



doc. dr. Robert Pečenko, univ. dipl. inž. grad.
robert.pecenko@fgg.uni-lj.si
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Ema Kogovšek, mag. grad.
emak@projekt.si
Projekt, d. d.,
Kidričeva ulica 9 a, 5000 Nova Gorica



doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.
bojan.cas@fgg.uni-lj.si
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC 539.4.012:544.3.032.4

VPLIV TEMPERATURNIH SPREMEMB OKOLJA NA POJAV NATEZNIH NAPETOSTI V MOSTOVIH, ZGRAJENIH PO TEHNOLOGIJI NATEZNIH TRAKOV

THERMAL EFFECTS OF THE ENVIRONMENT ON THE DEVELOPMENT OF TENSILE STRESSES IN BRIDGES CONSTRUCTED USING THE STRESS-RIBBON TECHNOLOGY

Povzetek

Mostovi, zgrajeni s tehnologijo nateznih trakov, predstavljajo sodobno obliko prednapetih armiranobetonskih konstrukcij, katerih izvedba zahteva natančno načrtovanje in izvedbo. Zaradi svoje zasnove so ti mostovi še posebej občutljivi na temperaturne vplive okolja, ki nanje delujejo tako v času gradnje kot med obratovanjem. V članku so predstavljene analize vpliva začetne temperature okolja ob izvedbi tovrstnih mostov na njihovo napetostno in deformacijsko stanje v času uporabe, s poudarkom na pojavu nateznih napetosti v betonskem delu konstrukcije. Te napetosti so z vidika trajnosti konstrukcije neželene, saj lahko povzročijo razpoke, kar vodi v povečano deformabilnost konstrukcije, hkrati pa omogočajo vdor vode ter agresivnih snovi do armature in kablov. Posledično se poveča tveganje za korozijo, zmanjšano nosilnost ter poslabšano dolgoročno obnašanje konstrukcije. Rezultati parametričnih študij kažejo, da kombinacija višje temperature med gradnjo in kasnejši temperaturni padci povzročajo povečane natezne napetosti v prekladni konstrukciji. Kljub temu da so takšni mostovi prednapeti, lahko temperaturna nihanja vodijo do razpok v armiranobetonskih elementih ter do povišanih napetosti v nosilnih kablji, kar lahko negativno vpliva na trajnost konstrukcije.

Ključne besede: mostovi, natezni trakovi, temperaturne spremembe okolja, natezne napetosti, razpoke

Summary

Stress ribbon bridges are a modern form of prestressed reinforced concrete structures, requiring precise planning and execution. Due to their structural concept, these bridges are particularly sensitive to environmental temperature effects, both during construction and throughout their service life. This article presents an analysis of the impact of initial environmental temperatures at the time of construction on the stress-strain state of such bridges during their service life. The focus is on the occurrence of tensile stresses within the concrete part of the structure, which can be problematic in terms of durability. Such stresses can lead to the formation of cracks, resulting in increased structural deformability and enabling the ingress of water and aggressive substances to the reinforcement and prestressing tendons. As a result, the risk of corrosion increases, potentially reducing the load-bearing capacity and compromising the long-term performance of the structure. Results from parametric studies indicate that the combination of high temperatures during construction, followed by temperature drops in colder periods of the year, leads to increased tensile stresses in the structure. Although the bridges are prestressed, such temperature fluctuations can cause cracking in the concrete elements and elevated stress levels in the load-bearing cables, potentially compromising the long-term durability of the structure.

Key words: stress ribbon bridge, prestressing, environment thermal effects, tensile stresses, cracks

1 UVOD

Mostovi, zasnovani po tehnologiji natezних trakov (angl. stress ribbon bridges), predstavljajo sodobno inženirsko rešitev, ki združuje estetsko dovršenost z zahtevnimi tehnološkimi pristopi pri premoščanju večjih razponov. Njihovo značilno vitko in elegantno obliko sestavlja »viseča« prednapeta armiranobetonska prekladna konstrukcija. Zaradi svoje zasnove in načina delovanja so ti mostovi konstrukcijsko učinkoviti, z minimalnimi zahtevami glede vzdrževanja, vendar pa njihova izvedba zahteva podrobno razumevanje obnašanja prednapetih konstrukcij ter natančna načrtovanje in izvedbo.

Takšni mostovi so najpogostejše namenjeni pešcem in kolesarjem, vendar lahko ob ustrezni zasnovi prevzemajo tudi večje prometne obremenitve [Strasky, 2011]. Prekladna konstrukcija je sestavljena iz prednapete armiranobetonske plošče, nosilnih kablov in kablov za prednapenjanje, ki skupaj tvorijo t. i. natezni trak (glej sliko 1).



Slika 1. Most čez reko Krko, zgrajen po tehnologiji natezних trakov [Freyssinet, 2023]

Gradnja natezних trakov poteka v več zaporednih in medsebojno povezanih fazah, pri čemer se konstrukcijski sistem in način prenosa obtežb med fazami spreminjata ([Weingerl s sodelavci, 2023], [Likar s sodelavci, 2023]). Po montaži prefabriciranih segmentov na prednapete nosilne kable se konstrukcija monolitizira in prednapne, kar zagotavlja zaščito armature in kablov pred vplivi okolja, kot je npr. soljenje v zimskem času. Prednapetje hkrati zagotavlja potrebno togost konstrukcije, ki je ključna za njen ustrezen dinamični odziv [Weingerl s sodelavci, 2023].

Natezni trakovi prenašajo lastno težo, stalne in spremenljive vplive skoraj izključno z nateznimi silami, kar omogoča uporabo vitkih prečnih prereзов glede na razpon konstrukcije. Posledično delujejo ti mostovi izjemno lahkotno, a hkrati zahtevajo robustno podporno konstrukcijo. Zaradi velikih natezних sil v prekladni konstrukciji, ki so posledica lastne teže, monolitizacije, prednapenjanja in prometnih obremenitev, morajo biti krajni oporniki masivni in so pogosto globoko temeljeni in zasidrani v teren z geotehničnimi sidri ([Strasky, 2011], [Redfield in Strasky, 1990], [Weingerl s sodelavci, 2023]).

Pregled literature ([Strasky, 2011], [Čas s sodelavci, 2020]) kaže, da so tovrstne konstrukcije občutljive na temperaturne vpli-

ve, zlasti na ohlajanje v zimskih mesecih, ki povzroča krčenje prekladne konstrukcije. Za ustrezno vključitev temperaturnih vplivov v računske modele je ključna ocena začetne temperature konstrukcije ob gradnji (T_0), ki pa v fazi projektiranja pogosto ni znana. Zato se, skladno s priporočili standarda Evrokod [SIST EN 1991-1-5, 2004], običajno privzame vrednost $T_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ker se gradnja prekladne konstrukcije običajno izvede v kratkem časovnem obdobju, kot je bilo npr. pri mostu v Irči vasi ([Weingerl s sodelavci, 2023], [Likar s sodelavci, 2023]), je mogoče začetno temperaturo T_0 oceniti precej natančno, če sta znana lokacija in čas gradnje.

