

Ispitivanje pješačkog nathodnika Kaštel Stari

Vrkić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:626697>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-01**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

DIPLOMSKI RAD

Josip Vrkić

Split, 2021.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Josip Vrkić

Ispitivanje pješačkog nathodnika Kaštel Stari

Diplomski rad

Split, 2021.

Ispitivanje pješačkog nathodnika Kaštel Stari

Sažetak:

U ovom radu je opisana provedba eksperimentalnog ispitivanja i numerička analiza ponašanja pješačkog nathodnika Kaštel Stari koji premošćuje Državnu cestu D8 na dionici Split-Trogir. Statička i dinamička analiza je provedena u računalnom programu SCIA Engineer 20. Statička analiza je provedena za linearni i nelinearni model materijala. Dobiveni rezultati iz statičke i dinamičke eksperimentalne i numeričke analize su uspoređeni te su na kraju izvedeni odgovarajući zaključci.

Ključne riječi:

nathodnik, modeliranje, ispitivanje konstrukcija, eksperimentalna analiza, numerička analiza

Testing of pedestrian overpass Kaštel Stari

Abstract:

The subject of this paper is experimental and numerical analysis of pedestrian overpass Kaštel Stari which spans over state road D8, section Split-Trogir. Static and dynamic analysis are performed using software SCIA Engineer 20. Both linear and non-linear numerical analysis are performed and compared to experimental values. Adequate conclusions are given at the end.

Keywords:

Overpass, modelling, testing of structures, experimental analysis, numerical analysis

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Ispitivanje konstrukcija | 1 |
| 1.2. Ispitivanje mostova | 1 |
| 2. ISPITIVANJE PJEŠAČKIH MOSTOVA | 2 |
| 2.1. Pokusno opterećenje..... | 2 |
| 2.2. Statičko ispitivanje | 2 |
| 2.2.1. Primjer statičkog ispitivanja..... | 3 |
| 2.3. Dinamičko ispitivanje | 4 |
| 2.3.1. Primjer dinamičkog ispitivanja | 5 |
| 3. PJEŠAČKI NATHODNIK KAŠTEL STARI..... | 8 |
| 4. ISPITIVANJE PJEŠAČKOG NATHODNIKA KAŠTEL STARI..... | 10 |
| 4.1. Statičko ispitivanje | 11 |
| 4.1.1. Instrumentarij za ispitivanje..... | 11 |
| 4.1.2. Sheme opterećenja | 12 |
| 4.1.3. Provedba statičkog ispitivanja | 14 |
| 4.1.4. Rezultati statičkih ispitivanja | 18 |
| 4.2. Dinamičko ispitivanje | 19 |
| 4.2.1. Instrumentarij za ispitivanje..... | 19 |
| 4.2.2. Provedba dinamičkog ispitivanja | 20 |
| 4.2.3. Rezultati dinamičkog ispitivanja..... | 22 |
| 5. NUMERIČKI PRORAČUN PJEŠAČKOG NATHODNIKA KAŠTEL STARI | 28 |
| 6. USPOREDBA EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA..... | 36 |
| 6.1. Postignuta razina opterećenja..... | 36 |
| 6.2. Usporedba vertikalnih progiba | 36 |
| 6.3. Usporedba vlastitih frekvencija..... | 38 |
| 7. ZAKLJUČAK | 42 |
| 8. LITERATURA..... | 43 |

1. UVOD

1.1. Ispitivanje konstrukcija

Ispitivanje konstrukcija je znanstvena disciplina s kojom se provodi niz postupaka kojima utvrđujemo ponašanje konstrukcije pri sljedećim djelovanjima [1]:

- fizikalna (mehanička) – vlastita težina, uporabno opterećenje, izvanredna djelovanja, itd.,
- kemijska – korozija, agresija kemikalija, itd.

Značajan iskorak ova disciplina doživljava tijekom 20. stoljeća zbog razvoja elektronike koja je rezultirala boljom mjernom i računalnom opremom.

Svrha ispitivanja konstrukcija je utvrđivanje da li je neka građevina, konstrukcija ili građevni proizvod izveden u skladu sa svojom namjenom. Prilikom ispitivanja može doći do novih saznanja u vidu javljanja pojava koje nisu bile predviđene projektom ili nisu dio dotadašnjih teorijskih saznanja.

1.2. Ispitivanje mostova

Mostovi se ispituju na statička i dinamička opterećenja. Statička (nazovi-statička) opterećenja imaju statički karakter, teret se nanosi sporo, ne dolazi do pojave inercijalnih sila i prirast deformacija je mali. Dinamička opterećenja se nanose brzo, dolazi do pojave inercijalnih sila i prirast deformacija je velik. Kod mostova s više raspona trebaju se ispitati svi rasponi i pri tom se nastoje postići maksimalne projektirane rezne sile u svim kritičnim presjecima.

Pješački mostovi, kao cestovni i željeznički, moraju zadovoljiti uvjete nosivosti, uporabljivosti, estetike, sigurnosti i utjecaja na okoliš. To znači da most treba ispitati statičkim i dinamičkim probnim opterećenjem. Statičko probno opterećenje se simulira s materijalom koji je dostupan na gradilištu (vreće pijeska, cementa, betonske ploče i sl.), dok za dinamičko opterećenje moramo koristiti prometna vozila ili ljudsku navalu budući da smo ipak ograničeni samim mostom. Nakon nanošenja probnog opterećenja izmjerene vrijednosti se uspoređuju s teorijskim vrijednostima iz projekta.

2. ISPITIVANJE PJEŠAČKIH MOSTOVA

Kroz posljednja tri desetljeća može se primjetiti da je s razvojem računalne opreme inženjerska praksa dobila snažne alate za sve zahtjevnije proračune u građevinarstvu. S pojavom računalnog softwera, inženjerima se otvaraju mogućnosti izrade modela i proračuna koristeći modernije i kompliciranije proračune nego u prošlom stoljeću. Možemo primijetiti da je jedna od trenutnih zadaća ove generacije inženjera usavršavanje računalnog softwera i metoda koje se koriste.

2.1. Pokusno opterećenje

Pokusna opterećenja možemo podijeliti na više načina: prema učestalosti (redovita i kontrolna), prema veličini tereta (normalna probna opterećenja, posebna probna opterećenja, izuzetna probna opterećenja), prema prirodi opterećenja (statičko i dinamičko). Za pješačke mostove s rasponom jednakim ili većim od 15 metara, obvezno se provodi statičko i dinamičko ispitivanje. Probno opterećenje se vrši na potpuno dovršenom mostu. Tijekom ispitivanja mosta na samom objektu se ne smiju odvijati nikakvi drugi radovi. Za dinamičko ispitivanje mosta je poželjno da nema nikakvog drugog prometa oko mosta jer može doći do pojave ambijentalnih vibracija koje mogu utjecati na rezultate ispitivanja.

2.2. Statičko ispitivanje

Za statičko ispitivanje mosta potrebno je odrediti shemu opterećenja, raspored tereta, odrediti mjerne točke i proračunati očekivane progibe i deformacije. Prilikom statičkog opterećenja potrebno je u karakterističnim presjecima postići veličinu reznih sila što bližu onima na koje je most projektiran. To nije u potpunosti moguće budući da su po važećim propisima mostovi predimenzionirani, pa je stvarno uporabno opterećenje često manje od onog na koje je projektirano. Prilikom opterećenja mjere se: vertikalni progibi u sredinama svih raspona, pomaci ležajeva, deformacije na odabranim mjestima, promatra se pojava pukotina te se mjere trajni progibi i deformacije nakon rasterećenja. Konstrukcija se smatra ispravnom ako ispunjava uvjete iz norme Ispitivanje mostova pokusnim opterećenjem [2]:

- izmjereni progibi i pomaci su manji ili jednaki teorijskim,
- izmjereni trajni progibi nakon rasterećenja su manji od dozvoljenih (15% za čelične i spregnute mostove, 20% za mostove od prednapetog betona, 25% za armiranobetonske mostove),
- širina izmjerenih pukotina je manja od dozvoljenih,
- veličina progiba ne narušava estetiku mosta i unutar su dozvoljenih propisanih granica.

U slučaju da nisu zadovoljeni svi uvjeti a trajni progibi su prekoračeni za 25%, potrebno je ponoviti probno opterećenje. Pri ponovljenom opterećenju trajni progibi ne smiju prekoračiti propisane veličine (7,5% za čelične mostove, 10% za mostove od prednapetog betona, 12,5% za mostove od armiranog betona), a svi ostali uvjeti moraju biti zadovoljeni. U slučaju da bilo koji od uvjeta nisu ispunjeni, konstrukcija se mora analizirati i moraju se predložiti odgovarajuće mjere.

2.2.1. Primjer statičkog ispitivanja

Pješački most na izvoru rijeke Tihaljine je drveni most lociran na izvoru rijeke Tihaljine u općini Grude (Slika 2.1). Nosiva konstrukcija je rađena od lijepljenog lameliranog drva. Raspon mosta je 18,24 m sa širinom od 2,3 m. Za pokusno opterećenje korišteni su cestovni rubnjaci dimenzija $15 \times 25 \times 100$ cm, težine 90 kg. Postignuti teret je iznosio oko 5,5 kN po paleti. Izvođenje i mjerenje probnog opterećenja se izvodilo po prethodno opisanim postupcima, te je maksimalni izmjereni progib iznosio 2,1 mm [3].



Slika 2.1. Pokusno opterećenje na mostu preko rijeke Tihaljine [3]

2.3. Dinamičko ispitivanje

Dinamičko ispitivanje je trenutni predmet diskusije unutar akademskih krugova. U prošlosti su se koristili maksimalno pojednostavljeni modeli, iako je problematika zapravo iznimno komplicirana. Najvažnija lekcija je naučena na mostu Tacoma Bridge, nakon čega je zaključeno da je najvažnije izbjeći pojavu rezonancije na mostu. Formalno gledajući, dinamičko ispitivanje mosta treba zadovoljiti propise iz norme Ispitivanje mostova pokusnim opterećenjem [2]. Za dinamičko ispitivanje je potrebno imati pokretni teret (npr. vozila ili grupa pješaka) koja u most unosi pobudu. Prilikom prolaza tereta obvezno se mjere vertikalni progibi u sredinama raspona, te se mjeri brzina prolaska tereta. Dinamička otpornost mosta je zadovoljavajuća ako se:

- periodi slobodnih oscilacija nalaze unutar granica teorijskih vrijednosti,
- dinamički koeficijent nalazi unutar granica predviđenih projektom,
- ne dolazi do stvaranja vibracije koje izazivaju osjećaj neugodnosti (rezonancija, pojava podrhtavanja, pojava odnosa amplitude i frekvencije koja izaziva osjećaj neugodnosti).

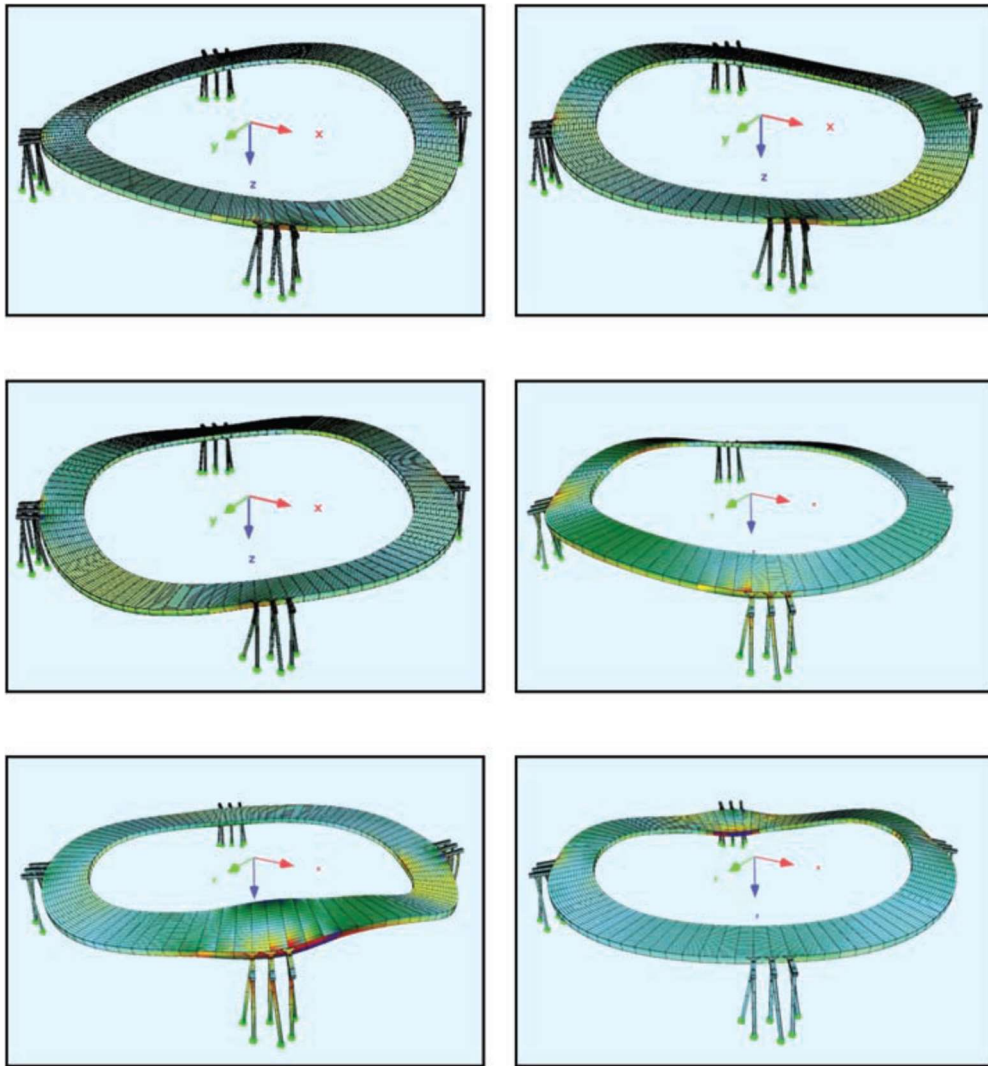
2.3.1. Primjer dinamičkog ispitivanja

Pješački most u centru grada Rzeszów [4] napravljen je kao potreba za rješavanjem prometnih zastoja u centru grada (Slika 2.2). Budući da se nalazi na križanju glavnih ulica, most je zapravo prstenastog oblika vanjskog promjera 40 m, širine 4 m. Oslonjen je u 4 točke na CFST stupove (šuplje čelične cijevi ispunjene betonom), a stupovi su oslonjeni na armiranobetonske pilote. Rasponi (po vanjskom opsegu) od točki oslanjanja su $32,6 + 29,0 + 29,7 + 31,8$ m. Takvi rasponi su odabrani zbog postojeće infrastrukture prema kojoj se most trebao prilagoditi.

