

Djelovanje temperature u mostovima sandučastog poprečnog presjeka

Željka Radovanović, Mladen Ulićević

Ključne riječi

sandučasti poprečni presjek, most, armirani beton, djelovanje temperature, pješački most u Podgorici, Eurokod 1

Key words

bridge, box-shaped cross section, reinforced concrete, temperature action, pedestrian bridge in Podgorica, Eurocode 1

Mots clés

pont, coupe transversale en forme de caisson, béton armé, action de température, pont piéton à Podgorica, Eurocode 1

Ключевые слова

мост, ящикообразное поперечное сечение, железобетон, действие температуры, пешеходный мост в Подгорице, Еврокод 1

Schlüsselworte:

Brücke, Kastenquerschnitt, Stahlbeton, Temperatureinfluss, Fussgängerbrücke in Podgorica, Eurokode 1

Ž. Radovanović, M. Ulićević

Izvorni znanstveni rad

Djelovanje temperature u mostovima sandučastog poprečnog presjeka

Prikazani su rezultati vlastitih istraživanja djelovanja temperaturnih promjena na konstrukciju mostova sandučastih poprečnih presjeka. Opisano je ispitivanje provedeno na pješačkom mostu u Podgorici. Primjenom metode regresijske analize postavljeni su matematički odnosi i određene jednačbe ovisnosti srednjih temperatura u betonskoj konstrukciji o temperaturama okolišnog zraka u hladu. Jednačbe su uspoređene s jednačbama drugih autora, a također i s krivuljom iz Eurokoda 1.

Ž. Radovanović, M. Ulićević

Original scientific paper

Influence of temperature on box girder bridges

Results obtained by the study of temperature action on structural assemblies of box girder bridges are presented. The testing conducted on a pedestrian bridge in Podgorica is described. Based on regression analysis, mathematical relations were set, and equations were developed so as to determine in which way mean temperatures in the concrete structure are influenced by external air temperatures in the shade. These equations are compared with equations developed by other authors, and also with the curve presented in Eurocode 1.

Ž. Radovanović, M. Ulićević

Ouvrage scientifique original

L'influence de température sur les ponts caissons

Les résultats obtenus au cours de l'étude des effets de température sur les ponts caissons sont présentés. Les essais faits sur un pont piétons à Podgorica sont décrits. En se basant sur l'analyse de régression, les relations mathématiques ont été établies et les équations ont été développées afin de définir la dépendance entre températures moyennes dans la construction de béton et températures de l'air ambiant à l'ombre. Ces équations ont été comparées avec les équations développées par d'autres auteurs, et également avec la courbe présentée à l'Eurocode 1.

Ж. Радованович, М. Уличевич

Оригинальная научная работа

Действие температуры в мостах ящикообразного поперечного сечения

В работе показаны результаты собственных исследований действия температурных изменений на конструкцию мостов ящикообразных поперечных сечений. Описано проведённое испытание на пешеходном мосте в Подгорице. Применением метода регрессионного анализа восстановлены математические отношения и выведены уравнения зависимости значений средних температур в бетонной конструкции от значений температуры окружающего воздуха в тени. Уравнения сопоставлены с уравнениями других авторов, а также и с кривой Еврокода 1.

Ž. Radovanović, M. Ulićević

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Temperatureinfluss in Brücken mit Kastenquerschnitt

Dargestellt sind Ergebnisse eigener Untersuchungen der Temperatureinflüsse auf die Konstruktion von Brücken mit Kastenquerschnitt. Beschrieben ist die Untersuchung durchgeführt an der Fussgängerbrücke in Podgorica. Durch Anwendung der Methode der Regressionsanalyse wurden die mathematischen Verhältnisse aufgestellt und die Gleichungen der Abhängigkeit der mittleren Temperaturen in der Betonkonstruktion von den Temperaturen der umgebenden Luft im Schatten festgelegt. Die Gleichungen sind mit Gleichungen anderer Autoren und der Kurve aus Eurokode 1 verglichen.

Autori: Mr. sc. **Željka Radovanović**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Mladen Ulićević**, dipl. ing. građ., Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Podgorica

1 Uvod

Posljednjih je godina znatno poraslo zanimanje za proučavanje ponašanja mosnih konstrukcija izloženih temperaturnim promjenama. Djelovanje temperature zavisi od geografske lokacije i meteoroloških uvjeta na mikrolokaciji građevine, pa je stoga ovo djelovanje teško precizno definirati. Temperaturne su promjene u okolišu stohastičkog karaktera i vrlo je teško, ako ne i nemoguće, konstituirati teorijski model koji točno definira djelovanje temperature. Stoga uspješnost postojećih teorijskih modela najčešće možemo ocijeniti samo usporedbom njihovih rezultata s izmjerenim vrijednostima temperature u materijalu samih konstrukcija.

Eksperimentalna istraživanja utjecaja temperature na mostove započela su još prije pola stoljeća, ali tek u posljednjih dvadesetak godina, zahvaljujući napretku mjerne tehnike, došlo se u ovom području do značajnih rezultata.

Rezultati istraživanja posljednjih četrdeset godina, mahom na mostovima grednog sustava u srednjoeuropskoj klimi, ugrađeni su u evropsku normu koja definira utjecaj temperature na mostove, EN 1991-1-5, [7]. Uzimajući činjenicu da je na tom polju ostalo još mnogo neistraženih pitanja, navedena evropska norma ostavlja mogućnost da se djelovanje temperature na okvirne, lučne, ovješene i viseće mostove može odrediti i posebnim studijama. Mnogi parametri kojima se definiraju najveće i najmanje komponente jednolike promjene u mostovima i temperaturne razlike mogu ili moraju biti utvrđene nacionalnim dodacima država članica Evropske unije.

Tranzicijskim zemljama predstoji usvajanje eurokodova kao nacionalnih norma, a za njihovu primjenu nužno je odrediti nacionalne dodatke u kojima će se dati parametri koji vrijede za odgovarajuće klimatsko područje ili će se usvojiti parametri koji se već nude kao rješenja u EN 1991-1-5, [7]. Prvi korak pri određivanju utjecaja temperature na konstrukcije bit će određivanje karata izoterma, funkcija ovisnosti jednolike temperature od temperatura zraka u hladu i određivanje grafikona temperaturnih razlika. Vlastita baza eksperimentalnih istraživanja prvi je korak na putu usvajanja parametara kojima se definira utjecaj temperature na mostove u mediteranskom području.

Pri izgradnji amiranobetonskog pješačkog mosta „Zabjelo“ u Podgorici ugrađeni su instrumenti za praćenje temperature i pomaka u konstrukciji. Provedene su serije mjerenja od početka listopada 2006. do kraja lipnja 2007. godine.

Na osnovi iskustava drugih istraživača, koji su se bavili eksperimentalnim istraživanjem djelovanja temperature na mostove, usvojen je položaj mjerne opreme, dinamika mjerenja, metodologija i način obrade podataka.

Uporabljena je vrlo pouzdana mjerna oprema s malom pogreškom mjerenja, koja prema deklaraciji proizvođača i dosadašnjem iskustvu pripada opremi za dugotrajna mjerenja.

Podaci su se očitavali periodično, u serijama mjerenja tijekom građenja mosta i nakon njegova puštanja u upotrebu. Provedene su dvije serije mjerenja prije postavljanja završnog sloja na pješačkoj stazi i tri serije mjerenja tijekom upotrebe, kojima su obuhvaćene ekstremno niske temperature zraka, ekstremne temperaturne razlike tijekom dana i ekstremno visoke temperature zraka.

U obradi podataka uporabljeni su programski paketi EXCEL i Curve filter.

Podaci o izmjerenim satnim temperaturama zraka u hladu, o brzini vjetra, sunčevu zračenju i vlažnosti zraka na meteorološkoj stanici u Podgorici dobiveni su od ovlaštene ustanove, Republičkog hidrometeorološkog zavoda Crne Gore (RHMZ).

Na osnovi izmjerenih podataka o temperaturama u karakterističnim betonskim presjecima u kojima je provedeno i mjerenje dobivenih podataka o temperaturama zraka u hladu, postavljene su matematičke ovisnosti radi definiranja jednolike komponente temperature u betonu sandučastih mostova.

Vlastite jednadžbe ovisnosti srednjih temperatura u betonu u funkciji temperatura zraka u hladu uspoređene su s jednadžbama drugih autora i krivuljom kojom je ta ovisnost definirana u EN 1991-1-5, [7].

