

Ravninska statička analiza Paškog mosta preko Ljubačkih vrata

Baričević, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:237154>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-30**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Lucija Baričević

**Ravninska statička analiza Paškog mosta
preko Ljubačkih vrata**

Završni rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Prijediplomski sveučilišni studij
Građevinska statika 2**

**Lucija Baričević
JMBAG: 0114032741**

**Ravninska statička analiza Paškog mosta
preko Ljubačkih vrata**

Završni rad

Rijeka, rujan 2023.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Lucija Baričević

U Rijeci, 15. rujan 2023.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Draganu Ribariću na pristupačnosti, strpljenju i prenesenim vještinama prilikom pisanja završnog rada. Ostalim profesorima, svojoj obitelji i prijateljima zahvaljujem na ustrajnoj podršci i pomoći tijekom studiranja.

SAŽETAK:

U ovom radu opisano je idejno rješenje nosivosti te uporabljivosti lučne konstrukcije sa kolničkim gredama i stupovima, proračunate kao ravninski poligonalni štapni model.

Kontinuirana čelična rasponska konstrukcija koja spaja otok Pag sa kopnom preko Ljubačkih vrata duljine je 279,6m i oslonjena je na niz parova betonskih stupova. Lučni je most nadvođen nad morem betonskim lukom raspona 193,2m, dok mu je najviša točka nad morem visine 38,74m. Ukupna širina mosta iznosi 10,5m.

Sukladno Eurocode normama i propisima, proračunato je pritiskajuće djelovanje vjetra na konstrukciju, kao i opterećenje prometovanja motornih vozila i pješaka duž kolnika. Djelovanje povremenog snijega u ovom zadatku je izostavljeno radi geografskog položaja, no i zbog nemogućnosti istovremenog djelovanja snijega uz nalete vjetra koji će imati veće vrijednosti te je zbog toga on naposljetku računat kao mjerodavan.

Konstrukcija je prikazana ravninski, a zbog manjeg nedostatka podataka o geometriji mosta pojedine dimenzije približno su procijenjene. Skice modela izrađivane su u programu *Autocad* dok je konačno rješenje problema, nakon unošenja odgovarajuće geometrije te mjerodavnih proračunskih kombinacija opterećenja, dobiveno programom *Staad.pro*. Rezultati graničnog stanja nosivosti prikazani su dijagramima uzdužnih i poprečnih sila te momenata savijanja, a uporabljivost konstrukcije prikazana je skicom konačnih progiba.

Ključne riječi: Paški most, štapni model, čelična rasponska konstrukcija, betonski luk, betonska stupašta, opterećenje vjetrom, prometno opterećenje, mjerodavne kombinacije opterećenja, rezultatni dijagrami.

SUMMARY:

The project describes the conceptual design of the bearing capacity and usability of an arch structure with pavement beams and columns, calculated as a planar polygonal stick model. The continuous steel span construction that connects the island of Pag with the mainland via Ljubački vrata is 279.6 m long and is supported by a series of pairs of concrete columns. The bridge is arched over the sea with a concrete arch spanning 193.2m, while its highest point above the sea is 38.74m high. The total width of the bridge is 10.5 m.

The compressive effect of the wind on the structure was calculated in accordance with Eurocode norms and regulations, as well as the load of motor vehicle traffic along the roadway. The effect of occasional snow in this task is neglected due to the geographical location and due to the impossibility of the simultaneous effect of snow with gusts of wind, which will have higher values, which is why it was ultimately counted as authoritative.

The construction is shown as twodimensional, and due to a small lack of geometry data of the bridge, some dimensions are approximately estimated. Sketches of the model were created in the *Autocad* program, while the final solution to the problem, after entering the appropriate geometry and the relevant calculated load combinations, was obtained with the *Staad.pro* program. The results of the load capacity are shown by diagrams of longitudinal and transverse forces and bending moments, and the usability of the structure is shown by a sketch of final deflections.

Keywords: Pag bridge, stick model, steel span construction, concrete arch, concrete columns, wind load, traffic load, relevant load combinations, resultant diagrams.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. KARAKTERISTIKE PAŠKOG MOSTA..... | 2 |
| 3. REŠETKASTA KONSTRUKCIJA..... | 4 |
| 3.1. Poprečni presjeci..... | 5 |
| 4. ANALIZA OPTEREĆENJA..... | 8 |
| 4.1. Stalno opterećenje..... | 8 |
| 4.2. Opterećenje vjetrom..... | 9 |
| 4.3. Prometno opterećenje..... | 12 |
| 5. KOMBINACIJE OPTEREĆENJA..... | 15 |
| 6. ANALIZA REZULTATA..... | 18 |
| 6.1. Reakcije u osloncima..... | 18 |
| 6.2. Uzdužne sile..... | 19 |
| 6.2.1. <i>Uzdužne sile u luku</i> | 19 |
| 6.2.2. <i>Uzdužne sile u stupovima</i> | 19 |
| 6.2.3. <i>Uzdužne sile u kolničkoj konstrukciji</i> | 19 |
| 6.3. Momenti savijanja..... | 20 |
| 6.4. Progibi i deformacije..... | 21 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 22 |
| 8. POPIS SLIKA..... | 23 |
| 9. LITERATURA..... | 26 |

1. UVOD

Na državnoj cesti D106 nad Ljubačkim vratima u Zadarskoj županiji kopno sa otokom Pagom spaja Paški most. Projektirao ga je arhitekt Ilija Stojadinović te je prvi puta u promet pušten 1968. godine. Do danas se most nekoliko puta obnavljao budući da je u Domovinskom ratu bio znatno oštećen, a kasnije ubrzano razaran utjecajem agresivne maritimne sredine, burne i slane. Najveći niz sanacija i popravaka dovršen je 2001. godine kada se kompletna prednapeta armiranobetonska kolnička konstrukcija zamjenila čeličnom.

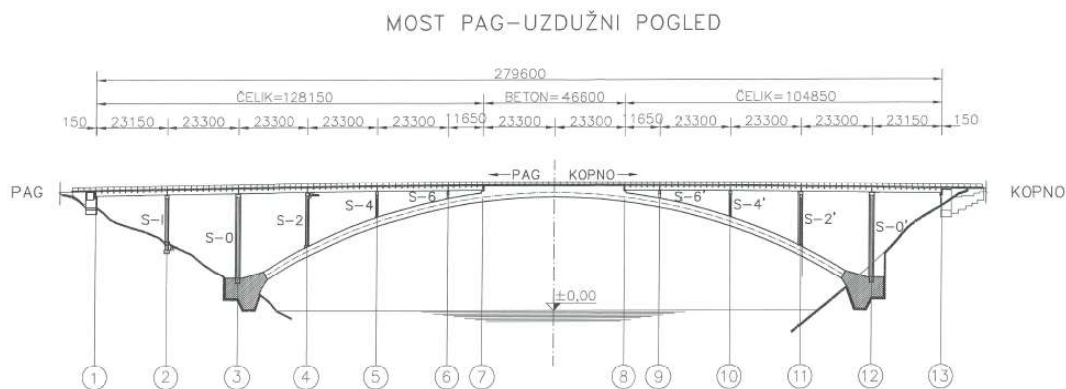
U ovom završnom radu analiziran je pojednostavljeni prikaz konstrukcije današnjeg mosta. Skice ravninskog štapnog modela izrađivane su na osnovi dostupnih informacija o okolnom terenu i samoj geometriji mosta te su zbog manjih nedostataka podataka neke dimenzije približno pretpostavljene. Sve skice izrađivane su programom *Autocad 2024.*, a statički proračuni te sam model mosta izvedeni su programom *Staad.pro V22 CONNECT edition.*



