

Ispitivanje krovne konstrukcije proizvodne hale

Jakopec, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:515914>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana Jakopec

**ISPITIVANJE KROVNE KONSTRUKCIJE
PROIZVODNE HALE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.

Ana Jakopec ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana Jakopec

**ISPITIVANJE KROVNE KONSTRUKCIJE
PROIZVODNE HALE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ana Jakopec

**TESTING OF ROOF STRUCTURE OF
PRODUCTION HALL**

MASTER THESIS

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana Jakopec

**ISPITIVANJE KROVNE KONSTRUKCIJE
PROIZVODNE HALE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac

Komentor: dr.sc. Janko Koščak

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ana Jakopec

**TESTING OF ROOF STRUCTURE OF
PRODUCTION HALL**

MASTER THESIS

Supervisors: izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac

dr.sc. Janko Koščak

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

MARKO
BARTOLAC

Digitally signed by MARKO BARTOLAC
DN: c=HR, o=HRIDCA, ou=identification,
sn=BARTOLAC, givenName=MARKO,
serialNumber=PNOJHR-89197294027,
cn=MARKO BARTOLAC
Date: 2024.06.25 11:03:15 +0200

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

Zahvale

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac koji me strpljivo i marljivo svojim velikim znanjem vodio kroz izradu ovog rada te u svakom trenutku nejasnoće bio otvorenih vrata. Također se zahvaljujem komentoru dr.sc. Janko Koščak koji mi je pomogao oko svih nejasnoća tijekom pisanja rada, a najviše oko numeričkog modela.

Zahvaljujem svim svojim prijateljima koji su uvijek bili uz mene u svim mogućim problemima, pogotovo kada mi je trebala pomoć u pisanju rada.

Na kraju, najveće hvala cijeloj mojoj obitelji i rodbini na razumijevanju i podršci tijekom svih ovih godina studiranja, a posebno mom ocu Vladimiru Jakopcu koji je uvijek tu za mene.

Ispitivanje krovne konstrukcije proizvodne hale

Sažetak:

Rad opisuje postupak ispitivanja konstrukcija, na primjeru čelične konstrukcije, što predstavlja ključni korak u procjeni sigurnosti i pouzdanosti građevinskih objekata. Cilj ovog postupka je utvrđivanje statičkih i dinamičkih parametara konstrukcije kako bi se osiguralo da građevina zadovoljava predviđene kriterije nosivosti i stabilnosti. Analizira se postupak statičkog i dinamičkog ispitivanja te su prema prethodno izrađenom programu ispitivanja prikazane faze opterećenja, raspored mjernih mjesta i korištena oprema za provođenje ispitivanja. Opisani su svrha i ciljevi ispitivanja konstrukcija, te su detaljno prikazani podaci o sekundarnom nosaču proizvodne hale koji je bio predmet ispitivanja. Obradena je hrvatska norma HRN U.M1:047:1987 Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do loma ko se ispitivanje provodi, te je prikazan utjecaj statičkih i dinamičkih parametara na valjanost predmetnog sekundarnog nosača. U sklopu rada izrađen je numerički model programskim paketom Scia Engineer 24.0 s ciljem određivanja tih parametara kako bi se oni mogli usporediti s izmjerenim rezultatima. Za procjenu ovog utjecaja korišteno je probno opterećenje pomoću kojeg su statičkim ispitivanjem izmjereni pomaci i relativne deformacije, dok su dinamičkim ispitivanjem određene vlastite frekvencije i oblici titranja predmetnog nosača. Stoga su rezultati dobiveni probnim opterećenjem na konstrukciji tijekom ispitivanja uspoređeni s rezultatima numeričkog modela kako bi se donio zaključak o ponašanju predmetnog nosača i njegovom utjecaju na cijelu konstrukciju.

Ključne riječi:

Krovna konstrukcija, probno ispitivanje, statičko ispitivanje, dinamičko ispitivanje, numerički model

Testing of roof structure of production hall

Abstract:

The work describes the procedure for testing steel structures, which is a fundamental step in assessing the safety and reliability of building structures. The aim of this procedure is to determine the static and dynamic parameters of the structure to ensure that the building meets the specified load-bearing and stability criteria. The static and dynamic testing procedures are analyzed, and the loading phases, arrangement of measurement points, and equipment used for testing are presented according to the previously developed testing program. The purpose and objectives of structural testing are described, and detailed data on the secondary beam being tested are provided. The Croatian standard HRN U.M1:047:1987 Testing of high-rise building structures by trial loading and fracture testing, which governs the testing process, is discussed, and the impact of static and dynamic parameters on the validity of the secondary beam is shown. A numerical model was created using the software package Scia Engineer 24.0 to determine these parameters so they could be compared with the measured results. To assess this impact, trial loading was used to measure displacements and relative deformations through static testing, while the natural frequencies and vibration modes of the beam were determined through dynamic testing. Therefore, the results obtained from trial loading on the structure during testing were compared with the results of the numerical model to draw conclusions about the behavior of the beam and its impact on the entire structure.

Keywords:

Roof structure, load testing, static load test, dynamic load test, numerical model

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. VAŽEĆA REGULATIVA ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA PROBNIM OPTEREĆENJEM.....	5
2.1 Hrvatska regulativa za ispitivanje konstrukcija	5
2.1.1 Predmet norme.....	5
2.1.2 Svrha ispitivanja.....	5
2.1.3 Postupak ispitivanja.....	6
2.1.4 Ocjena rezultata ispitivanja.....	7
2.1.5 Izvještaj o ispitivanju.....	9
2.2 Švicarska regulativa za postojeće konstrukcije	9
2.3 Usporedba Hrvatske i Švicarske norme.....	11
3. SVRHA I PODJELA ISPITIVANJA KONSTRUKCIJA	12
3.1 Nerazorna ispitivanja.....	13
3.2 Tvrdoa materijala.....	14
3.2.1 Statičke metode ispitivanja tvrdoće - ispitivanje tvrdoće utiskivanjem	14
3.2.2 Dinamičke metode ispitivanja tvrdoće	20
4. MJERNA TEHNIKA.....	23
4.1 Mjerni uređaji za statičko ispitivanje konstrukcija	23
4.1.1 Mjerenje pomaka.....	23
4.1.2 Mjerenje deformacija.....	30
4.2 Mjerni uređaji za dinamičko ispitivanje konstrukcija.....	34
ISTRAŽIVAČKI DIO	36
5. OSNOVNI PODACI O KONSTRUKCIJI	37
5.1 Opis čelične konstrukcije.....	37
5.2 Materijali konstrukcije.....	39
5.3 Sekundarni nosač krovne konstrukcije.....	40
6. PROGRAM ISPITIVANJA.....	42
6.1 Općenito o programu ispitivanja.....	42
7. OBRADA I ANALIZA REZULTATA PRI ISPITIVANJU	43

7.1 Osnovni podaci o probnom opterećenju.....	43
7.2 Statičko ispitivanje.....	44
7.2.1 Faze opterećenja i ispitivanja.....	44
7.2.2 Mjerenja i mjerna mjesta.....	46
7.3 Dinamičko ispitivanje.....	55
8. NUMERIČKA ANALIZA KONSTRUKCIJE.....	64
8.1 Opis numeričkog modela.....	64
8.2 Statička analiza numeričkog modela sa zategama većeg promjera s jedne strane nosača ...	69
8.2.1 Vertikalni promaci.....	74
8.2.2 Naprezanja i relativne deformacije.....	76
8.3 Statička analiza numeričkog modela s jednostrukim zategama s obje strane nosača.....	78
9. USPOREDBA I ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNE I NUMERIČKE ANALIZE.....	81
10. ZAKLJUČAK.....	83
LITERATURA.....	85
POPIS SLIKA.....	88
POPIS TABLICA.....	92

1. UVOD

Cilj svake strukturalne procjene je utvrditi postojeće stanje konstrukcije, prepoznati probleme koji utječu na izvedbu konstrukcije te razviti i provesti sve potrebne korektivne mjere. U praksi se sigurnost postojeće konstrukcije najčešće dokazuje putem izračuna temeljenih na općeprihvaćenim inženjerskim načelima, no moguće je doći do dokaza sigurnosti putem ispitivanja postojeće konstrukcije probnim opterećenjem. U takvim situacijama, ispitivanje probnim opterećenjem koje se provodi na licu mjesta pruža vrijedne informacije o djelovanjima i ponašanju postojećih konstrukcija koje nisu lako uočljive konvencionalnim računalnim metodama te kako bi se steklo dodatno znanje o ponašanju konstrukcije i zaključno utvrdila njena adekvatnost. Primarni cilj ispitivanja probnim opterećenjem je dokazati sigurnost konstrukcije. Osim toga, takva ispitivanja koriste se za procjenu sposobnosti konstrukcije da podnese dodatna opterećenja, evaluaciju sigurnosti konstrukcija s nedostacima u projektiranju ili s oštećenjima te za potvrdu učinkovitosti sustava ojačanja i projektiranja. Ispitivanjem do sloma konstrukcije ili konstrukcijskog elementa provjeravaju se granična stanja nosivosti odnosno sloma, pomaka i deformacija, pukotina, te stanja koja mogu dovesti do nestabilnosti, popuštanja spojeva, gubitka prionjivosti betona i čelika, korozije i drugih faktora. Ovaj proces obuhvaća različite metode i tehnike koje se koriste za procjenu materijala, konstrukcijskih elemenata i cijele konstrukcije pri djelovanju mehaničkih sila i utjecaja okoline. Temelji se na eksperimentu pomoću kojeg se dobivaju potrebni podaci za ocjenu stanja konstrukcije ili konstrukcijskog elementa. [1,2,3]

Pomoću eksperimentalne analize moguće je locirati oštećenja na konstrukciji, procijeniti njihovu veličinu i postojanje. Eksperimentalna ispitivanja se prema karakteru dijele na statička i dinamička ispitivanja. Statičkim ispitivanjem je moguće procijeniti ponašanje konstrukcija pod stalnim opterećenjima, dok dinamičko ispitivanje omogućuje analizu reakcije konstrukcija na promjene, koristeći prirodne vibracije strukture koje se javljaju pod vanjskim utjecajem ili promjenom uvjeta opterećenja. Na taj se način, čak i bez namjerne pobude, dinamičkim ispitivanjem mogu odrediti modalni parametri, poput vlastitih frekvencija i oblika titranja. Kombinacija ovih metoda osigurava cjelovitu analizu i doprinosi dugotrajnosti i sigurnosti građevinskih objekata. [2,3]

Najčešća svrha ispitivanja konstrukcija je mjerenje ključnih parametara kao što su pomaci, relativne deformacije, frekvencije (periodi), koeficijenti prigušenja, mehanizmi loma i mnogi drugi koji su potrebni za ocjenu stabilnosti i nosivosti konstrukcije ili konstrukcijskog elementa.[2,3]

U ovom radu opisana je primjena norme HRN U.M1.047 "Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do loma", koja se odnosi na konstrukcije od različitih materijala te su u njoj opisana ispitivanja pri statičkom djelovanju koja se provode na građevini ili u laboratoriju. Važno je naglasiti da ispitivanje predmetnog nosača probnim opterećenjem nije provedeno striktno prema svim odredbama te norme. Umjesto toga, tijekom ispitivanja slijedila se većina odredbi navedene norme. Probnim opterećenjem utvrđuju se usklađenosti s projektom, usklađenosti kvalitete svih materijala i ugrađenih elemenata predviđenih projektom, sposobnost konstrukcije za preuzimanje projektom predviđenog opterećenja te ponašanje konstrukcije u uporabi i njezina trajnost. [4]

Cilj ovog istraživanja je opisati i obraditi ispitivanje konstrukcija, s posebnim fokusom na provođenje ispitivanja čeličnih konstrukcija pri čemu se obrađuju i analiziraju rezultati dobiveni statičkim i dinamičkim ispitivanjem predmetnog sekundarnog nosača. Ti rezultati se zatim uspoređuju s rezultatima dobivenim numeričkim modelom, koji služi za verifikaciju rezultata ispitivanja kako bi se utvrdila podobnost predmetnog nosača za preuzimanje povećanog stalnog tereta na konstrukciji. Osnova za provedbu svakog ispitivanja obuhvaća izradu programa ispitivanja koji definira raspored mjernih mjesta, metode korištene za ispitivanje te potrebnu opremu za provođenje statičkog i dinamičkog ispitivanja.

Prilikom statičkog ispitivanja teretom se simuliralo djelovanje povećanog stalnog opterećenja uslijed montaže platforme i solarnih panela te djelovanje snijega. U sklopu dinamičkog ispitivanja, koje je provedeno neposredno prije i nakon statičkog ispitivanja, određeni su osnovni dinamički parametri predmetnog nosača (vlastite frekvencije i oblici osciliranja) pomoću metode dekompozicije frekventnog područja.

Izbor instrumenata za mjerenje prilikom ispitivanja konstrukcija ključan je za preciznu i pouzdanu analizu stanja građevinskih konstrukcija. Pravilno odabrani instrumenti omogućuju inženjerima da provode točna i pouzdana ispitivanja, čime se osigurava sigurnost, stabilnost i dugovječnost konstrukcija. Razumijevanje specifičnosti i primjena različitih instrumenata ključ je uspješnog ispitivanja konstrukcija. Za statička ispitivanja potrebno je izabrati precizne i točne uređaje za mjerenje određenih veličina, dok je pri

odabiru opreme za dinamička ispitivanja važno voditi računa da ona po svojoj frekventnoj rezoluciji bude prilagođena opsegu frekventnih karakteristika konstrukcije koja se ispituje.[2]

Povijest ispitivanja konstrukcija pokazuje kako su se metode i tehnike razvijale paralelno s razvojem građevinske industrije. Od jednostavnih vizualnih pregleda u antici do naprednih nerazornih metoda danas, ispitivanje konstrukcija postalo je ključna komponenta osiguravanja sigurnosti i dugovječnosti građevinskih objekata. [2]

TEORIJSKI DIO

2. VAŽEĆA REGULATIVA ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA PROBNIM OPTEREĆENJEM

2.1 Hrvatska regulativa za ispitivanje konstrukcija

Najčešće se ispitivanje konstrukcija u Republici Hrvatskoj provodi prema normi HRN U.M1.047, Službeni list 4/87, 1987. - *Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do sloma.*

2.1.1 Predmet norme

Prije spomenutom normom se utvrđuje ispitivanje probnim opterećenjem i ispitivanje do sloma konstrukcija i konstrukcijskih elemenata objekata visokogradnje. Primjenjuje se na sve konstrukcije od armiranog i prednapetog betona, konstrukcije od čelika, drveta i drugih materijala (staklo, plastika i dr.), od kojih se izrađuju nosive konstrukcije. Odnosi se na ispitivanje statičkog djelovanja sila na konstrukcije i konstrukcijske elemente. Normom su obuhvaćena sva ispitivanja gotovih konstrukcija i konstrukcijskih elemenata koja se provode na samoj građevini te su obuhvaćena sva ispitivanja koja se provode u laboratorijima za ispitivanje konstrukcija. [5]

2.1.2 Svrha ispitivanja

Opseg ispitivanja ovisi o važnosti konstrukcije koja se ispituje i ciljevima koji se ispitivanjem nastoje ostvariti. Na gotovim konstrukcijama provode se ispitivanja do razine korisnog opterećenja čime se utvrđuju samo pojedini elementi graničnog stanja upotrebljivosti, dok se na modelima ili elementima konstrukcije probnim opterećenjem može odrediti granično stanje nosivosti s obzirom na stabilnost i nosivost konstrukcije ili elementa, zamor te gubitak stabilnosti pojedinih elemenata s obzirom na izvijanje ili izbočavanje. Tako se i granično stanje upotrebljivosti određuje s obzirom na pomake i deformacije, raspucavanje i širinu pukotina, funkcionalnost i udobnost.[2,6,7]

Probim opterećenjem ne mogu se utvrditi granična stanja sloma konstrukcije, već ono može biti dio ispitivanja konstrukcije koja se ispituje do sloma. Probim opterećenjem konstrukcije utvrđuje se njeno ponašanje s obzirom na:

- usklađenost s projektom ili ovom normom,
- usklađenost kvalitete izvedenih i predviđenih radova,
- podobnosti konstrukcije za preuzimanje predviđenih opterećenja
- pojave, razvoj i širine pukotina i deformacijskih veličina sloma. [5]

Ispitivanjem do sloma konstrukcije ili konstrukcijskog elementa utvrđuje se granično stanje nosivosti odnosno sloma, granično stanje pomaka i deformacija, granično stanje pukotina te granično stanje s obzirom na pojavu nestabilnosti, popuštanja spojeva, gubitka prionjivosti betona i čelika, korozije i dr. [5]

2.1.3 Postupak ispitivanja

Prije vršenja samog ispitivanja potrebno je napraviti pripremu. Probom opterećenju i ispitivanju do sloma prethodi uvid u projektnu dokumentaciju, uvid u dokumentaciju o ispitivanju materijala i na kraju izrada programa ispitivanja.[5]

Položaj opterećenja pri statičkom opterećenju mora odgovarati najnepovoljnijem opterećenju prema projektu ili mora davati približno jednake unutarnje sile u karakterističnim presjecima.[5]

Veličine opterećenja moraju odgovarati:

- u probnom statičkom opterećenju, nedostajućem stalnom i ukupnom pokretnom najnepovoljnijem opterećenju prema projektu te se svi parcijalni koeficijenti sigurnosti za opterećenje jednaki 1.0;
- pri ispitivanju do sloma, teretu kojim se postiže slom ili jednom od kriterija kojima se definira slom konstrukcije;
- pri probnom dinamičkom opterećenju, najnepovoljnijim utjecajima kojima je konstrukcija u radu podvrgnuta;
- za konstrukcije s pogonskim postrojenjima (kranovi i sl.) probno statičko opterećenje mora biti veće od dozvoljene nosivosti, i to za kranove od 20 tona -25 %, za kranove iznad 20 do 50 tona – 15 % te za kranove iznad 50 tona – 10 %. [5]

Ispitivanje sadrži sljedeće osnovne faze:

- detaljni pregled i snimak konstrukcije prije nanošenja opterećenja,
- opterećivanje do najvećeg predviđenog opterećenja,
- promatranje držanja konstrukcije pod opterećenjem,
- promatranje konstrukcije poslije rasterećenja,
- detaljni pregled konstrukcije. [5]

U postupku opterećivanja probnim opterećenjem konstrukcija se opterećuje u najmanje 4 jednaka koraka do predviđenog nivoa opterećenja. U postupku opterećivanja do sloma takvih koraka mora biti najmanje 10. Kod čeličnih konstrukcija izvedenih s vijcima najveće probno opterećenje treba ponoviti najmanje jedanput da se dobije uvid u veličinu popuštanja spojeva.[5]

Između pojedinih koraka opterećivanja vrše se mjerenja pomaka i deformacija. Idući korak opterećenja nanosi se tek pošto je došlo do prestanka prirasta pomaka - deformacija (stabilizacija) u prethodnom koraku. Smatra se da je došlo do prestanka prirasta pomaka i deformacija ako je prirast pomaka i deformacija u periodu od 5 minuta manji od 15% prethodnog prirasta za isti vremenski period ili manji od greške mjernog instrumenta. [5]

Probno opterećenje i ispitivanje do sloma ne smije se izvesti na betonskim konstrukcijama čija je starost manja od 28 dana. Pošto se na konstrukciju nanese najveće predviđeno probno opterećenje, ono na njoj mora ostati najmanje 16 sati za sve konstrukcije osim čeličnih, gdje treba ostati 4 sata. U tom periodu vrše se promatranja najmanje 4 puta. Promatranje konstrukcije poslije rasterećenja traje 16 sati (4 sata) pošto se konstrukcija rastereti, odnosno onoliko dugo dok se ne ispune uvjeti o veličini trajnih pomaka koji su navedeni u poglavlju 2.1.4. [5]

Pri ispitivanju do sloma promatranje u fazi rasterećenja može se izostaviti. U slučaju probnog opterećenja i ispitivanja do sloma provodi se promatranje držanja konstrukcije kroz mjerenje pomaka i deformacija, kutova zaokreta, opažanja pojava razvoja i veličine pukotina, lokalnih defekata, kao i sloma konstrukcije. Opseg mjerenja ovisi o podacima koji se žele dobiti.[5]

2.1.4 Ocjena rezultata ispitivanja

Konstrukcija izložena probnom opterećenju zadovoljava uvjete za tehnički ispravnu konstrukciju:

- ako su izmjereni progibi na mjestima najvećih utjecaja manji ili jednaki računskim progibima pod probnim opterećenjem pri kratkotrajnom opterećenju;
- ako su izmjereni zaostali progibi poslije 16 sati od rasterećenja manji od 15 % najvećih izmjerenih progiba za čelične i spregnute konstrukcije, 20% najvećih izmjerenih progiba za prednapete konstrukcije, 25% najvećih izmjerenih progiba za armirano betonske konstrukcije, 30% najvećih izmjerenih progiba za konstrukcije od drveta, 40% najvećih izmjerenih progiba za konstrukcije od plastičnih materijala;
- ako je širina izmjerenih pukotina kod armirano betonskih konstrukcija za projektna opterećenja manja od veličine dopuštene prema propisima za beton i armirani beton;
- ako se veličina izmjerenih progiba može ocijeniti kao takva da ne utječe na funkcionalnost ili estetski izgled konstrukcije. [5]

Probno opterećenje se mora ponoviti ukoliko kriterij o veličini zaostalih progiba, na temelju prethodno navedenih uvjeta nije zadovoljen, a zaostali progibi iznose do 40% izmjerenih za čelične i spregnute konstrukcije, do 50% za konstrukcije iz armiranog i prednapetog betona, ili do 60% za drvene i konstrukcije od plastičnih materijala. Pri ponovljenom opterećivanju zaostali progibi ne smiju biti veći od 7.5% od izmjerenih za čelične konstrukcije, 10% za prednapete betonske konstrukcije, 12.5% za armirano betonske konstrukcije, 15% za drvene i 20% za konstrukcije od plastičnih materijala. Ukoliko su veličine zaostalih progiba veće od onih navedenih pri prvom probnom opterećenju ili veće od onih pri ponovljenom probnom opterećenju, projekt konstrukcije se mora ponovo analizirati i predložiti odgovarajuće mjere.[5]

Konstrukcija izložena ispitivanju do sloma zadovoljava uvjete za tehnički ispravnu konstrukciju:

- ako su izmjereni progibi na mjestima najvećih utjecaja manji ili jednaki teorijskim računskim progibima pod probnim opterećenjem pri kratkotrajnom opterećenju;
- ako konstrukcija zadovoljava glede graničnog stanja nosivosti, pomaka i deformacija, stanja pukotina i stabilnosti. [5]

Smatra se da je konstrukcija dostigla granično stanje sloma ako pri određenom opterećenju nastupi:

- slom konstrukcije, njenog dijela ili presjeka;
- gubitak stabilnosti konstrukcije, njenog dijela ili elementa;
- lokalni slom koji se povećava bez povećanja opterećenja;

- prirast deformacija odnosno pomaka koji se ne smanjuje pri konstantnom opterećenju, mjereno tri puta uzastopce u istim vremenskim intervalima;
- prirast deformacija ili pomaka koji je u posljednjoj fazi prirasta opterećenja jednak ili veći od zbroja deformacija ili pomaka u prethodnih 5 jednakih faza opterećenja;
- progib koji je jednak ili prekoračuje $1/50$ raspona;
- pukotine čiji je zbroj, mjereno na dužini od 200 milimetara, veći od 1.5 milimetra kod armirano betonskih konstrukcija;
- gubitak prionjivosti između armature i betona. [5]

Smatra se da je konstrukcija ispitana do sloma zadovoljila glede nosivosti ako je do sloma došlo pri opterećenju koje je jednako ili veće od projektom predviđenog opterećenja sloma, odnosno prema odgovarajućim propisima. [5]

2.1.5 Izvještaj o ispitivanju

O probnom opterećenju ili ispitivanju do sloma daje se izvještaj. Izvještaj sadrži sve relevantne podatke o ispitanjoj konstrukciji, postupku ispitivanja, uporabljenim instrumentima, potrebne teorijske proračune, podatke o mjerenjima tijekom ispitivanja, uspoređivanje teorijskih i izmjerenih veličina i zaključak o ponašanju konstrukcije na temelju poglavlja 2.1.4. [5]

2.2 Švicarska regulativa za postojeće konstrukcije

Serijske norme SIA 269 za postojeće konstrukcije predstavlja sveobuhvatan skup smjernica i normi koje je razvilo Švicarsko društvo inženjera i arhitekata (SIA) pod nazivom „Postojeće konstrukcije – osnove za pregled i intervenciju“. Norme navode principe, pripadajuću terminologiju i odgovarajuću metodologiju za postupanje s postojećim konstrukcijama kojom su opisani glavni metodološki aspekti kao što su ocjena, analiza i pregled različitih vrsta postojećih konstrukcija te mjera intervencije. Očekuje se da će ove norme pružiti učinkovita rješenja za pitanja poput većih uporabnih opterećenja, slučajnih djelovanja ili obnove i poboljšanja trajnosti postojećih konstrukcija. Ključne značajke regulative SIA 269 uključuju:

- kako bi se dokazala nosivost postojećih konstrukcija na probna opterećenja bez potrebe za skupim ojačanjima potrebno je primijeniti veća uporabna opterećenja,

poput prometnih opterećenja ili uporabnih opterećenja na zgradama za koje postojeća konstrukcija nije bila prvotno dizajnirana,

- provjerava se sigurnost konstrukcije od zamora, preostali životni vijek kod umora (posebno za konstrukcije koje su osjetljive na umor poput mostova) i uporabljivost,
- pažnja je usmjerena i na slučajna djelovanja na konstrukciju izloženu prirodnim ili ljudskim opasnostima, poput potresa i udara
- kod konstrukcija koje pokazuju značajnu štetu i propadanja, njezina trajnost, treba biti poboljšana i obnovljena na efikasan način. [8]

Norme nude strukturirani pristup ocjeni, analizi i intervencijama za različite vrste postojećih konstrukcija, uključujući armirano betonske konstrukcije, čelik, kompozit, drvo i zidane konstrukcije. SIA 269 sastoji se od 8 ogranaka odnosno 8 serija standarda. Norma SIA 269/1 sadrži ažurirane modele za djelovanja i efekte djelovanja, dok norme SIA 269/2 do SIA 269/6 daju specifične upute za ažuriranje materijalnih i strukturnih parametara i modela koji su važeći za različite vrste konstrukcija, posebno za one iz prošlosti. Oni se bave strukturnim otporima i odgovarajućim modelima. Norma SIA 269/7 pokriva geotehničke aspekte specifične za postojeće konstrukcije, a SIA 269/8 odnosi se na potresno inženjerstvo postojećih konstrukcija. [8]

SIA 269/2 do SIA 269/6 obuhvaćaju norme koje se bave postojećim armirano-betonskim, čeličnim, kompozitnim, drvenim i zidanim konstrukcijama. Ove norme pružaju odredbe o određenim karakteristikama građevinskih materijala iz prošlosti, kao i veze i konstrukcijske detalje koji se često koriste u postojećim konstrukcijama. Glavno čime se bave je područje strukturne otpornosti i obuhvaćaju pitanja analize i provjere postojećih struktura, kao i specifične probleme usmjerene na ispitivanje stanja i intervencije (uključujući metode jačanja i obnavljanja trajnosti konstrukcije). SIA standardi koji se odnose na testiranje konstrukcija, posebno za čelične konstrukcije SIA 269/3, pružaju smjernice i zahtjeve za provođenje testova opterećenja radi verifikacije računalnih modela ili procjene konstrukcijskog stanja zgrada i infrastrukture. Norma SIA 269/3 za čelične konstrukcije pruža mehanička svojstva i karakteristike, kao i odgovarajuće ažurirane faktore otpornosti za lijevano željezo, kovano željezo i rane blage čelike, kao i za spojeve zakovicama, vijčane i rane zavarene spojeve. Elasto-plastična (EP) metoda dopuštena je za strukturne elemente od kovanog željeza i ranih blagih čelika ako ispunjavaju određene uvjete vitkosti. Rešetkasti nosači mogu se modelirati koristeći čvorišta s osloncem. Za spojeve zakovicama i strukturne elemente daju se odredbe u vezi s konačnom otpornošću (uključujući stabilnost)

i otpornošću na umor (S-N krivulje). Norma također opisuje testove opterećenja na zgradama i drugim strukturama. Obuhvaća postupke za planiranje i izvođenje testova opterećenja na različitim vrstama građevina kako bi se ocijenila njihova izdržljivost i stabilnost. [8]

S društveno-ekonomskog gledišta SIA standardi odgovaraju novim inženjerskim metodama za učinkovito postupanje s postojećim konstrukcijama u skladu s načelima održivosti. Standardi također predstavljaju važnu priliku za temeljito obrazovanje i osposobljavanje strukturne inženjerske zajednice u području postojećih konstrukcija. [8]

2.3 Usporedba Hrvatske i Švicarske norme

Ispitivanje konstrukcija ključno je za procjenu sigurnosti, stabilnosti i trajnosti građevinskih objekata. Hrvatski i švicarski standardi za ova ispitivanja pokazuju značajne razlike i pristupe.

