

Šerif Dunica¹, Aleksandar Bojović², Branislav Životić³

PROJEKT KONSTRUKCIJE NOVOG AVALSKOG TORNJA

Rad prikazuje projekt konstrukcije Novog Avalskog tornja. Novi Avalski toranj se gradi na mestu starog (1964-1999) a po Projektnom zadatku i Projektu izgledaće kao stari. Namena Tornja je da bude turističko-telekomunikacioni objekt. Konstrukcija Tornja je armiranobetonska do visine od 136,650 m a zatim čelična do vrha na visini od 204,330 m. U radu se prikazuju najmarkantniji delovi Projekta: proračun opterećenja vетrom kao dominantnog opterećenja, armiranobetonska konstrukcija i čelična konstrukcija.

Ključne reči: Toranj, opterećenje vетром, konstrukcije - betonske i čelične.

DESIGN OF THE NEW AVALA TOWER

The piece presents the Structural Design of the New Avala Tower. The New Avala Tower is being constructed on the place of the old one (which existed in period 1964-1999) and according to the Design Specifications and the Design itself, it will resemble the old one. The Tower will have a tourist and a telecommunication purpose. Its structure is reinforced concrete up to the height of 136,650 m and from that height to the top at 204,330 m - steel. The piece presents the most significant segments of the Design: the analysis of the wind load as the dominant load, the reinforced concrete structure and the steel structure.

¹ Prof. dr, dipl.ing.grad., redovni profesor, Gradevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, Beograd.

² dipl.ing.grad., tehnički direktor, Delfin Inženjering, d.o.o., Jastrebovljeva 25, Beograd.

³ dipl.ing.grad., direktor Zavoda za konstrukcije, Saobraćajni institut CIP, Nemanjina 6, Beograd.

1 UVOD

Stari Avalski toranj (slika 1) projektovan je 1959-1960, a izведен 1961-1964. Srušen je 1999. u vazdušnim napadima NATO-a. Toranj je služio kao telekomunikacioni i turistički objekt, sa antenama za radio, televizijske, poštanske i druge komunikacije i restoranom u gondoli na 118 m. Restoran je oko 1970. zatvoren, a njegove prostorije su postale prostor za smeštaj opreme RT Beograd.

Projektnim zadatkom [2] i urbanističko-tehničkim uslovima određeno je da novi Toranj bude turistički objekt, koliko je moguće i telekomunikacioni i da bude istih dimenzija i izgleda kao stari.. Telekomunikacionu namenu definisao je Projektni zadatak [3]. Projekt [4] novog Avalskog tornja poštovao je ove zahteve pa je konstrukcija podeljena na armiranobetonski deo visine 136,650 m i čelični deo visine 67,680 m, što zajedno čini ukupnu visinu Tornja od 204,330 m.

Dominantno delovanje na konstrukciju je delovanje vetra koje je u [4] vrlo detaljno razmatrano. Obzirom da je reč i interaktivnom (vetar – konstrukcija) i iterativnom proračunu, proračunavan je Toranj u celini i posle poklapanja ulaznih karakteristika konstrukcija i izračunatog delovanja vetra odgovarajuće presečne sile su poslužile za dimenzionisanje konstrukcija armiranobetonskih i čeličnih. U nastavku teksta daju se kratki prikazi analiza delovanja vetra, konstruisanja i proračuna armiranobetonskog i čeličnog dela Tornja.

2 DELOVANJE VETRA NA TORANJ

Na samom početku rada konstatovana su velika pomerljivost i velika naprezanja delova konstrukcije od delovanja vetra. Intenziteti sila vetra upoređeni su sa istima iz Statičkog proračuna [1]. Pokazalo se da je intenzitet delovanja vetra u aktuelnom projektu [4] dva puta veći nego u starom [1], (slika 2) ! Ispostavilo se, takođe, da ovo nije nepoznata činjenica, (mada gotovo potpuno nepoznata u široj stručnoj javnosti), i da je Studija [5] i [6] još 1985. došla do istovetnih zaključaka.

