Modelsko ispitivanje montažnog stropnog nosača Zgrade 3F

Barić, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:652835

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Marija Barić

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Marija Barić

Modelsko ispitivanje montažnog stropnog nosača Zgrade 3F

Diplomski rad

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ:	**DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	**Marija Barić**
BROJ INDEKSA:	**564**
KATEDRA:	**Katedra za otpornost materijala i ispitivanje konstrukcija**
PREDMET:	**Ispitivanje konstrukcija**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: **Modelsko ispitivanje montažnog stropnog nosača Zgrade 3F**

Opis zadatka: U ovom diplomskom radu treba izvršiti ispitivanje modela montažnog stropnog nosača Zgrade 3F u sklopu kampusa Sveučilišta u Splitu. Naime, prethodno je izvršeno ispitivanje montažnog stropnog nosača Zgrade 3F u pogonu u Sirobuji u njihovoj stvarnoj veličini (prototip). Za dotični stropni nosač treba na temelju provedene modelske analize napraviti odgovarajući model iz mediapana. Napravljeni model treba ispitati kako eksperimentalno tako i numerički te usporediti dobivene rezultate na modelu (eksperimentalne i numeričke) s onima dobivenima prilikom ispitivanja prototipa (eksperimentalno i numerički). U radu treba opisati provedenu modelsku analizu kao i provedbu eksperimentalnog ispitivanja modela.

U Splitu, 04. ožujka, 2016.

Voditelj Diplomskog rada:	Predsjednik Povjerenstva za završne i diplomske ispite:
Prof. dr. sc. Pavao Marović	Prof. dr. sc. Ivica Boko

Modelsko ispitivanje montažnog stropnog nosača Zgrade 3F

Sažetak:

U ovom diplomskom radu izvršeno je modelsko i numeričko ispitivanje montažnog stropnog nosača Zgrade 3F. Model je odabran na temelju pravila koja vrijede u modelskoj analizi. Prototip nosača je izveden od montažnih armirano-betonskih elemenata, a model je načinjen od medijapana. Proveden je numerički proračun modela i prototipa te su dobiveni rezultati uspoređeni. Izrađeni model je ispitan u laboratoriju, a izmjereni pomaci na polovici raspona su uspoređeni s pomacima koji su izmjereni na prototipu.

Ključne riječi:

Model, nosač, progib, ispitivanje modela, eksperiment, numerički proračun.

Model analysis of prefabricated ceiling girder of the Building 3F

Abstract:

In this thesis, model and numerical testing of prefabricated ceiling girder of the Building 3F in Split was performed. Model was selected by the rules that apply in the model analysis. The prototype girders were made of prefabricated reinforced concrete elements and model was made of MDF (Medium Density Fibreboard). Numerical calculation was performed for model and prototype and obtained results were compared. Model was tested in the laboratory, and measured deflections in the middle of the span were compared with deflections that were measured on a prototype.

Keywords:

Model, girder, deflection, model testing, experiment, numerical calculation.

SADRŽAJ

1. UVOD **1**

2. OPIS PROTOTIPA **3**

3. ISPITIVANJE PROTOTIPA **5**

3.1. Pripreme za ispitivanje 5

3.2. Provedba ispitivanja 5

3.3. Rezultati statičkog ispitivanja 9

4. NUMERIČKI PRORAČUN PROTOTIPA **10**

4.1. Opis računalnog modela nosača 10

4.2. Statički proračun prototipa 12

4.3. Rezultati numeričke analize 12

5. MODELSKO ISPITIVANJE **15**

5.1. Općenito o modelskoj analizi konstrukcija 15

5.2. Zakoni modelske sličnosti 16

5.3. Određivanje mjerila 18

5.3.1. Mjerilo materijala 18

5.3.2. Mjerilo dužina 18

5.3.3. Mjerilo površina 20

5.3.4. Mjerilo sila 21

5.3.5. Mjerilo krutosti 22

6. NUMERIČKI PRORAČUN MODELA **23**

6.1. Opis računalnog modela 23

6.2. Statički proračun modela 24

6.3. Rezultati numeričke analize 25

7. USPOREDBA NUMERIČKOG PRORAČUNA PROTOTIPA S NUMERIČKIM PRORAČUNOM MODELA **26**

8. ISPITIVANJE MODELA **27**

8.1. Općenito o eksperimentalnoj analizi modela 27

8.2. Izrada modela nosača 28

8.3. Priprema za ispitivanje modela u laboratoriju 30

8.4. Instrumenti za ispitivanje 32

8.5. Provedba ispitivanja 34

9. PRIKAZ REZULTATA MJERENJA POMAKA U KARAKTERISTIČNIM TOČKAMA I USPOREDBA S NUMERIČKIM PRORAČUNOM MODELA 35

9.1. Rezultati ispitivanja modela 35

9.2. Rezultati numeričkog proračuna modela 37

9.3. Usporedba rezultata numeričkog proračuna modela s rezultatima ispitivanja modela **38**

10. USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA MODELA I ISPITIVANJA PROTOTIPA 39

11. ZAKLJUČAK 42

12. LITERATURA 46

1. UVOD

Ispitivanje konstrukcija je znanstvena disciplina koja se razvija usporedno s razvojem teorijskih znanja, mjerne opreme (elektronike) i računalstva. Ispitivanje konstrukcija obuhvaća niz postupaka kojima se utvrđuje ponašanje konstrukcije pri različitim djelovanjima. Djelovanja na konstrukciju možemo podijeliti u dvije skupine:

- fizikalna (mehanička) djelovanja (opterećenja vlastitom težinom, uporabna opterećenja, te izvanredna opterećenja kao što su: potres, požar, udar, itd.),
- kemijska djelovanja (korozija, agresija plinova, agresija kemikalija, itd.).

Razvijeni su razni postupci korištenja i objedinjavanja znanja iz raznih drugih područja znanosti (fizika, matematika, reologija, automatika, digitalna tehnika, itd.).

Cilj ispitivanja konstrukcija je potvrda teorijskih pretpostavki o ponašanju konstrukcije odnosno elementa konstrukcije. Pomoću ispitivanja konstrukcije/elementa potvrđujemo ili osporavamo teorijske pretpostavke koje su uzete u obzir pri projektiranju i proračunu konstrukcije, utvrđujemo ponašanje materijala koji se prvi put koriste, provjeravamo ponašanje novih konstruktivnih rješenja, provjeravamo kvalitetu ugrađenih materijala i izvedenih radova, provjeravamo postojeće stanje, oštećene ili obnovljene konstrukcije, te utvrđujemo je su li one prikladne za daljnju uporabu. Često puta pomoću ispitivanja dolazimo do racionalnijih konstrukcijskih rješenja, koja teorijskim putem nije moguće dobiti, te otkrivamo slabosti i nedostatke pojedine konstrukcije. Načini na koje možemo ispitati konstrukciju i kriteriji ocjenjivanja, određeni su normama.

Prije samog početka ispitivanja, potrebno je detaljno isplanirati tijek ispitivanja i definirati što se mjeri, izvršiti prethodni pregled konstrukcije, pripremiti i pregledati potrebnu projektnu dokumentaciju, osigurati opterećenje i mjerne instrumente. Za vrijeme ispitivanja treba poduzeti sve mjere sigurnosti, kontrolirati rezultate mjerenja, a na kraju ispitivanja sastavi se izvještaj i daje se ocjena o ponašanju konstrukcije.

U osnovi proučavanja ponašanja konstrukcija nalazi se eksperiment. Eksperiment ima veliki značaj kad se zbog složenosti problema javljaju poteškoće pri teorijskoj analizi konstrukcije. Naime, numeričke metode temelje se na pretpostavkama koje često nisu dovoljne da bi u svim dijelovima mogli vjerno prikazati ponašanje konstrukcije/elementa kao što su npr. pretpostavke o čvrstoći materijala, linearna veza sila-deformacija, itd.

Metodama eksperimentalne analize dobivaju se podaci potrebni za ocjenu stanja konstrukcije ili nekog njenog dijela. Ovim postupcima moguće je ustanoviti postojanje oštećenja, položaj oštećenja i veličinu oštećenja. Eksperimenti se mogu izvoditi na izvornim konstrukcijama (prototip) i na modelima. Kod ispitivanja izvornih konstrukcija, ispitivanje se provodi u pravoj veličini, a ako se radi o serijskoj proizvodnji tada se govori o ispitivanju prototipa.

Izrada i promatranje ponašanje modela konstrukcije jedan je od najstarijih postupaka koji se primjenjivao u gradnji. Učestala primjena modelske analize počinje tek u 20. stoljeću, razvojem *teorije modelske sličnosti* i *teorije mjerenja pomaka i deformacija.* Modelskim ispitivanjem utvrđuje se stanje deformacija radi određivanja pomaka i naprezanja stvarne konstrukcije. Promatra se fizikalni model koji što je više moguće odgovara stvarnoj konstrukciji.

U ovom diplomskom napravljena je numerička i modelska analiza te je dana usporedba sa stvarnim nosačem. Predmet ispitivanja je predgotovljen montažni nosač za Zgradu 3 fakulteta u sklopu kampusa Sveučilišta u Splitu. U svrhu modelske analize izrađen je model i na njemu je izvršeno ispitivanje kako bi se utvrdilo stanje deformiranja tj. pomaci. Model je izrađen od medijapana, dimenzije i opterećenje modela određene su modelskom analizom, prema uvjetima sličnosti. Potrebno je provesti numeričku analizu prototipa kao i modela. Podaci za izradu numeričkog modela prototipa su zadani. Na prototipu je provedeno probno ispitivanje. Nakon provedbe numeričke i modelske analize potrebno je usporediti rezultate međusobno kao i sa stvarnim nosačem. Usporedba se provodi na temelju progiba u sredini nosača. Nakon što se izvrši usporedba rezultat, potrebno je utvrditi koja analiza najbolje opisuje ponašanje stvarnog nosača pod opterećenjem.

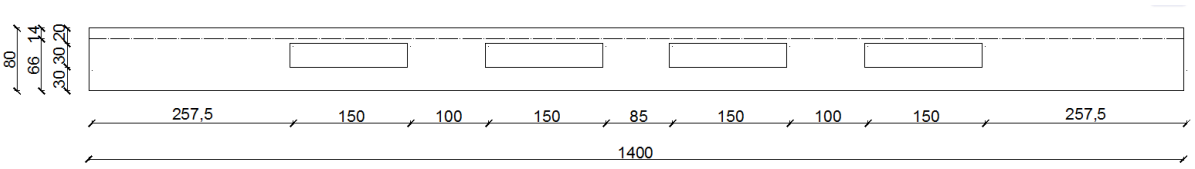
2. OPIS PROTOTIPA

Zgrada 3 fakulteta u sklopu Sveučilišnog kampusa Visoka u Splitu, izgrađena je kao monolitna armirano-betonska konstrukcija. Za izvedbu međukatnih konstrukcija korišteni su predgotovljeni betonski elementi (Slika 2.1) koji se nakon montaže monolitiziraju izvedbom armirano-betonske ploče debljine 14 cm.



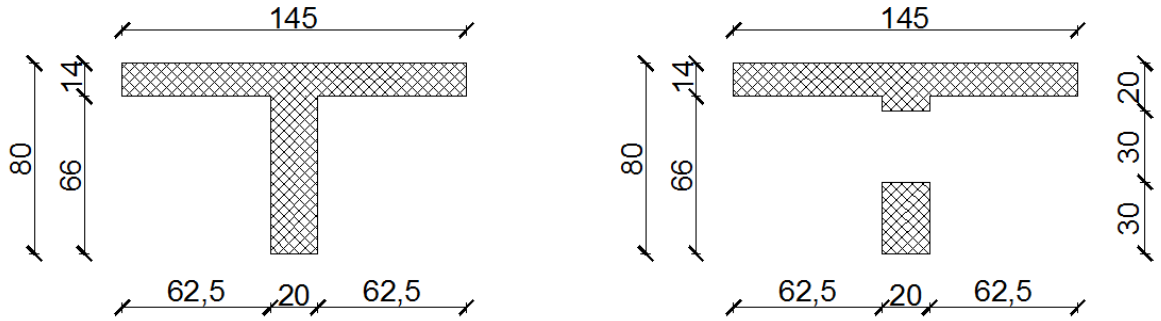
Slika 2.1. *Pogled na predgotovljeni montažni nosač*

Zbog pravilnog tlocrtnog oblika građevine, svi predgotovljeni betonski elementi (Slika 2.2) izvedeni su iste duljine (14 metara).



Slika 2.2. *Uzdužni presjek predgotovljenog montažnog nosača*

Svi nosači istog su poprečnog presjeka i jednako su armirani (Slika 2.3).



Slika 2.3. *Poprečni presjek predgotovljenog nosača*

Nosači su napravljeni od betona klase C30/37, čiji je modul elastičnosti E_b = 32000 [MPa]. Poprečni presjek ima površinu A_p = 3630 [cm^2].

3. ISPITIVANJE PROTOTIPA

3.1. Pripreme za ispitivanje

Prema Tehničkim propisima za betonske konstrukcije [1] potrebno je ispitati, pod pokusnim opterećenjem prije stavljanja u uporabu, tribine u sportskim građevinama i dvoranama razne namjene prema projektu betonske konstrukcije [2] i normi HRN U.M1.047 [3] kao i svim normama na koje oni upućuju. Kako za predgotovljene montažne nosače za Zgradu 3 fakulteta, Sveučilišni kampus Visoka u Splitu ne postoji izravna hrvatska norma, to je ispitivanje osim u skladu s općom hrvatskom normom HRN U.M1.047 [3] provedeno i u skladu s općom literaturom i svakodnevnom inženjerskom praksom. Opis ispitivanja prototipa je preuzet iz Izvještaja o izvršenom probnom opterećenju i ispitivanju predgotovljenog montažnog nosača za Zgradu 3 fakulteta, Sveučilišni kampus Visoka u Splitu [4].