Prilikom projektiranja primijećeno je da most titra frekvencijama između 2 Hz i 5 Hz (Slika 2.3). Stoga je bilo potrebno dokazati da pobuda koja može nastati kretanjem pješaka neće narušiti uporabljivost objekta. Pri dinamičkom ispitivanju promatralo se 5 slučajeva kretanja pješaka: šetanje, sporo šetanje, trčanje, usklađeno šetanje na frekvenciji prvog vlastitog oblika i drugog vlastitog oblika. Svaka shema je ispitana najmanje 3 puta pri čemu je broj pješaka varirao od 1 do 15 pješaka. Most je također ispitan na ljudske navale od 30 i 50 ljudi za slučajeve šetanja i sporig trčanja.



Slika 2.2. Prstenasti most u Rzeszów-u [4]



Slika 2.3. Vlastiti oblici vibriranja prstenastog mosta u Rzeszów-u [4]

Ispitivanja su pokazala da su dominantne frekvencije 2,41 Hz i 2,87 Hz (Slika 2.3), s pripadajućim prigušenjima od 0,55% i 1,94%. Najveće izmjereno ubrzanje je $3,0 \text{ m/s}^2$ za slučaj ljudske navale pri sporom trčanju (smatra se da se može dogoditi pri društvenim događajima ili navali navijača) (Slika 2.4) a za normalnu uporabu je izmjereno ubrzanje od $0,5 \text{ m/s}^2$ [4].

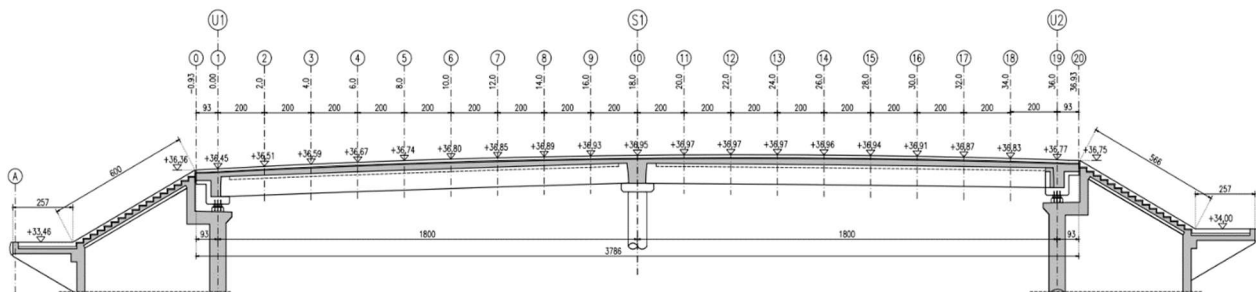


Slika 2.4. Dinamičko ispitivanje – ljudska navala-sporo trčanje [4]

3. PJEŠAČKI NATHODNIK KAŠTEL STARI

Pješački nathodnik u Kaštel Starome omogućava prijelaz pješaka preko Državne ceste D8 na stacionaži 5+563,50 rekonstruirane Državne ceste D8, dionica Kaštel Sućurac – Plano, poddionica Kaštel Gomilica – Kaštel Stari. Svi podaci dani u nastavku preuzeti su iz Glavnog [5] i Izvedbenog [6] projekta ovog objekta.

Os nathodnika siječe os Državne ceste D8 pod kutem od 90°. Nathodnik ima dva raspona veličine $18,0 + 18,0 = 36,0$ m, sa srednjim stupom lociranim u osi Državne ceste D8. Ukupna duljina nathodnika zajedno s upornjacima iznosi 53,44 m (Slika 3.1).



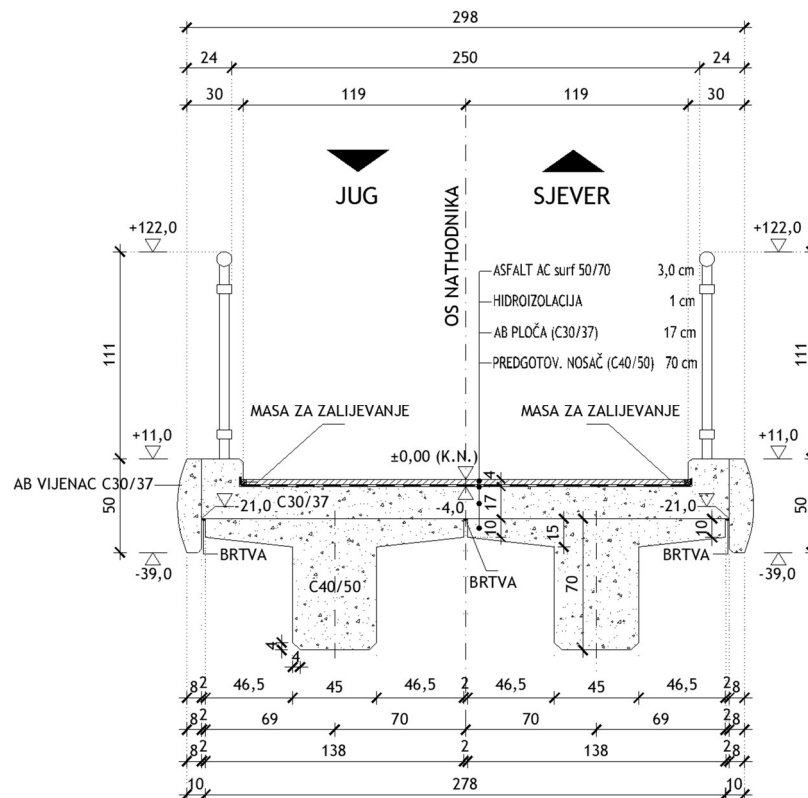
Slika 3.1. Uzdužni presjek nathodnika Kaštel Stari

Na dijelu nathodnika os Državne ceste je tlocrtno u pravcu. Niveleta nathodnika je u vertikalnoj krivini radijusa 450 m.

Sve dimenzije poprečnog presjeka vidljive su na Slici 3.2. Ukupna širina nathodnika zajedno s vijencima iznosi 3,08 m. Na nathodniku je predviđena čelična pješačka ograda visine 1,1 m te zaštitna žičana mreža visine 2,0 m. Slobodan profil za kretanje pješaka odnosno udaljenost između rukohvata na pješačkoj ogradi iznosi 2,54 m.

Nathodnik se nalazi u zoni u kojoj, uz povratni period od 475 godina, proračunsko ubrzanje tla iznosi $a_g = 0,22g$.

Nosiva konstrukcija nathodnika sastoji se od armiranobetonske rasponske konstrukcije slobodno oslonjene na upornjake te monolitno povezane s armiranobetonskim stupom smještenim u razdijelnom pojasu Državne ceste D8.



Slika 3.2. Poprečni presjek nathodnika Kaštel Stari

Predgotovljeni rasponski nosači su **T** poprečnog presjeka. Visina nosača iznosi 70 cm. Širina gornjeg pojasa nosača iznosi 138 cm. Širina hrpta je konstantna i iznosi 45 cm. Nakon sprezanja s pločom rasponske konstrukcije debljine 17 cm, ukupna visina rasponske konstrukcije iznosi 87 cm. Pojasnice nosača su debljine 10 cm na kraju i 15 cm uz hrbat.

Rasponski nosači su izvedeni betonom klase C40/50 te su armirani prednapetim čelikom čvrstoće ≥ 1860 MPa i armirani su betonskim čelikom B500B. Poprečni nosači, stupovi i upornjaci su izvedeni betonom klase C30/37 i armirani betonskim čelikom B500B.

Predviđeni su armiranobetonski šuplji upornjaci djelomično zapunjeni kamenim materijalom povezani s armiranobetonskim zidovima i vanjskim dvokrakim stubištem smještenim između upornjaka i zidova, kojim se pristupa s prilaznih puteva na nathodnik. Sve izmjere i detalji upornjaka vidljivi su iz Glavnog projekta [5].

U razdjelnom pojasu Državne ceste D8 predviđen je jedan samostalni okrugli stup promjera 80 cm. Vrh stupa je kruto vezan s rasponskom konstrukcijom.

4. ISPITIVANJE PJEŠAČKOG NATHODNIKA KAŠTEL STARI

Budući da pješački nathodnik Kaštel Stari ima raspon veći od 15 metara, odnosno ima dva raspona $18 + 18 = 36$ m, objekt je prema Tehničkim propisima za građevinske konstrukcije [7] potrebno ispitati probnim opterećenjem. Osim toga, njegovo ispitivanje predvidio je projektant nathodnika točkom 1.2.7. Tehničkog opisa [5]. Statičko ispitivanje nathodnika izvršeno je 6. veljače 2021. godine. Ispitivanje se provodilo sukladno hrvatskoj normi HRN U.M1.046:1984 Ispitivanje mostova probnim opterećenjem [2].

Naručitelj je za provođenje ispitivanja osigurao 24 zapakirane palete s vrećama cementa. Na svakoj paleti su bile 64 vreće cementa, a težina jedne vreće cementa je iznosila 20 kg. Konačna težina palete s vrećama cementa je iznosila oko 1300 kg uključujući težinu palete (Slika 4.7.).

Prije provođenja ispitivanja izvršen je pregled dostavljene projektne i atestne dokumentacije, kao i kontrola glavnih dimenzija objekta na licu mjesta. Također su postavljena i mjerna mjesta za mjerenje pomaka na osloncima nathodnika, te na sredinama raspona.



Slika 4.1. Pješački nathodnik Kaštel Stari

4.1. Statičko ispitivanje

4.1.1. Instrumentarij za ispitivanje

Mjerenje pomaka u predviđenim točkama izvršeno je preciznim digitalnim nivelmanom STONEX D1 (Slika 4.2.) i nivelirskom bar-code teleskopskom letvom STONEX model DS1 (Slika 4.3.). Deklarirana preciznost instrumenta za optičko i elektroničko mjerenje iznosi $\pm 1,5$ mm.



Slika 4.2. Precizni nivelman – aparat STONEX D1 za mjerenje pomaka



Slika 4.3. Invarska bar-code teleskopska letva STONEX, model DS1

4.1.2. Sheme opterećenja

Ispitivanje konstrukcije pješačkog nathodnika Kaštel Stari probnim opterećenjem predviđeno je provesti u šest faza opterećenja koristeći palete cementa koje je osigurao naručitelj ispitivanja:

Faza 1 – nulto stanje (neopterećeno),

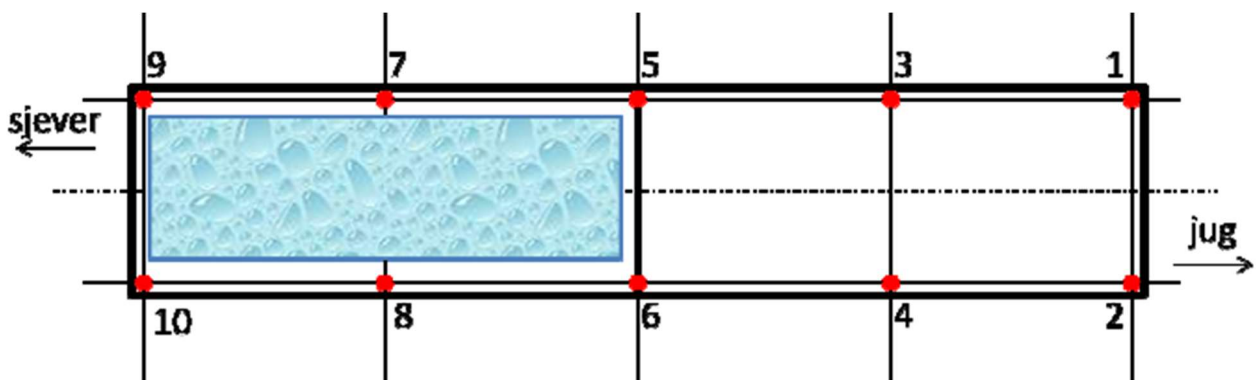
Faza 2 – opterećenje sjevernog raspona (maksimalni moment savijanja u sjevernom rasponu) (Slika 4.4. i Slika 4.8.),

Faza 3 – opterećenje u južnom rasponu (maksimalni moment savijanja u južnom rasponu) (Slika 4.5. i Slika 4.9.),

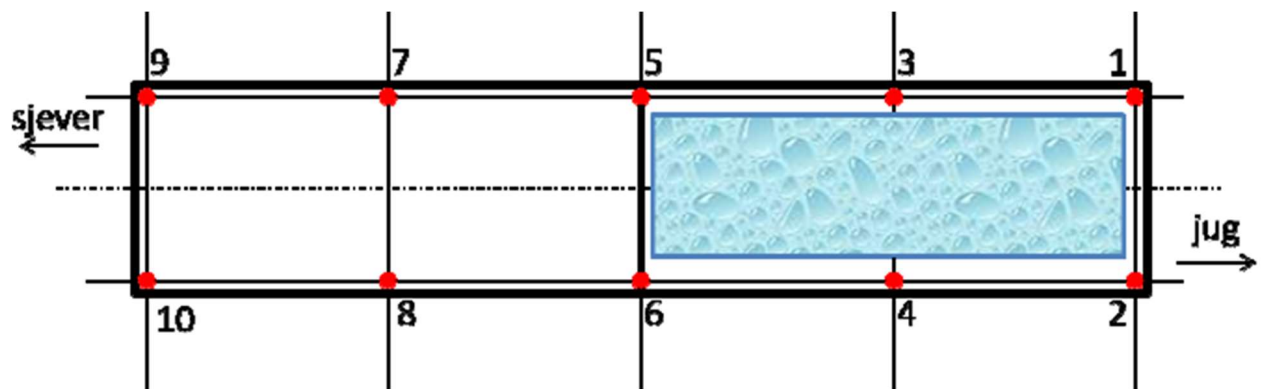
Faza 4 – rasterećenje konstrukcije,

Faza 5 – opterećenje oba raspona (maksimalna reakcija na srednjem osloncu, maksimalni moment savijanja na srednjem osloncu) (Slika 4.6. i Slika 4.10.),

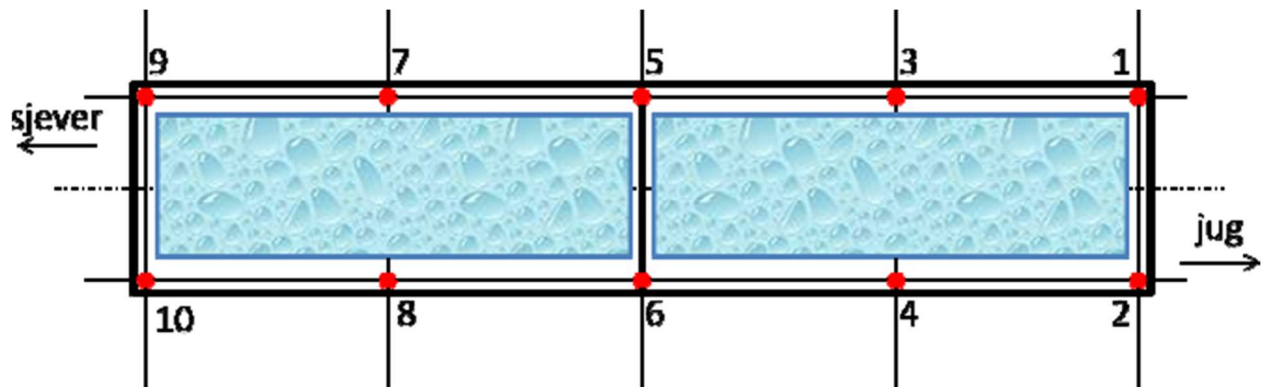
Faza 6 – rasterećenje konstrukcije.



