

V. Georgievski, Z. Bogatinoski, D. Kozinakov

## ISPITIVANJE PROBNIM OPTEREĆENJEM ZAVARENE NOSEĆE POKRIVNE PROSTORNO REŠETKASTE KONSTRUKCIJE TIP PRACTIX GIMNAZIJSKE SPORTSKE SALE

### PROOF LOADING TESTING OF WELDED SPACE ROOF GRID BEARING STRUCTURES TYPE PRACTIX OF AN GYMNAZIUM SPORT FACILITY

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 620.17:624.073.5.078.45

Rad primljen/Paper received: 31.3.1998, korigovan 20.4.2000.

Adresa autora / Author's address: Prof.dr Vladimir Georgievski,

asis.mr Zoran Bogatinoski, asis.mr Dimitri Kozinakov,

Mašinski fakultet, Skopje, Karpoš II bb. Makedonija

#### Ključne reči:

- ispitivanje probnim opterećenjem
- zavarena pokrivna konstrukcija
- prostorno rešetkast PRACTIX sistem

#### Izvod

*Prikazani su postupak i tok eksperimentalnog ispitivanja izvedenog s ciljem da se simulira i oceni ponašanje u eksploatacijskim uslovima noseće pokrivne čelične konstrukcije gimnazijske sportske sale izgrađene 1996/97. godine u Bitolju, R. Makedonija. Konstrukcija je izrađena primenom zavarenog prostorno rešetkastog PRACTIX- sistema, razvijenog i dizajniranog u Institutu za zavarivanje i zavarene konstrukcije na Mašinskom fakultetu u Skoplju.*

*Specifičnost konstrukcijskog rešenja zahtevala je i posebnu pažnju u pripremi i izvođenju ispitivanja.*

#### Key words:

- proof loading testing
- welded roof structure,
- space grid PRACTIX-system

#### Abstract

*Procedure and performance of experimental investigation are presented, carried out to simulate and evaluate the behaviour in service condition bearing steel roof structure for gymnasium sport facility, built 1996/97 in Bitola, R. Macedonia. The structure was made using welded space grid PRACTIX-system, developed and designed in the Institute for welding and welded structures at Faculty of Mechanical Engineering in Skopje.*

*The specific design solution required specific attention in preparing and performance of testing.*

#### UVOD

Prostorne rešetkaste konstrukcije (PRK) danas više nisu samo ekstravagantan dodatak ili vizuelno olakšanje masivnih betonskih i drugih objekata. Više decenija iskustva u primeni i razvoju raznih sistema štapova i prostornih spojnica u svetu proširili su primenu ovih lakih i atraktivnih metalnih konstrukcija, jer se brzo i jednostavno montiraju sastavljanjem kompatibilnih predfabrikovanih elemenata. Isto tako, poznato je da je primena savremenih prostornih rešetkastih sistema (PRS) praktično neograničena, pa se one uspešno primenjuju za izgradnju kako malih, tako i ogromnih nosećih krovnih konstrukcija, npr. za industrijske hale, sportske sale opšte namene, stadione, avionske hangare, izložbene paviljone, kongresne sale, plivačke bazene, pozorišta, benzinske pumpe, restorane, nastrešnice za autobuske i željezničke stanice i hotelske ulaze.

Svedoci smo neprestanog iznalaženja novih rešenja u ovoj oblasti projektovanja i razvoja već postojećih, pri čemu neiscrpan izvor ideja i dalje ostaju, u ovom radu nazvana "klasična" rešenja: MERO, UNISTRUT, OKTAPLATTE, SPACE DECK, TRIODETIK, UNIBAT, NODUS - sistemi, koji još i danas predstavljaju najčešće primenjene PRS u svetu /1/.

Međutim, i pored velikog napretka u razvoju prostornih rešetkastih sistema, jedan od najvećih konstrukcijskih problema i dalje ostaje prostorno povezivanje većeg broja štapova u jednom čvoru. To znači da uspešnost jedne prostorne rešetkaste konstrukcije najpre zavisi od efikasnosti rešenja prethodnog problema u praksi, a to je rešenje elementa za spajanje, tačnije prostorne spojnice. Prostorna spojnica treba da zadovolji niz složenih zahteva koji se nameću u toku izrade, montaže i eksploatacije PRK.