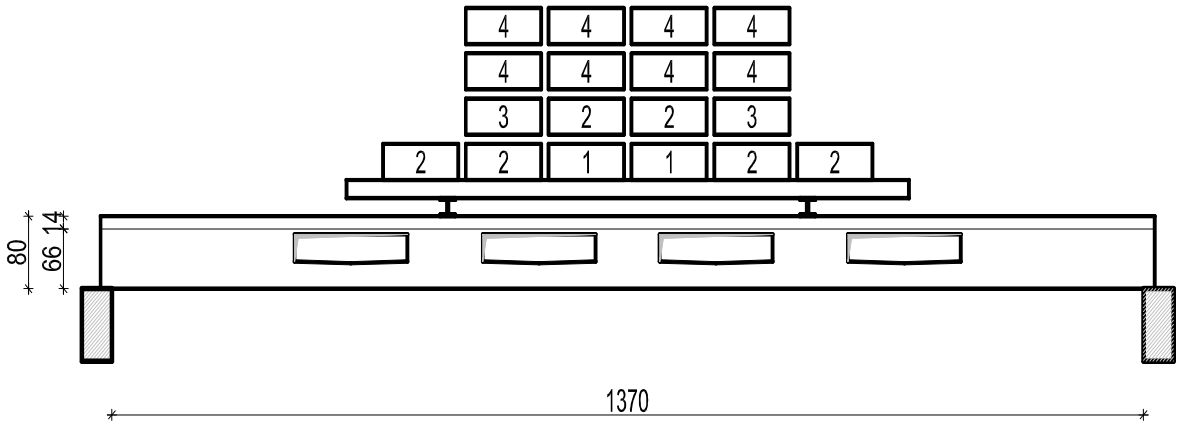
3.2. Provedba ispitivanja

Ispitivanje predgotovljenog montažnog betonskog nosača međukatnih konstrukcija Zgrade 3 fakulteta predviđeno je kao ispitivanje samo 1 komada izvađenog iz redovite proizvodnje. Ispitivanje je izvršeno na mjestu proizvodnje nosača, u Tvornici za proizvodnju montažnih elemenata Konstruktor na Sirobuji u Splitu (Slika 3.1).



Slika 3.1. *Nosač montiran na oslonce na mjestu ispitivanja*

Ispitivanje nosača je previđeno u više koraka, najmanje 10 do sloma elementa. Za probno opterećenje uzeti su betonski blokovi koji su slagani na čeličnu konstrukciju, kako bi se u trećinama raspona simulirale odgovarajuće koncentrirane sile (Slika 3.2).



Slika 3.2. *Shema nanošenja opterećenja*

Čelična konstrukcija je izrađena iz profila HEB 200, ukupne težine 1.214 kg. Betonski blokovi (oznake 1, 2 i 3 – Slika 3.2) dimenzija su 90 × 150 × 32 cm, težine 1.060 kg svaki. Betonski blokovi (oznaka 4 – Slika 3.2) dimenzija su 80 × 80 ×33 cm, težine 512 kg svaki. Predviđeno je da se na čeličnu konstrukciju (I faza opterećenja) (Slika 3.3) betonski blokovi slažu simetrično po dva.



Slika 3.3. *Prva faza opterećenja (okvir)*

Prilikom II. faze opterećenja (Slika 3.4) slažu se blokovi oznake 1, u III. fazi opterećenja (Slika 3.5) slažu se blokovi oznake 1 i 2, a u IV. fazi opterećenja (Slika 3.6) blokovi oznake 1, 2, 3 i 4. Ovako naneseno opterećenje predstavlja projektom predviđena uporabna i lomna opterećenja, odnosno odgovarajuće uporabne i lomne momente savijanja.



Slika 3.4. *II faza opterećenja (2 betonska bloka)*



Slika 3.5. *III faza opterećenja (8 betonskih blokova)*



Slika 3.6. *IV faza opterećenja (18 betonskih blokova)*

Prilikom provedbe probnog opterećenja i ispitivanja nosača mjereni su pomaci odabranih točaka, uz promatranje otvaranja, progušnjavanja i širenja pukotina. Pomaci su mjereni u točkama iznad ležaja i u sredini raspona. Mjerenje pomaka izvršeno je mjernim mikrourama Mitutoyo Absolute, digitalna s hodom 50 mm (Slika 3.7).



Slika 3.7. *Mikrourice i mjerna mjesta*

3.3. Rezultati statičkog ispitivanja

Sva opterećenja i ispitivanja izvršena su na predviđeni način. Nakon svake faze opterećenja mjereni su progibi na predviđenim mjestima (na ležajevima i u sredini raspona) s odgovarajućom mjernom opremom (mikroure). Rezultati statičkih ispitivanja su očitane i obrađene veličine apsolutnih pomaka za predviđene sheme opterećenja i odabrana mjerna mjesta (Tablice 3.1 i 3.2 i Dijagram 3.1).

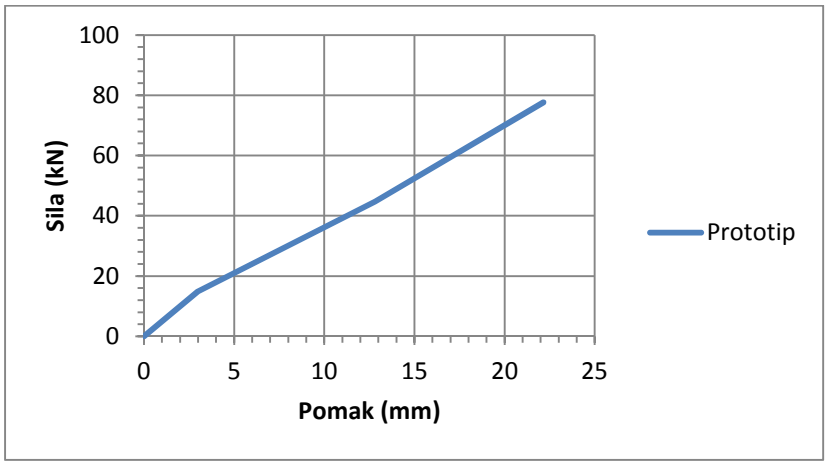
Tablica 3.1. *Izmjerene veličine apsolutnih pomaka (u mm)*

Mjerno mjesto	**0 (nulto)**	**I (okvir)**	**II (2bb)**	**III (8bb)**	**IV (18bb)**	**III (8bb)**	**II (2bb)**
P1	**0.00**	**0.01**	**0.13**	**0.69**	**1.18**	**0.94**	**0.55**
P2	**0.00**	**0.56**	**2.97**	**12.80**	**22.18**	**16.07**	**6.96**
P3	**0.00**	**0.57**	**2.98**	**12.81**	**22.16**	**16.11**	**7.06**
P4	**0.00**	**0.06**	**0.25**	**0.51**	**0.93**	**0.25**	**0.44**

(+) pomak prema dole

Tablica 3.2. *Rezultati ispitivanja prototipa*

SILA NA PROTOTIPU - F_p [kN]	POMAK NA PROTOTIPU -w_p [mm]
0	0
14,9	2,98
44,7	12,81
77,6	22,16



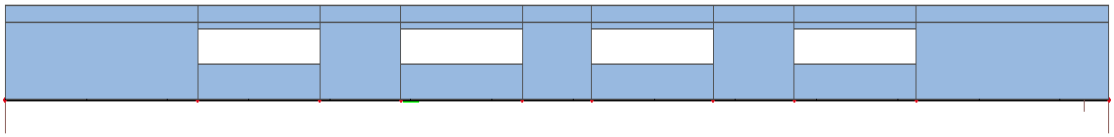
Dijagram 3.1. *Rezultati ispitivanja prototipa*

4. NUMERIČKI PRORAČUN PROTOTIPA

Cilj numeričkog modeliranja konstrukcije je prikazivanje ponašanja numeričkog modela te njegova usporedba s konstrukcijom u stvarnosti. Numerička analiza se temelji na vrijednostima unutarnjih sila, deformacija i pomaka (progiba). Na temelju vrijednosti progiba u sredini nosača biti će utvrđeno koliko dobro računalni model opisuje ponašanje stvarnog nosača. Radi jednostavnosti proračuna i što bolje usporedbe kontinuirano opterećenje zamijenjeno je ekvivalentnim koncentriranim silama koje djeluju u trećinama raspona.

4.1. Opis računalnog modela nosača

Prototip je modeliran kao prosta greda s promjenjivim poprečnim presjekom (puni presjek i oslabljeni presjek) kako bi se što bolje pratila geometrija stvarne konstrukcije (Slika 4.1). Geometrijske karakteristike određene se uvidom u Glavni projekt konstrukcije "Zgrade 3 fakulteta" u sklopu Sveučilišnog kampusa Visoka u Splitu [2].

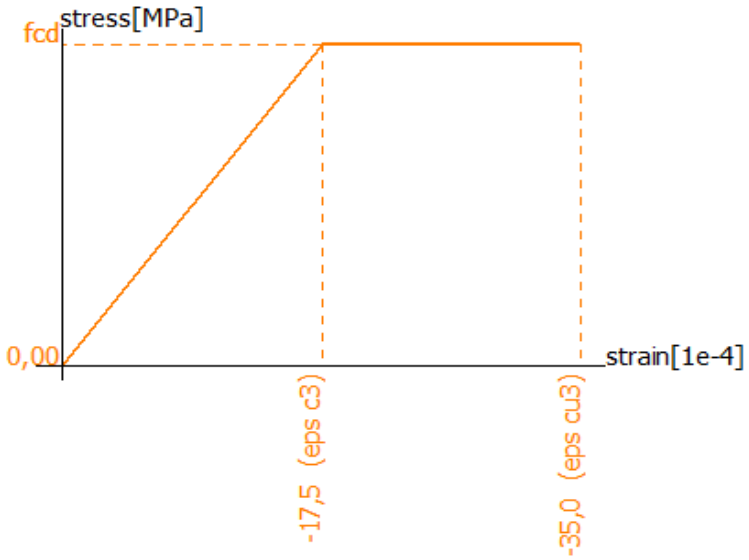


Slika 4.1. *Prikaz numeričkog modela prototipa*

Stvarni nosač na kojem je izvršeno probno opterećenje napravljen je od betona C30/37 čiji je modul elastičnosti E_b = 32800 [MPa]. Ukupna duljina nosača je 14 metara. Stvarni nosač simuliran je numeričkim prototipom prikazanim na Slici 4.1. Materijalne karakteristike prototipa su prikazane u Tablici 4.2.

Name	C30/37
Code independent	
Material type	Concrete
Thermal expansion [m/mK]	0,00
Unit mass [kg/m^3]	2500,0
E modulus [MPa]	3,2800e+04
Poisson coeff.	0,2
Independent G modulus	
G modulus [MPa]	1,3667e+04
Log. decrement (non-unifor...	0,2
Colour	
Specific heat [J/gK]	6,0000e-01
Thermal conductivity [W/mK]	4,5000e+01
Order in code	5

Slika 4.2. *Materijalne karakteristike prototipa*



Slika 4.3. *Prikaz σ-Ɛ dijagrama*

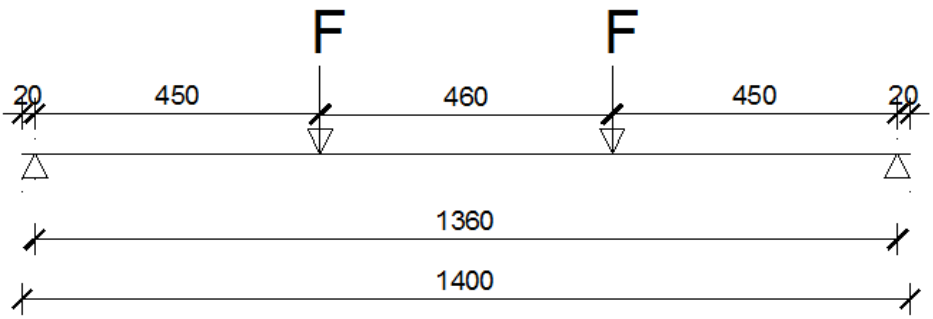
Prema Statičkom proračunu [1] odnosno Tehničkim podacima za ispitivanje predgotovljenog nosača [2], nosač je opterećen tako da se dobiju odgovarajući momenti savijanja u najkritičnijem presjeku. Vrijednosti sila po fazama opterećivanja (F_i) prikazane su u Tablici 4.1 (III - granično stanje uporabljivosti, IV - granično stanje nosivosti). Nosač je prilikom ispitivanja bio opterećen čeličnom konstrukcijom na koju su naslagani betonski blokovi. Međutim, opterećenje je postavljeno tako da simulira dvije koncentrirane sile koje djeluju u trećinama raspona. Prilikom analize napravljene su 4 iteracije.

Tablica 4.1. *Vrijednosti sila*

Faza opterećenja	Sila
F_{II}	14,9 kN
F_{III}	44,7 kN
F_{IV}	77,6 kN

4.2. Statički proračun prototipa

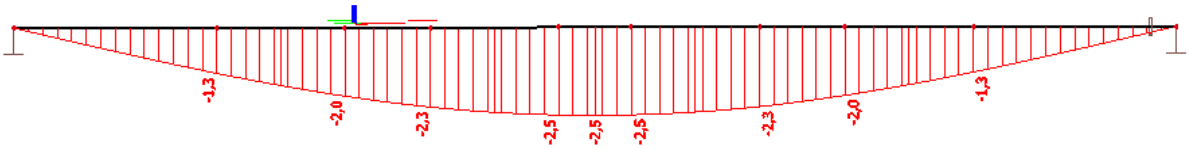
Statički proračun prototipa proveden je u programskom paketu Scia Engineer 15.3 [5]. Prosta greda promjenjivog poprečnog presjeka opterećena je dvjema koncentriranim silama u trećinama raspona (Slika 4.4). Na Slikama 4.5, 4.6 i 4.7 kao i u Tablici 4.2 prikazani su pripadajući progibi.