Slika 4.4. Faza opterećenja 2



Slika 4.5. Faza opterećenja 3



Slika 4.6. Faza opterećenja 5

4.1.3. Provedba statičkog ispitivanja

Pripreme za ispitivanje na terenu kao i ispitivanje konstrukcije pod statičkim opterećenjem provedeno je 6. veljače 2021. godine u prijedpodnevnim i posljepodnevnim satima. Za vrijeme pripreme i ispitivanja vrijeme je bilo promjenjivo do pretežno oblačno uz umjereni južni vjetar, dok je temperatura iznosila oko +15°C.

Na Slici 4.7. vidi se podizanje jedne palete s vrećama cementa s kamiona na objekt nathodnika.



Slika 4.7. Palete s vrećama cementa korištene za probno opterećenje

Ispitivanje konstrukcije je u potpunosti provedeno prema predviđenim fazama opterećenja, Procjena inženjera jest da je ovakvo opterećenje približno jednako predviđenom opterećenju.

Budući da je pješački nathodnik već bio asfaltiran prilikom provođenja ispitivanja nije bilo moguće mjeriti deformacije gornje plohe, a pristup nosačima s donje strane nije bio omogućen.

U nastavku, na Slikama 4.8., 4.9. i 4.10., prikazano je probno opterećenje u odgovarajućim rasponima za odgovarajuće faze nanošenja opterećenja.



Slika 4.8. Faza 2 – opterećenje na sjevernom rasponu



Slika 4.9. Faza 3 – opterećenje na južnom rasponu



Slika 4.10. Faza 5 – opterećenje na oba raspona

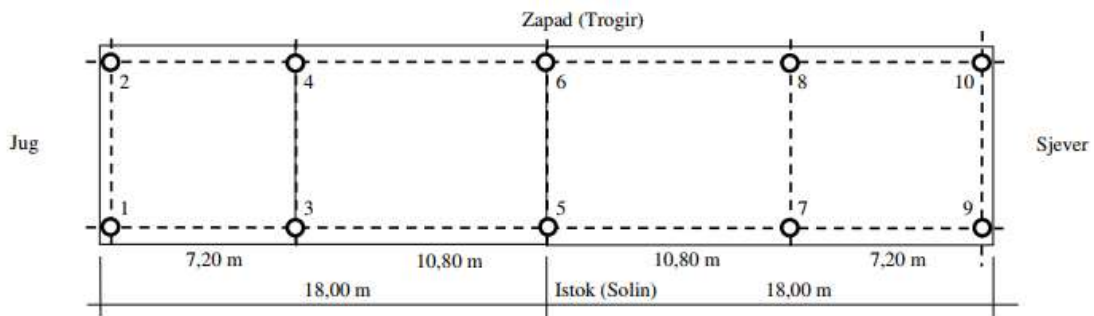
Na Slici 4.11. prikazan je podgled nathodnika i vizualna kontrola eventualne pojave pukotina.



Slika 4.11. Vizualna kontrola pukotina

4.1.4. Rezultati statičkih ispitivanja

Očitane veličine apsolutnih pomaka prilikom mjerenja su sređene i obrađene, te su kao rezultat ispitivanja prikazane u Tablici 4.1. za sva mjerna mjesta vidljiva na Slici 4.12.



Slika 4.12. Dispozicija mjernih mjesta za mjerenje pomaka

Veličina progiba prema dopuštenim vrijednostima u odnosu na raspon objekta iznosi:

$$f_{st} = \frac{L}{300} = \frac{1800}{300} = 6 \text{ cm} = 60 \text{ mm}$$

| PROGIBI (mm) | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Mjerno mjesto | Faza 2 | | | Faza 3 | | | Faza 5 | | |
| | Nulto stanje | Opterećenje | Rasterećenje | Nulto stanje | Opterećenje | Rasterećenje | Nulto stanje | Opterećenje | Rasterećenje |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1,0 | 0,1 | 0,0 | -1,9 | 0,0 |
| 2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1,1 | 0,1 | 0,0 | -2,0 | 0,0 |
| 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1,2 | 0,1 | 0,0 | -1,8 | 0,1 |
| 4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,7 | 0,0 | 0,0 | -2,0 | 0,0 |
| 5 | 0,0 | -0,6 | 0,0 | 0,0 | -0,6 | 0,1 | 0,0 | -1,5 | 0,1 |
| 6 | 0,0 | -0,5 | 0,0 | 0,0 | -0,5 | 0,0 | 0,0 | -1,7 | 0,0 |
| 7 | 0,0 | -1,1 | 0,1 | 0,0 | -0,1 | 0,1 | 0,0 | -2,1 | 0,1 |
| 8 | 0,0 | -1,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -2,3 | 0,0 |
| 9 | 0,0 | -0,9 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -2,1 | 0,0 |
| 10 | 0,0 | -0,1 | 0,1 | 0,0 | -0,1 | 0,1 | 0,0 | -1,9 | 0,1 |

| Legenda | |
|-----------|-------------------|
| - | pomak prema dolje |
| + | pomak prema gore |
| osjenčeno | sredina raspona |

Tablica 4.1. Izmjerene veličine apsolutnih pomaka u milimetrima

4.2. Dinamičko ispitivanje

4.2.1. Instrumentarij za ispitivanje

Mjerenje dinamičkih veličina izvršeno je uređajem DEWETRON 2010 odnosno DEWE-Rack (Slika 4.13.) i odgovarajućim jednoosnim akcelometrima (Slika 4.14.).



Slika 4.13. Uređaj za dinamička mjerenja DEWETRON 2010 odnosno DEWE-Rack



Slika 4.14. Jednoosni akcelometri za mjerenje dinamičkih veličina

4.2.2. Provedba dinamičkog ispitivanja

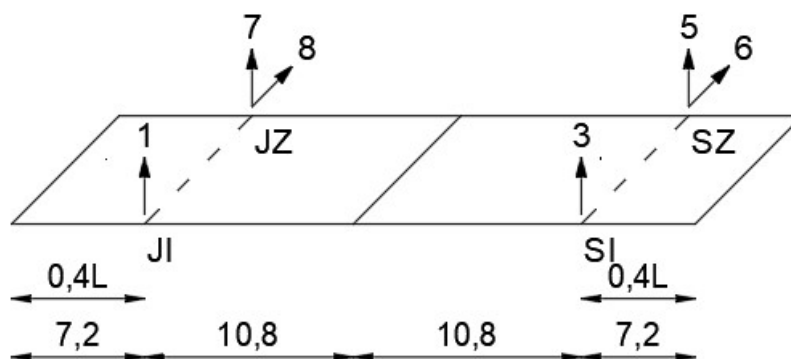
Ispitivanja pod dinamičkim opterećenjem provedena su 21. svibnja 2021. godine u prijedopodnevnim satima. Tijekom ispitivanja vrijeme je bilo sunčano bez vjetrova s temperaturom koja je iznosila oko $+20^{\circ}\text{C}$.

Ispitivanje konstrukcije pješačkog opterećenja provedena je prema predviđenim shemama. Dinamičke karakteristike mjerene su na temelju pobude koja je u prvom redu bila izazvana prometovanjem pješaka (Tablica 4.2.) a u drugom redu redovnim prometom koji se odvija ispod objekta (prometovanje motornih vozila u 4 trake).

| Oznaka prolaza | Vrsta djelovanja | Smjer kretanja | Napomena |
|----------------|------------------|--------------------|--|
| KS-1 | ambijentalno | | Prolaz vozila ispod nathodnika |
| KS-2 | ambijentalno | | Prolaz vozila ispod nathodnika |
| KS-3 | skakanje | L/2 u južnom polju | Dva pješaka (ukupna masa cca 195 kg) |
| KS-4 | pješaćenje | sjever – jug | 2+2 pješaka (dvored od 4 pješaka, uk. masa cca 330 kg) |
| KS-5 | trčanje | jug - sjever | 4 pješaka (jedan iza drugoga, uk. masa cca 330 kg) |

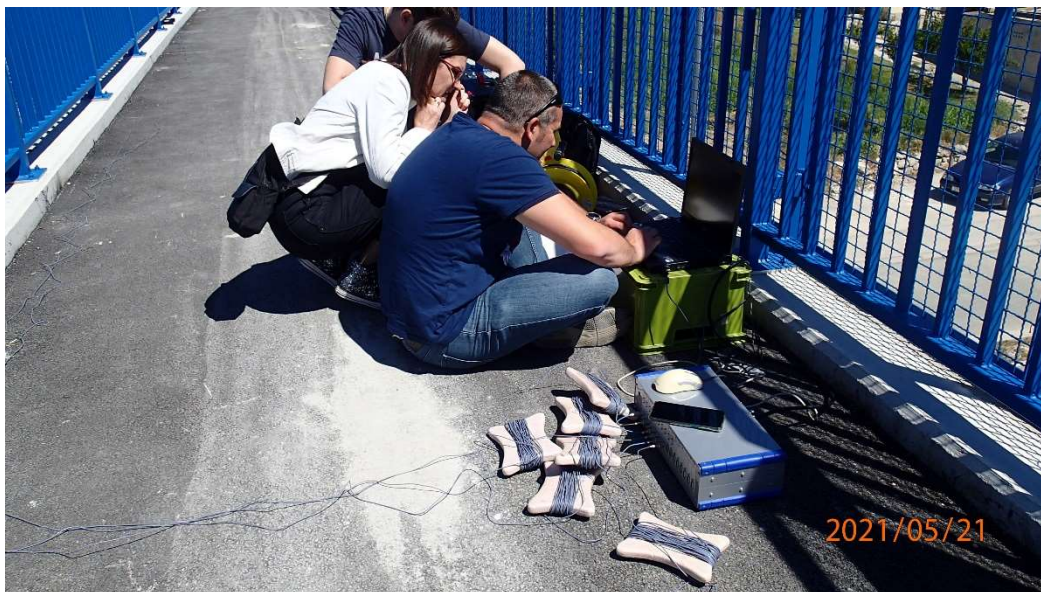
Tablica 4.2. Podaci o djelovanju kod dinamičkog opterećenja

Mjerni uređaji su postavljeni prema shemi na Slici 4.15. Vrijedi napomenuti da akcelerometri nisu postavljeni u sredinama raspona jer se mogu javiti vlastiti oblici titranja objekta u kojima bi sredina raspona bila nul-točka osciliranja. Provedena su dva ambijetalna mjerenja zbog povećanog teretnog prometa za vrijeme mjerenja u odnosu na vrijeme pripremanja opreme.



Slika 4.15. Dispozicija mjernih mjesta za mjerenje akceleracija

Na Slici 4.16. vidi se središnje mjesto za mjerenje vibracija s uređajem DEWETRON 2010 za mjerenje vibracija i kablovima koji spajaju središnji uređaj s akcelerometrima postavljenim na predviđenim mjestima za mjerenje vibracija (Slika 4.16.).

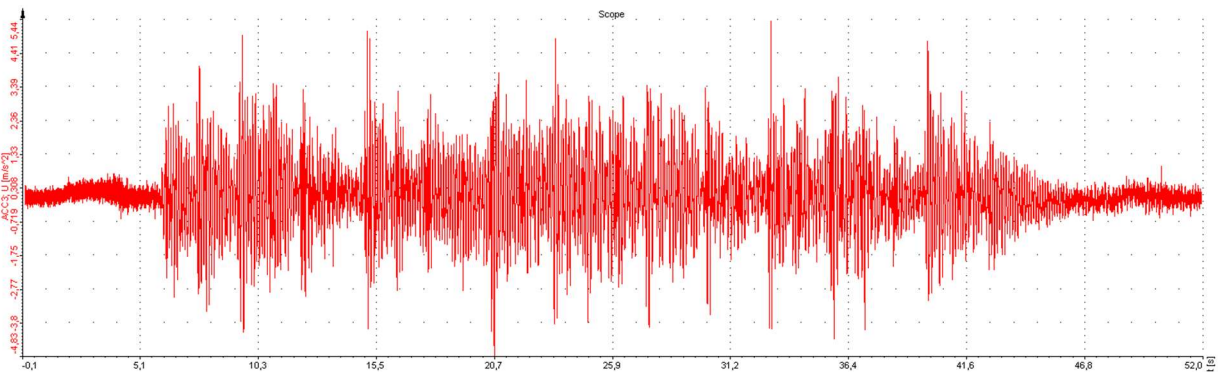


Slika 4.16. Mjerenje vibracija

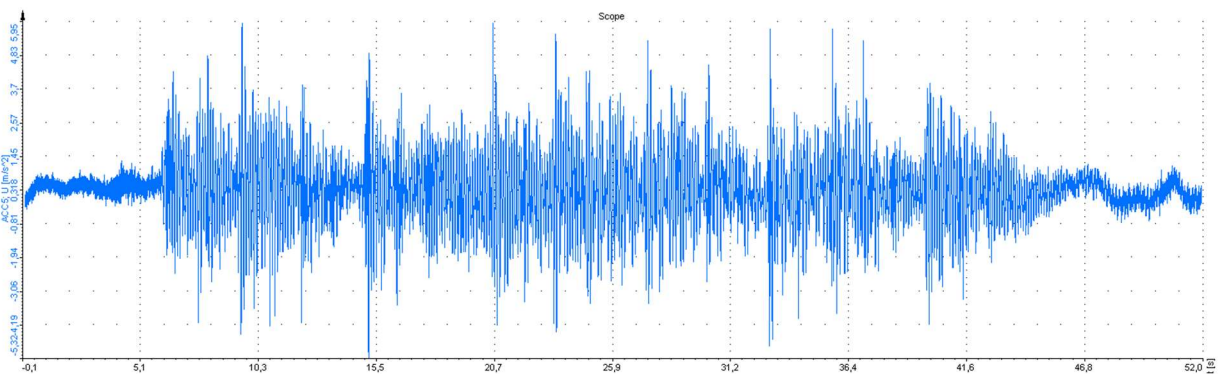
4.2.3. Rezultati dinamičkog ispitivanja

Budući da su grafovi za prolaze KS-1 i KS-2 uslijed ambijentalnih vibracija sadržavali mnogo šumova, oni nisu prikazani u rezultatima jer određivanje karakterističnih vrijednosti iz njih nije bilo moguće. Za svaki od ostalih prolaza (KS-3, KS-4 i KS-5) prikazana su po četiri akcelerograma, kao i pripadajući dijagram spektralne analize (FTT dijagram) (Slike 4.17. do 4.31.). S dijagrama spektralne analize očitane su izmjerene veličine prvih pet dominantnih vlastitih frekvencija, te su prikazane u Tablica 4.3.

