Probno ispitivanje krovnih konstrukcija

Duvnjak, Ivan; Rak, Mladenko; Damjanović, Domagoj

Source / Izvornik: **Građevinar, 2010, 62, 887 - 896**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:905405

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-23**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

UDK 624.91:624.058 Primljeno 19. 7. 2010.

Probno ispitivanje krovnih konstrukcija velikih sportskih građevina

Ivan Duvnjak, Mladenko Rak, Domagoj Damjanović

Ključne riječi

krovna konstrukcija, sportska građevina, probno ispitivanje, dvorana „Arena Zagreb“, dvorana „Varaždin“, numerički model

I. Duvnjak, M. Rak, D. Damjanović *Prethodno priopćenje*

Probno ispitivanje krovnih konstrukcija velikih sportskih građevina

Prikazana su dva primjera probnih ispitivanja krovnih konstrukcija sportskih građevina: dvorane „Arene Zagreb“ i dvorane „Varaždin“. Posebno je istaknuto da je uz redovito ispitivanje potrebno i kontrolno ispitivanje za vrijeme uporabe građevine „Arene Zagreb“. Opisano je ispitivanje prostorne čelične rešetkaste krovne konstrukcije dvorane „Varaždin“. Iskazani su rezultati ispitivanja relativnih deformacija, pomaka, vlastitih frekvencija te su uspoređeni s numeričkim modelom.

Key words

roof structure, sports facilities, load testing, Arena Zagreb Hall, Varaždin Hall, numerical model

I. Duvnjak, M. Rak, D. Damjanović *Preliminary note*

Load testing for roof structures of big sports facilities

Roof load testing for two sports facilities, i.e. Arena Zagreb Hall and Varaždin Hall, is presented. It is emphasized that, in addition to regular testing, it is also important to conduct control tests during the life span of the Arena Zagreb Hall. The testing of the spatial steel roof truss of the Varaždin Hall is described. The results obtained by testing relative strain, displacement, and eigenfrequencies, are presented and compared with the numerical model.

Mots clés

toiture, ouvrages de sports, essai de portance, salle d'Arena Zagreb, salle à Varaždin, modèle numérique

I. Duvnjak, M. Rak, D. Damjanović *Note préliminarie*

Essai de portance pour les toitures des grands ouvrages de sports

Les essais de portance conduits pour la toiture des deux ouvrages de sports, i.e. de la sale de sports "Arena Zagreb" et de la salle de sports à Varaždin, sont présentés. Il est souligné que, en plus des essais réguliers, il est également important de faire des essais de contrôle pendant la durée de vie d'Arena Zagreb. L'essai de la ferme en acier de la salle de sports à Varaždin est décrit. Les résultats obtenus par mesure de déformation relative, déplacements et fréquences propres, sont présentés et comparés avec le modèle numérique.

Ключевые слова

конструкция крыши, спортивное сооружение, пробное испытание, зал „Арена Загреб“, зал „Вараждин“, цифровая модель

И. Дувняк, М. Рак, Д. Дамьянович *Предварительное сообщение*

Пробное испытание конструкций крыш крупных спортивных сооружений

Приведены два примера пробного испытания конструкций крыш спортивных сооружений: залов „Арена Загреб“ и „Вараждин“. Особое внимание обращено на то, что помимо очередных, необходимо проведение и контрольных испытаний в период эксплуатации сооружения „Арена Загреб“. Описано испытание пространственной стальной решетчатой конструкции крыши зала „Вараждин“. Приведены результаты испытаний на относительные деформации, смещение, собственные частоты, произведено их сравнение с цифровой моделью.

Schlüsselworte

Dachkonstruktion, Sportbauwerke, Probeuntersuchung, Halle "Arena Zagreb", Halle "Varaždin", numerisches Modell

I. Duvnjak, M. Rak, D. Damjanović *Vorherige Mitteilung*

Probeuntersuchung von Dachkonstruktionen grosser Sportbauwerke

Dargestellt sind zwei Beispiele von Probeuntersuchungen der Dachkonstruktionen von Sportbauwerken: der Halle "Arena Zagreb" und der Halle "Varaždin". Besonders wird hervorgehoben dass neben der regelmässigen Untersuchung auch Kontrolluntersuchung des Bauwerks "Arena Zagreb" während der Benutzung notwendig ist. Beschrieben ist die Untersuchung des räumlichen Stahlfachwerks der Dachkonstruktion der Halle "Varaždin". Vorgelegt sind die Ergebnisse der Untersuchung von relativen Deformationen, Verschiebungen und eigenen Frequenzen und deren Vergleich mit dem numerischen Modell.

Autori: **Ivan Duvnjak**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Mladenko Rak**, dipl. ing. građ.; **Domagoj Damjanović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Konstrukcija mora biti takva da tijekom trajanja građevina podnese sve utjecaje uobičajene uporabe i utjecaje okoliša, tako da pri građenju i uporabi predvidiva djelovanja ne uzrokuju:

- rušenje građevine ili njezina dijela
- deformacije nedopuštena stupnja
- oštećenja građevnog sklopa ili opreme zbog deformacije čelične konstrukcije
- nerazmjerno velika oštećenja građevine ili njezina dijela u odnosu prema uzroku zbog kojih su nastala.

Konstrukcija ima dokaze nosivosti i uporabljivosti utvrđene ispitivanjem pokusnim opterećenjem kada je ono propisano kao obvezno ili zahtijevano projektom. Pokusnim se opterećenjem utvrđuju:

- usklađenosti s projektom ili pravilnikom
- usklađenosti kvalitete svih materijala i ugrađenih elemenata predviđenih projektom
- sposobnost konstrukcije za preuzimanje projektom predviđenog opterećenja
- ponašanje konstrukcije u uporabi i njezina trajnost [1].

Veličina probnog opterećenja mora biti jednaka najnepovoljnijem opterećenju iz statičkog proračuna konstrukcije ili položaj i veličina probnog opterećenja moraju izazvati približno jednake unutarnje sile u kritičnim presjecima konstrukcije. Obvezatno se probno opterećenje na konstrukcijama visokogradnje provodi za građevine definirane propisima za beton, armirani beton, prednapeti beton, čelične i drvene konstrukcije, sukladno veličini raspona konstrukcija ili pojedinih konstruktivnih elemenata. Prema karakteru pokusna ispitivanja mogu biti statička ili dinamička, prema trajanju kratkotrajna ili dugotrajna, prema opsegu cijela konstrukcija ili segmenti konstrukcije. Probno statičko opterećenje mora odgovarati stalnom i ukupnom pokretnom najnepovoljnijem opterećenju prema projektu (uzima se da su svi parcijalni koeficijenti sigurnosti za opterećenje jednaki, 1,0). Pokusna opterećenja su redovna [2] kada se provode prije puštanja objekta u eksploataciju, a kontrolna [3] po potrebi tijekom uporabe objekta [4].

