

UDK 528.482:726.6.025.4:692.44(497.5)
Stručni članak

Geodetski radovi na sanaciji kupole katedrale sv. Jakova u Šibeniku

Ivica ŽUBRINIĆ – Split*

SAŽETAK. Zahvaljujući velikim naporima konzervatora Državne uprave, Biskupskom uredu za graditeljstvo grada Šibenika, bračkim klesarima iz Pučišća, građevinarima i geodetskim stručnjacima Geodetskog zavoda d.d. Split, tijekom listopada i studenoga mjeseca 1996. godine obavljena je uspješna sanacija kupole šibenske prvostolnice – katedrale svetog Jakova. Tijekom Domovinskog rata u učestalim napadima na grad Šibenik, kamena kupola katedrale pogođena je dvama direktnim pogotcima od strane Jugoslavenske ratne mornarice. Kako se tijekom Domovinskog rata nije iznašlo novčanih sredstava za obnovu nastalih oštećenja, a uzimajući u obzir i sigurnost graditelja na sanaciji, tek je koncem 1996. godine uz svestranu pomoć svjetske zajednice i Republike Hrvatske, mogla započeti obnova kupole i ostalih oštećenih objekata u neposrednoj blizini katedrale. Da bi se tijekom rata donekle zaštitila kupola katedrale, postavljena je zaštitna skela, sagrađena od drvene građe i željeza, a pogođene kamene ploče i rebra zaštićena su pleksiglasom, koji je oblijepljen silikonskom masom. Na prijedlog konzervatora i Državne komisije za obnovu katedrale, prije promjene oštećenih kamenih ploča i rebara trebalo je snimiti postojeće stanje kamene kupole, da bi se nakon sanacije adekvatno tomu kamene ploče i rebra mogli postaviti u prvobitni položaj. Geodetska je izmjera obavljena na odabranim karakterističnim mjernim mjestima, tj. točkama (spoj segmenata vrhova rebara donje i gornje) koje su predložili geodetski stručnjaci. Svako je kontrolno mjerno mjesto numerirano i obilježeno tankim vodootpornim flomasterom. Za svaku je točku napravljen precizni položajni opis, kako bi se mjerno mjesto uvijek moglo ponovno uspostaviti. Bitno je napomenuti da je točnost ponovnog stabiliziranja pojedinih kamenih ploča i rebara bila iznad postavljenih kriterija koje je zahtijevao naručitelj, i to ± 2 mm za horizontalna i ± 1 mm za vertikalna odstupanja.

Ključne riječi: sanacija kupole šibenske katedrale, precizni geodetski radovi, signalizacija i stabilizacija mjernih točaka.

*Ivica Žubrinić, dipl.ing., Geodetski zavod d.d., R. Boškovića 20, 21000 Split.

1. Uvod

Genijalni graditelj i kipar Juraj Dalmatinac rođen je početkom XV. stoljeća u Zadru, a umro je u listopadu 1473. godine u Šibeniku. Školovao se u Veneciji u radionici braće Bon. U naše jadranske krajeve prenio je građevne i dekorativne oblike kasne mletačke cvjetne gotike. Od 1441. pa sve do smrti radio je kao glavni graditelj i projektant katedrale svetog Jakova u Šibeniku. Radio je na njezinu poprečnom brodu, koru, sakristiji i osnovama za kamenu kupolu. Njegova su djela plastična dekoracija krstionice, kipova apostola na bočnim portalima i vijenac sa 74 glave na vanjskoj strani apsida. Također je boravio u Splitu, gdje je podignuo niz palača. U Dubrovniku je radio na obnovi Kneževa dvora i dovršenju kule Minčeta. Djelovao je u Zadru i Pagu, za koji je izgradio urbanistički plan. U Anconi je podignuo *Loggiu dei Marcanti* te izradio pročelja s figurama na crkvama Sant Francesco alle Scale i Sant Agostino.

Katedrala (lat. *ecclesia cathedralis*) u zapadno crkvenoj terminologiji je glavna crkva u većem gradu, u kojoj stoluje, tj. ima svoju biskupsku stolicu biskup odnosno nadbiskup. Kao stolna crkva, katedrala je najmonumentalnija i najmarkantnija građevina toga grada. Često se u tom značenju nazivaju katedralama već ranokršćanske bazilike, zatim romaničke biskupske crkve, a ponajviše gotičke. Među najistaknutijima su katedrale u Kölnu, Milanu, Parizu, a kod nas su svakako najpoznatije zagrebačka, splitska i šibenska katedrala.

Šibenska katedrala građena je od 1441. pa, prema poznatim zadnjim saznanjima, do 1560. godine. Njezin je graditelj Juraj Dalmatinac bio prisutan gradnji svojega najpoznatijeg djela sve do smrti, a nakon toga po njegovim uputama i crtežima uz znatne teškoće razni su graditelji okončali gradnju katedrale. Iako danas nemamo pisanih podataka o tijeku gradnje, njezinim originalnim crtežima i planovima, već uglavnom spoznaje zasnivamo na pretpostavkama, možemo zaključiti da, gledajući očima onoga doba i ondašnjim ljudskim mogućnostima, gradnja takvog objekta cijelog u kamenu predstavlja svojevrsnu genijalnost u građevinarstvu. S velikom se sigurnošću pretpostavlja da se oko katedrale nije gradila drvena skela, jer su kameni blokovi od kojih se gradila katedrala bili dosta teški, već se primijenila tehnika gradnje zasipavanjem onoga dijela katedrale koji je izgrađen. Kako se na mjestu gdje je sagrađena katedrala nije moglo naći dovoljno zemlje za takav način gradnje, mještani su se obvezali da će po potrebi dovoziti zemlju s okolnih šibenskih polja, a ta se zemlja poslije upotrijebila za perivoj koji je bio izgrađen oko katedrale. Prema tome može se zaključiti da graditelji katedrale sv. Jakova nisu vidjeli svoje dijelo, sve do konačnoga kraja, kada su uklonivši zemlju iz katedrale i oko nje ugledali veličnu građevinu koja se gradila više od jednog stoljeća.