Analiza proračuna delovanja vetra u [1] pokazala je da način tretmana vetra kao opterećenja u originalnom projektu [1] nije bio korektan ni po onda važećim propisima PTP-2:1948. Iskustva sa eksploatacije Tornja kao telekomunikacionog objekta 1964-1999. bila su vrlo nepovoljna i potvrđivala su nedovoljnu krutost konstrukcije. Toranj se njihao i naginjao tako da je pri svakom jačem vetrnu upotrebljivost antena dolazila u pitanje, a o udobnosti korisnika izražene preko veličine horizontalnog ubrzanja, nije moglo biti ni govor.

Proračun delovanja vetra novog Tornja u [4] urađen je prema JUS U.C7.110:1991 i JUS U.C7.113:1991. Informativno, urađen je proračun i po Evropskoj normi EN 1991-1-4:2005, a konsultovane su i druge norme, već prema temi – britanska CP3:Ch.V:Part 2:1972 i nemačke DIN 1056:1984 i DIN 4131:1991, DIN 4133:1991, a zbog poređenja sa 1960. [1] i DIN 1055:1938 i DIN 1056:1956.

Glavne karakteristike studije i proračuna delovanja vetra:

- ◆ topografija terena: Toranj je neposredno na šumovitom terenu (klasa hrapavosti C), dok je šira okolina ravan teren (klasa B); razmatranjem svih uticajnih faktora po raznim azimutima zaključeno je da se može usvojiti klasa B kao merodavna;
- ◆ osnovna brzina veta je razmatrana prema razlišitim izvorima meteorološke literature, a finalni zaklučak je da se može usvojiti vrednost iz JUS U.C7.110:1991 - $v_{m,50,10} = 19 \text{ m/s}$;
- ◆ povratni periodi delovanja vetra: 1) upotrebljivost UHF-antena, prema [3], T=2 god; 2) zaledena čelična konstrukcija, T = 10 god; 3) udobnost korisnika, horizontalna ubrzanja, T = 10 god; 4) nosivost konstrukcije Tornja, T = 50 god;
- ◆ koeficijenti sile: betonski deo 1,65 i 1,15 (1960 [1]: 1,20 i 0,80), čelični deo 1,40, 1,45, 1,35, (1960: 2,80);
- ◆ frekvencija 1. tona fleksionih oscilacija za Toranj u celini = $n_1 = 0,216 \text{ Hz}$;
- ◆ proračunske deformacije Tornja: 1) upotrebljivost, nivo težišta UHF-antena = 198,350 m: horizontalni ugib = 705 mm, rotacija = $1,060^\circ \approx 1^\circ = \varphi_{dop}$; 2) T=50 god: horizontalni ugib vrha betonskog dela = 658 mm, horizontalni ugib vrha Tornja = 1598 mm, rotacija vrha Tornja = 0,0422 rad = $2,418^\circ$;
- ◆ horizontalno ubrzanje na nivou gondole na 119 m: $a_H = 0,29 \text{ m/s}^2 > 0,20 \text{ m/s}^2$ JUS U.C7.111:1991, što nije zadovoljavajuće za objekat sa stalnim boravkom ljudi, (ovde je reč o restoranu sa osam stolova), ali bolje nije moglo uprkos svim ojačanjima konstrukcije, pe svega zbog uslova Projektnog zadatka iz t. 1.

3 BETONSKA KONSTRUKCIJA

Armirano-betonska konstrukcija sastoji se od tri noge, stabla i gondola na stablu tornja, slika 1. Ukupna visina armirano-betonske konstrukcije je 136,650 m. Do ulaza u toranj predviđena je prilazna armirano-betonska konstrukcija rampe, sistema kontinualnog nosača raspona 17,80 + 24,40 + 17,81 m.

Donji deo tornja je u armirano-betonski okvirni nosač koji se sastoji iz tri noge promenljivog poprečnog preseka koje su na koti -4,00 m (435,000 mm) oslonjene na temelje dimenzija 6,00x7,30x2,00 m. U originalnom tornju, na koti 1,20 m noge su bile zglobno oslonjene na temelje koje su bile znatno manjih dimenzija. Međutim, u okviru Glavnog projekta [4] to je promenjeno, tj. noge su kruto vezane za temelje, preko prelazne konstrukcije znatno većih dimenzija, ali uz zadržavanja prvobitnog izgleda simuliranjem zglobne veze na koti 1,20 m. Noge se od kote 17,100 m do 19,100 m spajaju sa armirano-betonskom pločom debljine 2,00 m.