2 Djelovanje promjene temperature prema normi

U općem slučaju, djelovanje temperature uzrokuje nelinearnu temperaturnu promjenu u konstrukciji. EN 1991-1-5, [7] definira jednoliku komponentu kao ravnomjerno raspoređenu temperaturu po poprečnom presjeku konstrukcije, a temperaturnu razliku kao razliku temperature na vanjskim plohama i temperature na određenoj dubini presjeka.

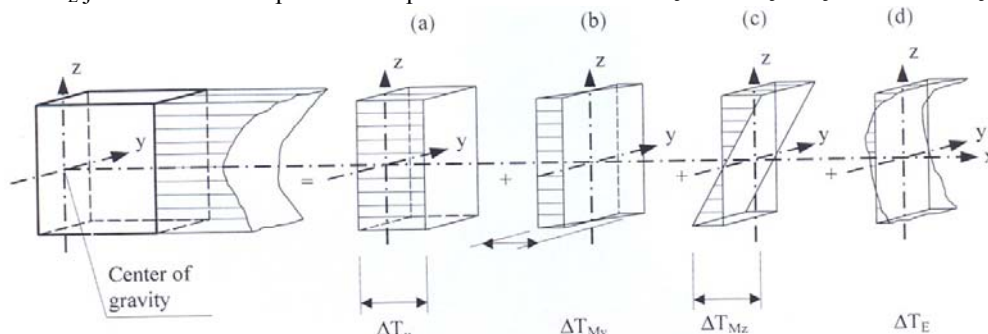
Raspodjela temperature po presjeku mosta dijeli se na dva dijela:

- jednoliku temperaturu ili srednju temperaturu u mostu ili kako se još vrlo često zove efektivnu temperaturu u mostu
- promjenljivu temperaturu po presjeku mosta koja se sastoji od linearne i nelinearne komponente.

Prema EN 1991-1-5 temperaturni profil može biti podijeljen na četiri dijela, kao što je prikazano na slici 1.:

- ΔT_u je jednolika komponenta
- ΔT_{My} je komponenta linearne temperaturne razlike oko osi Z

- ΔT_{Mz} je komponenta linearne temperaturne razlike oko osi Y
- ΔT_E je nelinearna komponenta temperaturne razlike.



Slika 1. Komponente raspodjele temperature u konstrukcijskom elementu, [7]

Jednolika komponenta ΔT_u jest razlika ekstremne, najmanje ili najveće efektivne srednje temperature T_N i temperature u trenutku zatvaranja konstrukcije T_0 .

Temperaturna razlika ΔT_M izaziva savijanja i zaokret u konstrukciji. Ona varira linearno po visini poprečnog presjeka. Registriraju se i horizontalne temperaturne razlike, ali su one manjeg intenziteta od vertikalnih temperaturnih razlika i u projektiranju konstrukcija one se rijetko uzimaju u obzir, osim pri izboru ležajeva mostova.

Nelinearna komponenta temperaturne razlike ΔT_E uzrokuje nelinearna unutrašnja naprezanja u konstrukciji ili takozvana izjednačavajući naprezanja u konstrukciji.

Jednolike temperature su prije svega mjerodavne za širenje i skupljanje konstrukcije mosta. Ovakva se tvrdnja vrlo često sreće u literaturi i u suštini ona je točna samo za konstrukcije kod kojih nisu spriječeni pomaci.

Jasno je da na realnoj konstrukciji temperatura ni u jednom trenutku ne djeluje jednolično, već je kombinacija svih triju komponenata: jednolike, linearne i nelinearne.

2.1 Jednolika komponenta – srednja temperatura u betonu

Mostovi su u EN 1991-1-5, [7] podijeljeni na tri tipa: čelične, spregnute i betonske. Betonska rasponska konstrukcija mostova (tip 3) dijeli se na betonske ploče, betonske grede i betonske sandučaste nosače.

U normi se definiraju najmanje i najveće vrijednosti jednolike komponente temperature. Ove su vrijednosti u vezi s najvećim i najmanjim temperaturama zraka u hladu koje se očekuju na lokaciji građevine. Vrijednosti najvećih i najmanjih temperatura zraka u hladu, za poratno razdoblje od 50 godina, ostavljeno je da odredi svaka od članica Europske unije za svoj teritorij na kartama izoterma.

Nakon očitavanja najmanje odnosno najveće temperature zraka u hladu s karata, iz dijagrama (slika 2.) očitavaju se najmanja odnosno najveća jednolika komponenta temperature u konstrukciji.

Karakteristična najveća vrijednost temperature koja djeluje na most i izaziva skraćnje konstrukcije dobiva se iz jednadžbe:

$$\Delta T_{N, \text{con}} = T_0 - T_{e, \text{min}} \quad (1)$$

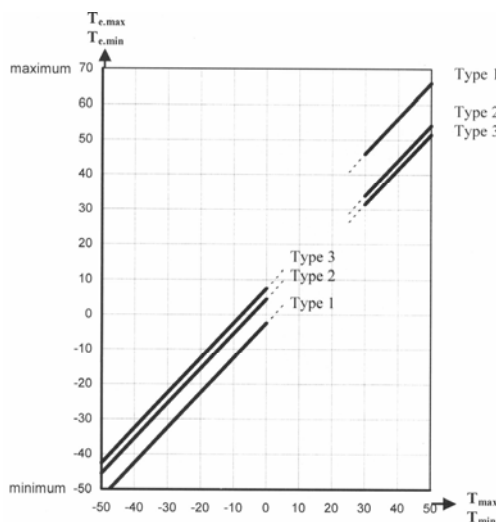
Karakteristična maksimalna vrijednost temperature koja djeluje na most i izaziva širenje konstrukcije dobiva se iz jednadžbe:

gdje je:

$$\Delta T_{N, \text{exp}} = T_{e, \text{max}} - T_0 \quad (2)$$

gdje je:

- $T_{e, \text{min}}$ - najmanja jednolika komponenta temperature
- $T_{e, \text{max}}$ - najveća jednolika komponenta temperature
- T_0 - temperatura zatvaranja konstrukcije.



Slika 2. Odnos između najmanje/najveće temperature zraka u hladu ($T_{\text{min}}/T_{\text{max}}$) i najmanje/najveće jednolike komponente temperature ($T_{e, \text{min}}/T_{e, \text{max}}$), [7]

Temperaturu zatvaranja konstrukcije, T_0 , ako je moguće predvidjeti kad će se zatvarati konstrukcija, treba uzeti prema dominantnim temperaturama tijekom monolitizacije konstrukcije. Ako nije poznato kada će konstrukcija biti monolitizirana uzima se da je $T_0 = 10^\circ\text{C}$.

2.2 Temperaturne razlike – vertikalna komponenta

Norma EN 1991-1-5 definira temperaturne razlike na dva načina: samo kao linearnu temperaturnu promjenu od gornjeg do donjeg ruba konstrukcije (za mostove jed-

nostavne geometrije) ili kao vertikalnu promjenu temperature po visini presjeka u koju su uključene i nelinearne promjene prouzrokovane sunčevim zračenjem i odbijanim zračenjem od tla i okolnih građevina. Ovdje ćemo više govoriti samo o vertikalnim promjenama temperature po visini presjeka u kojoj je sadržana i nelinearna promjena.

Vertikalne temperaturne razlike ΔT sadrže i nelinearni dio komponente ΔT_M , samo samouravnotežavajuću komponentu ΔT_E i mali dio jednolike promjene ΔT_N . Preporučene vrijednosti temperaturnih razlika za betonske mostove koje se nelinearno mijenjaju po visini poprečnog presjeka, kako ih definira norma EN 1991-1-5, dane su u tablici 1.