Slika 1. Pogled na Paški most

2. KARAKTERISTIKE PAŠKOG MOSTA

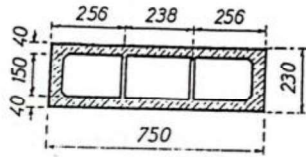
Nad Ljubačkim vratima koja su široka 200m izgrađen je betonski luk raspona 193,20m (slika 2), spljoštenosti 1:7. Luk je sandučastog poprečnog presjeka sa 3 komore (slika 3), širine 7m i visine 3m u tjemenu dok u petama njegova visina iznosi 2,3m. Nadlučni sklop sadrži 4 raspona od 23,3m prema kopnenoj strani te 5 istih prema paškoj strani, dok se uz tjeme nalazi sa obje strane jedan manji raspon od 11,65m (slika 2). Pri samom tjemenu u duljini od 46,6m most je spojen nadlučnom konstrukcijom u cjelinu. Poprečni presjek sačinjen je od dva glavna punostjena nosača konstantne visine od 1,5m povezana čeličnom ortotropnom pločom (slika 4). Rasponska konstrukcija oslonjena je na parove betonskih stupova koji su na međusobnom osnom razmaku od 4,6m. Oktogonalnog su poprečnog presjeka koji se mijenja zavisno o visini pojedinih stupova. Raspon mosta iznosi 279,6m, ukupne širine kolničke konstrukcije 10,5m, od čega je kolnik širine 7,6m i s njegove obje strane pješačka staza širine 1,2m. Najviša točka nad morem nalazi se na visini od 38,74m.



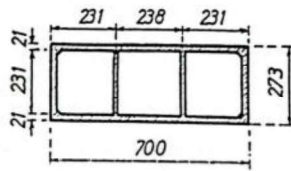
Slika 2. Nacrt mosta

POPREČNI PRESJECI ARMIRANO BETONSKOG LUKA

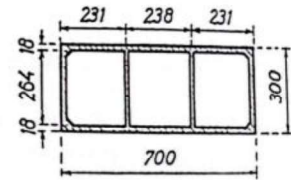
PRESJEK IZNAD UPORNJAKA
LUKA



PRESJEK U ČETVRTINI
RASPONA LUKA

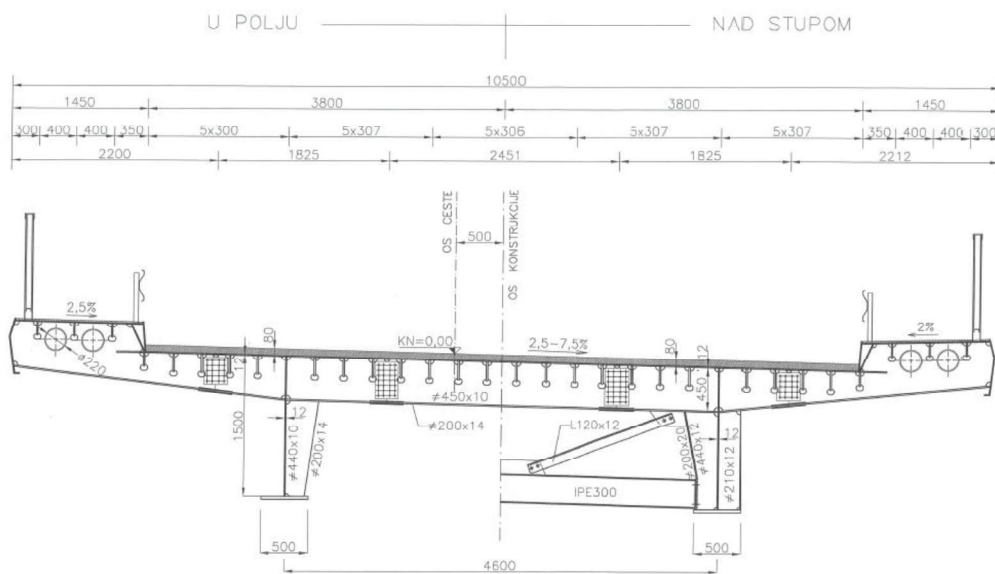


PRESJEK U TJEMENU
LUKA



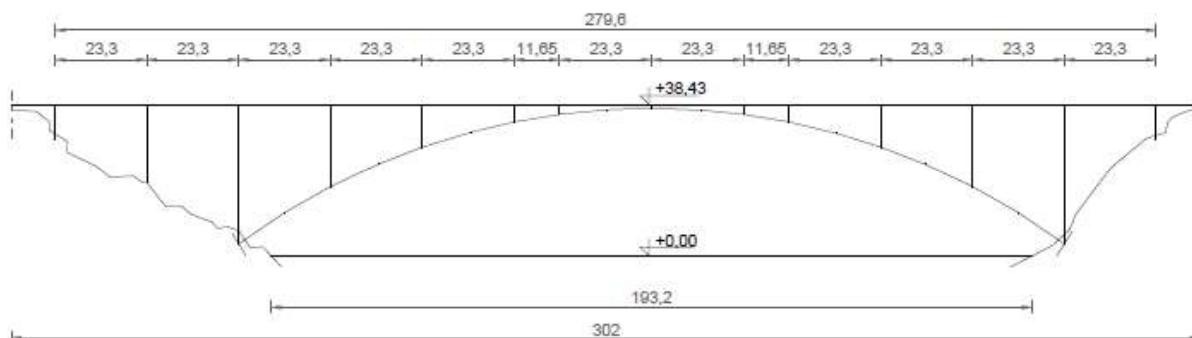
Slika 3. Poprečni presjek lučne konstrukcije

MOST PAG – POPREČNI PRESJEK ČELIČNE KONSTRUKCIJE



Slika 4. Poprečni presjek kolničke konstrukcije

3. REŠETKASTA KONSTRUKCIJA



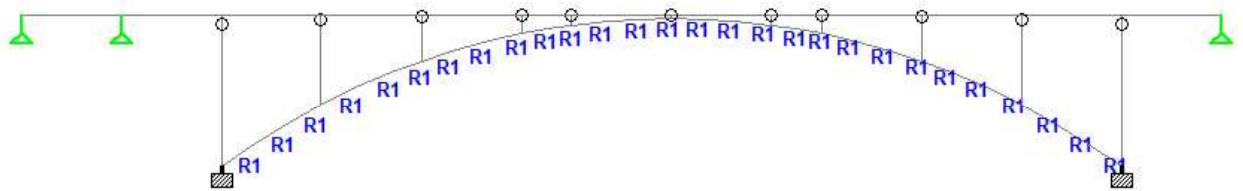
Slika 5. Model mosta prikazan štapovima

Pojednostavnjeni prikaz mosta izveden je kao ravninski poligonalni štapni model. Gornji ustroj mosta sačinjen je od kontinuirane čelične kolničke konstrukcije ukupne duljine 279,6m, oslonjene na štapove koji predstavljaju konstrukciju stupišta. Stupišta su simetrično udaljena od tjemena na obje strane. Luk je također izveden kao poligonalni sustav štapova: po 3 štapa između svakog stupišta na rasponu od 23,3m dok manje raspone od 11,65m povezuju po dva štapa lučne konstrukcije (slika 5). Zbog manjka informacija o terenu u okolišu mosta, stupovi koji sežu izvan lučnog svoda prikazani su pojednostavnjeno kao oslonci pod kolničkom konstrukcijom. Tri najkraća stupišta koja su najbliža tjemenu luka u ovom primjeru predstavljaju zamjenu betonskoj ploči nadtjemnog sklopa te su im dimenzije prilagođene ostalim omjerima u konstrukciji.

