

**OPTIMALIZACIJA PROJEKTNIH RJEŠENJA GLAVNIH VEZAČA
TIPA “A” KOD PREDNAPREGNUTIH BETONSKIH MONTAŽNIH
HALA SA ASPEKTA UPOTREBLJIVOSTI I TRAJNOSTI PREMA EC 2**

**OPTIMIZATION OF DESIGN SOLUTIONS OF MAIN GIRDERS OF
“TYPE A” FOR THE PREFABRICATED PRESTRESSED CONCRETE
INDUSTRIAL HALLS FOR SERVICEABILITY AND DURABILITY
ACCORDING TO EC 2**

**Husein Okugić, magistar građevinarstva
Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet
Dr. Irfana Ljubijankića bb, 77000 Bihać, BiH**

**Doc. dr. Sanin Džidić, dipl. ing. građ.
Internacionalni Burch Univerzitet Sarajevo
Ul. Francuske revolucije b.b. Ilidža, Sarajevo, BiH**

Ključne riječi: granično stanje upotrebe, napon, pukotina, progib, prednapregnuti nosač

REZIME

Predmet istraživanja su naponi u betonu, te naponi u armaturnom i prednapregnutom čeliku, pukotine i progibi betonskih prednapregnutih A krovnih nosača u cilju optimaliziranja raspona ovakvih nosača za istu količinu kablova za prednaprezanje i armaturnog čelika. Granično stanje upotrebljivosti (GSU) je stanje u kojem konstrukcija prestaje da zadovoljava određene eksploatacione zahtjeve (progib, širina pukotine). Veliki progibi mogu ugroziti funkcionalnost i izgled konstrukcije. Širine pukotina koje su veće od dopuštenih mogu izazvati propadanje konstrukcije (korozija čelika, propuštanje tekućine ili plina). Da bi montažne hale bile sigurne, progibi i pukotine moraju biti u dozvoljenim granicama tokom upotrebnog vijeka konstrukcije.

Key Words: serviceability limit state, stress, crack, deflection, prestressed girder

SUMMARY

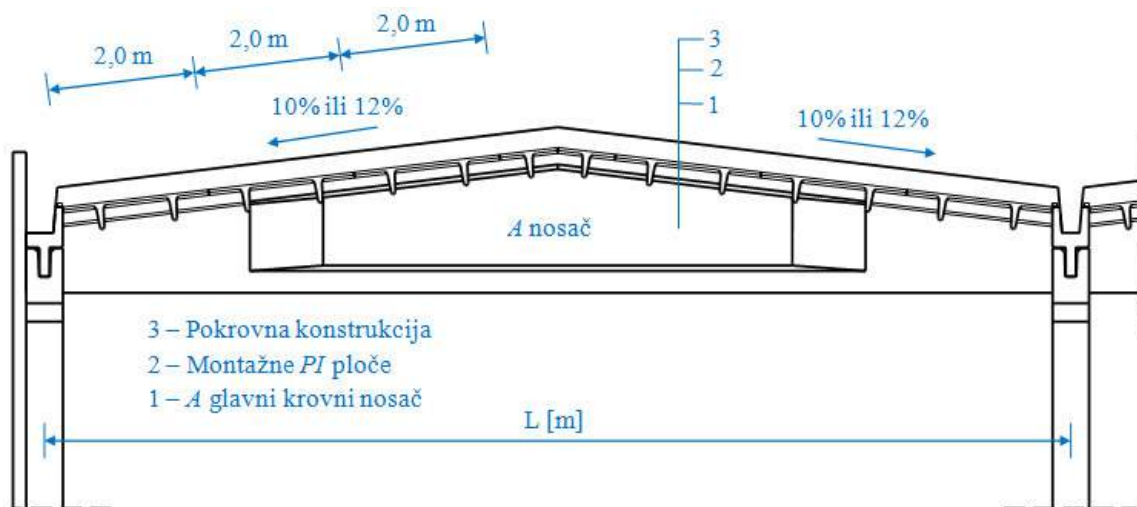
Research focus of this paper are stresses in concrete, reinforcement and tendons, cracks and deflections of the prestressed girders of “Type A” in order to optimize the span of such girder for the same amount of tendons and reinforcing steel. Serviceability Limit State (SLS) is a condition in which construction ceases to meet the specific requirements of serviceability (deflection, crack width). The large deflections can compromise the functionality and appearance of the structure. Crack widths that are larger than permitted can cause deterioration of the structure (steel corrosion, leakage of liquid or gas). Deflections and cracks must be within acceptable limits during the service life of the industrial halls for their safety and durability.