Tablica 1. Vrijednosti ΔT za betonske mostove prema EN 1991-1-5, [7]

Visina rasponske konstrukcije	Debljina površinskog sloja	Temperaturna razlika							
		Zagrijavanje			Hlađenje				
		ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4	
m	mm	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0,8	bez površinskog sloja hidroizolacija ¹⁾	15,4	4,0	2,0	12,8	3,3	0,9	5,6	
		23,6	5,0	1,4	12,8	3,3	0,9	5,6	
	50	17,8	4,0	2,1	9,8	2,4	1,2	5,8	
	100	13,5	3,0	2,5	7,6	1,7	1,5	6,0	
	150	10,0	2,5	2,0	5,8	1,3	1,7	6,2	
	200	7,5	2,1	1,5	4,5	1,0	1,9	6,0	
1,0	bez površinskog sloja hidroizolacija ¹⁾	15,4	4,0	2,0	13,4	3,0	0,9	6,4	
		23,6	5,0	1,4	13,4	3,0	0,9	6,4	
	50	17,8	4,0	2,1	10,3	2,1	1,2	6,3	
	100	13,5	3,0	2,5	8,0	1,5	1,5	6,3	
	150	10,0	2,5	2,0	6,2	1,1	1,7	6,2	
	200	7,5	2,1	1,5	4,3	0,9	1,9	5,8	
1,5	bez površinskog sloja hidroizolacija ¹⁾	15,4	4,0	2,0	13,7	1,0	0,6	6,7	
		23,6	5,0	1,4	13,7	1,0	0,6	6,7	
	50	17,8	4,0	2,1	10,6	0,7	0,8	6,6	
	100	13,5	3,0	2,5	8,4	0,5	1,0	6,5	
	150	10,0	2,5	2,0	6,5	0,4	1,1	6,2	
	200	7,5	2,1	1,5	5,0	0,3	1,2	5,6	

¹⁾ Ove vrijednosti predstavljaju gornje granične vrijednosti za tamnu boju

U statički neodređenim konstrukcijama, kao što su okvirne konstrukcije, zahtijeva se uzimanje u obzir istodobnog djelovanja obiju komponenata temperature. Takva kombinacija djelovanja dana je jednadžbama:

$$\Delta T_{M,\text{heat}} \text{ (or } \Delta T_{M,\text{cool}}) + \omega_N \Delta T_{N,\text{exp}} \text{ (or } \Delta T_{N,\text{con}}) \quad (3)$$

ili

$$\omega_M \Delta T_{M,\text{heat}} \text{ (or } \Delta T_{M,\text{cool}}) + \Delta T_{N,\text{exp}} \text{ (or } \Delta T_{N,\text{con}}) \quad (4)$$

Preporučene vrijednosti za ω_M i ω_N su $\omega_N = 0,35$ i $\omega_M = 0,75$

3 Vlastita eksperimentalna istraživanja

3.1 Most „Zabjelo“, ugradnja mjerne opreme

Armiranobetonski pješački most „Zabjelo“ u Podgorici okvirna je konstrukcija s lučnom gredom, sandučastoga poprečnog presjeka. Svijetli raspon mosta je 28 m, a osi oslonaca na razmaku su 33 m (slika 3.).

Visina glavnog nosača varira od 0,9 m u tjemenu do 2,45 m u ležaju. Smjer pružanja pješačkog mosta je sjever-jug.

Rasponska je konstrukcija kruto povezana s osloncima te su u proračunskom modelu temperature, u kojem je konstrukcija podvrgnuta djelovanju temperature, odabrane na osnovi vrijedećega

pravilnika za opterećenja na mostovima PTNOVOM 1990 [10], utjecaji temperature u okolišu vrlo su izraženi. U glavnom projektu konstrukcije mosta dobiveno je da je za sve presjeke glavnog nosača mjerodavna kombinacija stalnoga, prolaznog opterećenja i djelovanja temperature.

Investitor mosta u projektom je zadatku postavio uvjet da promet na prometnici koju most preotava tijekom gradnje mora teći neometano. Stoga je most građen u tri faze. U prvoj fazi izgrađeni su oslonci i „konzolni“ dio konstrukcije. U drugoj fazi izvedena je montažna greda, raspona 14 m, koja je betonirana na posebnoj skeli u krugu gradilišta i zatim montirana

pomoću dviju autodizalica na „konzolni“ dio konstrukcije. U trećoj fazi monolitizirani su „konzolni“ dijelovi i montažne grede. Takav je projektni zadatak znatno otežao gradnju mosta, a i montažu mjerne opreme učinio je složenom.



Slika 3. Pogled na most „Zabjelo“ u Podgorici



Slika 4. Montaža središnje grede

Iza oslonaca mosta ostavljen je prostor u kojem je bilo planirano da se napravi prostorija za smještaj instrumenata. Kako se moglo očekivati da dulji produžni kabeli tijekom izvođenja budu oštećeni, odustalo se od skupljanja svih produžnih kabela u jedno područje. Odlučeno je da se produžni kabeli *termoparova* i mjernih traka grupiraju u sedam sabirnih kutija, čiji je položaj i broj bio diktiran fazama betoniranja konstrukcije i brojem kanala na opremi za prihvaćanje izmjerenih podataka. Ugradnja mjerne opreme bila je sinkronizirana s gradnjom mosta. Način postavljanja instrumenata bio je uvjetovan načinom izvođenja i fazama betoniranja konstrukcijskih elemenata. Na slici 5. vide se *termoparovi* koji su postavljeni u rebru sanduka. Svi su *termoparovi* pričvršćeni uz plastičnu cijev, a cijev je postavljena u projektirani položaj i privezana žicom za armaturni koš.

Svi produžni kabeli mjerne opreme koja se ugrađuje u beton, postavljeni su u elastične rebraste PVC cijevi, a produžni kabeli mjernih traka, koje se lijepe za površinu betona, ugrađeni su u PVC kutije (slika 6.).



Slika 5. Mjerna oprema u rebru u presjeku 1-1



Slika 6. Sabirna kutija u gornjoj ploči sanduka presjeka 2-2

Pokazalo se da je prikazanim načinom ugradnje mjerne opreme postignuta najbolja zaštita jer su u prvom mjerjenju sva mjerna mjesta funkcionirala osim jednog *termopara* koji je mjerio vanjsku temperaturu.

3.2 Program ispitivanja

Radi registriranja relevantnih podataka koji bi pomogli upoznavanju utjecaja temperature na mostove u konkretnom podneblju, mjerenja na mostu provedena su tijekom gradnje mosta i njegove upotrebe, u tri karakteristična presjeka (slika 7.), u pet faza mjerenja (dvije jesenje faze i po jedna zimska, proljetna i ljetna).

Mjerenja su obavljena u danima registracije ekstremnih vremenskim prilika i u danima sa stabilnim vremenskim prilikama, bez kiše i vjetra. Jesenja su i proljetna mjerenja imala velike dnevne varijacije temperatura. Zimska su se mjerenja provodila u danima bez kiše, s najnižim temperaturama zraka u zimi 2006./2007. Ljetna serija mjerenja provedena je u danu najvećeg sunčeva zračenja i s najvećom temperaturom zraka od 36 °C.

U svakoj od navedenih faza na građevini i u njezinoj neposrednoj okolini mjereni su sljedeći podaci:

- očitavane su temperature u betonu mosta
- očitavane su dilatacije u betonu i u armaturi
- mjerene su i temperatura zraka u hladu i vlažnost zraka neposredno ispod mosta
- za svako očitavanje registriran je položaj sunca u odnosu na građevinu i zapisivan komentar o zapaženim vremenskim promjenama: naoblačenju ili brzini vjetra
- nakon završetka gradnje mosta, u zimskoj, proljetnoj i ljetnoj seriji mjerenja mjerene su i relativne vertikalne deformacije konstrukcije.

Za svaku od serije mjerenja dobiveni su od RHMZ podaci o temperaturama zraka u hladu, vlažnosti zraka, sunčevu zračenju i brzini vjetra, registrirani za svaki sat na meteorološkoj stanici Podgorica dva dana prije početka mjerenja i u dane mjerenja.

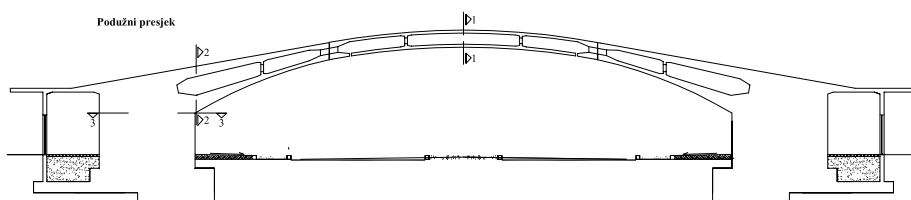
Nakon provedenog mjerenja na građevini, svaku fazu mjerenja pratilo je ispitivanje čvrstoće betona i modula elastičnosti na serijama uzoraka koji su tijekom gradnje uzimani iz karakterističnih konstrukcijskih elemenata.