HRN U.M1.047 pruža općenite smjernice za ispitivanje različitih materijala, fokusirajući se na probna opterećenja i ispitivanje do sloma kako bi se osigurala usklađenost s projektom i kvaliteta izvedenih radova. Norma prepoznaje važnost detaljnog pregleda konstrukcije prije opterećenja, postupnog opterećivanja te promatranja ponašanja konstrukcije. Ocjena rezultata ispitivanja fokusira se na usporedbu izmjerenih i teorijskih vrijednosti te na utvrđivanje nosivosti i stabilnosti konstrukcije.

S druge strane, švicarski standardi SIA 269, posebno SIA 269/3, detaljno se bave ispitivanjem i procjenom postojećih konstrukcija, naglašavajući otpornost na umor i potrebne mjere obnove radi dugoročne funkcionalnosti i održivosti. Također, SIA 269/3 pruža specifične smjernice za testiranje opterećenja na različitim vrstama struktura, uključujući procedure za planiranje i izvođenje tih testova, što doprinosi cjelovitosti i preciznosti ispitnih postupak.

Dok HRN U.M1.047 pokriva širi raspon materijala i više se usredotočuje na novogradnju, SIA 269 standardi pružaju detaljne smjernice za ispitivanje čeličnih konstrukcija i procjenu postojećih struktura kako bi se osigurala njihova trajnost i sigurnost.

U konačnici, iako oba standarda imaju isti cilj - osigurati sigurnost građevinskih konstrukcija - njihovi različiti pristupi i fokusi odražavaju specifične potrebe i kontekste građevinskog sektora u Hrvatskoj i Švicarskoj.

3. SVRHA I PODJELA ISPITIVANJA KONSTRUKCIJA

Ispitivanje konstrukcija je proces kojim se provjerava sigurnost, izdržljivost i stabilnost građevinskih objekata. Ovaj proces uključuje različite metode testiranja materijala i komponenti te analize kako bi se osiguralo da građevine ispunjavaju sigurnosne standarde i specifikacije. Ispitivanja pružaju pouzdane podatke o ponašanju i stanju konstrukcija pod djelovanjem mehaničkih sila, utjecajem okoliša i reološkim promjenama u materijalima. Također, mogu otkriti pojave i slabosti koje se ne mogu obuhvatiti proračunima. Potreba za ispitivanjem konstrukcija proizlazi iz nekoliko ključnih razloga. Redoviti razlozi uključuju provjeru usklađenosti ponašanja konstrukcije s proračunom, provjeru kvalitete izvedenih radova u odnosu na predviđene, te utvrđivanje nosivosti i uporabljivosti konstrukcije, odnosno određivanje graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti. Osim ovih redovitih razloga, postoje i posebni razlozi koji zahtijevaju ispitivanje konstrukcija. Ti posebni razlozi uključuju prikupljanje podataka o konstrukciji za koju nema dovoljno informacija, utvrđivanje ponašanja konstrukcije nakon rekonstrukcije, te provođenje ispitivanja koja služe za razvoj teorijskog proračuna i projektiranje temeljeno na ispitivanju. Također, ispitivanja su ključna za proučavanje ponašanja inovativnih materijala i tipova konstrukcija, omogućujući time unapređenje građevinske prakse i primjenu novih tehnologija. [2,3,6]

Ispitivanja se mogu klasificirati prema nekoliko kriterija:

- Prema svrsi: kontrolna, znanstveno-istraživačka, prethodna i ostala
- Prema karakteru opterećenja: statička i dinamička
- Prema razornosti: razorna i nerazorna
- Prema veličini objekta kojeg ispitujemo: prototipna i modelska
- Prema dužini trajanja opterećenja: kratkotrajna i dugotrajna
- Prema razini djelovanja: obična, posebna i izuzetna. [2,3,6]

Pri statičkom i dinamičkom ispitivanju konstrukcija i njihovih elemenata koriste se "razorne" metode, pri kojima se struktura elementa i konstrukcije razara kako bi se odredili granični parametri nosivosti i koeficijenti sigurnosti. S druge strane, "nerazorne" metode ispitivanja

određuju parametre stanja konstrukcija i elemenata bez oštećivanja strukture koja se ispituje. [2,3,6]

U ovom radu ukratko ćemo obraditi nerazorna ispitivanja, s posebnim naglaskom na određivanje tvrdoće materijala. [2,3,6]

3.1 Nerazorna ispitivanja

Svrha nerazornih ispitivanja je utvrđivanje svojstava materijala ili komponenti sustava te otkrivanje različitih defekata bez utjecaja na funkcionalnost objekta koji se ispituje. Ova metoda omogućuje određivanje parametara stanja konstrukcija i elemenata, poput modula elastičnosti, dinamičkih parametara, površinske tvrdoće, te stanja deformacija i naprezanja. Nerazorna ispitivanja provode se bez razaranja strukture, često se koriste za kontrolu kvalitete materijala tijekom izgradnje, te za procjenu stanja materijala ugrađenih u konstrukciju tijekom različitih faza vijeka građevine. Nasuprot tome, razorna ispitivanja uključuju razaranje cijele strukture konstrukcije ili njenih elemenata kako bi se odredili parametri čvrstoće, nosivosti i odgovarajući koeficijenti sigurnosti. Ova ispitivanja se obično provode u laboratoriju na modelima ili elementima konstrukcije. [9,10]

Nerazorna ispitivanja imaju mnoge prednosti u odnosu na razorna. Mogu se provoditi izravno na istom uzorku ili mjestu konstrukcije, omogućujući ponovljena ispitivanja tijekom uporabnog vijeka. Također, omogućuju ispitivanje većeg broja uzoraka ili mjernih mjesta na konstrukciji, te primjenu različitih metoda na istom uzorku više puta. [9,10]

Glavni nedostatak je što se svojstva i kvaliteta objekta u većini metoda mjeri indirektno, odnosno o kvaliteti se zaključuje temeljem nepostojanja pogrešaka ili odstupanja određene fizikalne veličine izvan granica zadanih kriterijem kvalitete. Također pojedine metode kontrole zahtijevaju pojačanu zaštitu na radu te interpretaciju rezultata koja je često složena i zahtjeva školovano osoblje. [9,10]

U nerazorna ispitivanja za beton i armirani beton spadaju ultrazvučna ispitivanja, dinamičke rezonantne metode, metode za određivanje modula elastičnosti te sklerometar, dok se za čelik koriste metode udarne tvrdoće, röntgenska snimanja i radiografska snimanja. [9,10]

3.2 Tvrdoća materijala

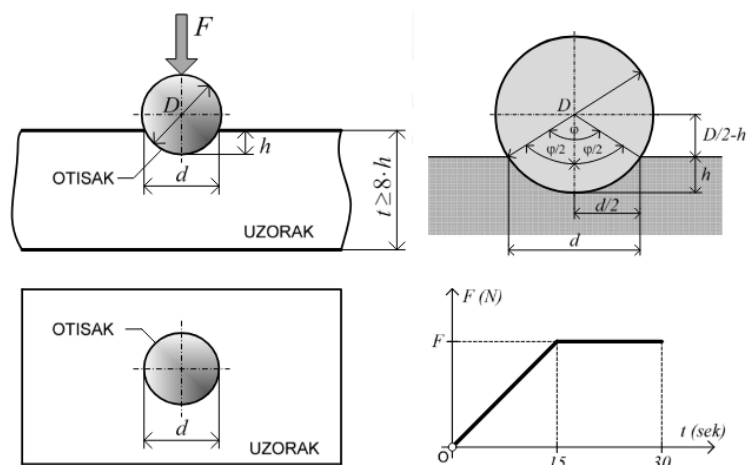
Tvrdoća materijala je jedno od važnijih mehaničkih svojstava koja predstavlja otpornost materijala prodiranju nekog drugog tijela, znatnije tvrđeg, u njegovu sredinu. Također ju možemo definirati kao otpor materijala prema plastičnoj deformaciji. Mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava. Razlog tome jest da je postupak dosta jednostavan i brz, nisu potrebni posebno izrađeni uzorci, mjerenje je moguće na gotovim proizvodima i poluproizvodima, te je tvrdoća u korelaciji s drugim mehaničkim svojstvima (čvrstoćom). Metode određivanja tvrdoće dijelimo na statičke i dinamičke. Metode ispitivanja paranjem spadaju u statičke metode te se koriste za vrlo tvrde i krhke materijale, dok se metode ispitivanja utiskivanjem koriste za elastoplastične materijale, daju točnije rezultate, ali zahtijevaju bolju pripremu površine za ispitivanje. U metode paranja spadaju Mohsova skala tvrdoće i Martensov postupak, dok u metode utiskivanja spadaju ispitivanja tvrdoće po Brinellu, Vickersu, Rockwellu i Knoopu. Dinamičke metode, poput Poldijevog, Shoreovog postupka i metode određivanja tvrdoće prema Leebu, koriste se za brzu procjenu čvrstoće materijala. Iako možda nisu najtočnije, ove metode temelje se na principu odskoka i pogodne su za ispitivanje tvrdoće na dijelovima velike mase (dimenzija) i složene geometrije. [11,12]

3.2.1 Statičke metode ispitivanja tvrdoće - ispitivanje tvrdoće utiskivanjem

U postupku određivanja tvrdoće pomoću metode utiskivanja tlačnom silom, određene vrijednosti se dobivaju tako da se u uzorak utiskuje utiskivač poput kaljene čelične kuglice, dijamantne piramide ili dijamantnog stošca, nakon čega se mjeri trajno deformirana površina koju je ostavio utiskivač. Tvrdoća materijala se izražava kao otpor koji pruža površina udubljenja prema silama koje su djelovale prilikom utiskivanja. [11,12]

Brinellov test tvrdoće

Ovaj test uključuje pritiskanje tvrdog, okruglog utiskivača u površinu materijala pomoću određene sile. Mjeri se promjer utisnute površine, a zatim se izračunava vrijednost tvrdoće (slika 3.1). Posebno je koristan za materijale s grubom ili neujednačenom strukturom, te elastoplastične materijale do 4500 MPa. Način ispitivanja tvrdoće čelika prema Brinellu provodi se prema normi HRN EN ISO 6506-1. [11,12]



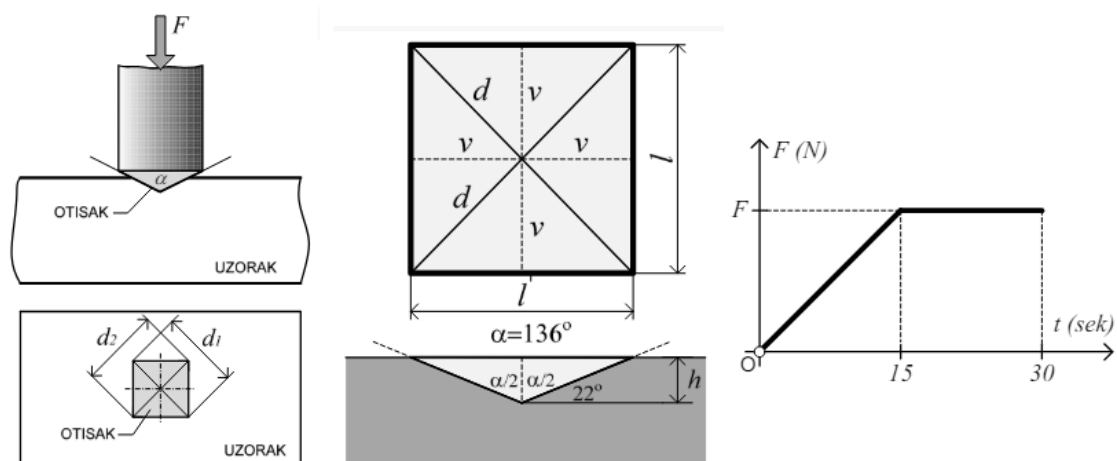
Slika 3.1 Ispitivanje tvrdoće po Brinellu [11,12]



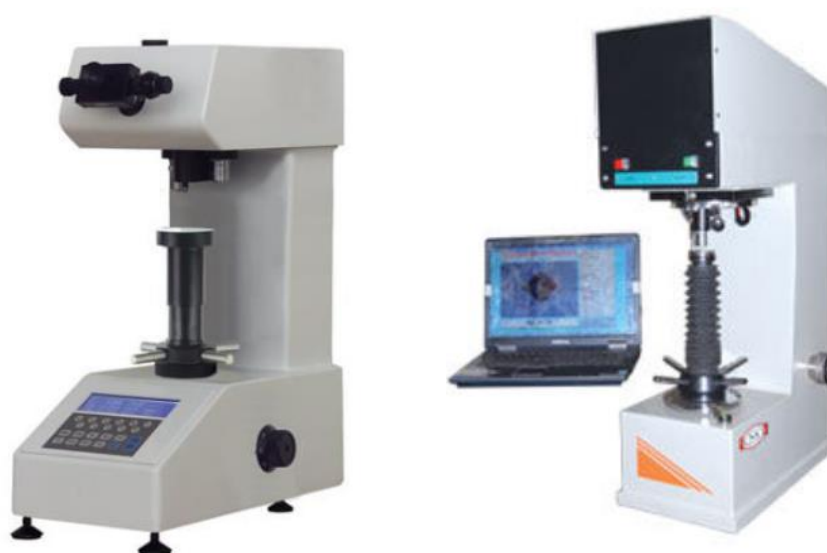
Slika 3.2 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Brinellu [11]

Vickersov test tvrdoće

Koristeći utiskivač kao četverostranu dijamanatnu piramidu s vršnim kutom od 136 stupnjeva, ovaj test uključuje njegovo pritiskanje u materijal i mjerenje dijagonala utisnute površine (slika 3.3). Vrijednost tvrdoće se zatim izračunava na temelju ovih mjerenja i primijenjene sile. Vickersov test je svestran i pogodan za sve vrste materijala, uključujući metale, keramiku i kompozite, a princip ispitivanja je isti kao i kod postupka po Brinellu. Način ispitivanja tvrdoće čelika prema Vickersu provodi se prema normi HRN EN ISO 6507-1. [11,12]



Slika 3.3 Ispitivanje tvrdoće po Vickersu [11,12]

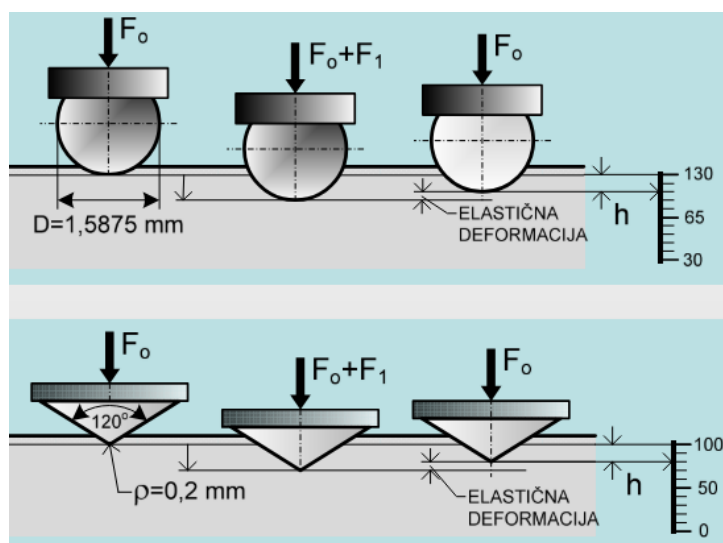


Slika 3.4 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Vickersu [11]

Rockwellov test tvrdoće:

Ovaj test mjeri dubinu penetracije utiskivača pod velikim opterećenjem u usporedbi s manjim pred opterećenjem. Rockwellov postupak određivanja tvrdoće sastoji se od tri faze ispitivanja koje se provode na posebnom uređaju na kojem je moguće pratiti pomake utiskivača s instrumentima točnosti $2\mu\text{m}$. Široko se koristi za metale, posebno u kontroli

kvalitete i proizvodnim okruženjima. Način ispitivanja tvrdoće čelika prema Rockwellu provodi se prema normi HRN EN ISO 6508-1. [11,12]

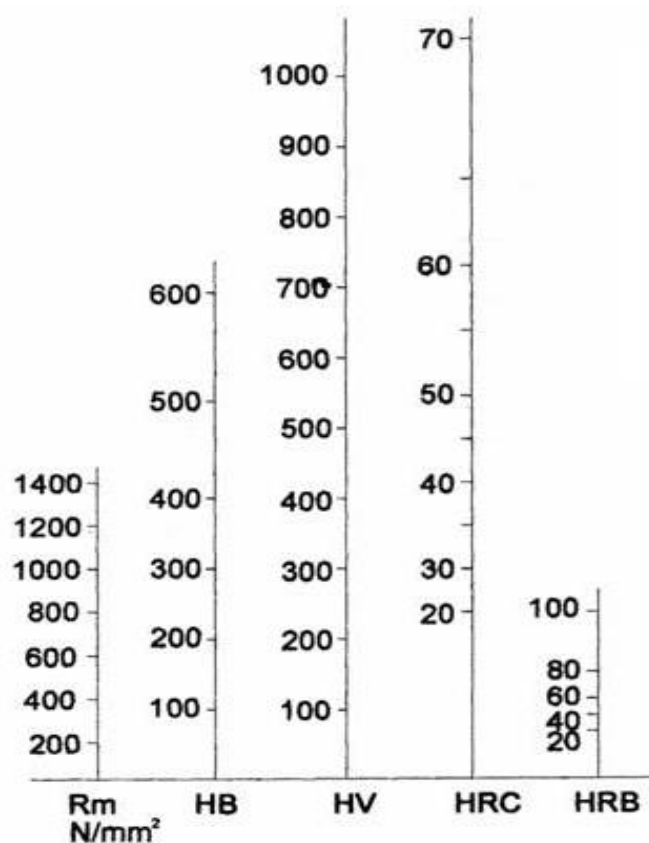


Slika 3.5 Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu [11]



Slika 3.6 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Rockwellu [11]

Na slici 3.7 u nastavku se nalazi skala usporednih vrijednosti tvrdoće po Brinellu, Vickersu i po Rockwellu. Na prikazanoj slici Rm označava čvrstoću, HB tvrdoću po Brinellu, HV tvrdoću po Vickersu, HRC tvrdoću po Rockwellu – stožac, a HRB tvrdoću po Rockwellu – kuglica.

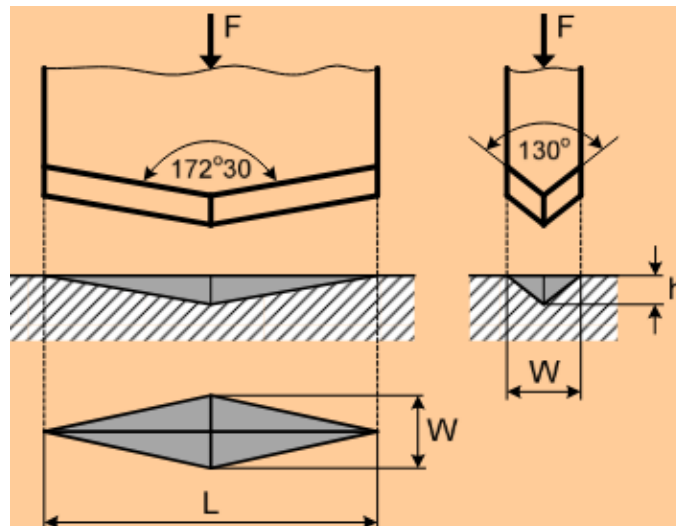


Slika 3.7 Usporedne vrijednosti tvrdoće [31]

Knoopov test tvrdoće

Koristeći dijamantni indentor s izduženim piramidalnim oblikom, ovaj test mjeri duljinu utisnute površine duž duge osi i izračunava tvrdoću na temelju tih mjerenja. Knoopov test je idealan za krhke materijale kao što je staklo i keramika. Način ispitivanja tvrdoće čelika prema Knoopu provodi se prema normi HRN EN ISO 4545-1. [11,12]

Svaki od ovih testova tvrdoće pruža ključne podatke za odabir materijala, kontrolu kvalitete i istraživanja, s posebnim prednostima prilagođenim različitim vrstama materijala i primjenama.



Slika 3.8 Ispitivanje tvrdoće po Knoopu [11]



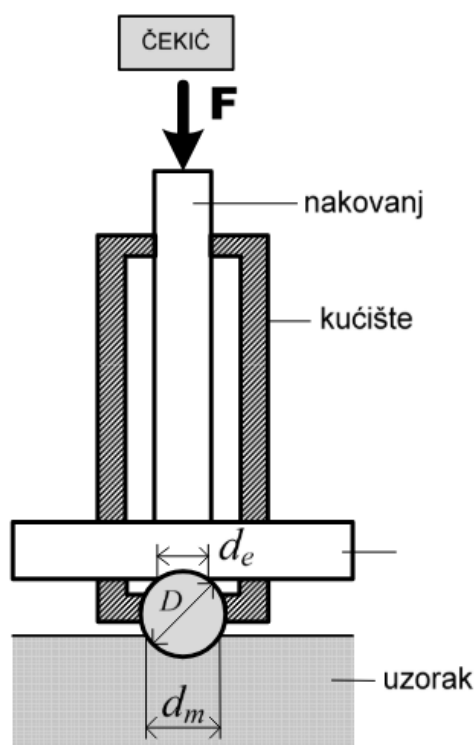
Slika 3.9 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Knoopu [11]

3.2.2 Dinamičke metode ispitivanja tvrdoće

Temelje se na dinamičkom djelovanju sile na utiskivaču i na elastičnom odskoku utiskivača od predmeta čija se tvrdoća mjeri. Dinamičke metode mogu se podijeliti u dvije kategorije: u jednoj se mjere dimenzije otiska utiskivača nakon dinamičkog udara, dok se u drugoj prati odskok mase koja udara na površinu uzorka. Ove metode su jednostavne, brze i ekonomične za izvođenje, ali smanjuju točnost mjerenja. [12]

Poldijev postupak ispitivanja tvrdoće

Poldijev postupak za ispitivanje tvrdoće koristi se kada nije moguće izvršiti mjerenje tvrdoće standardnim statičkim metodama. Ovaj postupak se temelji na udarnom djelovanju utiskivača i omogućuje izračunavanje tvrdoće slične Brinellovoj tvrdoći. Poldijev uređaj sastoji se od kućišta, etalona, Brinellove kuglice promjera 10 mm i čelića. Uređaj se postavlja okomito na površinu uzorka, nakon čega se čekićem mase 2 kg udara po njemu. Ova metoda je brza, jednostavna i pogodna za primjene gdje je potrebna brza procjena tvrdoće mekih materijala, poput stakloplastičnih kompozita (FRP) i polimernih materijala. [11,12]



Slika 3.10 Postupak ispitivanja tvrdoće po Poldiju [11,12]

Leebov postupak ispitivanja tvrdoće

Leebov test tvrdoće dinamička je metoda za procjenu tvrdoće materijala, poznata kao test tvrdoće odskoka. Ovaj test se izvodi pomoću prenosivog uređaja koji je 1975. godine predstavio Dietmar Leeb i prvobitno je bio namijenjen za mjerenje tvrdoće metalnih materijala. Uređaj, prikazan na slici 3.11, se može koristiti kako u laboratorijskim tako i u terenskim uvjetima, što ga čini vrlo praktičnim alatom za istraživanje tvrdoće materijala.[13]



Slika 3.11 Prikaz Leeb uređaja za mjerenje tvrdoće [31]

Osnovni princip rada uređaja je da udarno tijelo određene mase udara na ispitnu površinu ili uzorak pod određenom ispitnom silom. Vrijednost tvrdoće se dobiva iz omjera brzine odskoka i brzine udarca udarnog tijela kada se nalazi 1 mm iznad ispitne površine te se preko formule (1) izračunava tvrdoća.

$$HV = 1000 \cdot \frac{v_b}{v_a} \quad (1)$$

Pri čemu je v_b oznaka za brzinu odskoka, v_a oznaka za brzinu udarca udarnog tijela kada se nalazi 1 mm iznad ispitne površine i HV oznaka za tvrdoću.

U praksi, površina materijala mora biti očišćena i izravnata kako bi se osigurala točnost mjerenja. Zatim se ispitna sonda poravnava okomito na površinu materijala. [13]

Ova metoda nudi nekoliko prednosti. Kompaktna i lagana oprema idealna je za ispitivanja na terenu, čineći je vrlo prijenosnom. Osim toga, test minimalno utječe na površinu materijala te pruža trenutna očitavanja tvrdoće, što ga čini brzom i učinkovitom metodom. Leebov test tvrdoće također je svestran, prikladan za širok raspon materijala, uključujući metale, plastiku i kompozite. Idealan je za terenska ispitivanja velikih ili nepomičnih dijelova gdje su tradicionalni testeri tvrdoće nepraktični. Hrapavost i čistoća površine značajno utječu na točnost rezultata, a materijali s većom elastičnošću mogu dati manje precizne rezultate. Dovoljna masa i debljina ispitnog komada bitni su kako bi se izbjeglo pomicanje ili deformacija tijekom ispitivanja. [13]

U usporedbi s drugim testovima tvrdoće, Brinellov test tvrdoće koristi veći utiskivač za mjerenje tvrdoće udubljenja, što ga čini pogodnim za glomaznije materijale. Rockwellov test tvrdoće daje izravne vrijednosti tvrdoće bez potrebe za konverzijom, što ga čini idealnim za metale. Vickersov test tvrdoće, koji koristi dijamantni piramidalni utiskivač, prikladan je za tanke materijale ili male komponente. [13]

Važno je napomenuti da se pri laboratorijskim ispitivanjima (Brinellov test, Rockwellov i Vickersov test) uzorak uzima iz elementa, što može biti nepraktično. Nasuprot tome, Leebov test je prikladniji za terenske uvjete zbog svoje praktičnosti i mobilnosti.

