

**ELONGACIJA KABLOVA U NAKNADNO PREDNAPREGNUTIM PLOČAMA
TENDON ELONGATION IN POST TENSIONED SLABS**Vladimir Muzalevski, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAĐEVINARSTVO**

Kratak sadržaj – Predmet istraživanja rada obuhvata primenu „Mono-Strand“ i „Multi-Strand“ sistema u naknadno prednapregnutim pločama zgrada, uporednu analizu stvarnih i teorijskih vrednosti elongacija kablova, i opravdanost redukcije elongacije kablova sa pasivnom kotvom. Statističkom obradom podataka izvedeni su empirijski izrazi za izračunavanje elongacija kablova (sa glatkim cevima) u funkciji promene dužine (5-55 m). Usvojena je prosečna elongacija po metru dužinom kabla i formiran je grafik elongacija u funkciji promene dužine kabla sa donjom, gornjom i aritmetičkom vrednošću elongacije u skladu sa tolerancijom od $\pm 7\%$. Izvršena je uporedna analiza kriterijuma tolerancija elongacija prema ACI, BS EN i PTI standardima.

Ključne reči: Naknadno prednapregnute ploče, „Mono-Strand“ sistem, „Multi-Strand“ sistem, Elongacija.

Abstract – The subject of the paper includes the application of Mono-Strand and Multi-Strand systems in post tensioned building slabs, comparative analysis of actual and theoretical values of cable elongation, and justification of single live end cable elongation reduction. By processing the statistically obtained data, empirical expressions for the calculation of cable (with smooth ducts) elongations were derived, as the function of length change (5-55 m). An average elongation per meter of cable length was adopted, and an elongation graph was established as a function of cable length change with the infimum, supremum and characteristic elongation values by considering the tolerance of $\pm 7\%$. A comparative analysis of the elongation tolerance criteria was performed according to ACI, BS EN, and PTI standards.

Keywords: Post tensioned slabs, „Mono-Strand“ system, „Multi-Strand“ system, Elongation.

1. UVOD

Prednapregnuti beton rešava jedan od najvećih problema u betonskim konstrukcijama, a to je njihova težina. Tako su naknadno prednapregnute ploče izložene silama pritiska na način da eliminišu ili redukuju napone zatezanja izazvane stalnim i promenljivim opterećenjima. Napon pritiska usled prednaprezanja u betonu je posledica velikog napona zatezanja u kablovima.

Ova dva napona su direktno zavisna jedan od drugog. Isto tako, sila prednaprezanja i elongacije (izduženja) su u

direktnoj vezi, pa je opravdano prenos sile sa hidraulične prese na anker dokazivati pomoću elongacija, jednoj od najosetljivijih tačaka u tehnologiji naknadno prednapregnutih ploča. Njihove vrednosti se moraju nalaziti u dozvoljenim granicama, kako bi ostale aktivnosti mogle da otpočnu. Stoga, svaki inženjer teži da postigne stvarne elongacije sa što manjim odstupanjem. Međutim, to nije uvek lako postići, zbog čega se često postavlja pitanje: „usled čega nastaju odstupanja u elongacijama?“

Pretpostavljajući da se rad kabla prilikom utezanja nalazi u oblasti Hukovog zakona, prema linearnoj teoriji elongacija kablova se može odrediti kao:

$$\delta = \frac{P \cdot L}{A_p \cdot E_s} \quad (1)$$

gde je P srednja vrednost sile prednaprezanja u kablu, L_t unutrašnja dužina kabla, A_p površina poprečnog preseka kabla i E_s modul elastičnosti užadi koja čine kabl. Izraz (1) je praktičan za kontrolisanje sile prednaprezanja tokom utezanja i obrnuto, ali u stvarnosti tačnost je narušena drugim faktorima opisanim u radu. Neki od njih su gubici usled uvlačenja klina, trenja i ugaonog skretanja, zbog oštećenja cevi tokom instalacije, različitosti projektovanih i stvarnih fizičkih karakteristika materijala, nekalibrisane opreme za utezanje, nepreciznosti merenja, horizontalnih i vertikalnih devijacija trase kabla i drugih. Zbog toga, standardi za projektovanje (ovde su razmatrani [1-4]) načelno dopuštaju određenu toleranciju između stvarnih i proračunskih (teorijskih) vrednosti elongacija.