Prostorne spojnice istovremeno predstavljaju i najosetljiviji konstrukcijski deo PRS. Još uvek nije razvijena univerzalna, optimalna i ekonomična prostorna spojnica, u kojoj često treba da se spoji i više od 8 štapova u prostoru.

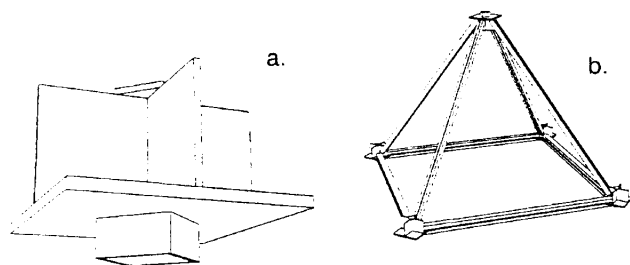
Mnogobrojni do sada patentirani tipovi prostornih spojnica i čvorova su glavni elementi koji karakterišu mnogobrojne tipizirane prostorne sisteme. U pojedinim zemljama su razvijeni razni prostorni sistemi, kao i prostorne spojnice. Međutim, primenjena rešenja imaju, pored znatnih prednosti i izvesne nedostatke.

U svakom slučaju, ovi sistemi pružaju arhitektima, građevinskim i mašinskim inženjerima u oblasti metalnih konstrukcija veliku slobodu i mogućnosti, kako u projektovanju i izvedbi, tako i u optimizaciji savremenih objekata.

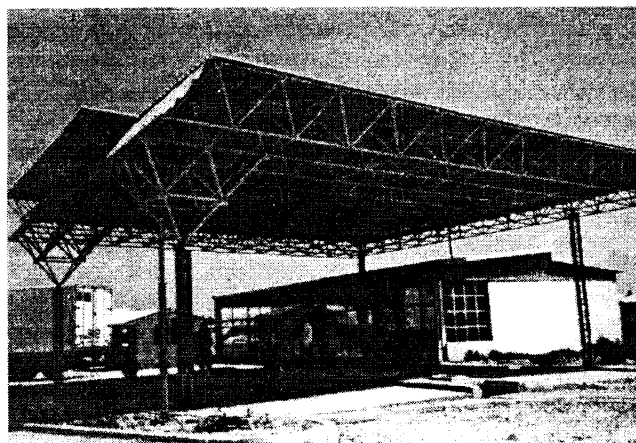
U Republici Makedoniji, posebno poslednjih nekoliko godina, značajno se povećao interes za primenu ovih sistema pri izgradnji raznih metalnih konstrukcija, najčešće za benzinske pumpe, industrijske hale i sportske objekte.

Na Mašinskom fakultetu u Skoplju, u Institutu za zavaranje i zavarene konstrukcije, na Katedri za metalne konstrukcije već dve decenije aktivno se radi na istraživanju i primeni prostornih rešetkastih konstrukcija. Posebna pažnja je posvećena iznalaženju i razvoju sopstvenih rešenja prostornih spojnica, najvitalnijem elementu PRK. Na početku, posle višegodišnjeg istraživanja, prof. A. Stojanovića i prof. V. Georgievskog razvijen je pre desetak godina, prihvaćen i primenjen tzv. TORUS GESTO - sistem (TORUS-GESTO = TORUS Georgievski Stojanović) /2/. Sa ovim istraživanjima, Mašinski fakultet iz Skoplja je u ovoj oblasti postao jedna od vodećih naučnoistraživačkih institucija u bivšoj SFRJ. Poslednjih nekoliko godina, od strane stručnog tima u kojem su učestvovali autori ovog rada, projektovano je jedno novo rešenje, nazvano PRACTIX sistem. Jedna od karakteristika PRACTIX sistema, koja ga čini različitim od drugih PRS je i oblik i tehnologija izrade elemenata - štapova i zavarenih spojnica /3/. Na sl. 1. prikazani su izgled jedne spojnice i piramide izrađene zavarivanjem REL-postupkom.

Na sl. 2., 3. i 4. prikazano je nekoliko PRK u PRACTIX - sistemu, izvedenih prema projektu autora ovog rada. Izvođač zavarenih čeličnih konstrukcija bila je firma MZT "Monting" iz Bitolja.



