

ПРИМЕНА САВРЕМЕНИХ ГЕОДЕТСКИХ МЕТОДА ТОКОМ ИЗГРАДЊЕ ВИСОКИХ ЗГРАДА

Марко З. Марковић¹

Дејан Васић²

Тоша Нинков³

Маријана Петковић⁴

Никола Јанковић⁵

УДК: 528.41 : 528.28

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.100

Резиме: У раду је приказано решење проблема реализације геодетских радова током изградње високих зграда. На примеру интегрисаног мултисензорског система (Глобални Навигациони Сателитски Системи (ГНСС), инклинометри, тотална станица, метеоролошки сензори) дато је идејно решење перманентног мониторинга у реалном времену и геодетског обележавања током изградње будуће куле комплекса „Београд на води“. За реализацију пројекта описано је софтверско решење Trimble 4D. На основу приказаног идејног решења илустроваће се могућности геодетске струке и указати на место, улогу и значај геодетског стручњака у пројектима оваквог типа.

Кључне речи: ГНСС, Тотална станица, инклинометар, High Rise

1. УВОД

Мониторинг током изградње и експлоатације објеката је од кључног значаја код објеката који су подложни вибрацијама, померањима тла, екстремним временским условима, утицајима налета ветра и грађевинским радовима. Од великог значаја је детекција померања, вибрација, структурних промена и понашања објеката у различитим условима да би се откриле слабости и могући проблеми [1].

Мониторинг високих објеката је неопходан да би се обезбедило сигурно окружење током извођења грађевинских радова и експлоатације и врши се континуалним праћењем могућности објеката да обављају своју функцију.

¹ Марко З. Марковић, мастер инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија, тел: 021 485 2198, е – mail: marko_m@uns.ac.rs

² Дејан Васић, дипл. инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

³ Др Тоша Нинков, дипл. инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

⁴ Маријана Петковић, мастер инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

⁵ Никола Јанковић, дипл. инж. геод., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких Наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, Србија

Пораст интересовања за изградњом високих зграда довео је до повећања потражње и усавршавања система за мониторинг објеката и праћења бочних померања, нагиба, пукотина, издизања, слегања [2]. Ови објекти су дизајнирани тако да буду флексибилнији и отпорнији на промене температуре, ветра и подрхтавања земље услед земљотреса. Постоје различити модели за анализу и тестови који се врше да би се потенцијални проблеми предвидели и решили [3], међутим често су услови на терену компликованији него што је то предвиђено у поступку пројектовања. Током времена долази и до старења материјала, замора и других ефеката услед оптерећења. На основу мониторинга добијају се подаци о перформансама објекта и могу се открити аномалије, испитати стање објекта и његово понашање. Мониторинг при изградњи је такође од великог значаја, јер се врши праћење објекта да би се установила потенцијална померања и одступања, као и открили проблеми и слабости објекта и обезбедила његова вертикалност. На основу детектованих померања контролних тачака на објекту врше се корекције координата наведених тачака како би у сваком тренутку геодетски стручњаци на терену имали реалне координате које се даље користе за позиционирање тоталне станице и реализацију радова геодетског обележавања и снимања изведеног стања објекта. Током изградње долази до померања објекта, тј. долази до одступања од вертикалности због различитих фактора, од којих следећи имају највећи утицај:

- Оптерећења услед утицаја рада кранова у околини објекта који се гради,
- Налети ветра,
- Соларни ефекти,
- Скупљање бетона.

Постоји велики број студија у којима су сагледани проблеми, решења, мерења и контролисања померања високих структура [1], [3], [4], [5]. Дуги низ година мониторинг динамичког понашања високих објеката се заснивао на мерењима акцелерометара постављених на кључним деловима објекта. Ови подаци су били доста корисни у различитим анализама, међутим, употребом ових података није било могуће доћи до закључака о статичном и квази-статичном понашању објекта [4]. Употребом геодетских (теодолит, нивелир, тотална станица, ГНСС и др.) и геотехничких инструмената долази се до оптималног решења за мониторинг објекта. Мониторинг деформација захтева прикупљање и анализу података мерења прикупљених различитим врстама сензора, које треба пажљиво одабрати и адекватно их поставити на објекат. Да би се успоставила референтна мрежа за перманентно праћење објекта, потребно је добро разрадити распоред тачака мреже и контролних тачака на објекту за потребе геодетског обележавања објекта током изградње. Постављање сензора се врши на оним местима на којима ће прикупљени подаци мерења најрепрезентативније апроксимирати померања која су се догодила.