Zaključno, Leebov test tvrdoće vrlo je učinkovita metoda za mjerenje tvrdoće materijala, posebno korisna u terenskim uvjetima i za veće komponente gdje su tradicionalne metode ispitivanja tvrdoće manje praktične. Njegova prijenosnost, ne-destruktivna priroda i brzina čine ga izuzetno važnim alatom za kontrolu kvalitete, terenska ispitivanja i odabir materijala u različitim industrijama. [13]

4. MJERNA TEHNIKA

Prije pristupanja mjerenju potrebno se upoznati sa svojstvima, potrebama i manama instrumenta koji će se koristiti u tom mjerenju s naglaskom na instaliranju instrumenta, kalibraciji instrumenta i načinu rada dotičnog instrumenta kako bi se izbjegla pogrešna mjerenja i oštećenja instrumenta. [9]

Prema karakteru opterećenja konstrukcija može biti izložena statičkom i dinamičkom djelovanju opterećenja. Pod statičkim ispitivanjima podrazumijevamo vrlo polagano nanošenje opterećenja, tako da se ubrzanje čestica konstrukcije koje uzrokuje pojavu inercijalnih sila može zanemariti, dok se kod dinamičkog ispitivanja te inercijalne sile ne mogu zanemariti. [9]

Mjerni se instrumenti prema načinu na koji se njima mjere određene veličine dijele na: mehaničke i optičke koji služe za mjerenje duljina i pomaka, električne/elektronske (mehanička veličina se pretvara u električnu te se električni signal očitava na analognom i digitalnom instrumentu) i geodetske (kao skupina objedinjuju svojstva prethodnih skupina). [9]

4.1 Mjerni uređaji za statičko ispitivanje konstrukcija

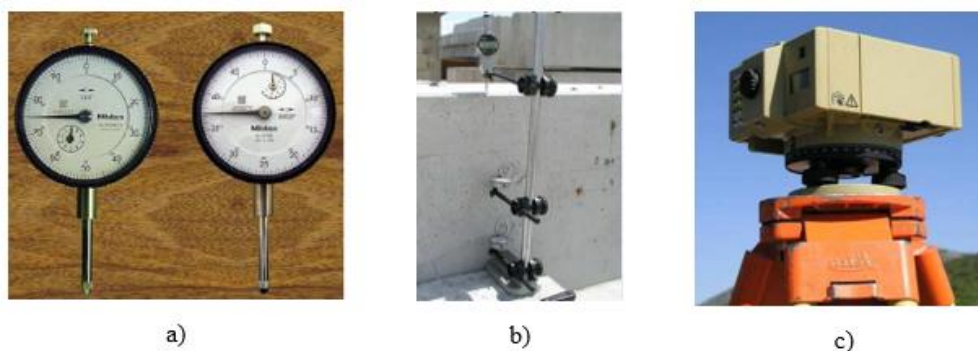
Pri provedbi statičkih ispitivanja realnih konstrukcija opterećenje se najčešće nanosi postavljanjem i raspoređivanjem tereta poznate mase na konstrukciju ili korištenjem hidrauličkih preša uz osiguranje preuzimanja reakcija. [2,3]

4.1.1 Mjerenje pomaka

Pomaci su jedni od najvažnijih parametara u ponašanju konstrukcije pod opterećenjem koji predstavljaju razmak neke točke na konstrukciji između neopterećenog i opterećenog stanja. Pomaci na konstrukciji općenito uključuju i pomake oslonaca, dok se progibi dobe isključivanjem pomaka oslonaca. [2]

Uređaji koji se koriste za mjerenje pomaka su milimetarski papir, indikatorska ploča, mikroura (mjerni sat), induktivna osjetila za mjerenje pomaka – LVDT, kapacitativni

pretvarač pomaka te geodetski instrument kao što je nivelir. U ovom se radu nećemo detaljno posvetiti svakom od tih uređaja, već ćemo se posvetiti onima koji su korišteni za naše ispitivanje. Pri našem ispitivanju pomak se mjerio pomoću LVDT uređaja. [2]

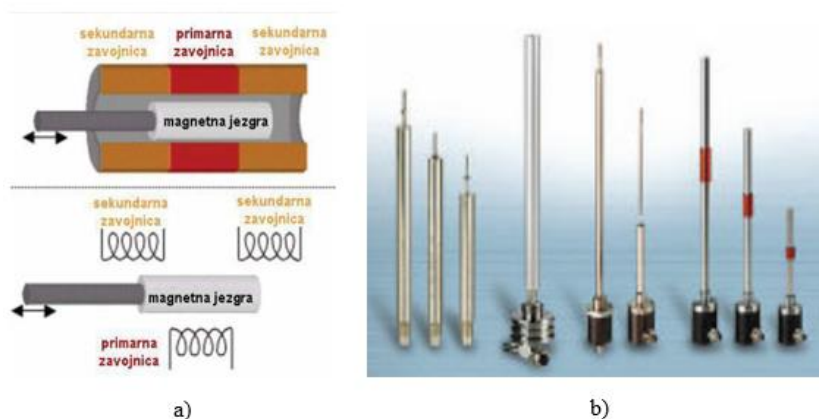


Slika 4.1 a) mehanička mikrouora b) montaža mikrouore c) digitalni nivelir Leica NA 3003 [8]

a) LVDT - induktivna osjetila za mjerenje pomaka

Induktivna osjetila za mjerenje pomaka LVDT (Linear Variable Differential Transformer) spadaju u električna osjetila koja imaju izlazni napon u voltima (V). Ovo osjetilo zahtijeva napajanje električnom energijom, najčešće istosmjernom, niskog napona do 24 V. [3]

Građeni su tako da imaju feromagnetnu jezgru određene dužine oko koje je u sredini primarna zavojnica i na krajevima dvije simetrične sekundarne zavojnice. Kroz primarnu zavojnicu teče izmjenična struja što uzrokuje induciranje napona u sekundarnim zavojnicama. Gibanjem jezgre u jednu ili drugu stranu od nultog položaja mijenja se napon u sekundarnim zavojnicama. Veza magnetskog protoka između primarnih i sekundarnih zavojnica mijenja se s položajem jezgre. Kad je jezgra u središnjem položaju jednako udaljena od sekundarnih zavojnica izlazni napon je nula. Izlazni napon osjetila se pomoću fazno osjetljivog demodulatora pretvara u istosmjerni napon odgovarajućeg predznaka koji je u linearnom odnosu s pomakom jezgre. Veza između pomaka i izlaznog napona se zove osjetljivost instrumenta i izražava se u mV/mm. Princip rada LVDT-a prikazana je na slici 4.2 a), a nekoliko vrsta induktivnih osjetila na slici 4.2 b). [2,3]

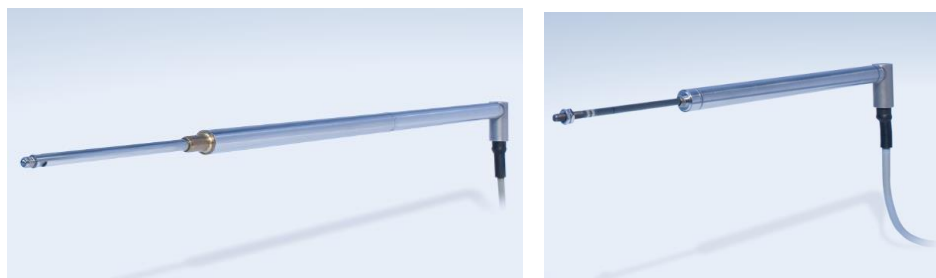


Slika 4.2 a) Princip rada LVDT uređaja [15] i b) LVDT osjetila [3]

Najučestaliji je pretvornik za mjerenje pomaka koji se koristi u industriji zbog svojeg jednostavnog dizajna i dokazane pouzdanosti. Glavni izazov s kojim se suočava LVDT uređaj je linearnost u ograničenom rasponu pomaka. Karakteristike LVDT-a ovise o geometriji pretvornika, o utjecaju fizičkih parametara na linearnost i na osjetljivost uređaja. Prednosti LVDT uređaja su: velik raspon za mjerenje pomaka u rasponu od 1,25 mm do 250 mm, visoka rezolucija i točnost mjerenja, potrošnja male snage, jednostavna instalacija i mogućnosti zapisivanja u stvarnom vremenu te niska histereza. Dok su neki od nedostataka visoka cijena uređaja, nemogućnost dobivanja cijelog polja pomaka i dodatni troškovi za prikupljanje podataka. [16]

Pretvarači pomaka i senzori pomaka osiguravaju pouzdane rezultate mjerenja u mnogim područjima istraživanja, razvoja i proizvodnje. Gotovo svi pretvarači pomaka rade prema iznimno pouzdanom induktivnom principu mjerenja. Jednostavni su za korištenje, izdržljivi i mogu postići visoku preciznost. Induktivni senzori pomaka rade prema principu induktivnosti. Metalna jezgra se pomiče u blizini zavojnice kroz koju prolaze izmjenične struje, što mijenja impedanciju i otpornost zavojnice. Ta promjena se detektira i pojačava pomoću Wheatstoneovog mosta, pretvarajući pomak u električni signal. Budući da nema kontakta između jezgre i zavojnice zbog principa rada, induktivno mjerenje pomaka može se smatrati bez trošenja. To je idealno za dugotrajnost i smanjenje troškova održavanja. Induktivni senzori pružaju visoku razlučivost i kompaktan dizajn u usporedbi s alternativama poput LVDT-a, što ih čini prikladnima za različite primjene. Raznovrsna paleta proizvoda uključuje modele poput WA-L i WA-T, poznatih kao "univerzalci". Koriste princip induktivnog osjeta kako bi omogućili točna mjerenja bez fizičkog kontakta s objektom koji se analizira. WA-L (slika 4.3 b)) dolazi s slobodnim klipom, dok WA-T (slika 4.3 a)) dolazi kao

sonda, čime osiguravaju izuzetnu svestranost. WI (slika 4.4 a)) induktivni pretvarač pomaka (minijaturna sonda) je kompaktni i precizni mjerni uređaj namijenjen industrijskim primjenama koje zahtijevaju točno mjerenje pomaka u skućenim prostorima. Ova tehnologija omogućuje točna i pouzdana mjerenja bez potrebe za fizičkim kontaktom s objektom koji se analizira. Na kraju, W1ELA/O (slika 4.4 b)) induktivni pretvarač pomaka (klip) dizajniran je posebno za svrhe instalacije, sastoji se od zavojnice i klipa bez kućišta. [14]



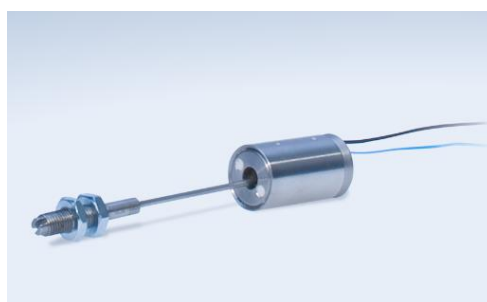
a)

b)

Slika 4.3 a) WA-T i b) WA-L model [14]



a)



b)

Slika 4.4 a) WI i b) W1ELA/O model [14]

b) Geodetski instrumenti

Pri statičkom ispitivanju konstrukcija, ovisno o njezinim karakteristikama i očekivanim vrijednostima pomaka, za određivanje pomaka primjenjuju se geodetske metode, odnosno precizni niveliri, totalne stanice te GNSS (globalni navigacijski satelitski sustavi). [11]

Metoda modificiranog preciznog geometrijskog nivelmana

Geometrijski nivelman se koristi za određivanje visinskih razlika putem horizontalne vizure, koristeći nivelir kao instrument, čiji se durbin može rotirati samo oko vertikalne osi. Modificirana metoda preciznog geometrijskog nivelmana je čest i jednostavan način mjerenja vertikalnih pomaka na terenu tijekom statičkog ispitivanja većih građevina poput mostova, brana ili tornjeva. Ova metoda je prikladna na lokacijama gdje nije moguće koristiti druge instrumente za mjerenje. Vertikalni pomaci se mjere preciznim nivelirima različitih tipova, kao što su optički nivelir Leica NAK2 (slika 4.5 a) s planparalelnom pločom ili digitalni nivelir LEICA DNA03 (slika 4.5 b)). [2,3,15]



a)



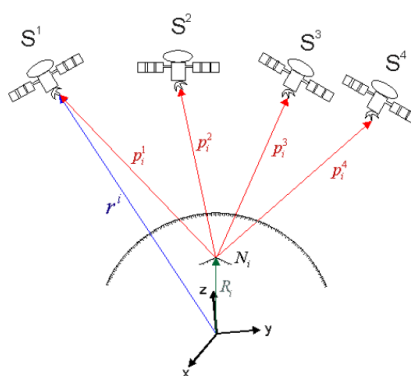
b)

Slika 4.5 a) Precizni optički nivelir Leica NAK2 s planparalelnom pločom [18] i b) precizni digitalni nivelir Leica DNA03 [19]

Optički nivelir Leica NAK2 s planparalelnom pločom ne omogućuje pohranu podataka u sam instrument, što čini proces mjerenja složenijim. Planparalelna ploča omogućuje očitavanje na 0,1 mm s procjenom na 0,01 mm. Uz ovu vrstu nivelira, koristi se invarna letva s dvostrukom centimetarskom podjelom. [18,20]

Digitalni nivelir LEICA DNA03 omogućuje pohranu podataka na memorijsku karticu te pruža upozorenja u slučaju prekoračenja dopuštenih odstupanja tijekom mjerenja. Preciznost mjerenja visina iznosi 0,3 mm/km, dok je preciznost mjerenja duljina 1 cm/20 m. Uz digitalni nivelir koristi se invarna letva s „barcode“ oznakama. [18, 2]

Osim geometrijskog nivelmana, pomaci se danas sve više mjere metodom trigonometrijskog nivelmana i teodolita. U novije vrijeme, tamo gdje se očekuju relativno veliki pomaci, koriste se i satelitske metode - GPS. GPS metoda se bazira na određivanju prostornih koordinata x , y , z pojedinih točaka na konstrukciji pomoću više umjetnih satelita koji kruže orbitom Zemlje. Uz idealne uvjete pomoću GPS-a se može postići točnost od $\pm 1,0$ mm, a najčešće je to $\pm 2 - \pm 10$ mm, dok je točnost određivanja horizontalnih pomaka je 1,5 – 2,5 puta veća nego kod određivanja vertikalnih pomaka. Točnost GPS metode mjerenja ovisi o dostupnosti satelita i sposobnosti mjernih uređaja da s njima komuniciraju. Iako se GPS koristi za mjerenje pomaka, nije široko prihvaćen u građevinarstvu zbog ograničenja u točnosti i visokih troškova opreme. [2,3,23]



Slika 4.8 GPS mjerenje pomaka [2]

Uz navedena mjerenja na konstrukciji koje smo detaljno obradili postoje još razne druge vrste mjerenja kao što su mjerenje temperature, kutova i mjerenje pritiska. Instrument koji se najčešće koristi za mjerenje kutova nazivamo klinometar te je prikazan na slici 4.9 a). Mjerenje temperature se izvodi pomoću Sonde koja je prikazana na slici 4.9 b), te se također koriste uređaji koji se nazivaju Termoparovi. U instrumente za mjerenje pritiska ubrajamo najčešće korišteni instrument koji se naziva Manometar te je prikazan na slici 4.9 c). [15]



a)



b)



c)

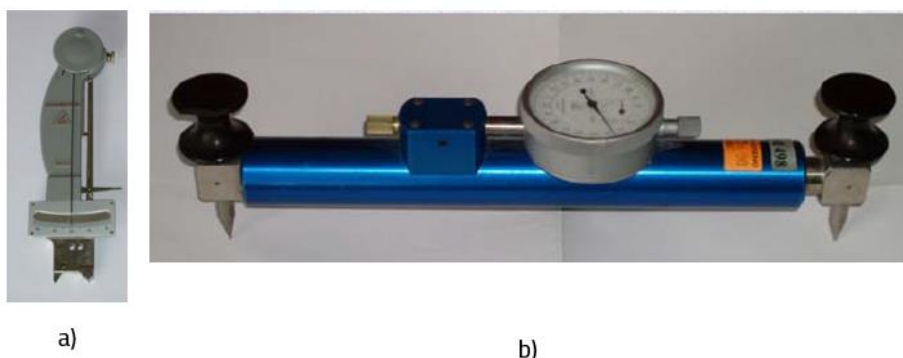
Slika 4.9 a) mehanički klinometar, b) sonda za mjerenje temperature i c) manometar [15]

4.1.2 Mjerenje deformacija

Pri statičkom opterećenju konstrukcije točke se pomiču u prostoru i tvore polje pomaka, ali se i međusobno razmiču odnosno približavaju ili udaljavaju. Pojam udaljavanja ili približavanja dviju bliskih točaka na konstrukciji tijekom opterećenja zove se deformacija. Naprezanja se ne mogu mjeriti direktno nego se računaju iz izmjerenih deformacija pomoću poznatih izraza koji povezuju deformacije i naprezanja, tzv. Hookeovi zakoni, uz poznavanje materijalnih karakteristika materijala. [2,3]

Relativne deformacije mogu se mjeriti pomoću LVDT senzora, koji se postavljaju na poznatom razmaku. Ipak, u praksi se najčešće koriste EOT senzori i optički senzori, zbog njihove visoke preciznosti i pouzdanosti.

Tenzometri se dijele na: mehaničke (Huggenbergerov tenzometar (slika 4.10 a)), Berryjev prijenosni komparator (slika 4.10 b)), optičke (Martensov zrcalni aparat), akustičke, elektromehaničke, elektrootporne, kapacitivne i potencijometrijske. Važan podatak nekog tenzometra je njegova osjetljivost - najmanji podatak koji se na tenzometru čita. Kod mehaničkih tenzometara osjetljivost je vezana uz uvećanje, a kod električnih uz rezoluciju. U posljednje vrijeme najviše se za mjerenje deformacija koriste elektrootporni tenzometri i optički senzori. [2,3]

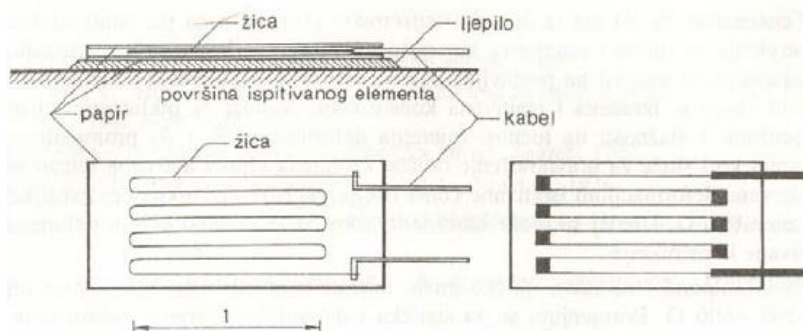


Slika 4.10 a) Huggenbergerov tenzometar i b) Berryjev prijenosni komparator [15]

a) Elektrootporni tenzometri – EOT

Ova metoda mjerenja deformacija je široko primijenjena u svim tehničkim područjima. Princip ovog mjerenja postavio je Lord Kelvin 1856.godine utvrdivši da se u bakrenoj i čeličnoj žici otpor povećava pri rastezanju. Za registraciju promjene električnog otpora kao instrumente koristio je Wheatstoneov most i galvanomjer. [2,15]

Elektrootporni tenzometri (mjerne trake) sastavljeni su od tankih žica koje mogu biti napravljene od bakra, nikla ili čelika te od nosivog elementa na kojeg je ta žica zalijepljena. Nosivi element je izrađen od papira, sintetičke smole ili od poliamida. Važan je i izbor materijala za izradu podloge, odnosno nosećeg elementa, jednako kao i vrsta ljepila s kojom se traka lijepi za konstrukciju. Najvažniji uvjet koji podloga i ljepilo moraju zadovoljiti je dobro prenošenje deformacije sa konstrukcije na žicu mjerne trake koja je prikazana na slici 4.11. [2,15]



Slika 4.11 Shematski izgled mjerne trake [15]

Mjerna baza tenzometra se bira ovisno o osobinama materijala konstrukcije koja se ispituje, odnosno ovisi o homogenosti materijala. Što je homogenost materijala veća to je baza tenzometra manja. Kod elektrootpornih tenzometra se veličina mjerne baze kreće od 0,6 mm do 150 mm, što za naše istraživanje čelika ide u korist pošto je on homogen i sitnozrnati materijal (6–12 mm). Za nehomogene materijale kao što je beton je potrebna veća mjerna baza (60 - 150 mm). [2,15]

U neke od prednosti elektrootpornih tenzometra se ubraja linearnost u širokom području deformacija, jednostavnost korištenja, niska cijena, trajnost i stabilnost kroz vrijeme, zanemariva masa te širok frekvencijski raspon korištenja. Dok se u nedostatke elektrootpornih tenzometara ubraja jednostruka upotreba, niska relativna promjena otpora i osjetljivost na temperaturu, vlagu, magnetska polja i ionizirajuće zračenje. [2,15]

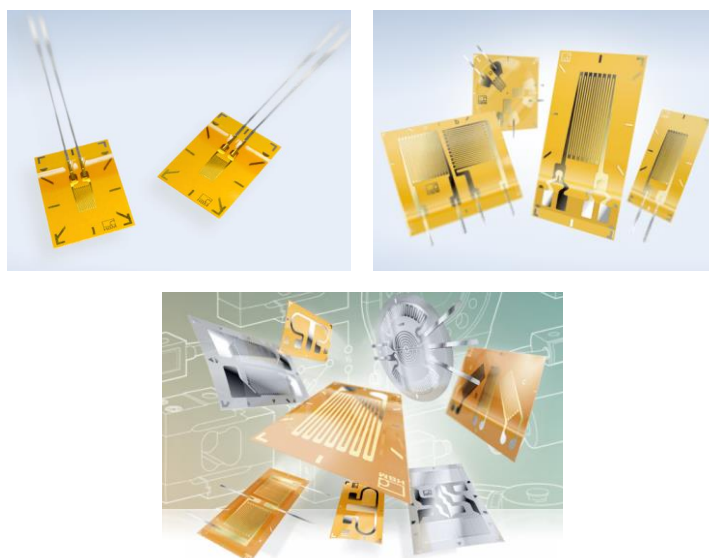
Mjerno područje EOT-a iznosi od $\pm 1 - \pm 50000 \mu\text{m/m}$, dok trake za velika izduženja mogu mjeriti relativne deformacije do $\pm 100\ 000 \mu\text{m/m}$. Elektrootporni tenzometri za velika izduženja izrađeni su od materijala koji trpe velika izduženja, a pri tome moraju zadržati elastična svojstva. Sličnih karakteristika mora biti i podloga i ljepilo. Temperaturno područje primjene je vrlo široko i ide od -270°C do $+250^\circ\text{C}$. Frekventno područje je također vrlo široko, od statičkog mjerenja do preko 50 kHz. Elektrootporni tenzometri pri deformacijama

do $\pm 1,0\%$ ($1000 \mu\text{m}/\text{m}$) imaju trajnu otpornost na zamor, pri većim nivoima deformacija pri ponavljanju opterećenja može doći do promjene karakteristike osjetila koja se manifestira odmakom od nule. [2,15]

Deformacijski senzori, odnosno tenzometri, nude širok spektar rješenja prilagođenih različitim potrebama mjerenja deformacija. Postoje deformacijski senzori opće namjene za praćenje zdravlja konstrukcija i testiranje umora materijala konstrukcija. [14]

Za eksperimentalnu analizu naprezanja, dostupni su posebno dizajnirani tenzometri (slika 4.12) koji su idealni za testiranje umora materijala, mjerenje preostalog naprezanja i strukturno praćenje. Ovi senzori uključuju specijalizirane varijante za zahtjevne zadatke poput analize širenja pukotina, uz prateći pribor za jednostavnu instalaciju i parametrizaciju. Također se koriste za određivanje razine naprezanja na materijalu. [14]

Ključne karakteristike deformacijskih senzora uključuju visoku performansu i pouzdanost za precizna mjerenja deformacija, te izdržljivost u različitim uvjetima okoliša. Ukratko, deformacijski senzori predstavljaju optimalno rješenje za industrije koje zahtijevaju precizna rješenja za mjerenje deformacija, odgovarajući na širok spektar primjena s visokim standardom kvalitete i podrške. [14]



Slika 4.12 Senzori za eksperimentalnu analizu naprezanja [14]

b) Optički senzori

Linija optičkih senzora (slika 4.13) omogućuje širok raspon mjerenja deformacija uz povećanu dugoročnu stabilnost. Idealan je izbor za praćenje zdravlja konstrukcija zbog brze i jednostavne instalacije te otpornosti na uvjete okoliša poput vlage, hrđe i soli, čak i na iznimno velikim udaljenostima. Omogućuju jednostavnu instalaciju koja rezultira smanjenjem troškova postavljanja, uz robusne dizajne. Optički senzori koristi se za mjerenje deformacija, temperature, ubrzanja i nagiba. [14]

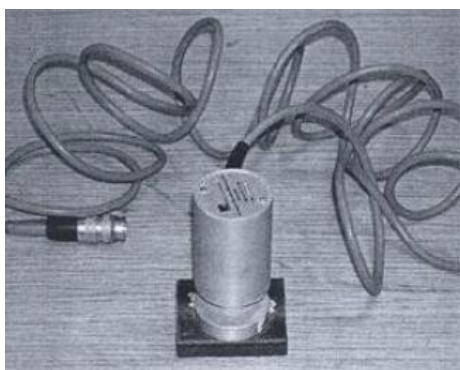


Slika 4.13 Optički senzori [14]

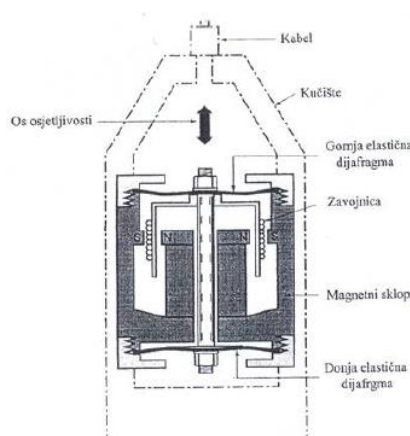
4.2 Mjerni uređaji za dinamičko ispitivanje konstrukcija

Za prikupljanje podataka o dinamičkim pojavama odnosno podataka pri provođenju dinamičkih ispitivanja u današnje se vrijeme najviše koriste električni senzori kao što su akcelerometri za mjerenje ubrzanja, brzinomjeri/velosimetri za mjerenje brzine (slika 4.15), seizmometri za mjerenje pomaka (slika 4.14) te mikrofoni za mjerenje jačine zvuka. [15]

Ovisno o tome kako se vrši pretvorba mehaničkih veličina u električne veličine, senzori za mjerenje dinamičkih pojava su zasnovani na principima promjene otpora, promjene induktiviteta, promjene kapaciteta, promjene potencijala i promjene električnog naboja. Napajanjem konstantnim električnim naponom daju električni izlazni signal koji je proporcionalan mjerenoj mehaničkoj veličini. Rad spomenutih senzora je zasnovan uglavnom na inercijalnoj metodi, gdje su glavni elementi masa i opruga odgovarajuće krutosti. [15]



Slika 4.14 Seizmometar [15]



Slika 4.15 Mjerač brzine – brzinomjer [15]

Akcelerometar je najčešće korišteni instrument pri mjerenju dinamičkih pojava, odnosno vibracija. Prilikom mjerenja akceleracija dobiva se zapis ubrzanje – vrijeme pomoću kojeg se jednostrukom integracijom dobiva brzina, dok se dvostrukom integracijom dobiva pomak. S obzirom na smjer mjerenja vibracija akcelerometri mogu biti jednoosni tako da mjere vibracije samo iz jednog smjera, dvoosni mjere istovremeno vibracije iz dva međusobno okomira smjera i troosni kod kojeg se vibracije smjer iz tri međusobno okomita smjera. [15]



Slika 4.16 troosni akcelerometar [15]

Pri dinamičkim ispitivanjima, oprema igra ključnu ulogu i ima značajan utjecaj na način prikupljanja i analize podataka. Sva oprema koja se koristi mora biti prilagođena svojoj sposobnosti da precizno registrira frekvencije i opseg karakteristika konstrukcije koja se ispituje. Također je važno osigurati da se tijekom prikupljanja i prijenosa podataka filtriraju svi dodatni signali koji nisu u frekvencijskom području od interesa kako bi se izbjegle pogreške i poteškoće tijekom analize. [2,26]

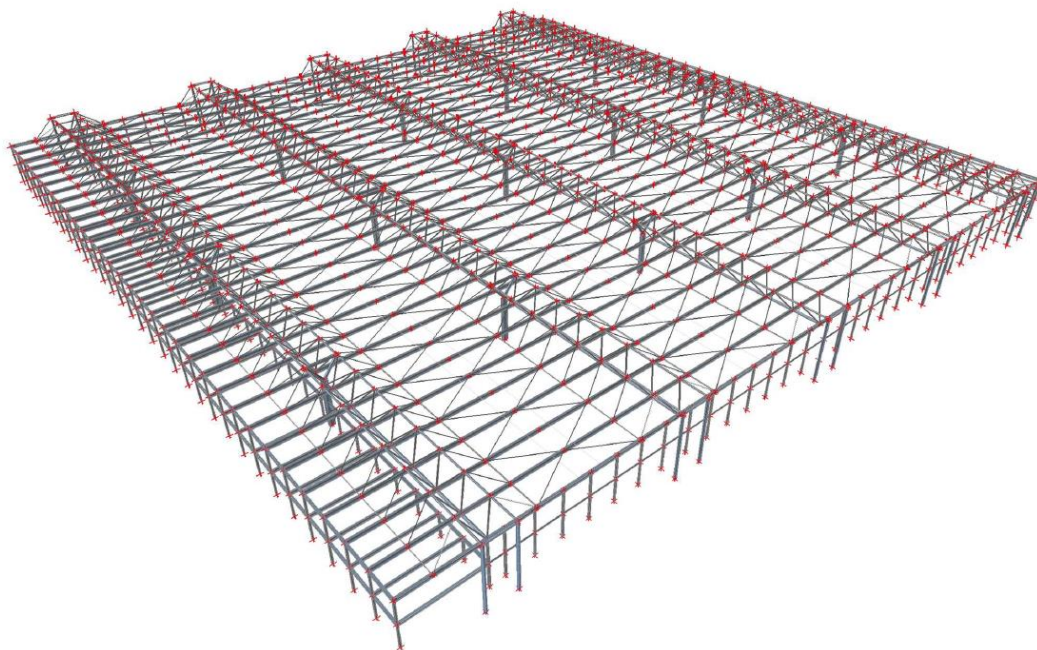
ISTRAŽIVAČKI DIO

5. OSNOVNI PODACI O KONSTRUKCIJI

Predmet ovog diplomskog rada je analiza izvedene čelične konstrukcije s fokusom na ispitivanje sekundarnog nosača probnim opterećenjem kako bi se utvrdila podobnost istoimenog nosača za preuzimanje povećanog stalnog tereta na konstrukciji. U povećani stalni teret ubraja se izgradnja sunčane elektrane, odnosno montaža solarnih panela i montaža potkonstrukcije na krovu čelične hale.