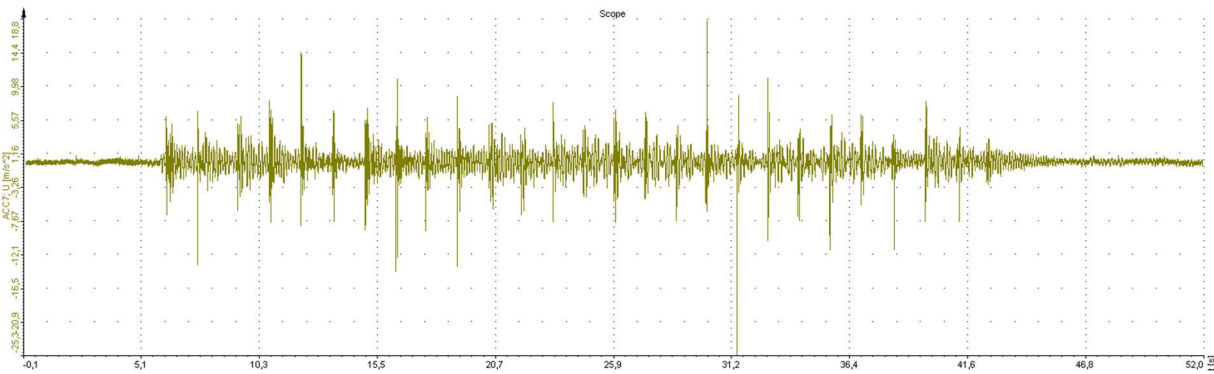
Prolaz KS-3 – skakanje



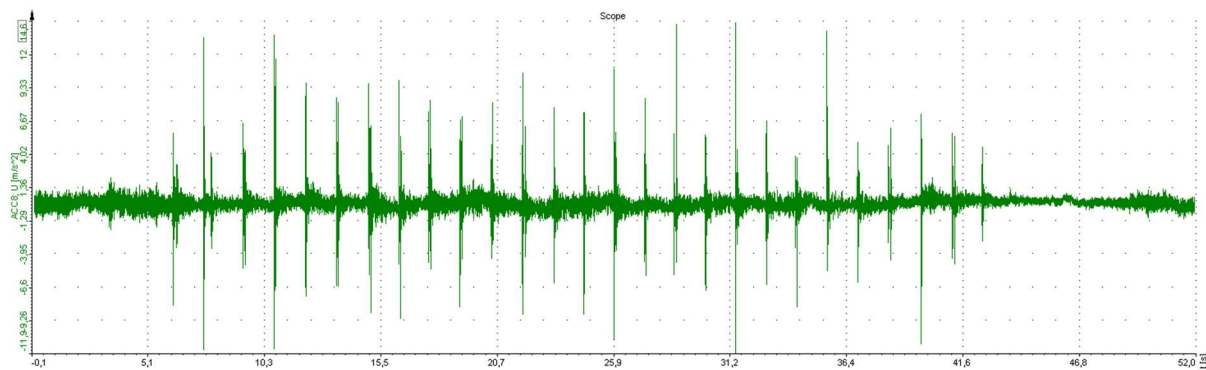
Slika 4.17. Akcelerogram za prolaz KS-3 – vertikalna akceleracija u 0,4L SI polja



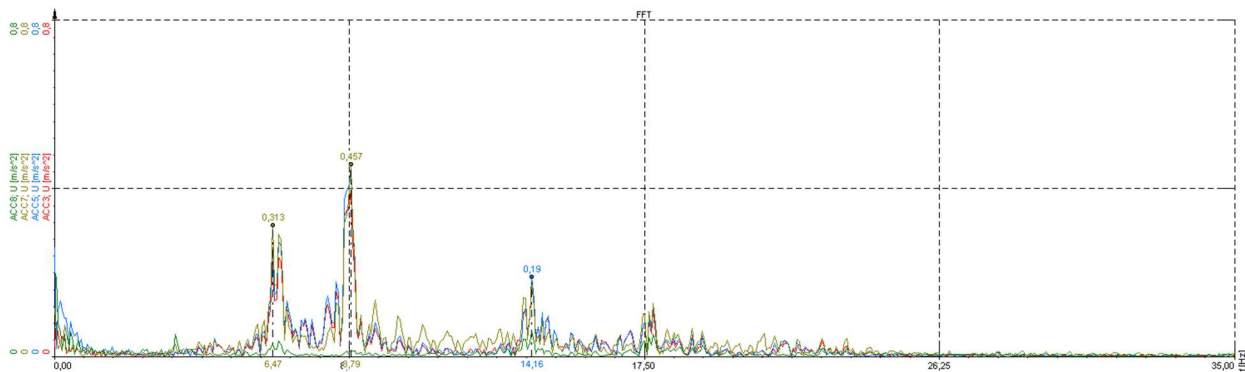
Slika 4.18. Akcelerogram za prolaz KS-3 – vertikalna akceleracija u 0,4L SZ polja



Slika 4.19. Akcelerogram za prolaz KS-3 – vertikalna akceleracija u 0,4L JZ polja

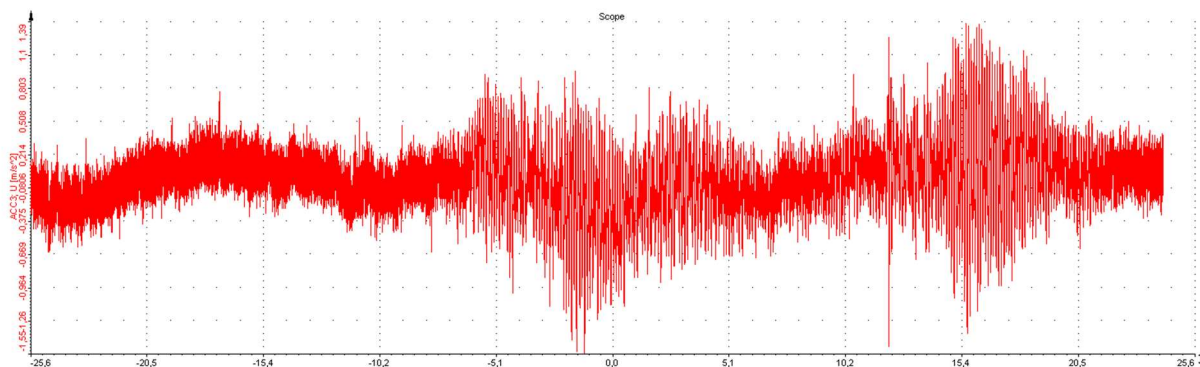


Slika 4.20. Akcelerogram za prolaz KS-3 – horizontalna akceleracija u 0,4L JZ polja

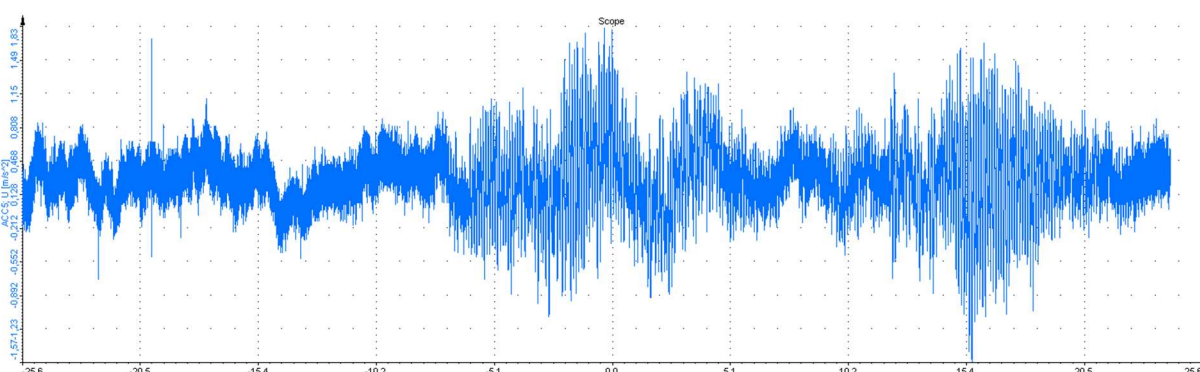


Slika 4.21. Dijagram spektralne analize (FTT dijagram) za prolaz KS-3

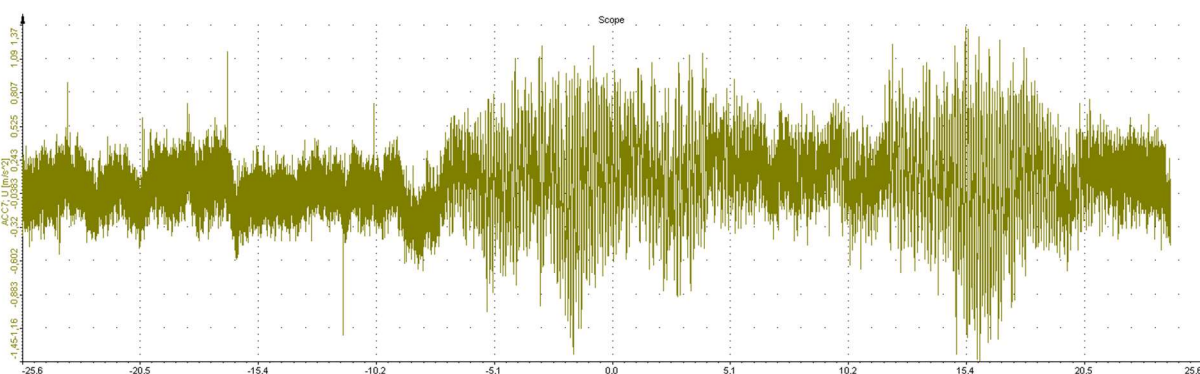
Prolaz KS-4 – šetanje



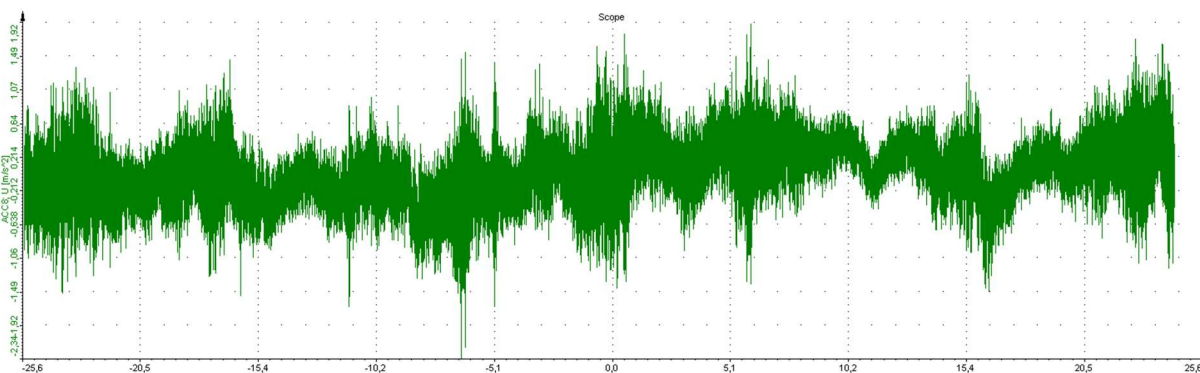
Slika 4.22. Akcelerogram za prolaz KS-4 – vertikalna akceleracija u 0,4L SI polja



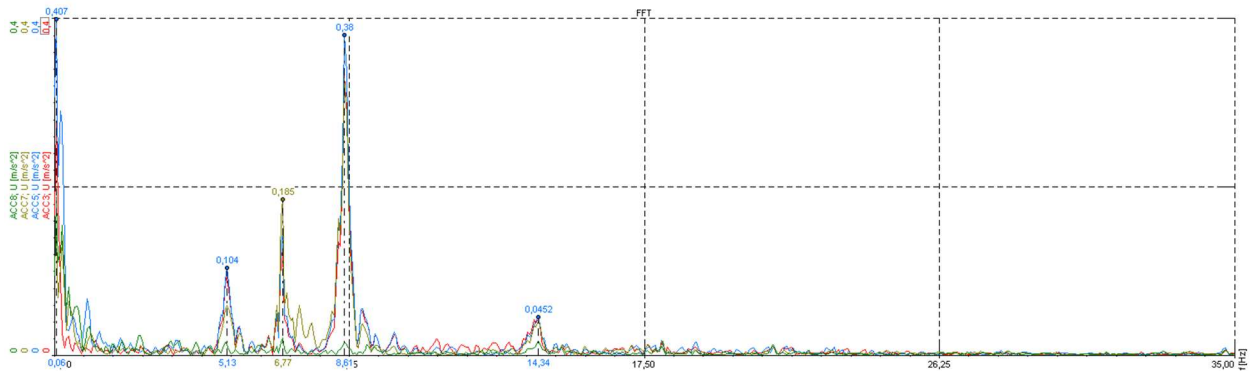
Slika 4.23. Akcelerogram za prolaz KS-4 – vertikalna akceleracija u 0,4L SZ polja



Slika 4.24. Akcelerogram za prolaz KS-4 – vertikalna akceleracija u 0,4L JZ polja

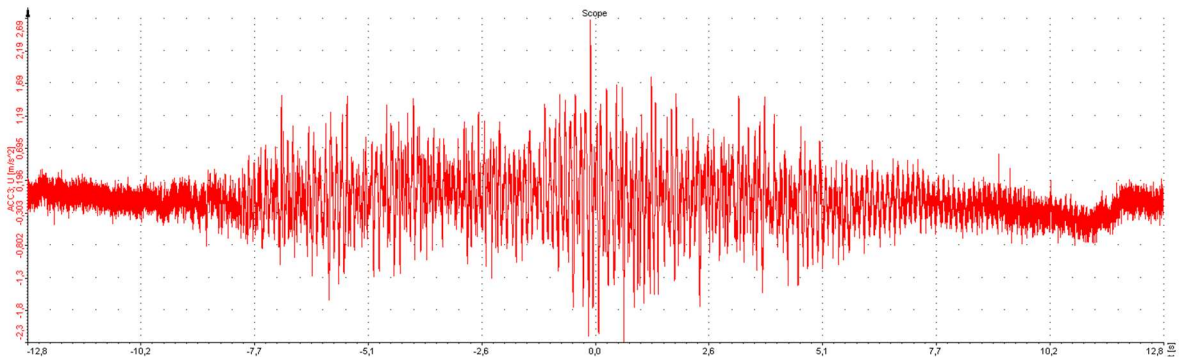


Slika 4.25. Akcelerogram za prolaz KS-4 – horizontalna akceleracija u 0,4L JZ polja