2. МОНИТОРИНГ БАЗИРАН НА ГНСС ТЕХНОЛОГИЈИ

ГНСС омогућава директно мерење статичких, динамичких и релативних померања са фреквенцијом прикупљања података до 100 Hz.

Даје одличне могућности за мониторинг високих структура у реалном времену у различитим етапама изградње као и у експлоатацији. У последњих 20 година је дошло до интензивног развоја и истраживања примена ГНСС технологије у поступку мониторинга високих објеката [2], [6]. Постоје две методе ГНСС позиционирања, а то су апсолутно и релативно позиционирање. Релативно позиционирање има потпуну примену у геодезији због високе тачности позиционирања док се апсолутно позиционирање углавном користи за потребе навигације. Релативно позиционирање може бити статичко или кинематичко. У поступку реализације пројеката мониторинга користи се релативна статичка и кинематичка метода позиционирања у реалном времену *RTK (Real Time Kinematic)*. У табели 1 су дате тачности ГНСС метода позиционирања.

Табела 1. Тачност мерења ГНСС

Метода позиционирања	Тачност позиционирања
Статика	2Д: 3-5 mm
	1Д: 6-10 mm
RTK	2Д: 10 mm
	1Д: 20 mm

Предности ГНСС сензора у односу на конвенцијалне сензоре за мониторинг деформација су [7]:

- Не захтева се визуелно догледање између тачака,
- Велики број аутоматских мерења,
- Ажурирање података у реалном времену,
- Рад у свим временским условима.

У грађевинарству су ГНСС методе мерења прво коришћене за статичко мерење слегања, ширења материјала услед промена температуре и других дуготрајних промена. Развој *RTK* методе мерења довео је до веће употребе ГНСС технологије при мониторингу структуралних објеката. За употребу оваквих система је неопходно постојање дефинисаних протокола за размену података, а то су *RTCM* и *NMEA* протоколи. Комуникација између контролног центра и референтне станице се може вршити путем телефонске линије, *ADSL* интернета, *GSM/GPRS/EDGE* комуникационих сателита или радио комуникације [8].

3. TRIMBLE СОФТВЕРСКО РЕШЕЊЕ

Ради лакшег управљања подацима и њиховом обрадом и анализом предлаже се употреба софтверских решења као што су *Trimble 4D Control* и *Trimble High Rise*. Ови софтвери омогућавају интеграцију података са различитих сензора и мониторинг током изградње и експлоатације објеката.

3.1. TRIMBLE 4D CONTROL

Trimble 4D Control представља софтвер који чини најважнији елемент *Trimble monitoring* система. Овај софтвер је тако дизајниран да обједињује и олакшава

управљање подацима у реалном времену са различитих сензора као што су: ГНСС, оптички, геотехнички, сеизмички и метеоролошки [9].

Подаци се процесуирају коришћењем напредних алгоритама представљених у практичном *Web Interface*-у. Поседује велики број алата за визуализацију и анализу података како би се открили потенцијални проблеми. Догађаји и информације могу бити сачувани и представљени преко различитих дијаграма. На основу великог броја повезаних сензора могу се креирати комплексни аларми. Поруке са аларма се могу слати путем *e-mail*-а или *SMS*-а, а систем може да активира аудио и визуелне аларме. Искуснији корисници могу да користе *SQL* базу података да преузму сирове податке директно [9]. Овај софтвер интегрише велики број података са различитих типова сензора и пружа информације од значаја које ће касније служити при доношењу одлука и формирању сигурног окружења. Софтвер *Trimble 4D Control* представља срж самог пројекта за мониторинг, покреће аларме на основу дефинисаних граничних вредности, врши контролу мерења, управља и складишти податке и даје различите анализе резултата [9].

Trimble 4D Control садржи низ софистицираних алата за анализу података као и алгоритме за деформациону анализу. Омогућава детаљну евалуацију података и издваја оне тачке чије је померање значајније. Детектује случајне и систематске грешке мерења. Могућности *Trimble 4D Control* софтвера:

- Преглед целе референтне геодетске мреже и приказ промена и кретања,
- Детаљнији приказ тачака и графикона за приказ померања током времена,
- Функције за анализу које комбинују у један график податке са више сензора.