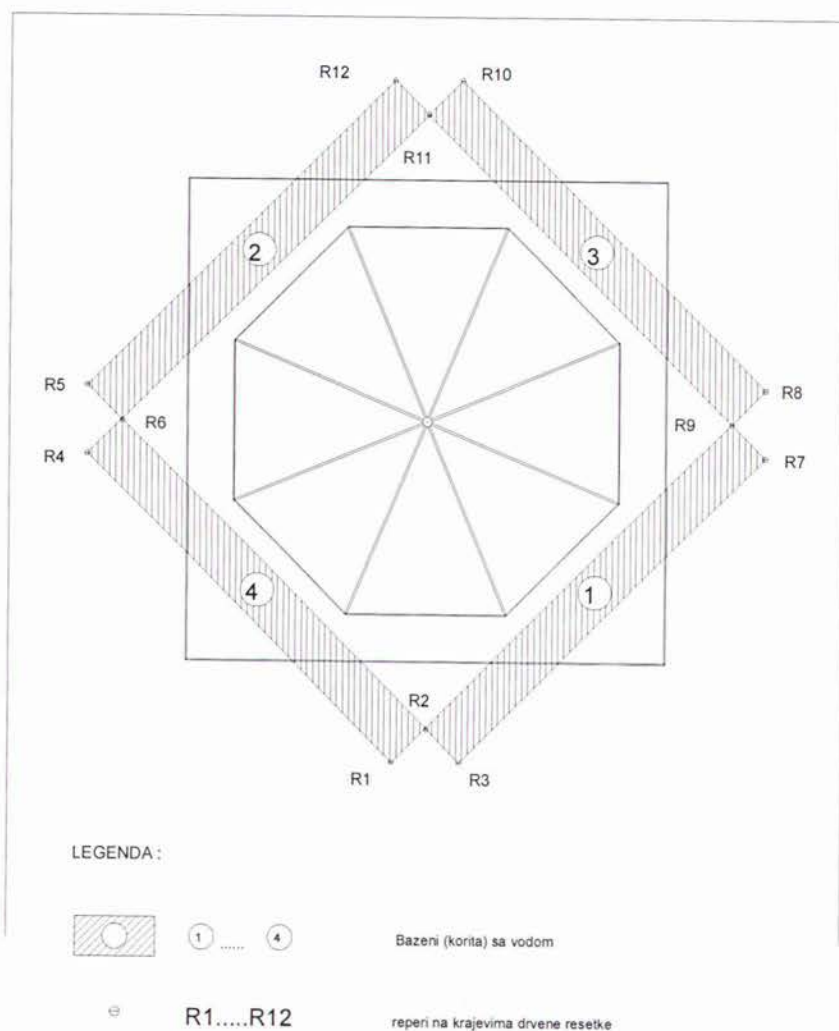
Glavni je i jedinstveni dio katedrale kupola, koja može imati tlocrt kružnice, kvadrata ili mnogokuta. Kupola dolazi ponajviše u obliku kalote ili polukugle, a izvodi se od kamena ili opeke, a u novije doba od armiranog betona. Često se između kupole i pandantiva umeće cilindrični tambur, a u tjemenu kupole najčešće se ostavi otvor za svjetlo. Takav slučaj nije primijenjen pri gradnji šibenske katedrale, već je ugrađen vršni kamen, koji je predstavljao određenu nepoznanicu.

Budući da nije bilo dostupnih pisanih podataka o gradnji kupole katedrale sv. Jakova, konzervatori Državne uprave odlučili su od stiropora izgraditi kupolu u naravnoj veličini, kako bi došli do spoznaja o njezinoj gradnji. Na prijedlog poduzeća

“Izgradnja” iz Šibenika, koje je izvodilo radove na sanaciji, angažirani su geodetski stručnjaci Geodetskog zavoda d.d. Split, koji su snimili postojeće stanje prije razmontiranja kupole, prisustvovali radovima na demontaži, izmjeni oštećenih dijelova i ponovnom sastavljanju kupole u cijelosti.

2. Geodetski radovi na sanaciji kupole

Kupola šibenske katedrale izgrađena je u kamenu i nadsvođuje oltar katedrale, a ima tlocrtni oblik mnogokuta (nepravilni oblik osmerokuta, utvrđen nakon geodetske izmjere) (vidi sliku 1). Za potrebe sanacije izgrađena je željezna skela od oltara



Slika 1. Skica položaja repera i bazena za ispitivanje sigurnosti drvenih rešetaka

do kupole, koja je zatim učvršćena drvenim daskama i gredama. Poslije, kod demontaže kupole, željezno-drvena konstrukcija poslužila je i kao uporište kamenoj kupoli koja nije imala adekvatnog potpornja.

Djelatnicima Geodetskog zavoda d.d. Split bio je postavljen složen zadatak: snimiti svaki bitni dio kupole katedrale (ploče i rebra) da se prilikom demontaže i ponovnog sklapanja može postići točnost od 2 mm za horizontalna i 1 mm za vertikalna odstupanja, koju je postavio naručitelj. Oko oštećene kupole postavljena je s vanjske strane drvena skela, koja je djelomično štitila kupolu ali i katedralu od daljnjih oštećenja (misli se na napade Jugoslavenske vojske, koja je sve do akcije "Oluja" bila stacionirana u neposrednoj blizini Šibenika) i od vremenskih nepogoda. Na zahtjev naručitelja radova obavljena su geodetska mjerenja – promatranje drvenih rešetki u visini baze tambura – pri opterećenju i nakon njega. Opterećenja su postignuta montiranim plastičnim koritima (bazenima) (slika 1), koja su za vrijeme mjerenja bila ispunjena vodom.