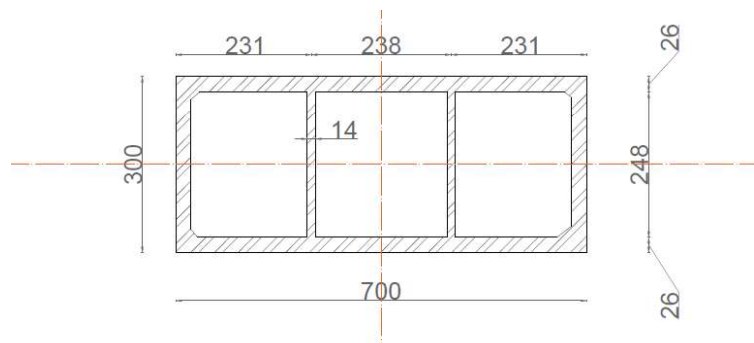
3.1. Poprečni presjeci

U zadanoj lučnoj konstrukciji razlikujemo 3 tipa poprečnih presjeka.

Oznakom R1 označeni je ukupno 28 štapova lučnog svoda koji su sandučastog poprečnog presjeka sa 3 komore (slika 6). Visina betonskog presjeka mijenja se duž luka no u sljedećem proračunu uzeta je fiksna vrijednost od 3m. Debljina donje i gornje ploče sandučastog presjeka mijenja se 0,40m uz petu do 0,18m u tjemenu te je u ovom proračunu uzet prosjek od 0,26m zbog pojednostavljivanja proračuna. Debljina unutarnjih rebara je konstantna i iznosi 0,14m (slika 7).



Slika 6. Model mosta u Staadu sa zadanim karakterističnim presjekom luka



Slika 7. Pojednostavljeni poprečni presjek luka

Površina i aksijalni momenti tromosti računati su ručno, za ovaj i sljedeća dva navedena presjeka:

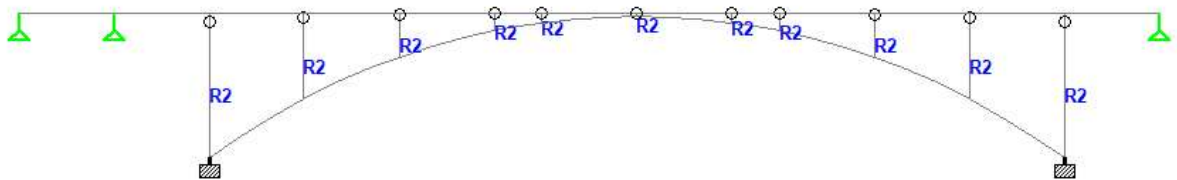
$$A = 56240 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 786928746,7 \text{ cm}^4$$

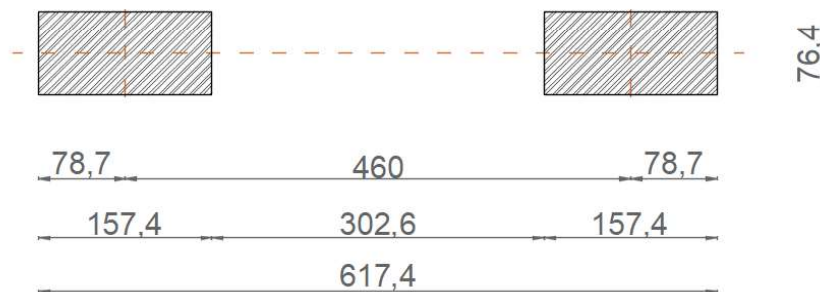
$$I_z = 305009305 \text{ cm}^4$$

Oznakom R2 označeni su štapovi koji su u stvarnosti par usporednih stupova na osnovom razmaku 4,6m promjenjivog oktogonalnog poprečnog presjeka (slika 8). U ovom modelu poprečni presjek pojednostavljen je na pravokutan oblik te je uzeta prosječna vrijednost dimenzija stupova (slika 9).

Stupovi su od tjemena na van postavljeni simetrično na obje strane, na jednakim rasterima.



Slika 8. Model mosta u Staadu sa zadanim karakterističnim presjekom stupišta



Slika 9. Pojednostavljeni poprečni presjek stupišta

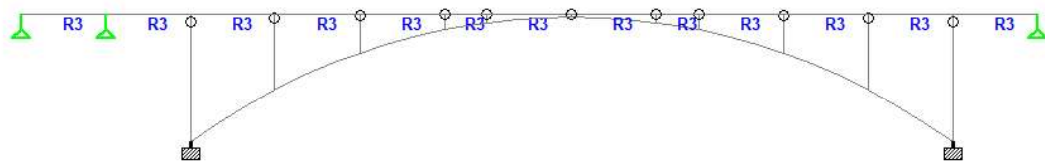
$$A = 24050,72 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 11698590,89 \text{ cm}^4$$

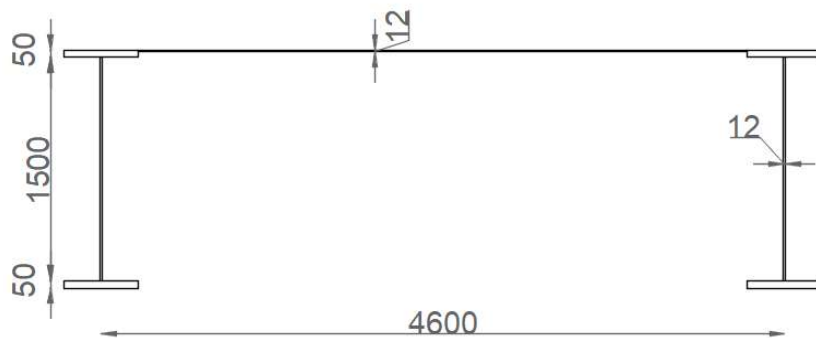
$$I_z = 1321937322 \text{ cm}^4$$

Oznakom R3 označeni su štapovi od kojih se sastoji čelična kolnička konstrukcija (slika 10). Poprečni presjek sastoji se od dva glavna punostjena nosača I-presjeka, konstantne visine od 1,5m. Glavni nosači međusobno su osno razmaknuti za 4,6m te se tako oslanjaju na jednako razmaknute stupove (slika 11).

Prikazana skica poprečnog presjeka također je pojednostavnjena zbog nedostatka informacija u geometriji presjeka, no takvom se dobiju zadovoljavajuće približne vrijednosti.



Slika 10. Model mosta u Staadu sa zadanim karakterističnim presjekom kolničke konstrukcije



Slika 11. Pojednostavljeni poprečni presjek kolničke konstrukcije

$$A = 136000 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 6,6833332 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$I_z = 7,21523764 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$$

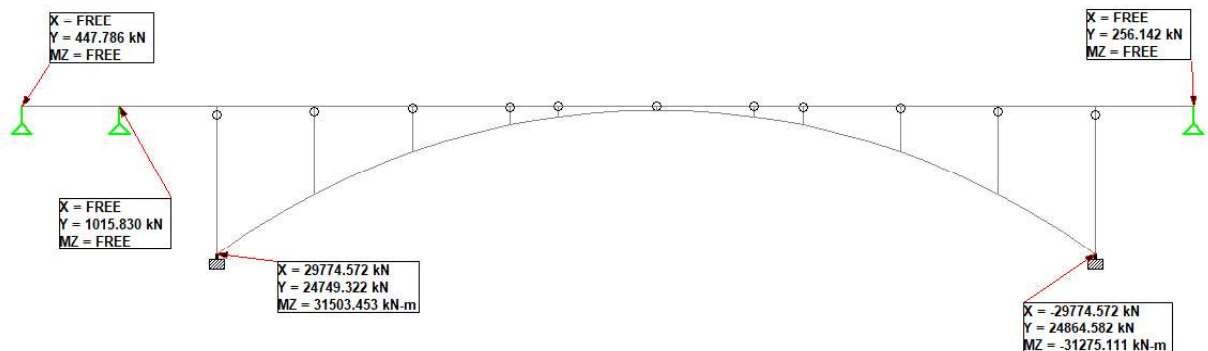
4. ANALIZA OPTEREĆENJA

4.1. Stalno opterećenje

U programu Staad.pro poligonalnom modelu potrebno je dodijeliti sve poprečne presjeke, dimenzije te materijale elemenata. Kako bi se proračunala mjerodavna vlastita težina lučne konstrukcije potrebno je još pribrojiti stalno opterećenje vlastitom težinom kolnika. Budući da se debljina kolničkog zastora mijenja u vrijednostima 16 – 24cm, u ovom proračunu je uzet prosjek od 20cm. Iz toga slijedi:

$$g_k = 24 \text{ kN/m}^3 * 0,2 \text{ m} * 7,6 \text{ m} = 36,48 \text{ kN/m}$$

Iznos stalnog opterećenja konstrukcije moguće je tada iščitati iz reakcija u osloncima (slika 12). Zbrajanjem svih vertikalnih reakcija u osloncima dobije se konačan iznos vlastite težine od 15333,66kN.