Могуће је дефинисање очекиваног правца померања сваке тачке. Померања тачака се рачунају у 3Д координатном систему.

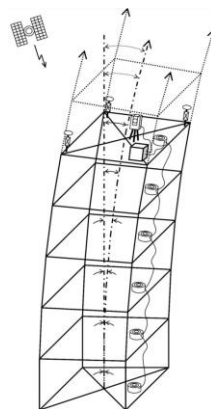
3.2. TRIMBLE HIGH RISE

Trimble High Rise апликација је намењена за мониторинг високих структуралних објеката током изградње коришћењем података мерења са ГНСС уређаја, тоталних станица и инклинометара који су неопходни за реализацију радова геодетског обележавања, снимања изведеног стања објекта, за праћење померања и испитивања вертикалности објеката. Примена ове апликације је намењена за објекте као што су торњеви, луке, поморске инфраструктуре и високе зграде. Код претходно наведених радова потребна су високо прецизна мерења, а прецизност мерења је условљена прецизним референтним тачакама геодетске мреже. Из тог разлога је потребно на земљи дефинисати референтне тачке геодетске мреже чији је положај апсолутно конзистентан. При избору ових тачака јављају се проблеми због густине околних објеката и догледања између тачака о чему треба посебно водити рачуна. Током изградње високих објеката јављају се различити проблеми и изазови које је неопходно решити јер услед разних утицаја долази до померања објекта. Тотална станица која је позиционирана на самом објекту се налази на тлу које није константно стабилно и чију је позицију потребно познавати да би се могла даље користити за потребе реализације геодетског обележавања или снимања изведеног стања. Услови за мерења су отежани јер се објекат континуално помера и са порастом висине објекта услед изградње константно се

повећава дужина између тачака са којих је предвиђено извођење мерења са тоталном станицом на врху објекта и тачака референтне мреже на терену, а самим тим се отежава и догледање између наведених тачака [10]. Помоћу *Trimble High Rise* апликације је могуће рачунање померања, корекција и изравнање координата тачака позиционираних на врху објекта. На основу ових података геодетски стручњак може да изврши позиционирање тоталне станице на врху објекта и то мобилним путем [11]. На основу мерења инклинометрима угловног одступања објекта од вертикале у две осе (X-Y) и на основу вертикалног одстојања између самих инклинометара, рачунају се одступања објекта од вертикалности. На основу података прикупљених ГНСС пријемницима, фиксираним директно на 360° призме и постављеним на контролне тачке на врху објекта, врши се изравнање 3Д координата контролних тачака. Апликација *Trimble High Rise* ради по принципу да систем сваке секунде ажурира координате контролних тачака на врху објекта поправљене за вредност 3Д одступања срачунатих на основу мерења инклинометрима и ГНСС уређајима (Сл. 2). Помоћу контролера на терену, коришћењем *wi-fi* или *3G*, приступа се серверу *High Rise* апликације који аутоматски шаље контролеру тражене податке о координатама 360° призми постављених на објекту заједно са ГНСС уређајима. Ови подаци се даље прослеђују тоталној станици за потребе њеног позиционирања методом пресецања праваца назад (Сл. 1). Геодетски стручњак врши позиционирање тоталне станице на врху објекта методом пресецања праваца назад а затим и геодетско обележавање или снимање изведеног стања објекта, а поступак се понавља за сваки спрат.



Слика 1. Принцип рада *Trimble High Rise* апликације [11]



Слика 2. Одступање објекта од вертикалности

4. ПРЕДЛОГ СЕНЗОРА ЗА РЕАЛИЗАЦИЈУ ПРОЈЕКТА ПРАЋЕЊА ИЗГРАДЊЕ ВИСОКЕ ЗГРАДЕ

Интегрисани систем сензора који се састоји од ГНСС уређаја, акцелерометара, тензометара, инклинометара, метеоролошке станице и чак псеудолита, несумњиво повећава тачност, поузданост и продуктивност система за мониторинг [12].

Trimble NetR9 ГНСС (Сл. 3) је референтни пријемник који садржи све неопходне карактеристике и функције потребне за реализацију пројеката мониторинга.