V tem prispevku predstavljamo parametrične analize, izvedene na primeru že zgrajenega mostu čez reko Sacramento [Redfield in Strasky, 1990], ki smo ga hipotetično umestili v slovensko okolje, in sicer v naselje Soča v občini Bovec. Z analizo želimo raziskati, kako začetna temperatura T_0 vpliva na napetostno in deformacijsko stanje konstrukcije v fazi uporabe. Poseben poudarek je namenjen pojavu natezних napetosti v betonskem delu konstrukcije, saj te predstavljajo ključen dejavnik tveganja za nastanek razpok in posledično zmanjšano trajnost konstrukcije. Cilj analiz je prispevati k boljšemu razumevanju in optimizaciji projektiranja mostov, grajenih po tej tehnologiji.

2 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANEGA MOSTU, GRAJENEGA PO TEHNOLOGIJI NATEZNEGA TRAKU

Obraevnani most čez reko Sacramento je prikazan na sliki 2. V tem prispevku so privzete vse dimenzije omenjenega, že zgrajenega mostu, torej njegov razpon, oblika prečnih prereзов, število nosilnih kablov in kablov za prednapenjanje ter sila prednapetja, ciljni poves ob koncu gradnje ter materialne karakteristike vseh uporabljenih materialov.

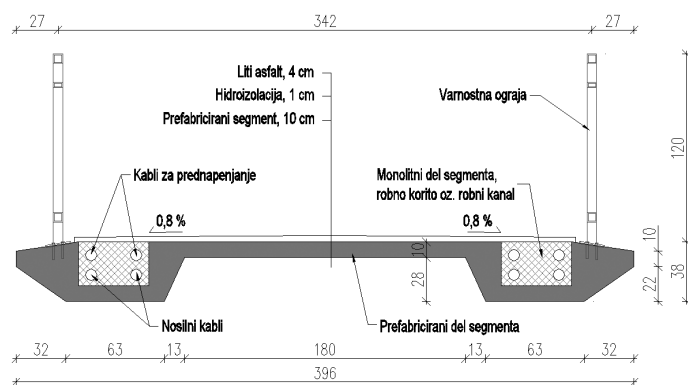


Slika 2. Prikaz obraevnanega mostu Sacramento River Pedestrian Bridge [Structurae, 2025]

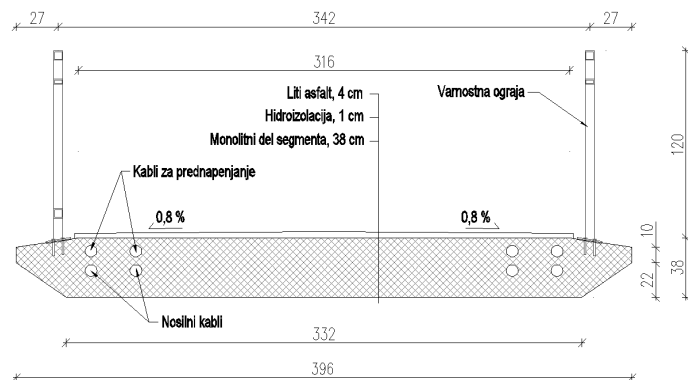
Svetli razpon mostne konstrukcije med krajnima opornikoma znaša 127,4 metra, skupna dolžina mostu pa je 137,42 metra. Uporabna širina med ograjama je 3,42 metra, medtem ko skupna širina prekladne konstrukcije znaša 3,96 metra. Največja višina prekladne konstrukcije znaša 0,38 metra, ta ima izveden tudi obojestranski prečni naklon 0,8 %. Ograja je visoka 1,20 metra.

Celotno prekladno konstrukcijo sestavlja 40 enakih, delno prefabriciranih in naknadno monolitiziranih segmentov dolžine 3,05 metra. Njihov prečni prerez je zasnovan tako, da vključuje dva robna vzdolžna kanala za namestitvev kablov (glej sliko 3). V robnih območjih v bližini podpor, kjer so pričakovane večje upogibne obremenitve, sta izvedeni dve monolitni območji prekladne konstrukcije. V prečnem prerezu je nameščenih osem kablov – štirje nosilni in štirje za prednapenjanje. Nosilni kabli so sestavljeni iz 28 jeklenih vrvi premera 12,7 mm, medtem ko kabli za prednapenjanje vključujejo 31 vrvi enakega premera.

Karakteristična prečna prereza prekladne konstrukcije, in sicer v osrednjem delu razpona ter monolitnega dela ob podporah mostu, sta prikazana na slikah 3 in 4.



Slika 3. Karakteristični prečni prerez delno prefabriciranih, naknadno monolitiziranih segmentov prekladne konstrukcije mostu



Slika 4. Prečni prerez monolitnega dela prekladne konstrukcije

Na podlagi razpoložljivih podatkov o tlačnih trdnostih vgrajenih betonov [Redfield in Strasky, 1990] smo v opravljenih analizah predpostavili, da so prefabricirani segmenti prekladne konstrukcije izvedeni iz betona razreda C40/50, medtem ko je bil monolitni del izveden z betonom višjega trdnostnega razreda C50/60, skladno s standardom Evrokod [SIST EN 1992-1-1, 2004]. Za jeklo za armiranje smo upoštevali jeklo kakovosti B 500B, ki je v tovrstnih konstrukcijah običajno uporabljeno. Ker Redfield in Strasky [Redfield in Strasky, 1990] ne navajata

natančnih podatkov o mehanskih lastnostih nosilnih in prednapetih kablov, smo v izračunih uporabili standardno jeklo za prednapenjanje kakovosti Y 1860 S7-16,0-A, z nizko stopnjo relaksacije.

3 VPLIVI NA KONSTRUKCIJO

Pri določanju obtežb in kombinacij obtežb za analizirano konstrukcijo nateznega traku smo izhajali iz veljavne zakonodaje Republike Slovenije ter sistema standardov Evrokod ([SIST EN 1990, 2004], [SIST EN 1991-1-3, 2004], [SIST EN 1991-1-4, 2004], [SIST EN 1991-1-5, 2004], [SIST EN 1991-2, 2004], [SIST EN 1992-1-1, 2004], [SIST EN 1992-2, 2005], skupaj z ustreznimi nacionalnimi dodatki ([SIST EN 1990:A101, 2006], [SIST EN 1991-1-3:A101, 2015], [SIST EN 1991-1-4:A101, 2010], [SIST EN 1991-1-5:A101, 2010])). Na ta način smo zagotovili, da je kontrola mehanske odpornosti in stabilnosti konstrukcije skladna z domačimi predpisi in zahtevami. V analizi so bile upoštevane vse bistvene obtežbe, in sicer:

- (i) lastna teža konstrukcije (nosilni kabli ter kabli za prednapenjanje, prefabriciran del nateznega traku, monolitni del nateznega traku)
- (ii) stalna obtežba (zaključni sloj, hidroizolacija, varnostna ograja)
- (iii) vpliv snega (občina Bovec, cona A4, nadmorska višina 448 m)
- (iv) vpliv vetra (cona 1, osnovna hitrost vetra 20 m/s)
- (v) prometna obtežba (enakomerno porazdeljena vertikalna obtežba, servisno vozilo, horizontalna prometna obtežba)
- (vi) reološki vplivi (krčenje in lezenje betona, RH = 70 %, temperatura vgrajene sveže betonske mešanice 20 °C)

Vsi zgoraj obravnavani vplivi so bili podrobno analizirani v magistrski nalogi Kogovškove [Kogovšek, 2024], zato so v tem prispevku predstavljeni zgolj v strnjeni obliki. Dinamični vplivi, vključno s potresno obtežbo, v okviru te študije niso bili obravnavani. V nadaljevanju je še posebej izpostavljena in natančneje predstavljena določitev toplotnih vplivov, saj je osrednji namen članka prikaz teh vplivov na napetostno in deformacijsko stanje obravnavane konstrukcije.