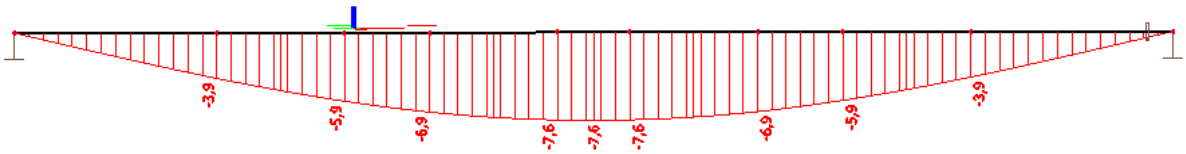
Slika 4.4. *Statičko opterećenje prototipa silama na l/3*

4.3. Rezultati numeričke analize

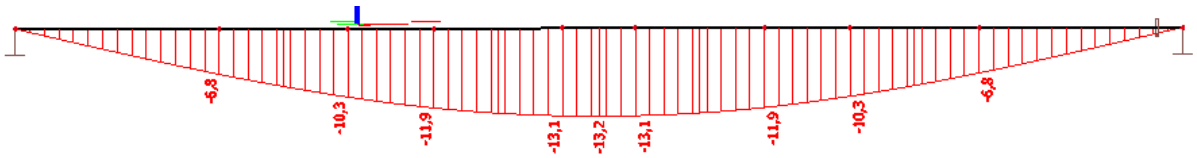
Proveden je linearni proračun, a prilikom analize praćen je vertikalni pomak na sredini nosača. Rezultati numeričke analize prikazani su na Slikama 4.5, 4.6 i 4.7 kao i u Tablici 4.2.



Slika 4.5. *Progibi pri opterećenju silom od 14,9 kN*



Slika 4.6. *Progibi pri opterećenju silom od 44,7 kN*



Slika 4.7. *Progibi pri opterećenju silom od 77,6 kN*

Tablica 4.2. *Rezultati numeričkog proračuna prototipa*

SILA [kN]	**PROGIB U SREDINI NOSAČA** [mm]
0	0
14,9	2,5
44,7	7,6
77,6	13,2

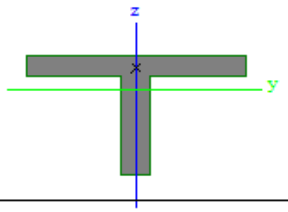
Pošto se analiza temelji na linearnom proračunu, tj. veza između opterećenja i pomaka je linearna, za očekivati je da grafički prikazano to bude pravac što se i vidi iz Dijagrama 4.1.



Dijagram 4.1. *Rezultati numeričke analize prototipa*

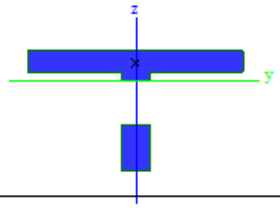
Prototip je prosta greda s promjenjivim poprečnim presjekom (puni i oslabljeni) oblika slova T čije su karakteristike prikazane na Slici 4.8.

Name	punipresjek	
Type	General cross-section	
Item material	C30/37	
Fabrication	general	
Use 2D FEM analysis	✓	



A [m²]	3,3500e-01	
A y, z [m²]	2,2219e-01	1,4816e-01
I y, z [m⁴]	1,7921e-02	3,6007e-02
I w [m⁵], t [m⁴]	1,2572e-04	3,0012e-03
Wel y, z [m³]	3,1310e-02	4,9665e-02
Wpl y, z [m³]	0,0000e+00	0,0000e+00
d y, z [mm]	0	141
c YUCS, ZUCS [mm]	0	0
α [deg]	0,00	
A L, D [m²/m]	4,5000e+00	4,5000e+00

Name	oslabljenipresjek	
Type	General cross-section	
Item material	C30/37	
Fabrication	general	
Use 2D FEM analysis	✓	



A [m²]	2,7500e-01	
A y, z [m²]	2,3261e-01	2,2830e-01
I y, z [m⁴]	1,6376e-02	3,5807e-02
I w [m⁵], t [m⁴]	1,1613e-04	1,8668e-03
Wel y, z [m³]	2,7335e-02	4,9389e-02
Wpl y, z [m³]	0,0000e+00	0,0000e+00
d y, z [mm]	0	120
c YUCS, ZUCS [mm]	0	27
α [deg]	0,00	
A L, D [m²/m]	4,3000e+00	4,3000e+00

Slika 4.8. *Poprečni presjek nosača (puni presjek i oslabljeni presjek)*

5. MODELSKO ISPITIVANJE

5.1. Općenito o modelskoj analizi konstrukcija

U davna vremena prije razvoja tehnike i raznih proračuna stabilnosti konstrukcija, gradnja konstrukcija temeljila se na načelu pokušaja i pogreške. Ako je gradnja uspjela to je bio temelj za novi napredak, a ako gradnja nije uspjela tada bi se povećale dimenzije konstrukcija, odabrao bi se kvalitetniji materijal, itd.

Razvojem tehnike, računala i složenih numeričkih analiza konstrukcija, pomiču se granice složenosti konstrukcije, pa tako dolazimo do novih konstruktivnih sustava. Da bi se moglo procijeniti i odrediti stanje naprezanja i deformacija u konstrukciji ili nosivost konstrukcije, koriste se eksperimentalne metode. Ispitivanje takvih nepoznatih konstruktivnih sustava moguće je provesti na modelima.

U slučajevima kada imamo objekte koji su od velike važnosti kao što su brane, veliki mostovi, vrlo visoke zgrade i slične konstrukcije, koje su izložene složenim uvjetima opterećenja (npr. potresi, vjetar) ispitivanje modela je neophodno. Modelska analiza se koristi kada nismo sigurni u rezultate teorijskog proračuna te iz toga ne možemo predvidjeti odziv konstrukcije na djelovanja kojima je izložena.

Model je umanjena konstrukcija/element koje je u takvom odnosu prema konstrukciji koja se ispituje da se promatranjem na njemu mogu pretkazati osobine konstrukcije.

Prototip (original) je fizički sustav ili konstrukcija za koju se predskazuje ponašanje na osnovu ispitivanja na modelu.

Modelskim ispitivanjem promatra se stvarni fizikalni model koji u idealnom slučaju u svemu odgovara stvarnoj konstrukciji. Uz poznate uvjete oslanjanja dobivamo podatke o ponašanju stvarne konstrukcije za uporabno opterećenje te za granična stanja nosivosti i uporabljivosti za koje je konstrukcija predviđena, kao i stvarnu sliku sloma konstrukcije.

Modelsko ispitivanje služi za utvrđivanje stanja deformacija (zbog određivanja naprezanja) i stanja deformiranja (zbog određivanja pomaka) stvarne konstrukcije. Predskazuju se veličine istezanja i deformacija, slika deformacija i pomaka (progibi), dinamička svojstva i stabilnost.

Modelska ispitivanja se provode ako:

- na prototipu se ne može provesti ispitivanje,
- na prototipu je provedba mjerenja skupa i opasna,
- prototip je još u fazi projektiranja,
- na prototipu su mjerenja neponovljiva.

Prednost modelskog ispitivanja je što model ne mora biti vjerna kopija. Naime, ako se ista fizikalna pojava događa na prototipu i na modelu, brojčane vrijednosti izmjerenih veličina biti će različite zbog različite veličine prototipa i modela. Prema tome, potrebno je definirati omjere fizičke sličnosti između modela i prototipa. Ti omjeri nazivaju se omjeri sličnosti ili koeficijenti sličnosti ili mjerila prijenosa.

5.2. Zakoni modelske sličnosti

Model treba izraditi prema uvjetima na prototip koji su formulirani zakonom sličnosti a koji je osnovni zakon modelske analize. Sličnost predstavlja odnos veličina, pojava, uzroka i posljedica koje se zbivaju na modelu i na prototipu. Zakon sličnosti određuje pravila za projektiranje, izradu, provođenje ispitivanja i interpretaciju rezultata ispitivanja modela na temelju kojih će se vršiti predviđanje ponašanja prototipa. Zakonom sličnosti dani su uvjeti pod kojima će ponašanje dvaju sustava biti slično, te je omogućena tehnika točnog predskazivanja ponašanja prototipa na osnovu rezultata ponašanja modela. Zakoni ponašanja (npr. Hookeov zakon, izrazi za progibe itd.) vrijede jednako za prototip i za model.

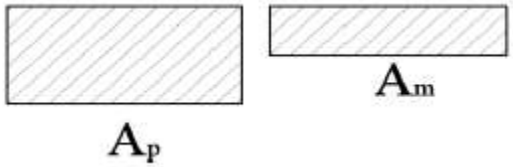
Modeliranje se vrši na temelju sličnosti koja može biti:

1) geometrijska – koristi se kod problema uspoređivanja i označava sličnost oblika,
2) fizikalna – koristi se u studijima ponašanja i funkcioniranja sustava i označava sličnost kretanja,
3) matematička – koristi se za matematička rješavanja fizikalnih problema.

Sličnost još može biti:

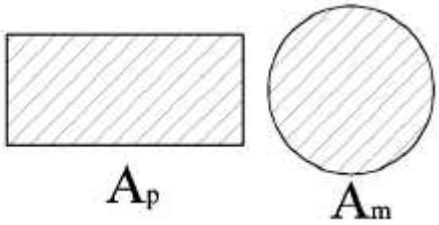
1) stroga sličnost – sve dimenzije modela su u istom mjerilu kao i kod prototipa,

$$r_A = \frac{A_p}{A_m}$$



2) djelomična sličnost – sve dimenzije nisu u istom omjeru,

$$r_A = \frac{A_p}{A_m}$$



3) izobličena sličnost – nisu ispunjeni uvjeti sličnosti.

Kod modeliranja traži se da se definiraju omjeri koji prikazuju odnos određenih veličina kod prototipa (p) i kod modela (m) prema općoj formuli da je omjer nove veličine "a" jednak kvocijentu veličine "a_m" na modelu i "a_p" na prototipu:

$$r_a = \frac{a_m}{a_p}.$$

Veličine mogu biti osnovne kao što su dužina (L), sila (F), masa (m) i vrijeme (t) ili izvedene kao što su površina (A), volumen (V), brzina (v), što znači da se mogu prikazati produktom potencija osnovnih veličina, a sve prema prirodnim zakonima.

Osnovna mjerila za strogu sličnost su:

- za dužinu: $r_L = \frac{L_m}{L_p}$
- za silu: $r_F = \frac{F_m}{F_p}$
- za vrijeme: $r_t = \frac{t_m}{t_p}$

Ako je ispunjeno više mjerila sličnosti dobivamo novu sličnost:

r_L= konstantno — geometrijska sličnost

r_F= konstantno — sličnost sila

r_t= konstantno — vremenska sličnost

Njihovim kombinacijama dobivamo slijedeće sličnosti:

r_L= konstantno i r_t= konstantno — kinematička sličnost

r_L= konstantno i r_F= konstantno — statička sličnost

r_L= konstantno, r_F= konstantno i r_t= konstantno — dinamička sličnost

5.3. Određivanje mjerila

5.3.1. Mjerilo materijala

Da bi izračunali omjer sličnosti materijala potrebno je poznavati karakteristike materijala od kojih su izrađeni prototip i model.

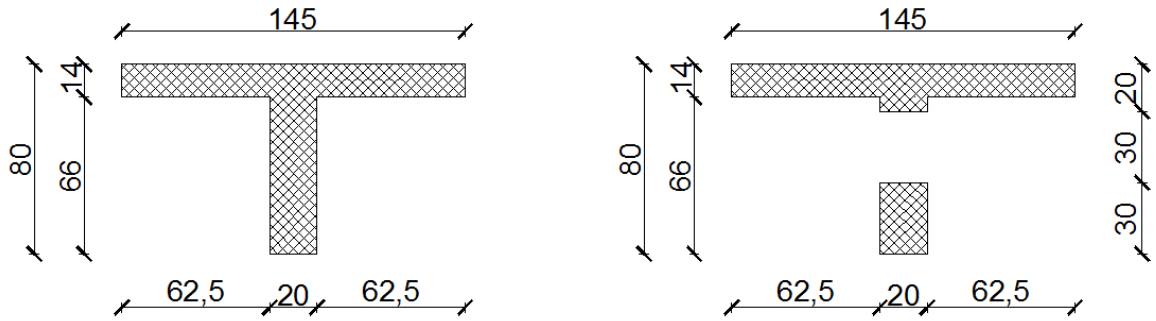
Model nosača izrađen je od medijapana. Medijapan je vrsta pločastog materijala koji se može opisati kao srednje gusti vlaknasti materijal u obliku ploče. Modul elastičnosti medijapana je E_m = 2500 N/mm^2, Poissonov koeficijent ν = 0,16 a gustoća materijala ρ = 720 kg/m^3. Medijapan se izrađuje prešanjem drvene prašine i vezivnih sredstava (ljepilo i polimerska smola). Zbog svoje gušće i homogenije strukture otporniji je na vlagu i sva druga mehanička naprezanja. Prototip je izrađen od betona C30/37 čiji je modul elastičnosti E_b = 32 800 N/mm^2.

Omjer sličnosti materijala se računa na temelju modula elastičnosti materijala pa vrijedi:

$$r_E = \frac{E_m}{E_p} = \frac{2500}{32800} = 0{,}0762$$

5.3.2. Mjerilo dužina

Mjerilom dužina potrebno je odrediti odnos između dimenzija modela i dimenzija prototipa. Za izradu prototipa, odnosno stvarne konstrukcije koristio se beton C30/37. Prototip je predgotovljeni montažni nosač ukupne duljine 14 metara. Poprečni presjek nosača je promjenjiv (Slika 5.1).