Пријемник *Trimble NetR9* је компактно решење за високо прецизно позиционирање са ниском потрошњом енергије. Поддржава више ГНСС система (*GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, COMPASS*) и више фреквенција. Поседује 440 канала за ГНСС и подржава различите формате података. Повезивање са уређајем је могуће путем *Bluetooth-a, Ethernet-a, серијски и USB-ом*. Капацитет меморије омогућава складиштење велике количине података, а постоји и могућност чувања података на екстерни уређај. Батерија може да се користи као примарни извор енергије или као резерва [13].

Trimble NetR9 представља једну од најнапреднијих референтних станица са напредним подацима за корекцију *Trimble RTX* [13]. Широко покривање и различите опције достављања података пружају могућности за рад у срединама у којима то раније није било могуће.



Слика 3. *Trimble NetR9*



Слика 4. *Trimble Zephyr Geodetic 2*



Слика 5. *Trimble TSC3*

Trimble Zephyr Geodetic 2 (Сл. 4) екстерна ГНСС антена садржи напредну технологију за редукцију вишеструке рефлексије, праћење сателита на ниским висинама и испод милиметарску стабилност фазног центра [14]. Ове антене представљају робусно и дуготрајно решење за успостављање референтне станице и ГНСС мреже. Контролер *Trimble TSC3* (Сл. 5) се користи да би се поједноставили свакодневни задаци на терену и повећала ефикасност. Омогућава комуникацију између тоталних станица или ГНСС уређаја на терену и рачунара са *Trimble 4D Control* софтвером у реалном времену као и преузимање и слање важних података по потреби било где и било када. За комуникацију поседује *Wireless* интернет и интегрисани *GSM/GPRS* модем [15].

Тотална станица *Trimble S9* (Сл. 6) омогућава тачност мерења углова 0.5" и 1" и представља поуздано комплетно решење за радове на терену, једноставан пренос и брзо прикупљање података [16]. Ова тотална станица је посебно прилагођена за мониторинг уз могућност потпуно аутоматизованих опажања, обраде података и алармирања у случају појаве резултата мерења изван дефинисаних граничних вредности. Комбинује напредна *Trimble* софтверска решења, високу тачност и напредне инжењерске функције. За мерење температуре, убрзања и одступања од вертикалности и хоризонталности се предлаже уређај *SENSR CX1* (Сл. 7) који садржи интегрисан термометар, двоосни инклинометар и троосни акцелерометар. Резолуција мерења акцелерометра је 0.0005 g, а резолуција мерења инклинометра износи 0.0005°. Напајање и комуникација се може успоставити *Ethernet* каблом или путем *USB-a* [17].



Слика 6. Trimble S9



Слика 7. SENSR CX1



Слика 8. WINDCAP WXT520

Метеоролошка станица *Vaisala WINDCAP WXT520* (Сл. 8) мери шест кључних параметара: брзину и правац ветра, падавине, ваздушни притисак, температуру и релативну влажност вадуха. Компактна је, лака и има низак ниво потрошње електричне енергије и конекција се врши путем *USB*-а [18].

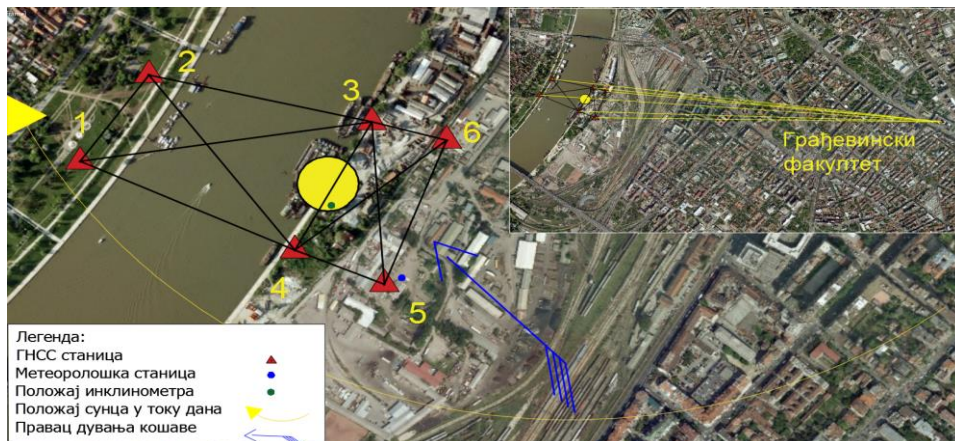
5. ПРЕДЛОГ РЕШЕЊА ПРОЈЕКТА ПРАЋЕЊА ИЗГРАДЊЕ БУДУЋЕ КУЛЕ КОМПЛЕКСА „БЕОГРАД НА ВОДИ“

Као предлог решења за праћење изградње будуће куле комплекса „Београд на води“ приказано је *Trimble*-ово решење.