3.3 Položaj i karakteristike mjerne opreme

Plan mjerenja obavljen je prema uputama za postavljanje instrumenata na mostovima američke Federalne administracije za autoceste, [17], kao i na osnovi drugih referentnih izvora.

Presjeci koji su praćeni označeni su na slici 7.

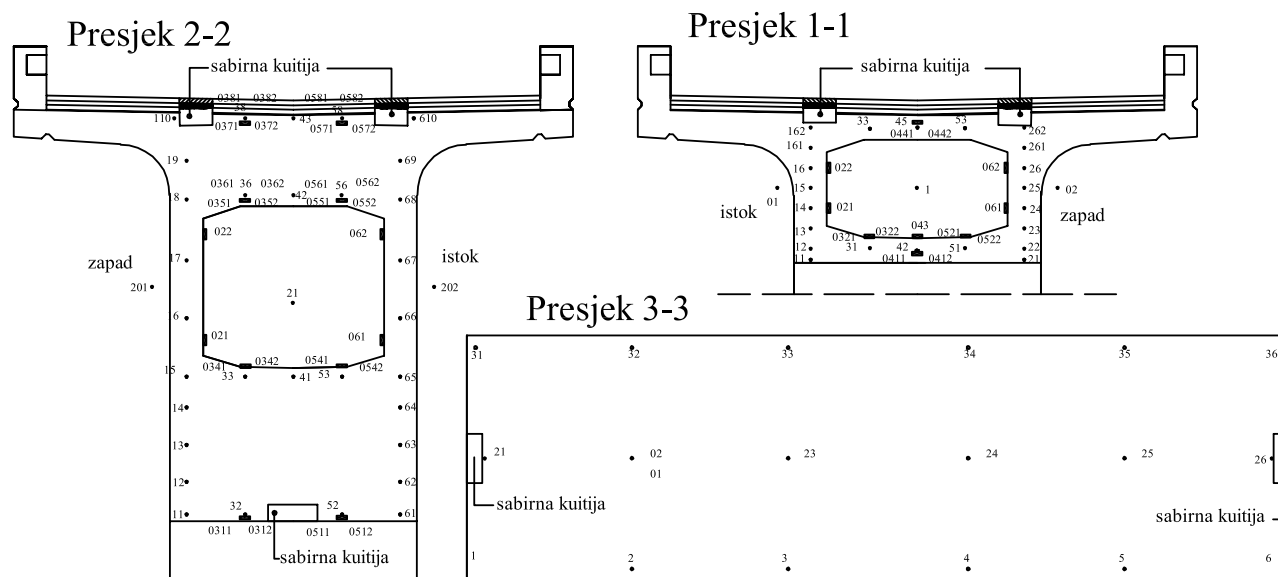
Ukupno je 76 *termoparova* i 50 mjernih traka ugrađeno tokom izgradnje mosta. Ovaj most ima relativno kompliciran oblik, pa su stoga položaj i način ugradnje mjerne opreme morali biti temeljito isplanirani.



Slika 7. Uzdužni presjek mosta s označenim poprečnim presjecima na kojima su postavljeni instrumenti

Mjerna se oprema ugrađivala u više faza koje su ovisile o fazama betoniranja konstrukcijskih elemenata mosta. Položaj *termoparova* i mjernih traka u poprečnom presjeku i položaj sabirnih kutija prikazan je na slici 8.

Termoparovi tipa T izabrani su zbog svog temperaturnog opsega (od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$) i točnosti mjerenja ($\pm 0,06\%$ mjerenja $+ 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) (slike 9. i 10.). *Termopar* tipa T izrađen je s ojačanim i vodootpornim krajem koji je osjetljiv na promjenu temperature. Ovi *termoparovi* ugrađeni su u betonsku masu i mjere temperaturu unutar betona. Ugrađeni su i *termoparovi* koji mjere temperaturu unutar sanduka i *termoparovi* koji mjere temperaturu vanjskog zraka.



Slika 8. Karakteristični poprečni presjeci s označenim položajem termoparova i mjernih traka

Položaj sabirnih kutija određen je na temelju faza betoniranja konstrukcije i karakteristika raspoložive opreme za očitavanje podataka (jedan *data logger* TDS 303 i jedan *switching box* ISB-50C).

3.3.1 Mjerenje temperature

Termoparovi tipa T, proizvod kompanije TML-Japan, uporabljeni su za mjerenje temperatura u poprečnom presjeku mosta.



Slika 9. Termopar tipa T s produžnim kabelom od 3 m

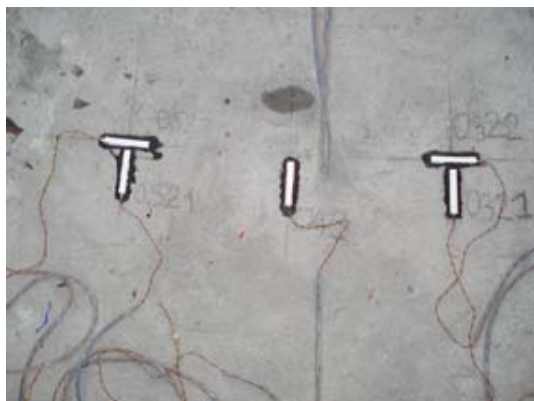


Slika 10. Termopar tipa T ugrađen u gornju ploču sandučastog presjeka

3.3.2 Mjerenje relativnih deformacija

Relativne deformacije unutar betonskog sanduka, po njegovu unutrašnjem opsegu, mjerile su se mjernim trakama tipa WFLM-60-11-2LT (slika 11.). Kako beton

ima nehomogenu strukturu, izabrane su mjerne trake s najduljom bazom mjerenja za ovaj tip traka (60 mm). Deklarirana normalna operativna temperatura ovih traka jest od -20°C do $+80^{\circ}\text{C}$.



Slika 11 Mjerne trake tipa WFLM-60-11-2LT



Slika 12. Mjerne trake tipa PMFL-60-2LT

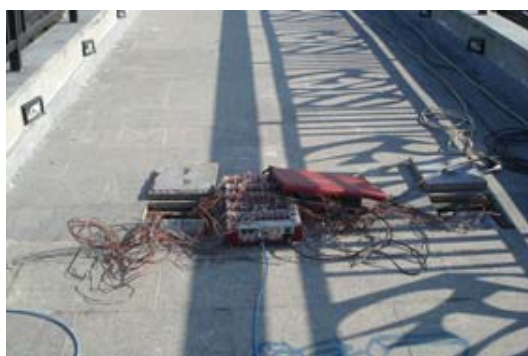
Relativne deformacije unutar betona mjerene su ugradnim mjernim trakama tip PMFL-60-2LT (slika 12.). Ovaj tip traka posebno je projektiran za mjerenja relativnih deformacija unutar betona i preporučuje se za dugotrajna mjerenja.

Relativne deformacije u armaturi mjerene su mjernim trakama tip PFL-30-11-3LT. Taj tip traka ne preporučuje se za dugotrajna mjerenja.

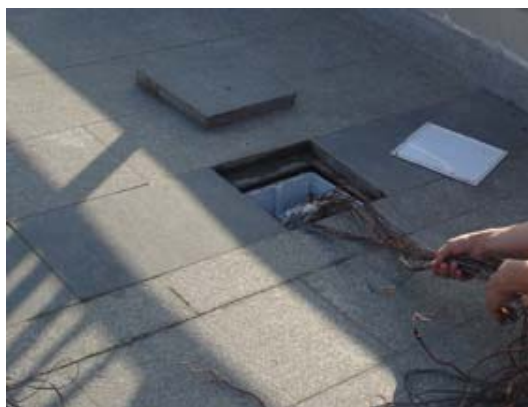
Sve ugrađene mjerne trake imaju dodatnu žicu za kompenzaciju temperature okoliša i deklariranu točnost od $\pm 0,05\%$ mjerenja $+3\ \mu\epsilon$. Naručene su i ugrađene kao kalibrirane s produžnim kablom od 2 do 3 m koji su bili najkraći mogući, ali dovoljni da dosegnu do sabirnih kutija u kojima se smještaju (slika 6.). Svi termoparovi i mjerne trake na kraju produžnog kabela označeni su brojem koji je otisnut na plastičnoj podlozi. Taj broj odgovara broju sa sheme mjernih mjesta.