3.1 Toplotni vplivi

Toplotni vplivi so bili določeni na podlagi standarda SIST EN 1991-1-5 [SIST EN 1991-1-5, 2004] ter pripadajočega nacionalnega dodatka [SIST EN 1991-1-5:A101, 2009]. Zaradi značilne konstrukcijske zasnove nateznih trakov, pri katerih se zaradi nizke upogibne togosti zunanje obtežbe prenašajo predvsem preko osnih obremenitev trakov oziroma kablov, smo upoštevali le enakomerne temperaturne spremembe v prekladni konstrukciji, neenakomerne temperaturne spremembe po višini prekladne konstrukcije, ki jih predhodno omenjeni standard in pripadajoči nacionalni dodatek prav tako obravnavata, pa smo zanemarili. V nadaljevanju so predstavljeni ključni parametri, povezani s toplotnimi vplivi okolja, ki so bili upoštevani v analizi. Preglednica 1 prikazuje strnjen prikaz teh podatkov, ki so bili uporabljeni kot osnova za določitev temperaturnih obtežb prekladne konstrukcije ter izvedenih nadaljnjih parametričnih študij.

$T_0 = 0\text{ °C do } 35\text{ °C}$	predpostavljena začetna temperatura okolja oz. temperatura, pri kateri poteka gradnja
$T_{\max,100} = 39,2\text{ °C}$	ocenjena najvišja temperatura ozračja v senci, s povratno dobo 100 let
$T_{\min,100} = -16,9\text{ °C}$	ocenjena najnižja temperatura ozračja v senci, s povratno dobo 100 let
$T_{e,\max} = T_{\max,100} + 2\text{ °C} = 41,2\text{ °C}$	ocenjena najvišja temperatura mostne konstrukcije
$T_{e,\min} = T_{\min,100} + 8\text{ °C} = -8,9\text{ °C}$	ocenjena najnižja temperatura mostne konstrukcije
$\Delta T_{N,\exp} = T_{e,\max} - T_0 = 6,2\text{ °C do } 41,2\text{ °C}$	enakomerni del temperature spremembe, raztezanje – npr. segrevanje v poletnem obdobju
$\Delta T_{N,\text{con}} = T_{e,\min} - T_0 = -43,9\text{ °C do } -8,9\text{ °C}$	enakomerni del temperature spremembe, krčenje – npr. ohlajanje v zimskem obdobju

Preglednica 1. Uporabljeni parametri toplotnih vplivov okolja

3.2 Kombinacije vplivov

Pri predstavitvi kombinacij vplivov se osredotočamo predvsem na tiste, ki so v nadaljevanju ključne za preverjanje izbranih mejnih stanj. Ena ključnih zahtev v okviru mejnih stanj uporabnosti (MSU), ki ji je pri mostovih, grajenih po tehnologiji natezних trakov, nujno zadostiti, je zagotovitev nerazpokanosti betonskih prečnih prereзов prekladne konstrukcije [SIST EN 1992-2, 2004]. Ta pogoj je še posebej pomemben pri prednapetih konstrukcijah, saj neposredno vpliva na trajnost, togost in dolgoročno obnašanje mostu. V okviru računske obravnave lahko ločimo dve značilni napetostno-deformacijski stanji prečnega prereza, in sicer: (i) prečni prerez nateznega traku je v celoti tlačni in (ii) v prečnem prerezu nateznega traku so poleg tlačnih napetosti prisotne tudi natezne napetosti, ki pa ne presežejo natezne trdnosti vgrajenih betonov. Osrednji namen prispevka je prav analiza pojava teh natezних napetosti v betonskem delu prekladne konstrukcije. V skladu s standardom SIST EN 1992-2 [SIST EN 1992-2, 2004] je pri prednapetih konstrukcijah treba preveriti, da natezne napetosti v betonu pri pogosti kombinaciji vplivov ne presegajo dopustnih vrednosti (natezne trdnosti vgrajenih betonov). Običajno investitorji zahtevajo strožje kriterije, zato smo ta pogoj preverili pri karakteristični kombinaciji vplivov. Poleg betonskega dela konstrukcije smo analizirali tudi natezne napetosti v nosilnih kablji in kablji za prednapenjanje, pri čemer te, v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1 [SIST EN 1992-1-1, 2004], ne smejo preseči $0,75 f_{pk}$, ravno tako pri karakteristični obtežni kombinaciji. Na podlagi navedenega smo za karakteristično kombinacijo vplivov izvedli devet različnih kombinacij obtežb, ki so podrobno obravnavane v magistrski nalogi [Kogovšek, 2024]. V tem prispevku pa izpostavimo samo kombinacijo z oznako K1, ki se je izkazala kot najbolj merodajna.

$$K1: \sum_{j \geq 1} G_{k,j} " + " P " + " Q_{k,1} " + " \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} " + " P " + " gr_1 " + " 0,6 \cdot \Delta T_{N,\text{con}}, \quad (1)$$

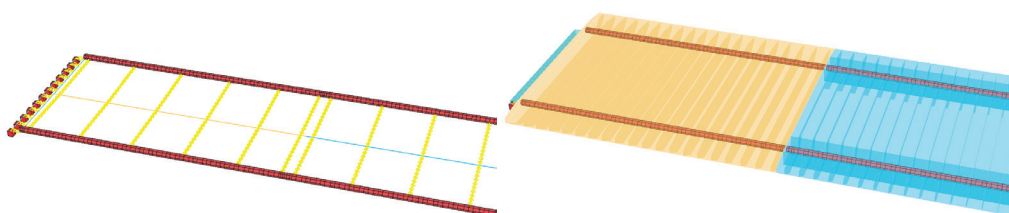
Kombinacija K1 vključuje karakteristične vrednosti lastne in stalne obtežbe, prednapetja, prevladujočo spremenljivo obtežbo – prometna obtežba skupine gr_1 (enakomerna porazdeljena prometna obtežba q_{fk} in točkovne horizontalne sile Q_{fk}) ter spremljajoči spremenljivi vpliv – ohlajanje konstrukcije zaradi padca temperature. Skladno s standardom SIST EN 1990 [SIST EN 1990, 2004] smo ta spremenljivi vpliv vključili v kombinacijo z ustreznim kombinacijskim faktorjem $\psi_0 = 0,6$.

Na tem mestu velja poudariti, da so bile v okviru magistrske naloge [Kogovšek, 2024] izvedene tudi ustrezne kombinacije obtežb za preverjanje mejnih stanj nosilnosti ter druge kontrole v okviru mejnih stanj uporabnosti, kot je na primer omejevanje tlačnih napetosti v betonu. Ker te kontrole niso predmet obravnave tega prispevka, pripadajoče kombinacije obtežb tudi niso prikazane.