Svrha je tih mjerenja bila provjera stabilnosti drvene građevine nakon pet godina, koja je pri sanaciji kamene kupole poslužila kao skela, a koja je još i dograđena. Ispitivanja su obavljena na predloženim mjernim točkama prema izvedbenom projektu, koji je izradio projektant Davor Uglešić, dipl. ing. građevinarstva. Ispitivanje je obavljeno u paru, po dvije rešetke na svakom kutu tambura. Prije opterećenja označeni su reperi na krajevima rešetke, na svakome tamburu po tri. Mjereno je nulto stanje, bez opterećenja, zatim su obavljena tri mjerenja repera na rešetkama s opterećenjem i na kraju dva mjerenja bez opterećenja. Mjereno je digitalnim nivelirom DINI 010 Zeiss i kodiranim invarnim letvama. Mogućnost očitavanja mjerenih podataka je reda veličine 1/100 mm, a standardno odstupanje mjerenja iznosi 0,3 mm. Visinski su pomaci mjereni s obzirom na referentni reper, koji je postavljen na neutralnom dijelu krova katedrale. Pomaci drvenih rešetaka pri opterećenju i nakon opterećenja prikazani su u tablici 1. Mjerenja su obavljena 4. i 5. listopada 1996. od 9 do 18 sati, a vrijeme tijekom mjerenja preciznog nivelmana bilo je ugodno i bez vjetra.

Nakon provjere drvene konstrukcije, trebalo je obaviti rekognosciranje terena u neposrednoj blizini kamene kupole, te se došlo do saznanja da nije moguće primijeniti tehniku zatvorenih mnogokuta (Janković 1980), koja se primjenjuje kod oskultacija brana i visokih građevina.

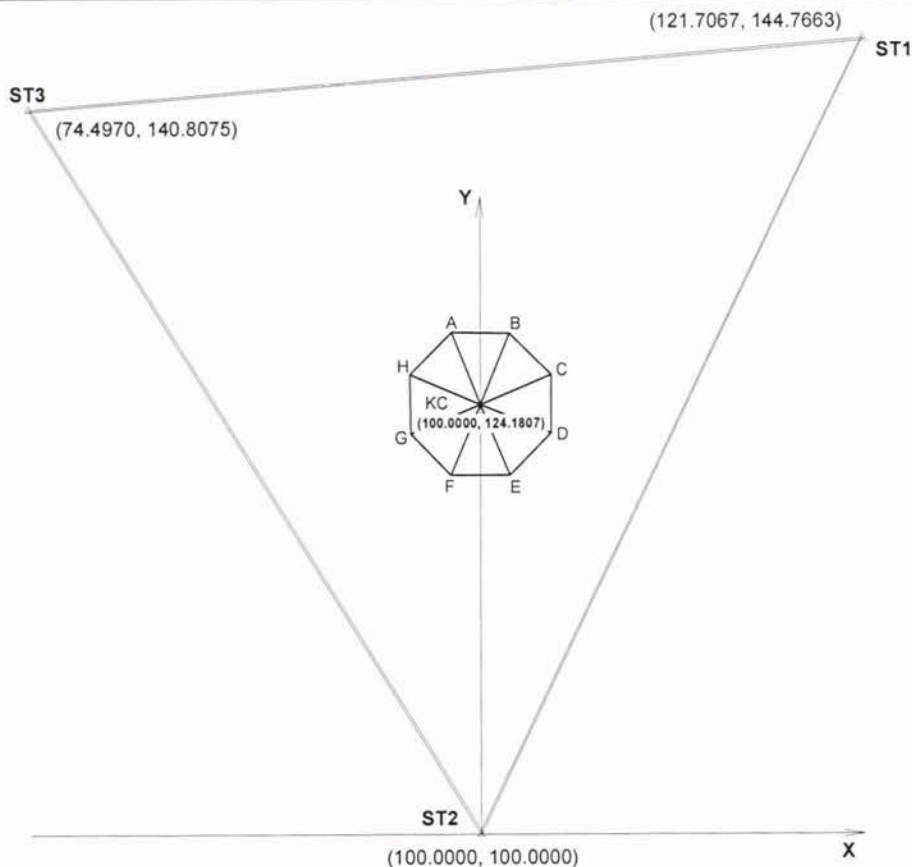
Okolni teren nije omogućivao povoljne kriterije zatvaranja slobodne osnovne mikrotriangulacijske mreže, pa je prihvaćen uvijet trokuta. Trebalo je također stupove osnovne mikrotriangulacijske mreže postaviti na približno istim visinama, tako da su duljine između stupova približno jednake. Osnovnu mikrotriangulacijsku mrežu činile su tri točke, postavljene na sljedeći način: stajalište 1 nalazilo se na balkonu muzeja, stajalište 2 na katedrali (poprečnom brodu), a stajalište 3 na balkonu stambene zgrade (slika 2).

Na stajalištima 1 i 3 ugrađeno je željezno postolje za prisilno centriranje instrumenta, dok se zbog zaštite spomenika kulture nije moglo na sličan način stabilizirati stajalište 2 (izgraditi na krovu katedrale betonski stup). Zbog toga se pristupilo stabilizaciji Kernovih nogara krutim viskom, koje se ubetonira u kameni krov broda katedrale. Poslije se kruti visak skine i točnot centriranja provjeri se optičkim viskom, koji se nalazi na prizmi. Lokalni koordinatni sustav postavljen je tako da os Y prolazi kroz točku 2 i središte kupole, tj. točku označenu kao KC (kupola centar).