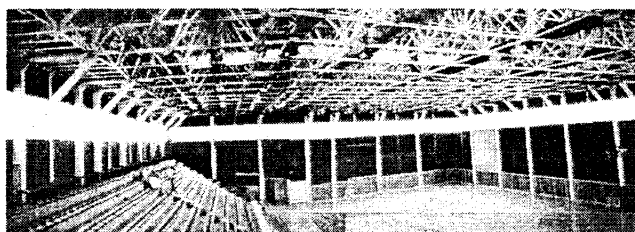
Slika 1. Elementi PRACTIX - sistema: a. zavarena spojnica; b. Izgled piramide izrađene zavarivanjem dijagonalnih i pojasnih štapova sa prostornim spojnica



Slika 2. Pokrivna PRK za benzinsku pumpu "Torpedo" - Bitolj (262 m<sup>2</sup>). Godina izvedbe 1993.



Slika 3. Pokrivna PRK za benzinsku pumpu "Agoprom" - Tetovo (2x208 = 416 m<sup>2</sup>). Godina izvedbe 1994.



Slika 4. Pogled na deo prostorne rešetkaste konstrukcije sportske sale u Resenu (32,5 x 52,5 m = 1780 m<sup>2</sup>) - panoramska fotomontaža. Kapacitet 1300 gledalaca. Godina izvedbe 1995.

## EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE PROBNIM OPTEREĆENJEM NOSEĆE POKRIVNE KONSTRUKCIJE SPORTSKE SALE

### Osnovne tehničke i izvedbene karakteristike konstrukcije

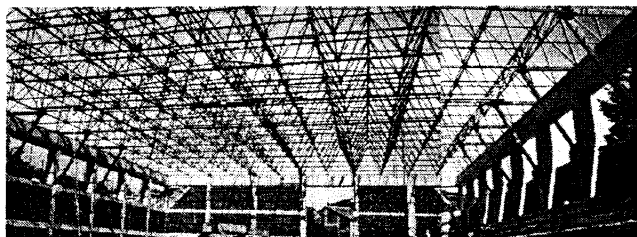
Izvedena sportska sala predstavlja potpuno zatvoren objekt sa sve četiri strana, lociran u slobodnom prostoru dvorišta gimnazije u Bitolju. Kao osnovna mera je uzeto igralište za rukomet dimenzija 20 x 40 m, u koje mogu da se uklope i ostali sportovi (košarka, odbojka). Sa jedne strane, po dužini sportske sale predviđene su i tribine sa 350 sedišta. Sala je osvetljena prirodnim svetlom na podužnim zidovima, kao i reflektorima postavljenim na noseću PRK.

Na osnovu arhitektonskog rešenja je izrađen Glavni projekt za noseću pokrivnu prostorno rešetkastu konstrukciju /4/. Kao noseća pokrivna konstrukcija je usvojena zavarena jednoslojna prostorna rešetkasta konstrukcija - tip PRACTIX, postavljena na 32 armiranobetonska stuba raspoređena po konturi objekta (sl. 5). Izvođač čelične konstrukcije bila je firma MZT "Monting" iz Bitolja. Tehnički podaci izveden konstrukcije

- Usvojen prostorno rešetkast sistem: PRACTIX
- Modul sistema: m=2,2 m
- Visina PRK : h=2,2 m
- Ukupan broj čvorova: n=513
- PRACTIX zavarene spojnice: 4 tipa
- Ukupan broj štapova: 1920

Za pokrivanje je upotrebljen sendvič od čeličnog plastificiranog lima F38/158 debljine 0,6 mm, ispunjen termičkom ispunom - tervol debljine 80 mm. Pomoću sekundarne čelične konstrukcije oformljen je dvovodni krov nagiba 6%.

Ostali podaci o konstrukciji, kao što su geometrijske i statičke karakteristike usvojenih preseka štapova rešetke, dimenzije spojnica, dimenzije zavarenih spojeva, su dati u Glavnom projektu za noseću prostorno rešetkastu konstrukciju sportske sale gimnazije u Bitolju /4/. Pre realizacije analize i eksperimentalnog ispitivanja bilo je potrebno proučiti projekt, kako bi se mogla unapred odrediti mesta za opterećenje i merna mesta i procene rezultati.



