

ОДРЕЂИВАЊЕ МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА ПРОСТОРНОГ РАСТОЈАЊА ПРИМЕНОМ ГЛОБАЛНИХ НАВИГАЦИОНИХ САТЕЛИТСКИХ СИСТЕМА

Олег Одаловић, Душан Петковић, Сања Грекуловић, Миљана Тодоровић-Дракул

Кључне речи: ГНСС, просторно растојање, теренска база, мерна несигурност

КРАТАК САДРЖАЈ

Постоје четири у потпуности успостављена Глобална навигациона сателитска система (ГНСС): амерички *GPS NAVSTAR*, руски *GLONASS*, кинески *BEIDOU (COMPASS)* и европски *GALILEO*. Њиховом применом успешно се успостављају терестрички референтни системи широм планете. У овом раду приказан је поступак успостављања теренске базе за еталонирање мерила дужине применом технологије ГНСС-а. На релативно кратком растојању дефинисане су крајње тачке теренске базе чије су координате одређене на основу ГНСС опажања. Одређена је мерна несигурност дефинисане базе и извршено је поређење добијених резултата са вредностима добијеним класичним геодетским методама.

DETERMINATION OF SPATIAL DISTANCE MEASUREMENT UNCERTAINTY USING GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS

Keywords: GNSS, spatial distance, field base, measurement uncertainty

ABSTRACT

There are four fully operational Global Navigation Satellite Systems (GNSS): United States *GPS NAVSTAR*, Russian *GLONASS*, China's *BEIDOU (COMPASS)*, and European *GALILEO*. With their application, reference systems around the planet were established. This paper presents a procedure for establishing a field base for calibrating length measurement equipment using GNSS. A field base is defined as a short distance determined by its endpoints using GNSS technology. The measurement uncertainty was calculated for the defined base, and the results were compared with the values obtained using traditional geodetic methods.

УВОД

Велики број сателита Глобалних навигационих сателитских система (ГНСС) значајно је унапредио перформансе одређивања координата тачака, посебно у погледу брзине, а самим тим и у погледу финансијских захтева. Тренутно је на располагању преко 130 сателита у сва четири система (*GLONASS* 26, *BEIDOU* 49, *GPS* 32, *GALILEO* 27 – на дан 10. августа 2022 године).

У овом раду посебна пажња посвећена је могућностима успостављања теренске базе применом технологије ГНСС-а за потребе еталонирања мерила дужине, при чему су основне хипотезе биле следеће [1]:

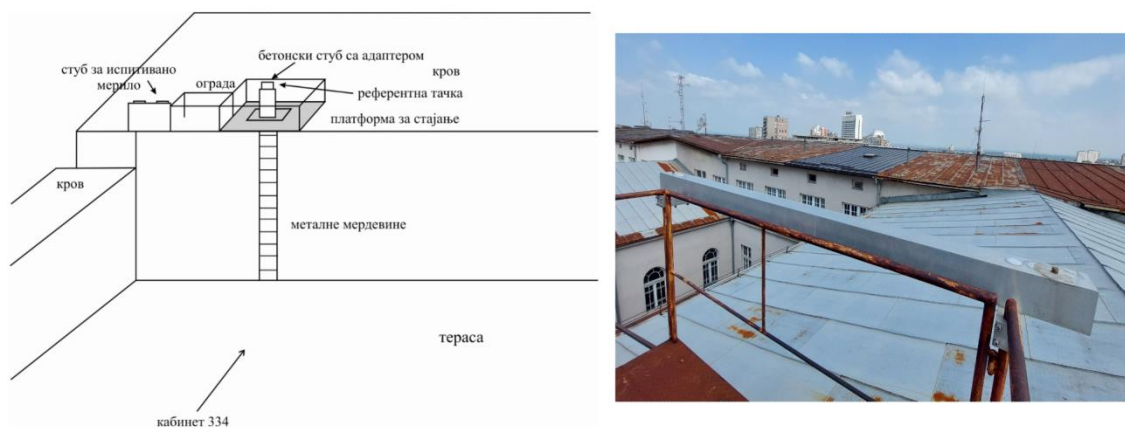
- модерни ГНСС инструменти обезбеђују резултате мерења разлике фаза са субмилиметарским нивоом шума,
- мерна несигурност просторних растојања одређених применом ГНСС-а начелно не зависи од положаја на телу Земље на којем су постављени пријемници,
- интензитет вектора између два пријемника може бити одређен са мањом несигурношћу („са мањом грешком“) него компоненте самог вектора,
- велики број ГНСС омогућава оптимизацију при одабиру сателита у циљу квалитетнијег одређивања просторне дистанце.