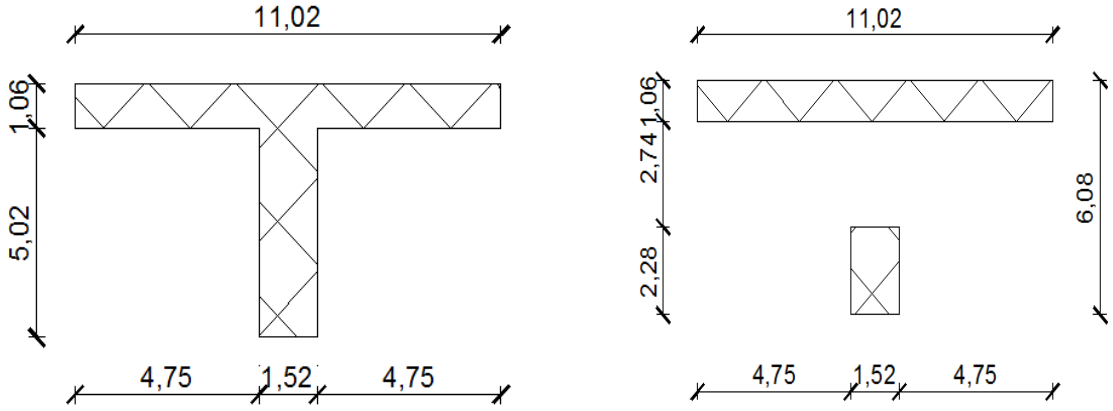


Slika 5.1. *Poprečni presjek nosača (puni presjek i oslabljeni presjek)*

Modelska analiza nosača Zgrade 3 fakulteta je proveden po zakonu djelomične sličnosti, što znači da dimenzije prototipa i modela nisu jednake ali su u odgovarajućem omjeru. Zbog unaprijed zadanih dimenzija debljine ploče medijapana, osnovno mjerilo dužina dobije se iz odnosa debljina ploča modela i prototipa:

$$r_L = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1{,}0}{14} = 0{,}076$$

Koristeći dobiveni koeficijent izračunali smo ostale dimenzije presjeka modela (Slika 5.2).



Slika 5.2. *Pripadajući poprečni presjeci modela*

Statički sustav prototipa je prosta greda ukupne duljine 14 metara, prema tome i model je izveden kao prosta greda ukupne duljine 106,4 centimetra:

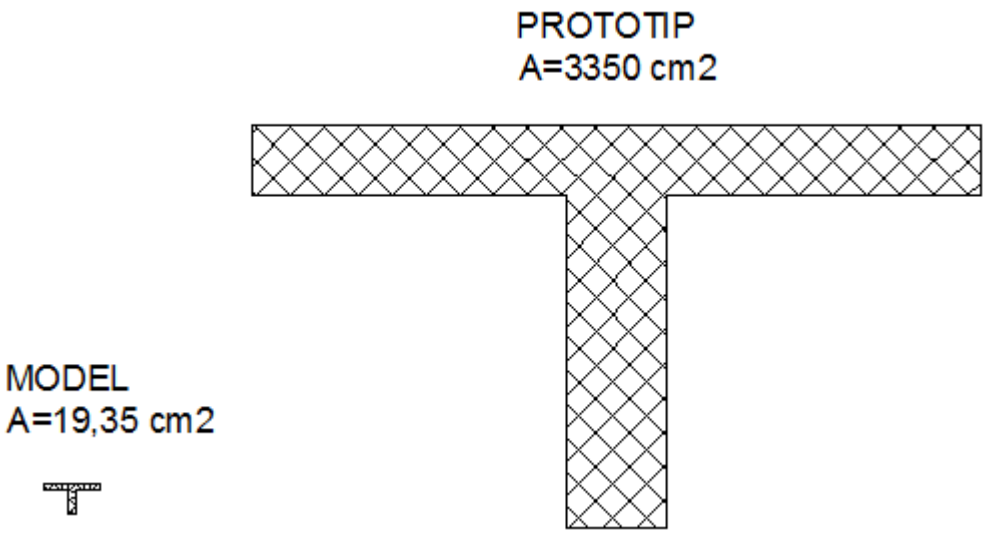
$$r_L = \frac{L_m}{L_p} = 0{,}076 \qquad\qquad 0{,}076 = \frac{L_m}{14}$$

$$L_m = 0{,}076 \cdot 14 = 1{,}064\ [m] = 106{,}4\ [cm]$$

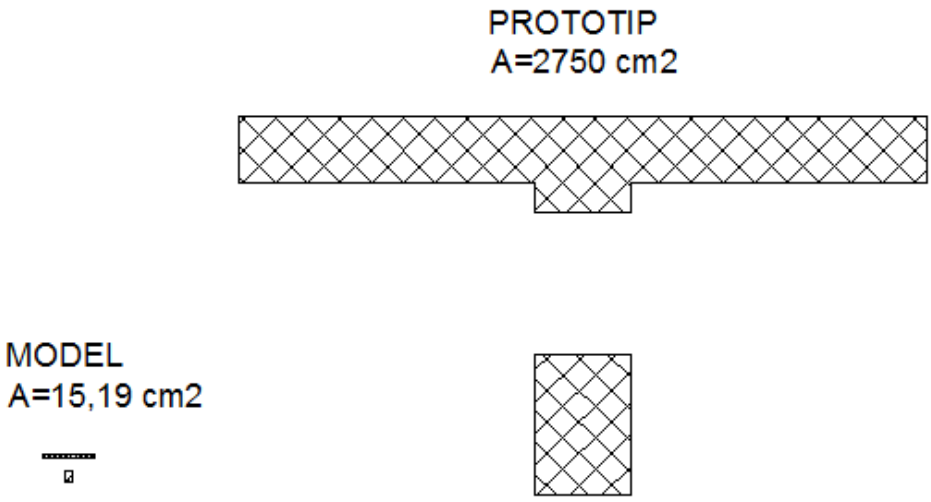
5.3.3. Mjerilo površina

Prema već definiranim dimenzijama modela i prototipa, izračunamo njihove površine i iz omjera površina dolazimo do mjerila površina (Slike 5.3 i 5.4):

$$r_A = \frac{A_m}{A_p} = \frac{19{,}35\ cm^2}{3350\ cm^2} = \frac{15{,}19\ cm^2}{2750\ cm^2} = 0{,}0058$$



Slika 5.3. *Pripadajuće površine poprečnog presjeka modela i prototipa (puni presjek)*



Slika 5.4. *Pripadajuće površine poprečnog presjeka modela i prototipa (oslabljeni presjek)*

5.3.4. Mjerilo sila

Ispitivanje nosača probnim opterećenjem vršilo se betonskim blokovima u 4 faze. Opterećenje se postepeno povećavalo. Zbog jednostavnosti statičkog proračuna, takav tip opterećenja zamijenili smo koncentriranim silama u 1/3 raspona.

Uz sličnost dužina i sila, mora biti ispunjen i zahtjev sličnosti stanja naprezanja i deformacija koji je definiran Hooke-ovim zakonom:

$$H_0 = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{EA}$$

Uvjet sličnosti naprezanja i deformacija prototipa i modela glasi:

$$r_{H_0} = \frac{H_{0_m}}{H_{0_p}} = 1$$

$$\frac{r_F}{r_E r_A} = 1$$

Iz toga slijedi da je mjerilo sličnosti sila:

$$r_F = r_E \cdot r_A = 0{,}0762 \cdot 0{,}0058 = 0{,}00044$$

Na temelju navedenoga može se uspostaviti veza između sila na prototipu i sila na modelu (Tablica 5.1).

Tablica 5.1. *Opterećenje na prototipu i modelu*

SILA NA PROTOTIPU	SILA NA MODELU
14,9 kN	0,0066 kN
44,7 kN	0,019 kN
77,6 kN	0,034 kN

5.3.5. Mjerilo krutosti

Za već definirane geometrijske karakteristike presjeka prototipa i modela izračunate su pripadajuće krutosti te je njihovim omjerom definiran koeficijent sličnosti krutosti:

$$r_I = \frac{I_m}{I_p} = \frac{119{,}68\ cm^4}{3600700\ cm^4} = 3{,}3238 \cdot 10^{-5}$$

Nakon što su izračunati svi omjeri sličnosti, potrebno je izračunati odnose progiba na modelu i prototipu. Na temelju vrijednosti progiba vršimo usporedbu ponašanja prototipa i modela pod opterećenjem.

Za gredni nosač izložen djelovanju koncentriranog opterećenja vrijedi da je odnos progiba prototipa i modela:

$$\frac{u_m}{u_p} = \frac{F_m}{F_p}\frac{L_m^3}{L_p^3}\frac{E_p I_p}{E_m I_m}$$

$$\frac{u_m}{u_p} = \frac{r_F r_L^3}{r_E r_I}$$

Iz navedenoga slijedi veza između progiba prototipa i modela:

$$u_P = u_m \frac{r_E r_I}{r_F r_L^3} = u_m \frac{0{,}0762 \cdot 0{,}000033}{0{,}00044 \cdot 0{,}076^3};\ u_P = 13{,}11 \cdot u_m$$

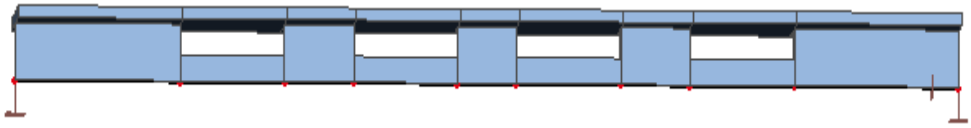
Izmjereni progib na modelu (u_m) pomnožen s 13,11 trebao bi dati očekivani progib na prototipu (u_p). Množenjem progiba i drugih statičkih veličina s odgovarajućim koeficijentima dobivenim iz modelske analize, moguće je predviđanje ponašanja prototipa u stvarnim uvjetima.

6. NUMERIČKI PRORAČUN MODELA

Osnovni cilj numeričkog modeliranja konstrukcije je prikazivanje numeričkog modela, te njegovo poistovjećivanje s konstrukcijom/elementom u stvarnosti. Model je prosta greda poprečnog presjeka T oblika, opterećena koncentriranim silama u trećinama raspona. Numerički proračun proveden je u programskom paketu Scia Engineer 15.3 [5]. Dobiveni rezultati uspoređeni su s numeričkim proračunom prototipa, kao i s rezultatima eksperimentalne analize modela.

6.1. Opis računalnog modela

Nosača je modeliran kao prosta greda s promjenjivim poprečnim presjekom (puni presjek i oslabljeni presjek) kako bi se što bolje pratila geometrija stvarne konstrukcije (Slika 6.1). Modelskom analizom je definiran poprečni i uzdužni presjek, te koncentrirane sile koje djeluju na modelu. Svi potrebni podaci za geometriju modela dobiveni su iz modelske analize.



Slika 6.1. *Prikaz numeričkog modela modela*

Model nosača napravljen je od medijapana čiji je modul elastičnosti E_m = 2500 [MPa]. Ukupna duljina nosača je 1,064 metra a raspon između ležajeva 1,0336 metara. Materijalne karakteristike modela su prikazane na Slici 6.2.

Name	GL24h medijapan
Code independent	
Material type	Timber
Thermal expansion [m/mK]	0,00
Unit mass [kg/m^3]	720,0
E modulus [MPa]	2,5000e+03
Poisson coeff.	0,16
Independent G modulus	☑
G modulus [MPa]	7,2000e+02
Log. decrement (non-unifor...	0,15
Colour	
Specific heat [J/gK]	6,0000e-01
Thermal conductivity [W/mK]	4,5000e+01

Slika 6.2. *Materijalne karakteristike modela*

Prilikom odabira modela materijala računalni program ne pruža mogućnost odabira $\sigma - \varepsilon$ dijagrama materijala. Stoga je za model materijala prihvaćen model materijala s gore navedenim karakteristikama materijala. Geometrijske karakteristike modela su prikazane na Slici 6.3.

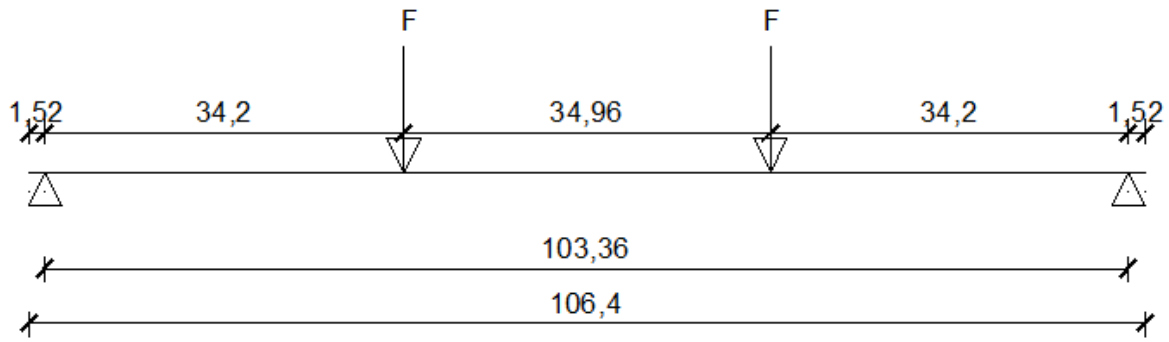
Name	punipresjek	
Type	General cross-section	
Item material	GL24h medijapan	
Fabrication	general	
Use 2D FEM analysis	×	
A [m²]	1,9312e-03	
A y, z [m²]	1,2770e-03	8,4872e-04
I y, z [m⁴]	5,9772e-07	1,1968e-06
I w [m⁶], t [m⁴]	0,0000e+00	2,5991e-07
Wel y, z [m³]	1,3744e-05	2,1721e-05
Wpl y, z [m³]	1,8245e-05	2,9156e-05
d y, z [mm]	0	0
c YUCS, ZUCS [mm]	-400	350
α [deg]	0,00	
A L, D [m²/m]	3,4200e-01	3,4200e-01
Mply +, - [Nm]	4,38e+02	5,62e+02

Name	oslabljenipresjek	
Type	General cross-section	
Item material	GL24h medijapan	
Fabrication	general	
Use 2D FEM analysis	×	
A [m²]	1,5153e-03	
A y, z [m²]	1,1985e-03	3,3221e-04
I y, z [m⁴]	5,4555e-07	1,1888e-06
I w [m⁶], t [m⁴]	0,0000e+00	1,0076e-07
Wel y, z [m³]	1,2012e-05	2,1576e-05
Wpl y, z [m³]	1,3105e-05	2,7770e-05
d y, z [mm]	0	0
c YUCS, ZUCS [mm]	-450	402
α [deg]	0,00	
A L, D [m²/m]	3,1768e-01	3,1768e-01
Mply +, - [Nm]	3,15e+02	4,11e+02

Slika 6.3. *Poprečni presjek modela (puni presjek, oslabljeni presjek)*

6.2. Statički proračun modela

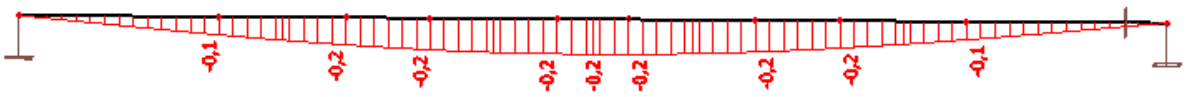
Statički proračun proveden je u programskom paketu Scia Engineer 15.3 [5]. Prosta greda promjenjivog poprečnog presjeka opterećena je koncentriranim silama (Slika 6.4).