Tablica 1. Pregledni prikaz pomaka drvenih rešetaka na bazi tambura

Datum	Broj repera	0. mjerenje bez opterećenja	1. mjerenje opterećenje 2x2600 kg nakon 30 min.	2. mjerenje opterećenje 2x4600 kg nakon 30 min.	3. mjerenje opterećenje 2x4600 kg nakon 2 sata	4. mjerenje bez opterećenja nakon 30 min.	5. mjerenje bez opterećenja nakon 17 sati	
oznaka bazena		mm	mm	mm	mm	mm	mm	
4.10.1996.	R1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	
	R2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	R3	0,0	-0,2	-1,4	-1,5	-0,4	-0,4	
	1	R4	0,0	-0,4	-1,5	-1,5	-1,3	-1,0
		R5	0,0	-0,2	-4,6	-4,7	-0,5	-0,4
		R6	0,0	0,	-2,7	-2,7	-2,0	-1,8
	2	R7	0,0	-2,6	-5,8	-5,8	-1,3	-1,3
		R8	0,0	0,0	-1,0	-1,1	0,0	0,0
		R9	0,0	-1,3	-5,2	-5,3	-2,8	-2,7
	R10	nije mjereno	nije mjereno	nije mjereno	nije mjereno	nije mjereno	nije mjereno	
	R11	- -	- -	- -	- -	- -	- -	
	R12	- -	- -	- -	- -	- -	- -	
5.10.1996.	R1	0,0	1,7	-3,3		-1,6		
	R2	0,0	-0,4	-2,2		-1,0		
	R3	0,0	0,0	-0,2		0,0		
	3	R4	0,0	-1,8	-5,5		-1,9	
		R5	0,0	0,0	-4,0		-1,4	
		R6	0,0	0,0	-2,0		-0,4	
	4	R7	0,0	-1,4	-3,0		-1,7	
		R8	0,0	-0,8	-3,4		-0,8	
		R9	0,0	-1,0	-1,0		-0,2	
	R10	0,0	-1,5	-2,5		-0,5		
	R11	0,0	0,0	-2,5		0,0		
	R12	0,0	0,0	-0,7		0,0		

Početne lokalne koordinate $Y = 100,000$ m; $X = 100,000$ m dodijeljene su stajalištu 2, dok su koordinate ostalih stajališta izračunane iz mjerenih podataka (mjerenje duljina i pravaca metodom kombiniranih mjerenja s izjednačenjem). Početna relativna visina od $50,0000$ m dodijeljena je osnovnom reperu ugrađenomu u blizini re-



Slika 2. Skica mikrotriangulacijske mreže

bra A. S početnog repera visina je prebačena na točke mikrotriangulacije, a s njih dalje na svako mjerno mjesto, i to metodom trigonometrijskog nivelmana, što služi kao kontrola preciznog nivelmana visoke točnosti za svako mjerno mjesto. U našem slučaju mogli smo i trigonometrijskim nivelmanom određivati visine, jer su duljine između stajališta relativno male i utjecaja refrakcije je malen (Čubranić 1954, Janković 1981). No primijenili smo mjerenje metodom preciznog nivelmana visoke točnosti, jer su vizure između pojedinih stajališta bile kratke (od nivelira do kontrolnih mjernih točaka do 3 m). Trigonometrijski smo nivelman uzeli kao pomoćnu metodu mjerenja i došli do saznanja da uporabom visokoprecizne mjerne stanice Leica TC 2002 i pomoćnog pribora dobivamo približno iste veličine visinskih razlika. Međutim, takav način mjerenja ima prednosti kada su duljine kratke i kada za to postoje opravdani razlozi. Trigonometrijski se nivelman može upotrebljavati za opažanja visinskih pomaka u posebnim slučajevima, kada se ne može primijeniti metoda preciznog nivelmana. To su redovito slučajevi teško pristupačnih konstrukcija, odnosno terena nepristupačnih za primjenu preciznog nivelmana visoke točnosti (Čubranić 1967). Zato se ta redovito brza metoda malo primjenjuje, bez obzira na njezinu točnost, koju uvjetuje pojava promjena terestičke refrakcije.

Princip je mjerenja isti kao i pri mjerenju horizontalnih pomaka, tj. visinski se pomaci određuju iz razlike visina koje su dobivene mjerenjem vertikalnih kutova. Točnost te metode ovisi o točnosti kojom se mjere vertikalni kutovi, udaljenosti, točnosti čitanja mjerenih podataka i terestičke refrakcije (upotrebljavati teodolite s točnošću čitanja na limbu od $\pm 0,1''$). Točnost određivanja visinskih pomaka tom metodom može se povećati ako su duljine između stupova osnovne mikrotriangulacijske mreže i kontrolnog mjernog mjesta kratke, što se međutim mora uskladiti i sa zahtjevima za promatranje horizontalnih pomaka. Osim toga, pozornost treba posvetiti mjerenju visine instrumenta na stupu, stabilnosti stupa i mjernih mjesta. Mjerenje visine instrumenta, kao i pojedinačne visine na svakome – pomičnom mjestu gdje će se postavljati Kernova prizma, učinjeno je šublerom – pomičnim mjerilom. Visine kontrolnih mjernih mjesta, koja se nalaze na rebrima kupole, određene preciznim i trigonometrijskim nivelmanom razlikuju se najviše 0,5 mm. Naime, za svako je mjerno mjesto izračunan koeficijent uklanjanja utjecaja refrakcije. Koeficijenti su izračunani prema sljedećim relacijama (Janković 1980):

$$\frac{d^2}{2R} \text{ utjecaj zakrivljenosti Zemlje, i } -\frac{k}{2R} d^2 \text{ utjecaj refrakcije,}$$

gdje su $R = 6\,377\,000$ m, Zemljin radijus, d – duljina i k – koeficijent refrakcije (vidi tablicu 2).

Tablica 2. Prikaz izračunanih koeficijenata

Duljina pravaca d m	$\frac{d^2}{2R}$	$-\frac{k}{2R} d^2$	$\frac{1-k}{2R} d^2$
10	0,0078 mm	0,0010 mm	0,0068 mm
20	0,0314 mm	0,0041 mm	0,0273 mm
30	0,0706 mm	0,0092 mm	0,0614 mm
40	0,1254 mm	0,0163 mm	0,1091 mm
50	0,1960 mm	0,0255 mm	0,1705 mm
100	0,7841 mm	0,1019 mm	0,6821 mm

Duljine pravaca između stajališta danih u primjeru (mjereno sa stajališta ST1 i ST3) kreću se od 27 do 30 metara, a uvidjevši da su veličine utjecaja refrakcije na kratkim udaljenostima male i kreću se ispod granice od 1 mm, mogli smo u račun uzeti srednju veličinu, jer veća je pogreška opažaća od točnosti mjerenja, a utjecaj refrakcije ima većeg utjecaja kada su udaljenosti veće.