У циљу тестирања могућности примене ГНСС технологије за потребе еталонирање мерила дужине у јулу 2022. године успостављена је теренска база при чему су тачке базе на којима се постављају пријемници на међусобном растојању од приближно 2 m. На овај начин су начелно на резултате мерења ГНСС позиционирања, као и на мерне несигурности, учињени безначајним ефекти који настају због ефеката јоносфере, тропосфере, ефекте маса атмосфере и океана, ефекте вишеструке рефлексије, као и низа других извора несигурности.

Битно је напоменути да је приликом обраде резултата мерења посебна пажња посвећена поступку одређивања координата усвојеном од стране Међународне асоцијације за геодезију (*IAG – International Association of Geodesy*) [2], без обзира да ли се одређени параметри коришћени у обради података наводе или не у постојећим стандардима за еталонирање ГНСС пријемника [3] или мерила дужине [4, 5].

УСПОСТАВЉАЊЕ БАЗЕ И ПРИКУПЉАЊЕ ПОДАТАКА

У циљу одређивања мерне несигурности резултата мерења просторног растојања применом технологије ГНСС-а, успостављена је теренска база на крову Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Теренска база је постављена на већ постојећој конструкцији направљеној за потребе



Слика 1. Скица конструкције (лево) и изглед постављене шине (десно)

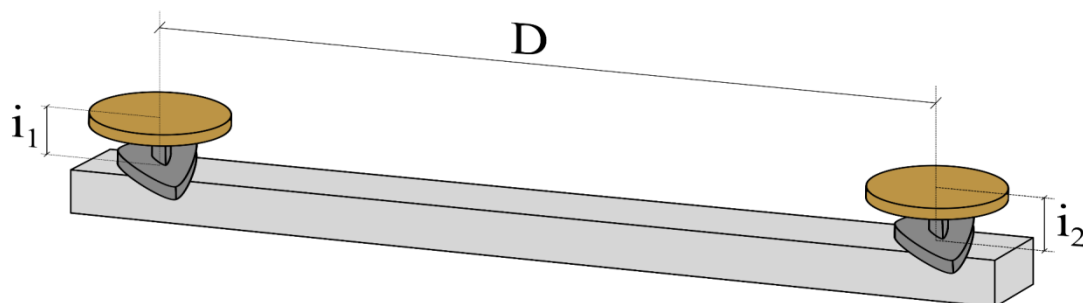
рада *CORS* (*Continuous Operating Reference Stations*) перманентне станице. Конструкција је постављена тако да омогућава несметани пријем сателитских сигнала и да у близини не постоје никакви извори електромагнетног зрачења. Успостављање теренске базе подразумевало је уграђивање одговарајућих завртњева на већ постојећу конструкцију (Слика 1).

Просторно растојање између центара завртњева одређено је помоћу ручне пантљике *ВМI D97* у оквиру три серије мерења, читавањем до на милиметар и оценом десетих делова милиметра. Пантљика је за потребе експеримента еталонирана у Метролошкој лабораторије за еталонирање мерила угла и дужине коришћењем методе еталонирање линеарних мерила применом ласерског интерферометра [6], при чему је одређена њена проширена мерна несигурност од 0,0003 m.

Након мерења растојања пантљиком, на теренској бази су постављена два ГНСС пријемника произвођача *Trimble*. Основне релевантне карактеристике коришћених ГНСС пријемника приказани су у оквиру Табеле 1. Након постављања пријемника измерене су и висине антена на четири места по ободу антене (правци исток, запад, север и југ) (Слика 2).