1. UVOD

Prednapregnute betonske montažne hale danas predstavljaju najveći stepen industrijalizacije građenja. Betonske montažne hale se sastoje ne samo od klasično armiranih betonskih elemenata, već i od prednapregnutih, kojima se omogućava savladavanje velikih raspona. U tom smislu, prednapregnuti glavni nosači "Tipa A" predstavljaju jedno od rješenja. Ovi elementi se proizvode i koriste za potrebe izgradnje montažnih konstrukcija kao što su: industrijske hale, skladišni objekti, tržni centri, te poljoprivredni i sportski objekti. Nosači „Tipa A“ se izrađuju sa različitim rasponima, sa dvostrešnim nagibom krovnih ploha od 10 % ili 12 % što zavisi od raspona. Predmet istraživanja ovog rada je praćenje ponašanja krovnog nosača sa aspekta upotrebljivosti i trajnosti uz varijaciju raspona elemenata, odnosno naponi u betonu i čeliku (za armiranje i prednaprezanje), pukotine i progibi za svaki pojedini izabrani raspon krovnog nosača „Tipa A“.

2. KONSTRUKTIVNI DETALJI

Ovaj tip nosača je proračunat kao sastavni element montažne hale za šest nosača različitih raspona i to: $A_1 = 14$ m, $A_2 = 18$ m, $A_3 = 22$ m, $A_4 = 27$ m, $A_5 = 32$ m, $A_6 = 35$ m. Proračun svakog nosača se vrši za sredinu raspona ($L/2$). Svaki nosač sadrži maksimalnu količinu prednapregnute armature koju je moguće ugraditi u presjek, uz poštivanje preporučenih razmaka između samih kablova. Nosač sadrži 21 kabl za prednaprezanje sa ukupnom površinom od $A_p = 29,4$ cm², te 6 armaturnih šipki presjeka 16 mm sa ukupnom površinom od $A_s = 12,06$ cm². Istraživanje će se provoditi proračunom nosača prema EC2. U obzir se uzimaju sva dejstva koja djeluju na pojedini nosač. Analizirana je montažna hala kod koje je međusobni raster A nosača $R = 8$ m.



Slika 1. Montažna hala sa A krovnim nosačem

Nosači se proračunavaju kao proste grede sa zglobnom vezom sa stubom. U proračunu su usvojene relativno male dimenzije poprečnog presjeka oba nosača, čime sami elementi imaju malu vlastitu težinu. Shodno napomenutom, nosač se proračunava za:

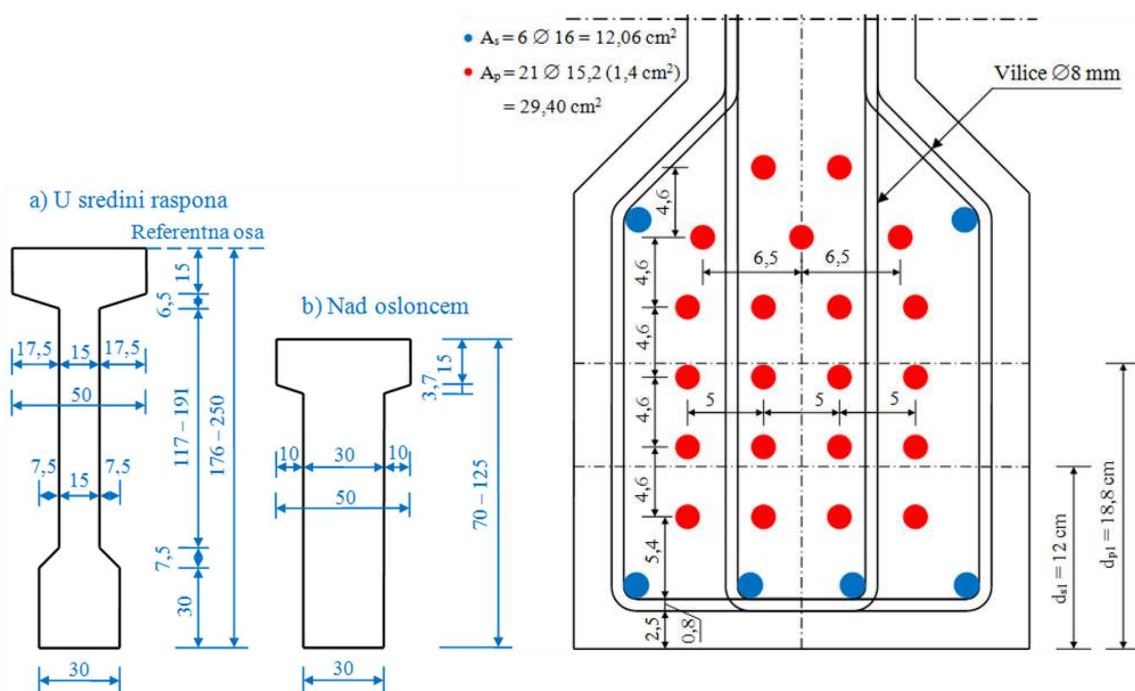
1. Stalno dejstvo:

- Vlastita težina A nosača: $g_{k,1} = 10,00$ kN/m'
- PI montažne ploče: $g_{k,2} = 1,87$ kN/m² \times 8 m = 14,96 kN/m'
- Pokrovna konstrukcija: $g_{k,3} = 0,36$ kN/m² \times 8 m = 2,88 kN/m'
- Ukupno stalno dejstvo:** $g = 27.84$ kN/m' \approx **28.00 kN/m'**

2. Promjenljivo dejstvo:

- Snijeg: $q_{k,1} = 1,20 \text{ kN/m}^2 \times 8 \text{ m} = 9,60 \text{ kN/m}'$
- Upotrebno dejstvo: $q_{k,2} = 0,4 \text{ kN/m}^2 \times 8 \text{ m} = 3,20 \text{ kN/m}'$

Klasa čvrstoće betona za izradu A nosača je $C 45/55$. Čvrstoća na zatezanje za $C 45/55$ je $f_{ctm} = 3,8 \text{ N/mm}^2$, a modul elastičnosti je $E_{cm} = 36000 \text{ N/mm}^2$. Armaturni čelik je tipa $B 500 B$ sa karakterističnom granicom popuštanja od $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ i modulom elastičnosti od $E_s = 205000 \text{ N/mm}^2$. Kablovi za prednaprezanje glavnih krovnih nosača su tipa Dywidag 1670/1860 ($f_{p0,1k} / f_{pk} \rightarrow \text{N/mm}^2$), gdje je $f_{p0,1k}$ naprezanje pri 0,1% zaostaloj deformaciji, a f_{pk} je karakteristična čvrstoća na zatezanje. Modul elastičnosti je $E_p = 195000 \text{ N/mm}^2$. Jedan kabl se sastoji od 7 žica. Promjer jednog kabla je $\varnothing = 15,24 \text{ mm}$, a površina kabla je $A_p = 140 \text{ mm}^2$. Maksimalna vrijednost sile kojom se zatežu kablovi neposredno nakon prednaprezanja ne smije prekoračiti vrijednost $\sigma_{p,max} = 0,8 \times f_{pk} = 1488 \text{ N/mm}^2$. Dimenzije poprečnog presjeka A nosača sa količinom i rasporedom armaturnog čelika i kablova za prednaprezanje su dati na narednoj slici.



Slika 2. Dimenzije poprečnog presjeka A nosača sa količinom i rasporedom armaturnog čelika i kablova za prednaprezanje

Težište armaturnog čelika od donje ivice presjeka je $d_{s1} = 12 \text{ cm}$, dok su kablovi za prednaprezanje postavljeni tako da njihovo težište od donje ivice nosača bude $d_{p1} = 18,80 \text{ cm}$. Ostali podaci potrebni za proračun i analizu krovnih nosača prema EC2 su:

- Pokrovni sloj betona za armaturni čelik: $C_{nom} = 25 \text{ mm}$;
- Pokrovni sloj betona za čelik za prednaprezanje: $C_{nom} = 30 \text{ mm}$;
- Osovinski razmak šipki armaturnog čelika: $U_s = 40 \text{ mm}$;
- Osovinski horizontalni razmak kablova za prednaprezanje: $U_{p,h} = 50 \text{ mm}$;
- Osovinski vertikalni razmak kablova za prednaprezanje: $U_{p,v} = 46 \text{ mm}$.

3. KRITERIJI (USLOVI) OPTIMALNOSTI SA ASPEKTA UPOTREBLJIVOSTI I TRAJNOSTI PREMA EC 2

Granično stanje upotrebljivosti je stanje elementa ili konstrukcije pri kojem je, pod utjecajem najnepovoljnijih dejstava u toku eksploatacije, dostignut neki od konvencionalno utvrđenih kriterija koji uslovljava normalno korištenje i ponašanje konstrukcije u toku eksploatacije. U graničnom stanju upotrebljivosti razmatraju se sljedeće kombinacije djelovanja:

- *Rijetka kombinacija* – Uzima u obzir smanjenu vjerovatnost istovremenog djelovanja više promjenljivih nezavisnih opterećenja sa njihovom najnepovoljnijom vrijednošću. Ova kombinacija je vrlo rijetka, a tokom životnog vijeka konstrukcije događa se jednom ili nijednom;
- *Česta kombinacija* – Može se koristiti za provjeru graničnog stanja nosivosti uzimajući u obzir izvanredna djelovanja i za povratna granična stanja upotrebljivosti. Ova kombinacija se događa npr. jedanput godišnje;
- *Kvazistalna kombinacija* – Može se koristiti za provjeru povratnog graničnog stanja upotrebljivosti. Ovakva se kombinacija javlja npr. jednom sedmično. U ovom radu kvazistalna kombinacija predstavlja ukupno stalno opterećenje jer se radi o krovnim nosačima.

Kriteriji optimalnosti prema EC 2 su sljedeći:

1) Faza transporta nosača:

- a) Naprezanje betona na gornjem rubu presjeka – Ovaj napon se ograničava na vrijednost:
 $\sigma_{cg} \leq f_{ctm} = 3,80 \text{ N/mm}^2$;
- b) Naprezanje betona na donjem rubu – Ograničava se na vrijednost:
 $\sigma_{cd} \leq 0,6 \times f_{ck} = 0,6 \times 45 = -27 \text{ N/mm}^2$.