U težnji za detaljnijim saznanjem ponašanja elongacija kablova u funkciji promene njihove dužine, izvršena je uporedna analiza njihovih stvarnih i teorijskih vrednosti, kako za „Mono-Strand“, tako i za „Multi-Strand“ sistem. Na osnovu podataka iz projekta „Commercial Boulevard District (BP18A)“, Lusail, Katar, ispitano je 3767 kablova prečnika užadi 12,7 mm i 139 kablova prečnika 15,2 mm. Takođe, donet je zaključak o opravdanosti redukcije elongacija kablova usled skraćanja zaštitnih cevi na mestu formiranja pasivne kotve.

Kako podaci imaju tendenciju skupljanja oko određene centralne vrednosti, normalna (Gausova) raspodela je bila logičan izbor za statističku obradu. Na osnovu rezultata, izvedeni su izrazi i napravljen je grafik, koji treba da budu podesni za proveru elongacija prilikom utezanja.

Isto tako, rezultati govore da su PTI standardi [3] (kablovi kraći od 7,62 m (± 6 mm), kablovi duži od 7,62 m ($\pm 7\%$)) najoptimalniji po pitanju kriterijuma dopuštene tolerancije elongacija, za raličku od ACI 318-14 ($\pm 7\%$) [1] i BS EN 13670 [4] ($\pm 7\%$).

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio doc. dr Vladimir Vukobratović.

2. TEHNIČKI OPIS PROJEKTA

Baza podataka stvarnih vrednosti elongacija potiče iz projekta „COMMERCIAL BOULEVARD DISTRICT (BP18A)“. Klijent projekta je Lusail Real Estate Company, glavni izvođač Redco Construction Almana, a podizvođač Freyssinet Menard Qatar. Projekat se nalazi u državi Katar, u mestu Lusail. Sastoji se od 18 različitih zgrada u funkcionalnom i arhitektonskom smislu, sa stambenim, poslovnim, komercijalnim, izložbenim i zabavnim prostorima. Broj podzemnih i nadzemnih etaža se kreće od -3 do 14, a površina ploča za naknadno prednaprezanje od 1086 do 7516 m².

Veoma čvrsto tlo i stenski materijal opredelili su izgradnju objekata u skeletnom konstruktivnom sistemu sa zidovima i ramovima za ukrucenje. Prenos momenata savijanja, transverzalnih i aksijalnih sila između elemenata obezbeđen je monolitnom vezom. Ploče su oslonjene linijski na grede i/ili zidove i tačkasto preko kapitela. Rasponi oslonaca se kreću od 9 do 13,5 m, a debljine ploča od 20 do 80 cm.

3. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE NAKNADNO PREDNAPREGNUTIH PLOČA

Za projektovanje su korišćeni sledeći standardi:

- „ACI“ (ACI 318-14) [1],
- „BSEN 1992“ (EN 1992-1-1) [2]
- „PTI“ (Post Tensioning Institute) [3]

Proračunska analiza je sprovedena u softverima zasnovanim na metodi konačnih elemenata:

- RAM Concept
- ADAPT Builder
- RAPT PT

Geometrijske i mehaničke karakteristike čelika za prednaprezanje usvojene prema ASTM A416-88b, sa niskom relaksacijom čelika i užadima sastavljenih od 7 glatkih žica.