За реализацију референтне мреже препоручује се 7 ГНСС станица (Сл. 9), од чега су четири станице на обали на којој се гради објекат, две станице на супротној обали и једна на стабилној згради ван зоне градилишта. Шест тачака уз објекат су поређане у ланац од два геодетска четвороугла, а седма, мастер станица је на згради Грађевинског факултета. Зграда Грађевинског факултета је узета у обзир због своје дуговечности и стабилности. Улога мастер станице је да прати померања 6 референтних тачака на градилишту и да шаље податаке *RTCM* корекција преко мобилног интернета (*NTRIP*) или директне интернет везе. Две станице са друге стране обале су препоручене због побољшања квалитета геометрије мреже и из разлога што се објекат гради делом на реци, тј. планира се насипање терена на коме ће бити изграђен објекат.

Свих 6 станица референтне мреже се користе за праћење померања тла на градилишту, док је препоручено да 3 референтне станице имају радио модем и могућност слања података *RTCM* корекција корисницима ГНСС уређаја на градилишту за реализацију мерења *RTK* методом.

На врху објекта, ради прикупљања података за потребе изравњања позиција контролних тачака услед нагиба објекта и реализације геодетског обележавања, препоручује се постављање 4 ГНСС уређаја са интегрисаним 360° призмама, равномерно распоређена по ободу објекта (Сл. 10а). Да би се извршило пресецање праваца назад, неопходно је визуелно догледање ка минимум 3 тачке. Због постојања могућих препрека и немогућности визуелног догледања са једном од 3 тачке неопходно је додавање макар још једне тачке за сигурну реализацију поступка пресецања праваца назад. Да би се систем комплетирао потребно је постављање инклинометара који одређују одступање објекта од вертикалности. Као оптимално решење препоручује се коришћење 5 инклинометра (Сл. 10б).



Слика 9. Скица референтне геодетске мреже

Пошто су очекивани мањи нагиби објекта током изградње на мањим висинама, а већи на већим, потребан је гушћи распоред инклинометара на већим висинама јер се дејство ветра, сунца и оптерећења кранова повећава са повећањем висине објекта при изградњи. Инклинометар је потребно поставити на тај начин да осе инклинометара буду паралелне са координатним системом градилишта како би се избегле грешке услед погрешно интерпретираних детектованих померања. Ради праћења временских услова и климатских аномалија, неопходно је поставити метеоролошку станицу. Препоручена локација је изван објекта (Сл. 9), поред тачке 5 где се очекују највећи утицаји ветра (кошаве) и сунчевог зрачења.



Слика 10а. Положај ГНСС уређаја Слика 10б. Положај инклинометара

6. ЗАКЉУЧАК

Реализација прецизне референтне мреже са ГНСС уређајима на градилишту треба да задовољи све захтеве геодетске струке на самом градилишту и не захтева додатна улагања у ГНСС инфраструктуру. На овај начин се избегавају евентуалне грешке неслагања координата које добијају и користе различити извођачи, а самим тим се смањује ризик од грешака у изградњи насталих употребом погрешног координатног система. Описани систем обезбеђује перманентни мониторинг и добијање информација у реалном времену о евентуалним померањима тачака референтног координатног система. Референтни координатни систем на градилишту пружа неограничену и флексибилну употребу за све врсте произвођача геодетске опреме и представља основу за *High Rise* апликацију.