2) Karakteristična (rijetka) kombinacija djelovanja:

- a) Provjera raspucalosti presjeka (naprezanje betona u donjoj zoni) – Neraspucali su oni presjeci u kojima za rijetku kombinaciju opterećenja nije prekoračena srednja vrijednost čvrstoće betona na zatezanje, a koja iznosi: $\sigma_{cd} \leq f_{ctm} = 3,80 \text{ N/mm}^2$. Ova vrijednost može biti prekoračena, ali tada uslov pod e) mora biti zadovoljen;
- b) Naprezanje u čeliku za armiranje – Naprezanje u čeličnoj armaturi pri rijetkoj kombinaciji ograničava se na vrijednost: $\sigma_s = 0,8 \times f_{yk} = 0,8 \times 500 = 400 \text{ N/mm}^2$;
- c) Dokaz napona pritiska u betonu (naprezanje betona na gornjoj zoni) – Naprezanje u betonu pri rijetkoj kombinaciji treba biti u granici: $\sigma_{cg} = 0,6 \times f_{ck} = 0,6 \times 45 = -27 \text{ N/mm}^2$;
- d) Naprezanje u čeliku za prednaprezanje – Naprezanje u čeliku za prednaprezanje mora biti ograničeno na vrijednost: $\sigma_p = 0,75 \times f_{pk} = 0,75 \times 1860 = 1395 \text{ N/mm}^2$;
- e) Dokaz širine pukotine – Za odabranu klasu izloženosti XC3 dopuštena širina pukotine pod rijetkom kombinacijom treba biti: $W_k \leq W_g = 0,2 \text{ mm}$.

3) Česta kombinacija djelovanja:

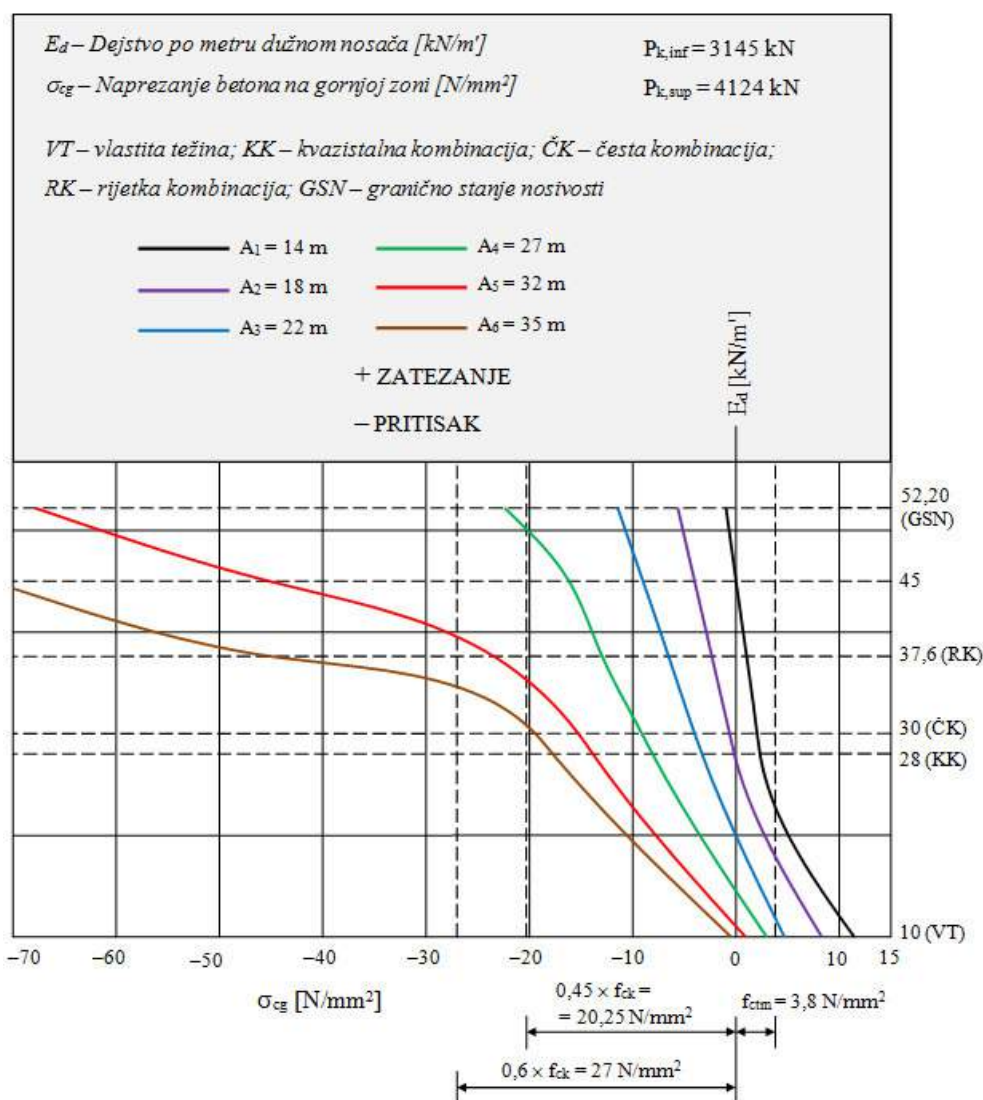
- a) Dokaz dekompresije (napon na donjoj zoni presjeka približno jednak nuli) – Za klasu izloženosti XC3, dokaz dekompresije se provodi za čestu kombinaciju djelovanja.

