

UDK 624.071.3:627.47+536.4

Primljeno 15. 7. 2005.

# Djelovanje topline na zid bujice

Danila Lozzi-Kožar, Ivica Kožar, Danko Holjević

## Ključne riječi

betonski zid, temperatura, toplinsko opterećenje konstrukcije, analiza naprezanja od topline, pukotine

## Key words

concrete wall, temperature, thermal load imposed on the structure, thermal stress analysis, cracks

## Mots clés

mur en béton, température, charge thermique imposée sur la structure, analyse des contraintes thermiques, fissures

## Ключевые слова

бетонная стенка, температура, тепловая нагрузка конструкции, анализ тепловой нагрузки, напряжения от теплоты, трещины

## Schlüsselworte

Betonmauer, Temperatur, termische Belastung der Konstruktion, Analyse der termischen Spannungen, Risse

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar, D. Holjević

Prethodno priopćenje

## Djelovanje topline na zid bujice

Razmatra se djelovanje toplinskog opterećenja na zid bujičnog vodotoka u Mošćeničkoj Dragi. Modeliran je dio zida na kojem su se pojavile pukotine te je proračunan kao model dvodimenzionalnog štapa u ravnini. Temperaturno opterećenje izaziva naprezanja veća od dopuštenih za zadanu marku betona pa su se pojavile pukotine. Rezultati mjerenja pukotina uspoređeni su s izračunatim pomacima. Veličine pomaka upućuju na dilatacije koje nisu izvedene, a potrebne su da zid ne bi pucao.

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar, D. Holjević

Preliminary note

## Analysis of the torrential-watercourse wall exposed to thermal action

The thermal load imposed on a torrential-watercourse wall in Mošćenička Draga is considered. The part of the wall affected by cracking was modelled and analyzed as a two-dimensional member in the plane. The temperature load leads to stress values greater than those allowed for the concrete type used, which results in the formation of cracks. Cracking measurement results are compared with calculated displacements. The displacement values show that expansion joints, not anticipated in this case, were in fact necessary to prevent wall cracking.

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar, D. Holjević

Note préliminaire

## Analyse de l'action de la chaleur sur le mur d'un cours d'eau torrentiel

La charge thermique imposée sur le mur d'un cours d'eau torrentiel situé à Mošćenička Draga est considérée. La partie du mur affectée par l'apparition de fissures est modélisée et analysée comme un élément bidimensionnel dans le plan. La charge de température provoque les contraintes plus élevées que celles admises pour le béton utilisé, ce qui résulte en l'apparition des fissures. Les résultats obtenus par le mesurage des fissures sont comparés avec les déplacements calculés. Ces valeurs de déplacement montrent que les joints de dilatation, non prévus dans ce cas, ont dû être réalisés afin de prévenir l'apparition de fissures.

Д. Лодзи-Кожар, И. Кошар, Д. Холевич

Предварительное сообщение

## Анализ действия теплоты на стенку потока

В работе рассматривается действие тепловой нагрузки на стенку потока в Мошченичковой Драге. Моделирована часть стены, на которой появились трещины, а также анализирована как модель стержня в плоскости. Температурная нагрузка вызывает напряжения большие от допустимых для заданной марки бетона, так что появились трещины. Результаты измерения трещин сравнены с рассчитанными сдвигами. Величины сдвигов указывают на то, что появились трещины. Результаты измерения трещин сравнены с рассчитанными сдвигами. Величины сдвигов указывают на дилатации, которые не сделаны, а необходимы чтобы стенка не трескалась.

D. Lozzi-Kožar, I. Kožar, D. Holjević

Vorherige Mitteilung

## Analyse der Einwirkung der Wärme auf eine Wildbachmauer

Man betrachtet die Einwirkung der termischen Belastung auf die Mauer des Wildbachs in Mošćenička Draga. Modelliert wurde ein Teil der Mauer an der Risse auftraten, und das analysierte man als Modell eines zweidimensionalen Stabs in der Ebene. Die termische Belastung verursacht Spannungen die grösser sind als die für diese Betonmarke zulässigen, so traten Risse auf. Die Ergebnisse der Rissmessungen wurden mit den berechneten Verschiebungen verglichen. Die Grössen der Verschiebungen deuten darauf hin dass keine Dehnfugen ausgeführt worden waren, die aber notwendig sind um Risse zu vermeiden.

Autori: **Danila Lozzi-Kožar**, dipl. ing. građ., Hrvatske vode VGO Rijeka; prof. dr. sc. **Ivica Kožar**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; mr. sc. **Danko Holjević**, dipl. ing. građ., Hrvatske vode VGO Rijeka

## 1 Uvod

Djelovanje promjene temperature na građevine, odnosno uzimanje u obzir toplinskog opterećenja pri proračunu konstrukcija od znatnog je utjecaja [6]. To ćemo pokazati na primjeru oštećenoga obalnog betonskoga zida koji se nalazi na regulacijskom profilu bujice Mošćenička Draga, nizvodno od propusta na cesti Rijeka – Pula do ušća u more. Bujica Mošćenička Draga jedna je od najvećih bujica Kvarnerskog zaljeva, ne samo po veličini već i po izraženoj bujičnoj aktivnosti, naročito u gornjim dijelovima slivnog područja. Bujični vodotok utječe u more prolazeći kroz samo mjesto Mošćenička Draga, a reguliran je u obliku betonske kinete s vertikalnim zidovima i dnom od betona. Kineta je dimenzionirana na protoku od  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ , pri čemu je brzina vode  $10,4 \text{ m/s}$ , s tim da je mogućnost pojave velike vode mala.