Pokusna opterećenja potrebno je provoditi po koracima, i to:

- detaljni pregled i snimka konstrukcije
- opterećivanje do najvećega predviđenog opterećenja kroz nekoliko faza
- promatranje ponašanja pod opterećenjem
- rasterećenje
- promatranje konstrukcije nakon rasterećenja
- detaljni pregled.

Kod nekih je konstrukcija broj faza propisan normom ili postupkom ispitivanja. Konstrukcija se pokusno opterećuje u najmanje 4 jednaka koraka do predviđene razine opterećenja. Kod čeličnih konstrukcija s vijcima najveće probno opterećenje treba ponoviti barem jednom, kako bi se dobio uvid u veličinu popuštanja spojeva. Između pojedinih koraka kontinuiranim se zapisom mjere pomaci i deformacije, a idući je korak tek nakon stabilizacije prethodnog koraka. Nakon nanošenja najvećeg predviđenog probnog opterećenja, ono na konstrukciji mora ostati najmanje 16 h za sve konstrukcije osim čeličnih gdje treba stajati barem 4 h (u tom se razdoblju konstrukcija pregledava najmanje 4 puta). Promatranje ponašanja konstrukcije uključuje promatranje pomaka i deformacija, kutova zaokreta, pojave i širenja pukotina, njihovih širina, lokalnih defekata i sloma konstrukcije. Svrha nanošenja probnog opterećenja po fazama jest da se utvrdi linearnost prirasta deformacija u odnosu prema prirastu opterećenja.

Nakon izvršenoga probnog opterećenja, osnovni kriterij valjanosti odnosno uvjet za tehnički ispravnu konstrukciju jest:

- izmjereni progibi i deformacije pri probnom opterećenju moraju biti manji ili jednaki računskim za isto opterećenje.

Sljedeći se kriterij odnosi na elastično ponašanje konstrukcije:

- nakon rasterećenja zaostale deformacije i progibi moraju biti u granicama koje su propisane za pojedine vrste konstrukcija i takvih veličina da se ponašanje konstrukcije može smatrati elastičnim.

Da bi konstrukcija nakon prvoga probnog opterećenja zadovoljila, zaostale deformacije i progibi ne smiju biti veći:

- 15 % od maksimalno izmjerenih u istoj točki za čelične i spregnute konstrukcije
- 20 % od maksimalno izmjerenih u istoj točki za konstrukcije od prednapetoga betona
- 25 % od maksimalno izmjerenih u istoj točki za konstrukcije od armiranog betona [2][4].

Ispitivanje konstrukcija daje mogućnost dobivanja podataka koji su dragocjeni za projektiranje i razvoj konstrukcija, održavanje u uporabi i pravodobno otkrivanje eventualnih nedostataka, ali i za unapređivanja propisa i normativa. Eksperimentalna ispitivanja krovišta velikih sportskih građevina prikazat ćemo na primjerima sportske dvorane „Arena Zagreb“ (slika 1.) i „Varaždin“ (slika 2.). Dvorane su izgrađene uoči Svjetskog prvenstava u rukometu početkom 2009. godine.

Slika 1. Sportska dvorana "Arena Zagreb"

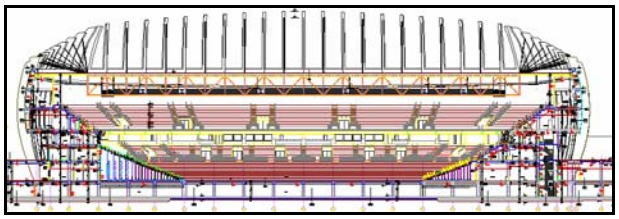
Slika 2. Sportska dvorana "Varaždin"

Parametri (pomak, relativna deformacija) dobiveni pokusnim opterećenjem dat će najbolju sliku stanja redovnog pregleda konstrukcije krova, odnosno mogućnost usporedbe eksperimentalno dobivenih rezultata s numeričkim rješenjem. Osim redovnoga probnog opterećenja, zbog složenosti se obavlja i kontrolni pregled konstrukcije krova tijekom uporabe objekta. Takav primjer kontrolnog pregleda prikazan je na sportskoj građevini „Arena Zagreb“.

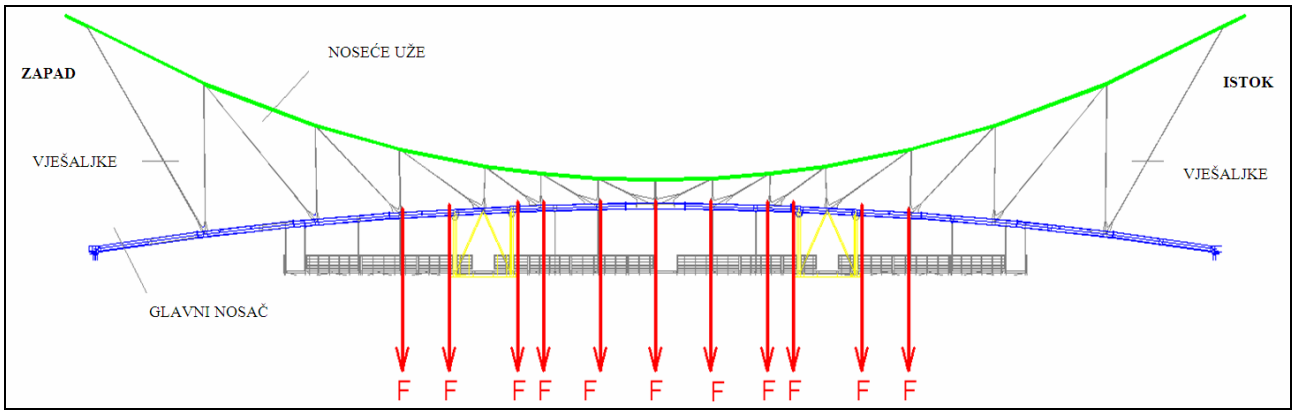
2 Ispitivanje krovne konstrukcije „Arene Zagreb“

2.1 Redovno probno opterećenje

Krovna je konstrukcija “Arene Zagreb” približno pravokutnoga tlocrtnog oblika nad površinom otprilike 143 x 104 m (15000 gledatelja). Krovna konstrukcija sastoji se