Slika 12. Reakcije u osloncima od stalnog opterećenja



Slika 13. Momenti savijanja u konstrukciji uslijed stalnog opterećenja

4.2. Opterećenje vjetrom

Budući da se u ovdje radi o ravninskom problemu, horizontalnu komponentu nije moguće prikazati. Stoga je proučavana okomita komponenta vjetra, pritiskajuća, na kolničku konstrukciju. Sukladno normama HRN EN 1991-1-4:2012 rezultanta djelovanja na konstrukciju proračunata je prema sljedećem izrazu (1):

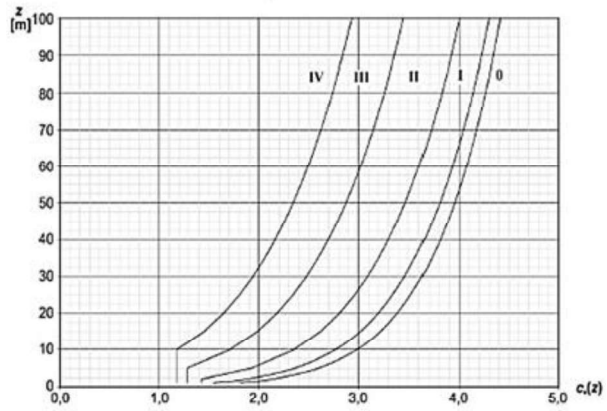
$$W_e = q_{p(z_e)} * C_{pe} \quad (1)$$

pri čemu je q_p komponenta pritiska od brzine vjetra, a C_{pe} koeficijent tlaka. Komponenta pritiska računata je po formuli (2):

$$q_{p(z_e)} = C_{e(z)} * q_b \quad (2)$$

pri čemu faktor izloženosti $C_{e(z)}$ očitavamo iz grafa na slici (slika 14).

| KATEGORIJA TERENA | | z_0 (m) | z_{min} (m) |
|-------------------|--|--------------|------------------|
| 0 | More ili priobalna područja izložena otvorenom moru | 0,003 | 1 |
| I | Jezera ili ravna i horizontalno položena područja sa zanemarivom vegetacijom i bez prepreka | 0,01 | 1 |
| II | Područja s niskom vegetacijom, npr. travom, i izoliranim preprekama (drveće, zgrade) s razmakom najmanje 20 visina prepreka | 0,05 | 2 |
| III | Područja sa stalnim pokrovom od vegetacije ili zgrada ili područja s izoliranim preprekama s razmakom najviše 20 visina prepreka (npr. sela, predgrađa, stalna šuma) | 0,3 | 5 |
| IV | Područja s najmanje 15 % površine pokrivene zgradama čija prosječna visina premašuje 15 m | 1,0 | 10 |



Slika 14. Odabir potrebne kategorije terena

Slika 15. Graf za očitavanje faktora izloženosti

Iz grafa je iščitana vrijednost: $C_{e(z)} = 3,75$. Tlak pri osnovnoj brzini q_b izvodi se iz formule (3):

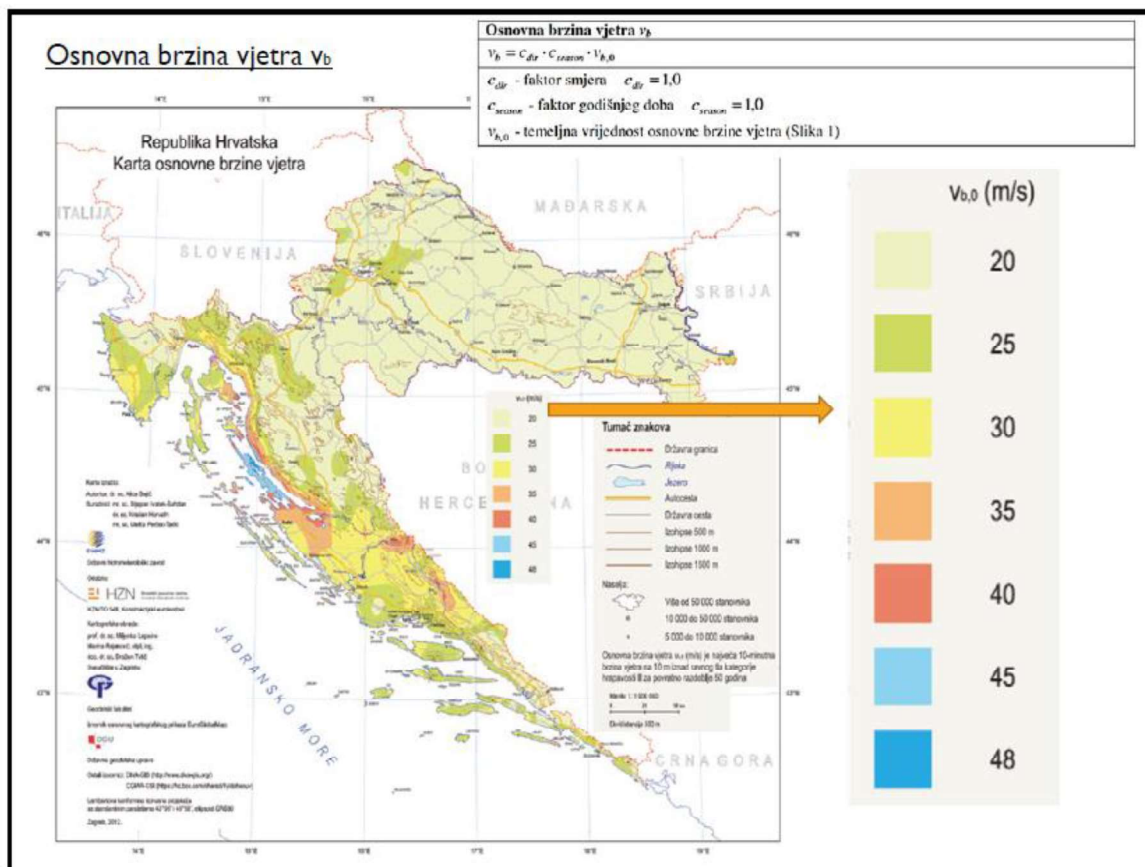
$$q_b = \rho/2 * v_b^2 \quad (3)$$

pri čemu u proračun uzimamo gustoću zraka prosječne vrijednosti $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, a osnovnu brzinu vjetra treba proračunati formulom (4):

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (4)$$

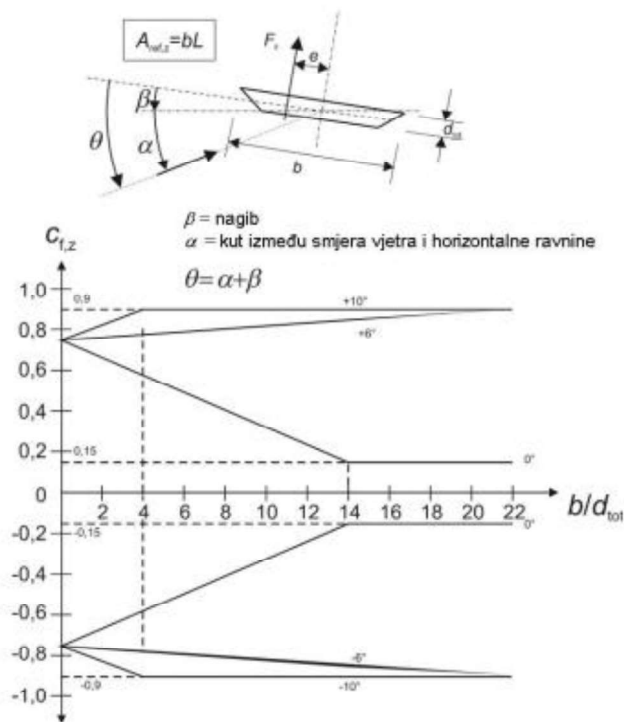
gdje faktori iznose: $c_{dir} = 1$ (faktor smjera); $c_{season} = 1$ (faktor godišnjeg doba)