Na zidu kinete uočene su pukotine. Oštećeni se zid željelo sanirati i ustanoviti uzrok nastanka pukotina da bi sanacija bila što uspješnija.

Proračunom je dokazano da je sigurnost obalnog zida na prevrtanje i klizanje zadovoljena, ali je zid ipak puknuo. Stoga smo pri proračunu uzeli u obzir i toplinsko opterećenje pri čemu su dobivena naprezanja koja su veća od dozvoljenih za upotrijebljenu marku betona. Dobiveni rezultati pomaka uspoređeni su s rezultatima mjerenja.

Ovim se radom želi istaknuti važnost uzimanja u obzir toplinskog opterećenja pri proračunu konstrukcija.

Europskom prednormom ENV 1991-2-5:1997: Basis of design and action on structure – Actions on structures – Thermal actions (Osnove projektiranja i djelovanja na građevine – Djelovanja na građevine – Toplinska djelovanja) [1] definirana je temperatura zraka koja se primjenjuje u proračunima toplinskog djelovanja na građevini.

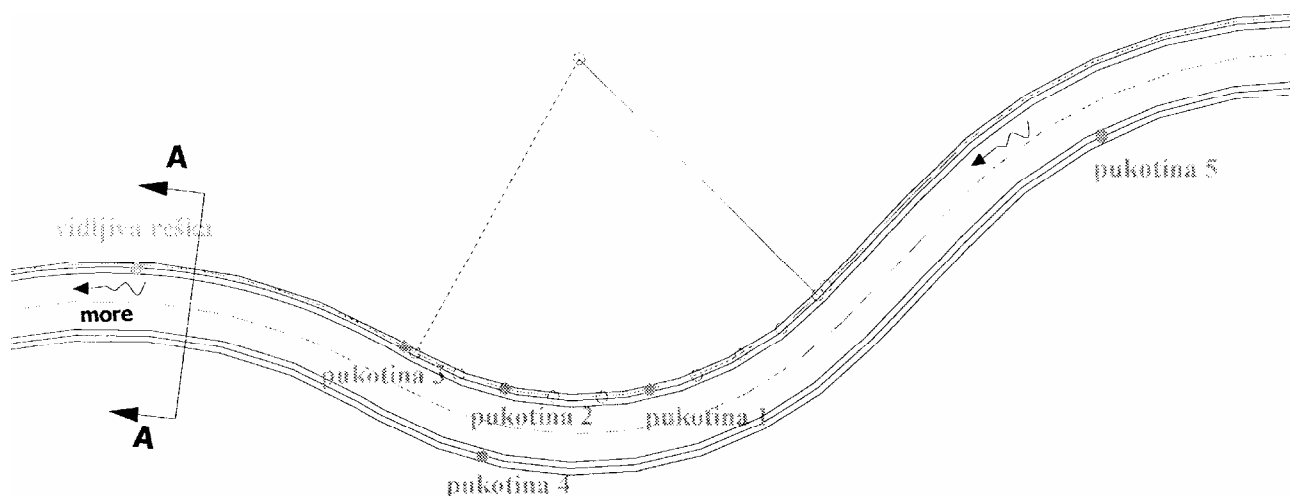
Klimatološki parametri koji se uzimaju u obzir u građevinskim proračunima su apsolutno najveća i apsolutno najmanja temperatura zraka koja se može očekivati jednom u 50 godina. ( $T_{\text{max}50}$  i  $T_{\text{min}50}$ ). I u Hrvatskoj se provode istraživanja ekstremnih temperatura zraka radi izrade meteorološke podloge za izradu hrvatskih norma. Definirano je pet zona za najveće temperature zraka i šest zona za najmanje temperature zraka. Mošćenička je Draga svrstana u II. klimatsku zonu najvećih temperatura zraka  $T_{\text{max}50}$ , s najvećom temperaturom zraka na nadmorskoj visini od 0 m od  $+36,4^\circ\text{C}$ , i u IV. klimatsku zonu najmanjih temperatura zraka  $T_{\text{min}50}$  s najmanjom temperaturom zraka, na razini mora od  $-9,1^\circ\text{C}$ . Za proračun konstrukcija kod kojih utjecaj topline nije velik, mogu se uzeti i ekstremne vrijednosti temperature za područje Hrvatske i to  $-27^\circ\text{C}$  i  $+42^\circ\text{C}$ . [1] Prema ENV 1991-2-2:1997 dane su preporuke toplinskog djelovanja posebno za zgrade, mostove, dimnjake i cjevovode.