4) Kvazistalna kombinacija djelovanja:

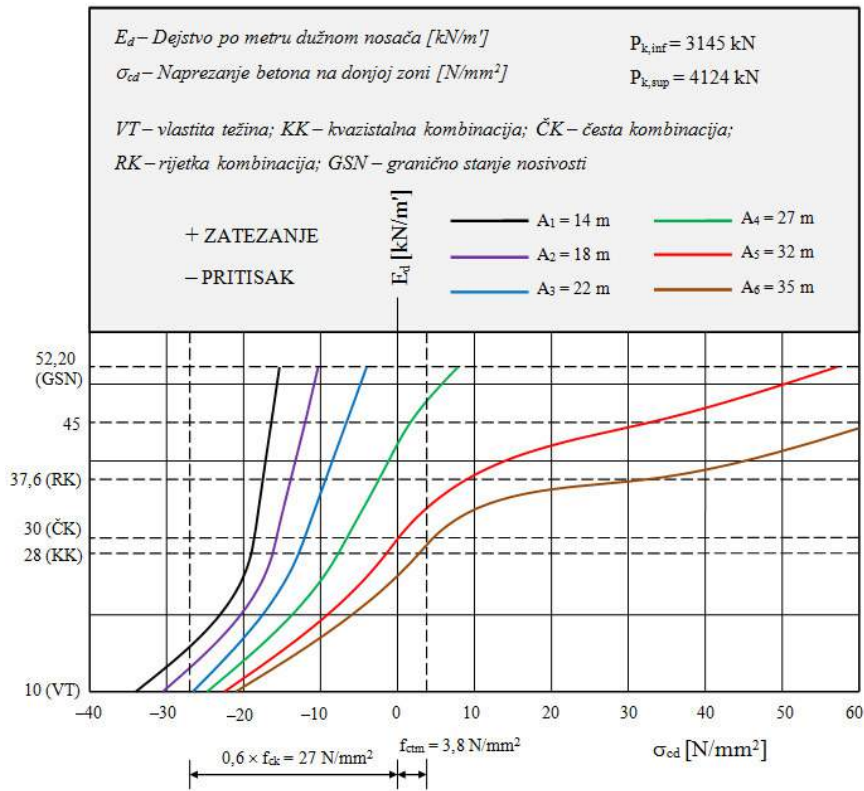
- a) Dokaz napona pritiska u betonu – Za kvazistalnu kombinaciju opterećenja napon pritiska u betonu ne smije prijeći vrijednost: $\sigma_{cg} \leq 0,45 \times f_{ck} = 0,45 \times 45 = -20,25 \text{ N/mm}^2$;
- b) Dokaz deformacija (progib) – Pod kvazistalnom kombinacijom djelovanja, progib mora biti u granici: $\delta_{\max} \leq L / 250$ (raspon / 250).