Komponentu $v_{b,0}$ potrebno je iščitati sa karte (slika 15):



Slika 16. Karta osnovnih brzina vjetra u RH

Sa karte se iščitava vrijednost $v_{b,0} = 45 \text{ m/s}$. Potrebno je još odrediti koeficijent vanjskog pritiska na konstrukciju mosta te je to moguće iščitati iz grafa prema nacionalnom dodatku (slika 16):



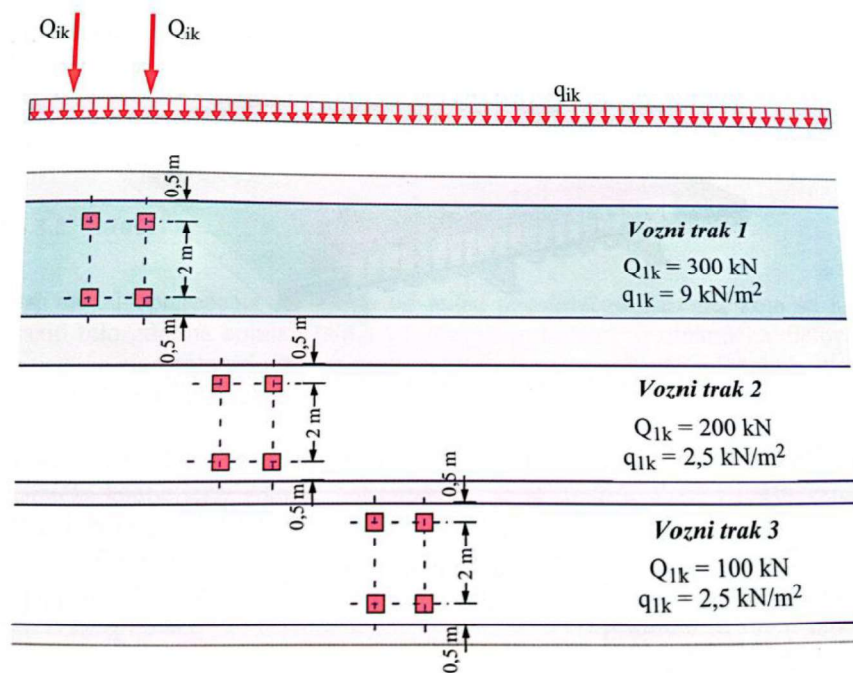
Slika 17. Graf za očitavanje koeficijenta pritiska na mostove

Prema tome, konačna vrijednost pritiska vjetra računa se kao $W_e = 4,763 \cdot 0,8 = 3,81$ kN/m² te kako bi se to svelo na ravninski problem potrebno je još pomnožiti sa ukupnom širinom kolničke konstrukcije od 10,5m. Rezultanta pritiska vjetra na kolnik tada iznosi 40,01 kN/m.

4.3. Prometno opterećenje

Opterećenje prometom na cestovne mostove proračunava se prema ENV 1991-3 pomoću predloženih modela opterećenja. U njemu su preporučeni proračuni za mostove s pojedinačnim rasponima manjim od 200m te širinama kolnika manjim od 42m. U ovom primjeru opisan je glavni model opterećenja, dvoosovinsko sa jednoliko raspodijeljenim po površini kolnika za djelovanja od teških i osobnih vozila. Za vertikalno opterećenje prometom uzimati će se maksimalno 3 trake širine 2,7 do 3m te ploha preostala do pune širine mosta (slika 17).

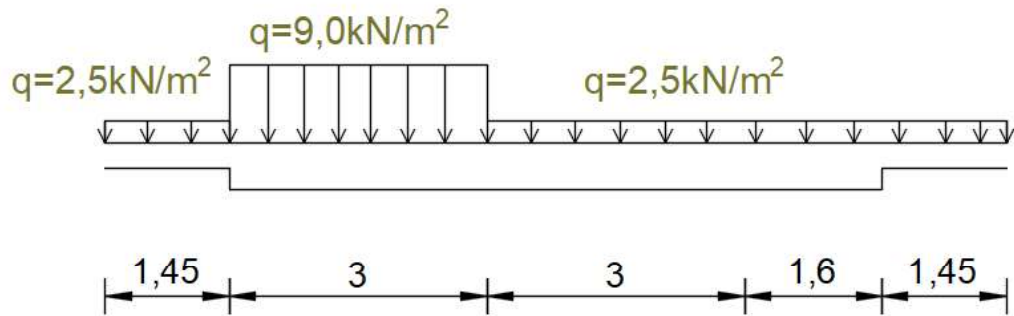
Potrebno je tada odrediti broj računskih vozni trakova na način da se širina kolnika podijeli sa 3, što je u ovom primjeru $n = 7,6/3 = 2,53$ te zaokruživanjem na prvi manji cijeli broj uvažava se informacija $n=2$. U svaki se vozni traka tada postavlja jedna dvoosovina u najnepovoljniji položaj. Svaki će vozni trak tada biti opterećen sa 4 kotača koja su duž osovine udaljena za 2m, a razmak među osovina biti će 1,2m. Gledano ravninski, dobiju se dvije koncentrirane sile na površini kolnika od kojih svaka iznosi 500kN na međusobnom razmaku od 1,2m te je njih potrebno smjestiti u karakteristične točke koje će predstavljati najnepovoljniji položaj. Iz tog razloga potrebno je provjeriti djelovanje tih sila njihovim premještanjem duž cijelog kolnika.



Slika 18. Model prometnog opterećenja

Jednoliko raspodijeljeno kontinuirano opterećenje uzrokovano prometom motornih vozila koje je svedeno na ravninski prikaz proračunato je zatim prema prikazanom modelu (slika 18):

$$q_{pr} = (1,45 \cdot 2 + 3 + 1,6) \cdot 2,5 + 3 \cdot 9 = 45,75 \text{ kN/m.}$$



Slika 19. Raspodjela prometnog opterećenja za odabrani model

5. KOMBINACIJE OPTEREĆENJA

Kako bi se proračunale najnepovoljnije okolnosti za konstrukciju mosta potrebno je dobivena opterećenja nanijeti istovremeno u različitim kombinacijama. Prema Eurocode normama, pri provjeri graničnog stanja nosivosti potrebno je stalno opterećenje vlastitom težinom te težinom kolnika pomnožiti sa parcijalnim faktorom iznosa 1,35, dok promjenjiva monožimo sa faktorom iznosa 1,5. Jednaka takva računica vodi se i pri provjeri graničnog stanja uporabljivosti, no tu se primjenjuje parcijalni faktor iznosa 1,0 za obje vrste opterećenja.

Kobiniranjem mjerodavnih najnepovoljnijih opterećenja potrebno je provjeriti ukupno 22 kombinacije, pri kojima istovremeno djeluju stalno, kontinuirano prometno te opterećenje vjetrom, a koncentrirane sile je potrebno postavljati u različite pozicije duž kolnika kako bi se provjerila najnepovoljnija. Provjeravane su sljedeće kobinacije opterećenja, gledano s Paga prema kopnu:

1.) $1,35 \cdot \text{stalno} + 1,5 \cdot \text{prometno} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{vjetar}$ → vozilo se nalazi nad 3. čvorom gornjeg
ustroja

2.) $1,35 \cdot \text{stalno} + 1,5 \cdot \text{prometno} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{vjetar}$ → vozilo se nalazi nad 3. poljem

3.) $1,35 \cdot \text{stalno} + 1,5 \cdot \text{prometno} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{vjetar}$ → vozilo se nalazi nad 4. čvorom

...