Za usporedbu, prema propisima za mostove – DIN 1085 – potrebno je pri proračunu računati sa sljedećim temperaturnim opterećenjem:

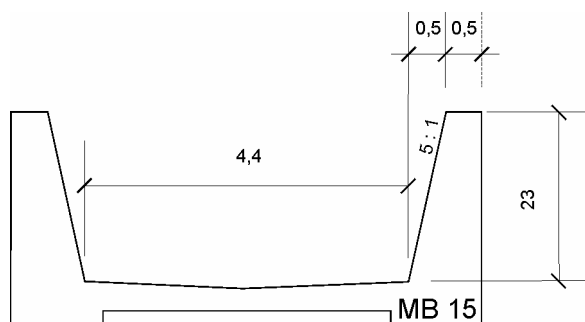
- jednolika temperatura  $-10 \text{ do } +30^\circ\text{C}$
- diferencijalna temperatura  $-5 \text{ do } +5^\circ\text{C}$

## 2 Prikaz postojećeg stanja i proračun stabilnosti obalnog zida

Regulacija bujice Mošćenička Draga izvedena je oko 1985. u obliku kinete od betona MB 15. Procijenjeno je da građevina nije armirana. Najveće su se pukotine pojavile na desnom obalnom zidu na savinutim dijelovima konstrukcije (u zavoju). Mjesta pukotina označena su s 1, 2 i 3, s tim da se pukotina 1 nalazi uzvodno, a pukotina 3 nizvodno. Također su se pojavile nešto manje pukotine na lijevom obalnom zidu. Mjesta pukotina označena su s 4 i 5. Na slici 1. i 2. prikazana je situacija građevine i geometrijske karakteristike kinete.



Slika 1. Situacija građevine s položajem nastalih pukotina



Slika 2. Presjek A-A s geometrijskim podacima

Potporni je zid proračunan kao krilo tijela [2].

Najprije je proveden proračun ne uzimajući u obzir utjecaj vode. Proračun je ponovljen uzimajući u obzir i hidrostatski pritisak vode, tako da je visina vode izvan zida 0,5 m, a iza zida 1,5 m. Koeficijent sigurnosti na prevrtanje u oba je slučaja veći od 1,5. Izbetonirano dno kanala ne dozvoljava da zid otkliže, jer djeluje kao nepomični oslonac (što nije uzeto u proračun), te je na taj način zadovoljena i sigurnost na klizanje.

Proračunom je dokazano da je sigurnost zida na prevrtanje i klizanje zadovoljena, ali zid je ipak puknuo.

Na nekim se mjestima vide radne reške. Na tim mjestima nije došlo do pucanja zida. Stoga smo pretpostavili da je zid puknuo od toplinskog opterećenja.

### 3 Tranzijentna toplinska analiza

Kao prvi korak u povezivanju mehaničkih svojstva betona i temperature za zadane toplinske rubne uvjete u vremenu  $t$ , potrebno je izračunati raspored temperature kroz čvrsto tijelo volumena  $\Omega$ . U svakoj točki kontinuuma, koja je definirana u Kartezijevu koordinatnom sustavu  $(x, y, z)$ , treba zadovoljiti očuvanje energije. To možemo izraziti sljedećom parabolikom diferencijalnom jednačinom:

$$\lambda \Delta T(x, y, z, t) + W(x, y, z, t) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) = 0$$

gdje je:

$T$  - temperatura

$\lambda$  - toplinska konduktivnost

$c$  - specifični toplinski kapacitet

$\rho$  - gustoća

$W$  - unutarnji izvor topline

$\Delta$  - Laplaceov operator.

Površinski rubni uvjeti koji moraju biti zadovoljeni na površinama koje su pod toplinskim utjecajem su:

$$\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0$$

a na površinama gdje postoji toplinski tok

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha(T_M - T)$$

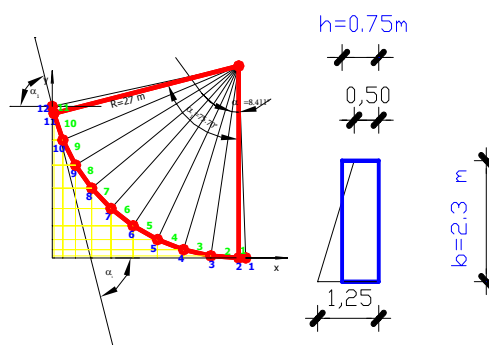
gdje je:

$n$  - normala na rubnu površinu  $\Gamma$

$\alpha$  - koeficijent prijenosa topline

$T_M$  - temperatura medija u kojem je izložena površina  $\Gamma$  čvrstog tijela  $\Omega$  (npr. temperatura zraka).

Da bi riješili problem s pomoću metode konačnih elemenata, gornju diferencijalnu jednačinu mora se napisati u slaboj (integralnoj) formulaciji [3]:



Slika 3. Geometrija sustava i poprečni presjek zida

$$\int_{\Omega} \lambda \left( \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) d\Omega + \int_{\Omega} v \left( c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma} v \alpha (T - T_M) d\Gamma = 0$$

gdje je  $v$  probna funkcija.

Nakon uvođenja uvjeta da funkcional ima stacionarnu vrijednost, dobijemo jednačinu po MKE

$$[\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{T}}\} + ([\mathbf{K}] + [\mathbf{H}])\{\mathbf{T}\} = \{\mathbf{R}\}$$

gdje je

$$[\mathbf{C}] = \int_{\Omega} [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] c\rho d\Omega$$

$$[\mathbf{K}] = \int_{\Omega} [\mathbf{B}]^T [\lambda] [\mathbf{B}] d\Omega$$

$$[\mathbf{H}] = \int_{\Gamma} \alpha [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] d\Gamma$$

$$[\mathbf{R}] = \int_{\Gamma} [\mathbf{N}]^T \alpha T_M d\Gamma$$

Gornja jednačba riješena je upotrebom direktne metode bazirane na pretpostavci za rješenje u sljedećem vremenskom koraku

$$\{\mathbf{T}\}_{n+1} = \{\mathbf{T}\}_n + \Delta t((1-\beta)\dot{\mathbf{T}}_n + \beta\dot{\mathbf{T}}_{n+1})$$