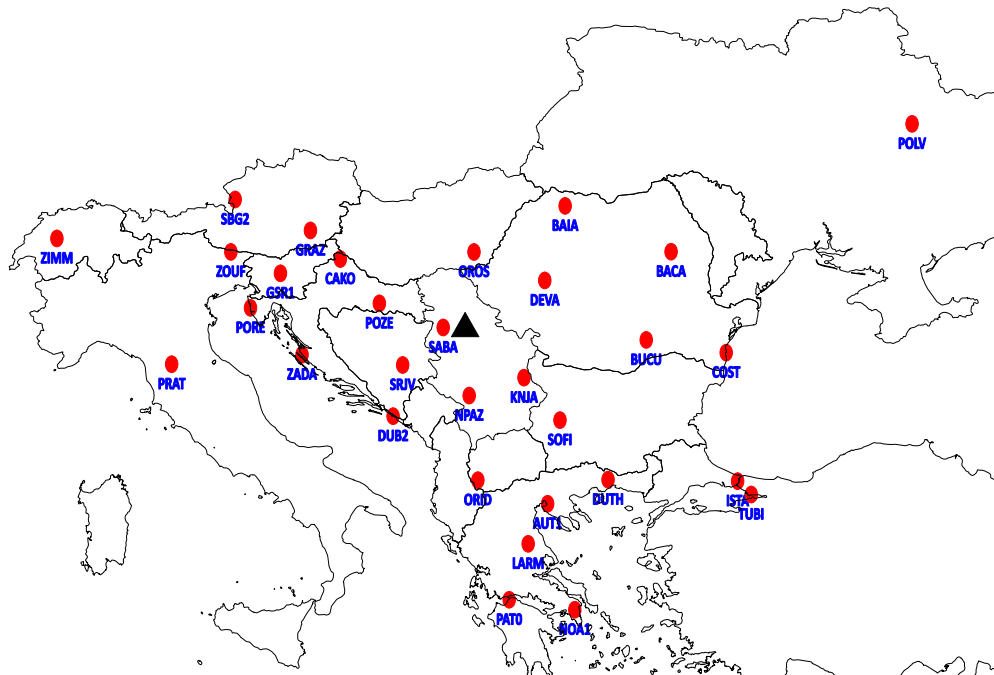
Табела 1: Карактеристике коришћених ГНСС пријемника [7]

Пријемник 1		Пријемник 2	
Тип	NetR9	Тип	NetR9
Подржава системе	GPS, GLONASS, GALILEO, BAIDOU	Подржава системе	GPS, GLONASS, GALILEO, BAIDOU
Антена	Zephyr Geodetic	Антена	Zephyr Geodetic 3
Максимална вредност ексцентрицитета фазног центра	2 mm	Максимална вредност ексцентрицитета фазног центра	2 mm



Слика 2. Скица описане теренске базе

Прикупљање података методом ГНСС-а извршено је у оквиру кампање која је трајала три дана, од 09.07.2022. до 11.07.2022. године са сесијама у трајању од 24 часа и интервалом регистрације од 30 секунди. Прикупљени подаци архивирани су у датотекама у *RINEX* (*Receiver INdependent EXchange*) формату верзија 3.04. У циљу одређивања координата тачака теренске базе са Европске мреже перманентних станица (*EPN – EUREF Permanent Network*) (Слика 3) [8] преузете су *RINEX* датотеке за наведени период времена, а са одговарајућих сервиса [9] преузете су информације о: прецизним ефемеридама сателита за наведени период, моделу тропосфере, моделу јоносфере, плимским ефектима масе атмосфере и океана, прецизним ефемеридама планета Сунчевог система, пријемницима и антенама постављеним на тачкама *EPN* мреже, и координатама тачака *EPN* станица у одговарајућој *GPS* (*Global Positioning System*) недељи.