Slika 3. Uzdužni presjek dvorane

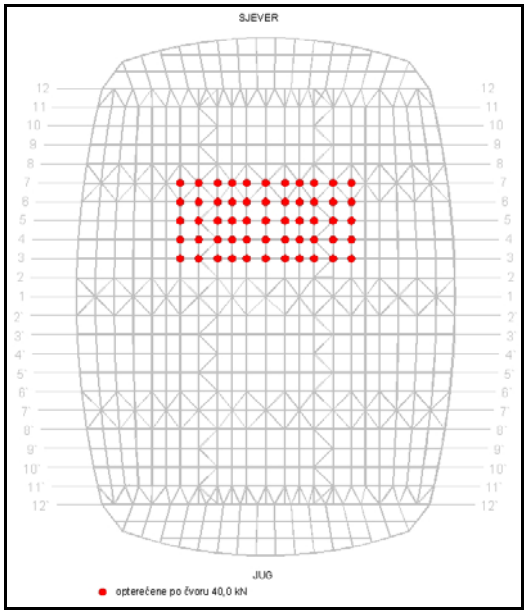


Slika 4. Raspored probnog opterećenja po nosaču u poprečnom presjeku

Slika 5. Zamjenjujuće pokretno računsko opterećenje

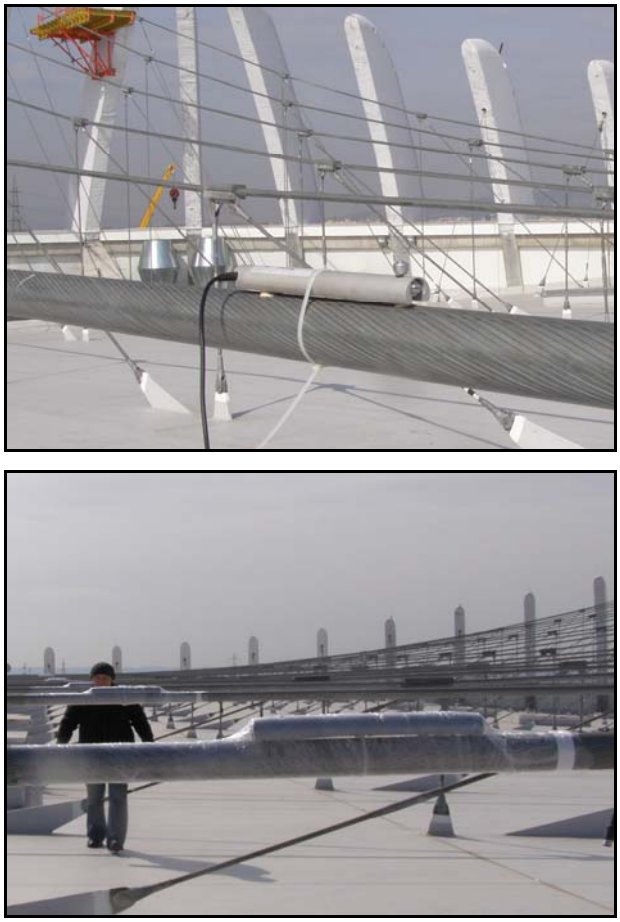
od zaobljenih glavnih nosača raspona L = 104 m, koji su ovješeni. Glavno uže je na najvišim točkama ovješeno na armiranobetonske prednapete lamele u smjeru istok-zapad, dok su glavni čelični nosači u donjem pojasu oslonjeni na armiranobetonsku konstrukciju dvorane. U smjeru sekundarnih nosača (sjever-jug) projektirane su dvije usporedne prostorne stabilizacijske čelične rešetke, čija je zadaća ravnomjerno prenošenje opterećenja na susjedne sklopove (slika 3.).

Programom ispitivanja definirano je probno opterećenje svih glavnih krovnih nosača s ekvivalentnim učinkom kao jednoliko raspoređeno pokretno proračunsko opterećenje (snijeg) na dijelu između betonskih tribina (diskretizirano u čvorovima nosača), što ukupno iznosi 440 kN po jednom krovnom nosaču (slika 4.). Ispitivanje nosača provedeno je tako da su na srednjim čvorovima glavnog nosača obješene vješaljke (slika 5.) na koje je postavljena platforma za nanošenje opterećenja. [5]



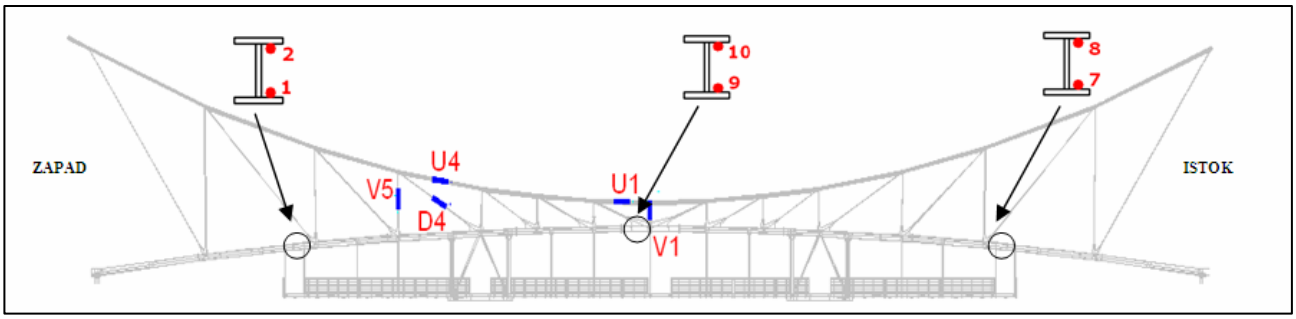
Slika 6. Tlocrtni prikaz opterećenja za 2. fazu

Tijek ispitivanja podijeljen je u 6 faza (po 5 nosača, slika 6.) od kojih je jedna nesimetrična faza, a nakon svake faze opterećenja obavljeno je rasterećenje. Za ispitivanja izvršen je kontinuirani zapis relativnih deformacija na mjestima glavnih nosača i na sredini svakoga glavnog užeta te na nekim vertikalama i dijagonalama nosećeg sklopa (slike 7. i 8.).

