

METODOLOGIJA PREGLEDA I OCENA STANJA KONSTRUKCIJE IZLOŽBENIH HALA BEOGRADSKOG SAJMA

THE METHODOLOGY OF INSPECTION AND ASSESSMENT OF THE CONDITION OF THE STRUCTURE OF THE EXHIBITION HALLS OF THE BELGRADE FAIR

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC:

Rad primljen / Paper received:

Adresa autora / Author's address:

Institute for Materials Testing (IMS), Belgrade, Serbia

email: bojan.ivankovic@institutims.rs

Ključne reči

- Beogradski sajam
- prednapregnuta betonska konstrukcija
- pregled objekta
- ocena stanja konstrukcije
- ispitivanje sile u prednapregnutim žicama

Izvod

Beogradski sajam predstavlja jedno od najuspešnijih ostvarenja domaće arhitekture i građevinskog konstrukterstva. Sagrađen je između 1954. i 1957. godine, prema arhitektonsko-urbanističkom rešenju Milorada Pantovića i konstruktivnim rešenjima Branka Žeželja i Milana Krstića, kao moderno oblikovani kompleks sa tri izložbene hale prepoznatljivih kupola. Hala 1 je najveći objekat kompleksa i zaštićena je kao spomenik kulture. Svojim specifičnim rešenjem predstavlja izuzetno konstruktivno ostvarenje, a njena kupola i danas drži Ginisov rekord za ovu vrstu konstrukcije. Institut IMS redovno prati stanje objekata Beogradskog sajma i kroz stručnu podršku obezbeđuje sigurnu i funkcionalnu eksploataciju izložbenih hala. U radu su prikazani metodologija i rezultati pregleda i ocene stanja konstrukcije Hale 1 nakon skoro 70 godina upotrebe, uključujući sprovedeno ispitivanje sile prednapreznjanja u žicama kablova prstenastog nosača kupole Hale 1.

HALE BEOGRADSKOG SAJMA

Beogradski sajam predstavlja svedočanstvo tehničkog, tehnološkog, naučnog i kreativnog uzleta društva sredinom šezdesetih godina dvadesetog veka. Svojim urbanističkim i arhitektonskim rešenjem, dimenzijama, skladnošću oblika i opštom impozantnošću, svrstava se među najuspešija ostvarenja domaće arhitekture i građevinskog konstrukterstva.

Sagrađen je između 1954. i 1957. godine, prema arhitektonsko-urbanističkom rešenju profesora Milorada Pantovića i konstruktivnim rešenjima profesora Branka Žeželja i inženjera Milana Krstića. Svi autori postali su kasnije članovi SANU. SaJam je moderno oblikovani kompleks, sa tri izložbene hale prepoznatljivih kupola. Kasnije je kompleks proširen dodatkom još jedne velike hale, a ceo niz je međusobno povezan nižim pasarelama.

Objekti Beogradskog sajma imali su zadatak da svojim originalnim i impresivnim vizuelnim i tehnološkim identitetom pomognu u ostvarivanju društveno-političkih ciljeva i promociju identiteta zemlje, njenog privrednog napretka i međunarodne saradnje. Takođe, u brojnim vanrednim okolnostima, sajamske hale su se pokazale kao nezamenljiv prostorni resurs grada i države, /1/. Na sl. 1, prikazan je list Situacija iz originalnog projekta, /2/.

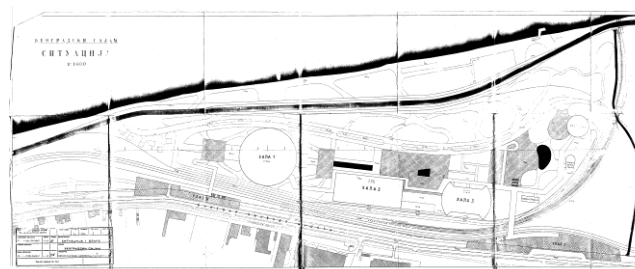
Keywords

- The Belgrade Fair
- prestressed concrete structure
- building inspection
- structural condition assessment
- testing of force in prestressed wires

Abstract

The Belgrade Fair represents one of the most successful realizations of Serbian architecture and structural engineering. It was constructed between 1954 and 1957, based on architectural and urban planning design by Milorad Pantović and structural design by Branko Žeželj and Milan Krstić, as a modern complex of three exhibition halls with recognizable domes. Hall 1 is the largest building of this complex, protected as cultural heritage. Its specific solution represents an outstanding structural realization, while its dome still holds the Guinness record for this type of structure. The IMS Institute constantly monitors the condition of the Belgrade Fair buildings, and through expert support provides safe and functional exploitation of exhibition halls. The paper showcases the methodology and results of inspection and assessment of condition of the Hall 1 structure after almost 70 years of use, including realized testing of prestressing force in cable wires in ring girder bearing of Hall 1 dome.

Institut IMS redovno prati stanje objekata Beogradskog sajma i kroz stručnu podršku obezbeđuje sigurnu i funkcionalnu eksploataciju izložbenih hala. Uz periodična ulaganja i odgovarajuće održavanje, sve postojeće hale mogu još dugo da obavljaju svoju funkciju.