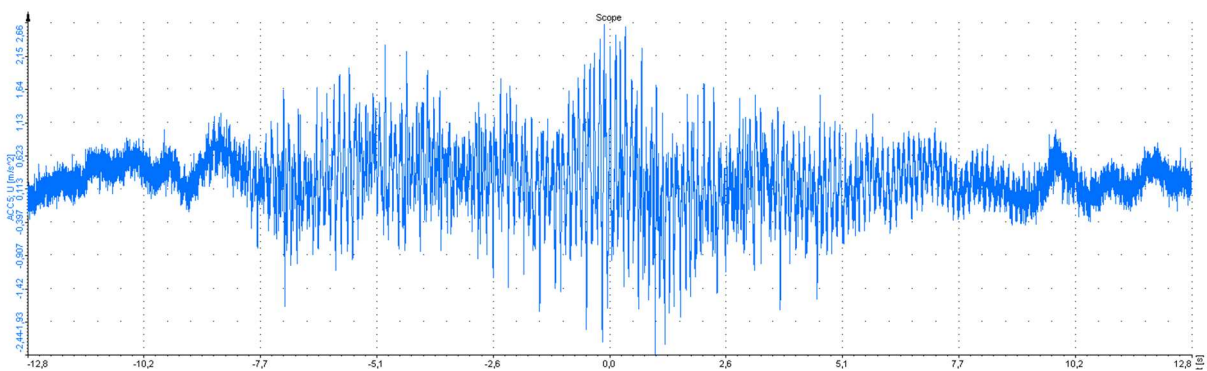


Slika 4.26. Dijagram spektralne analize (FFT dijagram) za prolaz KS-4

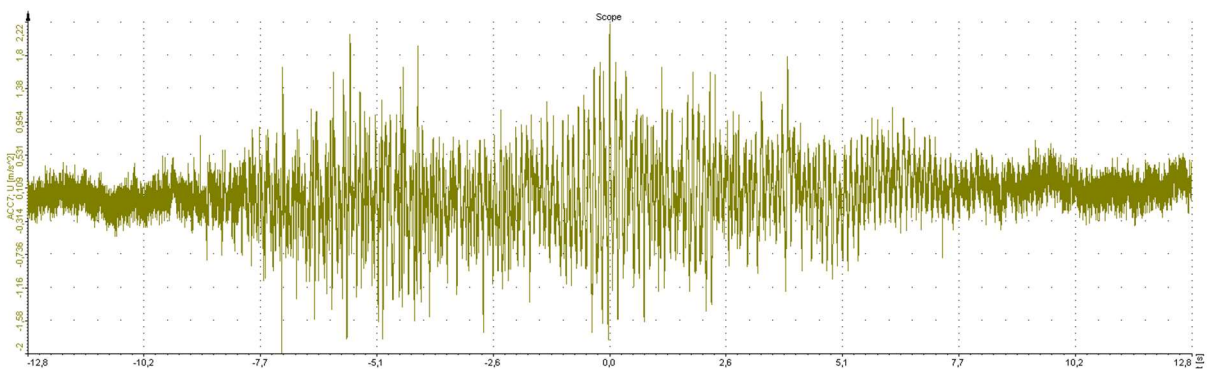
Prolaz KS-5 – trčanje



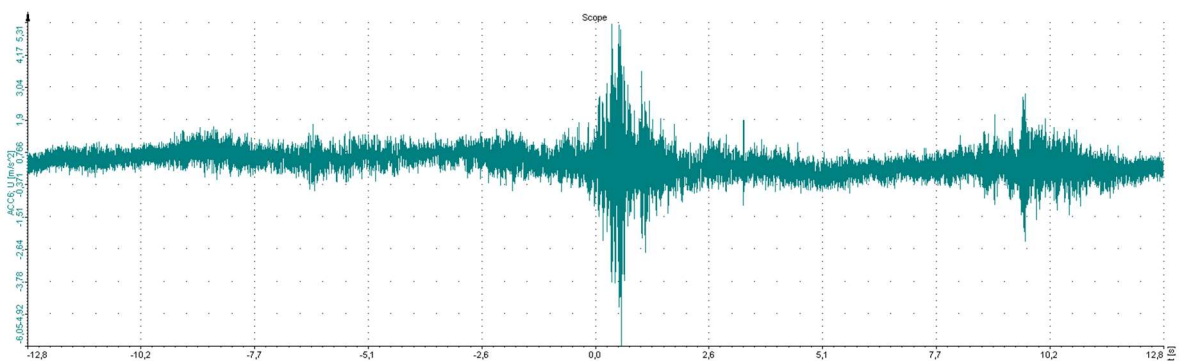
Slika 4.27. Akcelerogram za prolaz KS-5 – vertikalna akceleracija u 0,4L SI polja



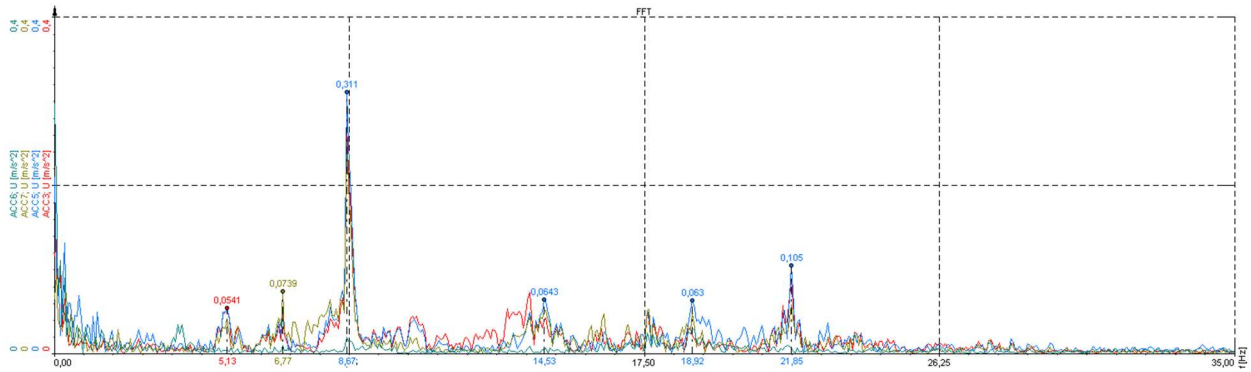
Slika 4.28. Akcelerogram za prolaz KS-5 – vertikalna akceleracija u 0,4L SZ polja



Slika 4.29. Akcelerogram za prolaz KS-5 – vertikalna akceleracija u 0,4L JZ polja



Slika 4.30. Akcelerogram za prolaz KS-5 – horizontalna akceleracija u 0,4L SZ polja



Slika 4.31. Dijagram spektralne analize (FTT dijagram) za prolaz KS-5

Podaci iz dijagrama spektralne analize (FTT dijagrami) (Slike 4.21., 4.26. i 4.31.) prikazuju vlastite frekvencije objekta. Njih možemo očitati te su za prvih pet dominantnih frekvencija prikazane u Tablica 4.3.

| Prolaz | Izmjerene vlastite frekvencije (Hz) | | | | |
|--------|-------------------------------------|---------------|------|-------|------|
| | KS-1 | Nisu određene | | | |
| KS-2 | Nisu određene | | | | |
| KS-3 | - | 6,47 | 8,79 | 14,16 | 17,5 |
| KS-4 | 5,13 | 6,77 | 8,61 | 14,34 | 17,5 |
| KS-5 | 5,13 | 6,77 | 8,67 | 14,53 | 17,5 |

Tablica 4.3. Izmjerene veličine vlastitih frekvencija (vrijednosti u Hz)

5. NUMERIČKI PRORAČUN PJEŠAČKOG NATHODNIKA KAŠTEL STARI

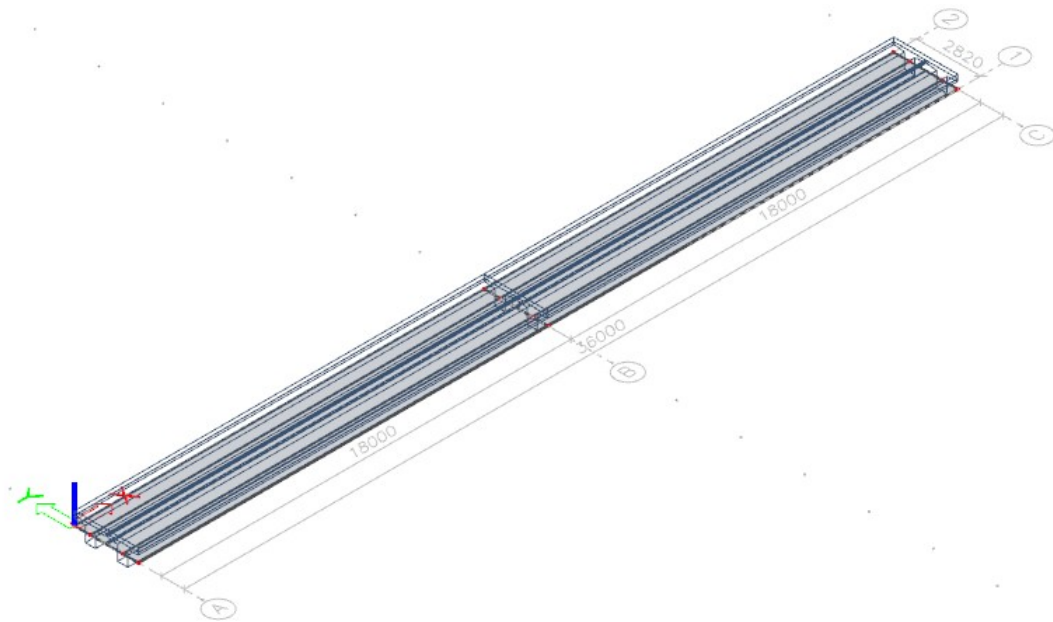
Numerički proračun nathodnika izveden je koristeći software SCIA Engineer 20. Geometrijske karakteristike pješačkog nathodnika preuzete su iz Glavnog i Izvedbenog projekta [5, 6]. Nosiva konstrukcija nathodnika modelirana je kao orebrena ploča. Ploča je tretirana kao 2D element dok su rebra dva odvojena T presjeka tretirana kao 1D element. Budući da software ne može za ovakav presjek omogućiti odabir različite čvrstoće betona, odabrana je čvrstoća betona greda (C40/50). Ploče su podijeljene na 488 konačnih elemenata, a rebra na 216 konačnih elemenata. Budući da je unutar software-a ploča povezana s rebrima poprečni presjek je zapravo π presjek koji ima jednu os koja je unutar software-a ručno postavljena u os grede radi modeliranja kabela za prednapinjanje. Oslonci su postavljeni na krajevima raspona, te jedan u sredini i svi su uzeti kao nepomični ležajevi. Odabrana armatura je također preuzeta iz Glavnog i Izvedbenog projekta [5, 6], međutim tu nailazimo na prvo ograničenje software-a. Naime za ovakav kompleksan model nije bilo moguće napraviti proračun u kojem odabrana armatura ulazi u proračun i utječe na veličine progiba. Karakteristike i geometrija kabela za prednapinjanje je preuzeta iz Glavnog i Izvedbenog projekta [5, 6]. U jednoj gredi su postavljena dva kabela, jedan iznad drugog, s promjenjivom horizontalnom geometrijom. Svaki individualni kabel je sastavljen od sedam užadi promjera 0,6" kvalitete čelika Y1860S7 ukupne površine 15,2 cm², sa silom prednapinjanja od 1350 kN. Unutarnji promjer zaštitne cijevi iznosi 65 mm. Pri modeliranju je bilo potrebno zadati četiri različite geometrije kablova budući da je horizontalna geometrija promjenjiva a trebalo je postići simetričan utjecaj kablova.

Kod modalne analize vlastita težina je na oba raspona postavljena na 7,2 m (0,4L) te je prikazana na Slici 5.4., što odgovara stvarnom položaju uređaja za mjerenje i pobude kod dinamičkog ispitivanja. Ploča je simulirana površinskim opterećenjem iznosa 0,9 kN/m² (M = 91,7 kg/m²) a vijenci, ograde i dio ploče koji služi kao rubnjaci su simulirani linijskim opterećenjem iznosa 1,9 kN/m (M = 193,7 kg/m') što je prikazano je na Slici 5.5.

Osigurano probno opterećenje bilo je težine oko 1300 kg/paleti, a za model je opterećenje postavljeno kao površinsko jednoliko raspodjeljeno opterećenje na ploči iznosa 3,05 kN/m². Unutar modela bilo je potrebno napraviti dvije situacije – opterećenje preko jednog polja (Slika 5.6.), te opterećenje preko dva polja (Slika 5.8). Osim probnog opterećenja bilo je potrebno zadati opterećenje od prednapinjanja kao i vlastitu težinu konstrukcije. Pri proračunu konstrukcije svi sigurnosni koeficijenti su uzeti kao faktor 1,0 budući da je riječ od stvarnim veličinama na terenu.

Numerički model konstrukcije pješačkog nathodnika prikazan je na Slici 5.1. Tako se na Slici 5.1.a) vidi geometrija modela, a na Slici 5.1.b) armatura i geometrijske karakteristike poprečnog presjeka.

Budući da korišteni software ima mogućnosti vršenja nelinearnih proračuna i modelske analize na slijedećim slikama su prikazane usporedbe rezultata proračuna konstrukcije za sve sheme opterećenja (Slike 5.6. i 5.8.) pri linearnom i nelinearnom proračunu (Slike 5.7. i 5.9.), a na kraju i dominantni oblici titranja zajedno sa svojim frekvencijama (Slika 5.10.).