Слика 3. Просторни распоред перманентних станица *EPN* мреже коришћених као референтни систем у оквиру ових истраживања (црвени кругови – перманентне станице *EPN* мреже, црни троугао – положај теренске базе у односу на перманентне станице)

ОБРАДА РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

Као што је наведено, мерење просторног растојања између центара завртњева теренске базе измерено је пантљиком три пута. Сва три резултата мерења коригована су за ефекте оцењених вредности адicione и мултипликационе константе, чије вредности износе $a = 0,03 \text{ mm}$ и $q = 0,99972286$, док су вредности проширене мерне несигурности одређивања адicione и мултипликационе константе $U_a = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ и $U_q = 6,7 \cdot 10^{-5}$, респективно (фактор проширења $k = 2$). За коначну вредност мереног растојања усвојена је средња вредност коригованих резултата мерења која износи $D_p = 2,0996 \text{ m}$. Измерене вредности висина антена су такође кориговане за утицај оцењених вредности адicione и мултипликационе константе и њихове вредности износе: $i_1 = 0,2052 \text{ m}$ и $i_2 = 0,1851 \text{ m}$ (Слика 2).

Координате тачака антена постављених ГНСС пријемника на теренској бази одређене су обрадом свих наведених података коришћењем софтвера *Bernese GNSS Software Version 5.2*. У циљу одређивања координата коришћене су две независне обраде свих наведених података: у оквиру прве обраде одређиване су координате тачке 1, без података прикупљених пријемником постављеним на тачки 2, док су у оквиру друге обраде одређиване координате тачке 2, без података прикупљених пријемником постављеним на тачки 1. Резултати обраде података су оцењене вредности координата дефинисаних тачака и оцена њихове тачности за комбиновано решење које су приказане у глобалном геоцентричном координатном систему¹. У оквиру Табеле 2 приказани су и резултати оцењене вредности растојања на основу добијених координата:

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (1)$$

¹ Глобални геоцентрични координатни систем је систем чији се координатни почетак налази у центру масе Земље (заједно са масом океана и атмосфере), Z оса се поклапа средњом осом Земљине ротације, X оса пролази кроз почетни меридијан и налази се у равни екватора, а Y оса, која је такође у равни екватора, управна је на X и Z осу по правилу десне руке. За више података погледати у <https://www.iers.org/iers/en/DataProducts/Conventions/conventions.html>.

као и разлика:

$$\Delta = D - D_p, \quad (2)$$

где је D_p просторно растојање одређено пантљиком. Вредности приказане у Табели 2, u_x , u_y и u_z усвојене су за стандардну несигурност типа А [10].

Табела 2: Оцењене вредности координата успостављених тачака теренске базе

Назив тачке	X [m]	Y [m]	Z [m]	D [m]	Δ [m]
09.07.2022.					
1	4246570,7423	1585755,1621	4472178,8952	2,1016	0,0019
2	4246570,6448	1585753,2065	4472179,6586		
10.07.2022.					
1	4246570,7479	1585755,1637	4472178,9004	2,1020	0,0024
2	4246570,6491	1585753,2071	4472179,6623		
11.07.2022.					
1	4246570,7429	1585755,1634	4472178,8970	2,1025	0,0029
2	4246570,6485	1585753,2075	4472179,6623		
Комбиновано решење					
1	4246570,7443	1585755,1631	4472178,8975	2,1020	0,0024
2	4246570,6475	1585753,2070	4472179,6611		
Оцена тачности комбинованог решења					
Назив тачке	u_x [m]	u_y [m]	u_z [m]	/	
1	0,0017	0,0004	0,0014		
2	0,0013	0,0003	0,0014		

У циљу одређивања мерне несигурности типа В, третиране су несигурности приказане у Табели 3. Приказане мерне несигурности односе се на релевантне правце (X, Y, Z) у локалном геодетском координатном систему (E, N, U)². Мерне несигурности из локалног система трансформисане су у глобални геоцентрични координатни систем за сваку осу система (Табела 4).

Табела 3: Мерне несигурности типа В у локалном координатном систему [11, 7]

Извор мерна несигурност	Ознака	Вредност	Јединице
Присилно центрисање пријемника	u_{PC}	0,0002	m
Положај фазног центра	u_{PFC}	0,0020	
Мерење висине антене	u_{VA}	0,0003	

Табела 4: Мерне несигурности типа В у глобалном координатном систему

Извор мерне несигурности	Ознака	Вредност	Јединице
Присилно центрисање пријемника	u_{PC_x}	0,0002	m
	u_{PC_y}	0,0001	
	u_{PC_z}	0,0001	

² Локални геодетски координатни систем данас се најчешће дефинише правцем истока, севера и висине чији је правац дефинисан вертикалом на тенгенцијалној равни у посматраној тачки. Скраћена ознака за овако дефинисан координатни систем следи од скупа акронима енглеских речи *East, North, Up* – (E, N, U).