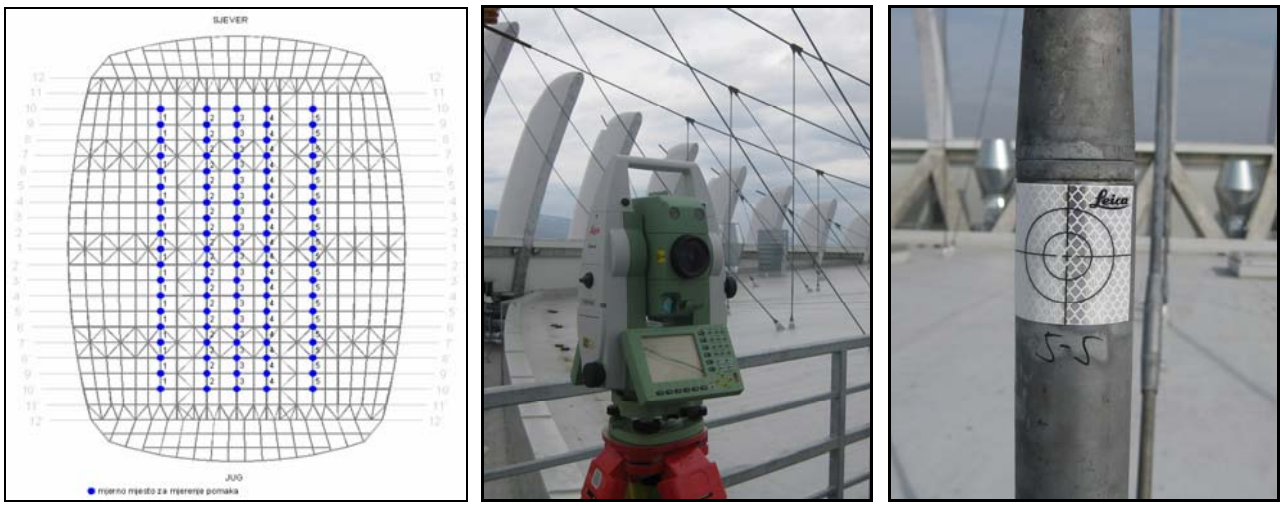


Slika 8. LVDT mjerni instrumenti za mjerenje relativnih deformacija

Pomaci su u svakoj fazi opterećenja mjereni na 5 mjesta duž svakog od 5 nosača. Vertikalni pomaci pri statičkom opterećenju određivani su metodom trigonometrijskog nivelmana, koristeći se totalnom stanicom s točnošću mjerenja unutar 1 mm (slika 9.). Nakon provedbe nultih



Slika 7. Prikaz mjernih mjesta za mjerenje relativnih deformacija u poprečnom presjeku



Slika 9. Mjerna mjesta za mjerenje pomaka (tlocrt), totalna stanica

mjerenja opterećenje je na nosače nanošeno definiranim redoslijedom u 4 koraka do punog iznosa. Pri punom iznosu opterećenja nakon stabilizacije deformacije obavljena su mjerenja na svim mjernim mjestima prema programu, a potom obavljeno rasterećenje i nakon stabiliziranja deformacije ponovno nulto očitanje svih mjernih mjesta.

Osim statičkog, obavljeno je i dinamičko ispitivanje. Određene su vlastite frekvencije krovne konstrukcije. Pobuda konstrukcije inducirana je uljuljavanjem u sredini te u četvrtini raspona krovišta. Tijekom pobude krova registrirani su odgovarajući vremenski signali, kao i funkcije spektralne gustoće snage (PSD) iz kojih su određeni relevantni dinamički parametri.

2.2 Rezultati dobiveni za redovnoga probnog opterećenja

Parametre dobivene eksperimentalnim ispitivanjem konstrukcije krovišta potrebno je usporediti s odgovarajućim rezultatima iz statičkog proračuna. Na taj se način testira računski model konstrukcije, što je veoma važno za projektanta pogotovo na velikim i složenim građevinama. Prvi kriterij koji je potrebno zadovoljiti što se tiče valjanosti konstrukcije jest da izmjereni progibi i deformacije moraju biti manji ili jednaki računskim za isto opterećenje.

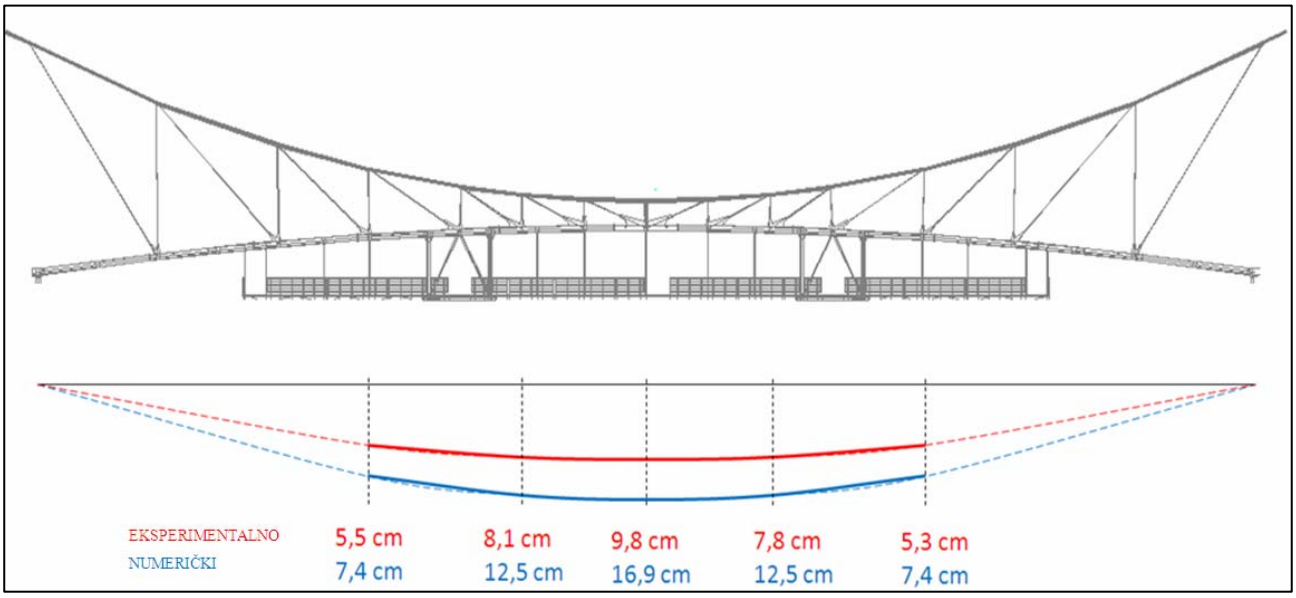
Sljedeći kriterij nalaže da se konstrukcija ponaša elastično, odnosno da za čelične konstrukcije zaostale vrijednosti deformacija i pomaka budu manje od 15 % maksimalno izmjerenih (tablice 1. i 2.). Na slici 10. grafički su prikazani numerički i eksperimentalno određeni progibi za treću fazu opterećenja [6].