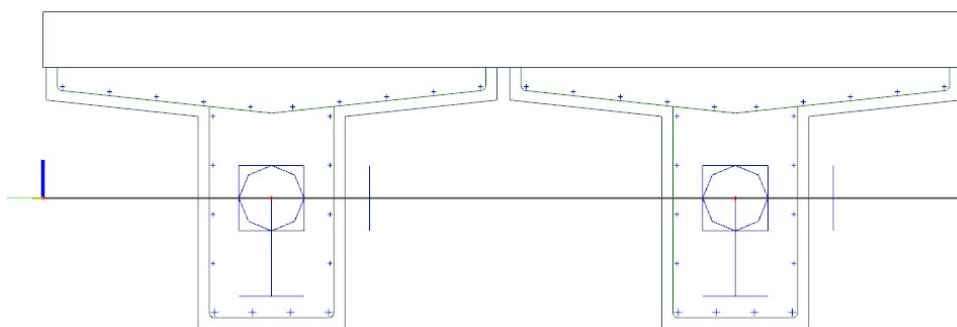


a) Geometrija modela konstrukcije nathodnika



- ① 2x120d8-150 B 500B, length=1,995 [m]
- ② 2x120d8-150 B 500B, length=1,778 [m]

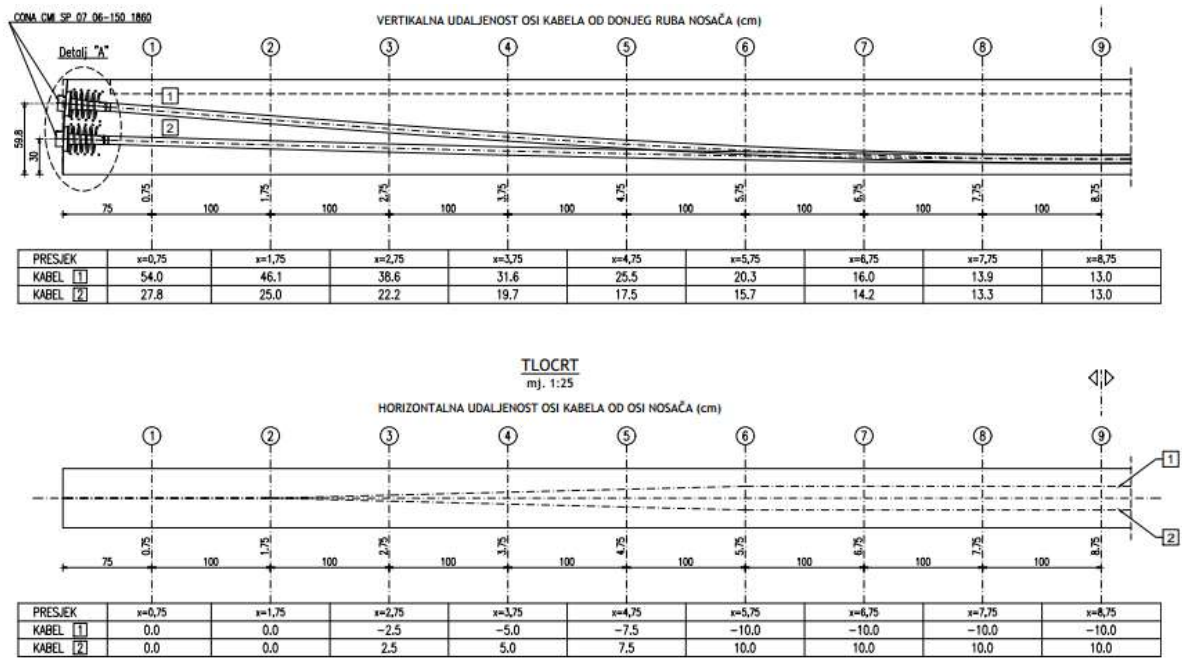
- ③ 4d25 B 500B, length=18,000 [m]
- ④ 4d16 B 500B, length=18,000 [m]
- ⑤ 4d16 B 500B, length=18,000 [m]
- ⑥ 5d16 B 500B, length=18,000 [m]
- ⑦ 5d16 B 500B, length=18,000 [m]



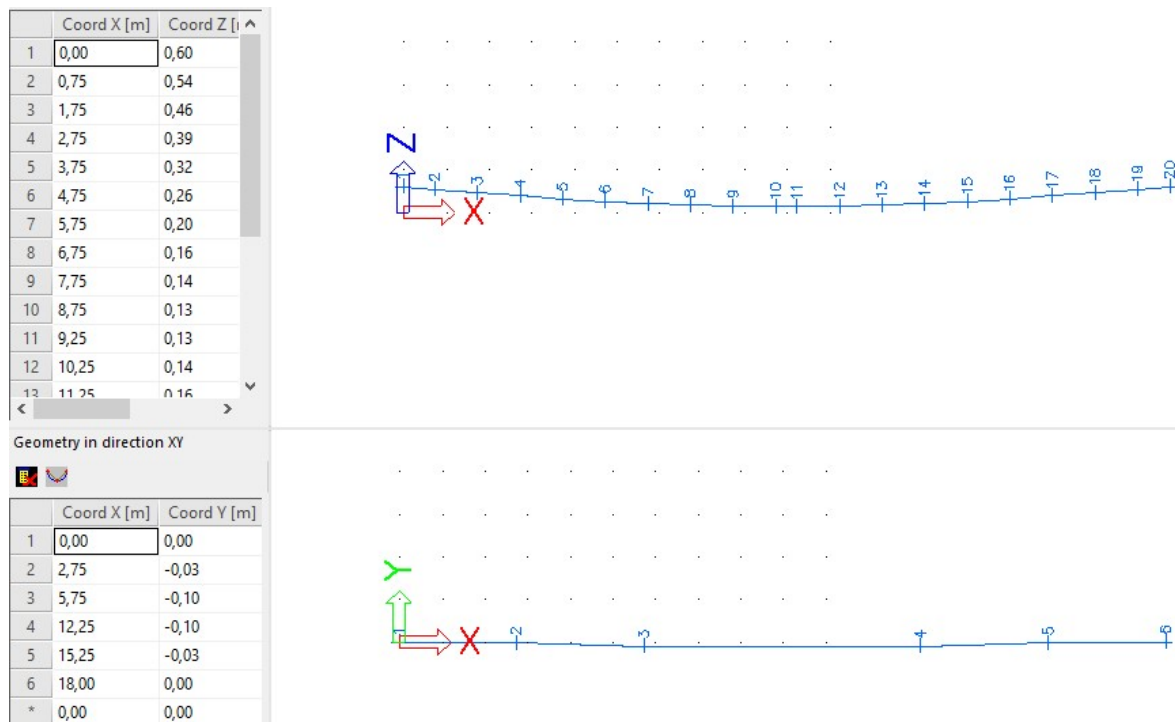
| | |
|----------------|----------------------|
| A | 1,439 m ² |
| I _Y | 0,112 m ⁴ |
| I _Z | 0,873 m ⁴ |

b) Armatura i poprečni presjek nosive konstrukcije nathodnika

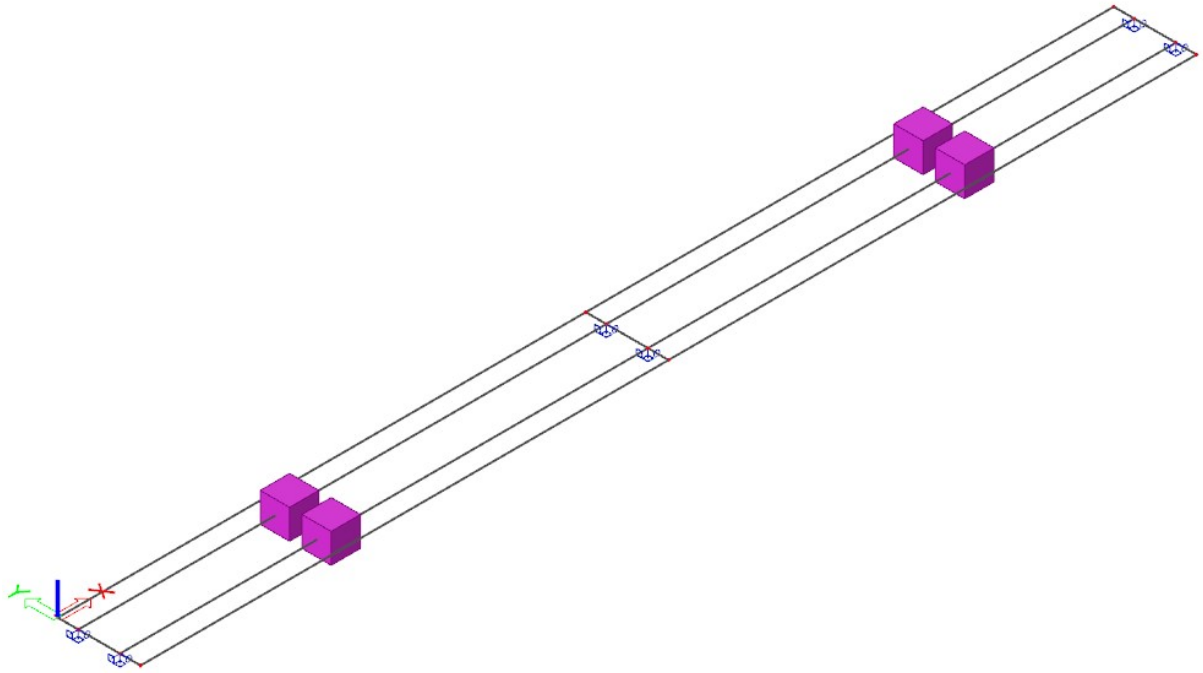
Slika 5.1. Geometrija pješačkog nathodnika



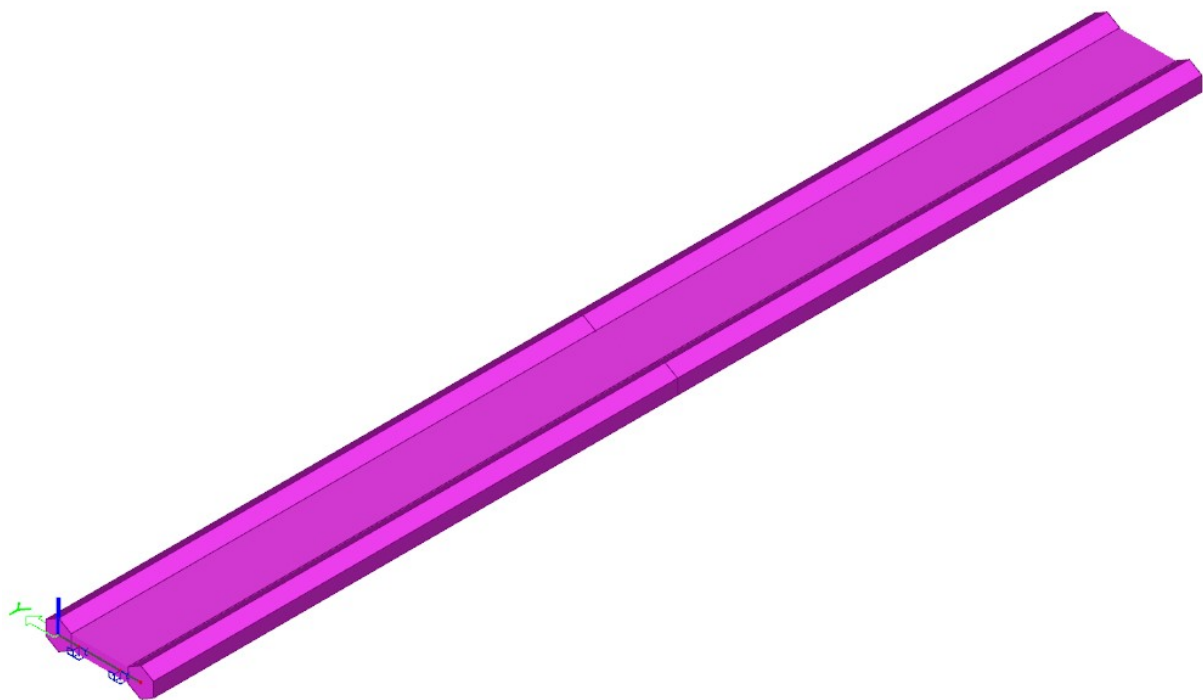
Slika 5.2. Stvarna geometrija kabela za prednapinjanje



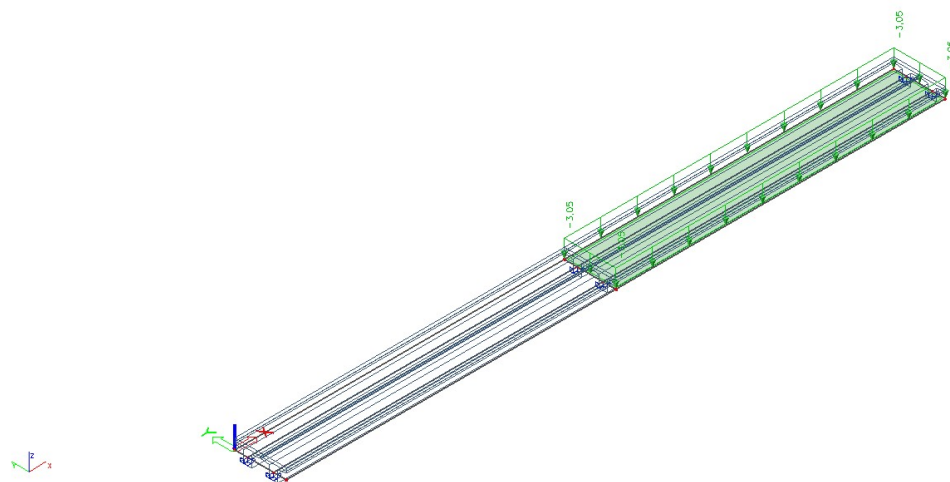
Slika 5.3. Geometrija gornjeg kabela za prednapinjanje za desno rebro nosača



Slika 5.4. Modalna analiza-vlastita težina

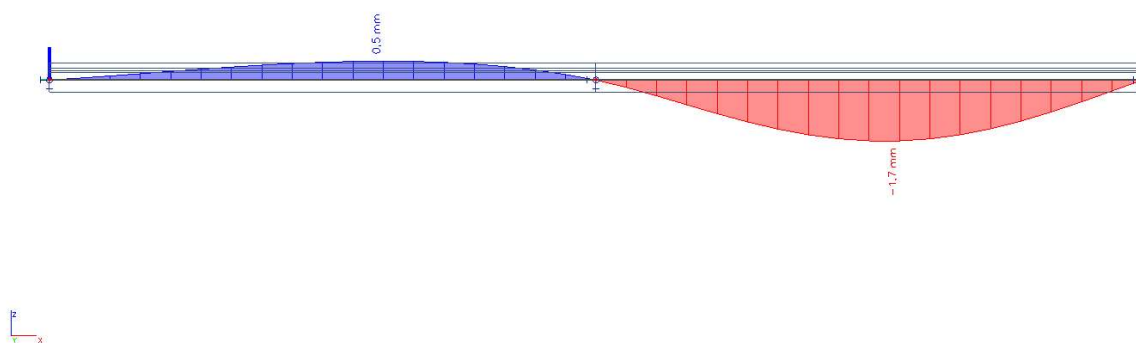


Slika 5.5 Modalna analiza-dodatno stalno opterećenje



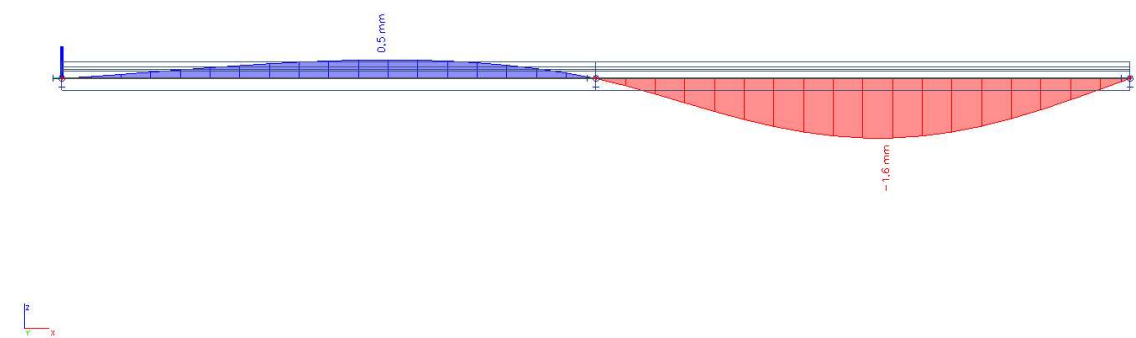
Slika 5.6. Shema opterećenja nathodnika – jedno polje

1D deformations
 Values: tz
 Linear calculation
 Load case: G1
 Coordinate system: Global
 Extreme ID: Global
 Selection: All