5.1 Opis čelične konstrukcije

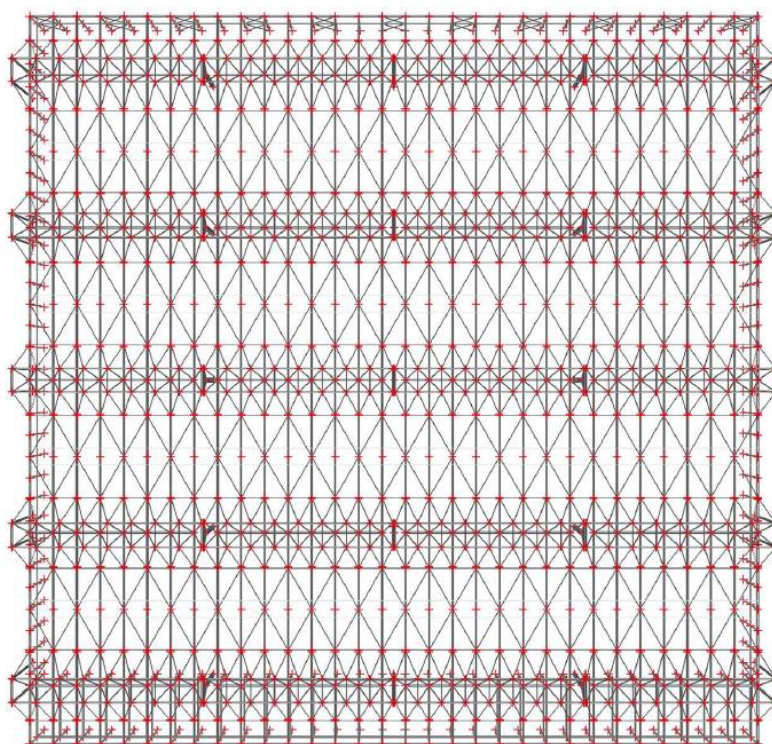
Proizvodna čelična hala, na slici 5.1 i na slici 5.2, izvedena je kao višebrodna čelična konstrukcija tlocrtnih osnih dimenzija 111,6 x 115,2 metara. Krovna konstrukcija sastoji se od trobridnih rešetki koje formiraju 5 valova na krovnoj plohi (nagiba 31°), dok je ostatak krova (uvale) izveden kao dvostrešni krov u minimalnom padu od 2°.



Slika 5.1 Proizvodna čelična hala

Osnovna nosiva konstrukcija sastoji se od čeličnih sandučastih stupova između kojih se protežu rešetkasti glavni nosači. Glavni nosači izvedeni su kao trobridne rešetke raspona 28,8 metara na čiji se donji pojas oslanjaju sekundarni nosači od varenih „I“ profila. Sekundarni nosači nadsvođuju raspon od 23,4 metra. Minimalni pad u uvalama ostvaruje se klupčicama promjenjive visine na koje su postavljene podrožnice od valjanih I profila.

Stabilnost u vertikalnom smjeru osigurana je upetim spojem glavnih čeličnih stupova sa temeljima te vertikalnim spregovima po fasadnoj ravnini hale. Stabilnost u horizontalnom smjeru osigurana je izvedbom vlačnih spregova.



Slika 5.2 Proizvodna čelična hala – pogled odozgo (tlocrt)

Osnovna nosiva čelična konstrukcija sastoji se od sljedećih elemenata:

- a) donji dio stupova od limova varenih u sandučasti p.p. – pojasevi od limova 700/10 mm, hrbat od limova 360/14 mm,
- b) gornji dio stupova od okruglih cijevnih profila RO 323,9/8 mm,
- c) vanjski glavni okvir (stup + greda) od okruglih cijevnih profila RO 323,9/12,5 mm,

- d) gornji pojas rešetke od okruglih cijevnih profila RO 193,7/16 mm,
- e) donji pojas rešetke od okruglih cijevnih profila RO 298,5/17,5 mm,
- f) ispuna gornjeg pojasa rešetke od okruglih cijevnih profila RO 101,6/14,2 mm,
- g) ispuna rešetke od okruglih cijevnih profila RO 139,7/12,5 mm,
- h) sekundarni nosači od varenog I profila – pojasevi od limova 180/14 mm, hrbat od lima 472/8 mm,
- i) podrožnice od valjanih I profila INP 100,
- j) stabilizacija rešetke od punog okruglog profila $\emptyset 34$,
- k) horizontalna i vertikalna stabilizacija od punog okruglog profila $\emptyset 16$.

5.2 Materijali konstrukcije

Vanjski stupovi izvedeni su od čelika S355JR sa normativnom granicom 355 N/mm², dok su svi ostali elementi čelične nosive konstrukcije izvedeni od čelika S235JR sa normativnom granicom 235 N/mm². Čelik S235JR je uobičajeni europski standardni čelik koji se često koristi u građevinarstvu i spada u kategoriju nelegiranih konstrukcijskih čelika te je proizveden u skladu s normom EN 10025-2. Oznaka "S" označava strukturni čelik, dok broj "235" označava minimalnu granicu razvlačenja od 235 izraženu u N/mm² za najtanje dijelove materijala, Slovo "JR" označava da je čelik dizajniran za premošćivanje temperature od -20°C, što ga čini pogodnim za upotrebu u različitim klimatskim uvjetima s minimalnom energijom udara loma od 27 J. Vlačna čvrstoća čelika S235JR kreće se između 360 i 510 MPa, dok granica popuštanja, koja označava točku kada materijal počinje plastično popuštati, iznosi otprilike 235 MPa. Ove karakteristike ilustriraju sposobnost čelika da se suprotstavi lomu i deformaciji pod zatezanjem. Izduženje čelika S235JR, što predstavlja postotak produženja prije nego što dođe do loma, iznosi oko 26%. Ova vrijednost naglašava čeličnu sposobnost deformacije prije loma, što sugerira njegovu duktilnost i otpornost. Modul elastičnosti čelika S235JR, koji opisuje njegovu sposobnost elastične deformacije pod opterećenjem, iznosi približno 210 GPa. Važno je naglasiti da ove vrijednosti mogu varirati ovisno o procesima proizvodnje i obrade čelika, kao i o temperaturi ispitivanja. [18,19]

Vijčani montažni spojevi izvedeni su prema normama važećim u vrijeme izgradnje, te variraju između kvalitete 4.6 i 8.8.

5.3 Sekundarni nosač krovne konstrukcije

Jedan od ciljeva ovog istraživanja je ispitivanje, petog po redu sa smjera sjevera prema jugu, sekundarnog krovnog nosača, koji je istovjetan drugim sekundarnim nosačima na hali, ali u dogovoru s investitorom i projektantom izabran je taj nosač (slika 5.3). Spomenuti sekundarni nosač nalazi se na krovu broj jedan s načinom numeriranja od zapadne prema istočnoj strani. Glavni razlog odabira tog nosača je njegova lokacija, odnosno pozicija na prostoru hale. Nalazi se na mjestu gdje je najjednostavnije pripremiti i izvršiti ispitivanje u smislu uklanjanja robe i opreme te u smislu najmanjeg utjecaja ispitivanja na proizvodnju.

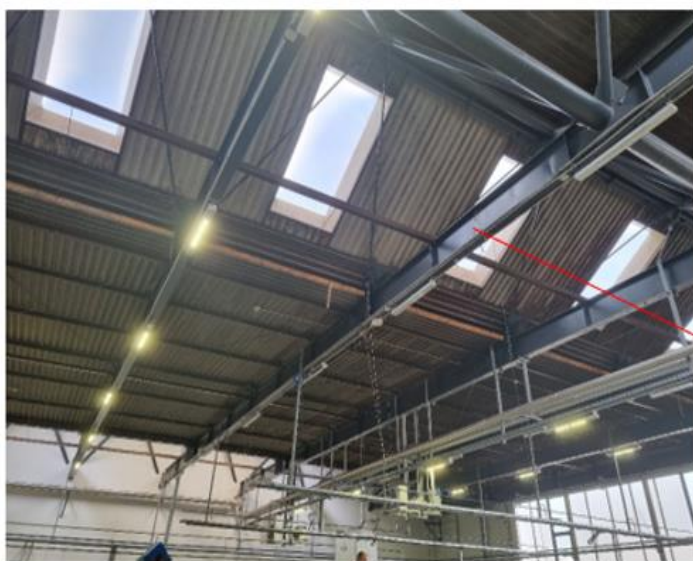


Krov broj 1 na kojem se nalazi
predmetni sekundarni nosač broj 5

Slika 5.3 Čelična hala s naznačenim sekundarnim nosačem koji se ispituje

Sekundarni nosači imaju raspon od 23,4 metra i u statičkom smislu su proste grede. Nosači su izvedeni kao vareni „I“ profili s pojasnicom od limova 180/14 mm i hrpta od lima 472/8 mm, te su izvedeni od čelika kvalitete S235JR s normativnom granicom popuštanja od 235 N/mm². Jedan od tih sekundarnih nosača prikazan je na slici 5.4.

Njihova veza s donjim pojasom rešetke ostvarena je vijčano preko čelične papuče. Pridržanje u vertikalnom smjeru je izvedeno kao vlačne dijagonale između gornjeg pojasa rešetke i sekundarnih nosača. Dijagonale su izvedeno od punih okruglih profila Ø34 od čelika S235JR sa normativnom granicom 235 N/mm².



Sekundarni nosač na krovnoj konstrukciji čelične proizvodne hale

Slika 5.4 Fotografija sekundarnog nosača krovne konstrukcije

Ranije spomenuti solarni paneli postavljaju se na čelične platforme, koje su oslonjene isključivo na sekundarne nosače, i to iznad podrožnica koje su izvedene kao proste grede na rasponu 3,6 m što predstavlja osni razmak sekundarnih nosača. Podrožnice su izvedene od valjanih „I“ profila INP 100 od čelika S235JR sa normativnom granicom popuštanja od 235 N/mm². Na taj se način dodatno stalno opterećenje prenosi isključivo iznad oslonca, čime se eliminira problem nosivosti pokrova. Veza sa sekundarnim nosačima ostvarena je preko klupčica promjenjive visine na koje se vijčano spajaju podrožnice.

6. PROGRAM ISPITIVANJA

6.1 Općenito o programu ispitivanja

Ključna faza pripreme za ispitivanje konstrukcija je izrada detaljnog programa ispitivanja. Program definira ciljeve i opseg ispitivanja, razinu i metodu opterećivanja, faze opterećenja, vremenski raspored ispitivanja, raspored mjernih mjesta i odabir mjernih uređaja, te kontrolni proračun. Prije sastavljanja programa, potrebno je provesti preliminarne radnje koje uključuju pregled tehničke dokumentacije, temeljit pregled konstrukcije i definiranje ciljeva ispitivanja. U programu se specificiraju tehnike za prikupljanje podataka, kao što su LVDT osjetila, geodetski instrumenti ili elektronički senzori. Popis i specifikacija svih potrebnih uređaja i alata također su uključeni, kao i vodič za provođenje ispitivanja, uključujući pripremne radnje, način primjene opterećenja, mjerenja i analizu podataka. Program definira kriterije za ocjenu rezultata, postavljajući standarde i norme koje rezultati moraju zadovoljiti, kao što su norme za maksimalne dopuštene deformacije i pomake. Na kraju, uključene su upute za osiguranje sigurnosti tijekom ispitivanja. Program ispitivanja je ključan za osiguranje dosljednosti, pouzdanosti i sigurnosti u procesu ispitivanja konstrukcija. [2]

Ispitivanje krovnog nosača proizvodne hale provedeno je prema planu ispitivanja prema normi HRN U.M1:047:1987, ali nije u potpunosti slijedilo sve smjernice norme zbog napredne tehnologije i suvremenih metoda mjerenja. Probno opterećenje i faze opterećenja odabrani su tako da simuliraju najnepovoljnije uvjete iz statičkog proračuna ili da rezultiraju sličnim unutarnjim silama u kritičnim presjecima konstrukcije. [4]

Za definiranje faza opterećivanja i mjernih mjesta potrebno je prethodno napraviti teorijsku analizu pomoću koje doznajemo kakve veličine pomaka i deformacija očekujemo na terenu, kako bi mogli kontrolirati parametre ispitivanja. [2,3]

Prema tome, definira se numerički model koji se opterećuje zadanim probnim opterećenjem te se po fazama, kao i tijekom ispitivanja, radi usporedba i analiza rezultata (unutarnje sile, pomaci, relativne deformacije i naprezanja, te ponašanje konstrukcije) dobivenih numerički i eksperimentalno.

7. OBRADA I ANALIZA REZULTATA PRI ISPITIVANJU

Cilj ovog rada je opisati i obraditi ispitivanje konstrukcija, s posebnim fokusom na provođenje ispitivanja čeličnih konstrukcija pri čemu se izvršila usporedba rezultata parametara konstrukcije (pomaka i relativnih deformacija) dobivenih eksperimentalno te onih rezultata dobivenih numeričkim modelom. Prema normi HRN U.M1.047 *Ispitivanje konstrukcija probnim opterećenjem i ispitivanje do sloma*, probnim opterećenjem se ispituju konstrukcije u koje se sumnja u njihovu nosivost, krutost, trajnost te se ispituju one konstrukcije koje su sanirane i čija je nosivost nepoznata.[5]

7.1 Osnovni podaci o probnom opterećenju

Statičko i dinamičko ispitivanje je provedeno probnim opterećenjem koje su predstavljali plastični spremnici u aluminijskim kavezima na paletama dimenzija 120 cm x 100 cm, napunjeni vodom. Količina tereta određena je u dogovoru s projektantom te se pomoću njega uslijed montaže platforme i solarnih panela, te djelovanja snijega, simuliralo djelovanje povećanog stalnog opterećenja. Za potrebe ispitivanja korišteno je 26 spremnika pri čemu je masa jednog praznog spremnika, koji je prikazan na slici 7.1, iznosila 70 kg.



Slika 7.1 Primjer plastičnog spremnika korištenog za ispitivanje predmetnog nosača

Na dijelu koji se ispitivao, prvo je postavljena čelična podkonstrukcija, zatim drvene fosne, a na kraju spremnici. Po završetku ispitivanja, fosne i spremnici su uklonjeni, a zatim su montirani solarni paneli. Spremnici su se punili količinom vode od 100, 200, 300, 400 i 600

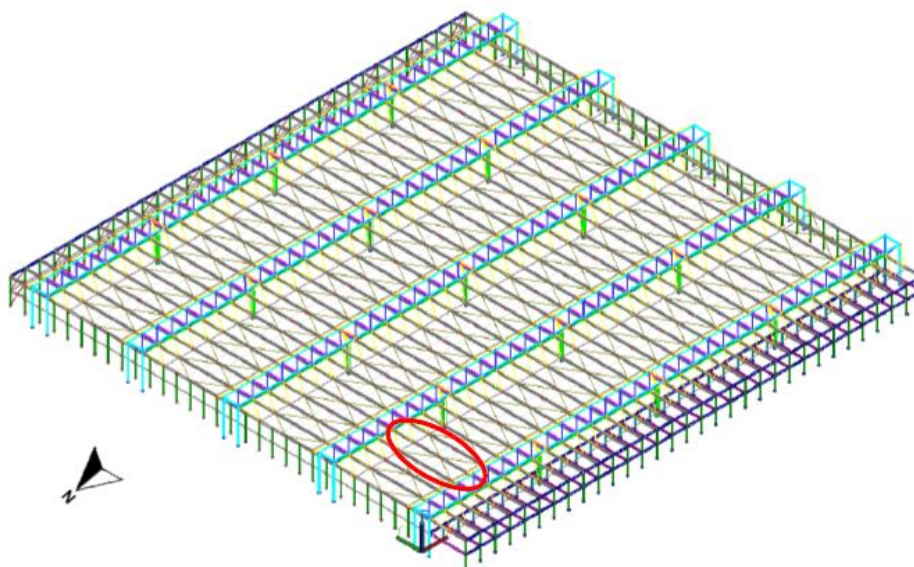
litara. Parametri, kao što su pomaci i relativne deformacije, dobiveni prilikom ispitivanja probnim opterećenjem daju najbolju sliku i ocjenu stanja konstrukcije te mogućnost usporedbe izmjerenih rezultata i numeričkog modela.

7.2 Statičko ispitivanje

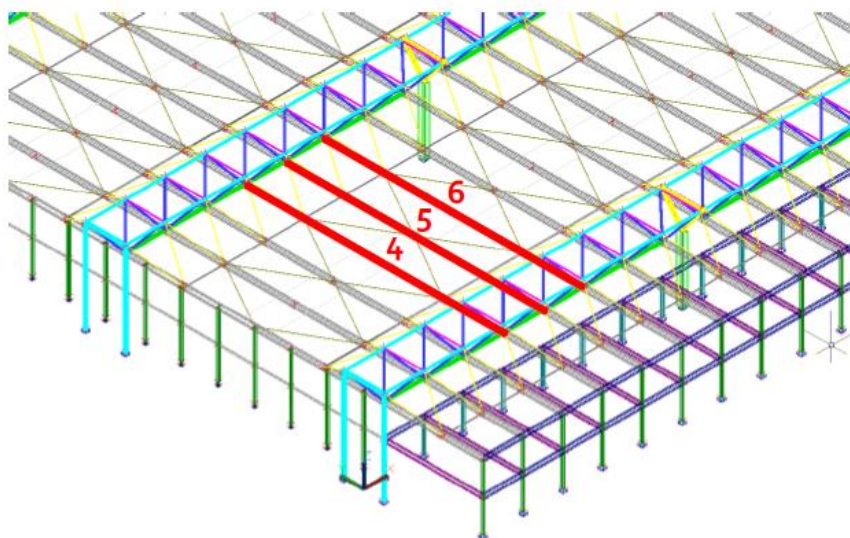
7.2.1 Faze opterećenja i ispitivanja

Faze opterećenja pri ispitivanju moraju biti takve da daju ekvivalentan učinak na unutarnje sile kao računski opterećenja. U pojedinoj fazi opterećenja nastoji se izazvati maksimum progiba u pojedinom rasponu ili maksimum neke unutarnje sile. Broj faza određuje se prema važnosti konstrukcije i opsegu ispitivanja koje se provodi. Nanošenje opterećenja provodi se u koracima s prirastom opterećenja po fazama. Programom se može predvidjeti i ponavljanje pojedinih faza dok je obavezno predvidjeti i faze rasterećenja u kojima se mjere zaostali pomaci i deformacije. [2]

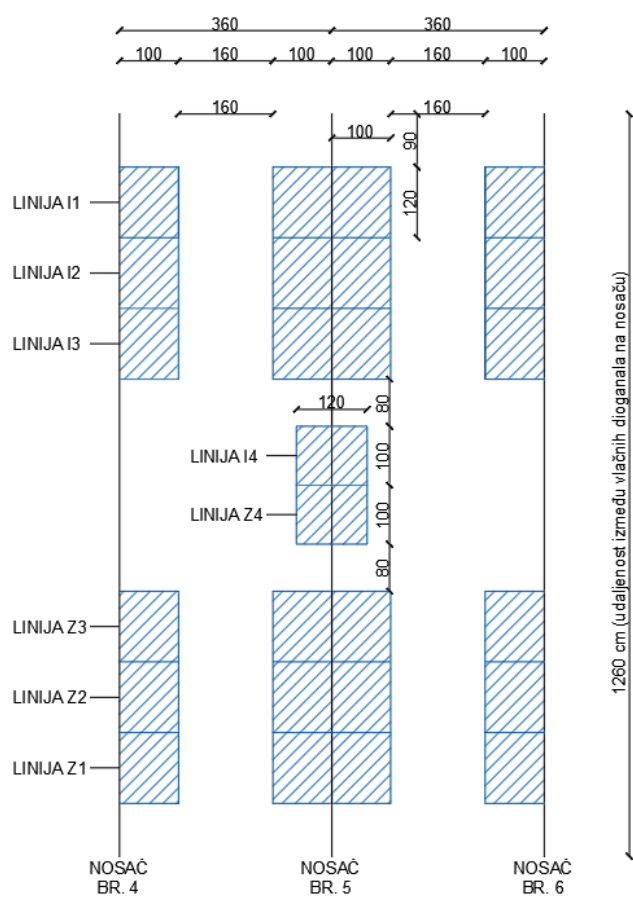
Kao probno opterećenje uzeti su spremnici napunjeni vodom kojima je opterećen predmetni sekundarni nosač. Raspored spremnika korištenih za ispitivanje krovnog nosača određen je u dogovoru s projektantom. Spremnici se nalaze iznad nosača broj 5 koji se ispituje te u poljima lijevo i desno od nosača. Nosači i njihova pozicija prikazani su na slikama 7.2 i 7.3, dok je raspored spremnika iznad sekundarnih nosača prikazan na slici 7.4.



Slika 7.2 Pogled odozgo na poziciju sekundarnih nosača



Slika 7.3 Pozicija sekundarnog nosača broj 5 na krovu broj 1 s označenim susjednim nosačima 4 i 6



Slika 7.4 Raspored spremnika napunjenih vodom

Statičko ispitivanje konstrukcije provedeno je u 8 faza koje su prikazane u tablici 7.1. Maksimalno opterećenje na konstrukciju je postavljeno u fazi 4 i iznosilo je otprilike 12,62 tone što uključuje spremnik napunjen vodom. Za vrijeme ispitivanja izvršen je zapis pomaka i relativnih deformacija u čvorovima koji predstavljaju mjesta gdje se podrožnice oslanjaju na predmetni sekundarni nosač. Razmak između čvorova, u koje smo koncentrirali opterećenje, iznosi 2,1 metar. U numeričkom modelu se modelirao samo nosač broj 5 koji je opterećen prema fazama ispitivanja s spomenutim probnim opterećenjem.

Tablica 7.1 Faze statičkog ispitivanja

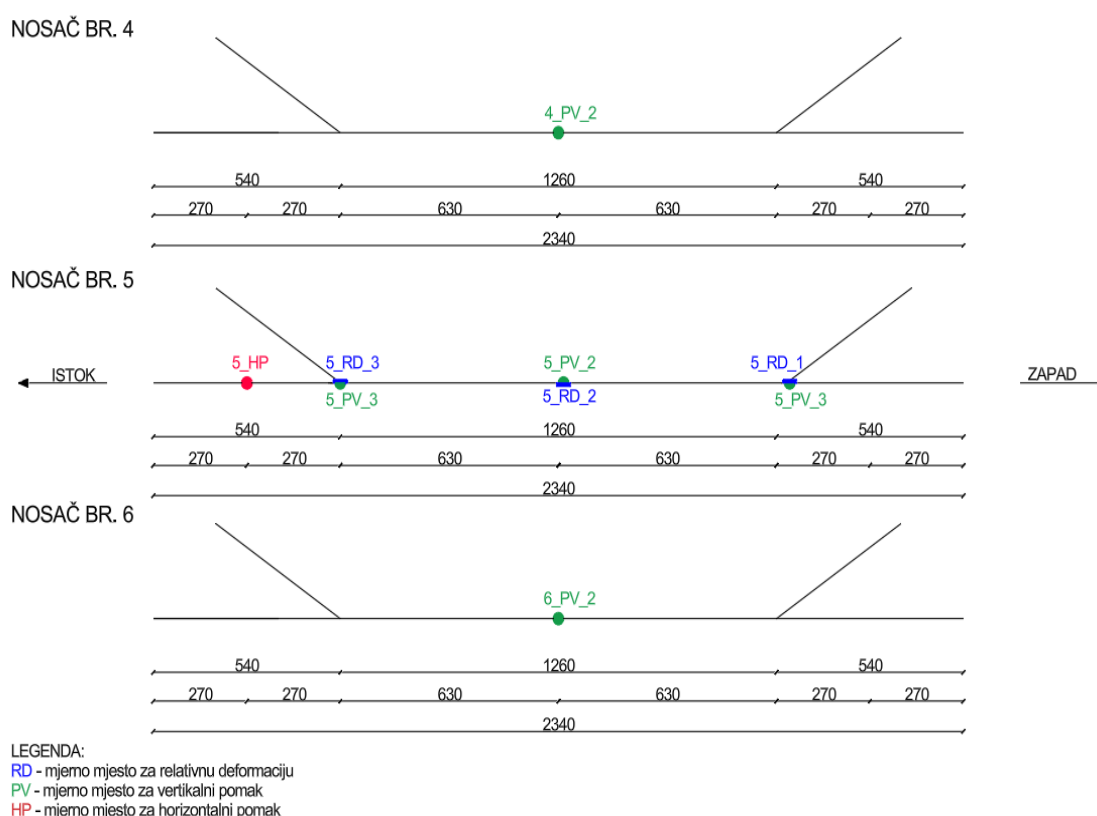
FAZA ISPITIVANJA	OPIS FAZE ISPITIVANJA
FAZA 1	100 litara vode u svim spremnicima
FAZA 2	200 litara vode u svim spremnicima
FAZA 3	300 litara vode u svim spremnicima
FAZA 4	400 litara vode u spremnicima u linijama I1 do I3 i Z1 do Z3 600 litara vode u spremnicima u linijama I4 i Z4
FAZA 5	400 litara vode u spremnicima u linijama I2 i I3 te Z2 i Z3 600 litara vode u spremnicima I4 i Z4 spremnici u linijama I1 i Z1 ispražnjeni
FAZA 6	400 litara vode u spremnicima u linijama I3 i Z3 te Z2 i Z4 600 litara vode u spremnicima I4 i Z4 spremnici u linijama I1 i I2 te Z1 i Z2 ispražnjeni
FAZA 7	600 l vode u spremnicima I4 i Z4 spremnici I1 do I3 te Z1 do Z3 ispražnjeni
FAZA 8	svi spremnici su ispražnjeni

7.2.2 Mjerenja i mjerna mjesta

Mjerenje malih veličina kao što su pomaci i deformacije obavljaju se isključivo pomoću odabranih preciznih mjernih instrumenata. Tijekom izrade plana i programa ispitivanja definira se skup točaka tj. diskretna polja pomaka i deformacija koja se žele mjeriti. Osim pomaka i deformacija definiraju se i drugi parametri koji se žele mjeriti tijekom određenog

statičkog ispitivanja, npr. parametri loma i parametri graničnih čvrstoća ako se konstrukcija ispituje do sloma. [2]

Statičko ispitivanje krovnog nosača proizvodne hale sastoji se od mjerenja pomaka i relativnih deformacija na prethodno određenim mjestima konstrukcije. Tijekom ispitivanja kontinuirano su mjereni vertikalni i horizontalni pomaci nosača, te relativne deformacije na nosačima broj 4, 5 i 6. Predmet ovog ispitivanja je bio nosač broj 5 čija su mjerna mjesta postavljena duž cijelog nosača, preciznije, na nosaču je postavljeno jedno mjerno mjesto u sredini raspona i na mjestima gdje se vlačne zatege spajaju na nosač, tako da se na njemu nalazi najveći broj mjernih mjesta, dok su na nosačima broj 4 i broj 6 mjereni pomaci samo na polovici raspona. Prikaz mjernih mjesta za mjerenje relativnih deformacija i vertikalnih pomaka nalazi se na slici 7.5. Mjerno osjetilo za mjerenje horizontalnog pomaka nalazi se na donjoj pojasnici nosača koji se ispituje te je prikazano na istoj slici crvenom bojom. Pomaci i relativne deformacije pri statičkom opterećenju mjereni su pomoću LVDT osjetila (eng. *Linear Variable Differential Transformer*), a baza mjerenja relativnih deformacija je bila 200 mm.