Slika 5. Pogled sa unutrašnje strane na čeličnu noseću prostorno rešetkastu konstrukciju tip PRACTIX, oslonjenu na armiranobetonske stubove ( $26,4 \times 44,0 \text{ m} = 1160 \text{ m}^2$ ) - panoramska fotomontaža. Godina izvedbe 1996/97.

### Pripreme i tok eksperimentalnog ispitivanja

Za teorijsku simulaciju eksperimentalnog ispitivanja probnim opterećenjem korišćen je kompjuterski model u kojem su opterećenja bila postavljena u pojedinim čvorovima donjeg pojasa konstrukcije /5/, a analiza je izvedena programom SAP90. Čvorovi za postavljenje probnog opterećenja su izabrani tako da omogućavaju adekvatnu simulaciju napona u određenim štapovima PRK, kao i ugiba konstrukcije u odnosu na eksploatacione vrednosti, koji se očekuju kada bi konstrukcija bila opterećena snegom od  $110 \text{ kg/m}^2$ , za nadmorsku visinu od 630 m za Bitolj.

Na osnovu kompjuterske analize za simulaciju opterećenja snegom krovne PRK je napravljen:

- raspored platformi za ispitno opterećenje konstrukcije;
- raspored mernih mesta;
- izbor pojedinih faza probnog opterećenja

Radi bezbednosti i jednostavnosti manipulacije probnim opterećenjem izabrano je opterećenje platformama koje su oslonjene na ručne hidraulične dizalice.

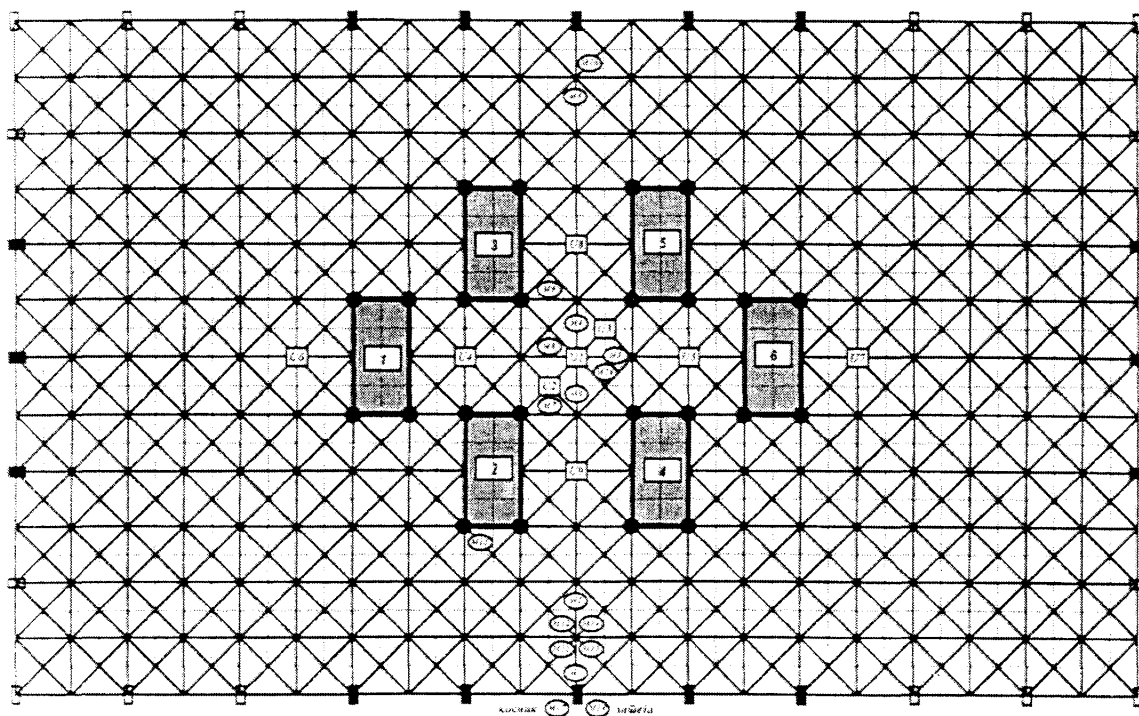
Platforme za opterećenje (sl. 6.) su postavljene u srednjoj trećini noseće konstrukcije. Ovaj raspored je napravljen u saglasnosti sa kompjuterskom analizom, čime se postiže skoro potpuna simulacija naponsko-deformacijskog stanja konstrukcije, u realnim eksploatacijskim uslovima.