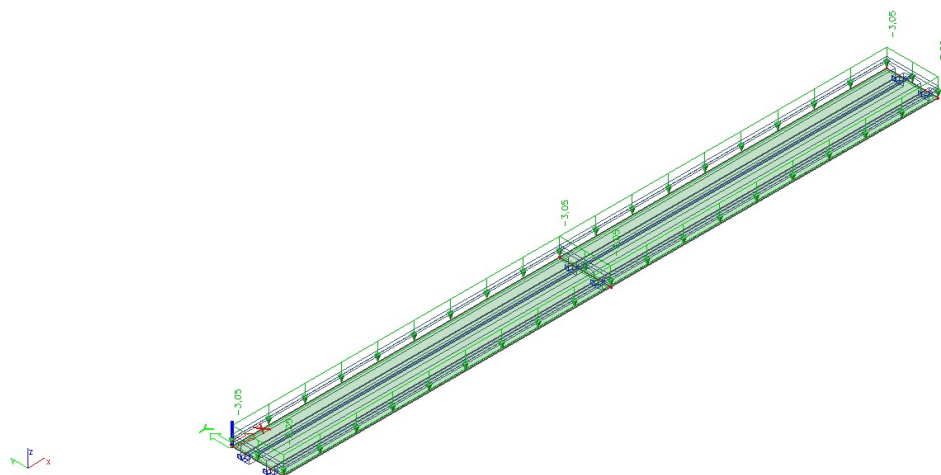
a) Linearni proračun

1D deformations
 Values: tz
 Nonlinear calculation
 NonLinear Combi: P1
 Coordinate system: Global
 Extreme ID: Global
 Selection: All



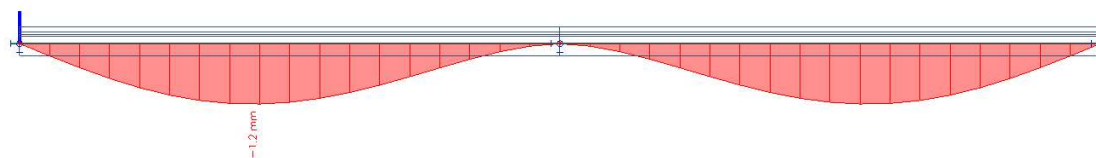
b) Nelinearni proračun

Slika 5.7. Veličine vertikalnih progiba za opterećenje na jednom polju



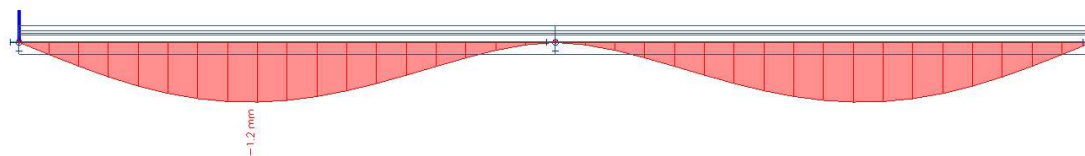
Slika 5.8. Shema opterećenja nathodnika – dva polja

1D deformations
 Values: tz
 Linear calculation
 Load case: G2
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: All



a) Linearni proračun

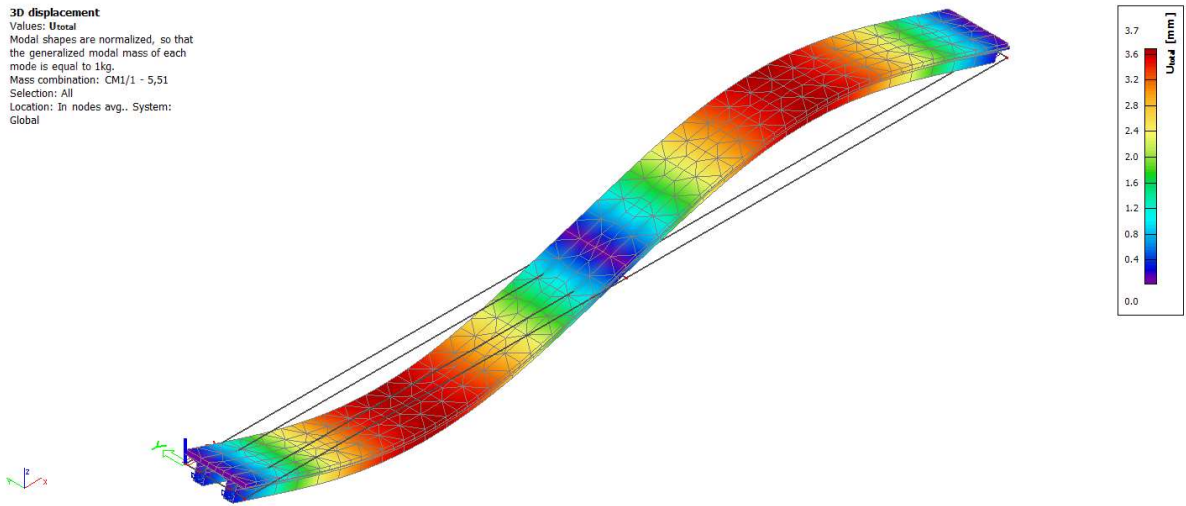
1D deformations
 Values: tz
 Nonlinear calculation
 NonLinear Combi: P2
 Coordinate system: Global
 Extreme 1D: Global
 Selection: All



b) Nelinearni proračun

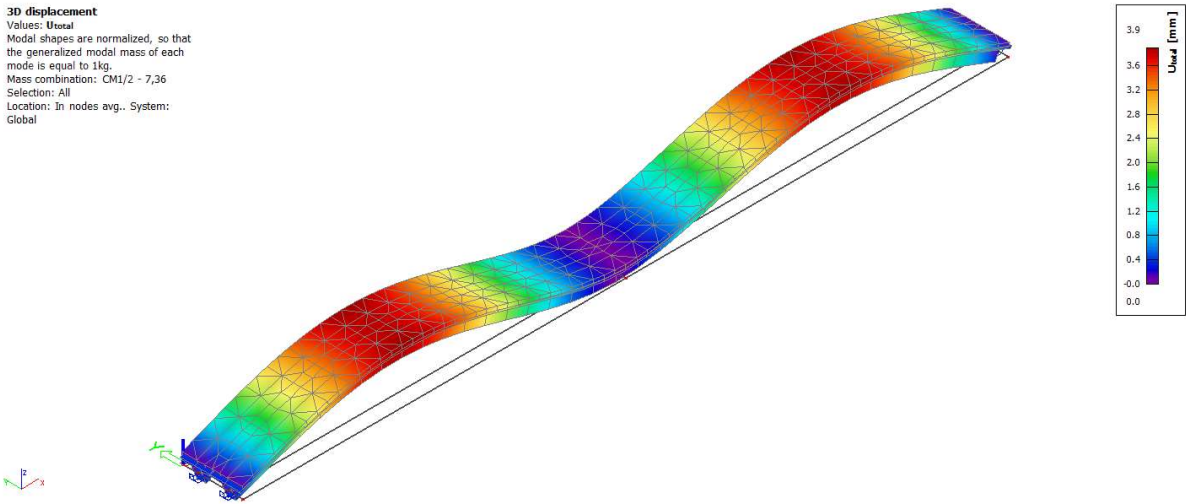
Slika 5.9. Veličine vertikalnih progiba za opterećenje na 2 polja

3D displacement
 Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM1/1 - 5,51
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



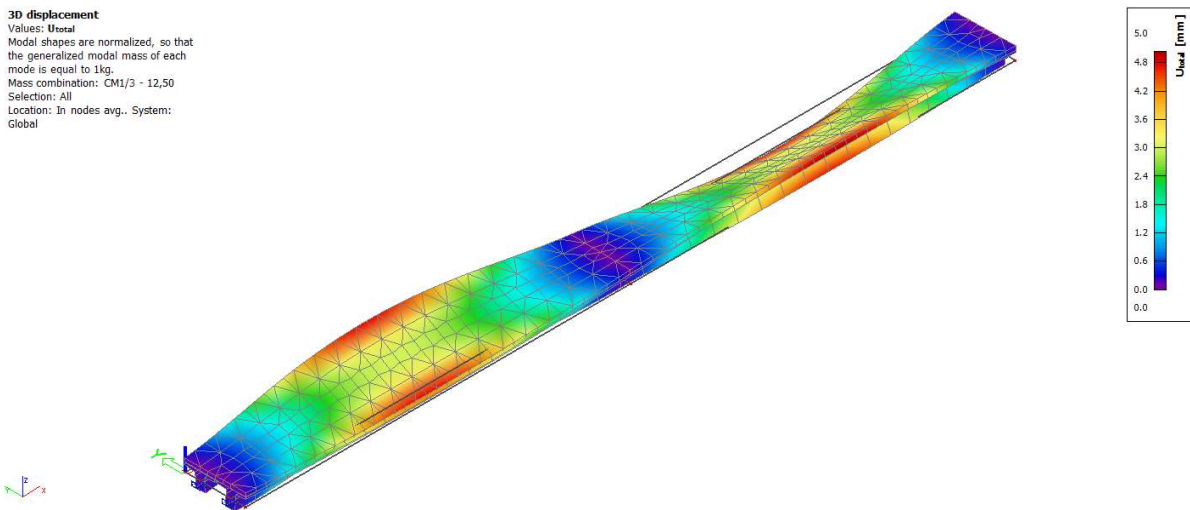
a) Prvi oblik titranja 5,51 Hz

3D displacement
 Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM1/2 - 7,36
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



b) Drugi oblik titranja 7,36 Hz

3D displacement
 Values: U_{total}
 Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.
 Mass combination: CM1/3 - 12,50
 Selection: All
 Location: In nodes avg.. System: Global



c) Treći oblik titranja 12,50 Hz

Slika 5.10. Prva tri dominantna oblika titranja konstrukcije nathodnika

6. USPOREDBA EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH REZULTATA

6.1. Postignuta razina opterećenja

Prema statičkom proračunu, nosači nathodnika su dimenzionirani prema najkritičnijim momentima savijanja za opterećenje iznosa $5,0 \text{ kN/m}^2$. Za probno opterećenje osigurani teret (vreće cementa na paleti) je iznosio oko 1300 kg/paleti , odnosno u modelu kontinuirano opterećenje iznosa $3,05 \text{ kN/m}^2$ što iznosi 61% od projektog.

Maksimalni momenti savijanja od pokretnog opterećenja iz proračuna koje je trebalo dostići probnim opterećenjem su iznosa 150 kNm u polju, te 269 kNm na srednjem osloncu nathodnika.

Maksimalni momenti savijanja od probnog opterećenja koje je bilo osigurano su iznosa 91 kNm u polju, te 164 kNm na srednjem osloncu nathodnika.

Uzevši u obzir gore navedene veličine, možemo ustvrditi da izvršeno probno opterećenje zadovoljava kriterij iz važeće norme [2] za normalno probno opterećenje, odnosno da 61% postignutog opterećenja spada pod dozvoljeno $0,5 \leq U \leq 1,0$.

6.2. Usporedba vertikalnih progiba

Usporedbe progiba izmjerenih relativnih (apsolutne vrijednosti pomaka reducirane na nepomične oslonce) i proračunatih (linearnih i nelinearnih) veličina progiba prikazane su u Tablici 6.1., a karakteristične mjerne točke prikazane su na Slici 4.12. Najveći zabilježeni progib se javlja u drugoj fazi i iznosi $1,0 \text{ mm}$.

Mjerna mjesta 3 i 4 postavljena su na južni raspon, a mjerna mjesta 7 i 8 postavljena su na sjeverni raspon (Slika 4.12).

U fazi 2 možemo primjetiti da južni raspon ima relativno ujednačen progib, dok na sjevernom rasponu imamo značajno odstupanje u veličinama progiba koje se još značajnije razlikuju od proračunatih linearnih i nelinearnih veličina.

U fazi 3 možemo vidjeti jako neobične rezultate, naime dok su veličine sjevernog raspona manje raspršene nego u prijašnjoj, u južnom rasponu (koji je opterećen) dolazi do uzdizanja mjerne točke 4, a sve skupa sa značajnim odstupanjem od obaju proračunatih vrijednosti.

U fazi 5 opterećenje je postavljeno na oba polja, iako u ovoj fazi točke u pripadajućim rasponima imaju iste/bliske veličine, razlika veličine progiba između južnog i sjevernog je 0,25-0,3 mm, ili izraženo u postotku 260-400%.

Kroz sve promatrane faze možemo primjetiti da se najveća razlika (u apsolutnoj vrijednosti) javlja između mjernih mjesta 4 i 8 i u sva 3 slučaja pomak u mjernom mjestu 8 ispada 4 puta veći od pomaka u mjernom mjestu 4, tj 400%. Sve promatrane faze s pripadajućim progibima će biti grafički prikazane na Slikama 6.1. do 6.3.