Tablica 1. Maksimalne izmjerene vrijednosti pomaka [5]

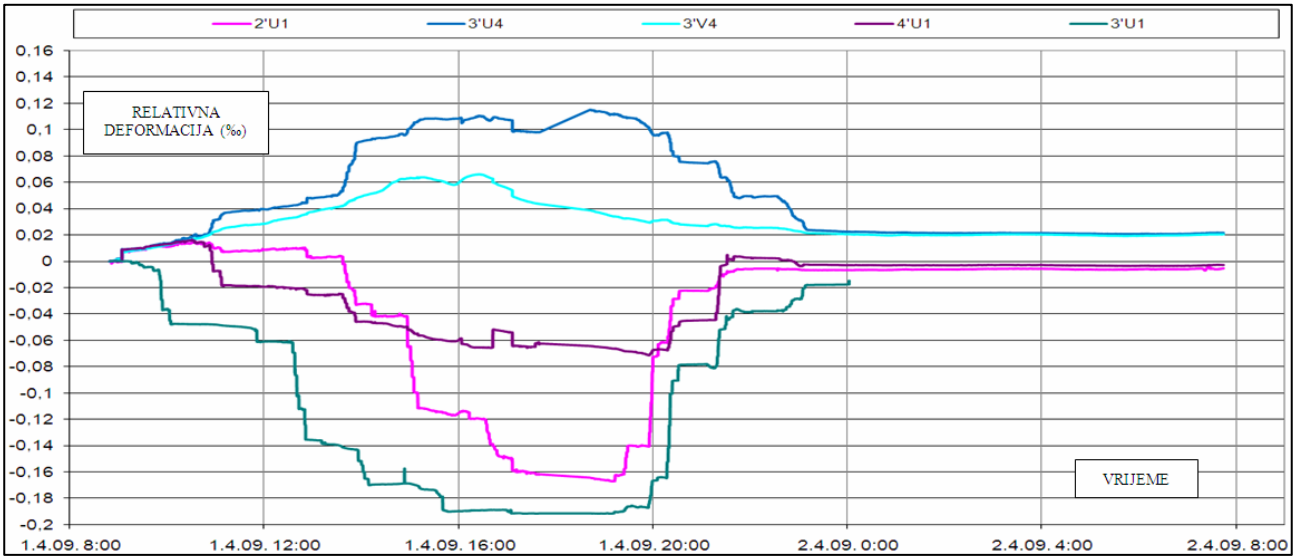
Faza opt.	Nosač br.	Računski (cm)	Izmjereno (cm)	Zaostali progibi (%)
1	10	-17,5	-8,2	2,44
	9	-17,3	-8,9	1,12
	8	-17	-9,0	2,22
	7	-15,8	-8,3	1,20
2	6	-17	-9,7	2,06
	5	-17,6	-10,2	1,96
	4	-17,2	-9,8	1,02
3	3	-16,9	-9,8	7,14
	2	-17,5	-10,2	5,88
	1	-16,7	-9,8	7,14
4	2`	-17,2	-9,9	6,06
	3`	-17,1	-10,3	6,80
	4`	-17,4	-10,2	8,82
5	5`	-17,2	-10,0	4,00
	6`	-17,1	-10,4	4,81
	7`	-16,3	-10,6	6,60
	8`	-18,1	-10,3	4,85
	9`	-16,5	-8,9	5,62
	10´	-11,8	-6,7	5,97
6	1	-8,4	-4,4	0
	2`	-9,0	-4,5	0

Tablica 2. Maksimalne izmjerene vrijednosti relativnih deformacija [5]

Faza opt.	Mjerno mjesto	Relativne deformacije (‰)
1.	8D3	+0,34
2.	1D4	+0,25
3.	1U1	-0,27
	2V1	+0,08
	2U4	+0,20
5.	6`V4	+0,08



Slika 10. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih progiba [6]



Slika 11. Zapis relativnih deformacija za četvrtu fazu opterećenja [5]

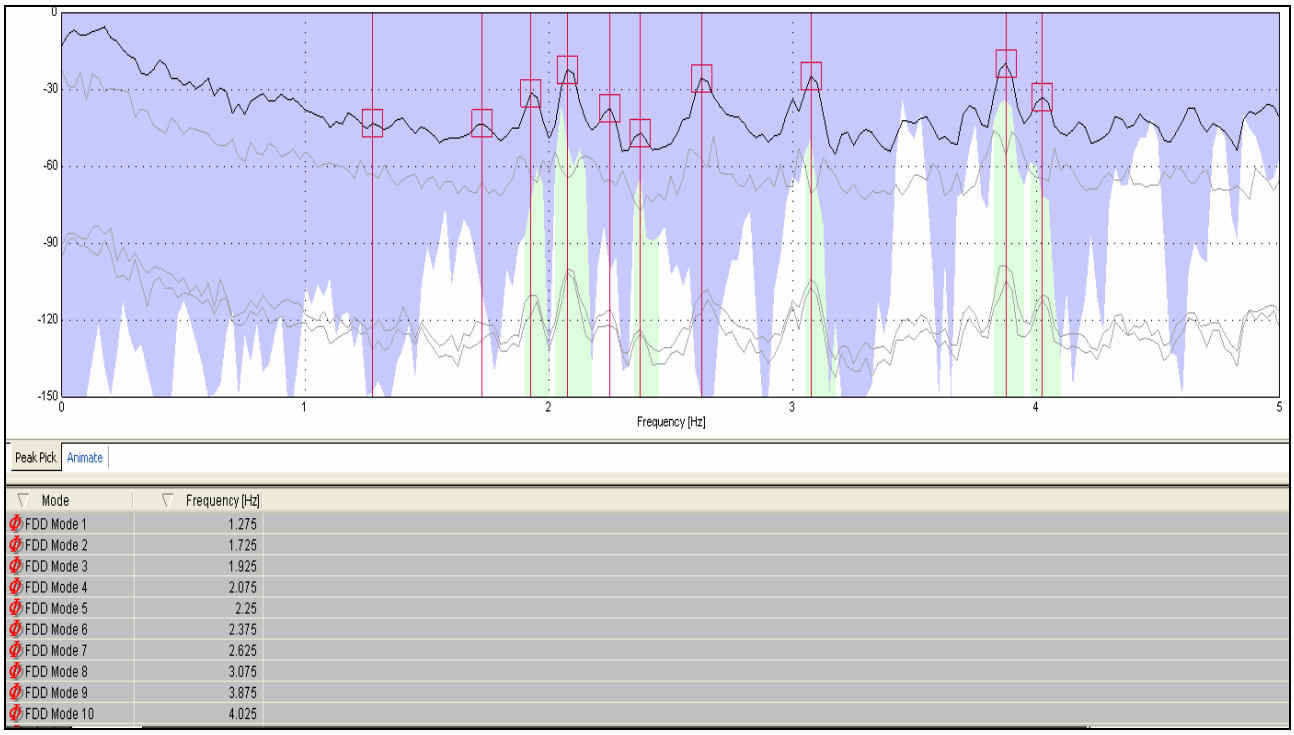
Koristeći se LVDT senzorima za mjerenje relativnih deformacija, na mjestima naznačenim na slici 7., za probnog se opterećenja može ustanoviti razina naprezanja odnosno razina sile na određenom elementu. Tako određene vrijednosti sila u elementu uspoređuju se s računskim veličinama. Kontinuirani vremenski zapis relativnih deformacija prikazan je na jednom primjeru za četvrtu fazu opterećenja (slika 11.).

Rezultati ispitivanja frekvencija krova u cjelini prikazani su u tablici 3., a odgovarajući grafovi registrirani mjernim sustavom na slici 12. Pobuda konstrukcije inicirana je istodobnim "zanjihavanjem" nekoliko glavnih kabela. Dinamički odgovor konstrukcije zabilježen je pri slobodnom istitravanju nakon prestanka pobude.