Положај фазног центра	u_{PFC_x}	0,0007
	u_{PFC_y}	0,0019
	u_{PFC_z}	0,0028
Мерење висине антене	u_{VA_x}	0,0002
	u_{VA_y}	0,0001
	u_{VA_z}	0,0002

Укупна мерна несигурност одређених координата одређена је коришћењем израза:

$$u_i^2 = u_{A_i}^2 + u_{B_i}^2, \quad (3)$$

где је

$$u_{B_i}^2 = u_{PC_i}^2 + u_{PFC_i}^2 + u_{AV_i}^2, \quad (4)$$

где i узима вредности редом x , y и z . Вредности укупних мерних несигурности координата тачака дате су у Табели 5.

Табела 5: Укупна мерна несигурност координата тачака

Назив тачке	u_x [m]	u_y [m]	u_z [m]
1	0,0019	0,0019	0,0031
2	0,0015	0,0019	0,0031

За рачунање мерне несигурности просторног растојања третирана је следећа релација за стандардну мерну несигурност [1]:

$$u_D^2 = \left(\frac{\Delta X}{D}\right)^2 \cdot (u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2) + \left(\frac{\Delta Y}{D}\right)^2 \cdot (u_{y_1}^2 + u_{y_2}^2) + \left(\frac{\Delta Z}{D}\right)^2 \cdot (u_{z_1}^2 + u_{z_2}^2). \quad (5)$$

У наведеној једначини мешовити чланови несигурности нису узимани у обзир, јер су оцене координате тачака 1 и 2 третиране као међусобно независне³. Коришћењем (5) и усвајањем фактор проширења $k = 2$ проширена мерна несигурност просторног растојања рачуната је коришћењем израза:

$$U_D = k \cdot u_D. \quad (6)$$

Применом наведених израза, вредност мерне несигурности просторног растојања износи $u_D = 0,0030$ m, док је за вредност проширене мерне несигурности добијено $U_D = 0,0060$ m.

Поред наведеног, а у циљу контроле свих изведених прорачуна, координате тачака одређене су применом два јавна сервиса: Канадски сервис *CSRS-PPP* (*Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning*) [12] и Аустралијски сервис *AUSPOS* [13]. Разлике оцењених вредности координата тачака добијених коришћењем поменутих сервиса по координатним осама са ознакама R_x , R_y и R_z и вредности приказаних у Табели 2 за сваку сесију мерне кампање приказани су у наредним табелама (Табеле 6 и 7).

³ Потпуна независност одређивања координата била би постигнута тек са успостављањем два независна референтна система, односно две независне групе станица у оквиру референтног система.

Табела 6: Разлике оцењених вредности координата и координата добијених коришћењем Канадског сервиса *CSRS-PPP*

Назив тачке	R_x [m]	R_y [m]	R_z [m]
09.07.2022.			
1	0,0047	0,0012	0,0041
2	0,0062	0,0025	0,0054
10.07.2022.			
1	0,0011	0,0013	0,0016
2	0,0019	0,0029	0,0047
11.07.2022.			
1	0,0032	0,0006	0,0030
2	0,0005	0,0005	0,0027
Просечне вредности разлика за сва три дана			
/	0,0029	0,0015	0,0036

Табела 7: Разлике оцењених вредности координата и координата добијених коришћењем Аустралијског сервиса *AUSPOS*

Назив тачке	R_x [m]	R_y [m]	R_z [m]
09.07.2022.			
1	-0,0023	-0,0011	-0,0052
2	0,0002	0,0005	-0,0026
10.07.2022.			
1	-0,0059	-0,0007	-0,0074
2	-0,0061	-0,0011	-0,0063
11.07.2022.			
1	-0,0028	-0,0014	-0,0070
2	-0,0055	-0,0005	-0,0083
Просечне вредности разлика за сва три дана			
/	-0,0037	-0,0007	-0,0061

ЗАКЉУЧАК

Из резултата приказаних у оквиру рада може се закључити следеће:

- резултат мерења просторног растојања одређен применом ГНСС-а разликује се од резултата мерења пантљиком за 0,0024 m и то за комбиновано решење за целу кампању сачињену од три дневне сесије,
- мерна несигурност ГНСС одређивања достигла је вредност од 0,0030 m,
- проширена мерна несигурност за усвојени фактор проширења $k = 2$ има вредност од 0,0060 m.