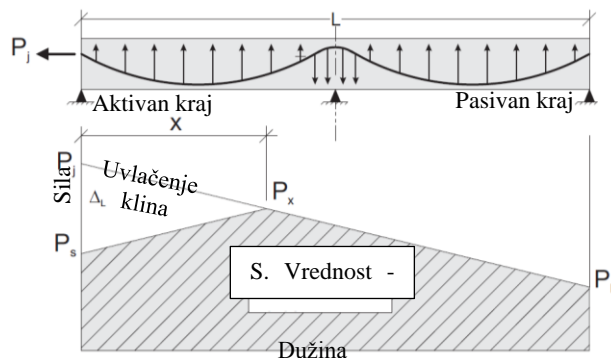
Osnovni parametri za proračun naknadno prednapregnute ploče:

Koeficijent trenja ($\mu = 0,20$ 1/rad), nenamerno ugaono skretanje ($k = 0,0066$ rad/m), modul elastičnosti ($E_p = 195$ GPa), zatezna čvrstoća čelika za prednaprezanje $f_{pk} = 1860$ MPa. Za užad prečnika 12,7 mm prekidna sila $F_{pk} = 184$ kN, sila na presi $F_j = 0,80 \cdot F_{pk} = 147$ kN, dok je za užad prečnika 15,2 mm prekidna sila $F_{pk} = 260$ kN, a sila na presi $F_j = 0,75 \cdot F_{pk} = 195$ kN.

Cilj je da se postigne napon prednaprezanja u pločama u dozvoljenim granicama od 0,7÷2,1 MPa.

4. UPOREDNA ANALIZA STVARNIH I TEORIJSKIH VREDNOSTI ELONGACIJA

Sila prednaprezanja u kابلu treba da se raspodeli čitavom dužinom kabla. Ako su dužine kablova veće od 30 m, smatra se da raspodela sile neće biti dovoljna na pasivnom kraju zbog gubitaka opisanih Slikom 1. U tom slučaju, kablovi duži od 30 m (osim izuzetaka) se projektuju da imaju aktivne kotve na oba kraja, i na taj način sila prednaprezanja je uneta u dovoljnoj količini celom dužinom kabla. Usled ankerisanja pasivnog kraja, deo kabla je skraćen za dužinu ankerovanja (oko 0,9 m). Posledica redukcije utiče na teorijsku vrednost elongacije na sledeći način (Izraz 2):



Slika 1. Sila prednaprezanja nakon trenutnih gubitaka

$$\delta_r = \frac{L_t - 0,9 \text{ m}}{L_t} \cdot \delta_t \quad (2)$$

gde je δ_t teorijska vrednost elongacije kabla.