Slika 7.5 Prikaz mjernih mjesta za statičko ispitivanje

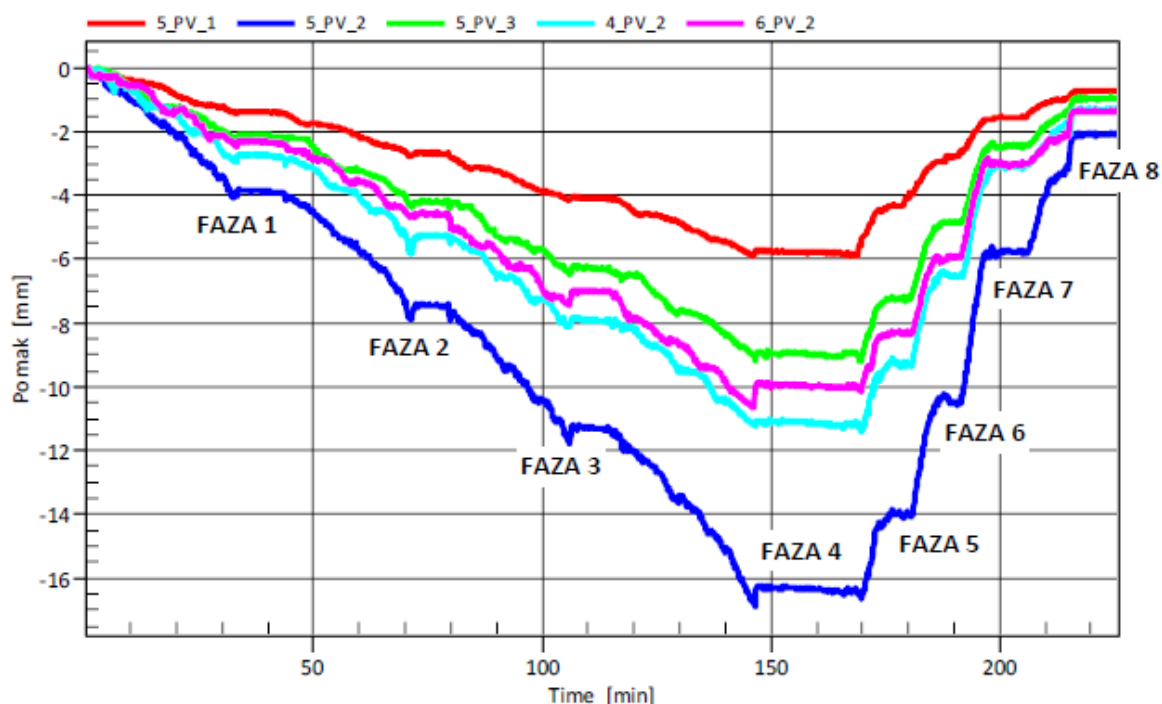
U tablici 7.2 prikazane su vrijednosti vertikalnih pomaka za fazu ispitivanja s maksimalnim opterećenjem, odnosno za fazu 4 te su prikazane vrijednosti vertikalnih pomaka zaostalih nakon rasterećenja konstrukcije – faza 8. Iz rezultata je vidljivo da je maksimalni pomak izmjeren u sredini raspona na nosaču broj 5 te njegova vrijednost iznosi 16,45 mm. Također je vidljivo da je zaostali pomak iznosio 2,13 mm što je 12,95 % maksimalne vrijednosti izmjerenog pomaka.

Tablica 7.2 Vertikalni pomaci nosača broj 4, 5 i 6 pri maksimalnom opterećenju i nakon rasterećenja

Mjerno mjesto	Pomak pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [mm]	Zaostali pomak nakon rasterećenja – faza 8 [mm]
5_PV_1	5,90	0,76 (12,88 %)
5_PV_2	16,45	2,13 (12,95 %)
5_PV_3	8,97	0,98 (10,93 %)
4_PV_2	11,28	1,34 (11,88 %)
6_PV_2	10,07	1,40 (13,90 %)

Sve vrijednosti izmjerenih zaostalih vertikalnih pomaka i relativnih deformacija nakon rasterećenja konstrukcije bile su manje od 15 % u odnosu na vrijednosti pri maksimalnom opterećenju, što je u skladu s dopuštenim granicama za čelične konstrukcije prema normi HRN U.M1:047:1987 "Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do loma". Iako su ovi rezultati zadovoljavajući prema normi, očekivalo se da će postotak biti niži za vrijednosti zaostalih vertikalnih pomaka i relativnih deformacija nakon rasterećenja konstrukcije iz razloga što se pretpostavlja da će konstrukcija pokazati veću elastičnost i manje trajne deformacije pri smanjenju opterećenja. Temperaturni uvjeti, vibracije ili drugi vanjski čimbenici mogu značajno utjecati na ponašanje konstrukcije, što može rezultirati većim zaostalim pomacima i deformacijama nakon rasterećenja. Također preciznost i osjetljivost mjernih uređaja igraju ključnu ulogu jer mogu utjecati na točnost mjerenja pomaka i deformacija.

Na slici 7.6 prikazan je graf (pomak – vrijeme) vremenskog zapisa vertikalnih pomaka nosača broj 4, 5 i 6 za vrijeme statičkog ispitivanja.



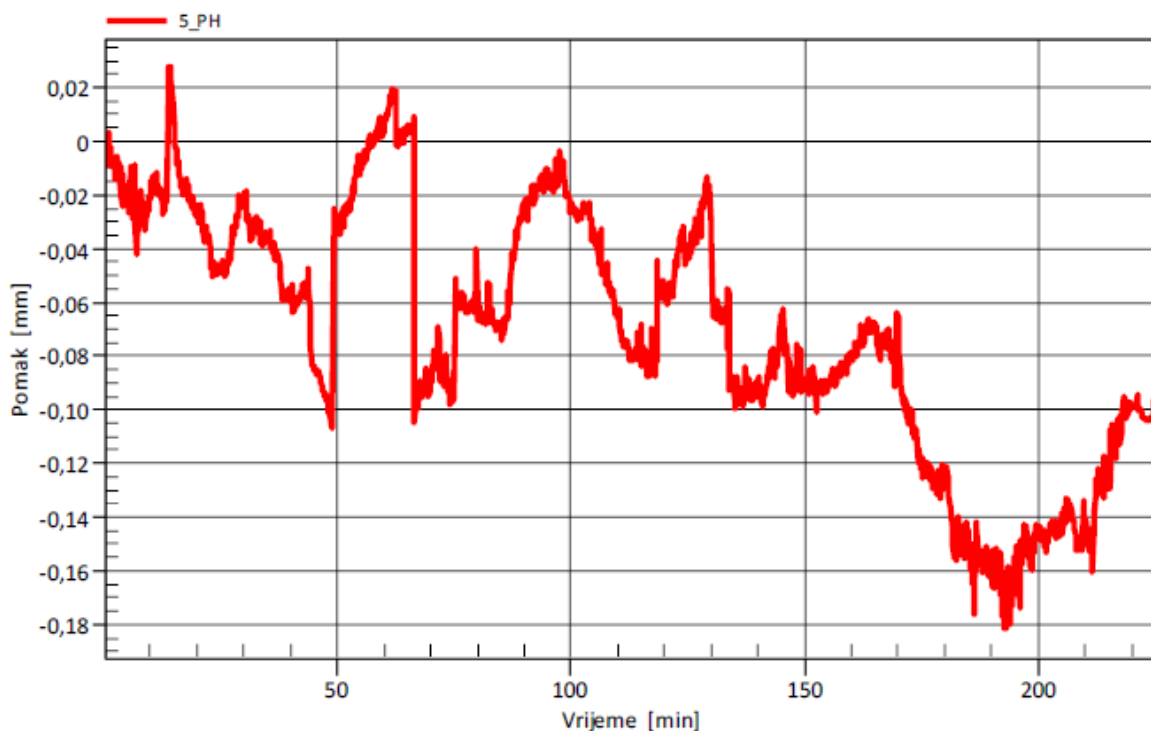
Slika 7.6 Vremenski zapisi vertikalnih pomaka nosača br. 4, 5 i 6 za vrijeme statičkog ispitivanja

Ispitivanje konstrukcija prema normi HRN U.M1.047, opisano je kao metodološki okvir za provođenje testiranja konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanjem do sloma. Norma zahtijeva da nakon što se na konstrukciju nanese maksimalno predviđeno probno opterećenje, teret mora ostati stabilan određeno vrijeme (4 sata za čelične konstrukcije) kako bi se provjerila stabilnost pomaka pri konstantnom opterećenju. To uključuje periodično promatranje konstrukcije tijekom tog razdoblja kako bi se utvrdilo da pomaci ne rastu, što je ključno za osiguravanje sigurnosti konstrukcije. Ovakav pristup može biti neefikasan u današnjem kontekstu gdje su dostupni visoko precizni senzori koji omogućuju kontinuirano i precizno mjerenje pomaka s jako visokom točnošću.

Ručna mjerenja u intervalima, kako je propisano normom, sklonija su većim mjerama nesigurnosti i sporijem otkrivanju promjena u pomacima. Moderna tehnologija omogućuje brže i preciznije praćenje stabilnosti pomaka, što bi omogućilo kraće vrijeme potrebno za promatranje konstrukcije pod opterećenjem. Ukoliko se već na početku ispitivanja pomak stabilizira, daljnje zadržavanje tereta ne bi imalo svrhe jer bi eventualno popuštanje ili promjene u pomacima bili vidljivi odmah, a ne s odgodom od nekoliko sati kao što propisuje norma. Osim toga, norma ne uzima u obzir napredak u tehnologiji senzora za mjerenje pomaka i deformacija, koji omogućuju kontinuirano praćenje i trenutno uočavanje promjena.

Prema tome, dok norma HRN U.M1.047 pruža osnovni okvir za ispitivanje konstrukcija, primjena suvremenih tehnologija za mjerenje pomaka može biti korisna za poboljšanje učinkovitosti, preciznosti i sigurnosti ispitivanja.

Vremenski zapis horizontalnog pomaka nosača broj 5 za vrijeme statičkog ispitivanja prikazan je na slici 7.7. Zapisom je vidljivo da su registrirane vrijednosti pomaka relativno male (maksimalna izmjerena vrijednost je otprilike 0,18 mm). Iz zapisa nije moguće utvrditi korelaciju horizontalnog pomaka nosača sa fazama ispitivanja. Važno je napomenuti da je oslonac za vrijeme ispitivanja bila hidraulična platforma prikazana na slici 7.8, čija potpuna nepomičnost na visini od 6 metara nije bila zajamčena. Iz logističkih razloga, naručitelj nam je mogao osigurati jedino tu platformu, što je donekle ograničilo preciznost ispitivanja.



Slika 7.7 Vremenski zapis horizontalnog pomaka nosača broj 5



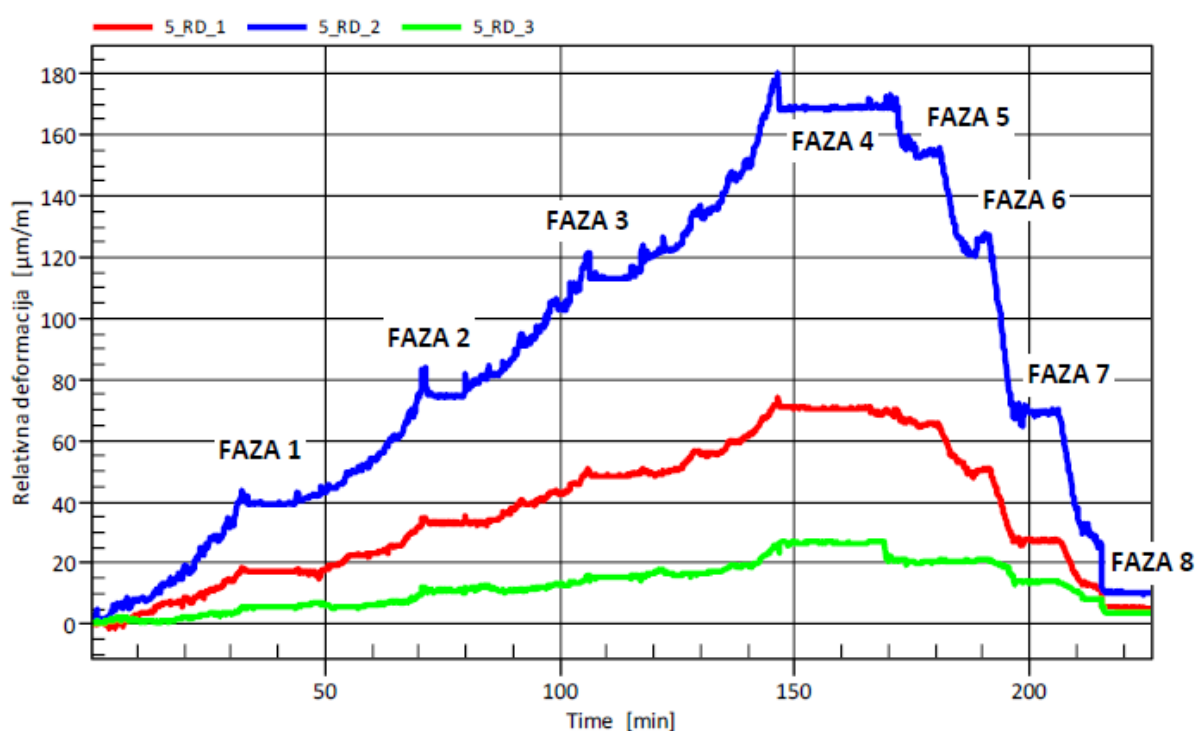
Slika 7.8 Pogled na osjetilo za mjerenje horizontalnog pomaka (hidraulična platforma je bila oslonac osjetila)

U tablici 7.3 prikazane su vrijednosti relativnih deformacija za fazu ispitivanja s maksimalnim opterećenjem, odnosno za fazu 4 te su prikazane vrijednosti zaostalih relativnih deformacija nakon rasterećenja konstrukcije – faza 8. Iz rezultata je vidljivo da je maksimalna izmjerena relativna deformacija na nosaču broj 5 za vrijeme ispitivanja iznosila $169,05 \mu\text{m}/\text{m}$, dok je nakon ispitivanja vrijednost zaostale relativne deformacije iznosila $9,88 \mu\text{m}/\text{m}$ što je 5,84 % maksimalne vrijednosti izmjerene relativne deformacije. Uz vrijednost relativnih deformacija pri maksimalnom opterećenju u tablici su prikazane i proračunate vrijednosti naprezanja uz pretpostavku da je vrijednost modula elastičnosti čelika $210\,000 \text{ N}/\text{mm}^2$.

Tablica 7.3 Relativne deformacije nosača broj 5 pri maksimalnom opterećenju i nakon rasterećenja

Mjerno mjesto	Relativna deformacija pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Naprezanja pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [N/mm^2]	Zaostala relativna deformacija nakon rasterećenja – faza 8 [$\mu\text{m}/\text{m}$]
5_RD_1	70,46	14,80	4,97 (7,05 %)
5_RD_2	169,05	35,50	9,88 (5,84 %)
5_RD_3	25,84	5,43	3,46 (13,39 %)

U nastavku, na slici 7.9 prikazan je graf (relativna deformacija – vrijeme) vremenskog zapisa relativnih deformacija nosača broj 5 za vrijeme statičkog ispitivanja.



Slika 7.9 Vremenski zapis relativnih deformacija nosača br. 5 za vrijeme statičkog ispitivanja

U nastavku su prikazane slike na kojima je vidljiva priprema za provođenje statičkog i dinamičkog ispitivanja konstrukcije.



Slika 7.10 Prazni spremnici (ukupno 26 kom) namješteni prema rasporedu (prije ispitivanja)



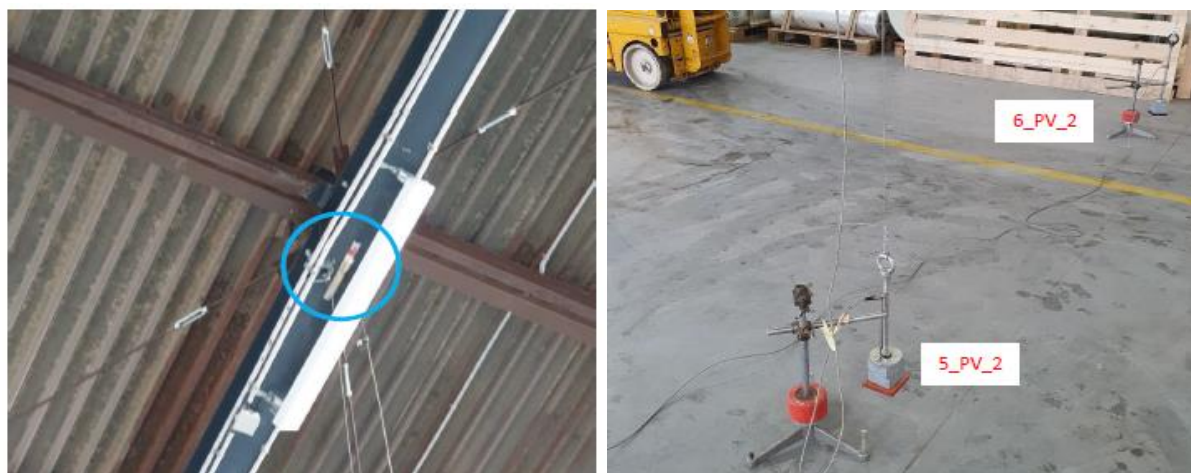
Slika 7.11 Faza 4 statičkog ispitivanja (400 l vode u 24 spremnika – lijevo i desno na slici i 600 l vode u 2 spremnika – u sredini na ovoj slici)



Slika 7.12 Mjerna stanica za provedbu statičkog i dinamičkog ispitivanja



Slika 7.13 Pogled na sekundarni nosač br. 5 i susjedne nosače br. 4 i 6 sa označenim mjernim mjestima vertikalnih pomaka (oznaka PV), horizontalnog pomaka (oznaka PH) i relativnih deformacija (oznaka RD)



a)

b)

Slika 7.14 a) Mjerno osjetilo za mjerenje relativnih deformacija i b) mjerno osjetilo za mjerenje vertikalnog pomaka

7.3 Dinamičko ispitivanje

Osim statičkog ispitivanja provedeno je i dinamičko ispitivanje predmetnog nosača s ciljem utvrđivanja njegovih dinamičkih svojstava i određivanja osnovnih dinamičkih parametara kao što su vlastite frekvencije i oblici osciliranja. Ono je provedeno neposredno prije i nakon statičkog ispitivanja kako bi se u slučaju pojave oštećenja nosača provjerio utjecaj statičkog ispitivanja na osnovne dinamičke parametre.

Osnovni cilj zbog kojeg se provode dinamička ispitivanja jest u određivanju utjecaja dinamičkih djelovanja na ljude i proizvodne procese u građevini, te u određivanju promjena strukturnih parametara (krutost) i oštećenja konstrukcija. Dokaz sigurnosti konstrukcije, predviđanje odgovora na poznatu pobudu potresa i vjetra, kontrolna mjerenja razine vibracija, kontrola računskih veličina dinamičkih parametara i poboljšanje računskog modela te kontrola kvalitete i učinkovitosti radova, sve to ulazi u primarnu svrhu provođenja dinamičkog ispitivanja.[2]

Modalna analiza, poznata i kao modalni proračun, ključna je metoda za temeljitu analizu dinamičkog ponašanja konstrukcija. Njezina primarna svrha je rješavanje problema vezanih uz vibraciju konstrukcija te analiza njihovih dinamičkih karakteristika. Dinamičko ponašanje konstrukcije može se opisati koristeći tri ključna parametra: vlastite frekvencije, modalne oblike i prigušenje. Vlastite frekvencije i modalni oblici najčešće se određuju putem numeričkih modela konstrukcija, dok se koeficijenti prigušenja obično određuju empirijski ili eksperimentalno. Proces eksperimentalnog određivanja modalnih parametara konstrukcije, koji uključuje korelaciju dinamičkih svojstava kroz matematički model temeljen na fizikalnim svojstvima konstrukcije dobivenim iz eksperimentalnih mjerenja, naziva se eksperimentalna modalna analiza. Postoje tri glavne metode eksperimentalne modalne analize: klasična eksperimentalna modalna analiza (EMA), operacionalna modalna analiza (OMA) te manje poznata tehnika nazvana udarno-sinkrona modalna analiza (ISMA). [26]

Operacionalna modalna analiza, također poznata kao ambijentalna modalna analiza, omogućuje ispitivanje dinamičkih karakteristika građevinskih konstrukcija bez potrebe za poznatim pobudama. Ova tehnika je posebno korisna za velike konstrukcije koje je teško ili nemoguće pobuditi zbog njihove veličine. Umjesto toga, operacionalna modalna analiza temelji se na mjerenju dinamičkog odgovora same konstrukcije, a ne parametara pobude. Ulazni podaci za analizu su mjereni zapisi odziva konstrukcije, pri čemu se najčešće koriste

zapisi akceleracije, iako se mogu koristiti i druge veličine poput brzine i sile. Različite metode operacionalne modalne analize razvijene su za obradu podataka u frekvencijskom i vremenskom domenu, pružajući tako detaljne uvide u dinamička svojstva konstrukcije. [27]

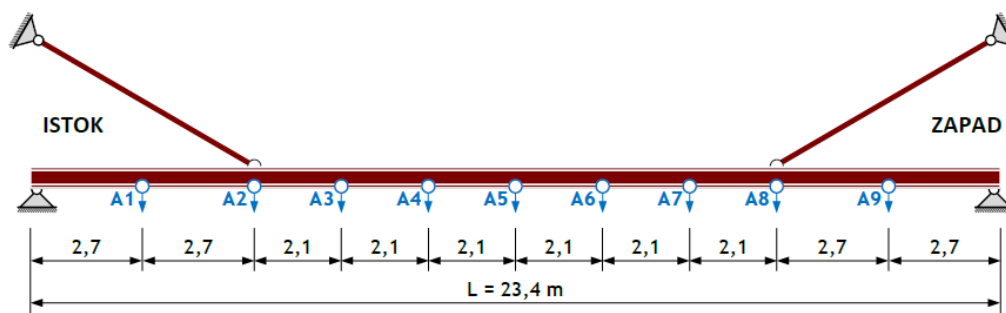
Metode koje se koriste u vremenskom području oslanjaju se na stohastičku identifikaciju podprostora (SSI), dok se metode u frekvencijskom području temelje na dekompoziciji funkcije frekventnog odgovora. Korištenje ovakvih metoda omogućuje bržu i jednostavniju analizu, uz intuitivniji pristup. Analiza podataka uključuje korištenje funkcija spektralne gustoće, što olakšava razumijevanje dinamičkog ponašanja konstrukcije i omogućuje kontrolu postupka u svakom koraku.[28]

Kod dinamičkog ispitivanja predmetnog nosača određivanje osnovnih dinamičkih parametara provodi se metodom dekompozicije frekventnog područja (eng. FDD – *Frequency Domain Decomposition*) koja spada u metode razvijene u frekvencijskom području. Metoda dekompozicije frekventnog područja FDD (eng. *Frequency Domain Decomposition*) jest brza i efikasna metoda u određivanju vlastitih frekvencija i modalnih oblika te se temelji na dekompoziciji odziva konstrukcijskog sustava na niz neovisnih sustava s jednim stupnjem slobode. Postupak se temelji na dekompoziciji singularne vrijednosti (SVD-*Singular Value Decomposition*) matrice autospektralnih gustoća snage odgovora konstrukcije. Uz pretpostavke da funkcija pobude odgovara bijelom šumu u promatranom spektralnom opsegu, da su prigušenja mala i da su modalni oblici geometrijski ortogonalni. Singularne vrijednosti predstavljaju autospektralne gustoće jednostupanjskog sustava, a singularni vektori modalne oblike. Vlastite su frekvencije određene kao rezonantni vrhovi zapisa singularnih vrijednosti autospektralnih gustoća. [2,28,29]

Glavni nedostatak spomenute metode leži u nepotpunoj identifikaciji modalnih parametara. Budući da se za svaki pojedini modalni oblik koristi samo diskretna frekvencija, nemoguće je procijeniti prigušenje konstrukcije. Unatoč tome, zbog svoje računalne efikasnosti, FDD se može jednostavno primijeniti za evaluaciju procijenjenih modalnih oblika na terenu tijekom mjerenja. Na taj način omogućuje se pravovremeno uočavanje nedostataka u zapisima i osigurava pouzdana identifikacija modalnih parametara. [28]

Kako bi se odredili dinamički parametri konstrukcije – koeficijent prigušenja, vlastite frekvencije i oblici titranja, mjerene su akceleracije pri ambijentalnim pobudama u vertikalnom smjeru u ravnini donjeg pojasa predmetnog nosača. Akceleracije su mjerene na 9 mjernih mjesta što ukazuje na ukupno 9 mjernih stupnjeva slobode. Mjerna mjesta

prikazana su na slici 7.15 te su označena oznakama od A1 do A9. Na mjernim mjestima s oznakama A1 i A5 prilikom mjerenja bili su postavljeni referentni akcelerometri.



Slika 7.15 Prikaz mjernih mjesta za dinamičko ispitivanje s naznačenim akcelerometrima

Mjerenje se provodi na način da se u svako mjerno mjesto postavljaju akcelerometri u vertikalnom smjeru (z) te se mjere akceleracije na tom mjernom mjestu i na referentnim mjernim mjestima u trajanju od 128 sekundi. Nakon što je provedeno mjerenje na jednom mjernom mjestu, akcelerometri se pomiču na sljedeće mjerno mjesto, pri čemu referentni akcelerometri ostaju nepomični tijekom cijelog ispitivanja. Takav se postupak ponavlja za svaku točku mjernog mjesta.

Nakon izmjerenih akceleracija prikupljaju se zapisi akceleracija u vremenu i one se pomoću Fourierove transformacije prikazuju u frekvencijskoj domeni. Na samom kraju određuju se vlastite frekvencije osciliranja konstrukcije dok se određivanje modalnih oblika provodi već spomenutom metodom dekompozicije frekventnog područja.

Za mjerenje akceleracije u vertikalnim smjeru predmetnog nosača korišteni su akcelerometri naziva PCB Piezotronics 393B31 (slika 7.16) i osjetljivosti 1000 mV/g te sustav za prikupljanje podataka i analizator Bruel & Kjaer 3560C (slika 7.17) s pripadnim računalnim programom.



Slika 7.16 Akcelerometar naziva PCB Piezotronics 393B31[30]



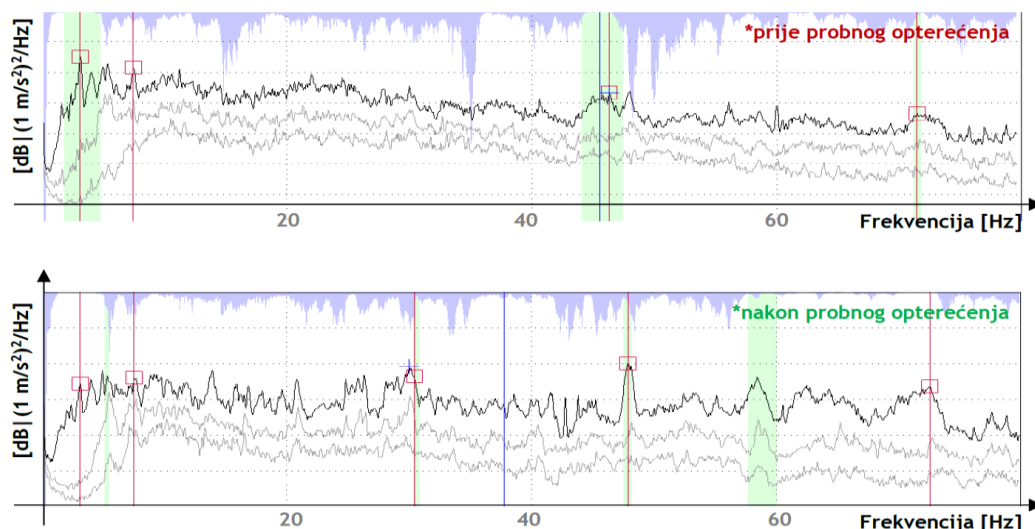
Slika 7.17 Sustav za prikupljanje podataka i analizator Bruel & Kjaer 3560C



Slika 7.18 Pogled na akcelerometre za vrijeme dinamičkog ispitivanja

Opisano mjerenje u svrhu dinamičkog ispitivanja konstrukcije provedeno je 2 puta, pri čemu se prvim putom podrazumijeva neposredno prije nanošenja statičkog probnog opterećenja, a drugi put nakon rasterećenja krovne konstrukcije.