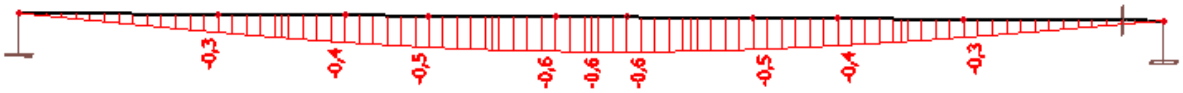
Slika 6.4. *Statičko opterećenje modela silama na l/3*

6.3. Rezultati numeričke analize

Provedena je linearna numerička analiza. Praćen je vertikalni pomak na sredini raspona (Slike 6.5, 6.6 i 6.7 i Tablica 6.1). Kroz sve faze opterećenja, na model djeluju dvije koncentrirane sile u trećinama raspona. Sila koja djeluje na model u iznosu F = 3,47 [kg] tj. 0,034 [kN] je ekvivalentna projektnoj sili koja djeluje na prototip.



Slika 6.5. *Progibi pri opterećenju silom od 0,0066 kN*



Slika 6.6. *Progibi pri opterećenju silom od 0,019 kN*



Slika 6.7. *Progibi pri opterećenju silom od 0,034 kN*

Tablica 6.1. *Rezultati numeričke analize modela*

FAZA OPTEREĆENJA	**SILA** [kN]	**PROGIB U SREDINI NOSAČA** [mm]
0	0	0
1	0,0066	0,2
2	0,019	0,6
3	0,034	1

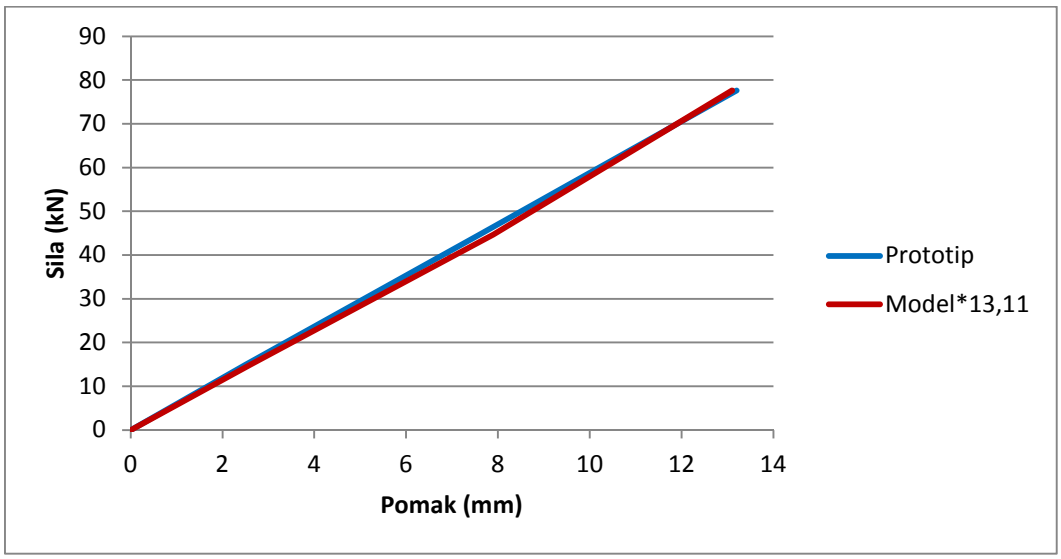
7. USPOREDBA NUMERIČKOG PRORAČUNA PROTOTIPA S NUMERIČKIM PRORAČUNOM MODELA

Numeričkim proračunom modela dobili smo sliku vertikalnog pomaka modela u polovici raspona nosača. Da bi mogli usporediti pomake modela izrađenog od medijapana i armiranobetonskog prototipa, koristimo mjerilo krutosti. Modelskom analizom dobiven je omjer između pomaka prototipa i modela te dobiveni izraz glasi: $u_P = 13{,}11 \cdot u_m$. Izračunati pomaci na modelu i prototipu prikazani su u Tablici 7.1.

Tablica 7.1. *Izračunate veličine apsolutnih pomaka na modelu i prototipu*

Opterećenje na modelu [kN]	**Pomak na modelu u L/2** [mm]	**Pomak na modelu × 13,11** [mm]	**Opterećenje na prototipu** [kN]	**Pomak na prototipu u L/2** [mm]
0	0	0	0	0
0,0066	0,2	2,6	14,9	2,5
0,019	0,6	7,9	44,7	7,6
0,034	1	13,1	77,6	13,2

Usporedbom rezultata iz Tablice 7.1 i priloženog Dijagrama 7.1 možemo uočiti dobro poklapanje rezultata; postoje vrlo mala odstupanja. Takvo poklapanje rezultata pokazuje da je modelska analiza dobro provedena te da su svi parametri modelske analize točno izračunati.



Dijagram 7.1. *Usporedba rezultata numeričke analize prototipa i modela*

8. ISPITIVANJE MODELA

8.1. Općenito o eksperimentalnoj analizi modela

Da bi se dobili podaci potrebni za ocjenu ponašanja modela, potrebno je provesti eksperimentalnu analizu. Eksperimentalno ispitivanje modela u laboratoriju događa se u kontroliranim idealnim uvjetima.

Kod mjerenja unaprijed određenih mjernih veličina dolazi do pojave mjernih grešaka. Mjerne greške dijelimo na:

- *deterministične mjerne greške* (utjecaj mjerne opreme, utjecaj organizacije i načina ispitivanja, posljedica nelinearnosti, utjecaj okoline i korisnika, itd.),
- *slučajne mjerne greške* (greške očitavanja, greške prilikom uzimanja uzoraka, itd.).

Najčešći uzroci zbog kojih se javljaju greške prilikom mjerenja su:

- nepravilno rukovanje mjernim instrumentima,
- nepoznavanje mjernog instrumenta, objekta ili veličine koja se mjeri,
- neispravnost mjernog instrumenta,
- neznanje ispitivača,
- pretvorba i računanje traženih veličina.

Mjerne greške mogu se smanjiti:

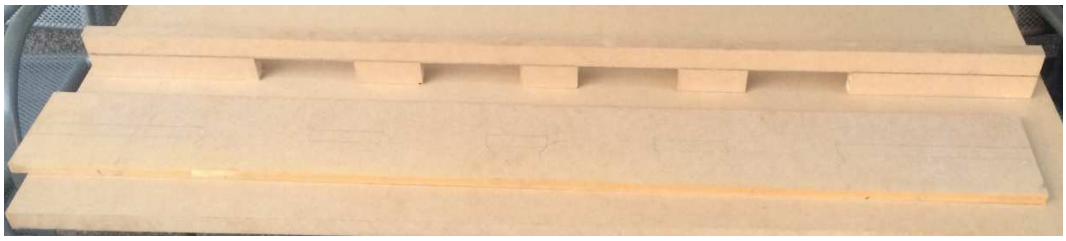
- ispravnim izborom mjernih veličina,
- izborom odgovarajućeg mjesta mjerenja,
- izborom podobne instrumentacija,
- izborom metode mjerenja.

Potpuno eliminiranje mjernih grešaka je nemoguće, ali ispravnim postupanjem prije svega s mjernim instrumentima te se greške mogu smanjiti.

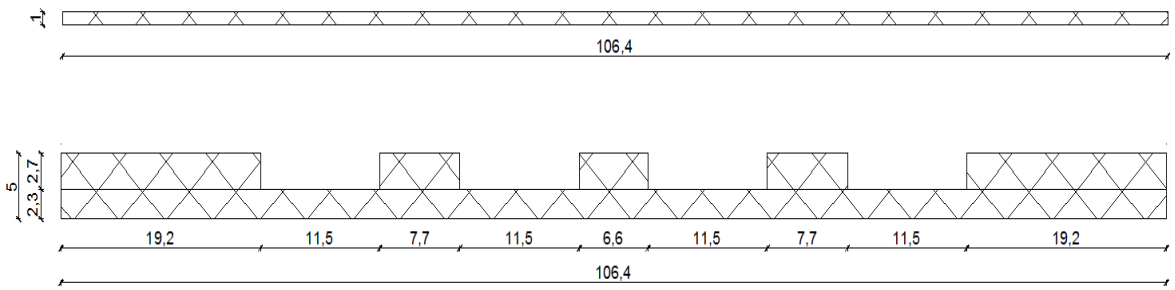
Prikazom rezultata mjernih veličina dobivamo predodžbu o ponašanju same konstrukcije/elementa, ali i utjecaj okoliša na samo ispitivanje. Interpretacija rezultata mjerenja je zapravo interpretacija ponašanja određenih svojstava konstrukcije/elementa u određenim uvjetima kao što su: temperatura, vlažnost, itd.

8.2. Izrada modela nosača

Model na kojem će se izvršiti ispitivanje je sastavljen od ploča medijapana. Model je sastavljen od dva elementa koji su dobiveni rezanjem ploča od medijapana (Slika 8.1). Dimenzije elemenata za sastavljanje modela dobivene su iz modelske analize (Slika 8.2).

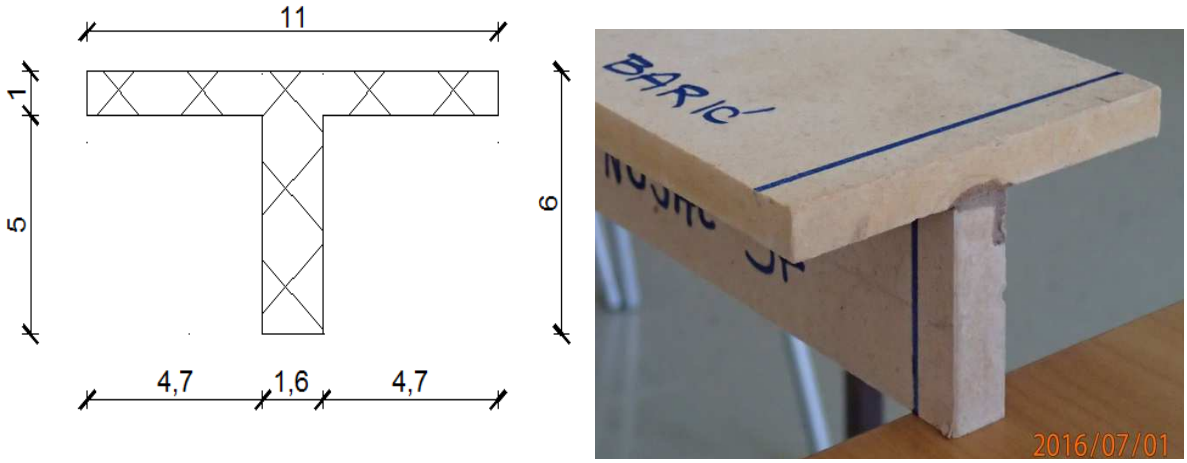


Slika 8.1. *Prikaz elemenata od kojih je sastavljen model*



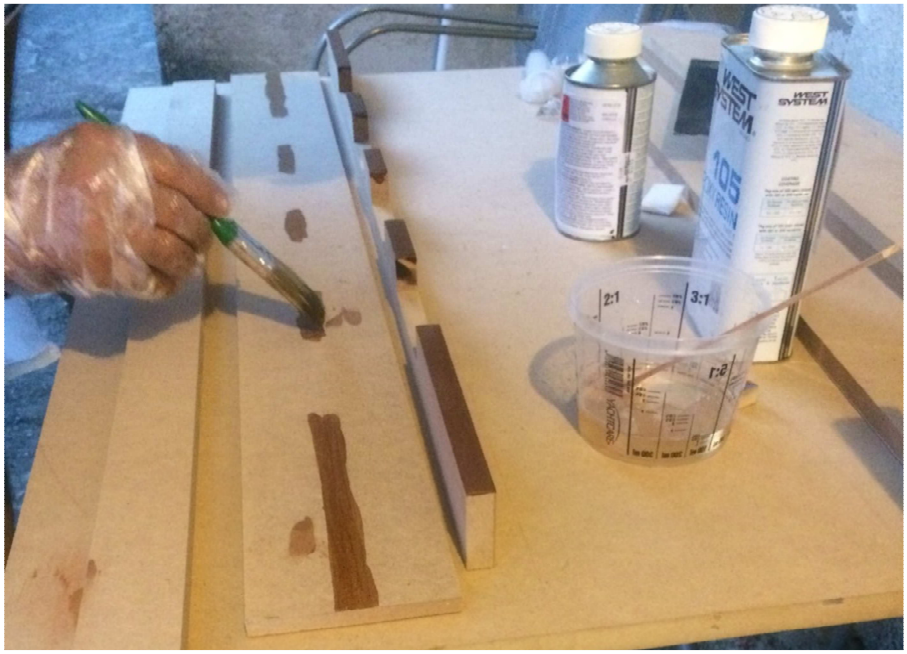
Slika 8.2. *Dimenzije elemenata od kojih je sastavljen model*

Poprečni presjek modela je istog oblika kao i kod prototipa, ali drukčijih dimenzija (Slika 8.3). Dimenzije poprečnog presjeka modela su izračunate modelskom analizom pomoću omjera sličnosti duljina.



Slika 8.3. *Poprečni presjek izrađenog modela*

Nakon što su ploče od medijapana izrezane na odgovarajuće elemente, potrebno je sastaviti model. Dva elementa međusobno su zalijepljena epoxy ljepilom (Slika 8.4). Na zalijepljene elemente je postavljen teret kako ne bi došlo do odvajanja površina premazanih ljepilom tijekom procesa sušenja ljepila (Slika 8.5). Nakon lijepljenja, model je ostavljen određeno vrijeme da se ljepilo osuši.