Produžni su kabeli termoparova i mjernih traka zaštićeni PVC cijevima kad se radi o opremi koja prolazi kroz beton, ili plastičnim kutijama kad se radi o mjernim tra-

kama koje se lijepje za unutrašnju površinu sanduka. Produžni kabeli, od mjernih traka i termoparova, najkraćim su putem vođeni do sedam sabirnih kutija. Kako su produžni kabeli od mjesta mjerenja do mjesta registracije vrlo kratki, može se smatrati da je promjena otpora zbog duljine kabela mala. Sve sabirne mjerne kutije su zaštićene i relativno nedostupne te nisu na udaru vandala (slike 13. i 14.).



Slika 13. Switch box postavljen u presjeku 2-2



Slika 14. Jedna od sedam sabirnih kutija

3.3.3 Registracija temperature i relativnih deformacija

Data logger TDS 303 (slika 15.), preko kojeg je električni impuls pretvoren u digitalni zapis, može snimati



Slika 15. Data logger TDS 303 u prostoriji iza oslonca

podatke s 30 mjernih mjesta, ima visoku rezoluciju od $0,1 \times 10^{-6}$. Uz *data logger* u mjerenju je rabljen i *switching box* (ISB – 50C) na koji se može priključiti 50 mjernih mjesta. Uz južni oslonac nalazila se prostorija u kojoj se osiguravalo stalno napajanje strujom i u kojoj je smješteno računalo na koje se prebacuju i čuvaju podaci koje očitava *data logger*.

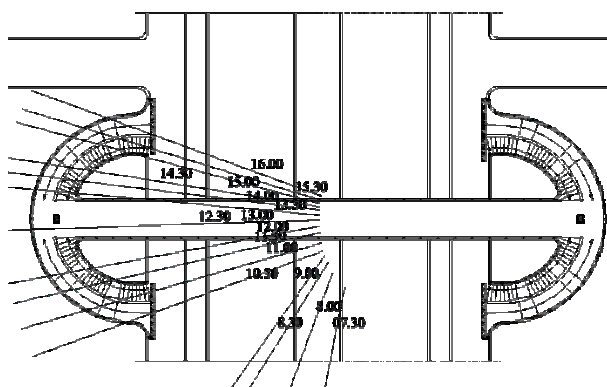
3.4 Ostala mjerenja

3.4.1 Vlažnost i temperatura mjereni neposredno uz most

U svim su fazama mjerenja registrirane temperatura zraka u hladu i vlažnost zraka, očitavanjem podataka s termometra-vlagomjera postavljenog uz južni oslonac. Elektronički se temperatura očitavala svakih pola sata.

3.4.2 Položaj sunca

U svakoj od faza mjerenja registriran je i položaj sunca u odnosu na građevinu (slika 16.) koji je subjektivno procjenjivan u odnosu na neki od stupova ograde. Stupovi ograde, kao fiksne točke, poslužili su za procjenu kuta sunčevih zraka u odnosu na most.



Slika 16. Tlocrt mosta "Zabjelo" - naznačenim položajem sunca tijekom mjerenja 4.2.2007.

Kut pod kojim sunčeve zrake padaju na konstrukciju mijenja se tijekom dana i godine. Zimi sunčevi zraci slabo obasjavaju zapadno rebro, dok je ljeti, zbog intenziteta zračenja, jače zagrijavanje zapadnog rebra od istočnog. Podatak o kutu izloženosti konstrukcije suncu daje objašnjenje o nekim naizgled nelogičnim registracijama temperature.

3.4.3 Karakteristike materijala

Konstrukcija je izvedena u betonu MB 30 i armirana je rebrastim čelikom, kvaliteta RA 400/500. Na uzorcima koji su uzeti u fazi gradnje konstrukcije praćene su vremenske promjene čvrstoće i modula elastičnosti. Ispitivanja uzoraka teklo je usporedno s fazama praćenja temperature i relativnih deformacija u konstrukciji.

3.4.4 Mjerenje vertikalnih pomaka

Vertikalni pomaci mosta mjereni su digitalnim nivelirom. Visinske razlike mjerene su metodom geometrijskog nivelmana, kao dvostruka mjerenja u smjeru "naprijed" i "nazad". Obrada podataka i ocjena točnosti mjerenja rađeni su metodom obrade i ocjene dvostrukih mjerenja. Točnost mjerenja izražena je srednjom pogreškom i prosječna srednja pogreška mjerenja iznosi $\pm 0,045$ mm. Mjerenje vertikalnih deformacija prikazano je na slici 17.



Slika 17. Mjerenje vertikalnih deformacija na mostu "Zabjelo"

3.4.5 Parametri registrirani na meteorološkoj stanici

Stanica Podgorica najbliža je meteorološka stanica udaljena od mosta oko 6 km. Sa RHMZ-om je za trajanja eksperimenta bila dobra suradnja. Tijekom eksperimenta sugerirani su dani pogodni za određene temperaturne pojave. Za sve dane eksperimentalnih mjerenja i za dva dana prije početka mjerenja dobiveni su podaci o izmjenjenim satnim temperaturama zraka u hladu, brzini vjetra, vlažnosti, količini sunčeva zračenja i duljini dana registrirani na Meteorološkoj stanici Podgorica. Također su dobiveni podaci i o najmanjim i najvećim registriranim temperaturama zraka u posljednjih pedeset godina, kao i podaci o ekstremno visokim temperaturama registriranim ljeti 2007., za razdoblje od oko 30 dana (najvišim registriranim za područje Podgorice u posljednjih pedeset godina).

4 Temperatura u mostu

4.1 Faktori koji utječu na temperature u mostu

Temperatura u konstrukciji ovisi prije svega o meteorološkim uvjetima na lokaciji građevine, a potom o toplinskim karakteristikama materijala, karakteristikama površine i geometrije poprečnog presjeka. Meteorološki uvjeti su vrlo kompleksni, a najvažniji faktori koji utječu na temperature u konstrukciji jesu:

- dnevne temperature
- sunčevo zračenje
- brzina vjetra
- oborine
- ostali vremenski uvjeti.

Kombinacija navedenih faktora stvara složenu distribuciju temperature po visini poprečnog presjeka rasponske konstrukcije mosta. Uobičajeno je da se utjecaji vlažnosti i brzine vjetra, zbog složenosti načina njihova djelovanja, kao i manjeg značenja u odnosu na temperaturu okoliša zanemaruju.

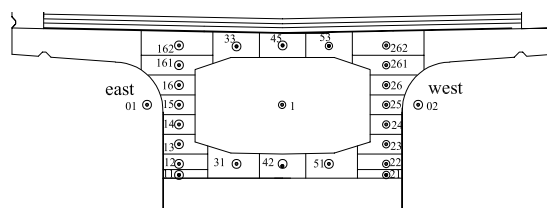
4.2 Srednje efektivne temperature u betonu mosta

Nakon svake od serija mjerenja na mostu podaci, koje *data logger* snima u obliku ASC datoteke (file) prebacivani su u EXCEL datoteke, za svako očitavanje, u kojima je već bilo zadano: proračun srednje vrijednosti triju čitanja za redom, proračun srednjih temperatura u betonu poprečnog presjeka i crtanje dijagrama promjene temperatura po visini presjeka.

Na slici 18. prikazana je distribucija temperature po visini, za jedno od provedenih mjerenja.

U konstrukcijama sa spriječenim pomacima, kao što je promatrani most, jednolika komponenta proizvodi deformiranje konstrukcije i nije lako precizno definirati što je prouzročila ta komponenta temperature, a što temperaturna razlika.

M. Emerson [6] smatra da efektivna temperatura ili srednja temperatura u mostu može biti izračunata zbrajajući umnoške ploština i srednjih temperatura u njima te zatim dijeleći taj zbroj s ukupnom ploštinom presjeka (jednadžba (5)).