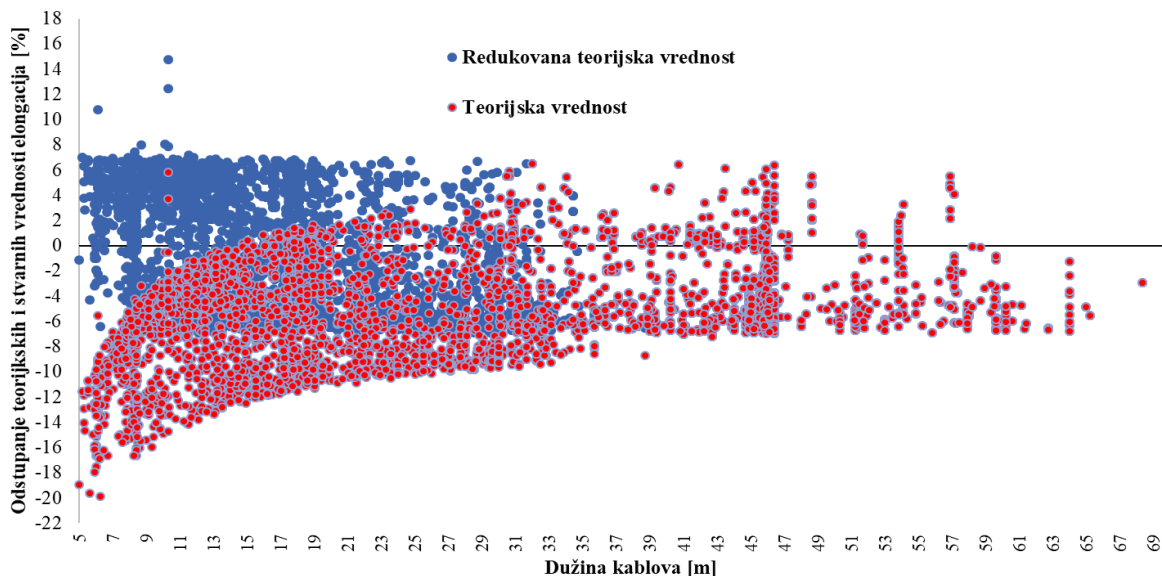
Sa druge strane, metodologija prednaprezanja kablova u „Multi-strand“ sistemu se razlikuje od „Mono-strand“ sistema. Broj užadi, modul elastičnosti, metoda utezanja i drugi parametri nisu zajednički za oba sistema. Dakle, uporedna analiza stvarnih i teorijskih vrednosti elongacija analizirana je za oba sistema ponaosob u skladu sa pomenutim kriterijumima. Utvrđeno je ponašanje kablova sa aktivnim kotvama, kablova sa pasivnom kotvom i opravdana je redukcija teorijske vrednosti elongacija usled skraćenja za dužinu ankerovanja.

5. PARAMETARSKA ANALIZA REZULTATA STVARNIH I TEORIJSKIH VREDNOSTI ELONGACIJA

5.1. „Mono-Strand“ sistem

Sprovedeno je procentualno odstupanje teorijskih i stvarnih vrednosti elongacija kablova za svaku pojedinačnu ploču. Primetno je da redukcija teorijske vrednosti elongacija ima svoj smisao. Idući ka sve kraćim kablovima redukcija postaje sve značajnija. Odnosno, procentualno odstupanje teorijskih i stvarnih vrednosti je sve veće, bez obzira na redukciju. Dakle, kablovi kraći od 30 m su osetljiviji u pogledu procentualne tolerancije elongacija. Budući da je ovaj zaključak zajednički za sve analizirane ploče, svi grafikoni su superponirani u jedan zajednički na Slici 2.

Na Slici 2 se jasno uočavaju dva snopa tačkica koji se razdvajaju idući ka kraćim dužinama kablova i preklapaju idući ka većim dužinama. Redukovane teorijske vrednosti za kablove kraće od 30 m daju bolje rezultate od teorijskih vrednosti bez redukcije. Iz redukcije proizilaze pozitivni rezultati, odnosno stvarne vrednosti elongacija su veće od teorijskih - redukovanih. Ovo govori da su kablovi zadovoljavajuće utegnuti. Njihove negativne vrednosti bi ukazale da zahtevana sila nije prenetna sa prese na kabl u dovoljnoj meri, što bi bilo logično za kablove većih dužina, gde put prenosa sile trpi veće gubitke. Primetno je da odstupanje elongacija kablova dužina 5-10 m značajno varira u odnosu na kablove dužine 50-55 m. Dakle, ne bi bilo adekvatno doneti zaključke na globalnom nivou, koji su zajednički za kablove svih dužina. Izduženja kod kratkih kablova češće su pozitivna za razliku od dugačkih kablova koji dominiraju sa negativnim vrednostima elongacija.



Slika 2. Procentualno odstupanje teorijskih i stvarnih vrednosti elongacija kablova

To znači, da prilikom utezanja treba imati različita očekivanja rezultata izduženja za različite dužine kablova. Kabl od 5 m će lako dostići teorijsku vrednost elongacije, za razliku od kabla dužine 55m, gde sila koja „putuje“ kroz kabl nailazi na mnogo prepreka (gubitaka). Drugim rečima, kablovi različitih dužina se različito ponašaju pri utezanju. Stoga, za dalji razvoj ispitivanja, kablovi su analizirani lokalno na svakih 5 m, a potom u cilju još efikasnijih rezultata, inkrement je smanjen na 1 m.