Zapisi singularnih vrijednosti matrica spektralnih gustoća za dinamička ispitivanja prije i nakon statičkog probnog opterećenja iz kojih se određuju vlastite frekvencije kao rezonantni vrhovi prikazani su na slici 7.19.



Slika 7.19 Zapisi singularnih vrijednosti matrica spektralnih gustoća s označenim eksperimentalno određenim vlastitim frekvencijama

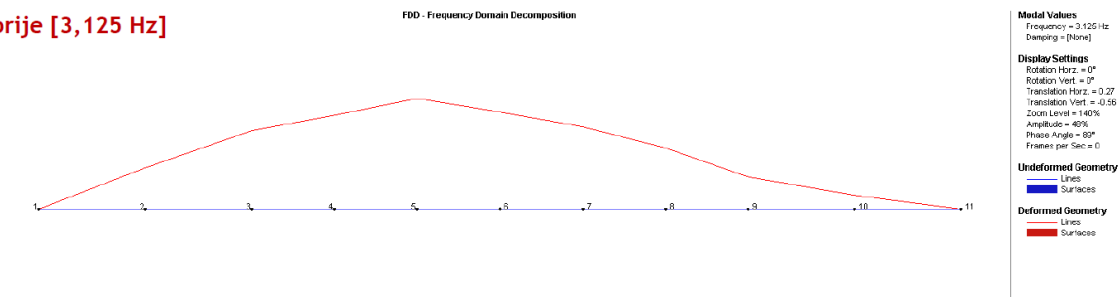
Nadalje, u tablici 7.4 prikazane su eksperimentalno određene vlastite frekvencije prije i nakon probnog opterećenja, zajedno s pripadajućim oblicima osciliranja. Promjena vlastite frekvencije u istoj tablici izražena je u postocima te predstavlja omjer izmjerenih vlastitih vrijednosti prije i nakon probnog opterećenja.

Tablica 7.4 Rezultati mjerenja vlastitih frekvencija prije i nakon statičkog ispitivanja s pripadajućim oblicima osciliranja

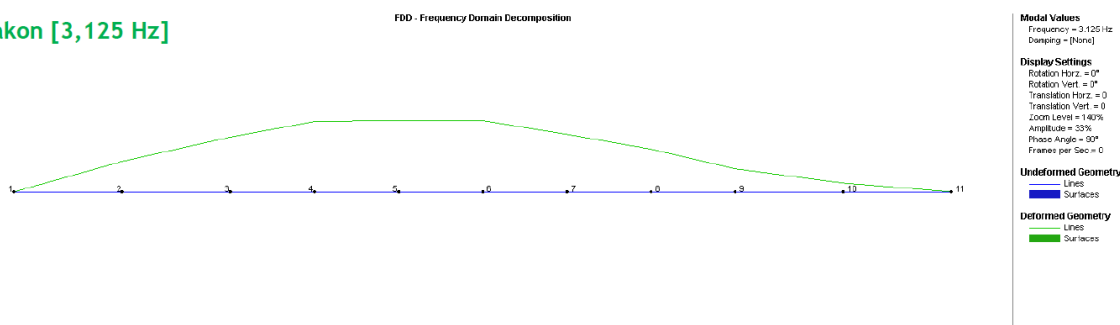
Ton	Vlastita frekvencija [Hz]		Promjena vlastite frekvencije [%]	Pripadajući oblik titranja
	Prije probnog opterećenja	Nakon probnog opterećenja		
TON 1	3,125	3,125	0,00	Slika 7.20
TON 2	7,438	7,500	0,83	Slika 7.21
TON 3	/	30,44	/	Slika 7.22
TON 4	46,31	47,88	3,39	Slika 7.23
TON 5	71,44	72,56	1,69	Slika 7.24
TON 6	99,94	100,0	0,06	Slika 7.25

Na slikama u nastavku prikazani su eksperimentalno određeni oblici titranja prije i nakon probnog opterećenja.

***prije [3,125 Hz]**

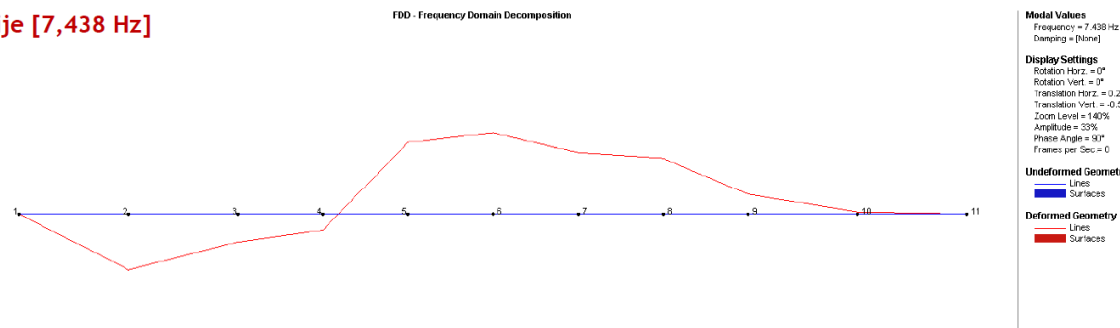


***nakon [3,125 Hz]**

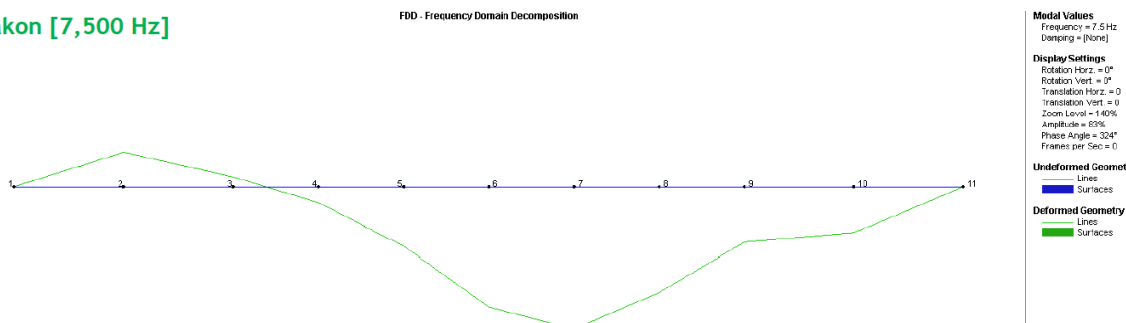


Slika 7.20 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 1

***prije [7,438 Hz]**

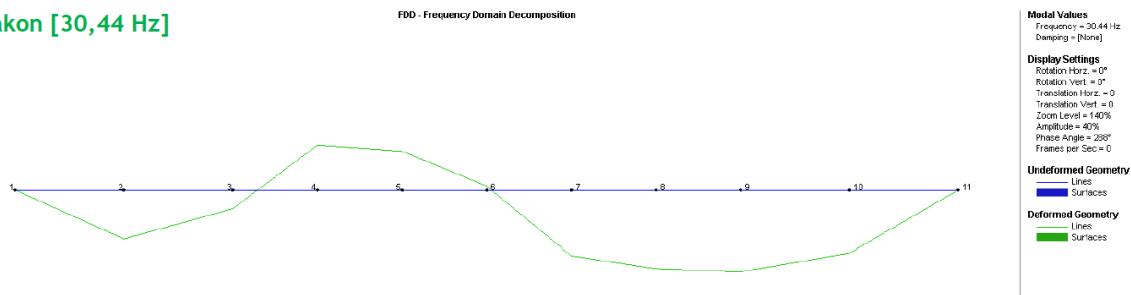


***nakon [7,500 Hz]**



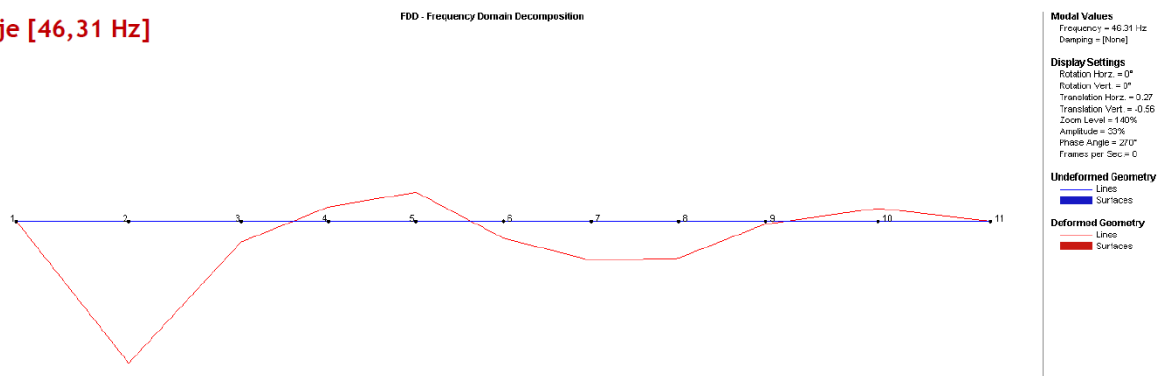
Slika 7.21 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 2

*nakon [30,44 Hz]

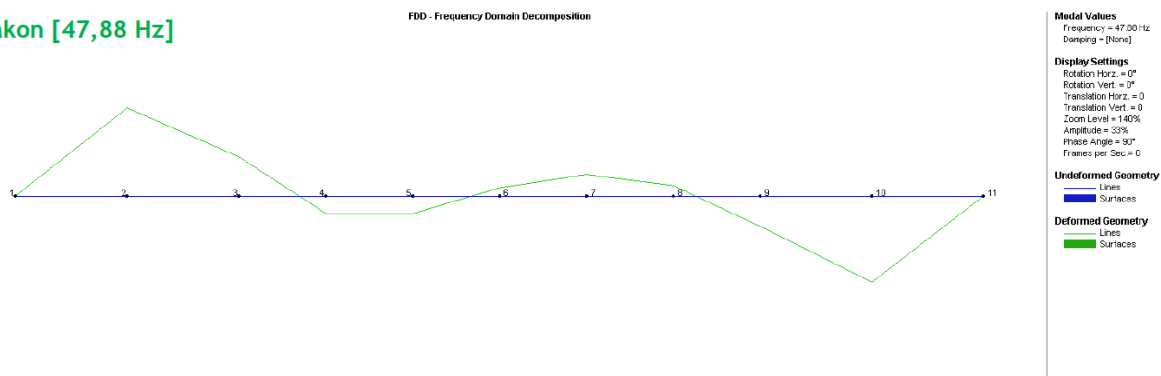


Slika 7.22 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 3

*prije [46,31 Hz]

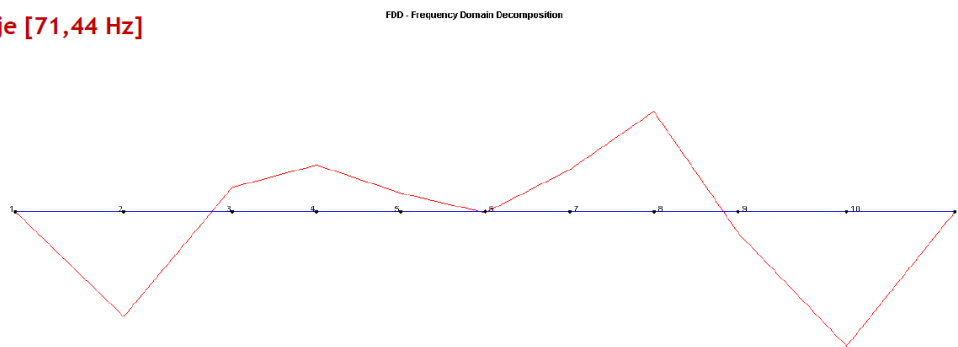


*nakon [47,88 Hz]



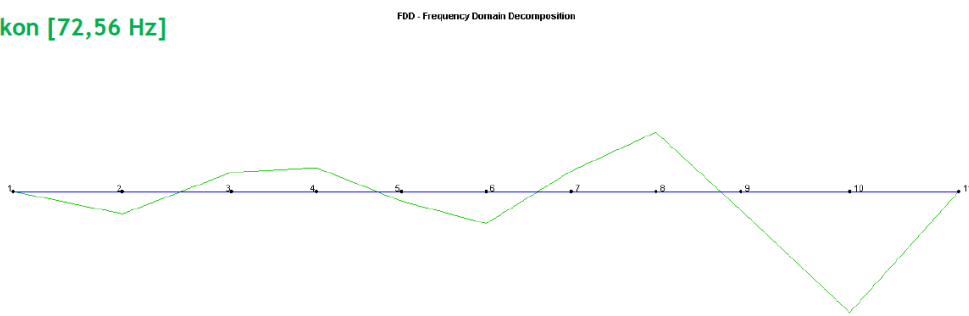
Slika 7.23 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 4

*prije [71,44 Hz]



Modal Values
 Frequency = 71.44 Hz
 Damping = [None]
Display Settings
 Rotation Horiz. = 0°
 Rotation Vert. = 0°
 Translation Horiz. = -0.27
 Translation Vert. = -0.56
 Zoom Level = 140%
 Amplitude = 40%
 Phase Angle = 270°
 Frames per Sec = 0
Undeformed Geometry
 Lines
 Surfaces
Deformed Geometry
 Lines
 Surfaces

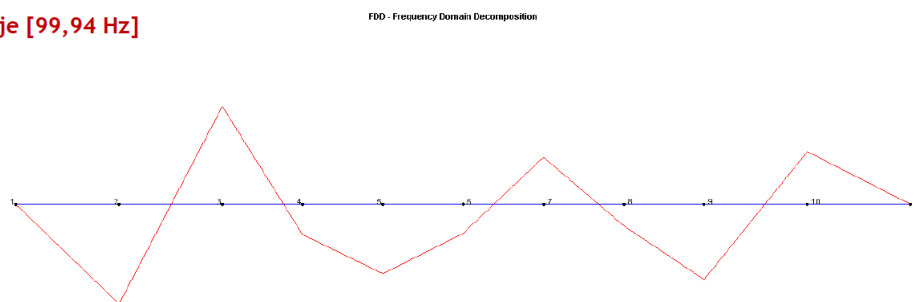
*nakon [72,56 Hz]



Modal Values
 Frequency = 72.56 Hz
 Damping = [None]
Display Settings
 Rotation Horiz. = 0°
 Rotation Vert. = 0°
 Translation Horiz. = 0
 Translation Vert. = 0
 Zoom Level = 140%
 Amplitude = 53%
 Phase Angle = 270°
 Frames per Sec = 0
Undeformed Geometry
 Lines
 Surfaces
Deformed Geometry
 Lines
 Surfaces

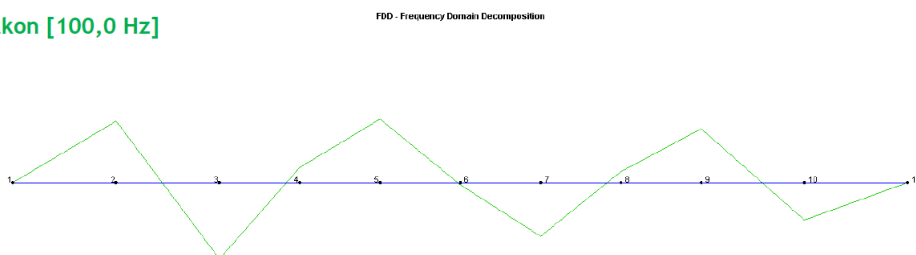
Slika 7.24 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 5

*prije [99,94 Hz]



Modal Values
 Frequency = 99.94 Hz
 Damping = [None]
Display Settings
 Rotation Horiz. = 0°
 Rotation Vert. = 0°
 Translation Horiz. = -0.27
 Translation Vert. = -0.56
 Zoom Level = 140%
 Amplitude = 40%
 Phase Angle = 270°
 Frames per Sec = 0
Undeformed Geometry
 Lines
 Surfaces
Deformed Geometry
 Lines
 Surfaces

*nakon [100,0 Hz]



Modal Values
 Frequency = 100 Hz
 Damping = [None]
Display Settings
 Rotation Horiz. = 0°
 Rotation Vert. = 0°
 Translation Horiz. = 0
 Translation Vert. = 0
 Zoom Level = 140%
 Amplitude = 53%
 Phase Angle = 270°
 Frames per Sec = 0
Undeformed Geometry
 Lines
 Surfaces
Deformed Geometry
 Lines
 Surfaces

Slika 7.25 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 6

Dinamičko ispitivanje sastavnih elemenata složenih konstrukcija predstavlja izazov zbog mnogobrojnih interakcija unutar cijelog sustava. Vibracije se mogu prenositi kroz cijelu konstrukciju, što može utjecati na detekciju osnovnih parametara poput oblika osciliranja i vlastitih frekvencija koji se mogu mijenjati zbog međudjelovanja različitih dijelova konstrukcija. Prilikom postavljanja senzora za mjerenje dinamičkih svojstava na mostu ili zgradi s elementima velike krutosti, kao što su spojevi zidova i ploča, postižu se znatno precizniji rezultati u odnosu na predmetnu čeličnu konstrukciju. To je zbog činjenice da se mjere najveće mase, najveće krutosti i dominantna mjesta konstrukcije. Dok pri ispitivanju predmetnog nosača čelične hale, svaka vibracija uzrokovana vanjskim utjecajem, poput rada stroja u proizvodnji ili vibracija od hoda po krovu konstrukcije, može utjecati na rezultate. Zbog toga ispitivanje samog nosača predstavlja izazov u razdvajanju vibracija koje potječu od samog nosača, broda ili cijele proizvodne hale te njegova analiza pruža ograničenu sliku dinamičkog ponašanja konstrukcije.

8. NUMERIČKA ANALIZA KONSTRUKCIJE

Numerički model i njegova analiza provedena je programskim paketom SCIA Engineer 24.0. Izrađen je model konačnih elemenata konstrukcije u kojem su ulazni podaci uzeti iz glavnog projekta konstrukcije. Za faze probnog opterećenja korištene su ranije prikazane ukupne mase spremnika s vodom te sheme opterećenja prikazane su u gore navedenim poglavljima.

Iz numeričkog su modela određeni vertikalni pomaci (progibi) u_z i naprezanja σ u određenim točkama za odgovarajuće faze statičkog probnog opterećenja te su prikazani dijagrami momenata savijanja.

Odabrani se nosač povrh svega navedenog proračunava na dodatno stalno opterećenje, opterećenje snijegom i opterećenje vjetrom.

8.1 Opis numeričkog modela

Sekundarni nosač u modelu je modeliran kao greda pomoću naredbe *Beam* s rasponom duljine 23,4 metra. U stvarnosti su sekundarni nosači izvedeni od varenih I profila, sa pojasnicama od limova 180/14 mm i hrptom od lima 472/8 mm od čelika S235JR sa normativnom granicom 235 N/mm². Geometrijske karakteristike i svojstva predmetnog nosača koja su se primijenila u Scia Engineer programskom paketu nalaze se na slici 8.1.

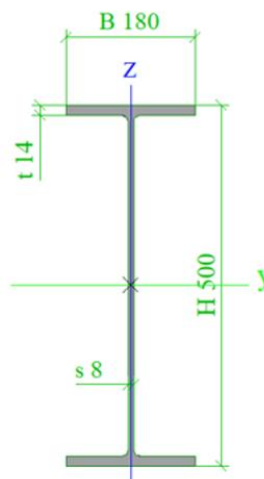
Sekundarni nosač je u vertikalnom smjeru pridržan pomoću vlačnih dijagonala koje su zataknete na gornji pojas rešetke. Njihove geometrijske karakteristike i svojstva koja su se primijenila u Scia Engineer programskom paketu nalaze se na slici 8.2 i na slici 8.3. S jedne strane su vlačne dijagonale izvedene od punih okruglih profila Ø34 mm (na slici 8.4 su prikazane kao zatega_1 i zatega_2), kvalitete čelika S235JR sa normativnom granicom 235 N/mm², dok su s druge strane nosača zatege izvedene od jednake kvalitete čelika, ali s većim okruglim profilima promjera Ø70 mm (na slici 8.4 su prikazane kao zatega_3 i zatega_4).

Prema projektu je predviđena jednostruka zatega promjera 34 mm s obje strane sekundarnog nosača. Međutim, na terenu je uočeno da je zatega s desne strane nosača

izvedena kao dupla, što je jasno vidljivo na slici broj 8.6 b) što je ujedno i razlog modeliranja zatega većeg promjera.

Type	I	
Detailed	500; 180; 14; 8; 8	
Formcode	1 - I section	
Shape type	Thin-walled	
Item material	S 235	
Fabrication	rolled	
Flexural buckling y-y, Flexural buckling z-z	a	b

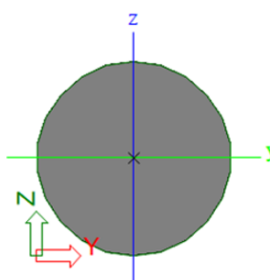
A	8.8720e-03	m ²
Ay	4.6879e-03	m ²
Az	4.0346e-03	m ²
AL	1.6902e+00	m ² /m
AD	1.6902e+00	m ² /m
cYUCS	90	mm
cZUCS	250	mm
α	0.00	deg
Iy	3.7086e-04	m ⁴
Iz	1.3630e-05	m ⁴
Iy	204	mm
Iz	39	mm
Wely	1.4834e-03	m ³
Welz	1.5145e-04	m ³
Wply	1.6834e-03	m ³
Wplz	2.3468e-04	m ³
Mply+	3.96e+05	Nm
Mply-	3.96e+05	Nm
Mplz+	5.51e+04	Nm
Mplz-	5.51e+04	Nm
dy	0	mm
dz	0	mm
It	4.2256e-07	m ⁴
Iw	8.0354e-07	m ⁶
βy	0	mm
βz	0	mm



Slika 8.1 Karakteristike predmetnog čeličnog nosača

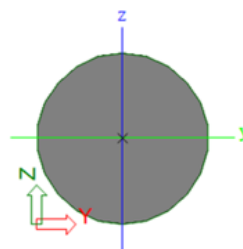
Type	RD34	
Formcode	11 - Full circular section	
Shape type	Thick-walled	
Item material	S 235	
Fabrication	rolled	
Flexural buckling y-y, Flexural buckling z-z	c	c

A	9.0746e-04	m ²
Ay	8.1841e-03	m ²
Az	8.1772e-03	m ²
AL	1.0653e-01	m ² /m
AD	1.0681e-01	m ² /m
cYUCS	17	mm
cZUCS	17	mm
α	0.00	deg
Iy	6.4223e-07	m ⁴
Iz	6.4223e-07	m ⁴
Iy	27	mm
Iz	27	mm
Wely	3.7778e-05	m ³
Welz	3.7778e-05	m ³
Wply	6.4474e-06	m ³
Wplz	6.4474e-06	m ³
Mply+	1.54e+03	Nm
Mply-	1.54e+03	Nm
Mplz+	1.54e+03	Nm
Mplz-	1.54e+03	Nm
dy	0	mm
dz	0	mm
It	1.3165e-06	m ⁴
Iw	1.3458e-24	m ⁶
βy	0	mm
βz	0	mm

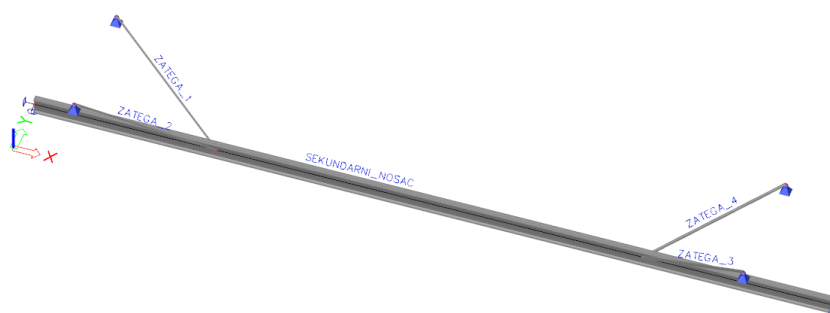


Slika 8.2 Karakteristike vlačnih zatega punih okruglih profila Ø34 mm

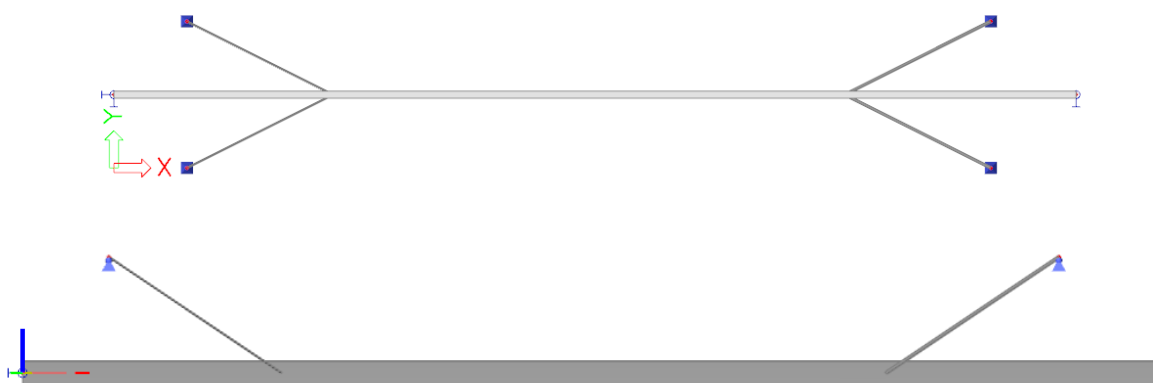
A	3.8465e-03	m ²
Ay	3.4706e-03	m ²
Az	3.4696e-03	m ²
AL	2.1933e-01	m ² /m
AD	2.1990e-01	m ² /m
cYUCS	35	mm
cZUCS	35	mm
a	0.00	deg
Iy	1.1539e-06	m ⁴
Iz	1.1539e-06	m ⁴
Iy	17	mm
Iz	17	mm
Wely	3.2968e-05	m ³
Welz	3.2968e-05	m ³
Wply	5.6265e-05	m ³
Wplz	5.6265e-05	m ³
Mply+	1.34e+04	Nm
Mply-	1.34e+04	Nm
Mplz+	1.34e+04	Nm
Mplz-	1.34e+04	Nm
dy	0	mm
dz	0	mm
It	2.3653e-06	m ⁴
Iw	1.0249e-22	m ⁶
βy	0	mm
βz	0	mm



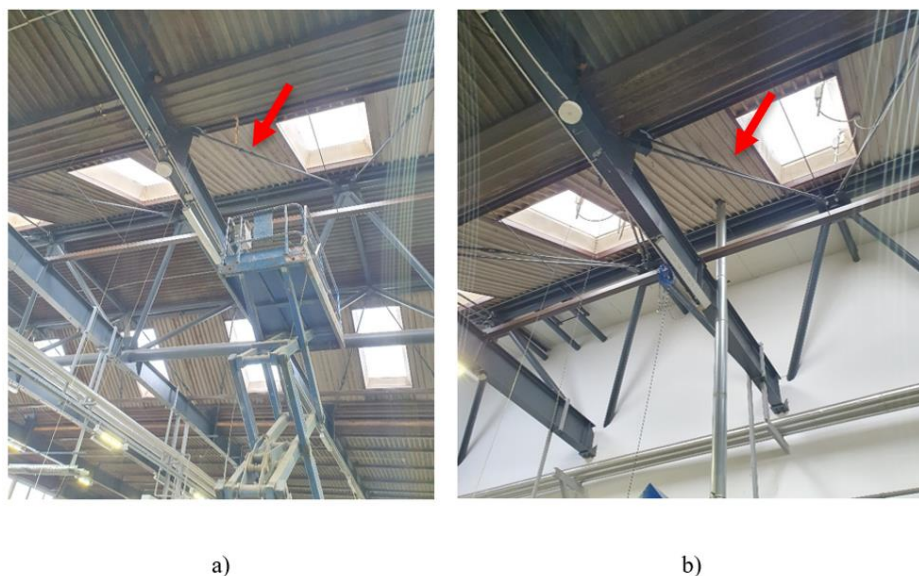
Slika 8.3 Karakteristike vlačnih zatega punih okruglih profila $\varnothing 70$ mm



Slika 8.4 Prikaz numeričkog modela predmetnog nosača s naznačenim vlačnim zategama



Slika 8.5 Prikaz numeričkog modela predmetnog nosača

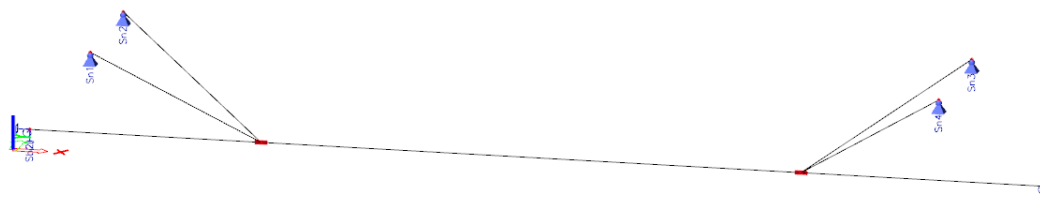


Slika 8.6 a) Prikaz jednostruke vlačne zatege i b) prikaz dvostruke vlačne zatege

Na prikazanoj slici u nastavku (slika 8.7), označeni su oslonci na analiziranom nosaču, kao i vlačne zatege, modelirane u softverskom paketu Scia Engineer 24.0. Uz to, priložena je i tablica koja sadrži detaljne karakteristike svih oslonaca.