Slika 1. Beogradski sajam - Situacija.

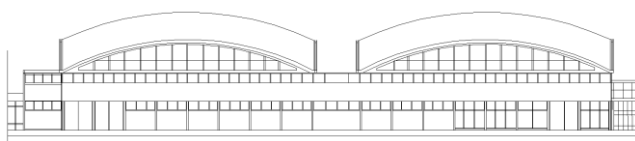
Hala 1

Hala 1 je najveći objekat kompleksa. Zaštićena je kao spomenik kulture. Svojim specifičnim rešenjem je u vreme građenja predstavljala pravi graditeljski podvig i izuzetno konstruktivno ostvarenje, a njena kupola i danas drži Ginisov rekord za ovu vrstu konstrukcije.

Tokom projektovanja Hale 1, u Institutu IMS je izrađen i ispitan njen model u razmeri 1:10, preko koga je dobijen uvid u ponašanje konstrukcije pod opterećenjem, odnosno, uvid u saglasnost teorijsko-računskih i izmerenih naponsko-deformacionih veličina. Opis konstrukcije Hale 1 dat je detaljno dalje u tekstu.

Hale 2 i 3

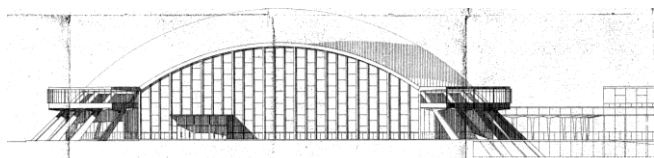
Hale 2 i 3 su nakon izgradnje imale najveće raspone za tu vrstu konstrukcija, originalno arhitektonsko rešenje i brojne tehnološke inovacije u izvođenju. Hala 2, sa rasponima od 48 m, debljine 9 cm zahtevala je kompleksnu primenu prednapreznja ljuski u ivičnim zonama, /3/. Na sl. 2 prikazan je crtež fasade Hale 2 ka Bulevaru vojvode Mišića, /4/.



Slika 2. Fasada Hale 2 ka Bulevaru vojvode Mišića.

Hala 3 (hala teške industrije) je oblika sfere prečnika 100 metara, presečena sa dve vertikalne ravni na razmaku od 48 m. Ljuska je uklještena u ivične nosače, gde u jednom pravcu sile prihvataju kosi stubovi i prenose do tla, dok su u drugom pravcu postavljeni vertikalni stubovi ispod lučnog ivičnog nosača. Bilo je neophodno izvršiti prednapreznje ljuske u zonama oslanjanja na ivične nosače. Ivični elementi predstavljaju statički sistem kontinualnih nosača preko 9 polja u podužnom pravcu i osam polja u poprečnom pravcu.

Izgradnja hale 3 zahtevala je formiranje čeličnih zatega u ploči za prijem horizontalnih sila u osloncima naspramnih kosih stubova na tlu. Fundiranje hala predstavljalo je veliki problem zbog loših geomehaničkih karakteristika tla. Primenom hidrauličnih presa vršene su korekcije usled neravnogmernog sleganja oslonaca. Izgled Hale 3 ka reci dat je na sl. 3, /2/.



Slika 3. Glavni izgled Hale 3.

Značaj ovih konstruktivnih rešenja je svetskih razmera. Njima su unapređena dotadašnja saznanja o graničnim vrednostima izbočavanja ljuski i dokazano je da se njihova sigurnost prednapreznjem bar udvostručuje. Hale 2 i 3 su, osim inovativnosti u konceptu dvostruko zakrivljenih formi, doprinele razvoju potpuno novog konstruktivno-tehnološkog sistema građenja. Prethodno napreznje kablovskim prostornim krivim snopovima je primenjeno među prvima u svetu, /3/.

Hale 2 i 3 su predstavljale poligon za sintezu naučnog i eksperimentalnog istraživanja u praksi. Na samom gradilištu su vršeni mnogobrojni eksperimenti na objektima, ali i na modelima u razmeri 1:10.

OPIS KONSTRUKCIJE HALE 1

Konstrukcija objekta Hale 1 Beogradskog sajma sastoji se od glavne konstrukcije, koju čine kupola oslonjena na pred-

napregnuti prsten i 8 V-stubova, konstrukcije galerija, prizemlja i suterena, kao i konstrukcija arene.

U konstruktivnom smislu, kupola Hale 1 formirana je od 80 radialno postavljenih montažnih polu-lukova I preseka - srpastih elemenata uklještenih na svojim donjim krajevima u krut, snažan prsten „šupljeg“ (sandučastog) poprečnog preseka, srednjeg prečnika 94,00 m. Na svojim gornjim krajevima polu-lukovi se završavaju u kružnoj, lako sferičnoj ploči sandučaste konstrukcije, koja je projektovana kao temeni konstruktivni element u sklopu kupole. Između polu-lukova (rebara konstrukcije) izvedena je laka ispuna od čelika i lakog betona („Durisola“), sa okruglim otvorima za osvetljenje. Prsten se oslanja na osam V-stubova, postavljenih na 8 piramidalnih oslonaca - temelja, fundiranih na „Franki“ šipovima (po 35 šipova za svaki od zajedničkih temelja). Oslonci leže na krugu, prečnika 106,00 m, pri čemu su V-stubovi koji iz njih izlaze u nagibu prema prstenu kupole.