Raspored mernih mesta za određivanje naponsko-deformacijskog stanja u elementima, kao i raspored mernih mesta za merenje ugiba birani su tako da je moguće što bolje praćenje i kontrola "rada" pokrivne noseće konstrukcije (sl. 6).

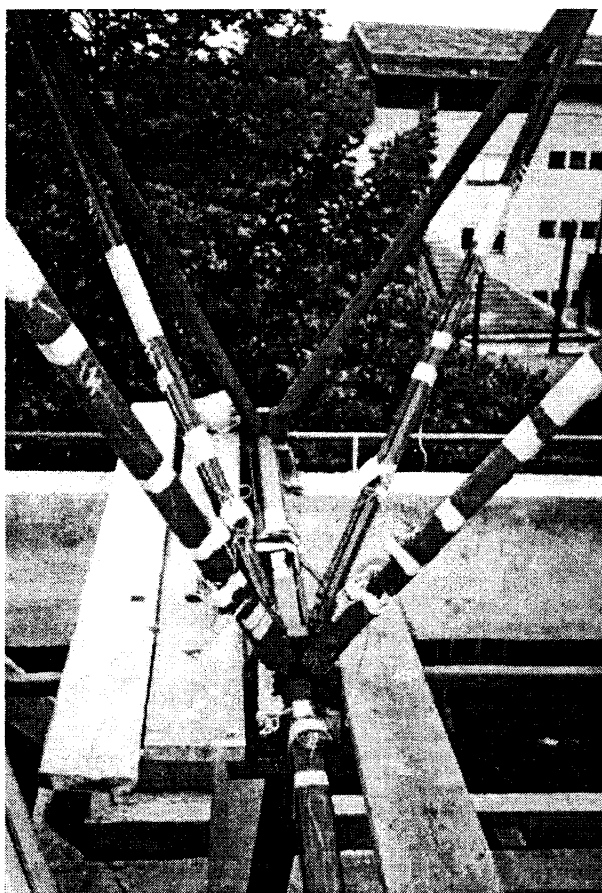
Za merenje deformacija korišćene su merne trake tipa 3 (120 LY11) (sl. 7) i 60 kanalni merni most UPM-60 firme Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH-Deutschland, kao i elektro-mehanički ugibomeri (sl. 8).

Treba naglasiti da je eksperimentalno ispitivanje izvedeno pre postavljanja pokrivnog sendvič lima, tako da pri opterećenju nije uzeta njegova težina i krutost. Isto tako, kod teorijske i eksperimentalne analize ne uzima se u obzir sopstvena težina same prostorne rešetke.

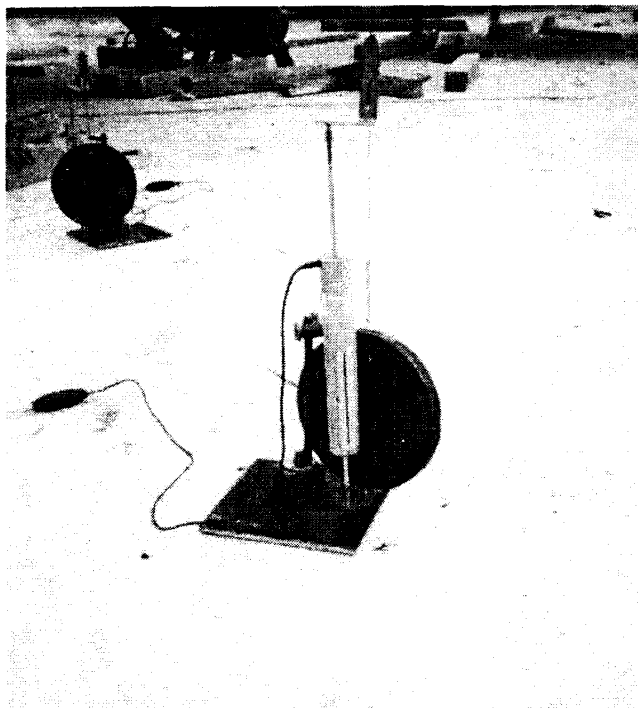
Faze probnog opterećenja su bile odabrane tako da je omogućeno postupno opterećivanje konstrukcije, a time i postupno praćenje naponsko-deformacijskog stanja elemenata. Probno opterećenje je bilo izvedeno čeličnim blokovima, a faze opterećenja (tab. 1. i 2) su bile usaglašene sa teorijsko-kompjuterski simuliranim fazama.