Od kote 19,100 m počinje stablo tornja. Na delu od kote 19,100 m do kote 35,000 m noge tornja postepeno prelaze do osnovnog oblika stabla. Stablu tornja je armirano-betonska konstrukcija zatvorenog sandučastog preseka u obliku ravno-stranog trougla dužine strane (mereno po osi zida) od 7,00 m, (sl. 2). Debljine zidova su 15 cm, a na uglovima, u presecima osa zidova, predviđena su ojačanja kružnog oblika prečnika 1,040 m. Na delu gondola ova ojačanja prelaze u pravougaoni oblik dimenzija 40x72 cm. Unutar stabla predviđen je još jedan armirano-betonski zid debljine 15 cm, upravan na osu rampe, i koji deli prostor stepeništa od liftovskog prostora. Svi podesti i stepenišni kraci su armiranobetonski debljine 10 cm. Stablu tornja se od kote 19,100 m nastavlja do kote 8,800 m na kojoj je a/b-ploča debljine

30 cm, dimenzionisana tako da primi opterećenje od udara lifta u slučaju havarije lifta. Od kote 102,780 m pa naviše projektovane su gondole i platforme koje su preko sistema horizontalnih i kosih a/b-greda i ploča vezuju za stablo tornja. Radi povećanja normalne sile u stablu, tj. smanjenja ekscentriciteta sile u nižim delovima stabla, predviđeno je prednaprezanje stabla sa 3 kabla u sredinama kružnih ojačanja. Sila prednaprezanja po jednom kablu je: $F_p = 0,70F_{pk} = 3463$ kN, tj. $N_k = 3F_p = 10389$ kN. Kablovi se ankeruju u kružna ojačanja na koti 59,000 m, a utežu se ispod a/b-ploče na koti 17,100 m. Na koti 136,650 m a/b-stablu se završava a/b-pločom debljine 1,50m na koju se oslanja čelični antenski stub, (v. t. 4).

Za konstrukciju Tornja izabrani su sledeći materijali:

- ◆ noge i stablo (a/b-zidovi i kružna ugaona ojačanja) od kote 19,200 do kote 102,780 m: beton MB60, armatura S500H;
- ◆ stablo od kote 102,78 m do vrha: beton MB50, armatura S500H;
- ◆ temelji i svi ostali elementi konstrukcije (zidovi, grede i ploče): beton MB35, armatura RA 400/500.
- ◆ kablovi za prednaprezanje u sredinama kružnih ugaonih ojačanja stabla: tip kabla - 19Ø15,2 mm klase B, Y1860S7.

Statička i dinamička analiza konstrukcije i proračun stabilnosti Tornja obavljen je primenom programa "TOWER5" na 4 prostorna modela korišćenjem metode koničnih elemenata. Proračun Tornja je izvršen za 6 osnovnih slučajeva opterećenja i to: stalno opterećenje, korisno opterećenje, prednaprezanje, dejstvo vетра u dva smera i seizmičko dejstvo. Proračun je sproveden i prema teoriji I, i prema teoriji II r.

Proračunski modeli:

- ◆ Model 1: 3D-model od grednih i pločastih elemenata, pri čemu je stablo modelirano kao gredni elemenat sa odgovarajućim geometrijskim karakteristikama; seizmičke sile nisu merodavne, merodavno je delovanje veta; ovde su izračunate i periode i forme sopstvenih oscilovanja konstrukcije Tornja.
 - ◆ Model 2: 3D-model od grednih i pločastih elemenata kao u Modelu 1, gde je stablo složen sistem od 4 zida (tri spoljna i jedan unutrašnji) i 3 gredna elementa sa kružnim ojačanjima na uglovima poprečnog preseka stabla; rezultati proračuna prema ovom modelu su korišćeni za dimenzionisanje horizontalnih i kosih ploča i greda iznad kote 99,440 m i svih ostalih a/b-ploča.
 - ◆ Model 3: 3D-model samo od grednih elemenata koji služi za proračun stabilnosti ravnoteže konstrukcije Tornja; za kombinaciju ($g + 0.5p + \text{prednaprezanje}$) određen je faktor kritičnog opterećenja; zatim su računate dužine izvijanja i vitkosti pojedinih elemenata nogu i stabla Tornja.
 - ◆ Model 4: kao Model 1, s tim što se proračun vrši za dve kombinacije opterećenja koja su merodavna za dimenzionisanje nogu i stabla i to prema teoriji II r.
- Dimenzionisanje elemenata konstrukcije sprovedeno je na sledeći način:
- ◆ primenom programa "TOWER 5" i pomoću posebnih programa i to prema PBAB:1987 i EN 1992-1-1:2004;
 - ◆ konstrukcije stabla i nogu: merodavne sile od delovanja veta znatno su veće od onih u originalnom projektu [1]; primer momenata od delovanja veta na koti 35,000 m: 1) vетар w_1 (dejstvo veta na stranu trougla) $M_{1,[4]}=147,54$ MNm $\approx M_{1,[5]}=145,10$ MN $> M_{1,[1]}=69,71$ MN; 2) vетар w_2 (vetar na ugao trougla): $M_{2,[4]}=121,19$ MNm $> M_{2,[1]}=60,66$ MNm.

