



# ЗБОРНИК РАДОВА



## XXX СИМПОЗИЈУМ ДРУШТВА ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ

2. - 4. октобар 2019. године  
Хотел “Дивчибаре”, Дивчибаре, Србија

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА  
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**



# **ЗБОРНИК РАДОВА**

**XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
Дивчибаре  
2- 4. октобар 2019. године**

**Београд  
2019. године**

**RADIATION PROTECTION SOCIETY OF  
SERBIA AND MONTENEGRO**



# PROCEEDINGS

**XXX SYMPOSIUM RPSSM  
Divčibare  
2<sup>nd</sup> - 4<sup>th</sup> October 2019**

**Belgrade  
2019**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
2-4.10.2019.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“  
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Проф. др Снежана Пајовић, научни саветник  
в.д. директора Института за нуклеарне науке Винча

Уредници:

Др Михајло Јовић  
Др Гордана Пантелић

**ISBN 978-86-7306-154-2**

©Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Михајло Јовић, Гордана Пантелић

Електронско издање:

Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Мике Петровића Аласа 12-14, 11351  
Винча, Београд, Србија

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2019.

## IZABRANE METODE PRORAČUNA BUILDUP FAKTORA U ZAŠTITI OD GAMA I X ZRAČENJA

Srboljub STANKOVIĆ<sup>1</sup>, Boris LONČAR<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup> i Gordan NIŠEVIĆ<sup>3</sup>

1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke VINČA, Beograd, Srbija,  
[srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)

2) Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija,  
[bloncar@tmf.bg.ac.rs](mailto:bloncar@tmf.bg.ac.rs),

3) Best Oncosupport d.o.o., Beograd, Srbija, [gordan.nisevic@bestoncosupport.com](mailto:gordan.nisevic@bestoncosupport.com)

### SADRŽAJ

*U ovom radu je dat pregled izabranih metoda proračuna buildup faktora na osnovu empirijskih aproksimacija Bergera, Tejlora i aproksimacije Geometrijske Progresije, sa kojima mogu da se rešavaju praktični problemi u zaštiti od zračenja u zavisnosti od stepena njihove složenosti. Razmatran je bazičan slučaj za određivanje buildup faktora u zavisnosti od karakteristika homogene materijalne sredine kroz koju se obavlja transport fotona X i gama zračenja, zatim od energije fotona iz izvora zračenja, kao od rastojanja između izvora fotona i tačke u materijalnoj sredini u kojoj se određuje dozimetrijska veličina. Posle sprovedene diskusije rezultata proračuna buildup faktora za olovo, gvožđe, običan beton i vodu, u radu su izvedeni odgovarajući zaključci u vezi efikasnosti primene pojedinih metoda proračuna u homogenoj materijalnoj sredini, uzimajući u obzir da svaka od prikazanih metoda ima svoje prednosti, kao i ograničenja, u zavisnosti od fokusa njene primene.*

### 1. Uvod

Pored eksperimentalnog pristupa u određivanju faktora nagomilavanja, odnosno buildup faktora (u daljem tekstu sa oznakom B), postoje i različiti načini za izračunavanje njegovih vrednosti. U opštem slučaju, u praksi se pojavila potreba za jednostavno razmatranje buildup faktora kao korekcionog faktora na izmereni odziv detektora koji potiče od fotona koji pri transportu nisu interagovali sa materijalom sredine, za komponentu koja doprinosi odzivu detektora koja potiče od rasejanog zračenja, kao i od dopunskog lokalnog zračenja. U zavisnosti od veličine koja se meri detektorom definiše se tip odziva detektora, tako da se buildup faktor određuje preko jačine apsorbovane doze gama i X zračenja, ili fluksa fotona, kao i drugih veličina (na primer, jačina ekspozicione doze), koje se još koriste u praksi sa uređajima starije tehnološke generacije, koji su proizvedeni od pre nekoliko decenija. Kao jedno od značajnijih pitanja koje se postavlja je do kog nivoa složenosti treba sprovoditi odgovarajući proračun, uzimajući u obzir zahteve koji su postavljeni za rešavanje konkretnog problema u praksi. Veoma često, u praksi se u prvoj aproksimaciji mogu sprovesti proračuni kojima se pre svega dobijaju rezultati za vrednosti buildup faktora za situaciju koja proističe iz pojednostavljenja realne složenije situacije, ili je čak veoma podudarna sa zahtevima koji se nameću u realnoj situaciji sa proračunom buildup faktora u zaštiti

od zračenja. Uzimajući u obzir ovakve mogućnosti, u ovom radu je prikazan pregled izabranih metoda koje su bazirane na empirijskim aproksimacijama za određivanje buildup faktora [1].