Trimble High Rise софтвер олакшава рад геодетских стручњака током изградње објекта јер сваке секунде, 24/7 је могуће мобилним путем, употребом контролера на терену приступити коригованим координатама контролних тачака на врху објекта. За одређивање координата 360° призми, поправљених за вредности 3Д одступања, које су неопходне за прецизно позиционирање тоталне станице на врху објекта методом пресецања праваца назад користе се мерења интегрисаног система сензора: ГНСС уређаја постављених директно на 360° призме и инклинометара. Имплементирани систем за мониторинг током изградње се може искористити и за мониторинг у експлоатацији, при чему се може задржати свих 5 инклинометара, мастер станица и један ГНСС уређај на врху зграде који ће континуално пратити 3Д померања објекта и евентуално алармирати надлежне особе у случају детекције 3Д померања изван дефинисаних граница толеранције.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Park, H. S., Sohn, H. G., Kim, I. S., Park, J. H.: Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **2008**, vol. 17, бр. 1, стр. 117-132.
- [2] Casciati, F., Clemente, F.: Monitoring a steel building using GPS sensors. *Smart Structures and Systems*, **2011**, vol. 7, бр. 5, стр. 349-363.
- [3] Hongnan, L., Linsheng, H.: Recent developments of structural vibration control in civil engineering in China. *Journal of Earthquake and Tsunami*, **2010**, vol. 4, бр. 1, стр. 9-21.
- [4] Park, H. S., Hong, K., Seo, J.H.: Drift design of steel-frame shear-wall systems for tall buildings. *The Structural Design of Tall Buildings*, **2002**, vol. 11, бр. 1, стр. 35-49.
- [5] Maciej, W., Grzegorz, N., Mariusz, F., Marcin S.: Multi-GNSS measurement system for Structural Health Monitoring applications. *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering, ICEE*, **2014**, vol. 9.
- [6] Ogaja, C., Li, X., Rizos, C.: Advances in structural monitoring with global positioning system technology: 1997-2006. *Journal of Applied Geodesy*, **2007**, vol. 1, бр. 3, стр. 171-179.

- [7] Yi, T. H., Hongnan, L., Ming, G.: Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures, *Structural Control and Health Monitoring*, **2013**, vol. 20, бр. 5, стр. 649-670.
- [8] Öcalan, T., Tunalıoğlu, N.: Data communication for real-time positioning and navigation in global navigation satellite systems (GNSS)/ continuously operating reference stations (CORS) networks. *Scientific Research and Essays*, 2010, vol. 5, бр. 18, стр. 2630-2639.
- [9] <http://www.trimble.com/infrastructure/trimble-4d-control.aspx>, преузето 2.3.2016.
- [10] <http://www.trimble.com/Infrastructure/Trimble-High-Rise-App.aspx>, преузето 2.3.2016.
- [11] https://trimbledimensions2014.smarteventscld.com/connect/fileDownload/session/CDE5B17A3218C90A4A4810A7F0BEA1F2/INFRA-7782_Li-INFRA-7782_Daub.pdf, преузето 2.3.2016.
- [12] Barnes, J., Rizos, C., Kanli, M., Pahwa, A., Small, D., Voigt, G.: High accuracy positioning using Locata's next generation technology. In *18th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the US Institute of Navigation*, **2005**, стр. 2049-2056.
- [13] http://www.ascscientific.com/NetR9_DataSheet.pdf, преузето 8.3.2016.
- [14] <http://www.trimble.com/gnss-inertial/zephyr-geodetic-antennas.aspx?dtID=overview>, преузето 8.3.2016.
- [15] <http://www.trimble.com/Survey/tsc3.aspx>, преузето 8.3.2016.
- [16] <http://www.trimble.com/Survey/Total-Station-S9.aspx>, преузето 8.3.2016.
- [17] <https://sensr.com/Products/CX1>, преузето 8.3.2016.
- [18] <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/WEA-MET-WXT520-Weather-datasheet-B210417EN-K-LOW.pdf>, преузето 8.3.2016.

APPLICATION OF MODERN GEODETHIC METHODS DURING THE CONSTRUCTION OF HIGHRISE BUILDINGS

Summary: *The realization of geodetic work for construction of high rise buildings is shown in the paper. With the example of integrated multi-sensor system (Global Navigation Satellite System (GNSS), inclinometers, total station, meteorological sensors), and a concept design of a permanent monitoring in real time as well as geodetic stakeout during the construction of a high rise building for the tower in the „Belgrade Waterfront” project is shown. The software solution Trimble 4D is described for the realization of the project. The possibilities of the geodetic profession are illustrated according to the concept design. The place, role and significance of the geodetic expert in these types of projects are shown.*

Keywords: *GNSS, total station, inclinometer, High Rise*