Slika 19. Poprečni presjek 1-1 podijeljen na dijelove radi određivanja srednjih temperatura u betonu

U ovom je istraživanju poprečni presjek podijeljen na dijelove u čijem središtu je lociran *termopar* (slika 19.). Srednja temperatura u mostu određena je jednadžbom:

$$T_{av,t} = \frac{\sum A_i T_i}{A} \quad (5)$$

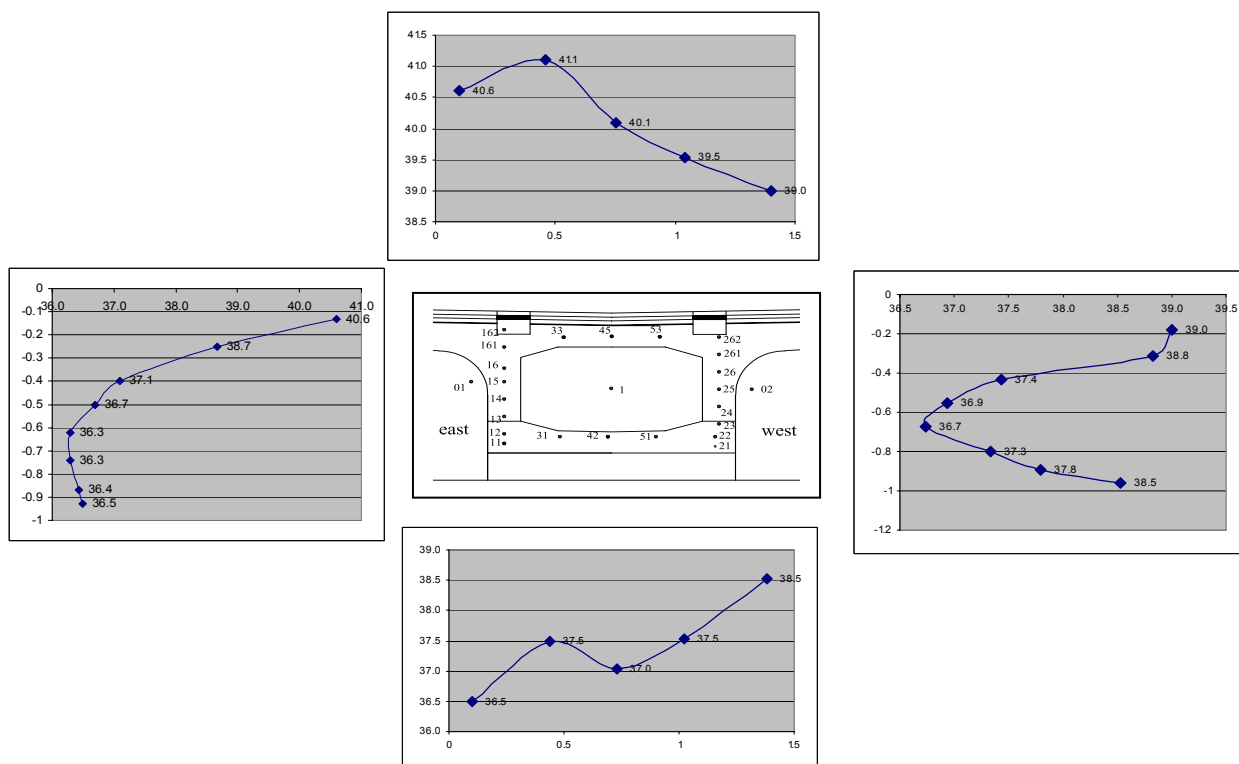
gdje je:

T_i - temperatura izmjerena na *termoparovima*

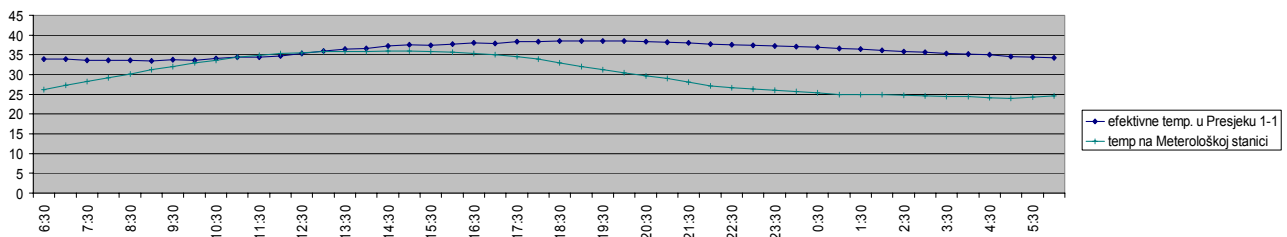
A_i - ploština dijela betonskog presjeka.

Nakon sortiranja i sređivanja golemog broja podataka registriranih eksperimentalnim mjerenjem moglo se pristupiti analizi podataka. Na osnovi iscrtanih grafikona sati – čitanje (slika 20.) jasnije su se uočavale pravilnosti promjena temperatura u betonu tijekom očitavanja.

Na grafikonima je početna slika o karakteru procesa prolaska temperature s okolne sredine do unutrašnjosti sandučastih poprečnih presjeka. Na temelju tih grafikona može se zaključiti:



Slika 18. Temperature registrirane u presjeku 1-1 (mjerenja 22. 6. 2007. u 18:00 sati)



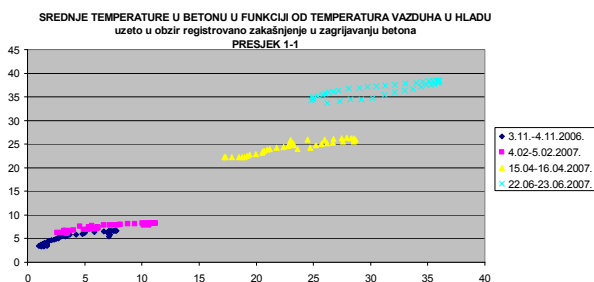
Slika 20. Dijagrami sati-srednje temperature u betonu u presjeku 1-1 i sati-temperature na meteorološkoj stanici 22.6. - 23.6.2007.

- temperatura koja se dobiva s meteorološke stanice stabilnija je krivulja u odnosu na mjerenja dobivena čitanjem temperatura zraka s *termoparova* ugrađenih u konstrukciju, pa ovisnosti treba određivati u odnosu na satne temperature zraka u hladu izmjerene na meteorološkoj stanici
- srednje efektivne temperature u betonu vremenski kasne u odnosu prema temperaturama koje se registriju na meteorološkoj stanici Podgorica.

4.2.1 Veza između srednje temperature u betonu i temperature u hladu

Na temelju analize dostupne literature i tumačenja dijagrama ovisnosti srednjih temperatura u betonu i satnih temperatura zraka u hladu, napravljenih na osnovi vlastitih istraživanja (jedan je od njih na slici 21.), dolazi se do sljedećih zaključaka:

- Najmanje srednje temperature u betonu, a na temelju izmjerenih podataka konstatirano je da se za ovo područje registriju u $7:00 \pm 1:00$ sati, ovise o temperaturama koje se u okolišu događaju u duljem trajanju
- Najmanje srednje temperature u betonu ne ovise o geometriji presjeka
- Promjena srednjih temperatura tijekom dana, od najmanjih do najvećih, u funkciji je promjena satnih temperatura zraka u hladu i intenziteta sunčeva zračenja
- Krivulje „promjena srednjih temperatura u betonu – promjene temperatura zraka u hladu“, dobivene na osnovi izmjerenih podataka, imat će različite oblike ovisno o geometriji presjeka.

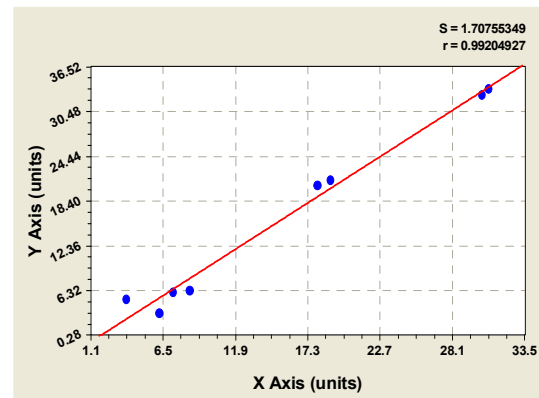


Slika 21. Srednje temperature u betonu u funkciji od temperatura zraka u hladu, presjek 1-1, (°C)

4.2.1.1 Veza najmanje dnevne srednje temperature u betonu i srednjih dnevnih temperatura

U radu [6] (M. Emerson) upotrijebljena je veza između 48-satnih srednjih temperatura zraka u hladu i srednjih temperatura u betonu. U istraživanju koje se ovdje opisuje vidi se veza između srednjih dnevnih temperatura zraka i srednje temperature u betonu. Srednja dnevna temperatura zraka je klimatološki podatak koji se standardno prikazuje u izvještajima meteoroloških stanica, pa je najjednostavnije promjene temperatura u betonu vezati za podatak koji prema klimatološkim standardima određuje temperature u jednome danu.