## 2. Metode proračuna

U opštem slučaju definicija buildup faktora na poziciji u prostoru određenu vektorom položaja  $\vec{r}$  se može prikazati preko relacije:

$$B(\vec{r}) = 1 + \frac{\int_0^{E_g} G(E)\varphi_s(\vec{r}, E)dE}{\int_0^{E_g} G(E)\varphi_u(\vec{r}, E)dE} \quad (1a)$$

Pri čemu su  $G(E)$  je funkcija odziva detektora fotona,  $\varphi_s$  i  $\varphi_u$  su komponenta fluensa fotona koja potiče od rasejanog, i nerasejanog zračenja, respektivno, dok je  $E_g$  najveća vrednost energije fotona. Kako bi se predstavile osnovne forme izabranih empirijskih aproksimacija za određivanje buildup faktora, a potom i razmatrale mogućnosti njihove primene, može se definisati jednostavna situacija, na koju se mogu svesti brojni slučajevi iz prakse. U takvoj situaciji postoji monoenergetski izvor zračenja veoma malih dimenzija (može se smatrati tačkastim izvorom), sa energijom fotona  $E_0$  (MeV), a detektor se nalazi u homogenoj sredini veoma velikih dimenzija u odnosu na karakteristične dimenzije izvora, i sa linearnim koeficijentom atenuacije  $\mu(E)$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), dok je  $r(\text{cm})$  linearno rastojanje od detektora do izvora izvora zračenja. Za ovakav slučaj u kojem se razmatra transport fotona iz tačkastog izvora duž preferentnog pravca kroz materijalnu sredinu, definicija buildup faktora je data sa:

$$B(r) = 1 + \frac{\int_0^{E_0} \varphi_s(r, E) \cdot E \cdot \mu(E)dE}{\varphi_u(r, E_0) \cdot E_0 \cdot \mu(E_0)} \quad (1b)$$

U suštini problema koji je vezan za određivanje buildup faktor je rešavanje jednačina kojima se prati transport fotona kroz materijalnu sredinu, tako da su u skladu sa tim istraživači pristupili određivanju aproksimativnih formula kojima se mogu dobiti što tačnije vrednosti u poređenju sa vrednostima dobijenim iz eksperimenta. U ovom radu je dat prikaz primene tri izabrane empirijske aproksimacije za proračun B faktora.

### *Bergerova aproksimacija*

U ovoj aproksimaciji može se koristiti sledeća formula:

$$B(E_0, \mu r) = 1 + [ a \cdot \mu r \cdot \exp(+ b \cdot \mu r) ] \quad (2)$$

gde su parametri  $a$  i  $b$  zavisni od  $E_0$ , od materijalnih svojstva sredine u kojoj se dešava slabljenje snopa zračenja, kao i od tipa odziva detektora, odnosno veličine koja se meri detektorom. Uzimajući u obzir dostupne podatke u literaturi [2], moguće je koristiti parametre  $a$  i  $b$  za veoma dobro fitovanje buildup faktora u opsegu od 0 do 40 srednjih dužina slobodnog puta (mfp) u materijalnim sredinama kao što su voda, gvožđe, olovo, beton.

## Tejlorova aproksimacija

U opštoj formi ova aproksimacija se prikazuje sledećom matematičkom relacijom:

$$B(E_0, \mu r) = \sum_{j=1}^N A_j \cdot e^{-\alpha_j \mu r} \quad (3)$$

u kojoj su parametri  $A_j$  i  $\alpha_j$  takođe zavisni od  $E_0$ , od materijalnih svojstva sredine u kojoj se dešava slabljenje snopa zračenja, kao i od tipa odziva detektora. U literaturi je uobičajeno da se za materijalne sredine koje se sreću u operativnoj dozimetriji u zaštiti od zračenja, kao što su voda, olovo, beton itd. [3] preporučuje korišćenje formule za  $j=2$ , sa parametrima  $A_1, \alpha_1, A_2=1-A_1, \alpha_2$ .

## Aproksimacija geometrijske progresije

Ova aproksimacija je razvijena od strane autora Harima [4] i Takeuchi, Tanaka i Kinno [5], tako da ima formu:

$$B(E_0, \mu r) = 1 + (b-1)(M^{\mu r} - 1)/(M - 1), \text{ za } M \neq 1 \quad (4a)$$

$$B(E_0, \mu r) = 1 + (b-1) \cdot \mu r, \text{ za } M = 1 \quad (4b)$$

gde se vrednost parametra  $M$  dobija preko matematičkog izraza:

$$M(\mu r) = c(\mu r)^a + d \cdot \frac{\tanh(\mu r / \xi - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (5)$$

Dok su parametri  $a, b, c, d$  i  $\xi$  zavisni od  $E_0$ , od materijalnih svojstva sredine u kojoj se dešava slabljenje snopa zračenja, kao i od tipa odziva detektora.

## 3. Rezultati i diskusija

U cilju demonstracije mogućnosti primene izabranih empirijskih aproksimacija, proračunate su vrednosti buildup faktora ( $B$ ) za olovo, gvožđe, običan beton i vodu, za izvor fotona energije 1 MeV, za pet dužina slobodnog puta (mfp) fotona, kada  $\mu r$  iznosi 5, i odgovarajući maseni atenuacioni koeficijent ( $\mu/\rho$ ) za posmatrani materijal, pri čemu su rezultati prikazani u tabeli 1.