U našem slučaju srednja vrijednost $\frac{1-k}{2R} d^2$ iznosi 0,0556 mm.

Visinska je razlika između dviju točaka izračunana prema sljedećoj jednadžbi (Čubričić 1954, 1967, Janković 1980, Macarol 1961):

$$\Delta h = d_2 \operatorname{tg} \alpha_2 + \frac{1-k}{2R} d_2^2 - \left(d_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{1-k}{2R} d_1^2 \right).$$

U tablicama 3 i 4 prikazane su izračunane visinske razlike (bez koeficijenata refrakcije) za stajališta ST1 i ST3, gdje su α – vertikalni kut sa stajališta prema mjerne mjestu na građevini-kupoli, a d – horizontalna udaljenost stajališta i mjernog mjesta na građevini-kupoli.

Tablica 3. Računanje visinskih razlika za stajalište ST1

Mjerno mjesto	α	$\operatorname{tg} \alpha$	d /m/	Δh /m/
A1D	- 3 57 01,3	0,06905627	28,5781	- 1,9735
A3D	- 1 16 35,6	0,02228378	28,6080	- 0,6375
A4D	+ 0 08 24,0	0,00244346	28,6501	+ 0,0700
A5D	+ 1 30 06,2	0,02621601	28,7113	+ 0,7527
A7D	+ 3 56 21,0	0,06885996	28,9022	+ 1,9902
A9D	+ 5 57 04,8	0,10424554	29,1955	+ 3,0435
A10D	+ 6 50 55,6	0,12010631	29,3490	+ 3,5250
A11D	+ 7 30 07,1	0,13168752	29,5404	+ 3,8901
A12D	+ 7 40 17,9	0,13470129	29,6924	+ 3,9996

Tablica 4. Računanje visinskih razlika za stajalište ST3

Mjerno mjesto		tg	d /m/	h /m/
A1D	- 1 53 29,7	0,03302636	26,9960	- 0,8916
A3D	+ 1 03 01,4	0,01833480	27,1017	+ 0,4969
A4D	+ 2 33 00,2	0,04453628	27,2385	+ 1,2131
A5D	+ 3 57 38,3	0,06923650	27,4378	+ 1,8997
A7D	+ 6 21 03,4	0,11130110	28,0249	+ 3,1192
A9D	+ 8 14 20,9	0,14479956	28,8481	+ 4,1772
A10D	+ 9 04 39,7	0,15977478	29,2499	+ 4,6734
A11D	+ 9 36 33,1	0,16930241	29,7279	+ 5,0330
A12D	+ 9 42 53,9	0,17120209	30,0382	+ 5,1426

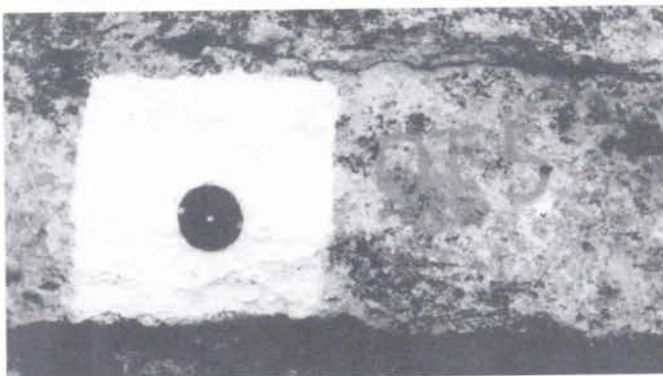
Definitivne vrijednosti visina kontrolnih repera određenih trigonometrijskim nivelmanom dane su u tablici 5.

Tablica 5. Definitivne visine kontrolnih repera

Broj mjernog mjesta	h m	Visina podnožne ploče m	Visina mjerne značke m	$\frac{1-k}{2R}d^2$	h def. m	Broj stajališta	Visina stupa H m	$H + \Delta h$ m	Definitivna visina MM m
A1D	- 1,9735	- 0,0500	- 0,3456	+ 0,0006	- 2,3685	1	52,3687	50,0002	50,0002
	- 0,8916	- 0,0500	- 0,2956	+ 0,0006	- 1,2366	3	51,2369	50,0003	
A3D	- 0,6375	- 0,0500	- 0,2867	+ 0,0006	- 0,9736	1	52,3687	51,3951	51,3953
	+ 0,4969	- 0,0500	- 0,2889	+ 0,0006	+ 0,1586	3	51,2369	51,3955	
A4D	+ 0,0700	- 0,0500	- 0,3012	+ 0,0006	- 0,2806	1	52,3687	52,0881	52,0882
	+ 1,2131	- 0,0500	- 0,3122	+ 0,0006	+ 0,8515	3	51,2369	52,0884	
A5D	+ 0,7527	- 0,0500	- 0,2996	+ 0,0006	+ 0,4037	1	52,3687	52,7724	52,7726
	+ 1,8997	- 0,0500	- 0,3145	+ 0,0006	+ 1,5358	3	51,2369	52,7727	
A7D	+ 1,9902	- 0,0500	- 0,3022	+ 0,0006	+ 1,6386	1	52,3687	54,0073	54,0076
	+ 3,1192	- 0,0500	- 0,2988	+ 0,0006	+ 2,7710	3	51,2369	54,0079	
A9D	+ 3,0435	- 0,0500	- 0,3118	+ 0,0006	+ 2,6823	1	52,3687	55,0510	55,0512
	+ 4,1772	- 0,0500	- 0,3132	+ 0,0006	+ 3,8146	3	51,2369	55,0515	
A10D	+ 3,5250	- 0,0500	- 0,3325	+ 0,0006	+ 3,1431	1	52,3687	55,5118	55,5121
	+ 4,6734	- 0,0500	- 0,3486	+ 0,0006	+ 4,2754	3	51,2369	55,5123	
A11D	+ 3,8901	- 0,0500	- 0,3269	+ 0,0006	+ 3,5138	1	52,3687	55,8825	55,8828
	+ 5,0330	- 0,0500	- 0,3374	+ 0,0006	+ 4,6462	3	51,2369	55,8831	
A12D	+ 3,9996	- 0,0500	- 0,3258	+ 0,0006	+ 3,6244	1	52,3687	55,9931	55,9934
	+ 5,1426	- 0,0500	- 0,3365	+ 0,0006	+ 4,7567	3	51,2369	55,9936	