Slika 8.4. *Međusobno lijepljenje elemenata potrebnih za sastavljanje modela*

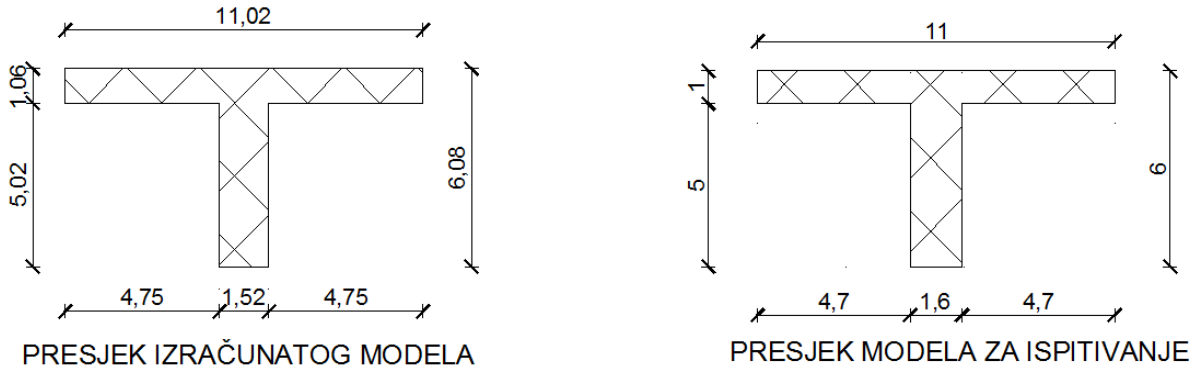


Slika 8.5. *Sušenje modela*

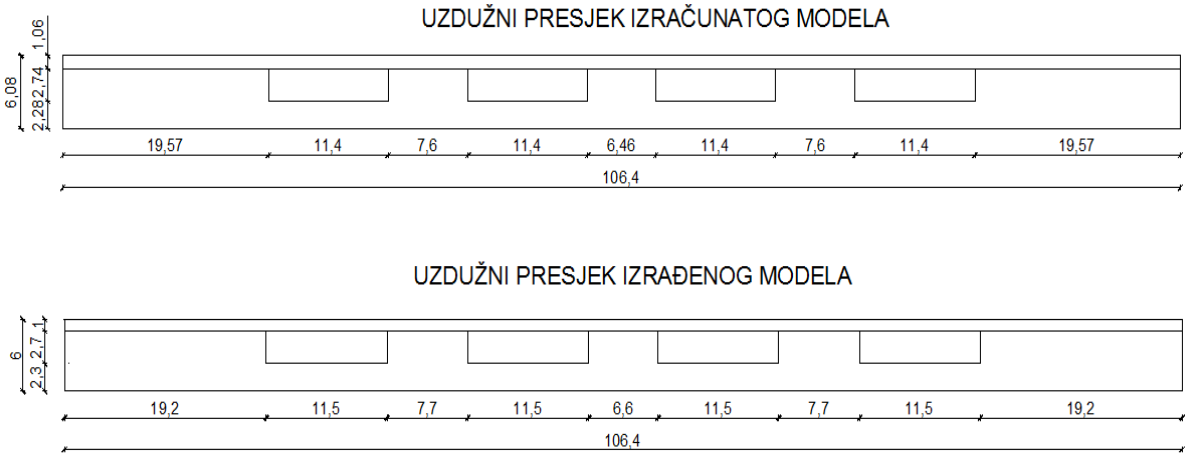
8.3. Priprema za ispitivanje modela u laboratoriju

Ispitivanje modela se provodi s ciljem dobivanja podataka o konstrukciji, u ovom slučaju to je predgotovljeni montažni nosač sa Zgrade 3 fakulteta. Cilj ispitivanja je dobivanje pomaka u karakterističnim točkama i usporedba s numeričkim proračunom modela.

Za potrebu ispitivanja bilo je potrebno izraditi model nosača. Dimenzije modela su određene modelskom analizom, međutim postoje određena odstupanja od veličina izračunatih modelskom analizom zbog poteškoća u rezanju materijala (Slike 8.6 i 8.7). Nosač je izrađen od medijapana a kao spojno sredstvo korišteno je epoxy ljepilo. Opterećenje koncentriranim silama na trećinama raspona simulirano je bocama vode koje su za svaku fazu opterećenja dopunjavanje vodom. Nakon svakog porasta opterećenja mjeren je progib na sredini nosača i na krajevima nosača. Na ovaj način su izmjereni apsolutni pomaci svih točaka iz čega su kasnije izračunati relativni pomaci u sredini nosača koji su u nastavku rabljeni u usporedbama.



Slika 8.6. *Poprečni presjek modela nosača*



Slika 8.7. *Uzdužni presjek modela nosača*

Prije samog ispitivanja trebalo je osigurati potrebnu opremu koja će se koristiti tijekom ispitivanja. Model je bilo potrebno postaviti u položaj da se može pravilno nanositi opterećenje, pazeći na sigurnost mjernih uređaja. Model je postavljen na dva udaljena stola kako bi prostor ispod modela bio oslobođen za postavljanje opterećenja (Slike 8.8 i 8.9).



Slika 8.8. *Postavljanje modela*



Slika 8.9. *Mjerna mjesta-krajevi nosača i sredina raspona; opterećenje-u trećinama raspona*

8.4. Instrumenti za ispitivanje

Postoji više vrsta uređaja za mjerenje pomaka, a to su: mehanički, električni, optički, laserski i drugi uređaji. Pomak je određen vektorom koji je usmjeren od točke prije djelovanja opterećenja, do te iste točke nakon djelovanja opterećenja. Pomaci neke točke na konstrukciji u pravilu sadrže i pomake oslonaca, a sprogibi se dobiju isključivanjem utjecaja pomaka oslonaca.

Pomaci se mogu mjeriti na više načina:

1) milimetarskim papirom i letvom,
2) milimetarskim papirom i polugom,
3) indikatorskom pločom,
4) induktivnim mjeračem pomaka (LVDT),
5) električnim kapacitivnim senzorima,
6) električnim potenciometarskim senzorima,
7) geodetskim instrumentima.

Pomaci se mogu mjeriti još i mikrourama koje su korištene prilikom eksperimentalnog ispitivanja.

Mjerni sat ili mikroura služi za precizno mjerenje apsolutnih pomaka. Pomaci koji se najčešće mjere su u rasponu od 0 do 100 mm. Točnost ovog instrumenta je u granicama od 1/10 mm (rijetko se koristi zbog nedovoljne preciznosti), 1/100 mm (uobičajeno se koristi te je preciznost zadovoljavajuća) i 1/1000 mm.

U ovisnosti o principu rada, mikroure možemo podijeliti u dvije skupine:

- mehanička mikroura,
- elektronska mikroura.

Mehanička mikroura radi na principu uvećavanja pomaka pomoću sustava zupčanika, te očitavanje tih pomaka na skali. Očitavanja pomaka možemo vršiti analogno (preko kazaljke) ili digitalno (preko numeričkog zaslona).

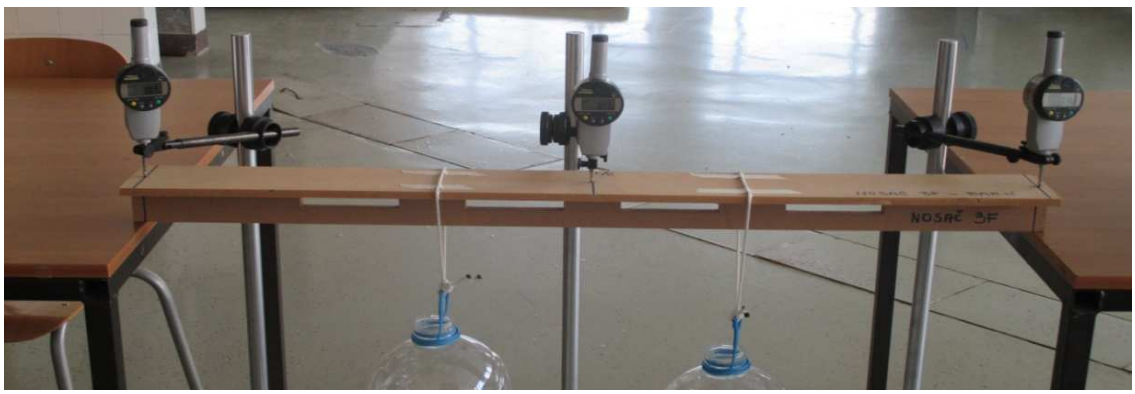
Elektronska ili digitalna mikroura ima mogućnost priključenja na računalo pomoću podatkovnog kabela, te se zapisi izravno unose u računalni program. Ove mikroure su poželjne zbog svojih visokih točnosti i imaju automatsko bilježenje rezultata u svakom trenutku. Osnovna prednost im je značajno smanjenje mogućnosti pogreške procjene očitanja, koju opažač čini tijekom očitanja s analogne mikroure.

Za potrebe mjerenja pomaka nosača u ovom radu korištena je mehanička mikroura s digitalnim očitanjem proizvođača Mitutoyo (Slika 8.10). Točnost ove mikroure je 1/100 mm, uz maksimalni mogući pomak ticala od 50 mm.



Slika 8.10. *Mehanička mikroura proizvođača Mitutoyo*

Mikroure pričvrstimo na stalak, a ticalo postavimo na predviđeno mjesto za mjerenje pomaka. Ticalo mikroure postavi se okomito na površinu odnosno u smjeru pomaka kojega želimo izmjeriti. Mikroure su postavljena na tri mjerna mjesta: u sredini raspona i na krajevima raspona (ležajevi) (Slika 8.11).



Slika 8.11. *Postavljene mikroure na predviđenim mjernim mjestima*

8.5. Provedba ispitivanja

Mjerenje progiba izvršeno je na polovici raspona i na ležajevima (Slike 8.11 i 8.12). Opterećenje je postavljeno na trećinama raspona (Slika 8.12). Opterećenje na trećinama raspona simulirano je bocama koje se postepeno pune vodom u inkrementima od 3 dl (u prvom inkrementu boca je napunjena s 4 dl). Volumen svake od boca bio je 7 litara što odgovara opterećenju od 7 kilograma kada je boca puna vode, pa je ukupno opterećenje na modelu u zadnjoj fazi iznosilo 14 kilograma. Nakon svakog koraka mjere se pomaci na već spomenutim mjestima. Model je opterećivan sve dok boce s vodom nisu bile pune. Iako je ta sila 2 puta veća od proračunske sile nosivosti, nije došlo do pucanja modela.



Slika 8.12. *Opterećenje modela*



Slika 8.13. *Punjenje boca vodom*

9. PRIKAZ REZULTATA MJERENJA POMAKA U KARAKTERISTIČNIM TOČKAMA I USPOREDBA S NUMERIČKIM PRORAČUNOM MODELA

9.1. Rezultati ispitivanja modela

Provedeno je ispitivanje na modelu pri čemu je praćen vertikalni pomak na polovici raspona (w l/2) i na ležajevima (w_1 i w_2). Rezultati modelskog ispitivanja prikazani su u Tablici 9.1.

Tablica 9.1. *Rezultati modelskog ispitivanja*

		POMACI [mm]			
Faza opterećenja	Opterećenje [kg]	W_1	$W_{L/2}$	W_2	Stvarni pomak [mm]
0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1.	0,4	0,01	0,16	-0,01	0,16
2.	0,7	0,02	0,28	0,00	0,27
3.	1,0	0,02	0,38	0,02	0,36
4.	1,3	0,00	0,47	0,07	0,44
5.	1,6	-0,09	0,53	0,16	0,50
6.	1,9	-0,16	0,57	0,24	0,53
7.	2,2	-0,18	0,65	0,28	0,60
8.	2,5	-0,19	0,77	0,29	0,72
9.	2,8	-0,21	0,87	0,32	0,82
10.	3,1	-0,25	0,96	0,40	0,89
11.	3,4	-0,28	1,07	0,42	1,00
12.	3,7	-0,29	1,20	0,43	1,13
13.	4,0	-0,37	1,23	0,50	1,17
14.	4,3	-0,37	1,37	0,49	1,31
15.	4,6	-0,36	1,50	0,49	1,44
16.	4,9	-0,35	1,68	0,45	1,63
17.	5,2	-0,34	1,83	0,43	1,79
18.	5,5	-0,33	1,97	0,42	1,93

		POMACI [mm]			
Faza opterećenja	Opterećenje [kg]	W_1	$W_{L/2}$	W_2	Stvarni pomak [mm]
19.	5,8	-0,30	2,16	0,38	2,12
20.	6,1	-0,29	2,30	0,38	2,26
21.	6,4	-0,29	2,45	0,37	2,41
22.	6,7	-0,28	2,59	0,37	2,55
23.	7,0	-0,26	2,75	0,36	2,70

Pošto je došlo do pomaka i na ležajevima, potrebno je progib u sredini umanjiti za srednju vrijednost zbroja pomaka na ležajevima. Tako dobivamo stvarni pomaku sredini raspona nosača. Prilikom izračuna srednje vrijednosti pomaka na ležajevima treba voditi računa o predznaku pomaka. Pozitivni predznak pomaka označava pomak prema dolje, dok negativni predznak označava pomak prema gore.