4 RAČUNSKI MODEL

Za potrebe numerične analize konstrukcije je bil izdelan prostorski računski model v programskem okolju SOFiSTiK 2023 [SOFiSTiK, 2023]. Model je zasnovan z uporabo linijskih končnih elementov, pri čemer so bile podpore nateznega traku modelirane kot toge. Izvedena je bila nelinearna analiza po teoriji tretjega reda, ki omogoča geometrijsko natančno obravnavo konstrukcije z iterativnim iskanjem ravnotežja na deformirani geometriji. Tak pristop je pri konstrukcijah natezних trakov nujen, saj se zaradi majhne upogibne togosti pojavljajo znatni vertikalni pomiki, ki pomembno vplivajo na potek notranjih sil in napetostno stanje teh konstrukcij. Čeprav teorija tretjega reda omogoča tudi upoštevanje nelinearnega materialnega odziva, je bilo v študiji predpostavljeno linearno elastično obnašanje materialov.

Slika 5 prikazuje računski model obravnavane konstrukcije v območju podpor. Na levi strani je prikazan globalni linijski računski model brez vizualizacije pripadajočih prečnih pre-



Slika 5. Računski model konstrukcije

rezov. Rdeči linijski elementi predstavljajo kable za prednapenjanje, medtem ko nosilni kabli potekajo pod njimi in so modelirani kot kabelski elementi brez upogibne togosti, ki prevzemajo izključno osne sile. Nosilni kabli so z betonskim delom prekladne konstrukcije povezani preko prečnih vezi, ki so prikazani z rumenimi elementi. Betonski del konstrukcije je v modelu idealiziran z linijskim elementom, ki poteka skozi težiščno os prečnega prereza. Na desni strani slike je prikazan model z upoštevanjem geometrije prečnih prerezov. Različne barve betonskega dela označujejo posamezne segmente. Svetlo modri del predstavlja prefabricirane elemente, medtem ko oranžno obarvano območje predstavlja monolitno izvedeni segment prekladne konstrukcije.

Modeliranje konstrukcij, izvedenih po tehnologiji nateznih trakov, zahteva upoštevanje postopnosti gradnje in specifičnega prenosa obtežb. Zato je numerični model zasnovan tako, da omogoča aktivacijo posameznih konstrukcijskih elementov v različnih gradbenih fazah, pri čemer se lahko njihove mehanske lastnosti, zlasti togost, spreminjajo glede na fazo gradnje. Zaporedje gradbenih faz je bilo simulirano z uporabo modula CSM (Construction Stage Manager), pri čemer so bili v vsaki fazi upoštevani reološki vplivi, kot sta lezenje in krčenje betona. Okoljski pogoji so bili definirani kot zmerno vlažni, z relativno zračno vlago $RH = 70\%$.

Na podlagi preliminarne analize, izvedene z uporabo modela, predstavljenega v [Klemenčič, 2018], so bile določene potrebne začetne napenjalne sile v nosilnih kablji, ki ob upoštevanju geometrijskih in materialnih lastnosti konstrukcije ter izbrane sile prednapetja v kablji za prednapenjanje zagotavljajo ciljni povos konstrukcije po zaključku gradnje. Izračunana sila napenjanja posameznega nosilnega kabla tako znaša 4450 kN. Skupna sila prednapetja $P_{m,0,pt}$ je bila izbrana na osnovi podatkov iz izvedbe mostu za pešce čez reko Sacramento [Redfield in Strasky, 1990] in znaša 17,100 kN, na podlagi katere so napetosti v kablji za prednapetje enake 58 % karakteristične natezne trdnosti uporabljenega jekla.

V začetni fazi gradnje, ko prefabricirani armiranobetonski segmenti še niso nameščeni, nosilno funkcijo prevzemajo izključno

nosilni kabli. Zato je v uporabljenem programskem okolju togost armiranobetonskih elementov, tako prefabriciranih kot monolitnih, v začetnih fazah gradnje ustrezno zmanjšana. Dodajmo tudi, da so bile lastne teže nosilnih kablov in betonskih elementov v numeričnem modelu podane ročno, da je bilo mogoče zagotoviti natančen prenos obtežb v posameznih gradbenih fazah.

5 REZULTATI IN DISKUSIJA

5.1 Vpliv začetne temperature okolja na odziv mostne konstrukcije

Glavni namen prispevka je analiza vpliva temperature okolja na konstrukcijsko obnašanje mostov, zgrajenih po tehnologiji nateznih trakov. Posebna pozornost je namenjena temperaturnim razmeram med gradnjo, saj te pomembno vplivajo na napetostno-deformacijsko stanje prekladne konstrukcije. Analiza je bila izvedena za začetne temperature okolja med $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, v korakih po $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar omogoča vpogled v vpliv gradnje pri različnih letnih časih na odziv konstrukcije. V vseh primerih je bil uporabljen razvit računski model, pri čemer je bila edina spremenljivka začetna temperatura okolja T_0 .

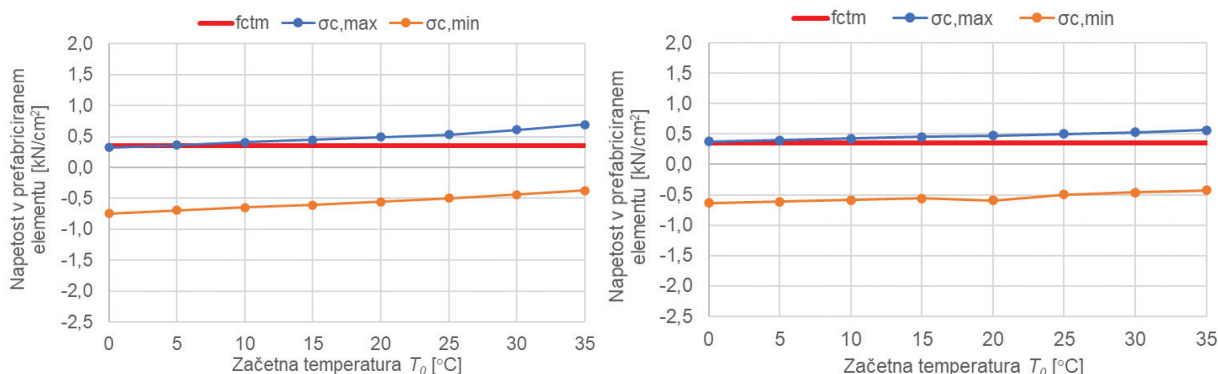
V preglednici 2 prikazujemo rezultate izvedenih računskih analiz za karakteristično obtežno kombinacijo K1, obravnavano v okviru mejnih stanj uporabnosti. Prikazane so največje napetosti v nosilnih kablji, kablji za prednapenjanje ter v betonskem delu konstrukcije, v odvisnosti od začetne temperature okolja T_0 . V preglednici so s sivo barvo označeni tisti rezultati, kjer so presežene s standardi ([SIST EN 1992-1-1, 2004], [SIST EN 1992-2, 2004]) predpisane omejitve napetosti v betonu ali kablji nateznega traku. V primeru betonskega dela konstrukcije je bila izvedena kontrola nateznih napetosti v betonu glede na njegovo natezno trdnost – za prefabricirane elemente je bila uporabljena vrednost $f_{ctm} = 0,35\text{ kN/cm}^2$ (C40/50), za monolitne segmente pa $f_{ctm} = 0,41\text{ kN/cm}^2$ (C50/60). Za nosilne in prednapete kable pa velja, da natezne napetosti ne smejo prekoračiti $0,75 \cdot f_{pk} = 139,5\text{ kN/cm}^2$.