Tablica 8.1 Karakteristike oslonaca

Name	Node	System	Type	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Sn1	N8	GCS	Standard	Rigid	Rigid	Rigid	Free	Free	Free
Sn2	N10	GCS	Standard	Rigid	Rigid	Rigid	Free	Free	Free
Sn3	N18	GCS	Standard	Rigid	Rigid	Rigid	Free	Free	Free
Sn4	N16	GCS	Standard	Rigid	Rigid	Rigid	Free	Free	Free
Sb1	N20	GCS	Standard	Free	Rigid	Rigid	Free	Free	Free
Sb2	N19	GCS	Standard	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Free	Free



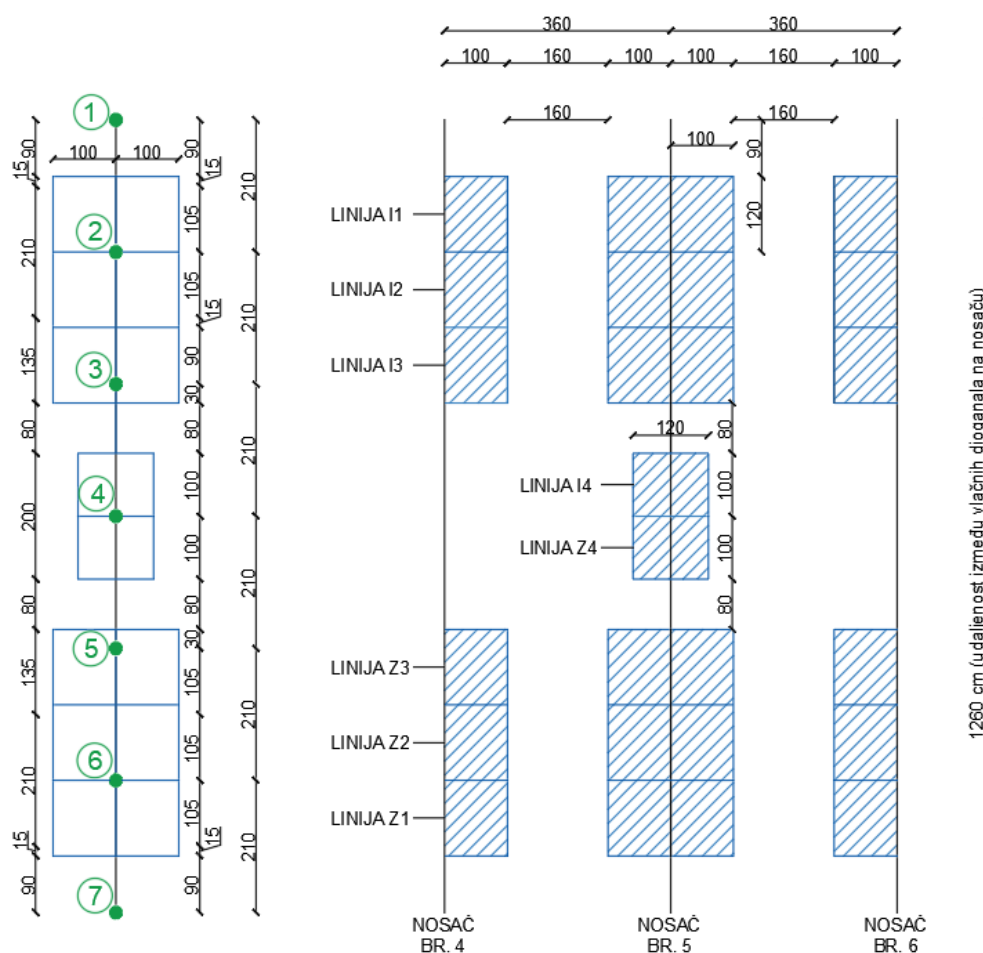
Slika 8.7 Sekundarni nosač s naznačenim osloncima

Unatoč tome što je jednostruka zatega predviđena projektom, proračun će se prvenstveno bazirati na uvjetima zatečenim na terenu, odnosno s dvostrukom zategom. Međutim, za cjelovitost analize, prikazat ćemo i rezultate proračuna koji bi se dobili da je izvedeno prema projektnoj specifikaciji, odnosno s jednostrukom zategom.

U nastavku će u poglavljima 8.2 i 8.3 biti prikazana statička analiza sa zategama većeg promjera s jedne strane nosača i s jednostrukim zategom s obje strane nosača. Svaka analiza će detaljno opisati metode korištene za proračun, ulazne podatke, te prikazati rezultate dobivene za svaki od scenarija.

8.2 Statička analiza numeričkog modela sa zategama većeg promjera s jedne strane nosača

U numeričkom modelu spremnici su modelirani kao koncentrirane sile raspoređene u 7 čvorova na mjestima gdje se podrožnice oslanjaju na sekundarne nosače. Razmak između čvorova, u koje smo koncentrirali opterećenje, iznosi 2,1 metar. Prikaz čvorova i raspored spremnika napunjenih vodom prikazani su na slici 8.8. Kao probno opterećenje uzeti su spremnici napunjeni vodom kojima je opterećen predmetni sekundarni nosač. Raspodjela opterećenja po čvorovima prikazana je u 8 faza ovisno o količini vode u spremnicima. Faze su opisane u prethodnom sedmom poglavlju.



Slika 8.8 Prikaz čvorova i raspored spremnika napunjenih vodom

U nastavku slijedi prikaz svih faza opterećenja po čvorovima koja su se primijenila prilikom izrade numeričkog modela.

- **FAZA 1**

U fazi 1 se u svim spremnicima i u svim linijama od I1 do Z1 nalazi 100 litara vode.

Tablica 8.2 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 1

ČVOR	IZNOSI OPTEREĆENJA
ČVOR 1	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 = 0,3\text{ kN}$
ČVOR 2	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 = 4,2\text{ kN}$
ČVOR 3	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 = 2,7\text{ kN}$
ČVOR 4	$1,2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 = 2,4\text{ kN}$
ČVOR 5	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 = 2,7\text{ kN}$
ČVOR 6	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 = 4,2\text{ kN}$
ČVOR 7	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ kN/m}^2 = 0,3\text{ kN}$

- **FAZA 2**

U fazi 2 se u svim spremnicima i u svim linijama od I1 do Z1 nalazi 200 litara vode.

Tablica 8.3 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 2

ČVOR	IZNOSI OPTEREĆENJA
ČVOR 1	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 = 0,6\text{ kN}$
ČVOR 2	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 = 8,4\text{ kN}$
ČVOR 3	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 = 5,4\text{ kN}$
ČVOR 4	$1,2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 = 4,8\text{ kN}$
ČVOR 5	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 = 5,4\text{ kN}$
ČVOR 6	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 = 8,4\text{ kN}$
ČVOR 7	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2 = 0,6\text{ kN}$

- **FAZA 3**

U fazi 3 se u svim spremnicima i u svim linijama od I1 do Z1 nalazi 300 litara vode.

Tablica 8.4 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 3

ČVOR	IZNOSI OPTEREĆENJA
ČVOR 1	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 = 0,9\text{ kN}$
ČVOR 2	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 = 12,6\text{ kN}$
ČVOR 3	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 = 8,1\text{ kN}$
ČVOR 4	$1,2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 = 7,2\text{ kN}$
ČVOR 5	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 = 8,1\text{ kN}$
ČVOR 6	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 = 12,6\text{ kN}$
ČVOR 7	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ kN/m}^2 = 0,9\text{ kN}$

- **FAZA 4**

U fazi 4 se nalazi 400 l vode u spremnicima u linijama I1 do I3 i Z1 do Z3 , te se 600 l vode nalazi u spremnicima u linijama I4 i Z4.

Tablica 8.5 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 4

ČVOR	IZNOSI OPTEREĆENJA
ČVOR 1	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 1,2\text{ kN}$
ČVOR 2	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 16,8\text{ kN}$
ČVOR 3	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 10,8\text{ kN}$
ČVOR 4	$1,2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 6\text{ kN/m}^2 = 14,4\text{ kN}$
ČVOR 5	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 10,8\text{ kN}$
ČVOR 6	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 16,8\text{ kN}$
ČVOR 7	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 1,2\text{ kN}$

- FAZA 5

U fazi 5 se nalazi 400 l vode u spremnicima u linijama I2 i I3 te Z2 i Z3, te se 600 l vode nalazi u spremnicima u linijama I4 i Z4. Dok su spremnici u linijama I1 i Z1 ispražnjeni.

Tablica 8.6 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 5

ČVOR	IZNOSI OPTEREĆENJA
ČVOR 1	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 2	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 16,8\text{ kN}$
ČVOR 3	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 10,8\text{ kN}$
ČVOR 4	$1,2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 6\text{ kN/m}^2 = 14,4\text{ kN}$
ČVOR 5	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 10,8\text{ kN}$
ČVOR 6	$1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,05\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 16,8\text{ kN}$
ČVOR 7	0 kN jer je spremnik prazan

- FAZA 6

U fazi 6 se nalazi 400 l vode u spremnicima u linijama I3 i Z3, te se 600 l vode nalazi u spremnicima u linijama I4 i Z4. Dok su spremnici u linijama I1 i I2 te u linijama Z1 i Z2 ispražnjeni.

Tablica 8.7 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 6

ČVOR	IZNOSI OPTEREĆENJA
ČVOR 1	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 2	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 3	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 10,8\text{ kN}$
ČVOR 4	$1,2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 6\text{ kN/m}^2 = 14,4\text{ kN}$
ČVOR 5	$0,15\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 + 1,20\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ kN/m}^2 = 10,8\text{ kN}$
ČVOR 6	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 7	0 kN jer je spremnik prazan

- **FAZA 7**

U fazi 7 se nalazi 600 l vode u spremnicima u linijama I4 i Z4, dok su spremnici od I1 do I3 te od Z1 do Z3 ispražnjeni.

Tablica 8.8 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 7

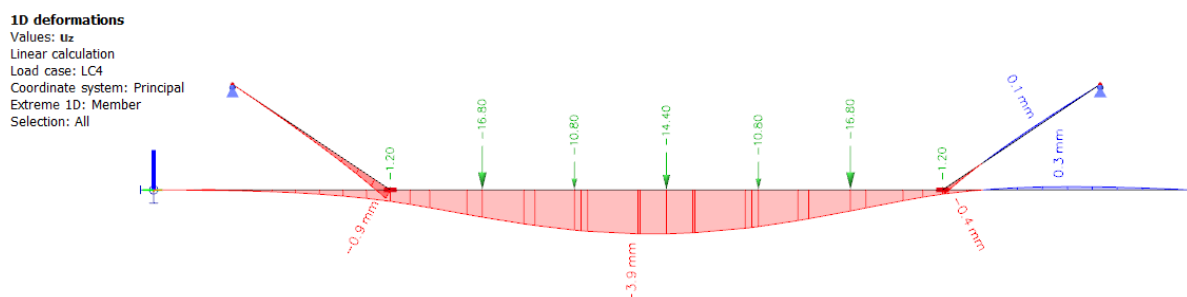
ČVOR	IZNOSI OPTEREĆENJA
ČVOR 1	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 2	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 3	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 4	$1,2 m \times 2 m \times 6 kN/m^2 = 14,4 kN$
ČVOR 5	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 6	0 kN jer je spremnik prazan
ČVOR 7	0 kN jer je spremnik prazan

- **FAZA 8**

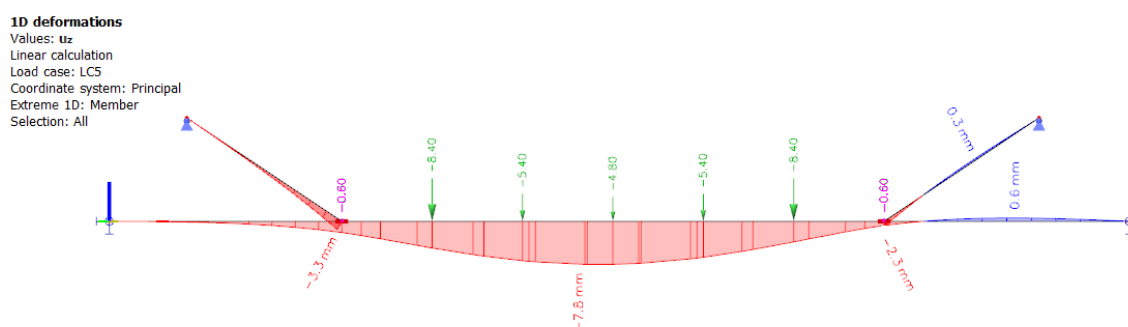
U fazi 8 su svi spremnici ispražnjeni.

8.2.1 Vertikalni pomaci

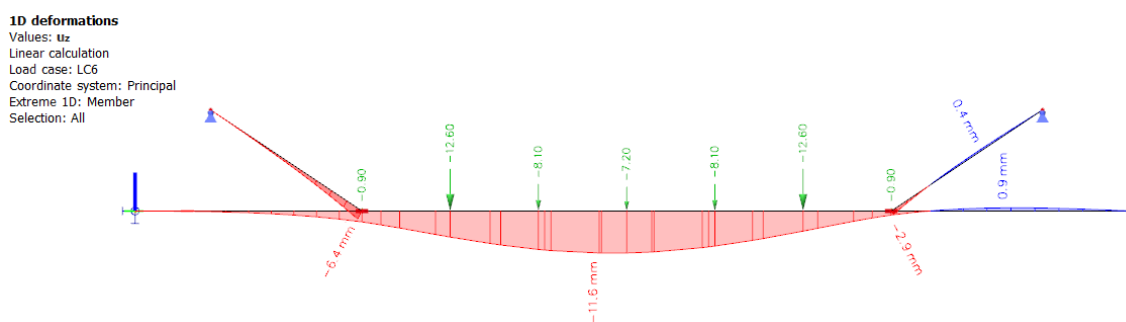
U nastavku na slikama su prikazani iznosi vertikalnog pomaka i iznosi naprezanja za sve faze koji su dobiveni analizom numeričkog modela. Predmetni nosač je podložen maksimalnom opterećenju u fazi broj 4, dok faza 8 predstavlja fazu rasterećenja.



Slika 8.9 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u prvoj fazi statičkog ispitivanja

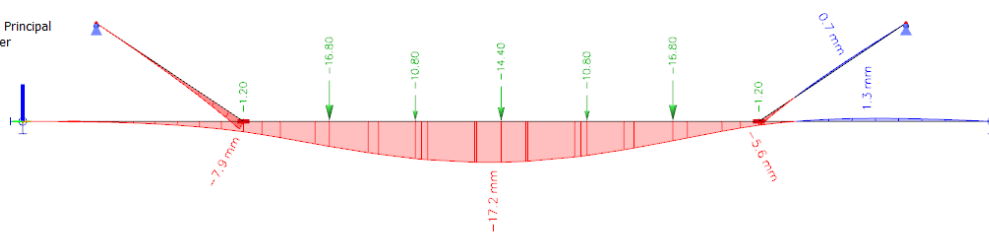


Slika 8.10 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u drugoj fazi statičkog ispitivanja



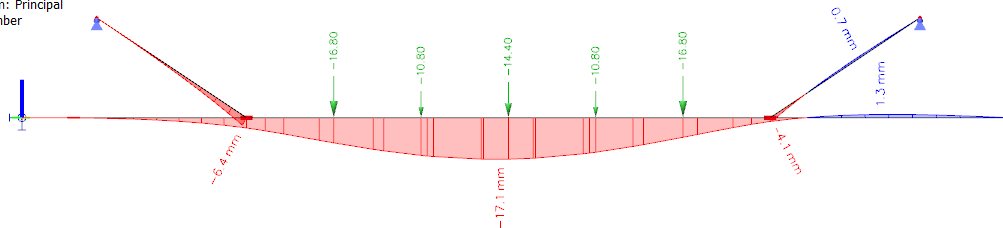
Slika 8.11 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u trećoj fazi statičkog ispitivanja

1D deformations
 Values: uz
 Linear calculation
 Load case: LC7
 Coordinate system: Principal
 Extreme 1D: Member
 Selection: All



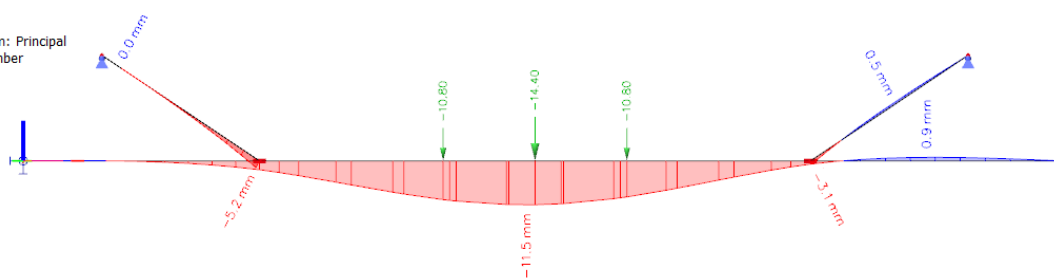
Slika 8.12 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u četvrtoj fazi statičkog ispitivanja

1D deformations
 Values: uz
 Linear calculation
 Load case: LC8
 Coordinate system: Principal
 Extreme 1D: Member
 Selection: All



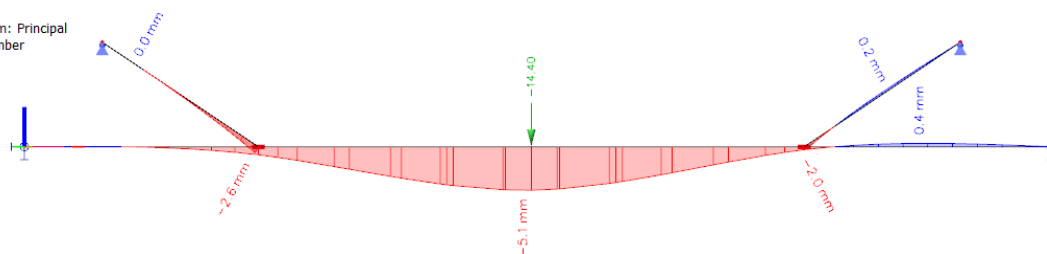
Slika 8.13 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u petoj fazi statičkog ispitivanja

1D deformations
 Values: uz
 Linear calculation
 Load case: LC9
 Coordinate system: Principal
 Extreme 1D: Member
 Selection: All

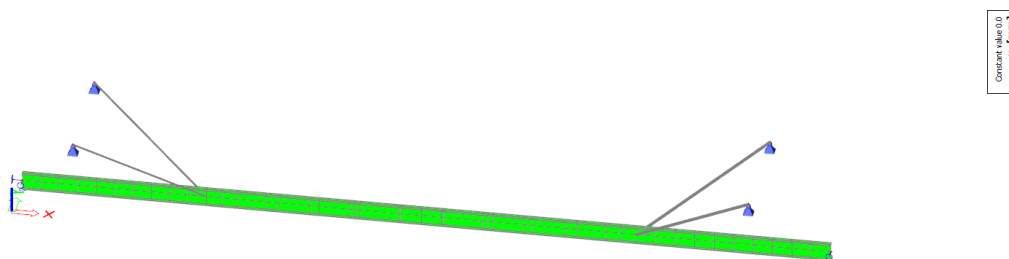


Slika 8.14 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u šestoj fazi statičkog ispitivanja

1D deformations
 Values: uz
 Linear calculation
 Load case: LC10
 Coordinate system: Principal
 Extreme 1D: Member
 Selection: All



Slika 8.15 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u sedmoj fazi statičkog ispitivanja



Slika 8.16 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u osmoj fazi statičkog ispitivanja

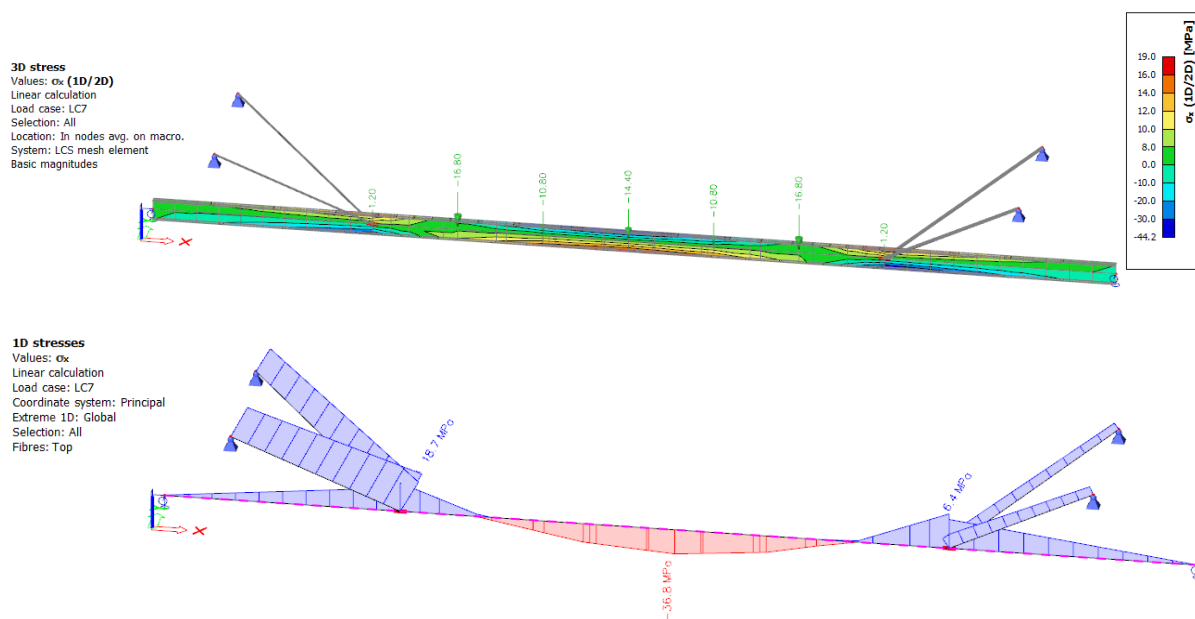
U sljedećoj tablici prikazana su mjerna mjesta i iznosi računskih vertikalnih pomaka (progiba) za predmetni nosač prilikom najopterećenije faze opterećenja.

Tablica 8.9 Maksimalni računski progibi

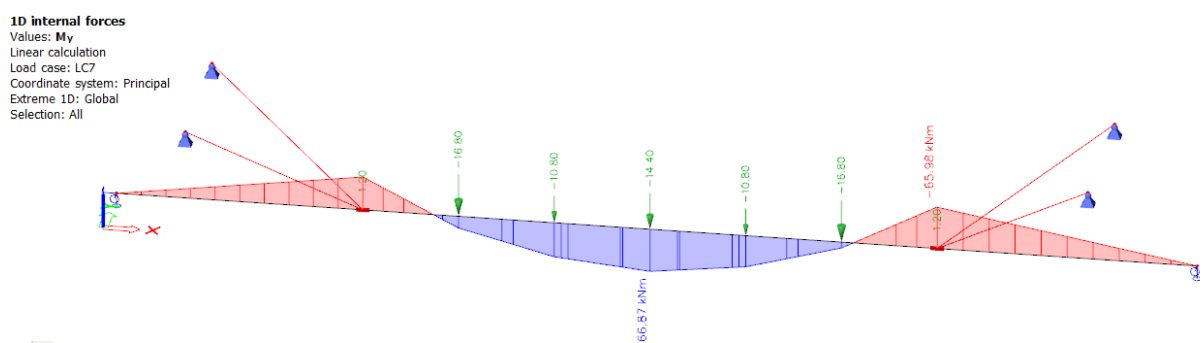
Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Računski progib $w_{r,max}$ [mm]
FAZA 4	5_PV_1	5,60
	5_PV_2	17,20
	5_PV_3	7,90

8.2.2 Naprezanja i relativne deformacije

Prilikom ispitivanja na terenu mjerile su se relativne deformacije u mjernim mjestima koja su prikazana u ranijim poglavljima. Programskim paketom Scia Engineer nije moguće prikazati relativne deformacije koje se mogu dobiti prilikom ispitivanja na terenu, već su one izračunate pomoću Hookovog zakona na temelju naprezanja koja su prikazana na slikama u nastavku. Također su u nastavku prikazani dijagrami momenata savijanja prilikom najopterećenije faze.



Slika 8.17 Dijagram naprezanja σ_x za najopterećeniju fazu – faza 4



Slika 8.18 Maksimalni iznos momenta savijanja za probno opterećenje – faza 4

U sljedećoj tablici 8.10 prikazana su mjerna mjesta i numerički dobiveni rezultati naprezanja, kao i računski određene relativne deformacije za predmetni nosač tijekom najopterećenije faze opterećenja. S obzirom na poznatu vrijednost modula elastičnosti čelika od 210 000 MPa i uz poznatu vrijednost naprezanja, relativna deformacija se lako može izračunati pomoću Hookeovog zakona (1):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

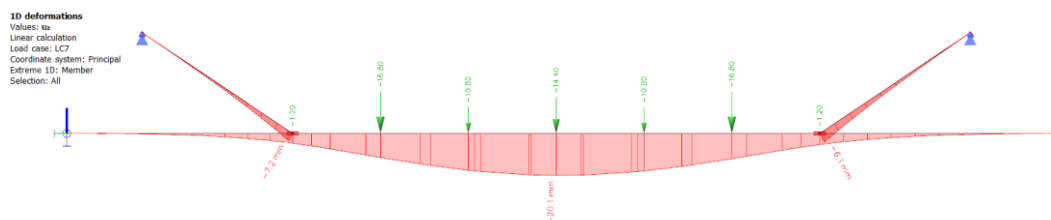
Pri čemu je σ oznaka za naprezanje, ε oznaka za relativnu deformaciju i E oznaka za modul elastičnosti.