Потребно је напоменути да је квалитет резултата одређивања координата тачака теренске базе додатно контролисан применом *online* сервиса за накнадну обраду ГНСС резултата мерења: Канадски сервис *CSRS-PPP* и Аустралијски сервис *AUSPOS*. Просечне вредности разлика координата одређених у оквиру ових истраживања применом *Bernese GNSS Software Version 5.2* и применом сервиса *CSRS-PPP* износе $\bar{R}_x = 0,0029$ m, $\bar{R}_y = 0,0015$ m, $\bar{R}_z = 0,0036$ m, док просечне

вредности разлика код сервиса AUSPOS износе $\bar{R}_x = -0,0037$ m, $\bar{R}_y = -0,0007$ m, $\bar{R}_z = -0,0061$ m.

За постизање квалитетнијих оцена координата, њихових компоненти и мерних несигурности будућа истраживања морају се ослонити на оптимизацију одабира сателита и самих ГНСС опажања [1].

ЗАХВАЛНОСТ

Посебну захвалност аутори рада дугују геодетској организацији „Гео-Жупа“ из Александровца која је уступила мерну опрему за потребе прикупљања података при реализацији истраживања описаних у овом раду.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. Garcia-Asenjo, S. Baselga, C. Atkins, P. Garrigues, *Development of a Submillimetric GNSS-Based Distance Meter for Length Metrology*, Sensors, DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041145>, 2021.
- [2] IAG – International Association of Geodesy. [Цитирано 2022 августа 8]. Доступно на: <https://www.iag-aig.org/>
- [3] ISO 17123-8:2015(E), *Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK), Second edition, 2015-06-15*, International Organization for Standardization, Switzerland, 2015.
- [4] ISO 17123-5:2018(E), *Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 5: Total stations, Third edition, 2018-02*, International Organization for Standardization, Switzerland, 2018.
- [5] SRPS ISO 17123-4:2014 (en), *Оптика и оптички инструменти – Поступци на терену за испитивање геодетских и осматрачких инструмената – Део 4: Електрооптички мерачи даљине (EDM мерења на рефлекторима), Мај 2014*, Институт за стандардизацију Србије, 2014.
- [6] Hewlett Packard HP 5528A Laser Measurement System, *User`s Guide*, 1988.
- [7] Trimble, *Trimble GNSS Geodetic Antennas*, 2017.
- [8] EUREF Permanent GNSS Network. [Цитирано 2022 августа 12]. Доступно на: <https://www.epncb.oma.be/>
- [9] Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez (Eds); 2015: *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- [10] SRPS ISO 17123-1:2014 (en), *Оптика и оптички инструменти – Поступци на терену за испитивање геодетских и осматрачких инструмената – Део 1: Теорија, Мај 2014*, Институт за стандардизацију Србије, 2014.
- [11] Чинкловић Н.: *Методe прецизних геодетских мерења*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Научна књига, Београд, 1983.
- [12] CSRS-PPP – Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning. [Цитирано 2022 август 08]. Доступно на: <https://webapp.csrscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>
- [13] AUSPOS – Online GPS Processing Service. [Цитирано 2022 август 10]. Доступно на: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>

ИНФОРМАЦИЈЕ О АУТОРИМА

Кореспондентни аутор:

Ванредни професор др Олег Одаловић,
Грађевински факултет, Универзитет у Београду
odalovic@grf.bg.ac.rs

Остали аутори:

Асистент Душан Петковић,
Грађевински факултет, Универзитет у Београду
dpetkovic@grf.bg.ac.rs

Доцент др Сања Грекуловић,
Грађевински факултет, Универзитет у Београду
sanjag@grf.bg.ac.rs

Доцент др Миљана Годоровић-Дракул,
Грађевински факултет, Универзитет у Београду
mtodorovic@grf.bg.ac.rs