Iz vlastite baze podataka prepoznate su najmanje srednje temperature u betonu i proračunane srednje dnevne temperature u prethodnom danu na temelju podatka dobivenih s Meteorološke stanice Podgorica.



Slika 22. Dijagram „Srednja dnevna temperatura zraka – najmanja srednja temperatura u betonu“

Upotrebom programa za regresijsku analizu (*CurveExpert*) za podatke (izmjerene za presjeka 1-1 i 2-2), uz pretpostavku da je funkcija pravac, linearnom regresijom dobivena je funkcija „srednje dnevne temperature zraka – minimalne srednje temperature u betonu“ (slika 22.) koja se može opisati jednadžbom:

$$\min T_{sr,b} = 1,158 t_{sr, dn, v} - 1,84 \pm 2^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

gdje je:

$\min T_{sr,b}$ - najmanja srednja temperatura u betonu

$t_{sr, dn, v}$ - srednja dnevna temperatura zraka u hladu.

Funkcija je definirana za opseg srednje dnevne temperature zraka u hladu od 3,8 °C (zimski serija) do 30,8 °C (ljetna serija).

4.2.1.2 Veza najmanje dnevne srednje temperature u betonu i najmanjih satnih dnevnih temperatura

Veza najmanje dnevne srednje temperature u betonu i najmanjih satnih dnevnih temperatura može se uspostaviti samo ako se prethodno postavi međuovisnost najmanjih srednjih dnevnih temperatura i najmanjih satnih temperatura tijekom dana. U toj analizi ovisnost srednjih dnevnih temperatura i minimalnih temperatura dobivena je regresijskom analizom podataka svih meteoroloških temperatura nižih od 5 °C koje je RHMZ ustupio za uporabu. Ovaj broj podataka nije velik, a i zima 2006./2007. bila je topla, pa se može smatrati da ti podaci ne mogu dovoljno točno opisati traženu ovisnost.

Predložena jednadžba koja definira ovisnost najmanjih satnih temperatura zraka u hladu i srednjih dnevnih temperatura zraka u hladu jest:

$$t_{sr, dn, v} = 0,789 t_{min, v} + 4,788 \text{ (}^\circ\text{C)} \tag{7}$$

gdje je:

$t_{min, v}$ - minimalna satna temperatura zraka u hladu

$t_{sr, dn, v}$ - srednja dnevna temperatura zraka u hladu.

Nakon dovođenja u vezu jednadžbi (6) i (7) i uzimanja u obzir pogrešaka dobivamo vezu najmanjih srednjih temperatura u betonu i najmanjih satnih temperatura zraka u hladu:

$$\min T_{sr,b} = 0,914 t_{min, v} + 2,7 \text{ (}^\circ\text{C)} \tag{8}$$

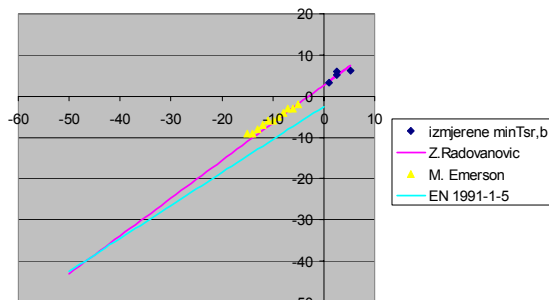
gdje je:

$t_{min, v}$ - najmanja satna temperatura zraka u hladu

$\min T_{sr,b}$ - najmanja srednja temperatura u betonu.

Jednadžba (8), autorice Ž. Radovanović, rezultat je vlastitih eksperimentalnih istraživanja koja se prikazuju u ovom radu.

Na slici 23. prikazan je pravac dobiven na osnovi jednadžbe (8), a uz to su na slici dani: izmjereni podaci, podaci M. Emerson i $\min T_{sr,b}$ prema europskoj normi EN 1991-1-5



Slika 23. Veza minimalne srednje temperature u betonu (0C) – minimalne temperature zraka u hladu

4.2.2 Najveće srednje temperature u betonu

Najveće srednje temperature u betonu tijekom dana dobivaju se kada se na najmanje srednje temperature u betonu doda varijacija srednjih temperatura u betonu koja je funkcija promjene satnih temperatura zraka, intenziteta sunčeva zračenja, vlažnosti zraka i brzine vjetra. Od navedenih je faktora temperatura zraka u hladu najmanje promjenjiva u vremenu, pa se zato promjene temperature u betonu tijekom dana vezuju za promjenu temperature zraka u hladu.

4.2.2.1 Veza najmanje srednje temperature u betonu i najvećih dnevnih temperatura

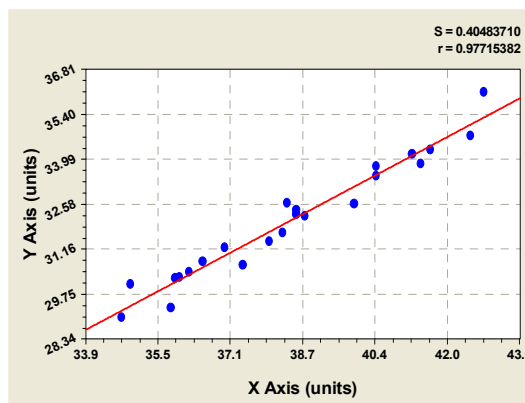
Veza minimalne dnevne srednje temperature u betonu i najvećih satnih dnevnih temperatura može se uspostaviti ako se prethodno postavi međuzavisnost srednjih dnevnih temperatura i maksimalnih satnih temperatura tijekom dana. Ta je ovisnost dobivena regresijskom analizom podataka svih meteoroloških temperatura, većih od 30 °C, za ljeto 2007. kada su zabilježene najviše temperature zraka u hladu za posljednjih 50 godina. Na slici 24. je izvod iz rezultata regresijske analize, koji je dan i jednadžbom ovisnosti srednjih dnevnih temperatura o najmanjim satnim temperaturama zraka:

$$t_{sr, dn, v} = 0,867 t_{max, v} + 1,95 \text{ (}^\circ\text{C)} \tag{9}$$

gdje je:

$t_{max, v}$ - najveće satne temperature zraka u hladu

$t_{sr, dn, v}$ - srednja dnevna temperatura zraka u hladu



Slika 24. Dijagram „Najveće satne temperature zraka – najmanje srednje temperature zraka“

Nakon dovođenja u vezu jednadžbi (6) i (9) dobivamo vezu minimalnih srednjih temperatura u betonu i najvećih satnih temperatura zraka u hladu:

$$\min T_{sr,b} = 0,867 t_{max, v} + 1,95 \text{ (}^\circ\text{C)} \tag{10}$$

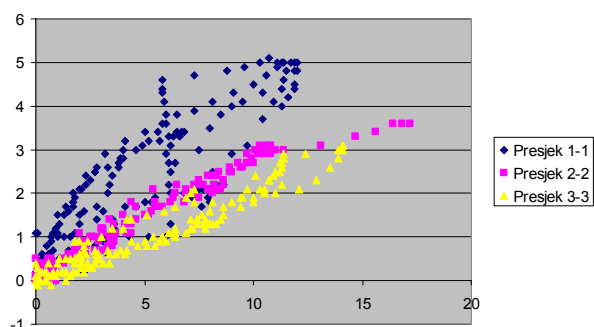
gdje je:

$t_{max, v}$ - najveća satna temperatura zraka u hladu

$\min T_{sr,b}$ - najmanja srednja temperatura u betonu.

4.2.2.2 Promjena srednje temperature u betonu tijekom dana

Srednje temperature u betonu mijenjaju se tijekom dana od najmanjih koje se registriraju oko 7:00 sati do najvećih koje se opažaju u različitim razdobljima dana ovisno o godišnjem dobu. Uobičajeno je da se u definiranju funkcije ovisnosti promjene temperatura u betonu od promjena satnih temperatura zraka u hladu kao parametar uzima samo promjena satnih temperatura zraka u hladu i ako na ovu funkciju utječu i intenzitet sunčeva zračenja, vlažnost zraka i brzina vjetera.



Slika 25. Promjena srednjih temperatura u betonu u zavisnosti od promjene satnih temperatura zraka u hladu

Na slici 25. za sve su presjeka dani podaci o promjeni srednjih temperatura u betonu u ovisnosti o promjeni satnih temperatura zraka u hladu. Na temelju grafikona sa slike 25. zaključuje se da dnevne varijacije srednjih temperatura u betonu, od najmanjih do najvećih, ovise o obliku i geometriji presjeka.