Upotrijebljena vrijednost parametra  $\beta = 0,5$  daje nam bezuvjetno stabilnu Crank-Nicolsonovu metodu:

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[\mathbf{C}] + \beta([\mathbf{K}] + [\mathbf{H}])\right)\{\mathbf{T}\}_{n+1} = \left(\frac{1}{\Delta t}[\mathbf{C}] - (1-\beta)([\mathbf{K}] + [\mathbf{H}])\right)\{\mathbf{T}\}_n + (1-\beta)\{\mathbf{R}\}_n + \beta\{\mathbf{R}\}_{n+1}$$

#### 4 Opis dvodimenzionalnog modela

##### 4.1 Štapni 2D proračun

Pri proračunu zida uporabljen je program *OkvirS* za štap u ravnini koji radi po metodi konačnih elemenata [4]. Temperaturne promjene izazivaju najveća naprezanja na savinutim dijelovima konstrukcije gdje su se pojavile pukotine, pa je samo taj dio zida modeliran.

Geometrija sustava polumjer luka je 27 m, kut  $\alpha_1$  75,7°, duljina luka 35,7 m.

Luk je podijeljen na 11 dijelova, tj. ima 11 štapova i 12 čvorova.

Koordinate čvorova dane su u proračunu.

Pukotine 1, 2 i 3 nalaze se približno u čvorovima 6, 9 i 12.

Pretpostavka o temperaturi

Ne znamo koja je srednja temperatura zraka bila tijekom izvođenja zida, pa proračun baziramo na sljedećim pretpostavkama:

- srednja temperatura pri izvođenju + 10° C
- srednja ljetna temperatura + 25° C
- temperatura površine zida obasjane suncem 10° C veća od srednje temperature zida

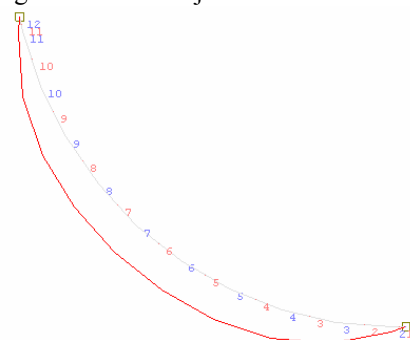
Prema tome slijedi temperaturno opterećenje:

$\Delta t_{\text{srednje}}$  +15°C linearna - jednolika temperatura (izaziva rastezanje i skupljanje)

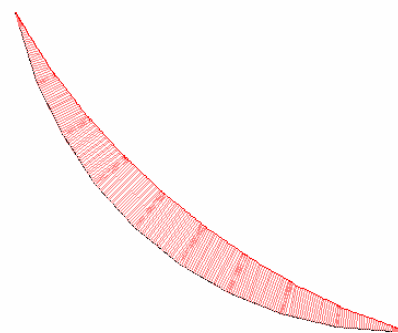
$\Delta t_{\text{diferencijalno}}$  10°C diferencijalna temperatura (izaziva savijanje).

Najprije je proveden proračun tako da su krajnji čvorovi (1 i 12) zglobovi. To znači da su spriječeni pomaci u smjeru x i y, a dozvoljene su rotacije, tj radi se o gredi sa dva zgloba.

Toplinsko opterećenje zadano je kao deformacija, tj. kao da ništa ne drži konstruktivni element, a program računa stvarni odgovor konstrukcije.



Slika 4. Pomak sustava od djelovanja toplinskog opterećenja oslonci su u krajnjim čvorovima



Slika 5. Dijagram momenata od djelovanja toplinskog opterećenja oslonci su u krajnjim čvorovima

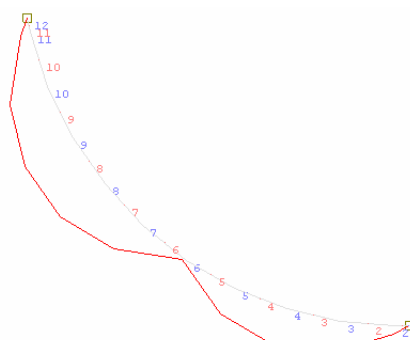
Za najveći moment i uzdužnu silu izračunana su naprezanja od momenta i uzdužne sile koja iznose:

$$\sigma_{\text{MN gore}} = 1510,8 \text{ kN/m}^2 \text{ i } \sigma_{\text{MN dole}} = -1572,7 \text{ kN/m}^2$$

Naprezanja prelaze dopuštena naprezanja za marku betona 15, tj.

$$\sigma_{\text{MN dole}} 1,57 \text{ MPa} > 0,8 \text{ MPa } (\sigma_{\text{doz vl. za MB 15}})$$

Simuliran je tijek nastanka pukotina dodavanjem zgloba u čvoru 6, približno u sredini luka, te je dobiven trozglobni luk.



Slika 6. Pomak sustava od djelovanja toplinskog opterećenja, trozglobni luk

Kod statički određenog sustava (trozglobni luk) od toplinskog opterećenja rezne sile su (momenti, uzdužne i poprečne sile) nula, pa iz toga slijedi da su i naprezanja nula. Vidimo da jednostavni štapni model samo grubo opisuje pucanje konstrukcije opterećene toplinom, jer odmah nakon nastanka prve pukotine (simuliranje zglobov) sustav postaje statički određen i daljnje pucanje prestaje.