Tablica 3. Pregled vlastitih frekvencija krova (Hz) [7]

Eksperimentalne vrijednosti	Računske vrijednosti
1,275	1,272
1,725	1,749
1,925	2,024
2,075	2,086
2,250	-
2,375	2,457
2,625	2,487
3,075	2,998
3,875	3,597
4,025	4,020

Odgovor konstrukcije mjeren je akcelerometrima simultano na 5 mjernih mjesta - na polovici i četvrtini raspona



Slika 12. Zapisi mjerenja frekvencija krova [7]

krovne konstrukcije. Putem mjernog sustava tipa B&K „PULSE“ registrirani su odgovarajući vremenski signali, kao i funkcije spektralne i međuspektralne gustoće.

2.3 Rezultati kontrolnog pregleda krovne konstrukcije tijekom uporabe građevine

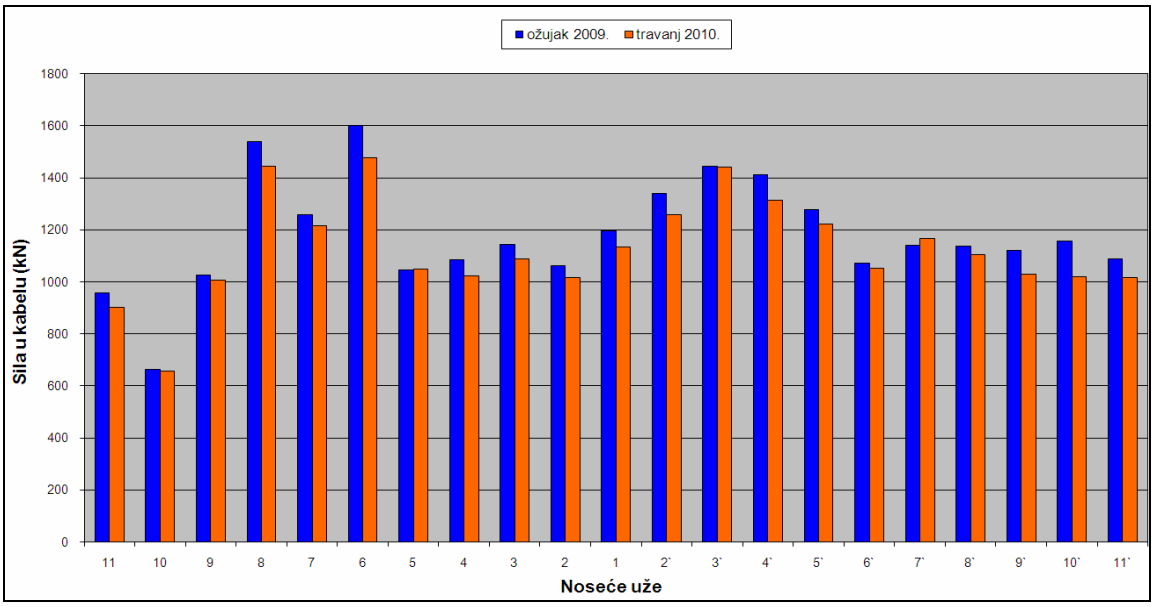
Zbog složenosti i veličine građevine potrebno je jednom na godinu provesti kontrolni pregled krovne konstrukcije. Ova ispitivanja podrazumjevaju vizualni pregled svih nosećih elemenata krovne konstrukcije, zatim mjerenja sila u glavnim kabelima, dijagonalama i vertikalama ovješenog sklopa glavnih nosača, dinamička ispitivanja cjelokupne krovne konstrukcije. Početne vrijednosti sila izmjerene su u sklopu probnog opterećenja u ožujku 2009. godine. U tablici 4. izdvojene su samo vrijednosti izmjerenih sila u glavnim nosećim kabelima ovješenog sklopa, te su uspoređeni rezultati za vrijeme probnog opterećenja i kontrolnog pregleda (travanj 2010., slika 13.). Sile u glavnim nosećim kabelima ovješenog sklopa iz tablice 4. određene su na temelju izmjerenih vlastitih frekvencija u sredinama glavnih kabela i projicirane u smjeru kabela na mjestu priključka s betonskim lamelama. Pritom je za određivanje sila iz vlastitih frekvencija upotrijebljena formula [8]:

$$F = 4 \cdot m \cdot l^2 \cdot f^2$$

gdje je F sila u elementu, m masa po jedinici duljine, l duljina elementa, f vlastita frekvencija.

Tablica 4. Pregled sila u glavnim kabelima krovne konstrukcije (kN) [7]

Noseće uže	Ožujak 2009.	Travanj 2010.	Odnos 2009./2010.
11	959	903	-5,81 %
10	662	658	-0,62 %
9	1027	1007	-1,96 %
8	1538	1445	-6,03 %
7	1259	1215	-3,48 %
6	1601	1478	-7,67 %
5	1046	1048	0,16%
4	1084	1023	-5,67%
3	1143	1089	-4,73 %
2	1063	1017	-4,37 %
1	1198	1134	-5,33 %
2`	1340	1257	-6,19 %
3`	1444	1442	-0,13 %
4`	1411	1315	-6,83 %
5`	1279	1223	-4,37 %
6`	1074	1053	-1,88 %
7`	1140	1166	2,31 %
8`	1138	1104	-3,05 %
9`	1121	1029	-8,19 %
10`	1156	1020	-11,82 %
11`	1090	1018	-6,60 %
		prosječno:	-4,39 %

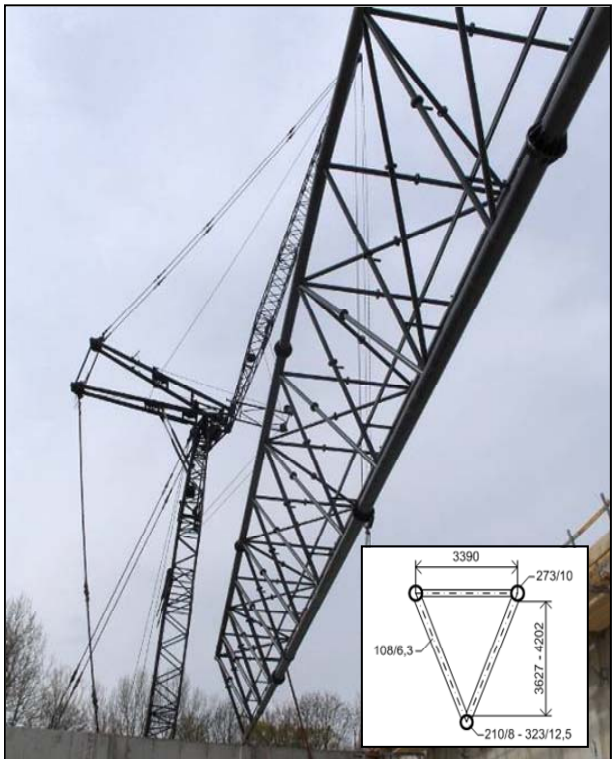


Slika 13. Usporedba sila u glavnim kabelima krovne konstrukcije [7]