Začetna temperatura T_0 [$^{\circ}\text{C}$]	Napetost v nosilnih kablji [kN/cm^2]	Napetost v kablji za prednapenjanje [kN/cm^2]	Napetosti v betonu [kN/cm^2]					
			Prefabricirani element				Monolitni segment	
			sredina - zgoraj	sredina - spodaj	rob - zgoraj	rob - spodaj	zgoraj	spodaj
0	134,74	107,34	0,32	0,38	-0,02	0,95	0,15	1,20
5	135,89	107,53	0,36	0,40	0,06	0,98	0,18	1,22
10	137,06	107,73	0,41	0,43	0,10	1,01	0,22	1,24
15	138,26	107,93	0,45	0,45	0,14	1,04	0,26	1,26
20	139,47	108,14	0,49	0,48	0,18	1,08	0,31	1,28
25	140,71	108,35	0,53	0,50	0,23	1,11	0,35	1,30
30	141,97	108,57	0,58	0,53	0,27	1,15	0,39	1,32
35	143,27	108,80	0,62	0,56	0,30	1,18	0,43	1,34

Preglednica 2. Največje napetosti v elementih nateznega traku v odvisnosti od začetne temperature okolja pri karakteristični kombinaciji vplivov K1

Iz analize robnih napetosti (zgornji in spodnji rob) v prefabriciranih elementih na sredini razpona nateznega traku (glej sliko 6) je razvidno, da se z višanjem začetne temperature okolja povečujejo robne natezne napetosti v betonih, kar je za konstrukcijo neugodno. Beton ima namreč nizko natežno trdnost, zato lahko ob prekoračitvi te pride do pojava razpok. Te zmanjšajo togost konstrukcije, povečajo deformabilnost in omogočajo vdor vode ter agresivnih snovi do armature in kablov,

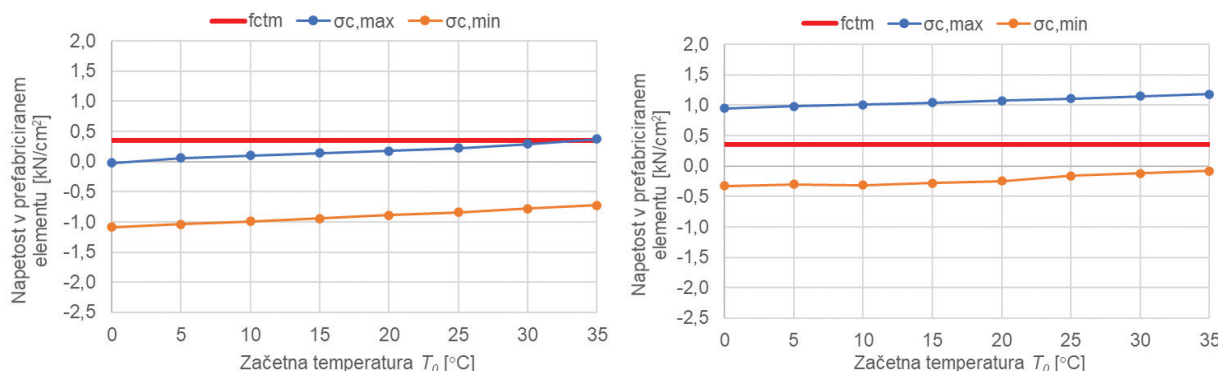
marna računska analiza nateznega traku izvedena pri drugačnih temperaturni obtežbi ($T_0 = 21\text{ °C}$, $\Delta T_{N,exp} = +22\text{ °C}$, $\Delta T_{N,con} = -22\text{ °C}$). Hkrati je bila ob ekstremnem padcu temperature predpisana omejitev prometne obtežbe. Glede na to je razumljivo, da v analizah, izvedenih za namen tega prispevka, pride do prekoračitve nateznih trdnosti vgrajenih betonov, saj smo upoštevali strožje kriterije in obtežbe, ki jih podajajo sodobnejši standardi Evrokod.



Slika 6. Vpliv začetne temperature okolja T_0 na napetosti na zgornjem (levo) in spodnjem robu (desno) sredinskega prefabriciranega elementa v MSU

kar lahko povzroči korozijo in zmanjša nosilnost, v skrajnih primerih tudi porušitev konstrukcije. Razpoke negativno vplivajo tudi na videz konstrukcije in povzročajo skrb uporabnikov. Sanacija je zahtevna in draga, zato je še toliko bolj pomembno, da z ustrezno izvedbo preprečimo nastanek razpok v uporabni dobi konstrukcije. Naši izračuni kažejo, da so natezne napetosti prekoračene na posebej neugodni lokaciji, in sicer na pohodni (zgornji) strani prekladne konstrukcije, kar omogoča neposreden vdor vode do armature in kablov. Iz analiz je sicer razvidno, da je gradnja pri nižjih tempera-

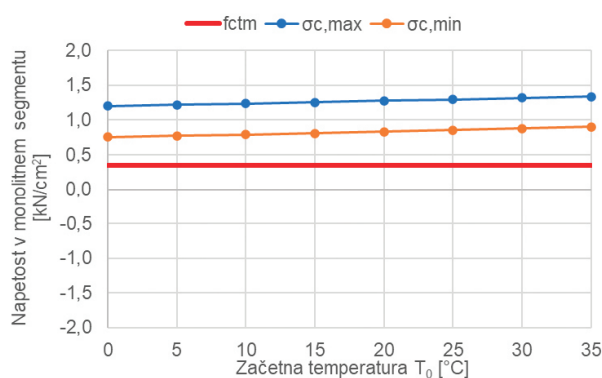
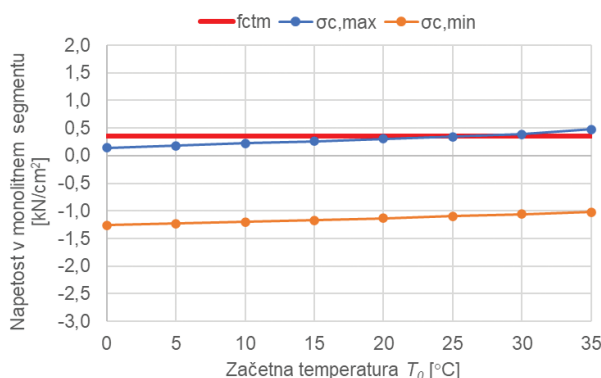
Z višanjem začetne temperature okolja se povečujejo robne natezne napetosti tudi v robnih prefabriciranih elementih (slika 7) ter monolitnih segmentih prekladne konstrukcije (slika 8). Ugotavljamo, da so natezne napetosti praviloma prekoračene le na spodnjem robu prekladne konstrukcije, kar ni tako neugodno kot v primeru razpok na pohodni strani konstrukcije, predstavljenem predhodno. Prekoračitve nateznih napetosti na tej lokaciji se praviloma omilijo oziroma odpravijo z vgradnjo dodatne armature, ki omejuje širino razpok in s tem zmanjšuje njihov negativni vpliv na konstrukcijo.