5.1.1. Primena normalne (Gausove) raspodele

Kako su elongacije osetljive na promenu dužine kabla, njihova reprezentativna vrednost mora da bude određena kao srednja, gornja i donja (u skladu sa tolerancijom standarda). Rezultati ovih graničnih vrednosti su dobijeni primenom normalne (Gausove) raspodele. Odnosno, dobijen je odgovor o raspodeli verovatnoće očekivanih vrednosti elongacija. Pri proračunu normalne raspodele, korišćen je izraz za standardnu devijaciju zasnovan na određenoj broju uzoraka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

gde su x_i podaci skupa, n je ukupan broj podataka i μ je aritmetička sredina. Za određivanje graničnih vrednosti, primenjeno je „68-95-99,7“ empirijsko pravilo. Tačnost je bazirana otklonom od dve standardne devijacije, odnosno uzeto je u obzir 95,45% svih podataka. Granične vrednosti određene su za vrednost elongacija i prosečne vrednosti elongacije po metru kabla.

5.1.2. Diskusija rezultata

Radi lakše analize i diskusije ponašanja elongacija kablova usled prednaprezanja u funkciji njihove dužine, u Tabeli 1 su prikazane vrednosti dobijene statističkom obradom. Posmatrajući pozitivno odstupanje, uočljivo je da kratki kablovi, dužina od 5-30 m, imaju postepeni pad pozitivnih odstupanja elongacija od (očekivane) teorijske vrednosti. Sa porastom dužine kabla, ovaj procenat opada. Dakle, pri utezanju, kratki kablovi će bez problema primiti zadovoljavajuću količinu sile prednaprezanja, dok idući ka dužim kablovima sigurnost u tu pretpostavku opada. Tako, kablovi dužina 25-35 i 45-50m su u najvećoj opasnosti da ne prime dovoljnu količinu sile prednaprezanja.

Što se tiče doprinosa vrednosti elongacija u funkciji porasta dužine kabla, rezultati su očekivani. Sa povećanjem dužine kablova rastu i vrednosti elongacija, kao što je i očekivano prema Izrazu (1). Isti princip analize upotrebljen je za serije kablova sa intervalom od 1 m. Zahvaljujući približno pravilnom prirastu elongacija u funkciji promene dužine kabla, formiran je grafikon aproksimacije elongacija za sve kablove (5-55 m), Slika 3.

Tabela 1. Rezultati individualnih i prosečnih vrednosti elongacija (po metru kabla) u funkciji dužine kabla

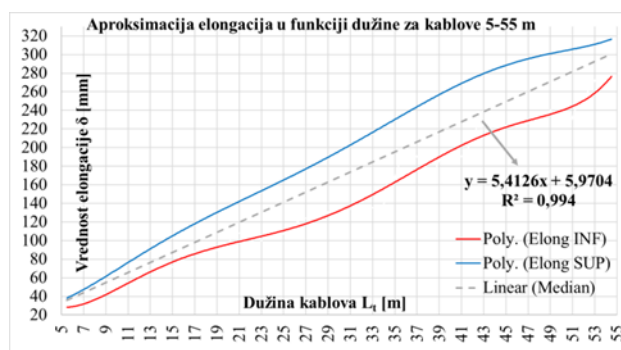
Dužina kablova [m]	$\delta_{INF} \div \delta_{SUP}$ [mm]	$\delta'_{INF} \div \delta'_{SUP}$ [mm/m]	Positivno odstupanje [%]
5-10	30-63	4,9-6,7	74%
10-15	55-96	5,0-7,0	67%
15-20	81-129	5,0-7,0	55%
20-25	99-159	4,5-6,9	38%
25-30	119-182	4,5-6,4	22%
30-35	134-216	4,3-6,7	33%
35-40	185-248	5,0-6,6	37%
40-45	211-276	4,9-6,4	44%
45-50	228-299	5,0-6,5	25%
50-55	257-324	5,0-6,0	37%