Stvarni pomak nosača na sredini raspona računamo prema formuli:

$$w_{L/2,S} = w_{L/2} - \frac{w_1 + w_2}{2}$$

9.2. Rezultati numeričkog proračuna modela

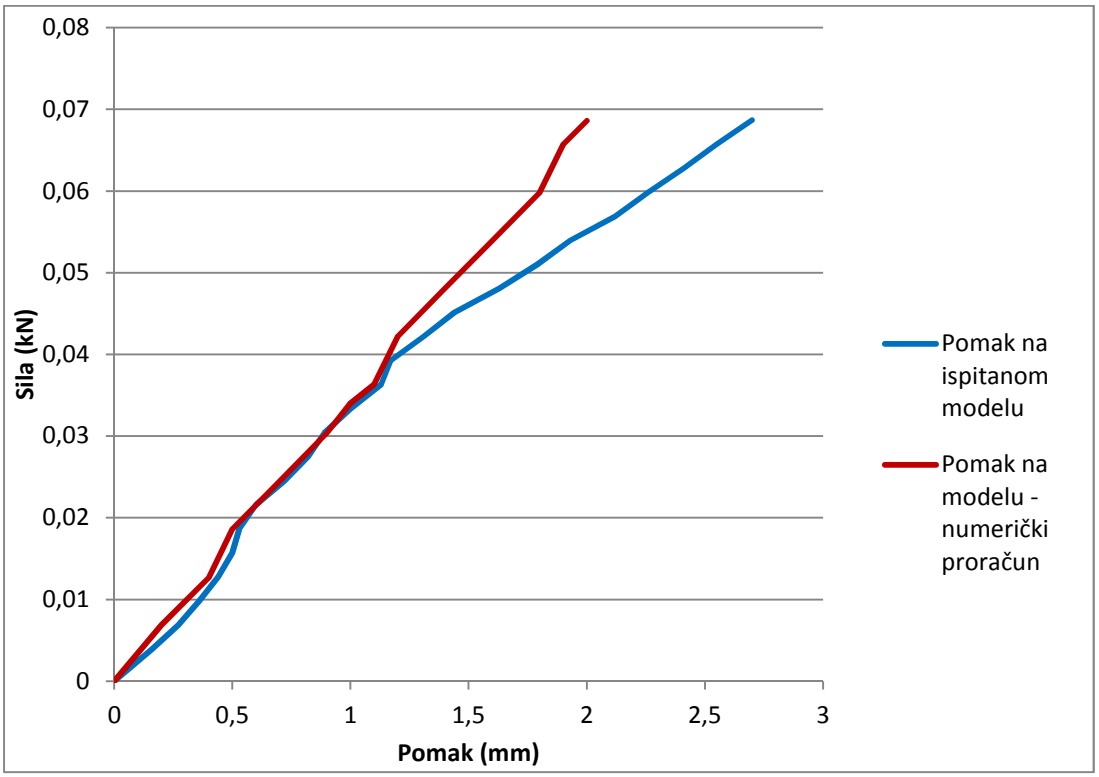
U Tablici 9.2 prikazani su rezultati numeričkog proračuna modela koji je proveden u programskom paketu Scia Engineer 15.3 [5].

Tablica 9.2. *Rezultati dobiveni numeričkim proračunom modela*

OPTEREĆENJE NA MODELU [kg]	OPTEREĆENJE NA MODELU [kN]	POMAK NA MODELU [mm]
0,0	0,0	0,0
0,7	0,0069	0,2
1,3	0,0127	0,4
1,9	0,0186	0,5
2,5	0,0245	0,7
3,1	0,0304	0,9
3,4	0,034	1,0
3,7	0,0363	1,1
4,3	0,0422	1,2
4,9	0,0481	1,4
5,5	0,0539	1,6
6,1	0,0598	1,8
6,7	0,0657	1,9
7,0	0,0686	2,0

9.3. Usporedba rezultata numeričkog proračuna modela s rezultatima ispitivanja modela

Na Dijagramu 9.1 grafički je prikazan odnos rezultata numeričke analize modela i rezultata ispitivanja modela. Vidljivo je da postoje odstupanja između pomaka dobivenih numeričkim proračunom i pomaka izmjerenih ispitivanjem modela. Prilikom ispitivanja modela, pomaci su mjereni u osi nosača. Uzrok odstupanja rezultata je taj što mjere modela koji se ispitivao nisu u potpunosti jednake mjerama modela koji se koristio za numeričku analizu u računalnom programu Scia Engineer 15.3 [5]. Dijagrami se gotovo poklapaju do sile od 0,036 (kN), nakon čega dolazi do odstupanja u rezultatima. Pri opterećenju od cca 0,036 (kN) došlo je do naglog skoka u pomaku na mjernom mjestu W_1 (ispod lijevog ležaja). Posljedica naglog rasta pomaka je deformiranje simuliranog oslonca, odnosno pomicanje (zaokretanje) modela na lijevom ležaju.



Dijagram 9.1. *Grafički prikaz rezultata dobivenih numeričkim proračunom i ispitivanjem modela*

10. USPOREDBA REZULTATA ISPITIVANJA MODELA I ISPITIVANJA PROTOTIPA

Rezultati ispitivanja prototipa preuzeti su iz dokumenta Izvještaj o izvršenom probnom opterećenju i ispitivanju predgotovljenog montažnog nosača za Zgradu 3 fakulteta, Sveučilišni kampus Visoka u Splitu [2].

U Tablici 10.1 prikazani su pomaci prototipa dobiveni ispitivanjem probnim opterećenjem. Da bi bilo moguće usporediti ponašanje modela i prototipa, pomake na modelu i sile koje djeluju na model treba pomnožiti s odgovarajućim koeficijentima dobivenim modelskom analizom (Tablica 10.2). Usporedba prototipa i modela vrši se na temelju vertikalnih pomaka na sredini nosača.

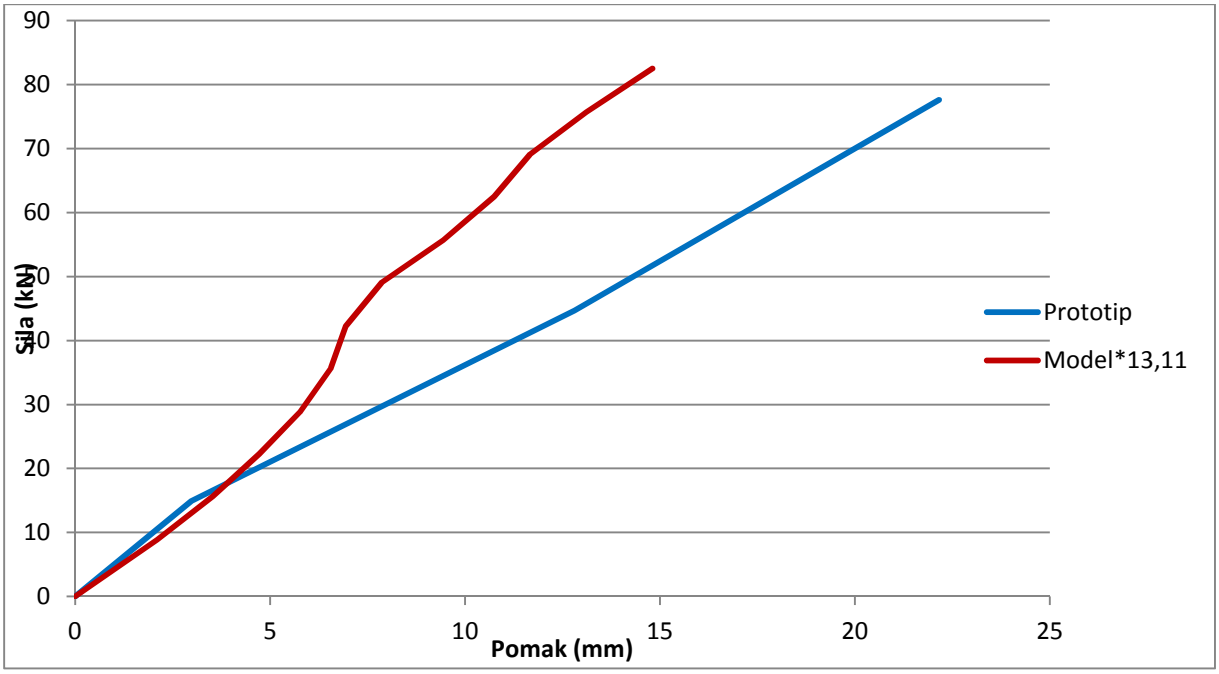
Tablica 10.1. *Rezultati dobiveni ispitivanjem prototipa*

SILA NA PROTOTIPU - F_p [kN]	POMAK NA PROTOTIPU - w_p [mm]
0	0
14,9	2,98
44,7	12,81
77,6	22,16

Tablica 10.2. *Rezultati dobiveni ispitivanjem modela (mm)*

POMAK NA MODELU - w_m	POMAK NA MODELU × 13,11	SILA NA MODELU - F_m	SILA NA MODELU × (1/0,00044)
0,0	0,0	0,0	0,0
0,16	2,10	0,0039	8,86
0,27	3,54	0,0069	15,68
0,36	4,72	0,0098	22,27
0,44	5,77	0,0127	28,86
0,50	6,56	0,0157	35,68
0,53	6,95	0,0186	42,27
0,60	7,87	0,0216	49,09
0,72	9,44	0,0245	55,68
0,82	10,75	0,0275	62,5
0,89	11,67	0,0304	69,09
1,0	13,11	0,0333	75,68
1,13	14,81	0,0363	82,5
1,17	15,34	0,0392	89,09
1,31	17,17	0,0422	95,91
1,44	18,88	0,0451	102,5
1,63	21,37	0,0481	109,32
1,79	23,47	0,0510	115,91
1,93	25,30	0,0539	122,5
2,12	27,79	0,0569	129,32
2,26	29,63	0,0598	135,91
2,41	31,60	0,0628	142,73
2,55	33,43	0,0657	149,32
2,70	35,40	0,0686	155,91

Iz Dijagrama 10.1 vide se rezultati ispitivanja prototipa i modela. Primjećujemo da se u prvih nekoliko faza opterećivanja model i prototip ponašaju linearno te se dijagrami gotovo preklapaju, dok u kasnijim fazama nanošenja opterećenja dolazi do većeg odstupanja. Do odstupanja dolazi zbog toga što mjere modela nisu u potpunosti jednake mjerama prototipa. Mjere modela trebalo je prilagoditi mogućnostima pilanja medijapana. Na odstupanje također utječe i način pridržavanja na krajevima koji nije moguće u potpunosti poistovjetiti s osloncima prototipa. Uočavamo da do odstupanja u rezultatima dolazi pri sili od cca 18 (kN). možemo pretpostaviti da je uzrok tome pomicanje oslonaca na modelu.



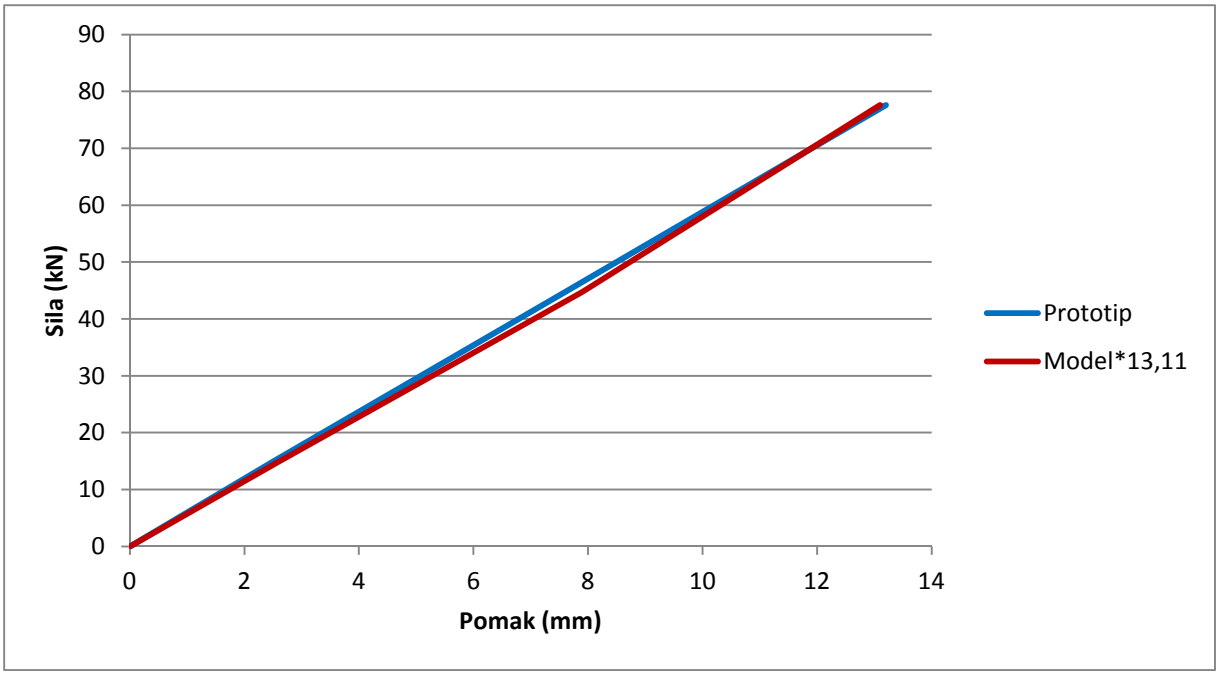
Dijagram 10.1. *Grafički prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem modela i prototipa*

11. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedena je numerička i modelska analiza stropnog nosača sa Zgrade 3 fakulteta u kampusu Sveučilišta u Splitu. Na samom nosaču izvršeno je ispitivanje probnim opterećenjem te su zabilježene vrijednosti vertikalnih pomaka u karakterističnim mjernim točkama (na sredini raspona i na ležajevima) za sve faze opterećenja. Raspon stropnog nosača iznosi 14 metara, a raspon između ležajevima iznosi 13,7 metara. Nosač je izrađen od betona C30/37.