- ◆ kose ploče i grede konstrukcija iznad kote 99,440 m i ostale a/b-ploče: na Modelu 2 i prema PBAB:1987.
- ◆ noge i stablo: prema EN 1992-1-1:2004 za merodavne kombinacije opterećenja i to prema teoriji II reda (Model 4), za dva slučaja - sa i bez efekata izvijanja: napomena: dimenzionisanje prema PBAB:1987, čak i za slučaj usvajanja najveće moguće marke betona MB60, zahtevalo bi povećanje dimenzija poprečnog preseka stabla, što je suprotno zahtevima definisanim u okviru Projektnog zadatka [2].

4 ČELIČNA KONSTRUKCIJA

Čelična konstrukcija Tornja projektovana je da odgovara: 1) tehničkim uslovima za smeštaj antena [3], 2) delovanju veta iz t. 2.

Karakteristike projektovane čelične konstrukcije:

- ◆ tri sekcije po visini; donja (osno 2040x2040 mm) i srednja (osno 960x960 mm) kao četvorozidna rešetka, kvadratne osnove, u gabaritima propisanim u [3]; gornje sekcije (700x700 i 600x600 mm) sa VHF- i UHF-antenama nisu predmet projekta – isporučuju se sa antenama;
- ◆ uklještenje čelične konstrukcije u betonsku na +136,650 m preko ubetoniranog segmenta; veza donjeg i srednjeg segmenta upuštanjem srednjeg u donji na dužini od 1750 mm; momenti inercije stuba su oko dva puta veći od itih 1960. po svakom od segmenata;
- ◆ svi štapovi rešetki su kružno cilindrične cevi zbog: 1) najboljih aerodinamičkih osobina (min c_f), 2) potrebnih velikih preseka zbog dostizanja potrebne krutosti konstrukcije za uslove upotrebljivosti antena i opšte nosivosti konstrukcije;
- ◆ konstrukcija u radionici zavarena, na montaži spojena zavrtnjima sa tačnim naleganjem; zaštita od korozoje sistem duplex (toplo cinkovanje + cink-epoksidni premaz);
- ◆ oprema na konstrukciji: platforme sa ogradama, ledobrani, penjalice, nosači kablova, antene;
- ◆ materijali konstrukcije: S235JRG2 JUS EN 10025:2003, bešavne cevi DIN 2458, zavrtnji klase 10.9 oblika JUS M.B1.067:1983;
- ◆ masa konstrukcije 55 t.

Investitor, projektanti, tehnička kontrola, izvođači

Investitor: Ministarstvo za Kapitalne investicije Vlade Republike Srbije.

Donator za Glavni projekt: Grad Beograd.

Generalni projektant: Saobraćajni institut CIP, d.o.o., Beograd.