Slika 4. Autor konstrukcije Branko Željelić ispred modela kupole Hale 1 u Institutu IMS.

Polu-lukovi i kružna ploča u temenu kupole nisu prednapregnuti, pošto su oblikovani i postavljeni prema potpornoj liniji sistema.

Prsten, koji predstavlja vrlo složeno napregnut konstruktivni element, morao je biti prednapregnut na složen način, kako bi se obezbedila njegova puna nosivost i sigurnost, i to primenom tri posebne grupe kablova: dve u okviru preseka (predviđenih za prihvatanje pozitivnih i negativnih momenata savijanja) i jedne u vidu spoljašnjeg obruča koji opasuje prsten. Uloga ovog obruča je da prihvati aksijalne sile koje deluju na prsten. Osim navedenih kablova, u okviru unutrašnjeg rebara prstena, u oslončkim zonama, postoje i kablovi čija je funkcija da prihvate velike glavne napone zatezanja usled zbirnog delovanja transverzalnih sila i momenata torzije, /5/.

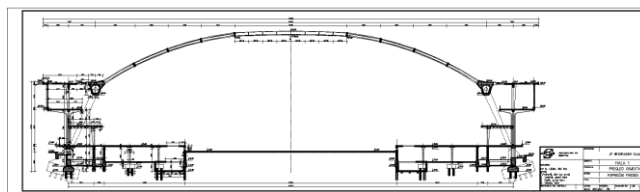
Montaža srpastih rebara - polu-lukova, prethodno betoniranih na zemlji, izvedena je uz ojačanja tih elemenata prednapreznjem, tj. primenom privremenih kablova koji su ranije proste nosače pretvarali u sisteme lukova sa zategama. Mada je operacija prednapreznja, podizanja i oslanjanja ovako dobijenih lukova sa zategama na centralnu skelu, koja je služila i za betoniranje temene kružne ploče, bila veoma delikatna, ona je uspešno okončana. Na kraju su, a nakon

monolitizacije spojeva između polu-lukova i prstena i polu-lukova i kružne ploče, uklonjene prednapregnute zatege i centralna skela, i na taj način aktiviran celokupan konstruktivni sistem betonske kupole koja pokriva objekat.



Slika 5. Model kupole Hale 1 izložen u Galeriji nauke i tehnike SANU 2021. godine. U pozadini se vide fotografije izvođenja.

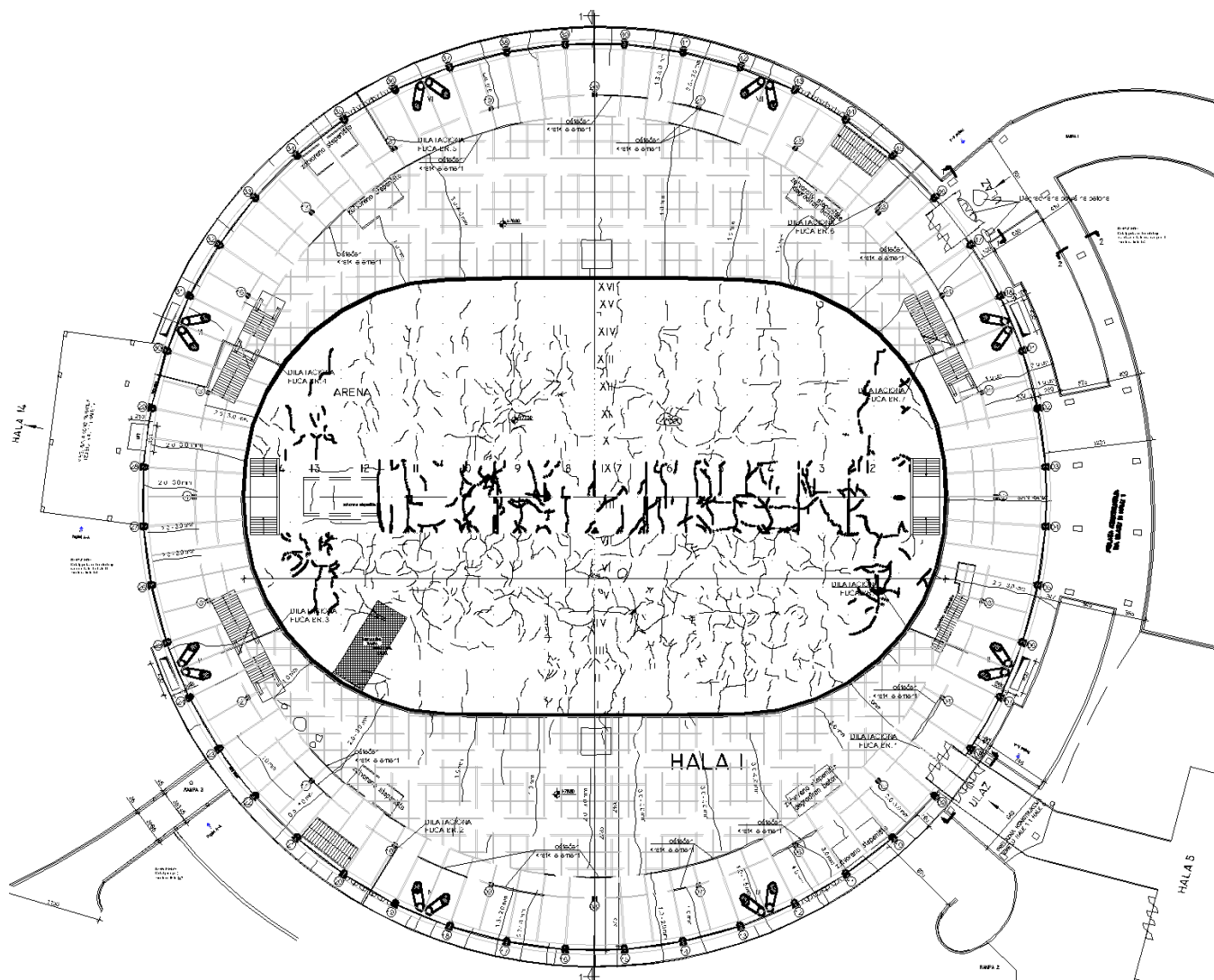
Na sl. 6, dat je crtež preseka Hale 1, a na sl. 7, dat je crtež osnove Hale 1 sa prikazom oštećenja, /6/.