#### 4.2 Proračun konačnim elementima – ravninsko stanje naprezanja i deformacija

Zid je proračunan i računalnim programom CSTBAR [5]. Računalni program CSTBAR računa raspored temperature u konstrukciji i toplinska opterećenja te naprezanja u masivnoj (monolitnoj) konstrukciji po metodi konačnih trokutnih elemenata (uz ravninsko stanje naprezanja ili deformacija).

Kao što je poznato, takav model (za razliku od štapnog) i za statički određenu konstrukciju može imati naprezanja od toplinskog opterećenja, odnosno od unutrašnjih sila.

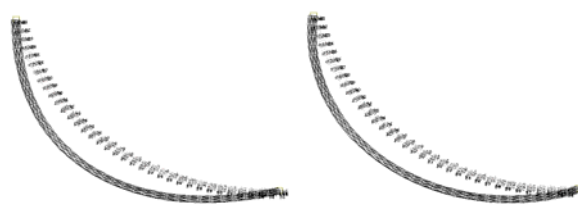
Za opterećenje je uzeta temperatura od 10°C izvana, 20°C iznutra i obrnuto, 20°C izvana i 10°C iznutra, što odgovara jednolikoj temperaturi od 15°C i diferencijalnoj temperaturi od  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

Kao i kod štapnog 2D proračuna modeliran je dio zida (luka), polumjera 27 m i duljine oko 35 m, CSTBAR-om po metodi konačnih elemenata. Zid-luk podijeljen je na 350 elemenata i ima 216 čvorova. Debljina zida je 75 cm.

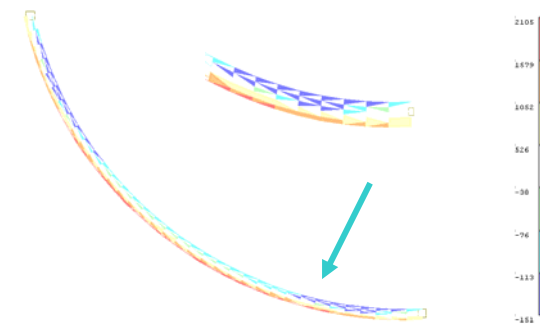
Oslonci su modelirani kao kod štapnog proračuna, tj. imamo zglobove na početku i kraju luka u čvoru 109 i 144, gdje su čvorovi nepomični u smjeru x i y. Svi ostali čvorovi su pomični. Za opterećenje je uzeta temperatura od 10°C izvana i 20°C iznutra, i obrnuto.

Tablica 1. Usporedba rezultata pomaka

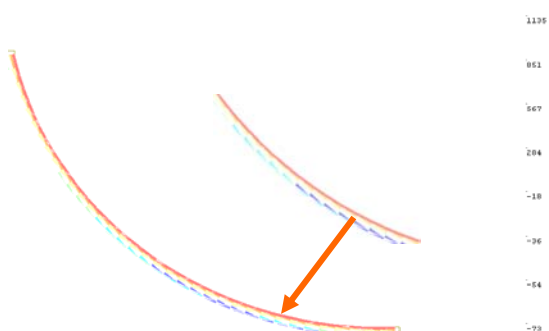
2D ŠTAPNA ANALIZA Pomaci [mm]				CSTBAR - RAVNINSKA ANALIZA Temp.10°C izvana 20°C iznutra Pomaci [mm]			CSTBAR - RAVNINSKA ANALIZA Temp.20°C izvana 10°C iznutra Pomaci [mm]		
Čvor	X-Smjer	Y-Smjer	Rotacija	Čvor	X-Smjer	Y-Smjer	Čvor	X-Smjer	Y-Smjer
1	,00	,00	-1,06	20	-4,08	-5,72	20	-3,78	-5,33
2	-,17	-,99	-,92	56	-4,08	-5,71	56	-3,77	-5,31
3	-1,02	-3,65	-,49	92	-4,08	-5,68	92	-3,76	-5,27
4	-1,96	-4,83	-,22	128	-4,08	-5,65	128	-3,76	-5,25
5	-2,78	-5,13	-,08	164	-4,07	-5,62	164	-3,75	-5,22
6	-3,44	-4,97	-,02	200	-4,06	-5,59	200	-3,75	-5,21
7	-3,96	-4,56	,02						
8	-4,28	-3,96	,08						
9	-4,19	-3,09	,22						
10	-3,28	-1,89	,49						
11	-,92	-,41	,92						
12	,00	,00	1,06						



Slika 7. Pomak sustava – oslonci na početku i kraju luka, slika lijevo - temperatura 10°C izvana, 20°C iznutra, slika desno - temperatura 20°C izvana, 10°C iznutra



Slika 8. Glavno naprezanje  $\sigma_y$  - temperatura 10°C izvana, 20°C iznutra oslonci na početku i kraju luka



Slika 9. Glavno naprezanje  $\sigma_x$  - temperatura 20°C izvana, 10°C iznutra oslonci na početku i kraju luka

Uspoređeni su rezultati pomaka, reakcija u oslancima i naprezanja zida (luka) modeliranog kao dvodimenzio-

Tablica 2. Reakcije u osloncima - usporedba rezultata

2D ŠTAPNA ANALIZA				CSTBAR - RAVNINSKA ANALIZA		
Reakcije i kontrola				Temperatura 10°C izvana 20°C iznutra Reakcije i kontrola		
Čvor	X-Smjer	Y-Smjer	Moment	Čvor	X-Smjer	Y-Smjer
1	42,16	-32,69	,00	109	45,83	-35,51
12	-42,16	32,76	,00	144	-45,30	35,49

nalni štapni sustav i modeliranog CSTBAR-om kao ravninski sustav, s time da su oslonci na početku i kraju luka (tablica 1.).