10.) $1,35 \cdot \text{stalno} + 1,5 \cdot \text{prometno} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{vjetar}$ → vozilo se nalazi nad 7. poljem

(slika 22)

11.) $1,35 \cdot \text{stalno} + 1,5 \cdot \text{prometno} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{vjetar}$ → vozilo se nalazi nad 8. čvorom

(slika 21)

12.) $1,0 \cdot \text{stalno} + 1,0 \cdot \text{prometno} + 1,0 \cdot \text{vjetar}$ → vozilo se nalazi nad 8. čvorom

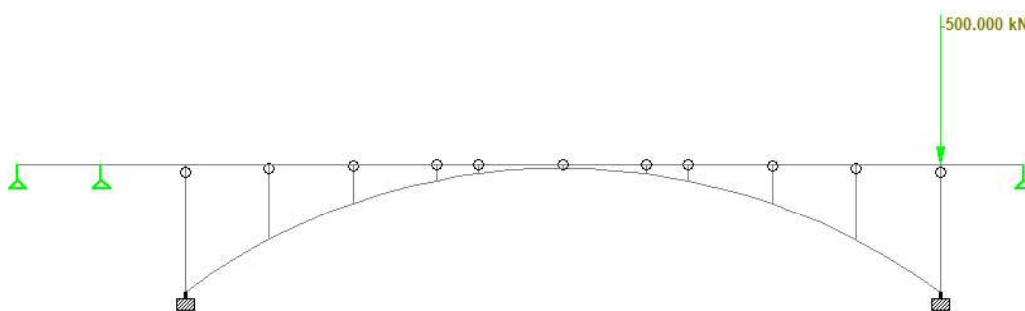
(kombinacija korištena pri računanju graničnog stanja uporabljivosti te maksimalnih deformacija)

...

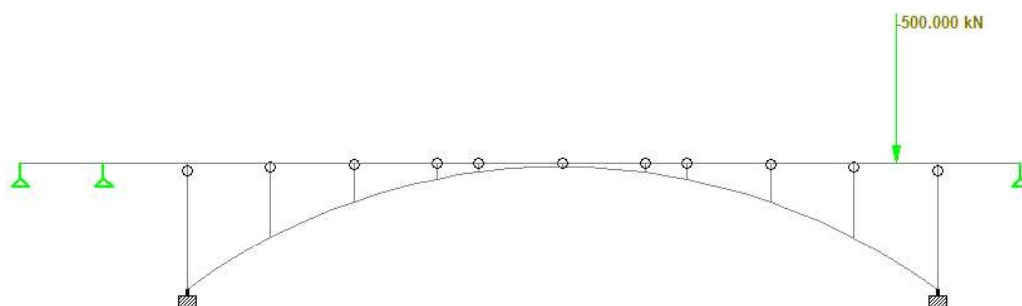
22.) $1,35 \cdot \text{stalno} + 1,5 \cdot \text{prometno} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{vjetar}$ → vozilo se nalazi nad 13. čvorom

(slika 19)

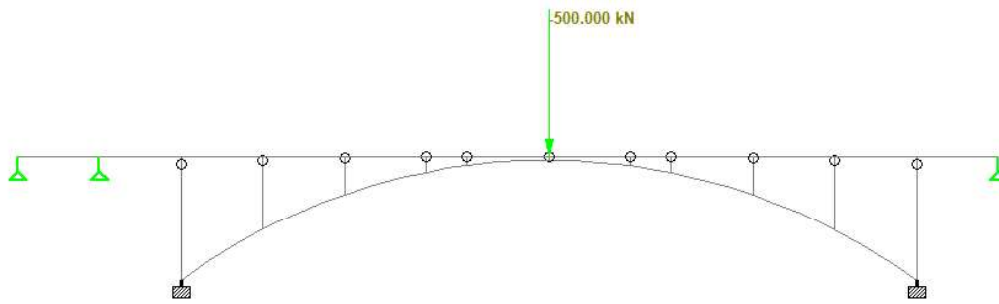
Budući da je udaljenost među dvjema osovina malena u usporedbi sa rasponom konstrukcije, na skici se doima da obje sile padaju u istu točku, no zapravo su udaljene međusobno za 1,2m. Na mjestu gdje je skicirana koncentrirana sila od 500kN ustvari djeluju dvije takve istovremeno, zato što svaka osovina teži 500kN. Na sljedećim skicama prikazane su karakteristične pozicije vozila koje će prouzročiti mjerodavne kombinacije:



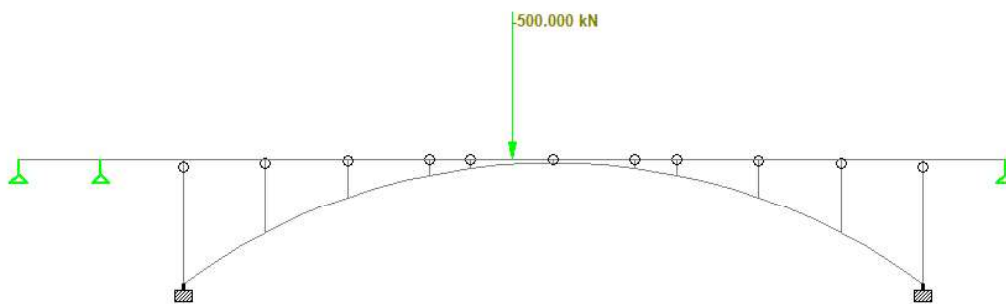
Slika 20. Vozilo se nalazi iznad 13. čvora



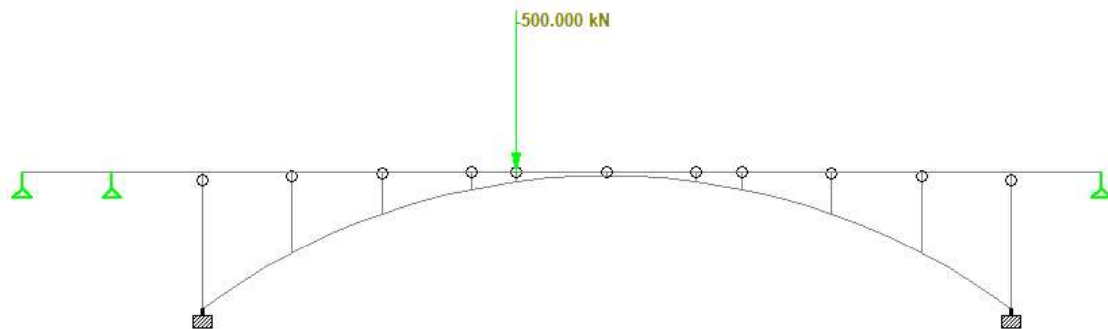
Slika 21. Vozilo se nalazi nad 12. poljem