Slika 6. Raspored platformi za opterećenje i mernih mesta za deformacije i ugibe



Slika 7. Pogled na deo PRK za zalepljenim i zaštićenim mernim trakama i kablovima na odgovarajućim dijagonalnim i pojasnim štapovima



Slika 8. Pogled na elektro-mehaničke ugibomere za vreme ispitivanja

Tabela 1. Lista čeličnih blokova i njihovih masa

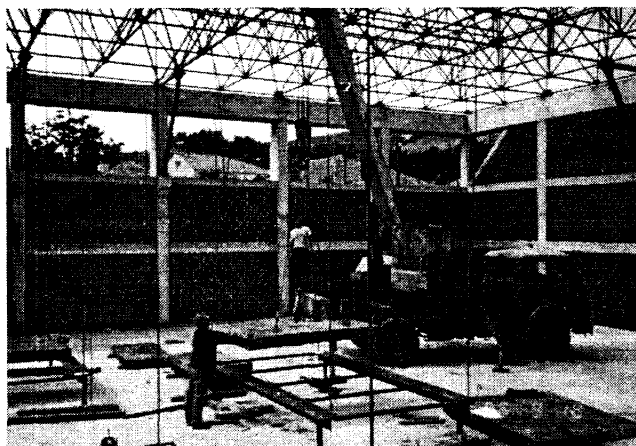
Blok broj	Masa, kg	Blok broj	Masa, kg
1	2800	11	2880
2	2930	12	4150
3	2750	13	4000
4	4100	14	4000
5	2720	15	4000
6	2780	16	4000
7	950	17	4150
8	4140	18	4100
9	4150	19	4000
10	3000	20	-

Tabela 2. Opterećenje konstrukcije po fazama

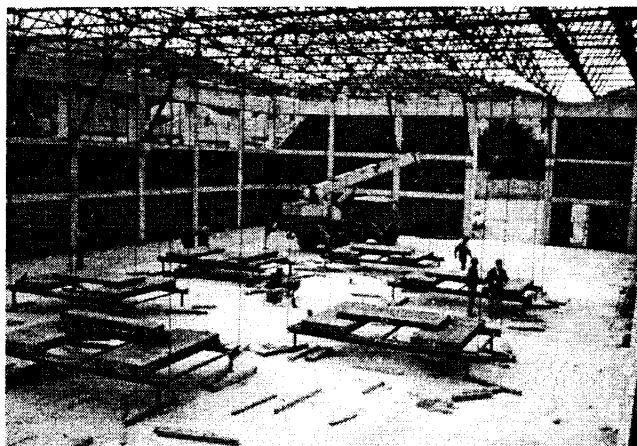
Faza	PLATFORMA					
	1	2	3	4	5	6
	Čelični blok broj					
0	-	-	-	-	-	-
I-Ao	4	-	-	-	-	18
I-Ar	rasterećenje					
I-Bo	4	13	-	-	16	18
I-Co	4	13	14	15	16	18
29,0 t *	4100 kg	4000 kg	4000 kg	4000 kg	4000 kg	4100 kg
0	rasterećenje					
II-Ao	4; 9	13	14	15	16	18; 12
II-Bo	4; 9	13; 17	14	15	16; 2; 7	18; 12
II-Co	4; 9	13; 17	14; 19	15; 8	16; 2; 7	18; 12
53,47 t *	8250 kg	8150 kg	8000 kg	8140 kg	7880 kg	8250 kg
III-Ao	4; 9; 10	13; 17	14; 19	15; 8	16; 2; 7	18; 12; 11
III-Bo	4; 9; 10	13; 17	14; 19; 3	15; 8; 5	16; 2; 7	18; 12; 11
III-Co	4; 9; 10	13; 17; 1	14; 19; 3	15; 8; 5	16; 2; 7; 6	18; 12; 11
70,4 t *	11250 kg	10950 kg	10750 kg	10860 kg	10660 kg	11130 kg
0	rasterećenje					

Na sl. 9. i 10. prikazan je deo toka eksperimentalnog ispitivanja.