Najveći su pomaci približno na sredini luka, tj. u čvoru 6 kod zida modeliranog kao 2D štapni sustav, odnosno kod zida modeliranog CSTBAR-om su također približno u sredini luka i to u čvorovima od 20 do 200 po 36 jer zid ima debljinu .

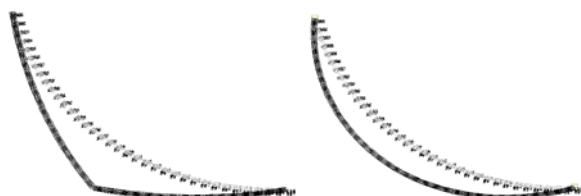
Uspoređene su i reakcije u osloncima za obadva modela (tablica 2.).

Za štapni model gdje su oslonci na početku i kraju luka, izračunata su naprezanja od maksimalnog momenta i uzdužne sile, koja iznose:

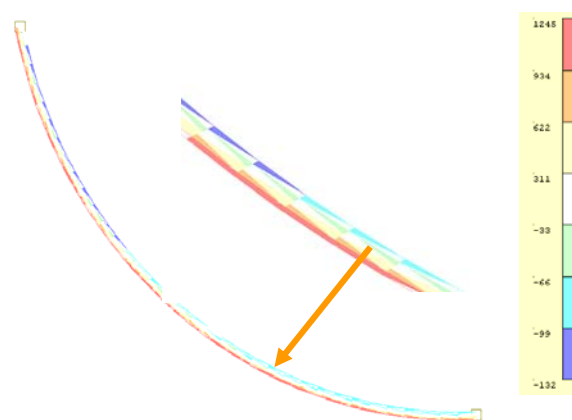
$$\sigma_{MN \text{ gore}} = 1510,8 \text{ kN/m}^2 \text{ i } \sigma_{MN \text{ dole}} = -1572,7 \text{ kN/m}^2.$$

Za isti model, ravninski proračun daje glavna naprezanja za temperaturu od 10°C izvana i 20°C iznutra, od  $\sigma_1 = 2,11$  MPa, a za temperaturu od 20°C izvana i 10°C iznutra,  $\sigma_1 = 1,36$  MPa. U oba slučaja naprezanja prelaze dopuštena naprezanja za marku betona MB 15. Dozvoljena vlačna naprezanja za MB 15 su 0,8 MPa.

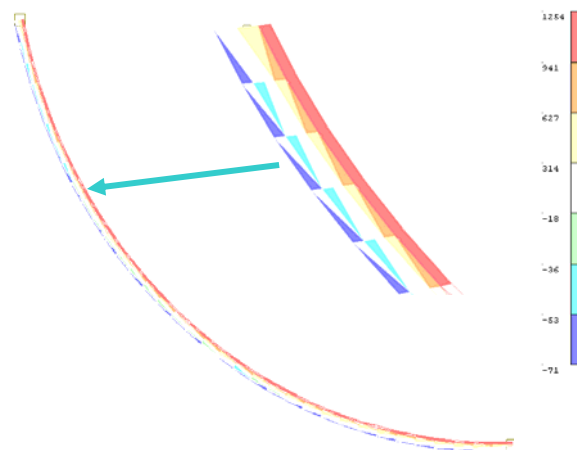
Kao kod štapnog modela i u ravninskom modelu (CSTBAR), na mjestu najvećih pomaka, simulirana je pukotina približno u sredini luka, tj. u čvoru 128 koji se nalazi približno u sredini zida debljine 75 cm. Pukotina je simulirana dodavanjem novih čvorova tako da sada umjesto 216 čvorova imamo 221 čvor. Broj elemenata je ostao isti. Za opterećenje je također uzeta temperatura od 10°C izvana i 20°C iznutra, i obrnuto.



Slika 10. Pomak sustava – oslonci na početku i kraju luka, a pukotina približno u sredini, lijevo - temperatura 10°C izvana, 20°C iznutra, desno - temperatura 20°C izvana, 10°C iznutra



Slika 11. Naprezanje  $\sigma_1$  - temperatura 10°C izvana, 20°C iznutra oslonci na početku i kraju luka, a pukotina približno u sredini luka



Slika 12. Naprezanje  $\sigma_1$  - temperatura 20°C izvana, 10°C iznutra oslonci na početku i kraju luka, a pukotina približno u sredini luka

Za model koji ima oslonce na krajevima i zglob u sredini (kod štapnog modela), odnosno pukotinu u sredini (kod ravninskog modela), mjesta i vrijednosti najvećih pomaka se razlikuju. Reakcije u osloncima kod štapnog modela i kod ravninskog modela su približno nula. Kako su rezne sile kod štapnog modela nula, iz toga slijedi da su i naprezanja nula (tablica 3.). Kod ravninskog modela za toplinsko opterećenje od 10°C izvana, 20°C iznutra i