Slika 6. Hala 1 - presek.

Lukovi, kao i prednapregnuti prsten, izrađeni su od marke betona MB45, dok su V-stubovi marke MB40. Temelji V-stubova izrađeni su od marke betona MB20.

Sve ostale konstrukcije u hali, koje formiraju prostor za ambalažu, hodnik, kancelarije, prva i druga galerija sa stubovima i obložnim zidom, rešene su kao sistem konstrukcija nezavisan od glavne konstrukcije hale. Jedini dodir između ove dve grupe konstrukcija ostvaren je u nivou temelja - temeljnom podvlakom i u nivou krovne ravni - lakim montažnim pločama. Time je obezbeđena nesmetana dilatacija glavne konstrukcije, odvojena od temperaturnih dilatacija ostalih konstrukcija. Ova druga grupa konstrukcija, izuzev temeljne podvlake po obimu, nije rađena prstenasto po dužini celog obima, već je podeljena sa nekoliko dilatacionih spojnica u zasebne sektore.



Slika 7. Hala 1 - osnova sa prikazom oštećenja.

Fasadni zid sa galerijama rešen je u vidu jedne ramovske konstrukcije. Ima 48 glavnih zvezdastih montažnih stubova rama, na razmaku od 7 m. Stubovi imaju po četiri dijagonalno postavljena prepusta. Po dva prepusta sastavljaju se i čine oslonac ploče gornje galerije, koja je livena na licu mesta.

Donja galerija se oslanja na stubove ramova sa jedne strane i na tanke stubove, kojih ima 24, na razmaku od 12 m, sa druge strane. Donja galerija je montažna, od I nosača, postavljenih u radijalnom pravcu. Posle završene montaže na licu mesta, betonirana je gornja ploča između nosača, debljine jednake debljini nožice I nosača. Montažne ploče se oslanjaju na grede, tako da je jedan oslonac greda u fasadnom zidu, a drugi oslonac je greda koja povezuje sekundarne stubove u prizemlju.

Suterenski deo, u kome su smeštene kancelarije, obložen je sa dva paralelna, lako armirana betonska zida, debljine 30 cm. Oni su fundirani na dva niza franki šipova.

Spoljni obložni zid predstavlja kružnu podvlaku, koja međusobno povezuje temelje samce glavne konstrukcije hale. Podvlaka je izvedena po celom obimu kruga od armiranog betona i kružno je utegnuta čeličnim kablovima.

Unutrašnji prostori za ambalažu rešeni su sa dva lako armirana obložna zida, oslonjena na niz franki šipova. Između zidova je postavljen niz od 22 stuba za oslanjanje armirano-betonske pećurkaste tavanice. Oni su takođe fundirani na šipovima. Zidovi arene su debljine 30 cm, fundirani na nizu franki šipova.

METODOLOGIJA GLAVNOG PREGLEDA HALE 1

Metodologija pregleda prikazana je na primeru Hale 1. Prema metodologiji razvijenoj u Institutu IMS, na osnovu propisa koji definišu ovu oblast, a prema pravilima koja se odnose na pregled, Glavnim pregledom konstrukcije objekta obuhvaćene su sledeće aktivnosti.

Detaljni vizuelni pregled odgovarajućom opremom, kojim su utvrđena sva relevantna oštećenja, pukotine i prsline na elementima konstrukcije objekta, sa posebnim osvrtom na glavne noseće elemente i krovnu konstrukciju.

Snimanje i provera geometrije konstrukcije, kako bi se utvrdili razmaci, rasponi, visine i poprečni preseki elemenata konstrukcije. Vršiti se poređenje sa postojećom tehničkom dokumentacijom, da bi se stekao uvid u izvedeno i trenutno stanje konstrukcije.