**Tabela 1. Vrednosti buildup faktora za energiju fotona 1 MeV i  $\mu r = 5$  proračunate sa tri izabrane empirijske aproksimacije i prema standardu ANS [6], za četiri različite materijalne sredine (olovo, gvožđe, beton i voda).**

Materijal	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	ANSI/ANS- 6.4.3-1991 $B_{ANS}$	Bergerova Aproksimacija $B_B$	Tejlorova Aproksimacija $B_T$	Aproksimacija Geometrijske progresije, $B_{GP}$
olovo	0,06843	2,43	2,392	2,441	2,444
gvožđe	0,0594	6,74	6,924	6,526	6,752
beton	0,06382	8,33	8,452	9,409	8,308
voda	0,07072	10,1	9,979	11,550	10,041

Analizom relativnih odstupanja proračunatih vrednosti od vrednosti standarda ANS može se uočiti da su najmanja odstupanja dobijena primenom aproksimacije geometrijske progresije, a potom Bergerove aproksimacije, dok su najveća odstupanja za Tejlorovu aproksimaciju. Ukoliko se razmatraju vrednosti za svaku materijalnu sredinu ponaosob, Bergerova aproksimacija ima najveće relativno odstupanje za gvožđe od 2,7% . Primenom Tejlorove aproksimacije relativna odstupanja su bila 3,1% za gvožđe, dok su znatno veća za običan beton (oko 13%) i za vodenu sredinu (14,4%).

#### 4. Zaključak

U radu je dat pregled izabраних емпириских апроксимација као метода којима се могу одређивати вредности buildup фактора приликом постављених проблема из свакодневне оперативне праксе у заштити од  $\gamma$  и X зрачења. Може се закључити да би примена апроксимације геометријске прогресије имала предности у односу на Bergerову и Tejlorову апроксимацију. У будућим истраживањима би било од интереса испитати могућности примене емпириских апроксимација у случајевима решавања практичних проблема са сложенјим геометријским конфигурацијима, посебно када су у питању нехомогне материјалне средине.

#### 5. Literatura

- [1] Y. Harima, N. Kurosawa, Y. Sakamoto, Parameter search of geometric-progression formula for gamma-ray isotropic point source buildup factors up to depths of 100 mfp, including contribution of secondary radiations, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4, 2014, 548-552.
- [2] A.B. Chilton, Tschebysheff-Fitted Berger Coefficients for Eisenhauer-Simmons Gamma-Ray Buildup Factors in Ordinary Concrete, *Nucl. Sci. Eng.* 69, 1979, 436-438.
- [3] K. Shure, O.J. Wallace, Taylor Parameters for Gamma-Ray Buildup Factors in the Proposed American National Standard, Report WAPD-TM-1628, 1988.
- [4] Y. Harima, S. Tanaka, Y. Sakamoto, H. Hirayama, Development of New Gamma-ray Buildup Factors and Applications to Shielding Calculations, *J. Nucl. Sci. And Techn.* 28, 1991, 74-78.
- [5] K. Takeushi, S. Tanaka, M. Kinno, Transport Calculations of Gamma Rays, Including Bremsstrahlung by Discrete Ordinates Code PALLAS, *Nucl. Sci. Eng.* 78, 1981, 272-283.
- [6] ANSI/ANS-6.4.3-1991, American National Standard Gamma Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering materials, American Nuclear Society, 1991.



## SELECTED METHODS FOR BUILDUP FACTOR CALCULATION IN GAMMA AND X RADIATION PROTECTION

**Srboljub STANKOVIĆ<sup>1</sup>, Boris LONČAR<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup> and Gordan NIŠEVIĆ<sup>3</sup>**

- 1) *University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences VINČA, Belgrade, Serbia,  
[srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)*
- 2) *University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia,  
[bloncar@tmf.bg.ac.rs](mailto:bloncar@tmf.bg.ac.rs)*
- 3) *Best Oncosupport d.o.o., Belgrade, Serbia,  
[gordan.nisevic@bestoncosupport.com](mailto:gordan.nisevic@bestoncosupport.com)*

### ABSTRACT

This paper provides an overview of selected calculation method buildup factors based on empirical approximation that can not be solved practical problems in radiation protection, depending on their level of complexity. A basic case was considered for the determination of the buildup factor depending on the characteristics of the homogeneous material environment through which the transport of photons X and gamma radiation is carried out, then from the energy of photons from the radiation source, from the distance between the photon source and the point in the material environment in which the dosimetric size. After the discussion of the results of the calculation of the buildup factors for lead, iron, ordinary concrete and water, the conclusions about the efficiency of the application of individual calculation methods in a homogeneous material environment were carried out, taking into account that each of the methods presented has its advantages, as well as the limitations, depending on the focus of its application.