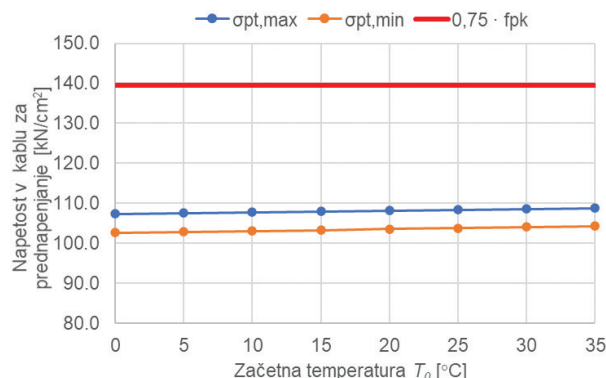
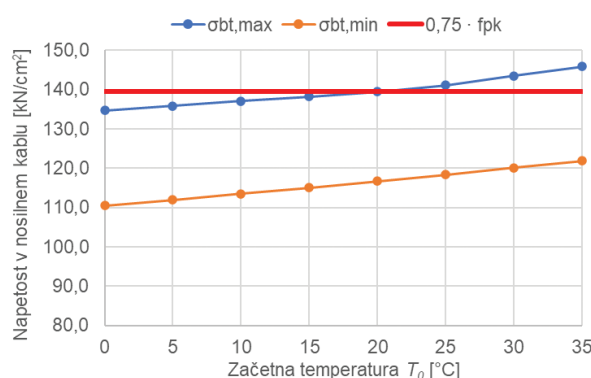
Slika 7. Vpliv začetne temperature okolja T_0 na napetosti na zgornjem (levo) in spodnjem robu (desno) robnega prefabriciranega elementa v MSU

turah (10 °C ali manj) ugodnejša, saj vodi v manjše natezne napetosti. Vendar to ni zadosten ukrep, saj so napetosti prekoračene že pri začetni temperaturi 0 °C. Na tem mestu je treba dodati, da je bil Sacramento River Pedestrian Bridge je zasnovan v skladu z ameriški standardi, ki so veljali v devetdesetih letih prejšnjega stoletja, pri čemer je bila pri-

Velja tudi, da zviševanje začetne temperature okolja povzroča povečanje napetosti tako v nosilnih kablji kot v kablji za prednapenjanje (slika 9). Pri kablji za prednapenjanje zviševanje začetne temperature povzroči le manjše povečanje napetosti, medtem ko napetosti v nosilnih kablji pri temperaturi, višji od 25 °C, prekoračijo dovoljeni nivo nateznih napetosti $0,75 \cdot f_{pk}$.



Slika 8. Vpliv začetne temperature okolja T_0 na napetosti na zgornjem (levo) in spodnjem robu (desno) monolitnega segmenta prekladne konstrukcije v MSU



Slika 9. Vpliv začetne temperature okolja T_0 na napetosti v nosilnih kablju (levo) in kablju za prednapenjanje (desno) v MSU

5.2 Povečanje sile prednapetja

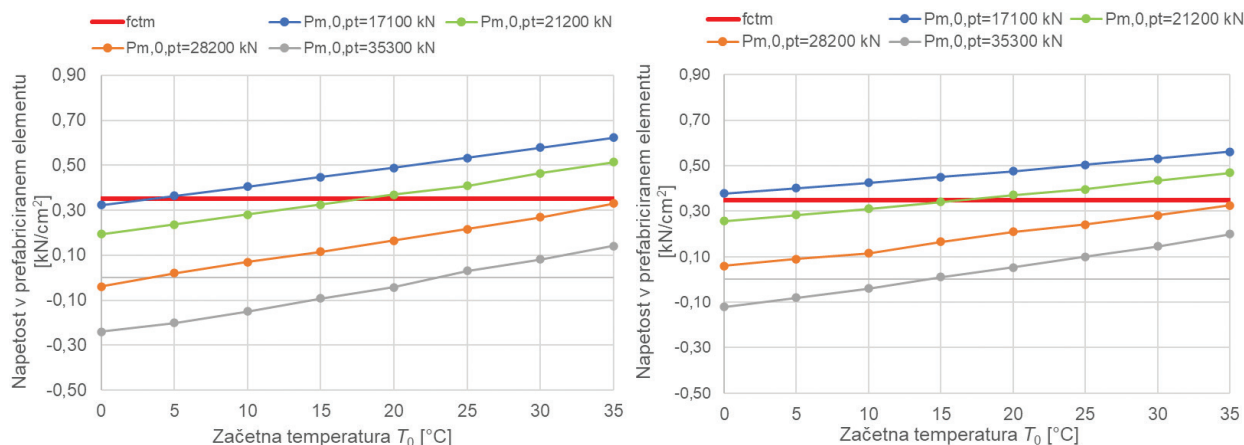
Ker so bile v analizah iz poglavja 5.1 ugotovljene prekoračitve nateznih napetosti v betonu, je razumljiv in učinkovit ukrep za izboljšanje napetostno-deformacijskega stanja povečanje sile prednapetja. S tem v konstrukcijo vnesemo večjo tlačno silo, kar zmanjša natezne napetosti v betonskem prerezu. Računske analize smo ponovno izvedli za osem različnih začetnih temperatur okolja, od 0 °C do 35 °C, pri čemer smo se osredotočili na kombinacijo vplivov K1 v MSU, predstavljeno v podpoglavju 3.2. Izhodiščni (osnovni) model mostu vključuje štiri kable za prednapenjanje, napete z začetno silo $P_{m,0,pt} = 17100$ kN. V dodatnih analizah smo upoštevali še tri večje vrednosti sile prednapetja, kot je prikazano v preglednici 3. Sorazmerno s

povečanjem sile smo ustrezno povečali tudi število vrvi v kablju oziroma skupni prečni prerez kablov, pri čemer smo v kablju ohranili enako začetno napetost kot v izhodiščnem računskem modelu.