3 Ispitivanje krovne konstrukcije dvorane „Varaždin“

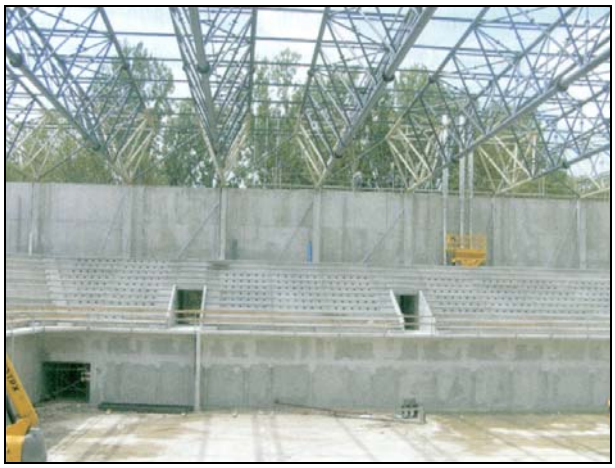
3.1. Redovno probno opterećenje

Dvorana „Varaždin“ je pravokutnih tlocrtnih dimenzija 63 x 84 m, čiji je glavni krovni nosač prostorna čelična rešetka (slike 14. i 15.) raspona 63 m oslonjena na armiranobetonske stupove. Visina rešetke u sredini je 4,5 m, a na rubovima 3,85 m.



Slika 14. Prostorna čelična rešetka

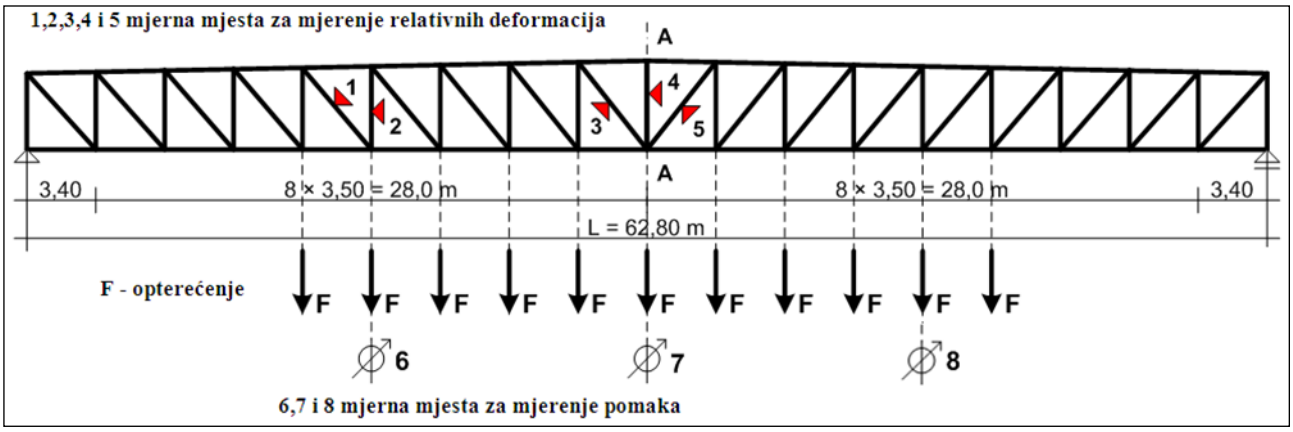
Zbog iznimnog raspona svaki od dvanaest rešetkastih nosača dopremljen je na gradilište u više dijelova te je potom vijčano spajan. U skladu s važećom regulativom i tehnologijom izrade, zahtijevano je redovno probno opterećenje da bi se provjero proračunski model.



Slika 15. Krovni nosači u izvedbi

Kontinuirano je opterećenje zamijenjeno djelovanjem niza koncentriranih sila koje se nanose hidrauličkim vlačnim prešama ili vješanjem tereta (slika16.).

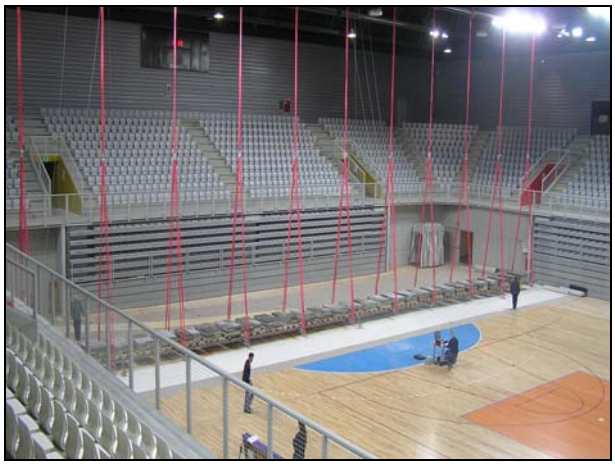
Ispitivanje je provedeno na rešetki već opterećenoj svim stalnim opterećenjima, pa je statičko ispitivanje obuhvatilo samo zamjenu za mjerodavno opterećenje snijegom. Rešetka je opterećena u 11 srednjih čvorova donjeg pojasa ukupnim opterećenjem od 380 kN. Opterećenje je naneseno vješanjem tereta (betonske ploče i vreće napunjene pijeskom) na unaprijed pripremljene platforme s paletama (30 paleta)



Slika 16. Uzdužni presjek sa oznakama mjernih mjesta i rasporedom opterećenja [8]

Probno je opterećenje podijeljeno po sljedećim fazama [9]:

1. "nulto stanje", rešetka predopterećena platformom i paletama
2. 25 % ukupnog opterećenja
3. 50 % ukupnog opterećenja (slika 17.)
4. 75 % ukupnog opterećenja
5. 100 % ukupnog opterećenja (slika 18.)
6. krovna rešetka rasterećena.



Slika 17. Probno opterećenje

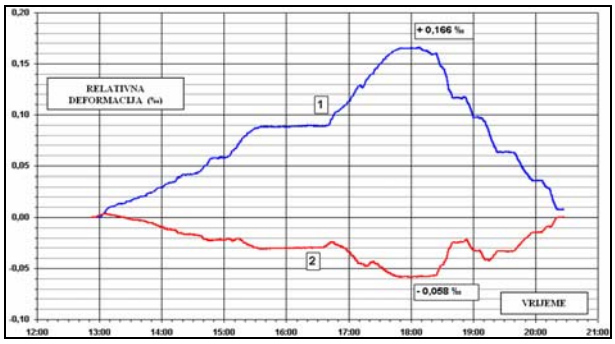
Slika 18. LVDT za mjerenje pomaka

Tijekom nanošenja opterećenja po fazama mjereni su pomaci rešetkastog nosača u sredini i četvrtinama raspona (mjerna mjesta 6, 7 i 8). Relativne su deformacije mjerene na pet mjernih mjesta, u četvrtini i sredini raspona na štapovima ispune (dijagonale i vertikale), mjerna mjesta 1 do 5.