Prikupljanje i analiza postojeće dokumentacije, koju u ovom slučaju čine Originalni projekat Beogradskog sajma iz 1955, /2/. Izveštaj o glavnom pregledu konstrukcije Hale 1 iz 2002. godine /7/ i Izveštaj o glavnom pregledu konstrukcije Hale 1 iz 2007 godine, /8/.

Izrada grafičke dokumentacije evidentiranih oštećenja na osnovu postojećih podloga - osnova i preseka izrađenih u sklopu prethodnih pregleda Hale 1.

Geodetska kontrola obuhvatila je nivelmansko opažanje ukupnih sleganja i kontrolu deformacija glavnih konstruktivnih elemenata, ugradnja repera i povezivanje objekta u geodetsku mrežu.

Analiza stanja zaštitnog sloja betona do armature obuhvatila je utvrđivanje stepena i dubine karbonatizacije betona.

Utvrđivanje sile u prednapregnutim žicama pomoću posebnog uređaja - *tenzofrekvenmetra*.

REZULTATI GLAVNOG PREGLEDA HALE 1

Kako je za konstrukciju Hale 1 od prvorazrednog značaja stanje prethodno napregnutog sandučastog nosača, u daljem tekstu su detaljnije prikazani upravo rezultati njegovog pregleda i ispitivanja.

Radi pristupa prednapregnutom prstenastom sandučastom nosaču, skinut je spuštenu plafon sa spoljne strane po celom obimu, budući da položaj eventualnih revizionih otvora nije bio poznat pre početka izvođenja istražnih radova, kao ni položaj kotvi i trasa kablova. Stoga ni položaj mesta merenja sile u prednapregnutim žicama nije mogao sa sigurnošću da se utvrdi bez pristupa celom prstenu sa spoljne strane.

Makroskopski - vizuelni pregled prednapregnutog sandučastog prstenastog nosača podeljen je po poljima, gde jedno polje predstavlja osni razmak između dva para glavnih stubova.

Nedovoljan zaštitni sloj betona do žica, kao i otpao zaštitni sloj betona do prednapregnutih žica, registrovan je na nekoliko mesta. Na mestima nedovoljnog zaštitnog sloja konstatovana je i korozija prednapregnutih žica u početnom stadijumu, dok je na mestima otpalog zaštitnog sloja na mestu devijatora konstatovana značajna korozija prednapregnutih žica.

Duž celog nosača registrovani su tragovi mestimičnog procurivanja vode sa krova hale, iz vremena pre izvedene sanacije krovne hidroizolacije. Najveće oštećenje od procurivanja vode konstatovano je kod grupe kablova koji obavijaju prstenasti nosač, i to na gornjem prstenu ove grupe. Preostala dva prstena grupe kablova koji opasuju prednapregnuti nosač nisu bili u kontaktu sa vodom.



Slika 8. Nedovoljan zaštitni sloj betona do prednapregnutih žica.

Na mestu prekida betoniranja, odnosno, na mestu sastava donje ploče sandučastog nosača i njegovih stranica, konstatovano je nedovoljna obrada betona i mestimična segregacija. Na tim mestima vidljiva je i armatura, koja je mestimično korodirala.

Na rebru sa spoljnje strane sandučastog nosača, na oko 4 m sa svake strane stuba ka polju, konstatovano je postojanje revizionih otvora, koji su zatvoreni betonom pre utezanja donjeg prstena prednapregnutih kablova koji obavijaju nosač sa spoljnje strane i ujedno prekrivaju polovinu površine naknadno zatvorenog otvora.

Kod stuba II, koji ima dosta izraženije sleganje od ostalih stubova, na mestu revizionog otvora ka stubu III, registrovana je prslina u donjoj ploči. Pošto ovakva prslina nije primećena i u polju ka stubu I, postoji osnovana sumnja da je došlo do rotacije stuba u osi II.

Mesta ispitivanja sila u kablovima izabrana su tamo gde su registrovana najveća oštećenja na prednapregnutim žicama. Izabrana mesta ujedno su i reprezent za ceo prsten. Sva ispitna mesta, kao i mesta nedovoljne debljine zaštitnog sloja betona do žica i mesta degradacije zaštitnog sloja betona do žica sanirana su po programu sanacije, definisanom od strane autora ovog rada.



Slika 9. Tragovi procurivanja vode.



Slika 10. Nedostajući zaštitni sloj betona.

ISPITIVANJE SILE U PREDNAPREGNUTIM ŽICAMA

Merenje sile u zategnutim kablovima nije česta - uobičajena procedura. Današnji nivo kvaliteta opreme za prednaprežanje, uz obučenu ekipu utezača i konstantnu tehničku

kontrolu procesa, u skladu sa procedurama sistema upravljanja kvalitetom, omogućava zahtevano unošenje projektovane sile. U principu, merenje sile u kablovima se obavlja samo po posebnim zahtevima. Kada konstruktivni koncept objekta nije moguće dovoljno tačno obuhvatiti statičkim, odnosno, matematičkim modelom, merenje napona i sila ima opravdanje, kako u fazi utezanja, tako i u fazi eksploatacije prednapregnutog objekta, što je u ovom slučaju realizovano na objektu koji je prednapregnut pre skoro 70 godina. Rad na zatezanju kablova uvek mora da obezbedi ostvarenje projektovane sile prednaprežanja, a kontrola se vrši u svemu prema posebno specificiranim zahtevima projektanta i uputstvima nosioca sistema prednaprežanja, odnosno, tehnologije građenja, imajući u vidu važeću tehničku regulativu.