Na sliki 10 je prikazan potek največjih napetosti v prefabriciranem elementu na sredini razpona, na zgornjem in spodnjem robu prečnega prereza nateznega traku, v odvisnosti od začetne temperature in sile prednapetja. Če začetno silo prednapetja povečamo na 21200 kN, se izkaže, da natezne napetosti niso prekoračene le do začetne temperature $T_0 = 15$ °C. To pomeni, da je pri takšnem nivoju prednapetja gradnja priporočljiva v hladnejših obdobjih leta, torej zgodaj spomladi, jeseni ali pozimi. Za zagotovitev, da natezne napetosti pri vseh začetnih temperaturah ne presežejo natezne trdnosti betona, je potrebna sila prednapetja v vrednosti 28200 kN, kar predstavlja kar 65 % povišanje glede na osnovno silo prednapetja. V primeru sile prednapetja v velikosti 35300 kN, kar predstavlja več kot 100% povečanje glede na osnovni primer, je prerez do začetne temperature okvirno $T_0 = 20$ °C v celoti tlaččen. Nad to temperaturo se začnejo pojavljati natezne napetosti, ki pa so manjše od natezne trdnosti betona. Popolnoma tlačnega prereza pri gradnji v toplejšem delu leta torej ni mogoče doseči kljub znatnemu povečanju sile prednapetja. Poleg tega je z vidika tehnologije izvedbe vnos tako visokih sil prednapetja v betonski prerez omejen, predvsem zaradi konstrukcijskih, tehnoloških omejitev glede števila kablov ali števila vgrajenih vrvi v prednapetih kablju in zmogljivosti napenjalne opreme [Likar s sodelavci, 2023].

Začetna sila prednapetja $P_{m,0,pt}$ [kN]	Število kablov	Število vrvi v kablju	Skupna površina kablov A_{spt} [cm²]
17100	4	31	157,5
21200	4	36	182,9
28200	4	48	234,8
35300	4	60	304,8

Preglednica 3. Velikosti začetnih sil prednapetja $P_{m,0,pt}$ in skupne površine kablov A_{spt}

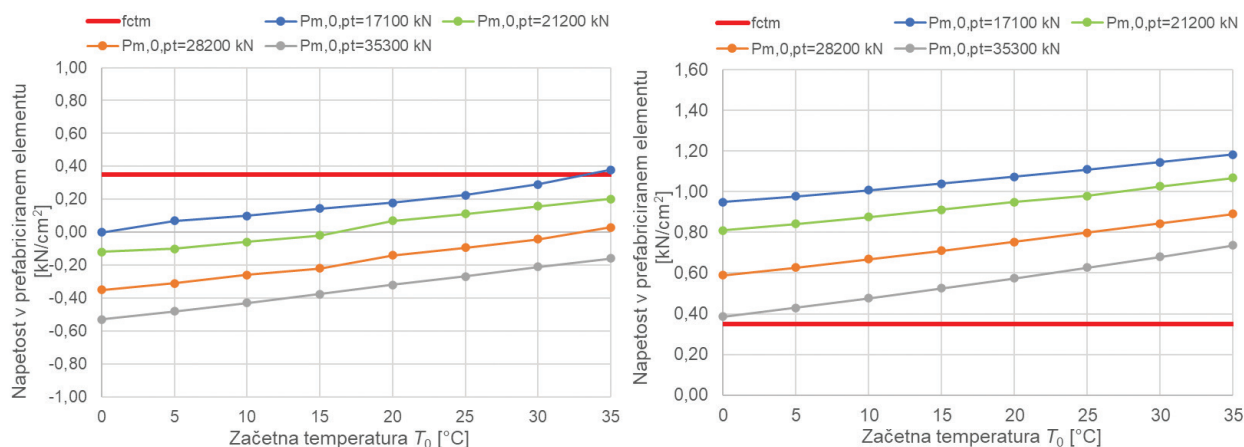


Slika 10. Vpliv začetne temperature okolja T_0 ter sile prednapetja na napetosti na zgornjem (levo) in spodnjem robu (desno) sredinskega prefabriciranega elementa v MSU

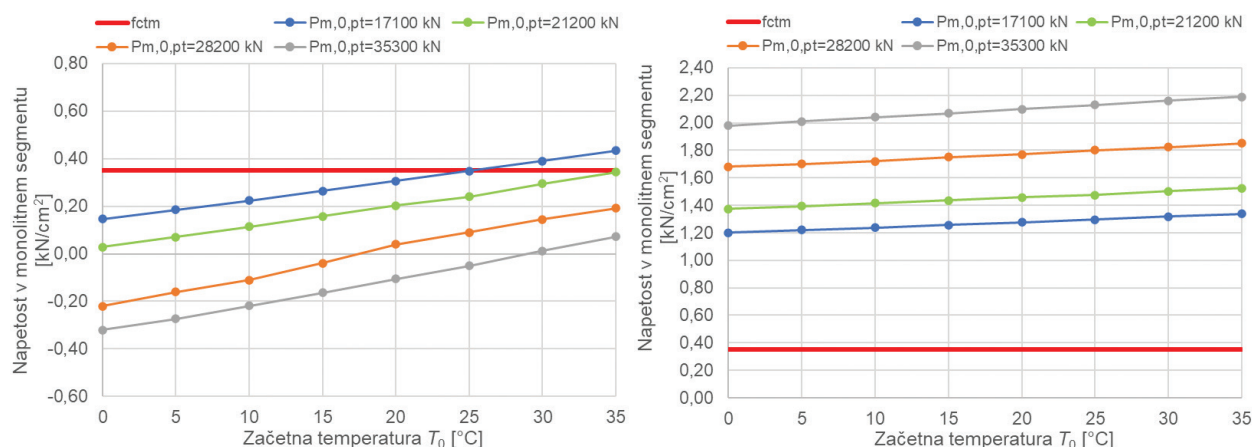
Vpliv povečanja sile prednapetja na potek največjih napetosti na zgornjem in spodnjem robu robnega prefabriciranega elementa v odvisnosti od začetne temperature T_0 je prikazan na sliki 11. Razvidno je, da povečanje sile prednapetja nima bistvenega vpliva na natezne napetosti na zgornjem robu prečnega prereza (slika 11, levo), saj so te že v osnovnem primeru (17100 kN), za vse analizirane začetne temperature T_0 nižje od natezne trdnosti vgrajenih betonov. Velja sicer, da se z večanjem sile prednapetja zmanjšujejo natezne napetosti na zgornjem robu robnega prefabriciranega elementa in pri določenih začetnih temperaturah T_0 celo preidejo v tlačne. Na spodnjem robu zasledimo podoben razvoj napetosti, saj povečanje sile prednapetja prispeva k zmanjšanju natezних napetosti, vendar te, tudi pri največji sili prednapetja, ki znaša 35300 kN, presegajo natezno trdnost betonov.

Potek največjih napetosti na zgornjem in spodnjem robu monolitnega segmenta v odvisnosti od sile prednapetja in začetne temperature okolja je prikazan na sliki 12. Ugotovitve so primerljive s tistimi za robni prefabricirani ele-

ment (glej tudi sliko 11). Povečanje sile prednapetja torej nima bistvenega vpliva na natezne napetosti na zgornjem robu prečnega prereza nateznega traku, saj so te, z izjemo primera pri $T_0 = 35^\circ\text{C}$, že pri osnovni sili prednapetja nižje od natezne trdnosti betona. Na spodnjem robu so natezne napetosti prekoračene pri vseh obravnavanih nivojih prednapetja. V splošnem pa velja, da povečanje sile prednapetja (sicer v nezadostnem obsegu) prispeva k zmanjšanju natezних napetosti na spodnjem robu monolitnega segmenta nateznega traku. Neugodne učinke prekoračenih natezних trdnosti vgrajenih betonov, ki se lahko odražajo v obliki razpok, je torej nujno obvladovati z vgradnjo primerne količine in razporeditve armature.