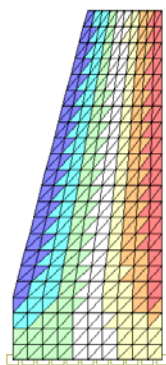
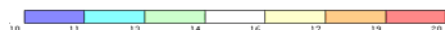


Tablica 3. Najveći pomaci – usporedba rezultata, oslonci na početku i kraju luka, a pukotina približno u sredini luka

2D ŠTAPNA ANALIZA (trozglobni luk)				CSTBAR – RAVNINSKA ANALIZA			CSTBAR – RAVNINSKA ANALIZA		
Pomaci [mm]				Temp.10°C izvana 20°C iznutra Pomaci [mm]			Temp.20°C izvana 10°C iznutra Pomaci [mm]		
Čvor	X-Smjer	Y-Smjer	Rotacija	Čvor	X-Smjer	Y-Smjer	Čvor	X-Smjer	Y-Smjer
1	,00	,00	-1,25	20	-6,20	-8,84	20	-3,94	-5,56
2	-1,16	-1,17	-1,10	56	-6,12	-8,88	56	-3,93	-5,54
3	-1,05	-4,32	-5,52	92	-6,05	-8,91	92	-3,92	-5,53
4	-1,89	-5,05	,06	128	-5,97	-8,95	128	-3,91	-5,51
5	-2,00	-3,51	,64	164	-5,89	-8,98	164	-3,91	-5,50
6	-,69	,13	-1,50	200	-5,81	-9,01	200	-3,90	-5,49
7	-4,15	-3,25	-,92						
8	-6,40	-4,50	-,34						
9	-6,94	-4,08	,24						
10	-5,36	-2,54	,82						
11	-1,39	-,53	1,40						
12	,00	,00	1,55						

obrnuto, 20°C izvana i 10°C iznutra naprezanje  $\sigma_1$  jest 1254 kN/m<sup>2</sup>. Vidi se da štapni model može samo grubo prikazati što se događa. Kako je ravninski model točniji, usvojiti ćemo te rezultate.

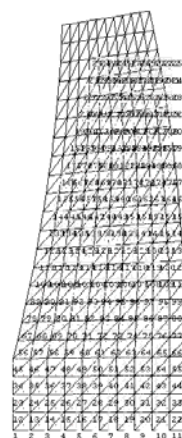
Dakle, modelirali smo zid-luk s osloncima na krajevima i opteretili ga toplinskim opterećenjem. Dobivena glavna naprezanja  $\sigma_1 = 2,11$  MPa za toplinsko opterećenje od 10°C izvana i 20°C iznutra, odnosno  $\sigma_1 = 1,14$  MPa za temperaturno opterećenje od 20°C izvana i 10°C, iznutra prelaze dozvoljena vlačna naprezanja za MB 15. Zbog prevelikih je naprezanja zid puknuo. Stoga smo na mjestu najvećih pomaka simulirali pukotinu i ponovili proračun. Sada su naprezanja  $\sigma_1$  za toplinsko opterećenje od 10°C izvana, 20°C iznutra i obrnuto jednaka, ustalila su se i iznose 1,24 MPa. Temperatura izaziva pucanje u konstrukciji sve dok veličina i položaj nastale pukotine ne izazove takve rubne uvjete (oslanjanje zida) da su naprezanja od unutrašnjih sila (toplinsko opterećenje) manja od dopuštenih.



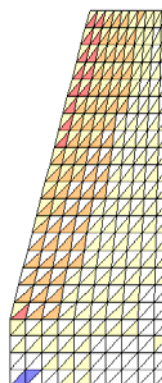
Slika 13. Raspored temperature kroz poprečni presjek zida temperatura, 10°C izvana, 20°C iznutra

U nedostatku 3D proračuna zid je modeliran i u poprečnom presjeku. Podijeljen je na 440 elementa i 253 čvora, te

je opterećen toplinskim opterećenjem kao i zid (luk) 10°C izvana, 20°C iznutra i obrnuto. Slike 16., 17. i 18. pokazuju raspored temperature kroz poprečni presjek zida, pomake zida od temperaturnog opterećenja te glavno naprezanje  $\sigma_{1max} = 452$  kN/m<sup>2</sup> za temperaturu od 10°C izvana i 20°C iznutra.



Slika 14. Pomak sustava od temperature 10°C izvana i 20°C iznutra



Slika 15. Naprezanje  $\sigma_1$ , temperatura 10°C izvana i 20°C iznutra

Tablica 4. Tablica najvećih pomaka na kruni zida( od čvora 243 do 253) tablica lijevo - temperatura 10°C izvana, 20°C iznutra, tablica desno - temperatura 20°C izvana, 10°C iznutra

Pomaci [mm]			Pomaci [mm]		
Čvor	X-Smjer	Y-Smjer	Čvor	X-Smjer	Y-Smjer
243	-, 39	, 49	243	, 58	, 60
244	-, 38	, 51	244	, 59	, 58
245	-, 37	, 53	245	, 60	, 56
246	-, 36	, 55	246	, 62	, 54
247	-, 35	, 57	247	, 63	, 52
248	-, 34	, 59	248	, 64	, 50
249	-, 33	, 61	249	, 64	, 48
250	-, 32	, 64	250	, 65	, 45
251	-, 31	, 66	251	, 66	, 43
252	-, 30	, 68	252	, 67	, 41
253	-, 29	, 70	253	, 68	, 39

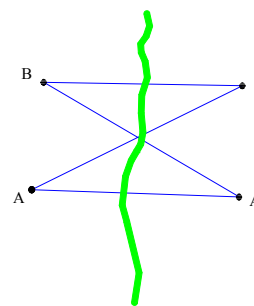
Najveći su pomaci zida u poprečnom presjeku na vrhu (kruni) zida.