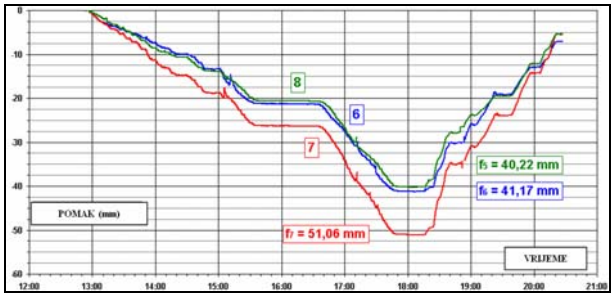
Pomaci i relativne deformacije mjereni su LVDT osjetilima točnosti 10^{-3} mm. Mjerna mjesta za mjerenje pomaka i relativnih deformacija označena su na slici 16.

3.2 Rezultati dobiveni za redovnoga probnog opterećenja

Na slikama 19. i 20. prikazani su neki od rezultata probnog opterećenja: dijagram relativnih deformacija (slika 19.) i dijagram pomaka u vremenu (slika 20.).



Slika 19. Zapis relativnih deformacija za mjerno mjesto 1 i 2 [9]



Slika 20. Grafički prikaz pomaka u vremenu [10]

Shema opterećenja pri eksperimentalnom ispitivanju analizirana je na proračunskom modelu. Usporedba izmjerenih i računskih rezultata iskazana je u tablicama 5. i 6.

Tablica 5. Usporedba eksperimentalnih i računskih pomaka (mm) [9]

Mjerno mjesto	Eksperimentalne vrijednosti	Računske vrijednosti
6	41,27	51,0
7	51,14	66,3
8	40,25	51,0

Tablica 6. Usporedba eksperimentalnih i računskih naprezanja (MPa) [9]

Mjerno mjesto	Eksperimentalne vrijednosti	Računske vrijednosti
1	+34,86	+34,86
2	-13,60	-12,31

4 Zaključak

Ponašanje i ocjena sposobnosti konstrukcije za preuzimanje predviđenog opterećenja donosi se sukladno propisima za pojedine vrste konstrukcija, a na osnovi rezultata ispitivanja i usporedbe s proračunskim vrijednostima deformacija i progiba te odgovarajućih dinamičkih parametara. Konstrukcija zadovoljava kada su ispunjeni svi kriteriji valjanosti postavljeni sukladno propisima za pojedinu vrstu konstrukcija. Ako konstrukcija nije pri pokusnom opterećenju ispunila sve kriterije valjanosti, pristupa se konstruktivnoj sanaciji.

U ovom su članku prikazana dva primjera probnih opterećenja čeličnih krovnih konstrukcija velikih raspona. Progibi dobiveni pokusnim ispitivanjem građevine „Arena Zagreb“ uspoređeni su s rezultatima dobivenim na numeričkom modelu. Progibi dobiveni ispitivanjem su i do 40 % manji od odovarajućih u numeričkom modelu. Tehničiki propis za ispitivanje konstrukcija nalaže da vrijednosti naprezanja, deformacija i pomaka dobiveni pokusnim ispitivanjem budu manji ili jednaki odgovarajućim vrijednostima iz numeričkog modela. Može se zaključiti da je krutost krovne konstrukcije veća od pretpostavljene u numeričkom modelu, u kojem nije uzet u obzir dio sekundarne potkonstrukcije. Redovnim i kontrolnim ispitivanjem razine sila u glavnim užadima ustanovljena je relaksacija sila prosječno 5 % od početnih izmjerenih vrijednosti. Te vrijednosti opadanja sila u užadima tijekom prvih godinu dana uobičajene su i očekivane. Izmjerene vlastite frekvencije poklapaju se sa vrijednostima numeričkog modela.

Probnom opterećnju rešetkastoga krovnog nosača Sportske dovrane "Varaždin" pristupilo se na temelju važećih propisa za čelične konstrukcije. Zbog prevelike visine rešetke su na gradilište prevezene u dva visinska dijela. Izrada i postavljanje čelične krovne konstrukcije izvršeni su bez podupiranja. Na osnovi rezultata ispitivanja i usporedbe s proračunskim vrijednostima utvrđena je dovoljna razina podudarnosti, čime je verifikacija računskog modela i tehnologije izvođenja potvrđena.

IZVORI

[1] Zakon o prostornom uređenju i gradnji (NN 76/07), Tehnički propis za čelične konstrukcije

[2] Tehnički propisi za pregled i ispitivanja nosivih čeličnih konstrukcija, SL 6/65

[3] Tehnički propisi za održavanje čeličnih konstrukcija za vrijeme eksploatacije, SL 6/65

[4] Herceg, Lj.: Skripta iz Ispitivanja konstrukcija, Zagreb 2009.

[5] Rak, M.; Damjanović, D.; Duvnjak, I.; Čalogović, V.: *Izvješće o probnom ispitivanju krovišta na objektu višenamjenske športske dvorane "Arena Zagreb"*, Zagreb 2009.

[6] Duvnjak, I.; Damjanović, D.; Rak, M.; Herceg, Lj.; Janjuš, G.: *Investigation of the "Arena Zagreb" multifunctional hall´s roof* / 26th Symposium on Advanced in Experimental Mechanics / Eichlseder, Wilfried (ur.). Leoben : Institute of Mechanical Engineering, Montanuniversitat Leoben, 2009., 47.-48.

[7] Rak, M.; Damjanović, D.; Duvnjak,; I.; Bartolac, M.: *Izvješće o vizualnom pregledu i specijalističkim ispitivanjima u okviru prvog redovitog pregleda čelične krovne konstrukcije na objektu višenamjenske sportske dvorane "Arena Zagreb" u Zagrebu*, Zagreb, 2010.

[8] Cyril M. H. (1996): *Shock and Vibration Handbook*, Fourth Edition. New York: McGraw-Hill. Esveld, C.; Modern Railway Track, Second edition, TU-Delft, 2001.

[9] Krolo, J.; Paska, I.; Šardi, V.: *Experimental analysis of the steel roof truss in Varaždin new sport hall* / 26th Symposium on Advanced in Experimental Mechanics / Eichlseder, Wilfried (ur.). Leoben : Institute of Mechanical Engineering, Montanuniversitat Leoben, 2009. 123-124

[10] Krolo, J.; Čalogović, V.; Duvnjak, I.: *Izvješće o ispitivanju čeličnih krovnih nosača krovne konstrukcije Gradske sportske dvorane Varaždin,* Zagreb 2008.