Grafikon je namenjen za očitavanje pretpostavljenih budućih elongacija, zasnovanih na matematičkom modelu sa tolerancijom elongacija od $\pm 7\%$. Donja i gornja granična vrednost elongacija udaljene su od aritmetičke vrednosti (isprekidana linija). Najpribližnija funkcija ove izlomljene krive (medijane) bio bi polinom šestog stepena, međutim, kako i linearna funkcija adekvatno aproksimira, radi pojednostavljenja opravdano ju je iskoristiti. Primećuje se da se granična odstupanja od medijane sužavaju krećući se od dužih ka kraćim kablovima. Kraći kablovi su osetljiviji po pitanju dozvoljene tolerancije, njihova sloboda greške je mnogo manja u odnosu na duže kablove. Na primer, kabl od 14 m sa elongacijom od +6 mm odstupa od teorijske vrednosti 6,6%, dok kabl od 5,2 m sa elongacijom od +2 mm odstupa od teorijske vrednosti 6,9%. Duži kabl od npr. 46 m, sa izduženjem od +18 mm odstupa od teorijske vrednosti 6,0%. Razmatrajući ovakve rezultate, dovodi se u pitanje da li je merodavno kratke kablove 5-15 m ocenjivati u procentualnoj toleranciji?

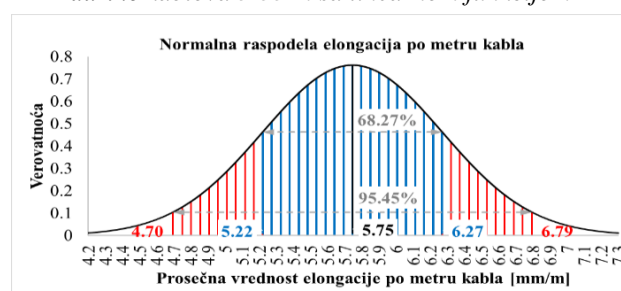
Relevantnije je odstupanje takvih kablova ocenjivati u milimetrima, a ne u procentima.

Kada je reč o prosečnim vrednostima elongacije kabla po metru dužnom, rezultati ne osciluju mnogo. Svi kablovi se

nalaze u intervalu između 5,4 i 6,1 mm po metru kabla. Dakle, očito da dužina kabla ne utiče mnogo na prirast elongacije po metru. Samo kablovi kraći od 10 m spadaju u „rizičnu grupu“. U tom slučaju, opravdano je usvojiti prosečnu vrednost elongacije kabla po metru dužnom za sve kablove u „Mono-Strand“ sistemu (10-55 m), prikazanu na Slici 4.



Slika 3 Grafikon aproksimacije elongacija u funkciji dužine kabla 5-55 m sa linearnom funkcijom



Slika 4. Normalna (Gausova) raspodela elongacija po metru za kablove 5-55 m

Dakle, statističkom obradom podataka, pomoću normalne (Gausove) raspodele, formulisani su sledeći izrazi za određivanje približnih vrednosti elongacija kablova u funkciji promene dužine za „Mono-strand“ sistem:

$$\text{Kablove dužina 5-55 m:} \\ \delta = 5,41 \cdot L_t + 5,9704 \text{ [mm]} \quad (4)$$

$$\text{Kablove dužina 10-55 m:} \\ \delta = 5,75 \cdot L_t \text{ [mm]} \quad (5)$$

5.2. „Multi-Strand“ sistem

Analizirajući pojedinačne ploče u „Multi-strand“ sistemu, rezultati su nešto drugačiji. Teorijske vrednosti elongacija kablova dužine do 10 m, odstupaju značajno negativno. U tom slučaju je redukcija opravdana. Međutim, kablovi dužina većih od 10 m donose rezultate koji su približniji teorijskoj vrednosti elongacija od redukovanih.