4. REZULTATI PRORAČUNSKE ANALIZE

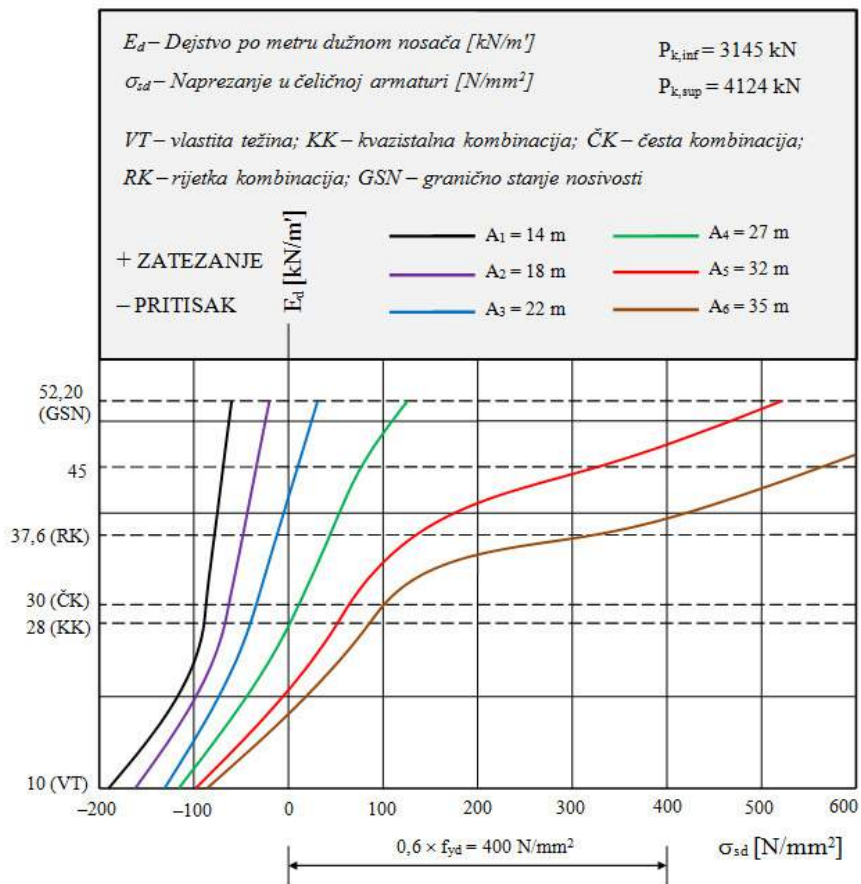
Na osnovu izvršenih proračunskih analiza i usporedbe proračunatih krovnih nosača, izrađeni su dijagrami rezultata proračuna. Kriteriji optimalnosti su proračunati za svaki raspon nosača „Tipa A“ posebno. Na narednim slikama daju se rezultati proračuna.



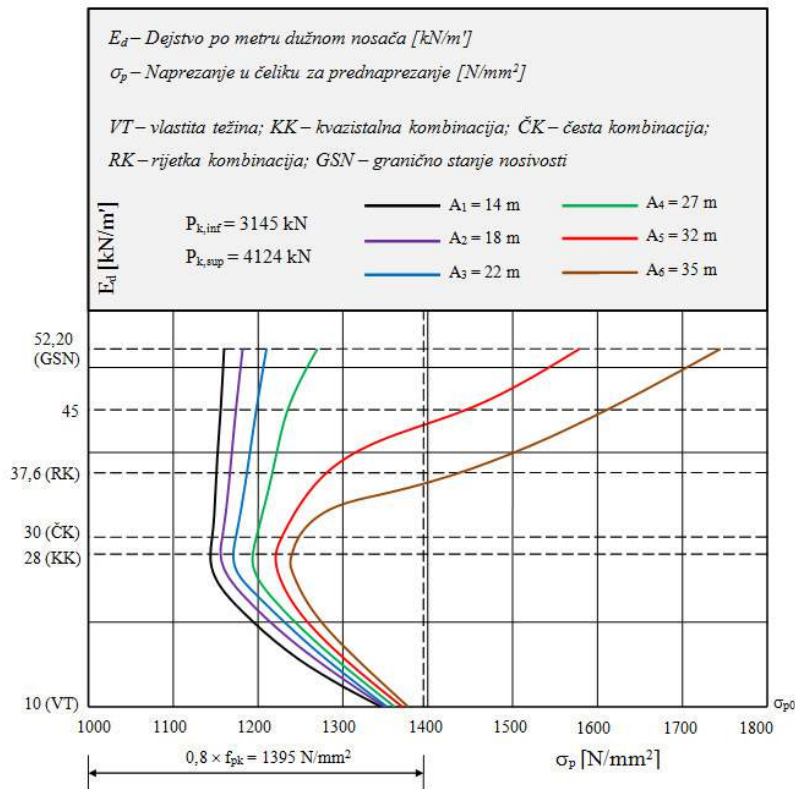
Slika 3. Dijagram naprezanja betona na gornjoj zoni u sredini raspona



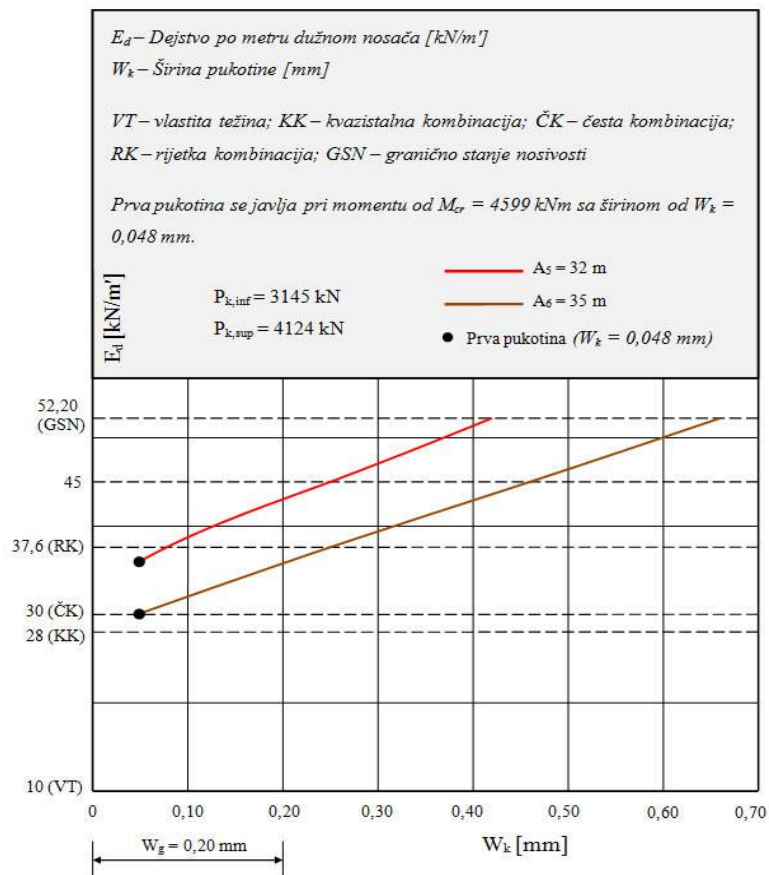
Slika 4. Dijagram naprezanja betona na donjoj zoni u sredini raspona