U tab. 3. i 4. prikazan je deo uporednih vrednosti teorijskih i eksperimentalnih rezultata za napone i ugibe po fazama /5/.



Slika 9. Postavljanje čeličnih blokova na jednu od platformi u prvoj fazi



Slika 10. Pogled na svih šest platformi za vreme poslednje (treće) faze opterećenja (potpuno opterećena PRK)

Iz grafičkog prikaza rezultata eksperimenta i kompjuterskog proračuna na sl. 11. i 12. se vidi da je saglasnost rezultata dobra.

Na osnovu dobijenih teorijskih - kompjuterskih rezultata, njihove analize i poređenja sa rezultatima eksperimentalnog ispitivanja, kao i na osnovu praktičnog iskustva u ovoj specifičnoj i kompleksnoj oblasti nosećih metalnih konstrukcija, utvrđeno je sledeće:

1. Konstrukcija je ispitivana u domenu elastičnih deformacija, pri čemu je povećanje ugiba i napona u svim fazama opterećivanja bilo podjednako i pravilno.

2. Eksperimentalno dobijeni rezultati za naponsko-deformacijsko stanje ispitivane konstrukcije u potpunosti su potvrdili postavljene teze i postavke, kao i kompjuterske i druge analize za simulirani matematički model. Drugim rečima, izvršena ispitivanja gotove konstrukcije probnim opterećenjem su potvrdila visok stepen saglasnosti "rada" izvedene konstrukcije sa usvojenim proračunskim (kompjuterskim) modelom.

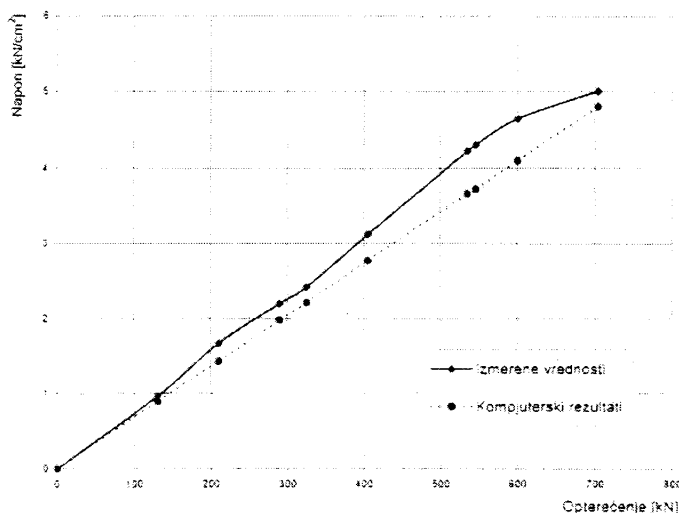
3. Eksperimentalnim ispitivanjem je dokazano da je noseća prostorna rešetkasta konstrukcija tip PRACTIX stabilna i dovoljno kruta, a potrebna nosivost odgovara proračunskoj.