Kako bi povećali sigurnost mjerenja, određene su orijentacijske točke koje su se mogle vidjeti sa svakoga stajališta (ukupno su određene četiri orijentacijske točke) i opažane su uvijek kada se obavljalo mjerenje. Sa svakoga stajališta mjerene su dužine (obostrano) i kutovi u četiri girusa.

Osnovna stajališta 1 i 3 s kojih se mjerilo postojeće stanje kupole katedrale i pratila njena demontaža i ponovno sklapanje, stabilizirana su s pomoću željeznog postolja visine 35 cm, ubetoniranoga u podlogu betonske ograde balkonâ na muzeju grada Šibenika i na stambenoj zgradi. Na vrhu postolja koje je do vrha ispunjeno betonom nalazi se rupa promjera 20 mm, gdje se specijalnim mesinganim vijkom postavlja



Slika 3. *Stabilizacija orijentacijske točke*

instrument i prisilno centrira. Orijentacijske su točke postavljene i stabilizirane dovoljno daleko da ne dolazi do oštećenja i da su dobro vidljive sa svakoga stajališta (slika 3).

S obzirom na to da su te mreže u pravilu slobodne, koordinatni sustav je slobodan. Koordinate točaka na segmentima rebara određene su metodom presjeka naprijed i mjerenjem duljina (metoda trilateracije), tako da smo za određivanje koordinata pojedinog rebra imali kombinirane presjeke s izjednačenjem (Čubranić 1967). Mjerenje pravaca za dobivanje koordinata pojedinih segmenata rebara učinjeno je u 4 girusa, a ujedno su i izmjerene horizontalne duljine u nekoliko ponavljanja. Mjerna su mjesta na rebrima (slika 4) numerirana i označena vodootpornim flomasterom.



Slika 4. *Mjerna mjesta na rebrima kupole i montirana Kernova prizma na priručnom postolju*

Kada smo obavili sve potrebne predradnje i numeraciju pojedinih segmenata rebara, trebalo je obaviti geodetska mjerenja. Za takva visokoprecizna geodetska mjerenja potrebno je odabrati odgovarajući pribor i instrumentarij. U našem slučaju opredjelili smo se za visokoprecizni elektronički tahimetar *Leica TC 2002 No 437501* i Kernove prizme s ugrađenom libelom, koje upotrebljavamo za oskultaciju i mjerenje duljina (npr. za mjerenje duljina na čelično-tlačnom cjevovodu RHE "Ve-lebit" u Obrovcu) i koji nam omogućuju visoku točnost mjerenja pravaca i duljina. Prije mjerenja duljina provjerena je točnost mjernog pribora: prizama, koje se postavljaju na specijalno postolje i optičkim viskom centriraju na mjerna mjesta (rebra), i instrumenta. Ispitivanja su na kalibracijskoj bazi DUGOPOLJE obavili Ivica Žubrinić i Zvonimir Šulentić, dipl. inženjeri.

2.1. Ocjena preciznosti

Jedan je od uvjeta kvalitetnih mjerenja i izbor instrumenta. Odlučili smo se za već provjereni elektronički tahimetar *Leica TC 2002*, kojom se postiže visoka točnost mjerenja kutova i duljina.

Prema tvorničkom certifikatu, rezultati mjerenja duljina mogu biti:

- normalno mjerenje duljina, mjerenje od 4 sekunde ima točnost $\pm(1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$,
- kontinuirano mjerenje duljina, mjerenje od 4 sekunde ima točnost $\pm(1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$,
- brzo mjerenje duljina, mjerenje do 3 sekunde ima točnost $\pm(3 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$,
- stalno mjerenje duljina, mjerenje od 1 do 2 sekunde ima točnost $\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$.

S obzirom na dobivene rezultate mjerenja duljina i tvorničke standarde, možemo sa sigurnošću istaknuti da su rezultati mjerenja imali veću točnost od $\pm(1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$.

Ispitivanje visokoprecizne mjerne stanice *Leica TC 2002* na kalibracijskoj bazi DUGOPOLJE obavljeno je mjerenjem duljina u trajanju od 4 sekunde, s prisilno centriranim instrumentom i Kernovim prizmama koje imaju jahaću libelu. Konstanta Kernovih prizama nakon višestrukih mjerenja iznosila je $-9,2 \text{ mm}$. U obradbi mjerenja, osim kvalitetno izmjerenih duljina, spominje se korekcijski faktor ppm. Prema tvorničkim uputama, tri su osnovna korekcijska koeficijenta za ppm: atmosferski korekcijski ppm ΔD_1 , redukcijski korekcijski ppm ΔD_2 (redukcija duljine na nivo mora) i korekcija za prijelaz u geodetsku projekciju ΔD_3 . U našem slučaju važan je samo atmosferski korekcijski faktor, dok su preostala dva zanemarena. Atmosferski korekcijski ppm ΔD_1 ovisi o sljedećem: p – atmosferskom tlaku (mb), t – temperaturi zraka u $^{\circ}\text{C}$ (potrebno je mjeriti temperaturu zraka kraj instrumenta i kraj prizme), h – relativnoj vlažnosti (%), α – $1/273,16$ i parametru

$$x = \frac{7,5 t}{273,3 + t} + 0,7857.$$

Tijekom mjerenja duljina na kupoli katedrale sv. Jakova temperatura zraka mijenjala se od $+12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+14 \text{ }^{\circ}\text{C}$, relativna je vlažnost bila oko 70%, atmosferski tlak stabilan i iznosio je $p = 1005,00 \text{ mb}$. Na temelju izmjerenih vrijednosti temperature i tlaka zraka izračunali smo ppm prema formuli:

$$\Delta D_1 = 281,0 - \left[\frac{0,29065 p}{(1 + at)} - \frac{4,126 \times 10^{-4} h}{(1 + at)} 10^x \right].$$