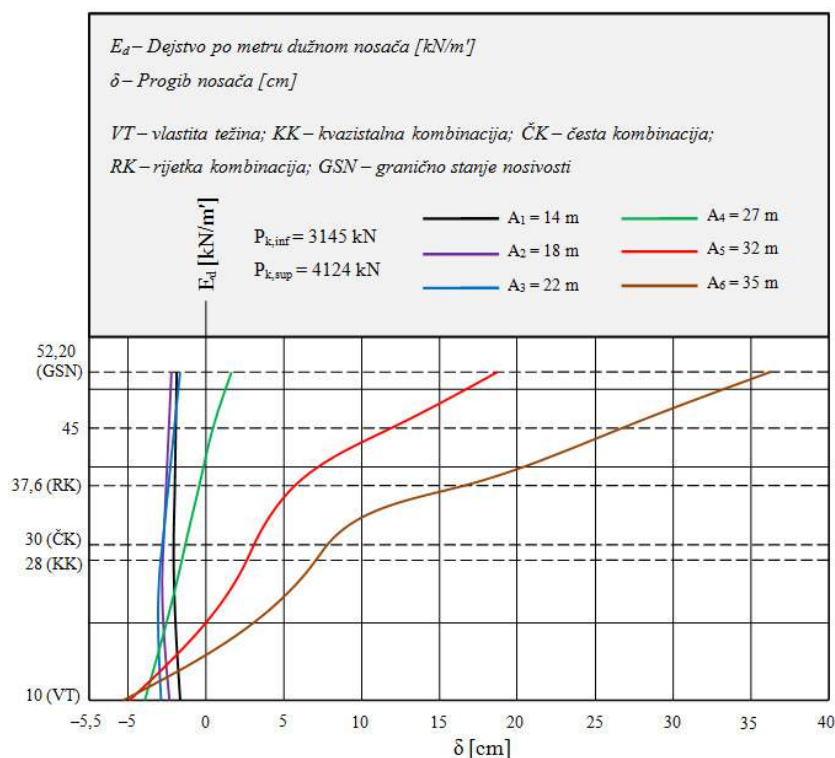
Slika 5. Dijagram naprezanja u čeličnoj armaturi u sredini raspona