Tabela 3. Poređenje proračunatih napona

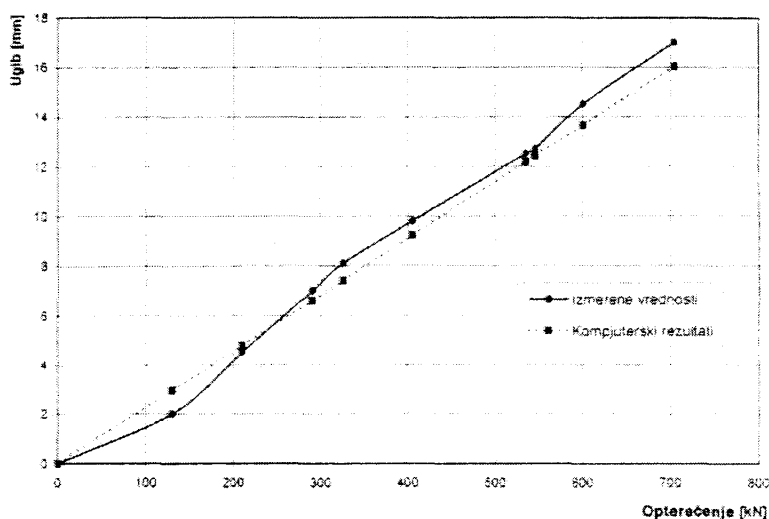
Merno mesto (traka)	Štap broj	I faza (I-Co)		II faza (II-Co)		III faza (III-Co)	
		Izmerene vrednosti kN/cm <sup>2</sup>	Kompjuterski rezultati kN/cm <sup>2</sup>	Izmerene vrednosti kN/cm <sup>2</sup>	Kompjuterski rezultati kN/cm <sup>2</sup>	Izmerene vrednosti kN/cm <sup>2</sup>	Kompjuterski rezultati kN/cm <sup>2</sup>
M1	121	-0.693	-0.83	-1.3	-1.53	-2.184	-2.01
M2	122	-0.987	-1.21	-1.008	-2.23	-1.407	-2.93
-	-	-	-	-	-	-	-
M8	492	-3.339	-2.12	-2.961	-3.91	-6.279	-5.14
M9	493	-3.507	-2.08	-3.927	-3.83	-6.678	-5.04

Tabela 4. Poređenje ugiba

Ugibomer	Čvor broj	I faza (I-Co)		II faza (II-Co)		III faza (III-Co)	
		Kompjuterski rezultati, cm	Izmerene vrednosti, cm	Kompjuterski rezultati, cm	Izmerene vrednosti, cm	Kompjuterski rezultati, cm	Izmerene vrednosti, cm
U1	257	-0.6607	-0.700	-1.2180	-1.050	-1.6028	-1.700
U2	244	-0.6531	-0.700	-1.2050	-1.050	-1.5860	-1.650
-	-	-	-	-	-	-	-
U8	259	-0.5376	-0.520	-0.9892	-0.826	-1.3023	-1.340
U9	255	-0.5413	-0.508	-0.9997	-0.800	-1.3148	-1.300



Slika 11. Grafički prikaz izmerenih i proračunatih napona u štapu 3 donjeg pojasa rešetke



Slika 12. Grafički prikaz izmerenih i proračunatih ugiba u sredini rešetke

## UMESTO ZAKLJUČKA

Prikaz jedne savremene noseće metalne konstrukcije, sa posebnim osvrtom na njeno ispitivanje probnim opterećenjem pre puštanja u eksploataciju, još jednom je istaklo značaj i ozbiljnost izvođenja jednog ovako odgovornog i kompleksnog stručno-naučnog projekta. Naime, radi se o veoma odgovornom javnom objektu, sportskoj sali sa velikim slobodnim rasponima (26,4 x 44,0 m), savladanim primenom jednog novousvojenog prostorno rešetkastog sistema (PRACTIX-sistema). Samim tim i realizacija eksperimentalnog ispitivanja probnim opterećenjem konstrukcije zahteva specifičnu pripremu i izvedbu, prikazanu u ovom radu.

## LITERATURA

1. V. Georgievski: "Lake metalne konstrukcije-prostorni rešetkasti sistemi", drugo izdanje, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
2. V. Georgievski: "Torus Gesto - Space Structures System", International Journal "Space Structures", Vol.10, No.1, 1990.
3. V. Georgievski, D. Kozinakov, Z. Bogatinoski: "Projektovanje i konstruisanje zavarenih konstrukcija primenom prostornog rešetkastog PRACTIX-sistema", Zbornik radova- Međunarodno savetovanje ZAVARIVANJE 94, Novi Sad, maj 1995.
4. V. Georgievski, D. Kozinakov, Z. Bogatinoski: "Glavni projekat za noseću PRK sportske sale za gimnaziju "Josip Broz-Tito" u Bitolju", Mašinski fakultet, Skoplje, 1995/96.
5. V. Georgievski, D. Kozinakov, Z. Bogatinoski: "Studija za izvršeno eksperimentalno ispitivanje čelične pokrivne PRK sportske sale za gimnaziju "Josip Broz-Tito" u Bitolju", Mašinski fakultet, Skoplje, 1996/97.