Atmosferski je ppm tijekom mjerenja iznosio $\Delta D_1 = 0,133$ mm. Kako se tijekom mjerenja mijenjaju pojedini faktori, pojednostavljeno je često računanje i korekcija navedenih veličina, tako da se iz dijagrama neposredno na terenu može unijeti u mjernu stanicu atmosferska korekcija ppm (atmosferski ppm potrebno je tijekom mjerenja češće kontrolirati jer se mijenjaju temperatura, tlak i vlažnost zraka). Iz svega toga, možemo zaključiti da su duljine za pojedine segmente rebara kvalitetno i precizno izmjerene, a eventualno veća točnost može se dobiti uvrštenjem i mjerenjem pravaca.

Pri oskultaciji visokih građevina, brana i sl., kontrolna se mjerna mjesta stabiliziraju na taj način da se markica ili prizma prisilno centrira na željeno mjesto. Kako u ovom slučaju nismo mogli ostvariti takav način prisilnog centriranja na pojedini segment rebara kupole, izradili smo postolje koje smo postavili u neposrednoj blizini mjenjenog mjesta (vidi sliku 4), a na to postolje (prozvali smo ga *mačja kanda*) postavili smo Kernovu prizmu, koja ima na sebi ugrađenu jahaću libelu i optički visak. S pomoću optičkog viska centralizirali smo prizme na promatrano mjesto, a horizontalnost je postignuta spomenutom libelom, koja je justirana. Točnost centriranja i mjerenje pravaca i duljina zadovoljila je potrebnu točnost postavljenu pri mjerenju segmenata rebara kamene kupole katedrale.

Nakon određivanja koordinata stajališta, određene su koordinate pojedinih točaka segmenata rebara. Svaka je mjerna točka na terenu označena urezanim križem i vodootpornim flomasterom, a napravljeni su i položajni opisi pojedinih mjenjenih točaka, kako bi se točke po potrebi mogle točno identificirati. Mjenjenim mjestima dali smo oznake npr. A1 donje (A1D) ili A1 gornja (A1G) itd., zatim A12G (gornja ujedno završna), E12G, C12G, G12G, središte segmenta kupole KC. Točka C6 gornja (C6G) nije se mogla izmjeriti zbog velikog oštećenja. Sa stajališta 1 mjerena su rebra A, B, C i D, na stajalištu 2 mjerena su rebra D, E, F i G, a na stajalištu 3 mjerena su rebra F, G, H i A. Tijekom rada, prilikom skidanja zaglavnoga kamena, uništena su mjerna mjesta C12G, E12G i G12G. Međutim, na temelju detaljnih položajnih opisa uspješno se obnoviti uništena mjerna mjesta. Kako je već prije navedeno, oko oštećene kupole sagrađena je skela pa se prilikom mjerenja pojedinog segmenta rebara morala obaviti djelomična demontaža skele jer se prizma na svojem postolju nije mogla vidjeti sa stajališta, a zatim ponovno montirati i na drugome mjestu demontirati radi daljnjeg mjerenja, što je dodatno otežavalo mjerenja.

Nakon određivanja lokalnih koordinata pojedinih segmenata rebara na istim je mjestima određena i visina (tablica 6). Osnovni je reper stabiliziran u neposrednoj blizini rebara A svojevoljno odabrane početne visine 50,00 m.

Budući da drvena skela oko kupole nije bila dovoljno stabilna izrađena je željezna konstrukcija što se učvrstila na pojedinom segmentu mjenjenog rebara s kojega su obavljena nivelmanska mjerenja digitalnim nivelirom DINI 010 Zeiss i kodiranim invarnim letvama, zatvaranjem pojedinih figura s nivoom (npr. mjenjen je nivo 6, A6D, A6G, B6D, B6G, C6D, C6G ... do H6D i H6G). Radi veće sigurnosti ali i kontrole obavljena su mjerenja visina obrnutim smjerom istog dana, na istom dijelu

Tablica 6. *Popis konačnih koordinata i visina stajališta i mjernih mjesta za rebro A*

Rebro	Oznaka točke	X	Y	H
	ST1	121,7067	144,7663	52,3687
	ST2	100,0000	100,0000	48,5863
	ST3	74,4970	140,8075	51,2369
	KC	100,0000	124,1807	-
A	A1D	98,3903	128,2419	50,0004
	A3D	98,4433	128,1160	51,3954
	A4D	98,5104	127,9508	52,0882
	A5D	98,6086	127,7130	52,7727
	A7D	98,8951	127,0189	54,0078
	A9D	99,2909	126,0604	55,0514
	A10D	99,4817	125,5982	55,5120
	A11D	99,7067	125,0525	55,8827
	A12G	99,8389	124,6805	55,9933

kupole katedrale, automatskim nivelirom KONI 007 s polucentimetarskim invarnim letvama.