Slika 22. Vozilo se nalazi nad čvorom broj 8



Slika 23. Vozilo se nalazi nad 7. poljem

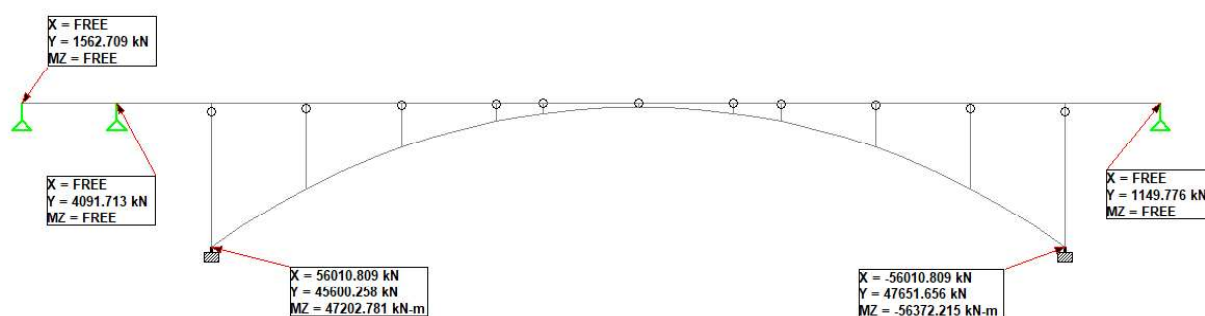


Slika 24. Vozilo nad 7. čvorom

6. ANALIZA REZULTATA

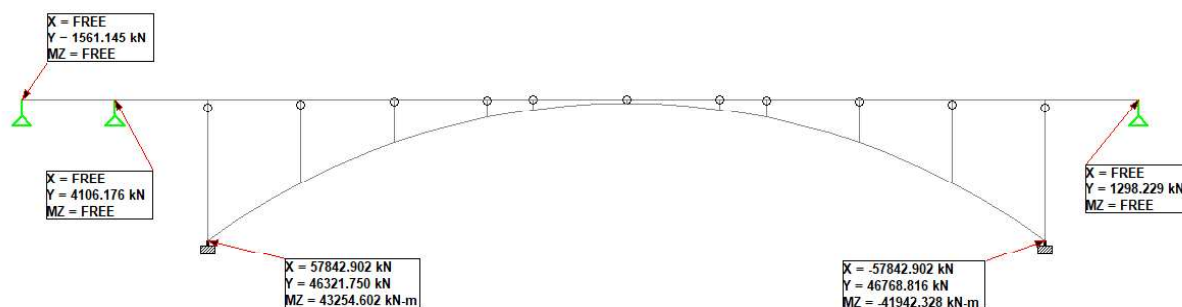
6.1. Reakcije u osloncima

Najveće vertikalne reakcije u osloncima se javljaju pri mjerodavnoj kombinaciji opterećenja broj 21 gdje se vozilo nalazi unutar prvog polja nad lukom, gledano s desna na lijevo (dvanaesto polje gledano s lijeva). Iznos maksimalne vertikalne reakcije je 47651,66kN. (slika 24)



Slika 25. Prikaz maksimalnih vertikalnih reakcija u osloncima

Najveće horizontalne reakcije u osloncima javljaju se pri položaju motornog vozila nad središnjim čvorom mosta, odnosno 8. po redu gledano s lijeva na desno, pri mjerodavnoj kombinaciji broj 11. Iznos horizontalnih reakcija je 57842,9kN. (slika 25)

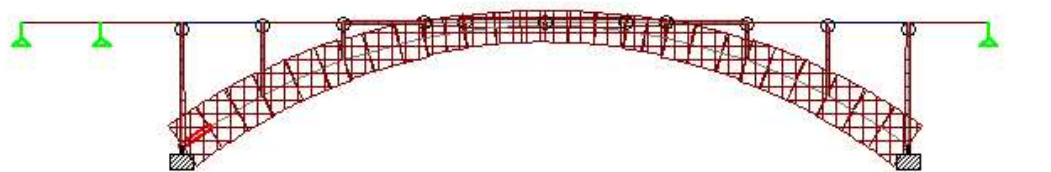


Slika 26. Prikaz maksimalnih horizontalnih reakcija u osloncima

6.2. Uzdužne sile

6.2.1. Uzdužne sile u luku

Maksimalne uzdužne sile javljaju se upravo u samom luku. Štapovi luka modela konstrukcije opterećeni su tlačno, a najveća sila javlja se pri osloncu. Postavljanjem vozila na sredinu 12. Polja, odnosno mjerodavnom kombinacijom broj 10 uzdužne sile dosežu najveće vrijednosti. Maksimalna izmjerena vrijednost javlja se u prvom štapu luka i iznosi 70379,27kN. (slika 26)



| | Beam | L/C | Node | Fx kN | Fy kN | Fz kN | Mx kN-m | My kN-m |
|--------|------|-------------|------|-----------|-----------|----------|------------|------------|
| Max Fx | 1 | 110 KOMBINA | 1 | 70379.273 | -704.100 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Min Fx | 31 | 106 KOMBINA | 32 | -425.606 | 2012.833 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Max Fy | 51 | 114 KOMBINA | 39 | 2998.115 | 6406.458 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Min Fy | 45 | 109 KOMBINA | 35 | 2914.160 | -6406.321 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Max Fz | 1 | 1 STALNO OF | 1 | 36819.254 | 462.687 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Slika 27. Maksimalne uzdužne sile u luku

6.2.2. Uzdužne sile u stupovima

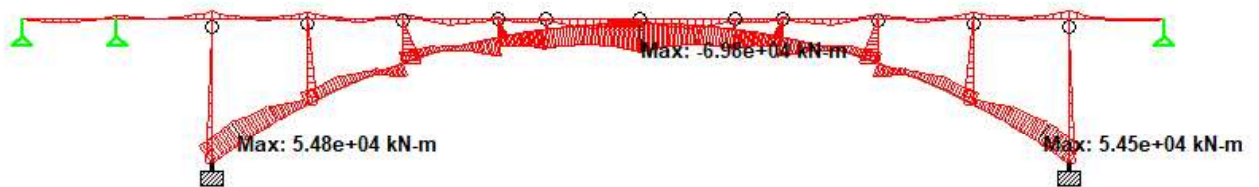
Stupišta konstrukcije također su opterećena tlačno. Postavljanjem vozila točno nad zadnjim desnim stupom očitavaju se najveći iznosi iz dijagrama. Mjerodavna kombinacija za ovaj primjer navedena je pod brojem 22, a sila u stupu tada iznosi 8804,95kN.

6.2.3. Uzdužne sile u kolničkoj konstrukciji

Pomicanjem vozila po kolničkoj konstrukciji tlačne sile rastu što je vozilo bliže tjemenu mosta. Kombinacijom broj 9 vozilo je postavljeno u čvoru broj 7 te se najveći iznos pojavljuje u gredi s lijeve strane tjemena i iznosi 12983,2kN.

6.3. Momenti savijanja

Kod savijanja, najnepovoljnije djelovanje prouzrokovati će vozilo smješteno nad 8. čvorom (kombinacija opterećenja broj 11). Najveći momenti savijanja javljaju se u samom tjemenu luka (u štapu luka broj 14), što je ovdje prikazano anvelopom koja objedinjuje sve momentne dijagrame mjerodavnih kombinacija opterećenja. Takva koncentracija momenata će javljati radi velike krutosti čeličnog elementa, no u stvarnom primjeru most na tom dijelu ima ojačanje betonskom krunom koja te momente bitno smanjuje. U ovom radu sigurnost konstrukcije dodatno će se dokazati provjerom maksimalnih progiba. Maksimalni moment savijanja u štapu luka pored tjemena iznosi 69791,54kNm. (slika 27)



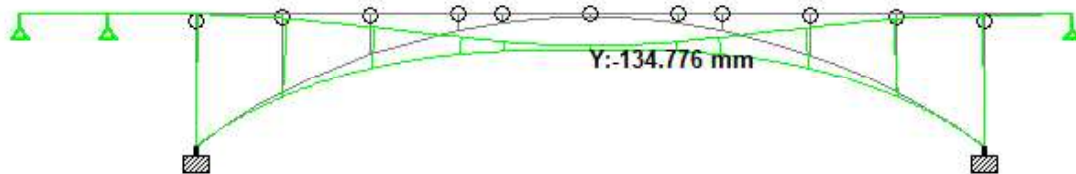
Baricevic_zavrzni_rad - Beam End Forces:

| Beam | Node | Env | Fx kN | Fy kN | Fz kN | Mx kN-m | My kN-m | Mz kN-m |
|------|------|-----|------------|------------|----------|------------|------------|------------|
| 14 | 15 | +ve | 45300.641 | 1690.504 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 |
| | | | 114 KOMBIN | 113 KOMBIN | - | - | - | - |
| | | -ve | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -69791.54 |
| | | | - | - | - | - | - | 111 KOMBIN |
| 15 | 15 | +ve | 45306.344 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 |
| | | | 109 KOMBIN | - | - | - | - | - |