Kod specijalnih konstrukcija u praksi je primenjivana kao dopunsko merenje i metoda *posrednog* utvrđivanja unete sile prednaprežanja merenjem dilatacija betona, kao i geodetsko osmatranje konstrukcije. Dobijeni rezultati treba da garantuju da je uneta projektovana sila prednaprežanja u konstruktivni element.

Međutim, u inženjerskoj praksi se javlja potreba za proverom sile u već zategnutom kablju u toku čitavog životnog veka konstrukcije, kako u fazama izgradnje, $t \approx /> 0$, tako i tokom praćenja konstrukcije u eksploataciji, $t \gg 0$ ($t \rightarrow \infty$), u cilju provere pretpostavki proračuna i ocene njenog stanja. Iako se naponi i sile u kablju, i kod žica i kod užadi, u vremenu t mogu izmeriti sa tehnički prihvatljivom tačnošću, teškoću predstavlja interpretacija izmerene sile, a zbog reoloških karakteristika betona i čelika za prednaprežanje. Izmerene vrednosti kretaju se od maksimalne vrednosti napona ili sile u vremenu $t = 0$, pa do blisko minimalnoj računskoj vrednosti, u vremenu $t \rightarrow \infty$. Zbog interpretacije rezultata merenja, neophodno je da projektant konstrukcije ili konstruktivnog elementa, u okviru statičkog proračuna, naznači očekivane vrednosti sila u kablovima, u funkciji vremena t (sila na presi N_{k00} , sila posle zaklinjavanja N_{k0} u vremenu $t = 0$, pad sile ΔN_{kt} kroz vreme).

U slučajevima kada se kablovi formiraju od glatkih žica prečnika 5 i 7 mm, koristi se metoda upoređivanja *oscilovanja žice*, poznate dužine, sa poznatim oscilacijama nekog oscilatora, /9/. Namenskim uređajima se direktno meri frekvencija žice pobuđene na oscilaciju i , uz određene uslove, na osnovu klasičnog (2) ili modifikovanog (3) obrasca, sa dovoljnom tačnošću, izračunava napon σ , odnosno, sila N_k , u već zategnutom kablju.

Merenje napona se bazira na obrascu za frekvenciju zategnute strune

$$\sigma_0 = \frac{4\gamma}{g} l^2 f^2. \quad (1)$$

Unošenjem u formulu (1) vrednosti gravitacionog ubrzanja g i zapreminske težine γ , dobija se izraz

$$\sigma_0 = 3,2 \cdot 10^{-2} l^2 f^2, \quad (2)$$

u kome je σ_0 [MPa] sračunati napon u žici; f [Hz] izmerena frekvencija; l [m] unapred zadata i izmerena baza oscilovanja.

Metoda se bazira na merenju oscilacija žice pobuđene na vibriranje na modelu, koji je u praksi najčešće kontinualna

greda od tri polja, raspona $l_1 + l + l_1$, zategnuta aksijalnom silom prednaprezanja N , /9/. Ovo se ostvaruje tako što iz snopa zategnutih žica kabla odvoji jedna, ubacivanjem dva čelična podmetača na rastojanju $l = 100-120$ prečnika žice (merna baza koja \approx obezbeđuje idealizovane pretpostavke), vodeći računa da odnos spoljnih raspona l_1 , prema rasponu merne baze l , bude blizak jedinici. Ovaj odnos omogućava primenu izraza (2) bez ikakvih korekcija. Udarom metalnim predmetom o žicu, baza l se pobudi na oscilovanje i direktno se mernim uređajem meri frekvencija f .

Imajući u vidu da u praksi najčešće nije moguće „otvoriti“ kabl, u izvedenoj konstrukciji, u dužini 300-360 prečnika žice ($l_1 + l + l_1 > 2,1$ m, za žicu $\varnothing 7$ mm), tada se ide na što manje vrednosti l_1 , pa se za $l_1 < l$ primenjuje korigovana formula

$$\sigma = k\sigma_0, \tag{3}$$

gde je σ_0 napon sračunat na osnovu izraza (2), a broj k je korekcionni faktor čije su vrednosti prikazane u tabeli 1.

Tabela 1. Korekcionni koeficijent k .

ν	n								
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
15	0,718	0,814	0,834	0,847	0,853	0,876	0,058	1,340	1,842
30	0,861	0,919	0,923	0,925	0,929	0,932	0,989	1,395	1,906
45	0,908	0,949	0,951	0,952	0,953	0,956	0,995	1,411	1,926
60	0,931	0,963	0,964	0,964	0,965	0,967	0,997	1,419	1,935
75	0,946	0,971	0,971	0,972	0,973	0,974	0,998	1,423	1,940
90	0,955	0,976	0,976	0,977	0,977	0,978	0,999	1,426	1,943
105	0,961	0,979	0,980	0,980	0,980	0,981	0,999	1,428	1,944

U tabeli 1, $n = l/l_1$ i

$$\nu = \lambda \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}}, \tag{4}$$

gde je ν koeficijent koji karakteriše žicu u smislu vitkosti ($\lambda = l/i$).