### 5 Mjerenje pomaka pukotina obalnog zida

Izvršena su i mjerenja pomaka pukotina na obalnom zidu bujice Mošćenička Draga. Mjerenje pomaka pukotina je na zahtjev Hrvatskih voda, VGO Rijeka, izvršio IGH PC Rijeka. Reperi za mjerenje pomaka postavljeni su 8. 9. 2004., a mjerenja su izvršena 9. 9. 2004. u četiri navrata i to u 8 h 15', 12h 15', 15h 15' i 19h 45' (slika 16.). Na svako mjerno mjesto postavljana su po dva para repera. Mjereni su pomaci triju pukotina koje su označene brojevima od 1 do 3, s tim da je pukotina broj 1 uzvodno, a pukotina broj 3 nizvodno. Razmaci svake pukotine mjereni su na kruni zida i pri vrhu obalnog zida, odnosno pri vrhu i dnu obalnog zida.

Tablica 5. Najveći izmjereni pomaci u odnosu na početno stanje

Pomak u 12 h15' u odnosu na stanje u 8h 15' sunčano, temperatura zraka 22°C, zid u hladu			
mjerno mjesto	A-A(mm)	B-B(mm)	sred.vrijed. A-A i B-B (mm)
2 -	0,02	0,61	<b>0,32</b>
Pomak u 15 h15' u odnosu na stanje u 8h 15' sunčano, temperatura zraka od 25,9°C do 28°C, zid u hladu			
mjerno mjesto	A-A (mm)	B-B (mm)	sred. vrijed. A-A i B-B (mm)
2 -	0,11	0,71	<b>0,41</b>
Pomak u 19 h45' u odnosu na stanje u 8h 15' sunčano, temperatura zraka 22°C, zid u hladu			
mjerno mjesto	A-A(mm)	B-B(mm)	sred.vrijed. A-A i B-B (mm)
2 -	0,12	0,64	<b>0,38</b>



Slika 16. Shematski prikaz postavljanih repera za mjerenje

Tablica 6. Najveći izračunani pomaci na kruni zida za razliku temperature od  $\pm 8^\circ\text{C}$ 

Pomaci [mm]			Pomaci [mm]		
čvor	x-smjer	y-smjer	Čvor	x-smjer	y-smjer
243	-0,195	0,245	243	-0,29	0,30
244	-0,19	0,225	244	-0,295	0,29
245	-0,185	0,265	245	-0,30	0,28
236	-0,18	0,275	236	-0,31	0,275
247	-0,175	0,285	247	-0,315	0,26
248	-0,17	0,295	248	-0,32	0,25
249	-0,165	0,205	249	-0,32	0,24
250	-0,12	0,32	250	-0,325	0,225
251	-0,155	0,33	251	-0,33	0,215
252	-0,15	0,34	252	-0,335	0,205
253	-0,145	0,35	253	-0,34	0,195

U tablici 6. prikazani su najveći izmjereni pomaci zida u odnosu na početno stanje, i to srednja vrijednost pomaka repera A-A i B-B. Od početne temperature od 20°C izmjerene u 8h 15', temperatura zraka je do 15h 15' porasla za 8°C i bila je 28°C, da bi u 19h 45' pala na 22°C. Najveći izmjereni pomak zida bio je u 15h 15' (0,41 mm), a najveći izračunani pomak jest 0,34 mm.



## 6 Zaključak

U ovom radu pokazali smo da utjecaj topline na konstrukcije izaziva naprezanja koja prelaze dopuštena naprezanja za zadanu marku betona. Zbog toplinskog djelovanja u zidu bez rešaka neminovno moraju nastati pukotine. Veličine pomaka upućuju nas na dilatacije koje su potrebne da zid ne bi pucao. Toplina izaziva pucanje u konstrukciji sve dok veličina i položaj nastale pukotine ne izazovu takve rubne uvjete (oslanjanje zida) kod kojih su naprezanja koja se javljaju manja od dopuštenih.

## LITERATURA

- [1] Gajić-Čapka, M.; Zaninović, K.; Androić, B.; Džeba, I.; Dujmović, D.: *Termičko djelovanje na građevine – meteorološka podloga za hrvatske norme*, Građevinar 53 (2001) 7, 431.-441.
- [2] Kožar, I.: *Računalni program Potporni zid*
- [3] Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Witt, R. J.: *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.,454-468
- [4] Kožar, I.: *Računalni program OkvirS*
- [5] Kožar, I.: *Računalni program Cstbar*
- [6] Irobe, M., Peng, S. Y.: *Finite Element Analysis of Thermal Crack in Gravity Dam caoused by Annually Oscilating Enviromental Temperature*, FRAMCOS-3, 1998, AEDIFICATIO Freiburg, Germany, p.1605-1614.
- [7] Ožbolt, J., Kožar, I., Eligehausen, R., Periškić, G.: *Instationäres 3D Thermo-mechanisches Modell für Beton*, Beton und Stahlbetonbau, (0005-9900) 100 (2005),1; 39-51.