Slika 6. Dijagram naprezanja u čeliku za prednaprezanje u sredini raspona



Slika 7. Dijagram širine pukotine u sredini raspona



Slika 8. Dijagram progiba u sredini raspona

5. KOMPARATIVNA ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA

Ponašanje ovdje obrađenih nosača u graničnom stanju upotrebljivosti pri istoj količini armature (obične i prednapregnute) značajno zavisi od raspona samih elemenata. Kod nosača $A_1 = 14$ m, napon betona na gornjoj zoni je tek u graničnom stanju nosivosti (GSN), počinje prelaziti u pritisak, dok na donjoj zoni u betonu nema napona zatezanja. Naprezanje u običnoj i prednapregnutoj armaturi je daleko ispod dozvoljenih vrijednosti. Prva pukotina nastaje tek pri opterećenju od $E_{d,cr} = 188$ kN/m', dok je progib negativan čak i u GSN. Ovo znači da je sila prednaprezanja prevelika i lako savladava raspon od $L = 14$ m, odnosno sposobna je savladati i veći raspon. Proračunska analiza kod nosača $A_2 = 18$ m, pokazuje da su naprezanja u betonu i armaturi nešto veća u odnosu na nosač $A_1 = 14$ m pri određenim kombinacijama djelovanja, ali su i dalje daleko ispod dozvoljenih vrijednosti. Prva pukotina nastaje tek pri opterećenju od $E_{d,cr} = 114$ kN/m', što je daleko veće čak i od opterećenja rijetke kombinacije djelovanja i GSN. Sila prednaprezanja je i dalje prevelika te lako savladava raspon od $L = 18$ m. I dalje je moguće savladati veći raspon. Rezultati proračuna za nosač $A_3 = 22$ m indiciraju da naponi u betonu i armaturi imaju linearan prirast čak i u graničnom stanju nosivosti, ali su veći u odnosu na nosač raspona 18 m. Prva pukotina nastaje pri opterećenju od $E_{d,cr} = 76$ kN/m' što je mnogo manje u odnosu na A nosače od $L = 14$ m i $L = 18$ m. Međutim, sila prednaprezanja i dalje lako savladava raspon od $L = 22$ m, te je zbog toga moguće savladati i veći raspon. Kod nosača $A_4 = 27$ m, prva pukotina nastupa pri opterećenju od $E_{d,cr} = 50,47$ kN/m' što je i dalje veće, čak i od opterećenja rijetke kombinacije djelovanja $E_{d,rare} = 37,60$ kN/m'. Presjek je neraspucao, čak i pri najvećoj kombinaciji djelovanja. Prirast napona u betonu i armaturi, te progiba je linearan, čak i u graničnom stanju nosivosti. Sila prednaprezanja i dalje ima mogućnost da savlada i veći raspon. Nosač $A_5 = 32$ m je optimalni A nosač. Nosač ovog raspona zadovoljava sve uslove optimalnosti. Dekompresija nastaje pri opterećenju od $E_{d,dec} = 29,85$ kN/m' što odgovara opterećenju od česte kombinacije djelovanja $E_{d,freq} = 30$ kN/m'. Napon betona na donjoj zoni pri čestoj kombinaciji je $\sigma_{cd} = 0,12$ N/mm² i malo je veći od nule.

Beton, armatura i sila prednaprezanja u ovom su slučaju potpuno iskorišteni zbog čega nije moguće savladati veći raspon. Međutim, kod nosača $A_6 = 35$ m, prva pukotina nastupa pri opterećenju od $E_{d,cr} = 30,04$ kN/m', a opterećenje od česte kombinacije iznosi $E_{d,freq} = 30$ kN/m'. Naponi u betonu i armaturi prelaze dopuštene vrijednosti pri rijetkoj kombinaciji djelovanja čime je sila prednaprezanja maksimalno iskorištena, te je nedovoljna da savlada raspon od $L = 35$ m.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenog proračuna koji je izvršen u ovom radu, te prikazanih dijagrama koji opisuju ponašanje nosača u graničnom stanju upotrebljivosti, mogu se izvesti slijedeći zaključci:

- Ponašanje nosača „Tipa A“ u graničnom stanju upotrebljivosti značajno ovisi od raspona samih elemenata. Kako se raspon povećava, prirast napona u betonu i čeliku, te prirast pukotina i progiba postaje sve nelinearniji;
- Mehanizam ponašanja krovnog nosača „Tipa A“ se svodi na to da se dejstvo pri kojem nastupa dekompresija, prva pukotina i moment loma smanjuje kako se raspon povećava. Do pojave prve pukotine svi se nosači ponašaju linearno elastično. Prirast naprezanja u betonu i čeliku kao i prirast progiba je linearan, te u ovom području vrijedi Hukov zakon, odnosno da je naprezanje u čeliku proporcionalno opterećenju. Daljim prirastom dejstava (nakon pojave prve pukotine) dolazi do blage nelinearnosti naprezanja u betonu, čeliku i progibima;
- Najveći raspon nosača „Tipa A“ pri kojem su zadovoljeni svi kriteriji optimalnosti je $L = 32$ m. Pri ovom rasponu, naponi u betonu i čeliku, te pukotine i progibi su u krajnjim dozvoljenim granicama. Najveće dozvoljeno opterećenje za ovakav nosač je $E_{d,Rk} = 51,4$ kN/m';
- Na prikazanim dijagramima koji opisuju ponašanje nosača se može primijetiti da je sila prednaprezanja prevelika za raspone koji su manji od $A_5 = 32$ m, a nedovoljna da se savladaju veći rasponi. Ovo praktično znači da optimalni nosači mogu biti svi od $L = 14 - 32$ m. Za nosače $A_1 - A_4$ potreban je manji broj kablova nego za A_5 . Dimenzije poprečnog presjeka je potrebno povećati ako se želi savladati raspon veći od $A_5 = 32$ m.

7. REFERENCE

- [1] EN 1991-1-1: 2002 – Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-1: General Actions Densities, Self-Weight, Imposed Loads for Buildings.,
- [2] EN 1991-1-3: 2003 – Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-3: General Actions- Snow Loads.,
- [3] EN 1992-1-1: 2004 – Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.,
- [4] Chanakya, A.: Design of Structural Elements – Concrete, Steelworks, Masonry and Timber Design to British Standards and Eurocodes, Third Edition, Taylor and Francis e-Library, Abingdon Oxon, 2009.,
- [5] Harapin, A: Dimenzioniranje betonskih konstrukcija prema TPBK (EC2) – Predavanja, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, Split, 2013.