Nakon položajnih i visinskih određivanja, pristupilo se demontaži kupole, koju su pratili lokalni mediji i Hrvatska televizija. Nije obavljena cjelokupna demontaža kupole do početnih rebra, već djelomična do pred dva početna rebra A2G. Svi rastavljeni dijelovi uredno su složeni u neposrednoj blizini katedrale, u ogradenom čuvanom prostoru. Konzervatori i brački klesari odlučili su zatim koji će se dijelovi zamijeniti. U bračkom kamenolomu nadaleko od Pučišća obavljeno je klesanje kamenih ploča i oštećenih rebra. Izmjena oštećenih elemenata (kamenih ploča i rebra) izvedena je vrlo pažljivo. Položaj svakog dijela koji se ugrađivao provjeren je visinski i horizontalno (uvidom u određene koordinate i izmjerene visine). Ako su eventualna odstupanja bila u granicama dozvoljenih odstupanja, pristupilo se trajnoj stabilizaciji specijalnim vezivom. Kako se ugradnja obavljala pod nadzorom geodetskih stručnjaka (na svaku je mjernu točku trebalo ponovno stabilizirati Kernovu prizmu i točno je centrirati optičkim viskom, što je zahtijevalo umijeće i veliku dozu strpljenja), na njima je bila velika odgovornost konačnoga spoja vršnoga kamena na završetku-vrhu kupole, na kojem je poslije montiran pozlaćeni andeo.

3. Zaključak

Premda do sada nismo imali geodetska iskustva na sanacijama te vrste, ali s obzirom na to da više godina radimo na geodetskim poslovima inženjerske geodezije, takav oblik geodetskih mjerenja ne smatramo nepoznatim. Obavljajući poslove klasične geodetske izmjere kao i različita visokoprecizna geodetska mjerenja, kao npr. mjerenja oskultacija brana *Peruča*, *Kazaginac*, *Podgranina*, *Mandak*, i *Prančević*, niza hidrocentrala *HE Đale*, *HE Kraljevac*, *HE Zakučac* te opažanja cjevovoda (*čelično-tlačni cjevovod RHE Velebit*, *cjevovod HE Orlovac*, *cjevovod HE Miljacka cjevovod HE Golubić*) stekli smo određena iskustva u preciznim geodetskim mjerenjima.

Sukladno tehnološkom napretku, svako je geodetsko mjerenje danas daleko jednostavnije, točnost je veća (misli se na kvalitetu i izradbu instrumenata i priručnog pribora), obradba rezultata mjerenja višestruko ubrzana, a obučenost geodetskih stručnjaka na računalima i mnogobrojnim zadacima učinkovita. U našem poslu ima i jedna "mana", jer se često nakon kvalitetno obavljena posla nigdje ne spominju geodetski stručnjaci, često ih se neopravdano izostavlja i zaboravlja spomenuti, a tako je bilo i prilikom završetka sanacije kupole katedrale svetog Jakova.

Uvidom u rezultate mjerenja koji su djelomično prezentirani u ovom članku i iznoseći metode i prikaz rezultata mjerenja, možemo istaknuti da je uspješno obavljen postavljeni zadatak, a točnost je konačnih rezultata mjerenja iznad postavljenoga kriterija. Naime, nakon demontaže svakog segmenta rebara i ploča te prilikom ponovne montaže kupole bilo je potrebno postići točnost odnosa prije demontaže i sklapanje kamenih elemenata nakon obnove unutar kriterija od 2 mm za horizontalna i 1 mm za vertikalna odstupanja koje je postavio naručitelj. Prema iznesenim rezultatima mjerenja možemo sa sigurnošću istaknuti da je točnost ponovnog sklapanja segmenata kupole bolja od zahtijevane točnosti naručitelja, a točnost je mjerenja horizontalnih i vertikalnih podataka unutar $\pm 0,5''$.

ZAHVALA. Zahvaljujem se suradnicima Zvonimiru Šulentiću, dipl. ing. geod., Božidaru Mandiću, dipl. ing. geod., geodetima Emiru Čejvanu i Ivanu Buljcu, bez čije svestrane pomoći ne bih obavio zahtjevan posao geodetskog mjerenja na sanaciji šibenske katedrale.

Literatura

- Čubranić, N. (1967): Teorija pogrešaka s računom izjednačenja, Tehnička knjiga, Zagreb.
- Čubranić, N. (1954): Viša geodezija, GZH, Zagreb.
- Janković, M. (1980): Inženjerska geodezija II, SNL, Zagreb.
- Janković, M. (1981): Inženjerska geodezija III, SNL, Zagreb.
- Macarol, S. (1961): Praktična geodezija, Tehnička knjiga, Zagreb.

Geodetic Works on Recovery of the Cupola on the Cathedral St. Jakov in Šibenik

ABSTRACT. Due to the great efforts of conservators in the State Agency, Bishop's office for Civil Engineering of the City of Split, stone-masons from Pučišće on Brač, constructors and surveyors of the Geodetic Institute d.d. in Split, there was a very successful recovery of the cupola on the cathedral of St. Jakov carried out in October and November 1996. During the Homeland War the stone cupola was hit by two direct shots by Yugoslav Navy during very frequent attacks onto the city of Šibenik. Since during the Homeland War there was no possibility to raise some funds for reconstructing the damages, and taking into consideration the safety of constructors during recovery, the reconstruction of the cupola and other damaged objects in the vicinity of the cathedral could start only at the end of the year 1996 supported by the world community and the Republic of Croatia. In order to protect the cupola at least partly during the war, there was protective scaffolding built of wood and iron material erected around the cupola, and the hit stone plate and ribs were protected with Plexiglas pasted with silicon mass. As suggested by the conservators and the State Commission for the cathedral reconstruction, the existing state of the stone cupola was to be surveyed before replacing the damaged stone plates and ribs, so that they could be placed in their original position after the recovery. Surveying was made on the selected characterising measuring spots, i.e. points (connection of rib tip segments, up and down) that were suggested by surveyors. Each control point was numbered and marked with fibre-tip waterproof pen. For each point a very precise positional description was made so that the measuring point could be established again whenever necessary. It is very important to point out that the accuracy of repeated stabilising of single stone plates and ribs was above the set criteria demanded by the orderer, i.e. ± 2 mm horizontal and ± 1 mm for vertical discrepancies.

Key words: recovery of the cupola on the cathedral in Šibenik, precise geodetic works, signalling and stabilising of measuring points.

Primljeno: 2001-1-20