Vjerojatni razlog ovakvog odstupanja možemo pronaći u klizanju ležajeva, a kod proračunatih vrijednosti dolazi do izražaja ograničenje software-a i možemo primjetiti zanemarivo malu razliku između linearnog i nelinearnog proračuna. Iako model sadrži armaturu ona pri proračunu nije utjecala na veličine progiba jer proračun koji bi ju uključio ne može biti izvršen za ovakav model.

| Mjerno mjesto | Usporedba progiba (mm) | | | | | | | | |
|---------------|------------------------|------------------|------------------|--------|------------------|------------------|--------|------------------|------------------|
| | Faza 2 | | | Faza 3 | | | Faza 5 | | |
| | I | P _{LIN} | P _{NEL} | I | P _{LIN} | P _{NEL} | I | P _{LIN} | P _{NEL} |
| 3 | -0,30 | -0,50 | -0,50 | 0,40 | 1,70 | 1,60 | 0,10 | 1,20 | 1,20 |
| 4 | -0,25 | -0,50 | -0,50 | -0,10 | 1,70 | 1,60 | 0,15 | 1,20 | 1,20 |
| 7 | 0,35 | 1,70 | 1,60 | -0,20 | -0,50 | -0,50 | 0,40 | 1,20 | 1,20 |
| 8 | 1,00 | 1,70 | 1,60 | -0,40 | -0,50 | -0,50 | 0,40 | 1,20 | 1,20 |

(+) POMAK PREMA DOLJE

(-) POMAK PREMA GORE

Tablica 6.1. Usporedba izmjerenih (I), proračunatih linearnih (P_{LIN}) i nelinearnih (P_{NEL}) relativnih pomaka

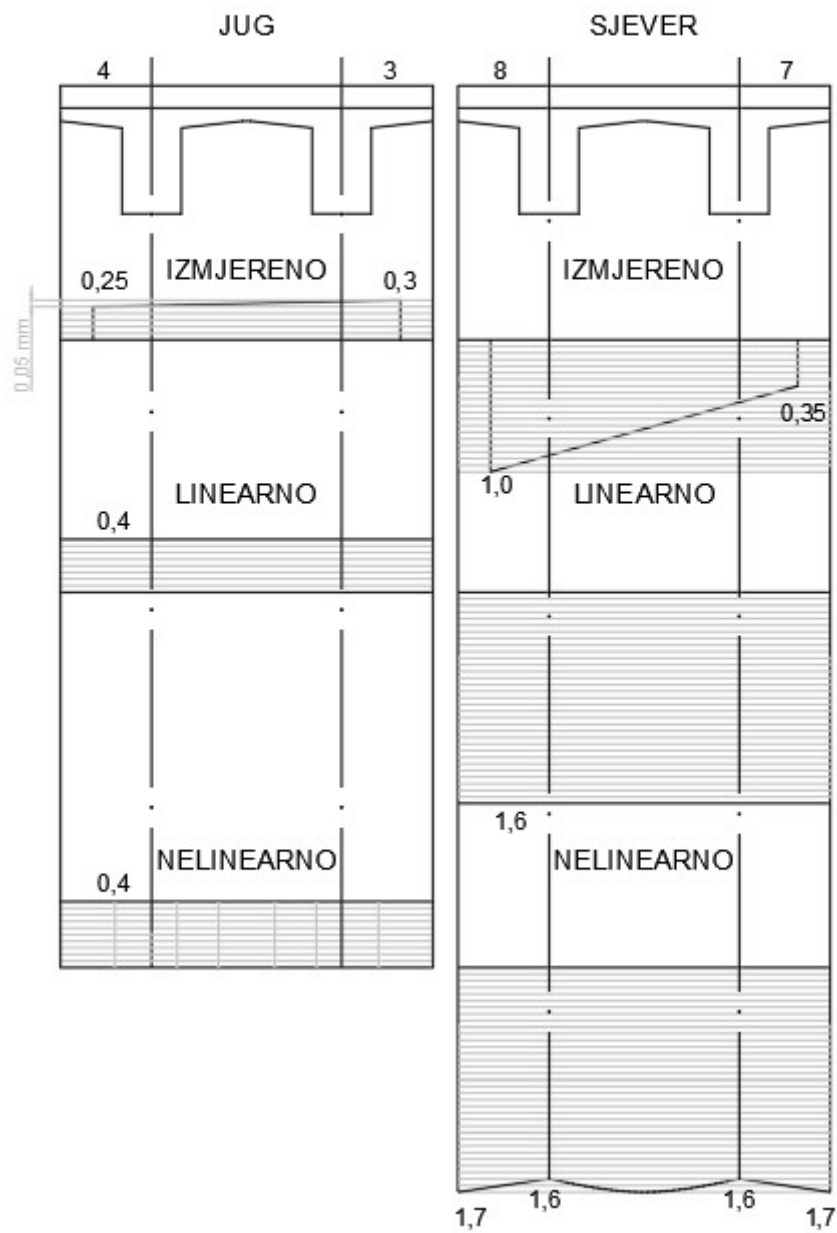
6.3. Usporedba vlastitih frekvencija

Usporedba izmjerenih i proračunatih (modalna analiza) veličina prvih pet vlastitih frekvencija prikazana je u Tablici 6.2. Možemo primjetiti da proračunate vlastite frekvencije osciliraju odnosno odstupaju od izmjerenih za otprilike 10%, izuzev treće vlastite frekvencije. Rezultati sugeriraju da je model za prve tri vlastite frekvencije ponešto krući, a za druge dvije ponešto mekši od stvarnog nathodnika. Rezultati mjerenja za prolaskes KS-1 i KS-2 nisu prikazani budući da su to mjerenja ambijentalnih vibracija puna šumova od prometa ispod nathodnika tako da stoga nije bilo moguće ništa iz njih odrediti.

| Prolaz | Izmjerene vlastite frekvencije (Hz) | | | | |
|-------------|-------------------------------------|------|------|-------|-------|
| KS-3 | - | 6,47 | 8,79 | 14,16 | - |
| KS-4 | 5,13 | 6,77 | 8,61 | 14,34 | - |
| KS-5 | 5,13 | 6,77 | 8,67 | 14,52 | 18,92 |
| Proračunato | 5,51 | 7,36 | 12,5 | 13,14 | 17,79 |

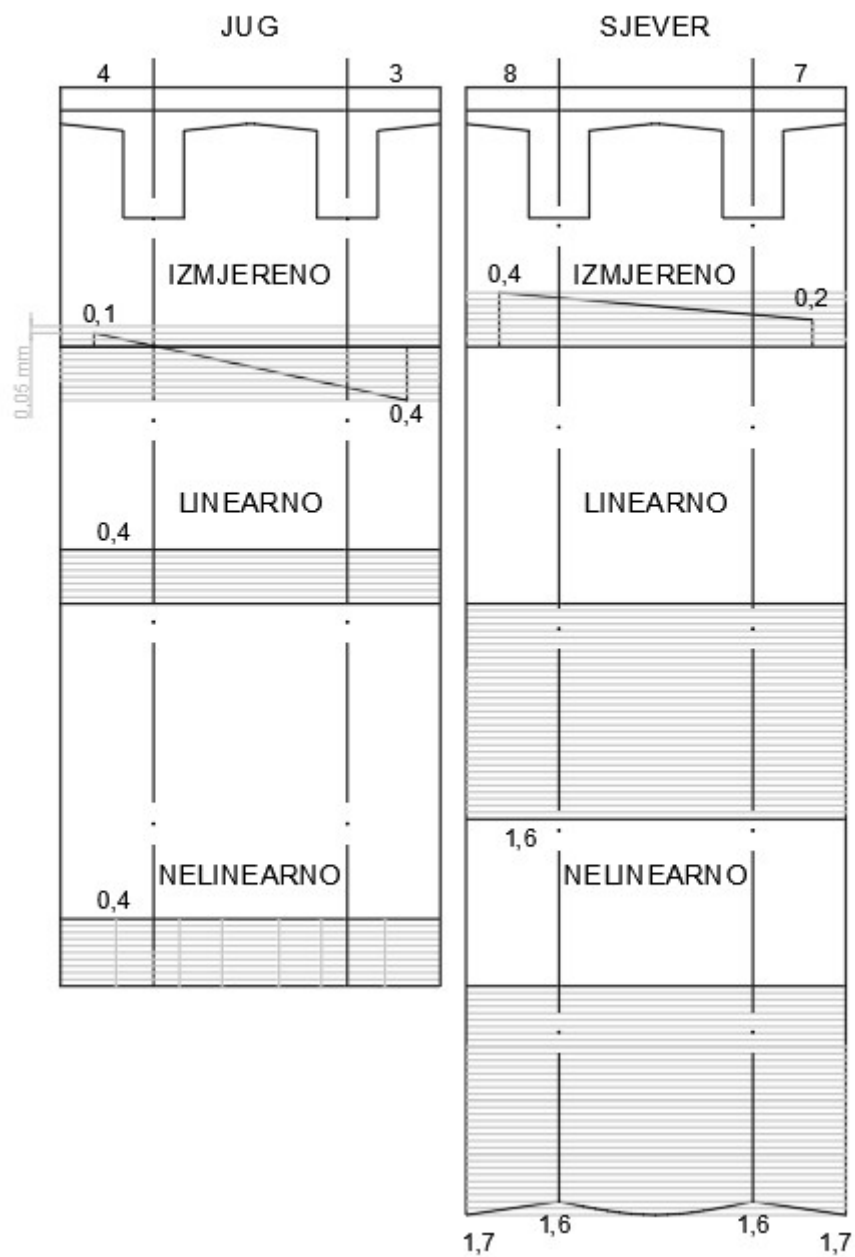
Tablica 6.2. Usporedba izmjerenih i proračunatih veličina prvih pet vlastitih frekvencija

FAZA 2



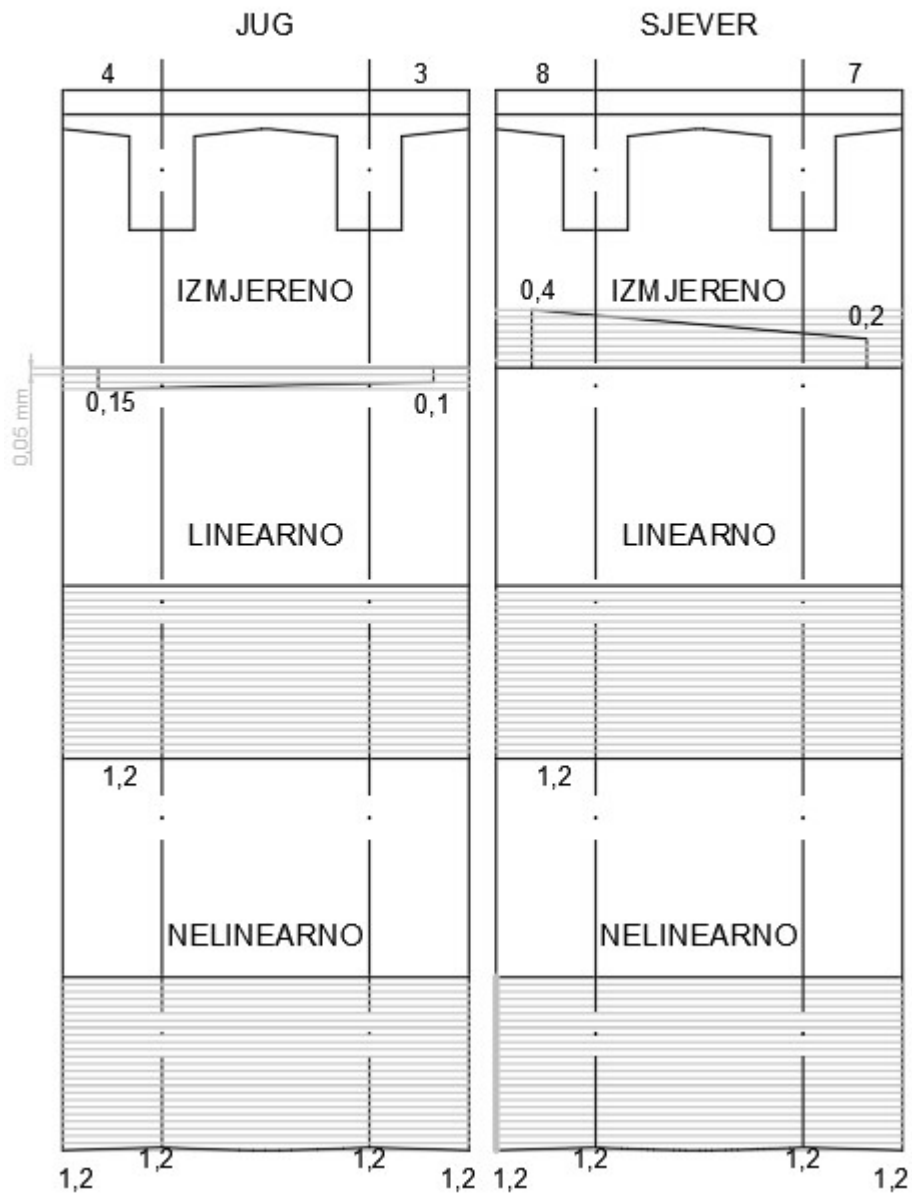
Slika 6.1. Grafički prikaz progiba ploče u fazi 2

FAZA 3



Slika 6.2. Grafički prikaz progiba ploče u fazi 3

FAZA 5



Slika 6.3. Grafički prikaz progiba ploče u fazi 5

7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog statičkog i dinamičkog ispitivanja nathodnika možemo reći da se sami nathodnik ponaša konstruktivno ispravno, te da su izmjerene veličine progiba i deformacija u dozvoljenim granicama. Zaostale deformacije su unutar dozvoljenih vrijednosti, te imaju povratni karakter pa se može pretpostaviti da se konstrukcija ponaša elastično. Dinamički odgovor konstrukcije na pješačko opterećenje je u skladu s očekivanim i vrijednosti vlastitih frekvencija su u granicama očekivanih.

Promatrajući rezultate izrađenog modela mogu se primjetiti značajne razlike u odnosu na stvarno izmjerene vrijednosti. Ovolika odstupanja izmjerenog i proračunatog proizlaze pretežno iz sljedećih razloga:

- Izvođenje konstrukcije pod realnim uvjetima znači da će uvijek postojati razlika između izvedene konstrukcije i proračunskog modela
- Pomak ležajeva tokom ispitivanja konstrukcije
- Ograničenje software-a pri izradi strukturalnog dijela modela
- Ograničenje software-a pri nelinearnom proračunavanju

Iz Tablice 6.1. možemo primjetiti značajno odstupanje izmjerenih i proračunatih vrijednosti, dok su istovremeno vrijednosti linearnog i nelinearnog proračuna jako bliske po iznosu. Tu se zapravo javlja ograničenje software-a, točnije ne postojanje doprinosa armature i u manjoj mjeri nemogućnost modeliranja uzdužnog nagiba nathodnika. Isto tako može se zaključiti da se konstrukcija nathodnika za proračunsko opterećenje još uvijek nalazi u linearnom području odnosno da se nije ušlo u nelinearno područje.

U Tablici 6.2. možemo primjetiti da su odstupanja vrijednosti veličina vlastitih frekvencija unutar 10% uz uzimku trećeg vlastitog oblika. Možemo reći da je modelirana konstrukcija nešto kruća kod prva tri oblika osciliranja, a nešto mekša kod druga dva oblika osciliranja.

8. LITERATURA

- [1] P. Marović: Ispitivanje konstrukcija, interna skripta, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2013.
- [2] Norma HRN U.M1.046: Ispitivanje mostova probnim opterećenjem, Službeni list 60/84, 1984.
- [3] M. Kustura, G. Šunjić, B. Šunjić: Pedestrian bridges and load testing, *e-Zbornik Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Mostaru*, Vol. 19/2020., pp. 88-102, 2020.
- [4] T. Siwowski, A. Wysocki: The circular footbridge of Rzeszów, Poland, *Structural Engineering International*, Vol. 25, No. 4, pp. 460-466, 2015.
- [5] Glavni građevinski projekt Pješačkog nathodnika u Kaštel Starom iznad rekonstrukcije Državne ceste D8, Dionica: Kaštel Gomilica – Kaštel Stari, Institut IGH d.d., Glavni projekt, Građevinski projekt, Oznaka mape: 1/5, Zajednička oznaka projekta: GP-14367/16, Br. projekta: 72120-GP-047-2017, Gl. projektant: N. Opačić, dipl.ing.građ., Projektant: M. Marušić, dipl.ing.građ., Split, ožujak 2018.
- [6] Izvedbeni građevinski projekt Pješačkog nathodnika u Kaštel Starom iznad rekonstrukcije Državne ceste D8, Dionica: Kaštel Gomilica – Kaštel Stari, Institut IGH d.d., Izvedbeni projekt, Građevinski projekt, RN: 63114367, Br. projekta: 72120-155/20, Gl.projektant: N. Opačić, dipl.ing.građ., Projektant: T. Brozović, dipl.ing.građ., Zagreb, rujan 2020.
- [7] Tehnički propis za građevinske konstrukcije, Narodne novine br. 17 / 2017., Zagreb, 2017.