2[p3]*Sec[z]/Sin[y],v2[p1]*Sec[y]},PrecisionGoal→3]]];

(*Plafon I (1,3) Desno*)
a2[p2_]:=(400/2)+p2;
B2=500;
b2[p3_]:=(500/2)-p3;
v2[p1_]:=(280/2)-p1;

x3[x_,y_,z_,p1_,p2_,p3_]:=Abs[-(-p3*Sin[y]*Sin[z]-p1*Cos[y]+p2*Sin[y]*Cos[z])+((-p3*Sin[y]*Sin[z]-
p1*Cos[y]+p2*Sin[y]*Cos[z])^2+p^2-(p1^2+p2^2+p3^2))^(1/2)];

Zeta1r=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p3]/a2[p2]]},{y,0,ArcTan[a2[p2]*Sec[z]/(v2[p1]+de1)]},{x,v2[p1]/Cos[y],(v2[p
1]+de1)/Cos[y]}]]];
zeta1r=Abs[Chop[NIntegrate[f[x,y,z,p1,p2,p3]*Sin[y],{p3,-15,15},{p2,-(225-(p3)^2)^(1/2),(225-
(p3)^2)^(1/2)},{p1,-(225-(p2)^2-(p3)^2)^(1/2),(225-(p2)^2-
(p3)^2)^(1/2)},{z,0,ArcTan[b2[p3]/a2[p2]]},{y,ArcTan[a2[p2]*Sec[z]/v2[p1]],ArcTan[a2[p2]*Sec[z]/(v2[p1]+d
e1)]},{x,a2[p2]*Sec[z]/Sin[y],v2[p1]*Sec[y]},PrecisionGoal→3]]];

Alfa1=Alfa1g+Alfa1r;
alfa1=alfa1g+alfa1r;
Gama1=Gama1g+Gama1r;
gama1=gama1g+gama1r;
Zeta1=Zeta1g+Zeta1r;
zeta1=zeta1g+zeta1r;

DoseA1=(4/((4/3)*Pi*(15^3)))*1.0790495*10^2*En*Y*mmm*2*(Alfa1+alfa1);
DoseB1=(4/((4/3)*Pi*(15^3)))*1.0790495*10^2*En*Y*mmm*2*(Gama1+gama1);
DoseC1=(4/((4/3)*Pi*(15^3)))*1.0790495*10^2*En*Y*mmm*2*(Zeta1+zeta1);
Dose1=DoseA1+DoseB1+DoseC1;
Print[{En,Dose1}];
```