Podizvođač za studiju veta i čeličnu konstrukciju: Delfin Inženjering,d.o.o., Bgd;

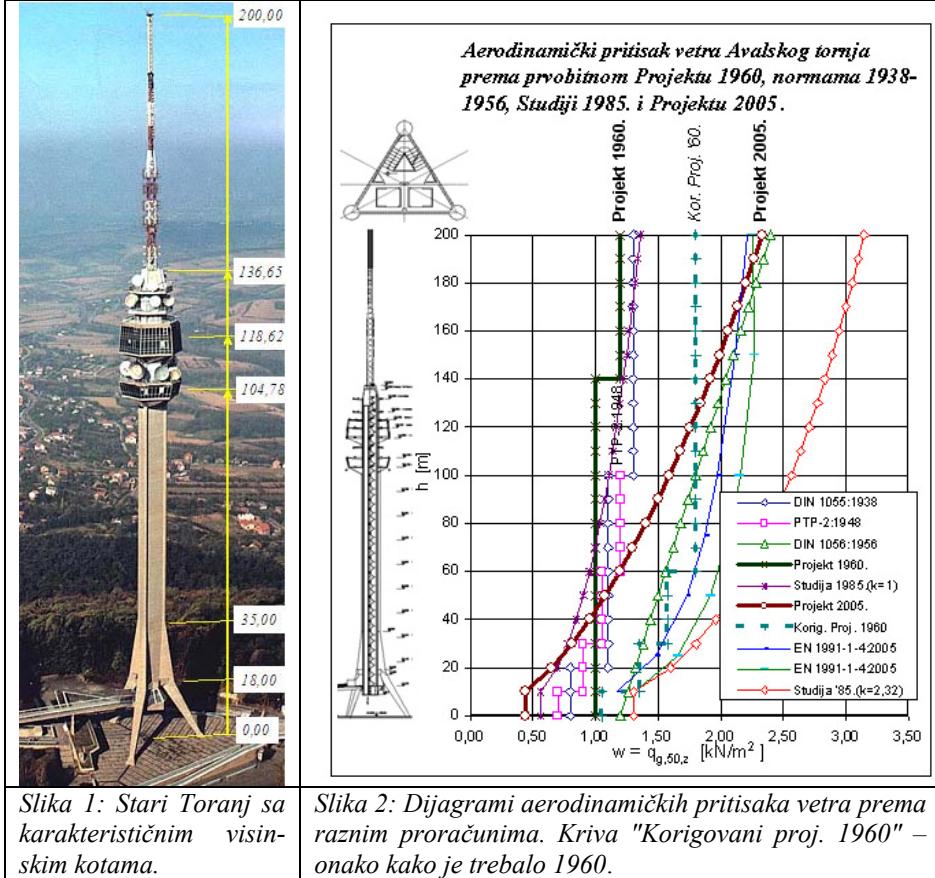
Odgovorni projektanti konstrukcije: Šerif Dunica i Branislav Životić za betonski deo konstrukcije Tornja i Aleksandar Bojović za čelični deo konstrukcije Tornja.

Tehnička kontrola: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu.

Generalni izvođač: "Ratko Mitrović" Dedinje d.o.o., Beograd.

Podizvođač za čeličnu konstrukciju: SZP Zavarivač,AD, Vranje.

Nadzorna služba: Saobraćajni institut CIP, d.o.o., Beograd.



LITERATURA

- [1] UKT i RTV toranj na Avali. II sveska: Statički proračun tornja i restorana. Projektni zavod Srbija projekt, Beograd. Beograd, 13.10.1960.
- [2] Projektni zadatak za izradu Glavnog projekta obnove dela Kompleksa tornja na Avali. Republika Srbija. Ministarstvo za kapitalne investicije; broj 350-01-0211/2005-10. Beograd, 03.11.2005.
- [3] Projektni zadatak za tehnološki deo emisionog objekta Toranj na Avali. JP RTV Srbije, Tehnika RTS, Emisiona tehnika i veze. Beograd, 30.11.2004.
- [4] Glavni projekat obnove dela kompleksa Tornja na Avali. Glavni projekat konstrukcije Tornja. Saobraćajni institut CIP d.o.o., Beograd. Beograd, 2005.
- [5] Hajdin,N., Ivković,M., Branković,D., Kolundžija,B., Dunica,Š.: Studija konstruktivnog sistema Radio-televizijskog tornja na Avali. Statički i dinamički proračun. Beograd, oktobar 1985.
- [6] Hajdin,N., Ivković,M., Branković,D.: Studija konstruktivnog sistema Radio-televizijskog tornja na Avali. Završni izveštaj. Beograd, 05.12.1985.