Zbog toga nastaje pitanje, da li je uopšte opravdano redukovati kablove dužina većih od 10 m u „Multi-strand“ sistemu?

Kako je broj podataka značajno manji u odnosu na kablove u „Mono-strand“ sistemu, pouzdanost zaključaka je automatski smanjena, te uloga rezultata formiranih jednačina po istom statističkom principu, služi samo kao početak budućim istraživanjima:

$$\text{Kablove dužina 20-47 m: } \delta = 5,45 \cdot L_t + 16,564 \text{ [mm]} \quad (6)$$

$$\text{Kablove dužina 8-20 m:} \\ \delta = 6,40 \cdot L_t \text{ [mm]} \quad (7)$$

6. ANALIZA TOLERANCIJE ELONGACIJA U ZAVISNOSTI OD RAZLIČITIH STANDARDA

Stvarne i teorijske vrednosti elongacija su neizbežne, te standardi propisuju različite tolerancije odstupanja:

- „ACI“ (ACI 318-14, $\pm 7\%$) [1]
- „BS EN 13670“ ($\pm 5\%$) [4]
- „PTI“ ($\pm 7\% \leq 7,62 \text{ m} \leq \pm 6 \text{ mm}$) [3]

7. ZAKLJUČAK

Uporednom analizom stvarnih i teorijskih vrednosti elongacija u „Mono-strand“ sistemu došlo se do zaključka da se ponašanje kablova u smislu pouzdanosti dobijanja adekvatnih elongacija ogleda u tome da su „najrizičnija grupa“ kablovi koji su na prelazu onih koji se utežu na jednom i na oba kraja (20-30 m). Kratki kablovi su uglavnom na strani sigurnosti, dok dugački u velikoj meri zavise od kvaliteta instalacije.

Kablovi u „Multi-strand“ sistemu u 97,8% slučajeva imaju pozitivna odstupanja. Posledica ovakvih rezultata ogleda se u drugačijoj vrsti zaštitnih cevi (minimalna oštećenja) i sistemu prednapreznja.

Opravdanost redukcije elongacija kablova sa pasivnom kotvom u „Mono-strand“ sistemu ima smisla, za ralik od „Multi-strand“ sistema, gde kablovi duži od 10 m „ne osete“ uticaj skraćenja dužine prednapreznja.

Statističkom obradom podataka, pomoću normalne (Gausove) raspodele, formulisani su empirijski izrazi koji imaju praktičnu vrednost, u smislu ocene očekivanih elongacija.

Pomoću statističkih rezultata, formiran je grafik elongacija u funkciji promene dužine kabla za „Mono-strand“ sistem. Grafik je podesan za izvođenje prednapreznja kablovima sa glatkim cevima, gde se u funkciji dužine kabla (5-55 m) očitavaju vrednosti očekivanih elongacija sa tolerancijom od $\pm 7\%$.

Poređenjem ACI, PTI i BS EN standarda, najoptimalnije tolerancije potiču od PTI standarda, gde se vrednovanje odstupanja meri u milimetrima, a ne u procentima, što je posebno korisno za kratke kablove.

8. REFERENCE

- [1] ACI 318-14. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14). American Concrete Institute.
- [2] EN 1992-1-1 (2004). Design of concrete structures. Brussels: European Commite For Standardization.
- [3] PTI-Price, Russell L. (2007). Frequently Asked Questions Field Elongation Measurements. Post-Tensioning Institute.
- [4] BS EN 13670 (2009). Execution of Concrete Structures. British Standards Institutiion.

Kratka biografija:



Vladimir Muzalevski rođen je u Novom Sadu 1995. god. Osnovne akademske studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2018. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti prednapregnutih betonskih konstrukcija odbranio je 2021. god.
Kontakt: vmuzalevski@gmail.com