U prvoj aproksimaciji, koja je najčešće dovoljna, koeficijent ν se određuje na osnovu sračunatog napona po obrascu (2) i stvarnog modula elastičnosti E dobijenog ispitivanjem čelika za prednaprezanje.

Institut IMS je, za napred navedena merenje, razvio instrument pod nazivom *tenzofrekvencmetar* opsega merenja od 15 do 1990 Hz, sa tačnošću očitavanja od 0,5 %, tako da je greška merenja svedena na minimum, /9/.

Imajući u vidu visoku tačnost tenzofrekvencmetra kojim merimo napon u zategnutoj žici kabla, može se konstatovati da obrazac (2) važi, sa greškom manjom od 5 %, ako se merenje vrši u opsegu u kome su $\nu \geq 45$ (što je u praksi najčešći slučaj) i $1 \geq n \geq 0,2$. Nasuprot tome za $n > 1$ situacija se naglo menja u negativnom smislu. Već za $n = 1,20$ obrazac (2) daje grešku veću od 40 %, a sa daljim prirastom ovog odnosa, merenja postaju apsurdna. Naravno treba imati u vidu da dobro obavljeno merenje zavisi od kvaliteta oslonaca merne baze.

U okviru sandučastog prstenastog nosača kupole Hale 1 nalaze se tri grupe kablova od žica $6\varnothing 5$ mm, rasporedene po visini preseka. Kataloške karakteristike ovih žica /10/ su date u tabeli 2.

Geometrijske karakteristike žice, prema katalogu proizvođača /10/ su date sledećim parametrima: $F = 0.196$ cm²; $I = 0.003068$ cm⁴; $l = 0.125112$ cm; $\lambda = 3.996413$.

Tabela 2. Karakteristike žice za prednaprezanje

tip	Nominalna sila (kN)	masa kabla (kg/m)	Karakteristična čvrstoća (MPa)	početna sila prednaprezanja za odgovarajući napon u čeliku σ (kN)			
				0,60 f_k	0,65 f_k	0,70 f_k	0,75 f_k
6 $\varnothing 5$	150	0,925	1670	118	128	138	148

Vrednosti l i l_1 iznose $l = 500$ mm, $l_1 = 300$ mm, tako da je odnos raspona $l_1/l = 0,6$. U tri preseka je izvršeno ispitivanje po jedne izdvojene žice $\varnothing 5$ mm, u skladu sa navedenim opisanim postupkom ispitivanja sile u prednapregnutoj žici. Imajući u vidu ograničenu dostupnost preseka prstena, izabrana su mesta za ispitivanje tako da je obuhvaćena barem po jedna žica u svakom preseku po visini prstenastog sandučastog nosača.

Ukupna projektovana sila prednaprezanja u sandučastom prstenastom nosaču iznosi 5.000 kN, /11/. Za projektovanih 50 kablova, to je sila koja daje napon u svakom kabl u vrednosti od $\sigma = 0,5f_{pk}$.

Izmerene vrednosti sile prednaprezanja u prednapregnutim žicama, koje se kreću u rasponu od 19,97 do 21,34 kN, se nalaze u teoretskim (očekivanim) granicama. Shodno tabeli 2, gde su date vrednosti koje se odnose na jedan kabl, odnosno, snop žica $6\varnothing 5$ mm i izmerene vrednosti koje su date za jednu žicu u snopu ($\varnothing 5$ mm), očekivane -preračunate vrednosti po presecima su date u tabeli 3.

Tabela 3. Preračunate vrednosti sile prednaprezanja kabla $6\varnothing 5$ mm.

presek	sila (kN)	napon
presek 1	127.62	$\sigma = 0,65 f_k$
presek 2	119.82	$\sigma = 0,61 f_k$
presek 3	128.04	$\sigma = 0,65 f_k$

Na osnovu ovako sprovedene kontrole trajne sile prednaprezanja u kablovima za prijem sile zatezanja u sandučastom nosaču, može se konstatovati da je naponsko stanje posmatranog nosača u projektovanim granicama.

ZAKLJUČAK - OCENA STANJA

Prema propisima je definisana i opisana kategorija stanja konstrukcije i dat je tip potrebnog održavanja konstrukcije i neophodne aktivnosti koje treba preduzeti u sledećem periodu. Rezultat ocene stanja dat je prema klasifikaciji stanja prikazanoj u tabeli 4.

Tabela 4. Klasifikacija stanja objekta.

	Ocena	Opis stanja	Tip održavanja
1.	opasno	preti rušenju	neodložna sanacija
2.	nezadovoljavajuće	vrlo oštećeno	planirana sanacija
3.	loše	oštećeno	investiciono
4.	nepovoljno	manje oštećeno	intenzivno
5.	prihvatljivo	zanemarljivo oštećeno	redovno održavanje
6.	Dobro	ispravan	održavanje

Hala 1

Na osnovu podataka dobijenih na opisani način - vizuelnim pregledom, snimanjem geometrije konstrukcija i njihovih oštećenja, uvidom u postojeću dokumentaciju, kao i nakon ovde prikazane analize rezultata merenja sile prednaprezanja u žicama, odnosno, kablovima prstenastog nosača kupole, konstatuje se da je *ocena 4 - manje oštećen (nepovoljno)*.