Tablica 8.10 Relativne deformacije i naprezanja dobivena u numeričkom modelu

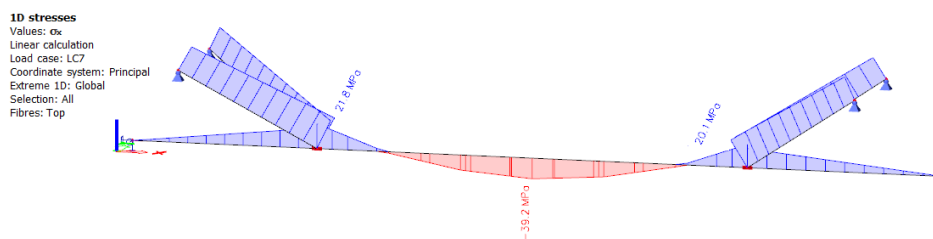
Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Naprezanja pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [N/mm ²]	Relativna deformacija pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [μm/m]
FAZA 4	5_RD_1	18,70	89,05
	5_RD_2	36,80	175,24
	5_RD_3	6,40	30,48

8.3 Statička analiza numeričkog modela s jednostrukim zategama s obje strane nosača

U nastavku na slikama i u tablicama je prikazana analiza modela s jednostrukim zategama s obje strane nosača. Analiza je provedena za najopterećeniju fazu opterećenja, fazu broj 4. Ova faza je kritična jer predstavlja najopterećeniju fazu na predmetni sekundarni nosač, te je od ključne važnosti za sigurnost i stabilnost nosača.



Slika 8.19 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u četvrtoj fazi statičkog ispitivanja – jednostruke zatege



Slika 8.20 Dijagram naprezanja σ_x za najopterećeniju fazu – jednostruke zatege

U sljedećim tablicama prikazana su mjerna mjesta i iznosi računskih progiba, naprezanja i relativnih deformacija za predmetni nosač s jednostrukim zategama prilikom najopterećenije faze opterećenja.

Tablica 8.11 Maksimalni računski progibi za nosač s jednostrukim zategama

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Računski progib $w_{r,max}$ [mm]
FAZA 4	5_PV_1	6,10
	5_PV_2	20,10
	5_PV_3	7,20

S obzirom na poznatu vrijednost modula elastičnosti čelika od 210 000 MPa i uz poznatu vrijednost naprezanja, relativna deformacija se lako može izračunati pomoću Hookeovog zakona.

Tablica 8.12 Relativne deformacije i naprezanja dobivena u numeričkom modelu s jednostrukim zategama

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Naprezanja pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [N/mm ²]	Relativna deformacija pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [μm/m]
FAZA 4	5_RD_1	20,10	95,72
	5_RD_2	39,20	186,67
	5_RD_3	21,80	103,81

U sklopu ove analize, proveli smo dvije statičke analize nosača: jednu prema projektnoj dokumentaciji koja predviđa jednostruku zategu promjera 34 mm s obje strane nosača, i drugu prema stvarnim uvjetima zatečenim na terenu gdje su zatege s jedne strane izvedene

kao jednostruke promjera 34 mm, a s druge strane kao zatege promjera 70 mm. Analize su napravljene za najopterećeniju fazu, fazu broj 4, kako bi se precizno ocijenile strukturne karakteristike i sigurnost nosača. U sljedećoj tablici prikazani su iznosi naprezanja i progiba za četvrtu fazu opterećenja, zajedno s usporedbom rezultata dobivenih na numeričkom modelu s jednostrukim zategama promjera 34 mm i na modelu s dvostrukim zategama promjera 70 mm.

Tablica 8.13 Prikaz naprezanja i progiba za oba numerička modela

Faza opterećenja	Numerički model	Mjerno mjesto	Naprezanja pri maksimalnom opterećenju – faza 4 [N/mm ²]	Računski progib $w_{r,max}$ [mm]
FAZA 4	Model s jednostrukim zategama	5_1	20,10	6,10
		5_2	39,20	20,10
		5_3	21,80	7,20
	Model s dvije dvostruke zatege	5_1	18,70	5,60
		5_2	36,80	17,20
		5_3	6,40	7,90

Rezultati analiza pokazuju značajne razlike u progibu i naprezanjima nosača između dvije verzije zatega. Kod verzije s jednostrukom zategom primjećuje se veći progib u sredini nosača u odnosu na verziju s dvostrukim zategama. Razlog tome je što jednostruka zatega manjeg promjera ima manju krutost što znači da zatega manje doprinosi ukupnoj otpornosti strukture na deformacije te se one više istežu jer nose uzdužnu silu. Zbog toga dolazi do većeg progiba i unutarnjih naprezanja u sredini nosača.

S druge strane dvostruke zatege većeg promjera značajno povećavaju krutost konstrukcije, smanjujući progib za oko 3 milimetra u sredini nosača. Veća krutost omogućava bolju podršku i ravnomjerniju distribuciju opterećenja, smanjujući koncentraciju naprezanja. Na mjestu spajanja, jednostruke zatege stvaraju veća lokalna naprezanja zbog manje kontaktne površine i krutosti, što rezultira većim deformacijama. Dvostruke zatege, s većom kontakt površinom i krutošću, omogućuju bolji prijenos i distribuciju sila, smanjujući lokalna naprezanja i deformacije te osiguravajući sigurniju i stabilniju strukturu nosača. Raspodjela naprezanja u spoju zatega i nosača povoljnija je kod dvostruke zatega.

9. USPOREDBA I ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNE I NUMERIČKE ANALIZE

Parametre dobivene eksperimentalnim ispitivanjem predmetnog nosača treba usporediti s rezultatima dobivenim numeričkim modelom. U nastavku je prikazana usporedba rezultata eksperimentalne analize predmetnog nosača pod probnim opterećenjem s rezultatima dobivenim analizom numeričkog modela kroz tablice. U tablici 9.1 su prikazani maksimalni izmjereni pomaci tijekom najopterećenije faze opterećenja, uz pripadajuće numerički dobivene vrijednosti progiba.

Tablica 9.1 Usporedba eksperimentalnih i računski dobivenih pomaka

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Izmjerni progib $w_{e,max}$ [mm]	Računski progib $w_{r,max}$ [mm]	Razlika [mm] = $w_{e,max} - w_{r,max}$	Razlika [%] = $\frac{w_{e,max} - w_{r,max}}{w_{e,max}} \cdot 100$
FAZA 4	5_PV_1	5,90	5,60	0,30	5,08
	5_PV_2	16,45	17,20	- 0,75	- 4,36
	5_PV_3	8,97	7,90	1,07	11,93

Tablica 9.2 Usporedba eksperimentalnih i računski dobivenih naprezanja

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Izmjerena naprezanja $\sigma_{e,max}$ [MPa]	Računska naprezanja $\sigma_{r,max}$ [MPa]	Razlika [MPa] = $\sigma_{r,max} - \sigma_{e,max}$	Razlika [%] = $\frac{\sigma_{r,max} - \sigma_{e,max}}{\sigma_{r,max}} \cdot 100$
FAZA 4	5_RD_1	14,80	18,70	3,90	20,86
	5_RD_2	35,50	36,80	1,30	3,53
	5_RD_3	5,43	6,40	0,97	15,16

U tablici 9.2, prikazana je usporedba izmjerenih i računalno dobivenih rezultata naprezanja. Budući da se naprezanja na terenu nisu izravno mjerila, već su određena putem mjerenja relativnih deformacija i primjenom Hookeovog zakona uz poznati modul elastičnosti čelika, izračunata su i prikazana naprezanja

Ključni kriterij koji se mora ispuniti jest da izmjerene deformacije i progibi budu manji ili jednaki od onih dobivenih numeričkom analizom. U prethodnoj tablici 9.1 primjećujemo da su računski vertikalni pomaci na spojevima sekundarnog nosača s vlačnim zategama (5_PV_1 i 5_PV_3) manji od stvarnih izmjerenih vertikalnih pomaka, dok je računski progib u sredini raspona nosača (5_PV_2) veći od izmjerenog, iako je odstupanje između tih rezultata relativno malo i ne prelazi 15%. Potencijalni izvori razlika i nesigurnosti između računskih i izmjerenih rezultata (vertikalnih pomaka i naprezanja) proizlaze iz činjenice da numerički model obuhvaća samo nosač s vlačnim zategama, bez uključivanja susjednih nosača (nosača 4 i 6) na koje također djeluje probno opterećenje kojim su bili opterećeni. Također, nije uključeno modeliranje trobridnih rešetki i glavnog nosivog sustava na koji se predmetni sekundarni nosač oslanja tako da njihov utjecaj na progib predmetnog nosača u modelu zanemarujemo. Dodatna nesigurnost proizlazi iz nedostatka informacija o uvjetima kontakta između predmetnog sekundarnog nosača i pregradnog zida ispod njega, kao i nedovoljne jasnoće o spoju vlačnih zatega s istim nosačem. U modelu se pretpostavlja da su vlačne zatege kruti elementi, no u stvarnosti one imaju zatezaljke koje mogu dodatno naprezati ili opuštatati zatege, što potencijalno utječe na razlike u rezultatima analize.

Stoga, ta razlika između računalno dobivenih i izmjerenih vertikalnih pomaka i naprezanja ne utječe na funkcionalnost konstrukcije ili konstrukcijskog elementa.

Važno je napomenuti da rezultati analize variraju ovisno o specifičnim karakteristikama pojedine konstrukcije. Primjerice, razlike u rezultatima ispitivanja mostova i čeličnih hala proizlaze iz specifičnih karakteristika ovih konstrukcija, kao i različitih vrsta opterećenja i okolišnih uvjeta kojima su izložene. Most se može definirati kao konstrukcija s pločom oslonjenom na stupove, dok čelična hala obuhvaća raznolikost elemenata koji znatno utječu na rezultate statičke analize. Ova složenost proizlazi iz potrebe za preciznim odabirom metode modeliranja konstrukcije, jer svaki pojedinačni element može imati značajan utjecaj na rezultate analize nosača.

10. ZAKLJUČAK

Cilj ovog istraživanja je analizirati ispitivanje čeličnih konstrukcija, uključujući potrebne mjerne uređaje i metodologiju, te usporediti rezultate statičkih i dinamičkih ispitivanja proizvodne hale s numeričkim modelom. Ispitivanja su provedena prema programu koji uključuje raspored mjernih mjesta, tehniku ispitivanja i opremu te sljedeći većinu smjernica norme HRN U.M1.047 koja pruža temeljni okvir za ispitivanje konstrukcija. Bitno je da konstrukcija zadovolji projektne i zakonske kriterije; u suprotnom, potrebna je sanacija.

Razlog provođenja ispitivanja čelične proizvodne hale bio je testiranje budućih dodatnih stalnih i uporabnih opterećenja. Ta su opterećenja simulirana pomoću spremnika za vodu postavljenih na predmetni sekundarni nosač te na dva susjedna nosača. Prilikom statičkog ispitivanja predmetnog nosača, izvršena su mjerenja vertikalnih pomaka i relativnih deformacija na tri mjerna mjesta: u sredini raspona te na mjestima spajanja vlačnih zatega s nosačem. Osim toga, mjereni su i horizontalni pomaci na jednom mjernom mjestu na nosaču. Na susjednim sekundarnim nosačima mjereni su samo vertikalni pomaci, isključivo u sredini raspona nosača. Relativne deformacije i pomaci su bilježeni pomoću LVDT osjetila. Dinamičko ispitivanje provedeno je prije i nakon statičkog ispitivanja. Vlastite frekvencije i oblici osciliranja nosača određeni su metodom dekompozicije frekventnog područja, a akceleracije su mjerene vertikalno na donjem pojasu nosača na devet lokacija.

Na temelju uvida u rezultate statičkog i dinamičkog ispitivanja probnim opterećenjem predmetnog sekundarnog nosača krovne čelične konstrukcije te analize istih, može se istaknuti da su sve vrijednosti izmjerenih zaostalih vertikalnih pomaka i relativnih deformacija nakon rasterećenja konstrukcije bile su manje od 15 % u odnosu na vrijednosti pri maksimalnom opterećenju, koliko je dopušteno za čelične konstrukcije prema normi HRN U.M1.047:1987. Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do loma. Bitno je za istaknuti da se analizom vremenskih zapisa vertikalnih pomaka i relativnih deformacija tijekom svih faza opterećenja i rasterećenja, može zaključiti da se predmetni nosač tijekom ispitivanja ponašao elastično. Također za vrijeme konstantnog opterećenja na konstrukciji nije uočen prirast vertikalnih pomaka i relativnih deformacija u vremenu. Utjecaj okoline, kao što su temperaturni uvjeti, mogu povećati zaostale pomake i deformacije nakon uklanjanja opterećenja. Također, važnost preciznosti

i osjetljivosti mjernih uređaja naglašava se kao ključna u osiguravanju točnosti mjerenja. Stoga je važno uzeti u obzir sve navedene čimbenike prilikom interpretacije rezultata ispitivanja konstrukcija visokogradnje, kako bi se osigurala njihova sigurnost i dugoročna stabilnost.

U jednom dijelu rada analiziran je slučaj s jednostrukim zategama s obje strane nosača te s dvostrukim zategama samo s jedne strane nosača. Razlog za ovu analizu je činjenica da je prema projektu predviđeno jednostruko zatezanje s obje strane, dok je u stvarnosti izvedeno dvostruko zatezanje s jedne strane nosača i jednostruko zatezanje s druge strane nosača. Analiza dvaju modela pokazala je razlike u naprezanjima i pomacima. Pokazalo se da su naprezanja veća u modelu s jednostrukim zategama zbog manje krutosti, što rezultira većim savijanjem nosača i koncentracijom naprezanja u sredini nosača.

Rezultati dinamičkog ispitivanja pokazali su da statičko ispitivanje nije uzrokovalo značajne promjene osnovnih dinamičkih parametara, poput oblika osciliranja i vlastitih frekvencija, što ukazuje na to da nosač nije oštećen. Međutim, dinamičko ispitivanje nosača pod opterećenjem predstavlja značajan izazov zbog brojnih interakcija unutar sustava. Vibracije koje se prenose kroz cijelu konstrukciju mogu mijenjati osnovne parametre. U usporedbi s mostovima ili pravilnim zgradama po tlocrtu i visini, gdje se postižu precizniji rezultati, ispitivanje čeličnih nosača (dijelova složene konstrukcije) je složenije zbog osjetljivosti na vanjske vibracije. To otežava analizu dinamičkog ponašanja i ograničava točnost zaključaka o ukupnoj dinamici konstrukcije.

Iako ranije spomenuta norma pruža temeljni okvir za ispitivanje konstrukcija, primjena suvremenih tehnologija za mjerenje pomaka može značajno poboljšati učinkovitost, preciznost i sigurnost ispitivanja. Nadogradnja norme kako bi se uključili suvremeni standardi i tehnologije omogućila bi brže i preciznije ispitivanje, što bi bilo ključno za osiguravanje sigurnosti i pouzdanosti konstrukcija u suvremenom građevinskom okruženju.

Prema tome, predmetni sekundarni nosač prema odredbama hrvatske norme HRN U.M1:047:1987 Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do loma se može i dalje koristiti u svrhu za koju je namijenjen.

LITERATURA

- [1] Tumialan G., Galati N., Nanni A. In-situ Load Testing of Concrete Structures, Part 1 Rationale, Objectives and Execution. *Structure*. 2014, 21(4), 10-13
- [2] Damjanović D. *Ispitivanje konstrukcija, skripta*. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku
- [3] Krolo J., Kapović Z., Rak M., Statičko i dinamičko ispitivanje konstrukcija. *Simpozij o inženjerskoj geodeziji s međunarodnim sudjelovanjem*. 2007. str. 109-116.
- [4] Duvnjak I., Rak M., Damjanović D. Probno ispitivanje krovnih konstrukcija velikih sportskih građevina. *Građevinar: časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera*. 2010; 62(10): str. 887-896.
- [5] Hrvatski zavod za normizaciju. *Ispitivanje konstrukcija visokogradnje probnim opterećenjem i ispitivanje do sloma U.M1.047, Službeni list 4/87, 1987.*, Zagreb
- [6] Aničić D., *Ispitivanje konstrukcija*, Građevinski fakultet, Osijek, 2002.
- [7] Herceg Lj., *Ispitivanje konstrukcija, skripta*. s.l. : Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2009.
- [8] Brühwiler E., Vogel T., Lang T., Lüchinger P., Swiss standards for existing structures, *Structural Engineering International*. 2012; 22(2): str. 275-280.
- [9] Banjad Pečur I., Skazlić M., Gabrijel I., Milovanović B. *Nerazorna ispitivanja, prezentacija*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2012./2013.
- [10] Banjad Pečur I., Primjena nerazornih ispitivanja u građevinarstvu. *HDKBR INFO Magazin*, 2013.; 3(1), 2-9.
- [11] Duvnjak I. *Tvrdoća materijala, prezentacija iz kolegija Mehanika materijala*. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2023.
- [12] Krolo J., Šimić D. *Mehanika materijala*. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2011.
- [13] Horvat A., Briševac Z. Upotreba Leeb testa tvrdoće za ispitivanje stijenskog materijala. *Nafta i Plin*, 2022., 42(172.-173.), 77-84.
- [14] Dostupno: <https://www.hbm.com/en/> [Pristupljeno: 17.6.2024.]

- [15] Marović P. *Ispitivanje konstrukcija, interna skripta*. Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2013.
- [16] Dostupno: <https://www.electrical4u.com/linear-variable-differential-transformer/>
[Pristupljeno 22.5.2024]
- [17] Marenić A., Paar R., Damjanović D. Određivanje dinamičkih pomaka i vlastitih frekvencija mosta RTS-om. *Građevinar*. 2017; 69(04.): str. 281-294.
- [18] Ćosić I., Ćurin J., *Određivanje i analiza visinskih pomaka nivelmanske mreže u središtu Zagreba*. Rektorova nagrada. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb; 2021.
- [19] Dostupno: <http://www.marquis-surveys.com/Survey%20equipment.htm>
[Pristupljeno: 29.4.2024.]
- [20] Benčić D., Solarić, N. *Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformati*, Školska knjiga, Zagreb, 2008.
- [21] Dostupno: <https://www.geodetski-instrumenti.com/niveliri/digitalni-niveliri/>
[Pristupljeno: 29.4.2024.]
- [22] Barković Đ., Zrinjski M. *Terenska mjerenja*. Sveučilišni priručnik. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb; 2020.
- [23] Bačić Ž., Bašić T., *Satelitska geodezija II*, interna skripta, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [24] EN 10025-2:2004: *Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike*.
- [25] Dostupno: <https://italfaber.it/bs/karakteristike%2C-svojstva-i-upotreba-%C4%8Delika-s235jr/> [Pristupljeno 22.5.2024.]
- [26] Herceg Lj. *Ocjena realnog stanja konstrukcija određivanjem dinamičkih parametara*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Doktorska disertacija, Zagreb, 1993.
- [27] Štimac Grandić I., Franković T., Šćulac P., Komadina T. Operacionalna modalna analiza nathodnika Malonji. *Zbornik radova*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. 2017; 20(1): str. 141-157.
- [28] Pajan J., Duvnjak I., Ereiz S. Pregled i primjena metoda operacionalne modalne analize u frekvencijskoj domeni. *Zajednički temelji 2023-uniSTem: deseti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti*, 2023. str. 108-113.

[29] Lamarche C. P., Paultre P., Proulx J., Mousseau S.: *Assessment of the frequency domain decomposition technique by forced-vibration test of a full scale structure*, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol. 37, Wiley Inter Science, 487-494, .

[30] Dostupno: <https://www.pcb.com/products?m=393b31> [Pristupljeno 21.6.2024.]

[31] Bartolac M., Duvnjak I. *Konceptualna rješenja obnove i mjere pojačanja konstrukcija, Bilješke s predavanja_Ispitivanja/mjerenja_1*. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku.

POPIS SLIKA

Slika 3.1 Ispitivanje tvrdoće po Brinellu [11,12]	15
Slika 3.2 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Brinellu [11].....	15
Slika 3.3 Ispitivanje tvrdoće po Vickersu [11,12].....	16
Slika 3.4 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Vickersu [11].....	16
Slika 3.5 Ispitivanje tvrdoće po Rockwellu [11]	17
Slika 3.6 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Rockwellu [11].....	17
Slika 3.7 Usporedne vrijednosti tvrdoće [31]	18
Slika 3.8 Ispitivanje tvrdoće po Knoopu [11]	19
Slika 3.9 Uređaj za ispitivanje tvrdoće po Knoopu [11].....	19
Slika 3.10 Postupak ispitivanja tvrdoće po Poldiju [11,12]	20
Slika 3.11 Prikaz Leeb uređaja za mjerenje tvrdoće [31]	21
Slika 4.1 a) mehanička mikrouređaj b) montaža mikrouređaja c) digitalni nivelir Leica NA 3003 [8]	24
Slika 4.2 a) Princip rada LVDT uređaja [15] i b) LVDT osjetila [3].....	25
Slika 4.3 a) WA-T i b) WA-L model [14].....	26
Slika 4.4 a) WI i b) W1ELA/0 model [14].....	26
Slika 4.5 a) Precizni optički nivelir Leica NAK2 s planparalelnom pločom [18] i b) precizni digitalni nivelir Leica DNA03 [19]	27
Slika 4.6 a) Nivelmanska letva s barkodom [21] i b) Nivelmanska letva s centimetarskom podjelom [15].....	28
Slika 4.7 određivanje visina pomoću geometrijskog nivelmana [22].....	28
Slika 4.8 GPS mjerenje pomaka [2]	29

Slika 4.9 a) mehanički klinometar, b) sonda za mjerenje temperature i c) manometar [15]	29
Slika 4.10 a) Huggenbergerov tenzometar i b) Berryjev prijenosni komparator [15]	30
Slika 4.11 Shematski izgled mjerne trake [15]	31
Slika 4.12 Senzori za eksperimentalnu analizu naprezanja [14]	32
Slika 4.13 Optički senzori [14]	33
Slika 4.14 Seizmometar [15]	34
Slika 4.15 Mjerač brzine – brzinomjer [15]	34
Slika 4.16 troosni akcelerometar [15]	35
Slika 5.1 Proizvodna čelična hala	37
Slika 5.2 Proizvodna čelična hala – pogled odozgo (tlocrt)	38
Slika 5.3 Čelična hala s naznačenim sekundarnim nosačem koji se ispituje	40
Slika 5.4 Fotografija sekundarnog nosača krovne konstrukcije	41
Slika 7.1 Primjer plastičnog spremnika korištenog za ispitivanje predmetnog nosača	43
Slika 7.2 Pogled odozgo na poziciju sekundarnih nosača	44
Slika 7.3 Pozicija sekundarnog nosača broj 5 na krovu broj 1 s označenim susjednim nosačima 4 i 6	45
Slika 7.4 Raspored spremnika napunjenih vodom	45
Slika 7.5 Prikaz mjernih mjesta za statičko ispitivanje	47
Slika 7.6 Vremenski zapisi vertikalnih pomaka nosača br. 4, 5 i 6 za vrijeme statičkog ispitivanja	49
Slika 7.7 Vremenski zapis horizontalnog pomaka nosača broj 5	50
Slika 7.8 Pogled na osjetilo za mjerenje horizontalnog pomaka (hidraulična platforma je bila oslonac osjetila)	51
Slika 7.9 Vremenski zapis relativnih deformacija nosača br. 5 za vrijeme statičkog ispitivanja	52

Slika 7.10 Prazni spremnici (ukupno 26 kom) namješteni prema rasporedu (prije ispitivanja)	53
Slika 7.11 Faza 4 statičkog ispitivanja (400 l vode u 24 spremnika – lijevo i desno na slici i 600 l vode u 2 spremnika – u sredini na ovoj slici).....	53
Slika 7.12 Mjerna stanica za provedbu statičkog i dinamičkog ispitivanja.....	53
Slika 7.13 Pogled na sekundarni nosač br. 5 i susjedne nosače br. 4 i 6 sa označenim mjernim mjestima vertikalnih pomaka (oznaka PV), horizontalnog pomaka (oznaka PH) i relativnih deformacija (oznaka RD).....	54
Slika 7.14 a) Mjerno osjetilo za mjerenje relativnih deformacija i b) mjerno osjetilo za mjerenje vertikalnog pomaka	54
Slika 7.15 Prikaz mjernih mjesta za dinamičko ispitivanje s naznačenim akcelerometrima	57
Slika 7.16 Akcelerometar naziva PCB Piezotronics 393B31[30].....	57
Slika 7.17 Sustav za prikupljanje podataka i analizator Bruel & Kjaer 3560C	58
Slika 7.18 Pogled na akcelerometre za vrijeme dinamičkog ispitivanja.....	58
Slika 7.19 Zapisi singularnih vrijednosti matrica spektralnih gustoća s označenim eksperimentalno određenim vlastitim frekvencijama.....	59
Slika 7.20 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 1.....	60
Slika 7.21 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 2.....	61
Slika 7.22 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 3.....	61
Slika 7.23 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 4.....	61
Slika 7.24 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 5.....	62

Slika 7.25 Eksperimentalno određeni oblik titranja prije i nakon probnog opterećenja s pripadajućim vlastitim frekvencijama – TON 6.....	62
Slika 8.1 Karakteristike predmetnog čeličnog nosača.....	65
Slika 8.2 Karakteristike vlačnih zatega punih okruglih profila Ø34 mm.....	65
Slika 8.3 Karakteristike vlačnih zatega punih okruglih profila Ø70 mm.....	66
Slika 8.4 Prikaz numeričkog modela predmetnog nosača s naznačenim vlačnim zategama	66
Slika 8.5 Prikaz numeričkog modela predmetnog nosača.....	66
Slika 8.6 a) Prikaz jednostruke vlačne zatege i b) prikaz dvostruke vlačne zatege	67
Slika 8.7 Sekundarni nosač s naznačenim osloncima	68
Slika 8.8 Prikaz čvorova i raspored spremnika napunjenih vodom	69
Slika 8.9 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u prvoj fazi statičkog ispitivanja.....	74
Slika 8.10 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u drugoj fazi statičkog ispitivanja.....	74
Slika 8.11 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u trećoj fazi statičkog ispitivanja.....	74
Slika 8.12 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u četvrtoj fazi statičkog ispitivanja.....	75
Slika 8.13 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u petoj fazi statičkog ispitivanja.....	75
Slika 8.14 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u šestoj fazi statičkog ispitivanja.....	75
Slika 8.15 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u sedmoj fazi statičkog ispitivanja.....	75
Slika 8.16 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u osmoj fazi statičkog ispitivanja	76
Slika 8.17 Dijagram naprezanja σ_x za najopterećeniju fazu – faza 4	77
Slika 8.18 Maksimalni iznos momenta savijanja za probno opterećenje – faza 4.....	77
Slika 8.19 Vertikalni pomaci predmetnog nosača u četvrtoj fazi statičkog ispitivanja – jednostruke zatege.....	78
Slika 8.20 Dijagram naprezanja σ_x za najopterećeniju fazu – jednostruke zatege	78

POPIS TABLICA

<i>Tablica 7.1 Faze statičkog ispitivanja</i>	46
Tablica 7.2 Vertikalni pomaci nosača broj 4, 5 i 6 pri maksimalnom opterećenju i nakon rasterećenja.....	48
Tablica 7.3 Relativne deformacije nosača broj 5 pri maksimalnom opterećenju i nakon rasterećenja.....	52
Tablica 7.4 Rezultati mjerenja vlastitih frekvencija prije i nakon statičkog ispitivanja s pripadajućim oblicima osciliranja.....	59
Tablica 8.1 Karakteristike oslonaca.....	67
Tablica 8.2 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 1.....	70
Tablica 8.3 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 2.....	70
Tablica 8.4 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 3.....	71
Tablica 8.5 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 4.....	71
Tablica 8.6 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 5.....	72
Tablica 8.7 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 6.....	72
Tablica 8.8 Prikaz rasporeda opterećenja po čvorovima u fazi 7.....	73
Tablica 8.9 Maksimalni računski progibi.....	76
Tablica 8.10 Relativne deformacije i naprezanja dobivena u numeričkom modelu.....	78
Tablica 8.11 Maksimalni računski progibi za nosač s jednostrukim zategama.....	79
Tablica 8.12 Relativne deformacije i naprezanja dobivena u numeričkom modelu s jednostrukim zategama.....	79
Tablica 8.13 Prikaz naprezanja i progiba za oba numerička modela.....	80
Tablica 9.1 Usporedba eksperimentalnih i računski dobivenih pomaka.....	81
Tablica 9.2 Usporedba eksperimentalnih i računski dobivenih naprezanja.....	81