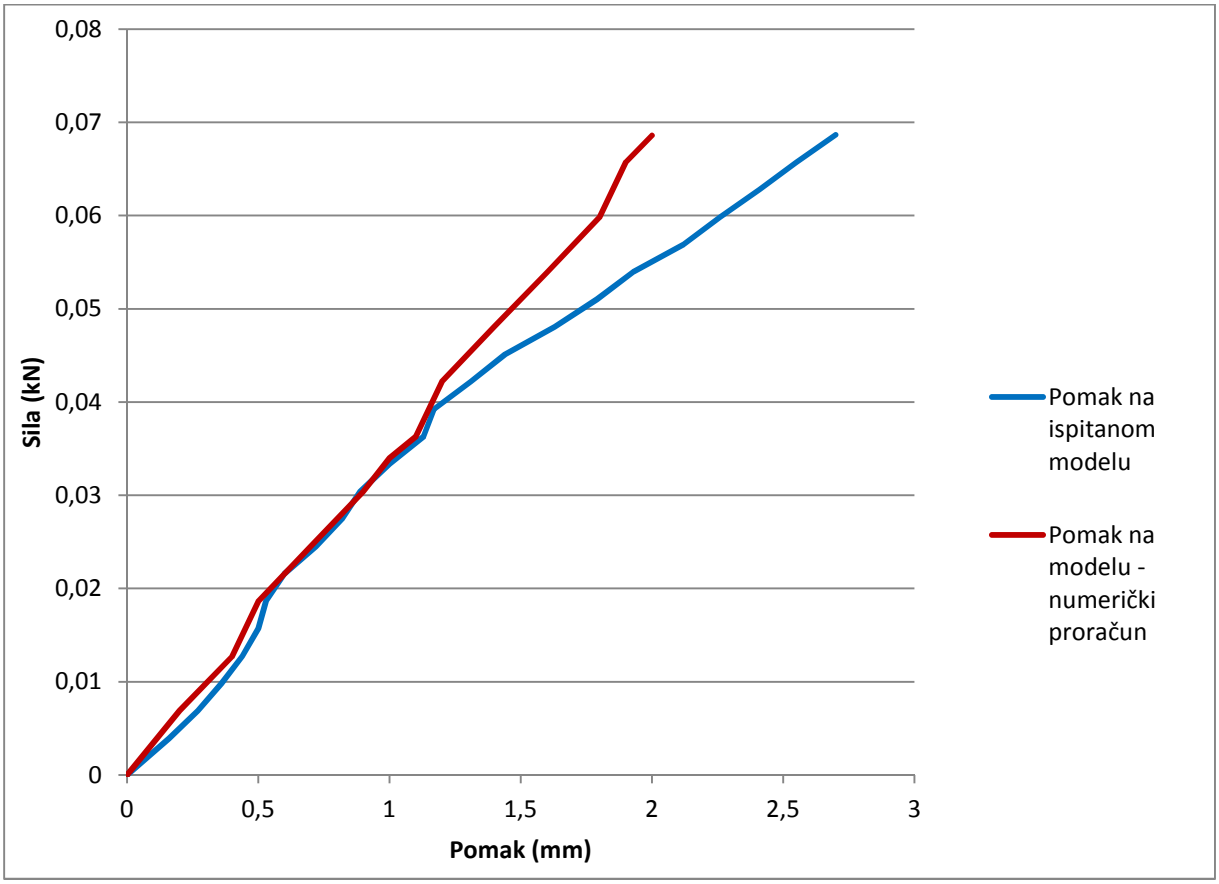
Modelskom analizom određene su dimenzije modela na kojem je izvršeno ispitivanje. Model je istog oblika (isti poprečni presjek) kao i prototip, ali različitih dimenzija i materijala. Ukupna duljina modela iznosi 1,064 metra, a raspon između ležajevima iznosi 1,0336 metra. Model je izrađen od medijapana te je za spojno sredstvo korišteno epoxy ljepilo.

Provedena je i numerička analiza dva numerička modela od kojih jedan predstavlja prototip, a drugi predstavlja model na kojem je izvršeno modelsko ispitivanje. Rezultati numeričkog proračuna prototipa i modela prikazani su na dijagramu sila-pomak (Dijagram 11.1) iz kojeg je vidljivo dosta dobro slaganje rezultata.



Dijagram 11.1. *Usporedba rezultata numeričke analize prototipa i modela*

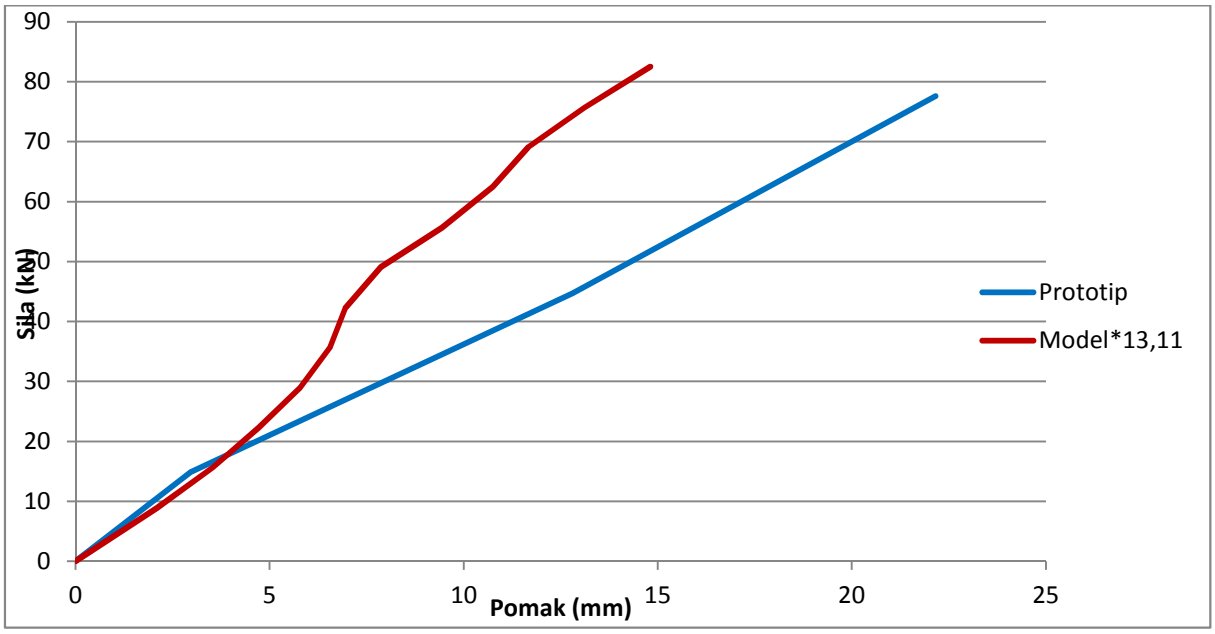
Nakon provedene modelske analize, izrađen je model. Zbog poteškoća u rezanju materijala, dolazi do malih odstupanja u dimenzijama modela koje su prethodno izračunate modelskom analizom. Nakon završetka ispitivanja izmjereni rezultati su uspoređeni s rezultatima numeričkog proračuna. Iz grafičkog prikaza (Dijagram 11.2) vidljivo je da se dijagrami gotovo poklapaju do određene točke opterećenja, nakon toga dolazi do odstupanja rezultata. Do odstupanja najvjerojatnije dolazi zbog razlike u dimenzijama ispitivanog modela i numeričkog modela, te zbog toga jer računalni program i eksperiment nemaju iste uvjete proračuna. Naime, model u računalnom programu ima idealne rubne uvjete, dok je to prilikom ispitivanja teško simulirati.



Dijagram 11.2. *Grafički prikaz rezultata dobivenih numeričkim proračunom i ispitivanjem modela*

Rezultati ispitivanje modela i prototipa prikazani su na Dijagramu 11.3. Vidljivo je da se grafovi gotovo preklapaju do određene točke opterećenja, nakon toga dolazi do odstupanja. Neslaganju rezultata doprinosi to što mjere ispitanog modela nisu u potpunosti jednake

mjerama koje su dobivene modelskom analizom. Odstupanju pridonose čimbenici kao što su osjetljivost mjernih instrumenata, način pridržanja modela koji je teško u potpunosti poistovjetiti s prototipom. Bitan faktor koji doprinosi neslaganju rezultata je i način sastavljanja modela, tj. njegovo lijepljenje. Model i prototip nisu izrađeni od istog materijala, što je također jedan od čimbenika koji utječe na neslaganje rezultata ispitivanja. Prototip je izrađen od betona, a model od medijapana.

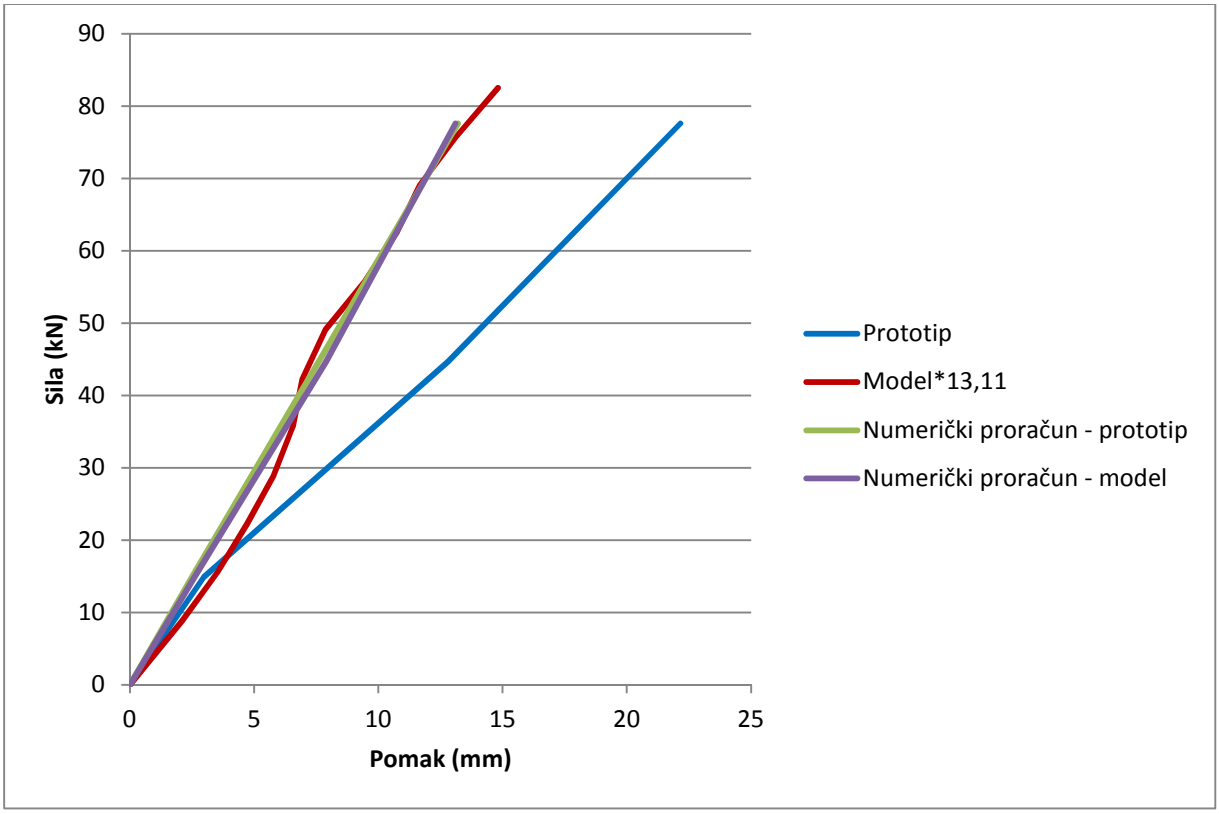


Dijagram 11.3. *Grafički prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem modela i prototipa*

Cilj ovog diplomskog je usporediti rezultate numeričkog proračuna modela i prototipa, te usporediti rezultate ispitivanja prototipa i modela. Krivulje dobivene numeričkim proračunom prototipa i modela gotovo su identične, što znači da model jako dobro simulira prototip. Pošto se numerička analiza temelji na linearnom proračunu obje krivulje su zapravo pravci.

Na Dijagramu 11.4 prikazani su rezultati numeričkog proračuna modela i prototipa te rezultati ispitivanja modela i prototipa. Iz priloženog dijagrama vidljivo je da najmanju krutost ima prototip, pri jednakoj sili ispitivanje na prototipu dalo je veće pomake od ispitivanja na modelu. To bi moglo značiti da je zbog načina izrade modela (mjere, lijepljenje, sastavljanje, način pridržanja) izrađen nosač koji ima veću krutost od nosača u stvarnosti. Iz grafičkog prikaza vidljivo je da se pri sili od cca 15 kN mijenja nagib krivulje rezultata ispitivanja prototipa. Do točke opterećenja od cca 15 kN vidimo da se gotovo pa poklapaju svi rezultati, nakon te točke uočavamo odstupanje rezultata ispitivanja prototipa od ostalih

rezultata. Možemo zaključiti da je pri toj sili došlo do pojave novih pukotina i produljenja već postojećih, a samim tim konstrukcija nosača prelazi iz linearnog elastičnog ponašanja u nelinearno ponašanje. S obzirom da proračunom nije obuhvaćeno nelinearno ponašanje prototipa, jasno je da postoje odstupanja u rezultatima kako u numeričkoj analizi tako i u rezultatima ispitivanja modela.



Dijagram 11.4. *Grafički prikaz rezultata dobivenih numeričkim proračunom modela i prototipa i rezultati ispitivanja modela i prototipa*

Nakon provedenih svih ispitivanja i numeričke analize možemo doći do zaključka da prilikom modelske analize treba biti precizan i što u većoj mjeri model poistovjetiti s prototipom.

12. LITERATURA

[1] Tehnički propisi za betonske konstrukcije, Narodne novine broj 101, Zagreb, kolovoz 2005.

[2] Glavni projekt konstrukcije “Zgrade tri fakulteta’’ – prostorna jedinica 7 – u sklopu Sveučilišnog kampusa Visoka u Splitu, broj projekta: TD 2320-5/06 (glavni projektant: D. Gabrić), Split, ožujak-svibanj 2006.

[3] Hrvatska norma HRN U.M1.047: Ispitivanje konstrukcije probnim opterećenjem i ispitivanje do sloma, Sl. list br. 4/87, siječanj 1987.

[4] P. Marović, M. Galić, M. Bertolino: Izvještaj o izvršenom probnom opterećenju i ispitivanju predgotovljenog montažnog nosača za Zgradu 3 fakulteta, Sveučilišni kampus Visoka u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, srpanj 2009.

[5] Scia Engineer 2013 – programski paket

[6] V. Šimić: Otpornost materijala 2, Školska knjiga, Zagreb, 2005.

[7] P. Marović: Ispitivanje konstrukcija, interna skripta - zapisi s predavanja, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Sveučilište u Splitu, Split, 2010.