Slika 28. Anvelopa momenata savijanja

6.4. Progibi i deformacije

Mjerodavnom kombinacijom broj 12, u kojoj su komponente opterećenja množene sa parcijalnim faktorima prikladnim za proračun graničnih stanja uporabljivosti, postiže se najveća deformacija rešetke. U toj kombinaciji vozilo se nalazi nad tjemnom konstrukcije (nad 8. čvorom) te se tako stvara progib od 13,5cm (slika 28). Potrebno je da taj iznos zadovoljava uvjet propisan pravilnikom koji glasi: $W_{\max} < L/250$. U ovom slučaju vrijednost $L=279,6 - 3*23,3= 209,7\text{m}$ uzeta je bez raspona koji sežu izvan lučne konstrukcije (dva lijevo i jedan desno), jer će se progib odvijati između 2 susjedna oslonca. Uvjet je time zadovoljen: $W_{\max} = 0,13\text{m} < 209,7/250 = 0,84\text{m}$. Skica je prikazana sa progibom pretjeranih dimenzija kako bi se bolje dočarao pomak.



Slika 29. Maksimalne deformacije rešetke

7. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad koncipiran je na temelju statičke analize pojednostavljenog modela Paškog mosta. Normiranim proračunima dobivene su vrijednosti reakcija u osloncima, maksimalne uzdužne sile u pojedinim elementima konstrukcije, maksimalni momenti savijanja te maksimalne deformacije mosta u vertikalnom smjeru. Uz svaki proračun priložena je skica, opis skice te opis potrebnog postupka.

Glavno i stalno opterećenje mosta njegova je vlastita težina. Prometno opterećenje proračunato je prema predlošku normiranih modela, a djelovanje vjetra svedeno je na pritisak po kolniku kako bi se dobile mjerodavne kombinacije. Djelovanje snijega je isključeno iz proračuna jer nije moguće istovremeno djelovanje snijega i jakih naleta vjetra pa je iz tog razloga odabrano djelovanje vjetra kao mjerodavno, budući da svakako vjetar stvara veća opterećenja, zbog geografskog položaja.

Sve tlačne sile preuzima donji ustroj mosta te ih prenosi u temelje. Na kraju rada dokazano je da se deformacija rešetke nalazi unutar dozvoljenih vrijednosti. Mjere štapnog modela mosta mjestimice su približno procjenjene, no iz njega se mogu zaključiti sve karakteristične značajke stvarnog statičkog sustava mosta.

8. POPIS SLIKA

| | |
|---|---|
| Slika 1. Pogled na Paški most | 1 |
| (https://www.novalja-bok.com/hr/7/novalja_pag.html) | |
| Slika 2. Nacrt mosta | 2 |
| (nacrt preuzet iz arhiva Hrvatskih autocesta) | |
| Slika 3. Poprečni presjek lučne konstrukcije | 3 |
| (preuzeto iz knjige Šram, S.: <i>Gradnja mostova</i> , Zagreb 2002.) | |
| Slika 4. Poprečni presjek kolničke konstrukcije | 3 |
| (preuzeto iz arhiva Hrvatskih autocesta) | |
| Slika 5. Model mosta prikazan štapovima | 4 |
| (skica izvedena u programu <i>Autocad</i>) | |
| Slika 6. Model mosta u Staadu sa zadanim karakterističnim presjekom luka | 5 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 7. Pojednostavljeni poprečni presjek luka | 5 |
| (skica izvedena u programu <i>Autocad</i>) | |
| Slika 8. Model mosta u Staadu sa zadanim karakterističnim presjekom stupišta | 6 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 9. Pojednostavljeni poprečni presjek stupišta | 6 |
| (skica izvedena u programu <i>Autocad</i>) | |
| Slika 10. Model mosta u Staadu sa zadanim karakterističnim presjekom kolničke konstrukcije | 7 |

(skica izvedena u programu *Staad.pro*)

Slika 11. Pojednostavljeni poprečni presjek kolničke konstrukcije..... 7

(skica izvedena u programu *Autocad*)

Slika 12. Reakcije u osloncima od stalnog opterećenja..... 8

(skica izvedena u programu *Staad.pro*)

Slika 13. Dijagram momenata savijanja uslijed stalnog opterećenja.....9

(skica izvedena u programu *Staad.pro*)

Slika 14. Odabir potrebne kategorije terena 10

(preuzeto sa prezentacije *Analiza djelovanja na konstrukciju iz kolegija Osnove čeličnih konstrukcija*)

Slika 15. Graf za očitavanje faktora izloženosti 10

(preuzeto sa prezentacije *Analiza djelovanja na konstrukciju iz kolegija Osnove čeličnih konstrukcija*)

Slika 16. Karta osnovnih brzina vjetra u RH..... 11

(preuzeto sa prezentacije *Analiza djelovanja na konstrukciju iz kolegija Osnove čeličnih konstrukcija*)

Slika 17. Graf za očitavanje koeficijenta pritiska na mostove 12

(https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/HRN_EN_1991-1-4_2012.pdf)

Slika 18. Model prometnog opterećenja 13

(preuzeto iz knjige *Čelični i spregnuti mostovi*, Zagreb 2006.)

Slika 19. Raspodjela prometnog opterećenja za odabrani model..... 14

(skica izvedena u programu *Autocad*)

Slika 20. Vozilo se nalazi iznad 13. čvora..... 16

(skica izvedena u programu *Staad.pro*)

| | |
|---|----|
| Slika 21. Vozilo se nalazi nad 12. poljem | 16 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 22. Vozilo se nalazi nad čvorom broj 8 | 17 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 23. Vozilo se nalazi nad 7. poljem..... | 17 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 24. Vozilo nad 7. čvorom..... | 17 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 25. Prikaz maksimalnih vertikalnih reakcija u osloncima | 18 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 26. Prikaz maksimalnih horizontalnih reakcija u osloncima | 18 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 27. Maksimalne uzdužne sile u luku..... | 19 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 28. Anvelopa momenata savijanja..... | 20 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |
| Slika 29. Maksimalne deformacije rešetke..... | 21 |
| (skica izvedena u programu <i>Staad.pro</i>) | |

9. LITERATURA

- (1) Palčić, I. (2008.). *Paški most - izgradnja, obrana, obnova*. Rijeka: adamić.
- (2) Androić, B., Čaušević, M., Dujmović, D., Džeba, I., Markulak, D., & Peroš, B. (2006.). *Čelični i spregnuti mostovi*. Zagreb: IA Projektiranje.
- (3) *HRN EN 1991-1-4*. (n.d.). Dohvaćeno iz Repozitorij Unizg:
https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/HRN_EN_1991-1-4_2012.pdf
- (4) *Analiza djelovanja na konstrukciju*. (n.d.). Dohvaćeno iz Moodle.srce.hr:
<https://moodle.srce.hr/2022-2023/mod/folder/view.php?id=2784005>
- (5) Radić, J. (2007.). *Masivni mostovi*. Zagreb: Andris.
- (6) *Sanacija Paškog mosta*. (n.d.). Dohvaćeno iz Hrvatska komora inženjera građevinstva:
https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2020/prezentacije/Odr%9Eavanje%20gra%F0evina/Sanacija%20Pa%9Akog%20mosta.pdf
- (7) Šram, S. (2002.). *Gradnja mostova*. Zagreb: Golden marketing.