Slika 11. Vpliv začetne temperature okolja T_0 ter sile prednapetja na napetosti na zgornjem (levo) in spodnjem robu (desno) krajnega prefabriciranega elementa v MSU



Slika 12. Vpliv začetne temperature okolja T_0 in sile prednapetja na napetosti na zgornjem (levo) in spodnjem robu (desno) monolitnega segmenta prekladne konstrukcije v MSU

6 ZAKLJUČEK

V prispevku smo analizirali vpliv začetne temperature okolja ob gradnji mostov, zasnovanih po tehnologiji nateznih trakov, na njihovo napetostno-deformacijsko stanje. Poseben poudarek je bil namenjen mejnim stanjem uporabnosti v povezavi s kontrolo nateznih napetosti v betonskem delu prečnih prereзов. Računsko smo obravnavali most Sacramento River Pedestrian Bridge, ki je zgrajen v ZDA. Tega smo, z njegovimi geometrijskimi in materialnimi lastnostmi, hipotetično umestili v slovensko okolje, in sicer v naselje Soča v občini Bovec. Na ta način smo omogočili oceno vplivov lokalnih temperaturnih razmer na konstrukcijsko obnašanje že zgrajenega mostu.

Analiza vpliva začetne temperature okolja na odziv mostu je pokazala, da so temperaturni pogoji med gradnjo izjemno pomembni za zagotavljanje trajnosti konstrukcije. Rezultati parametričnih študij so namreč razkrili, da višje začetne temperature ob izvedbi, v kombinaciji z ohlajanjem konstrukcije v hladnejših obdobjih leta, vodijo do povečanja nateznih napetosti v betonskih elementih nateznega traku. Posebno kritičen je bil pojav prekoračenih nateznih napetosti na zgornji pohodni površini mostu, saj lahko to privede do pojava razpok, kar omogoča neposreden vdor vode do vgrajene armature in kablov in posledičnega povečanega tveganja za razvoj korozije. Analize so potrdile, da gradnja pri nižjih temperaturah (okoli 10 °C ali manj) zmanjšuje tveganje za prekoračitve dovoljenih nateznih napetosti. Kljub navedenemu pa gradnja v obdobjih nižjih temperatur ni zadosten ukrep, saj se je izkazalo, da so natezne napetosti na pohodni površini obravnavanega nateznega traku prekoračene že pri gradnji pri temperaturi 0 °C.

Kot učinkovit ukrep za zmanjšanje nateznih napetosti se je izkazalo povečanje sile prednapetja, saj posledično povečanje tlačne sile v prečnih prerezech prispeva k izboljšanju napetostnega stanja konstrukcije. Kljub temu pa ima ta pristop svoje tehnološke in konstrukcijske omejitve, zlasti glede števila kablov ali vrvi, ki jih je treba vgraditi v

prednapete kable in zmogljivosti uporabljene napenjalne opreme. Poleg navedenega popolnoma tlačnih prečnih prereзов nateznih trakov pri gradnji v toplejšem delu leta ni mogoče zagotoviti brez znatnega povečanja sile prednapetja, kar pa v praksi pogosto ni izvedljivo.

Na podlagi izvedenih računskih analiz lahko zaključimo, da se strokovno korektna gradnja mostov po tehnologiji nateznih trakov načrtuje v hladnejših obdobjih leta, saj so tako temperaturni vplivi, ki se bodo pojavili med obratovanjem konstrukcije, ugodnejši. Na ta način se je mogoče izogniti nepotrebnim prekoračitvam nateznih trdnosti vgrajenih betonov in potrebi po dodatnem, celo pretiranem povečanju sile prednapetja, kar je tehnološko zahtevno, dražje ter časovno zamudno. Gradnja tovrstnih konstrukcij, ki poteka v hladnejših mesecih, omogoča optimalnejšo zasnovo konstrukcij ter prispeva k njihovi večji trajnosti kot tudi zanesljivosti.

Prispevek potrjuje, da je natančna ocena začetne temperature okolja ter ustreznost vključitev toplotnih vplivov v računske modele bistvena za varno in trajno zasnovo mostov, grajenih po tehnologiji nateznih trakov.

7 ZAHVALA

Raziskovalni program »Mehanika konstrukcij št. (P2-0260) je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

8 LITERATURA

Čas, B., Pulko, B., Pečenko, R., Češarek, P., Klemenčič, D., Logar, J., Načrt gradbenih konstrukcij: Kolesarski most 5-03 čez Krko: faza PZI, revizijsko poročilo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2020

Freyssinet, <https://www.freyssinet.com/wp-content/uploads/2023/05/Slovenia-Project-Footbridge.png>, Freyssinet Adria, 18.8.2025.

Kogovšek, E., Analiza toplotnih vplivov okolja na mostove grajene po tehnologiji nateznih trakov, Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2024

Klemenčič, D., Projektiranje mostu z nosilnim sistemom nateznega traku preko Savinje pri Mozirju, Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2018.

Likar, I., Malnar, D., Maraž, M., Izvedba brvi za kolesarje in pešce čez Krko v Irči vasi. Zborovanje gradbenih konstruktorjev, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, 26-27.10.2023, 61-72, 2023.

Redfield, C., Strasky, J., Sacramento River Pedestrian Bridge, USA, Structural Engineering International, (4), 19-21, 1990.

SIST EN 1990, Evrokod – Osnove projektiranja, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2004.

SIST EN 1990:A101, Evrokod – Osnove projektiranja – Nacionalni dodatek, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2006.

SIST EN 1991-1-3, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2004.

SIST EN 1991-1-3:A101, Evrokod 1 – Vplivi na konstrukcije – 1-3. Del: Splošni vplivi – Obtežba snega – Nacionalni dodatek, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2015.

SIST EN 1991-1-4, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2004.

SIST EN 1991-1-4:A101, Evrokod 1 – Vplivi na konstrukcije – 1-4. Del: Splošni vplivi – Obtežba vetra – Nacionalni dodatek, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2010.

SIST EN 1991-1-5, Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-5. del: Splošni vplivi – Toplotni vplivi, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2004.

SIST EN 1991-1-5:A101, Evrokod 1 – Vplivi na konstrukcije – 1-5. Del: Splošni vplivi – Toplotni vplivi – Nacionalni dodatek, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2009.

SIST EN 1991-2, Evrokod 1 – Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije – 2. Del: Prometna obtežba mostov, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2004.

SIST EN 1992-1-1, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1.del: Splošna pravila in pravila za stavbe, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2004.

SIST EN 1992-2, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 2. del: Betonski mostovi – Projektiranje in pravila

za konstruiranje, Evropski komite za standardizacijo CEN, 2005.

SOFISTIK AG., Sofistik 2023 Software for building design, 2023

Strasky, J., Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges, ICE Publishing, 2011.

Structurae, <https://structurae.net/en/structures/sacramento-river-trail-pedestrian-bridge>, 19.8.2025.

Weingerl, T., Pipenbahr, M., Gotovčević, T., Filipič, A., Prvi most grajen po tehnologiji nateznega traku v Sloveniji. Gradbeni vestnik, 72, 206-216, 2023.