Visoku ocenu prstenasti nosač je dobio prvenstveno na osnovu izmerene trajne sile u prednapregnutim žicama, koja je na očekivanom nivou i za oko 20 % veća od projektom predviđene trajne sile.

Osnovni problem sandučastog nosača je oštećen zaštitni sloj betona do žica (ili do armature), zatim neadekvatna otpornost na požar celog prstena, kao i pojava prsline u donjoj zoni prstenastog nosača zbog nejednakog sleganja i obrtanja temelja glavnog stuba.

Izvršena geodetska merenja glavne konstrukcije pokazuju stabilizaciju sleganja kod sedam glavnih V stubova, dok kod jednog stuba postoji dalji prirast sleganja. Kod pet glavnih stubova sleganje neprelazi 25 mm. Preostala dva stuba daju nešto veće vrednosti sleganja, s tim da jedan ima tendenciju zaustavljanja na oko 50 mm, dok drugi nema tendenciju zaustavljanja i vrednost njegovog trenutnog sleganja iznosi 83 mm.

Potreba za praćenjem eventualnog razmicanja temelja stubova konstatovana je nakon pregleda ploče prizemlja, na kojoj su konstatovane prsline u radijalnom pravcu, kroz celu debljinu ploče. Imajući u vidu položaj prsline u ploči i njihovu dubinu rasprostiranja kroz ploču, zaključeno je da je ploča dodatno napregnuta u svojoj ravni silom zatezanja kao posledica razmicanja temelja glavnih stubova.

Stoga je konstrukcija objekta Hale 1 ocenjena krajnjom ukupnom ocenom 3. Treba istaći da oštećenja konstatovana na glavnoj konstrukciji ne ugrožavaju nosivost konstruktivnih elemenata i stabilnost kupole u celini, ali za posledicu ima delimično narušenu trajnost i funkcionalnost objekta. Isto važi za konstrukciju galerija, suterena i prizemlja.

Hale 2 i 3

Hala 2 je ocenjena ocenom 4, jer su uočena oštećenja manjeg obima i značaja, uobičajena za takvu vrstu objekata, koja u daljoj budućnosti mogu samo u manjoj meri ugroziti trajnost objekta.

Hala 3 je takođe ocenjena ocenom 3, uzimajući u obzir pojavu oštećenja u vidu radijalnih prsline na donjim strana-

ma kružnih prstenastih ploča. Snimljene prsline, širine oko 1 mm, se pružaju između srednje i spoljne grede-prstena, dakle u spoljnom prostoru, i ima ih praktično u svakom polju po jedna ili dve. Pri tom, neke od njih prelaze i na spoljnu stranu srednje grede po visini, ali spoljnu gredu ne zahvataju.

REFERENCE

1. Beogradski sajam: Inovativnost tehnologije, arhitekture i kulture, Katalog izložbe, Beograd: SANU, 2021.
2. Projekat Beogradskog sajma, Beograd: Beogradski sajam, Projektantski biro, 1955.
3. Petrović, B., Branko Žeželj, Život i delo srpskih naučnika, V.D. Đorđević, Ed., SANU, Beograd, 2005, str.203-205.
4. Glavni pregled objekata Beogradskog sajma, Sveska 2, Elaborat o stanju konstrukcije Hale 2: Beograd, Institut IMS, 2016.
5. Muravljev, M., Branko Žeželj - stvaralaštvo inženjera i naučnika, Istraživanja, projekti i realizacije u graditeljstvu, Eds. Z. Popović i G. Petrović, Beograd, 2010, str. 27-29.
6. Glavni pregled objekata Beogradskog sajma, Sveska 1, Elaborat o stanju konstrukcije Hale 1: Beograd, Institut IMS, 2016.
7. Izveštaj o glavnom pregledu konstrukcije Hale 1 Beogradskog sajma, Beograd, Institut IMS, 2002.
8. Izveštaj o glavnom pregledu konstrukcije Hale 1 Beogradskog sajma, Beograd, Institut IMS, 2007.
9. Popović, Z., Arandelović, B., Popović, V., Kontrola sile u kablovima naknadno prednapregnutih konstrukcija, Istraživanja, projekti i realizacije u graditeljstvu, Eds. Z. Popović i G. Petrović, Beograd, 2010, str. 255-260.
10. Katalog sistema prednaprezanja IMS, Bilten Instituta IMS, Specijalni broj, Beograd, 1989.
11. Petrović, B., Statički proračun univerzalne hale Beogradskog sajma, Projekat Beogradskog sajma, Beograd, Beogradski sajam, Projektantski biro, 1955.

© 2023 The Author. Structural Integrity and Life, Published by DIVK (The Society for Structural Integrity and Life 'Prof. Dr Stojan Sedmak') (<http://divk.inovacionicentar.rs/ivk/home.html>). This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)