4.2.2.3 Veza najvećih srednjih temperatura u betonu i najvećih temperatura zraka u hladu

Najveće srednje temperature u betonu registriraju se od 16:00 do 20:00 sati, ovisno o godišnjem dobu. Te su temperature zbroj najmanjih srednjih temperatura, koje se registriraju oko 7:00 sati, i promjena temperature u betonu. Vrijednosti najveće temperaturne promjene u betonu ovisno o geometriji presjeka, dnevne varijacije temperature zraka i sunčeva zračenja iznosile su:

- 5,10 °C u presjeku 1-1
- 3,6 °C u presjeku 2-2
- 3,10 °C u presjeku 3.

U presjeku 1-1 dnevna varijacija temperature u betonu vrijednosti od 5 °C dostigla je i u ljetnoj i u proljetnoj seriji mjerenja.

Navedeni podaci upućuju na to da vrijednosti minimalnih srednjih temperatura u betonu moraju biti uvećane za vrijednost dnevne temperaturne promjene u betonu od 4,5 °C. Argumenti za to su sljedeći:

- Presjek 1-1, ukupne visine sa slojevima možemo smatrati najslabijim uobičajenim presjecima kod mostova sandučastog presjeka

- Kako presjek ima hrptove debljine svega 15 cm, u tom su presjeku varijacije temperature veće nego za uobičajene sanduke debljine hrptova od 20 cm ili više
- U presjeku 1-1, u slučaju većih dnevnih varijacija satnih temperatura zraka u hladu, koje su vrlo vjerovatne, ove temperature mogu biti i veće
- Postoji velika skupina sandučastih presjeka veće visine i veće širine poprečnog presjeka te ne bi bilo opravdano uzeti najveće vrijednosti dnevne varijacije temperature u betonu registrirane u presjeku 1-1.

Nakon uvećanja najmanjih srednjih temperatura u betonu za 4,5 °C dobiva se jednadžba za najveće srednje temperature u betonu u funkciji od najvećih temperatura zraka u hladu:

$$\max T_{sr,b} = 0,867 t_{\max,v} + 6,45 \text{ za } t_{\max,v} > 24^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

gdje je:

$t_{\max,v}$ - najveća satna temperatura zraka u hladu

$\max T_{sr,b}$ - najveća srednja temperatura u betonu

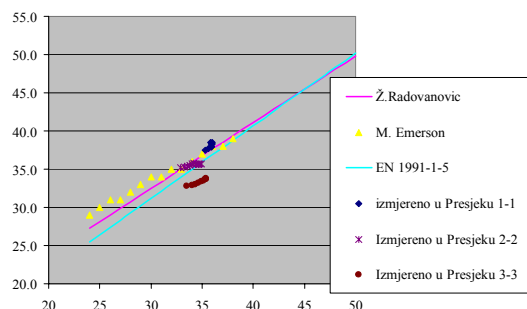
Jednadžba (11), autorice Ž. Radovanović, rezultat je vlastitih eksperimentalnih istraživanja.

Na slici 26. prikazane su vrijednosti najvećih srednjih temperatura u betonu izmjerene u ljetnoj seriji mjerenja i vrijednosti definirane jednadžbom (11) autorice Ž. Radovanović, europskom normom i u rezultatima istraživanja koje je prezentirala M. Emerson [6].

Tablica 2. Najveće srednje temperature u betonu u zavisnosti od najvećih temperatura zraka u hladu

$\max t_{zraka}$	Ž. Radovanović	M. Emerson	EN 1991-1-5
24	27,3	29	25,5
25	28,1	30	26,5
26	29,0	31	27,4
27	29,9	31	28,3
28	30,7	32	29,3
29	31,6	33	30,3
30	32,5	34	31,2
31	33,3	34	32,2
32	34,2	35	33,1
33	35,1	35	34,0
34	35,9	36	35,0
35	36,8	37	35,9
36	37,7	38	36,9
37	38,5	38	37,8
38	39,4	39	38,8
39	40,3		39,7
40	41,1		40,7
41	42,0		41,6
42	42,9		42,6
43	43,7		43,5
44	44,6		44,5
45	45,5		45,4

U tablici 2. dane su vrijednosti maksimalnih srednjih temperatura u betonu za uvjete ekstremno visokih satnih temperatura zraka u hladu.



Slika 26. Veza "Najveće srednje temperature u betonu i najveće satne temperature zraka u hladu"

U presjecima visine manje od 1 m mogu se očekivati veće najveće srednje temperature u betonu do 2 °C od onih dobivenih jednadžbom (11), dok se za presjeke više od 1 m mogu očekivati najveće srednje temperature u betonu manje do 2 °C od onih dobivenih jednadžbom (11).

5 Zaključak

Na osnovi prethodno izloženog zaključujemo:

- Svi izmjereni podaci veći su od pogreške mjerenja ugrađene opreme, pa provedena mjerenja na pješačkom

mostu "Zabjelo" daju pouzdane podatke za analizu utjecaja temperature na mostove sandučastog poprečnog presjeka

- Postavljene jednadžbe na temelju vlastitih istraživanja i uz primjenu metode regresijske analize, s visokim stupnjem pouzdanosti prikazuju najveće srednje temperature u betonu kao funkciju najvećih satnih temperatura zraka i dobra je metodološka osnova za definiranje najvećih jednolikih temperatura u betonskim mostovima sandučastog presjeka u budućem nacionalnom dodatku za EN 1991-1-5
- Predloženom metodom mogu se proračunati najveće srednje temperature u betonu sandučastih mostova za bilo koje područje Crne Gore, postavljajući na osnovi podatka iz Republičkoga hidrometeorološkog zavoda za to područje funkciju ovisnosti srednjih dnevnih temperatura od satnih dnevnih temperatura zraka u hladu

Podatke bi trebalo dopuniti istraživanjima na mostovima s pločastim i grednim poprečnim presjekom, jer u tim poprečnim presjecima dnevni bi prirast temperatura mogao biti veći nego kod mostova sa sandučastim poprečnim presjekom.

LITERATURA

- [1] AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges: Structures design guidelines for load factor design, Effective: January 1, 2000., 209.str
- [2] BD 37/01.: Design manual for roads and bridges, May, 2002.
- [3] Soukov, D.: Thermal action in the Eurocode 1- action on structures, LACER No.5, 2000., str. 379.-386.
- [4] Emerson, M.: Temperature differences in bridges: basis of design requirements , TRRL Laboratory Report 765, 1977.
- [5] Emerson, M.: The calculation of distribution of temperature in bridges, TRRL Laboratory Report 561, 1973
- [6] Emerson, M.: Extreme values of bridge temperatures for design purposes , TRRL Laboratory Report 744, 1976
- [7] EUROCODE 1 – Action on structures part 1.5 General Action – Thermal Action, Final draft, 2002
- [8] Johnson, J. K.: Concrete bridge deck behavior under thermal loads Master of Science in Civil Engineering, Montana State University Bozeman, Montana July 2005., 106.str.
- [9] Mortlock, J. D.: The instrumentation of bridges for the measurement of temperature and movement , TRRL Laboratory Report 641, 1974.
- [10] Pravilnik o tehničkim normativima za određivanje veličine opterećenja mostova (Sl. list SFRJ br. 1/91)
- [11] Proceedings of Symposium held at the Transport and Road Research Laboratory: Bridge temperatures, Crowthorne, 1978
- [12] Radovanović, Ž.: Konkursni rad za izgradnju nadzemnog prelaza na sobračajnom pravcu voisavljevića (put JNA) Zabjelo, Podgorica, Podgorica, 2004.
- [13] Radovanović, Ž.: Glavni projekat nadzemnog prelaza na Zabjelu u Podgorici, Podgorica, 2005.
- [14] Radovanović, Ž.: Estimation of temperature action in bridge according to EN 1991-1-5 and measurement plan in the concrete pedestrian bridge, International Conference on Civil Engineering Design and Construction, Varna, 2006., str. 435.-443.
- [15] Radovanović, Ž.; Ulićević, M.: Estimation of uniform temperature component based on site experimental data and according to EN 1991-1-5, 12th International Symposium of MASE Struga, 2007., str. 6
- [16] Římal, J.: Experimental investigation of structures and materials, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, 2003., 45 str.