

TERMIČKO PONAŠANJE GRAVITACIONIH RCC BRANA I DEO – PRORAČUN TEMPERATURNOG POLJA

dr Vladan KUZMANOVIĆ, dipl. građ. inž.
Građevinski fakultet, Beograd

REZIME

U ovom radu su prikazani ravanski i prostorni numerički model za fazni proračun nestacionarnog temperaturnog polja. Teorijska osnova modela odnosi se na proizvoljnu betonsku konstrukciju, a kao primer razmatrana je gravitaciona brana od valjanog betona. Pri tome su realno modelirani materijali, dimenzije i oblik konstrukcije, granični i početni uslovi. Odgovarajućim izborom mreže konačnih elemenata u obzir je uzeta i tehnologija izgradnje RCC brana u slojevima. Verifikacijom modela na osnovu rezultata merenja sa brane Platanovrisi, rezultati su potvrđeni u razmeri 1:1. Na osnovu svih razmatranja, dati su zaključci i preporuke za proračun temperaturnog polja kod gravitacionih RCC brana.

Ključne reči: numerički model, fazna nelinearna analiza, nestacionarno temperaturno polje, gravitaciona brana, valjani beton.

1. UVOD

Ovaj rad predstavlja prvi od tri rada koji će biti objavljeni na temu termičkog ponašanja RCC brana. Zasnovan je na doktorskoj disertaciji autora, koja je odbranjena na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu pod naslovom "Prilog termičkom proračunu gravitacionih brana od valjanog betona". Na taj način će se šira stručna javnost upoznati sa ovim veoma aktuelnim, a do sada nedovoljno izučanim problemom.

Zahvaljujući veoma pozitivnim iskustvima, u poslednjih tridesetak godina širom sveta izgrađeno je više od 300 brana od valjanog betona [5]. Dve osnovne prednosti ovih brana su kraće vreme građenja i znatno niža cena u odnosu na brane od klasičnog hidrotehničkog betona.

Skraćenje vremena izgradnje omogućeno je većim dnevnim učincima, tj. tehnološkim postupkom

transporta, razastiranja i ugrađivanja valjanog betona mehanizacijom za nasute brane. Niža cena je posledica znatno manje količine oplata i vrlo krute konsistencije RCC-a, sa malom količinom cementa i značajnim dodatkom elektrofiltarskog pepela. Na taj način brane od valjanog betona postale su konkurentne čak i nasutim zemljanim branama, a naročito imajući u vidu rizik od prelivanja i mehaničke sufozije.

S obzirom na osobine mešavine valjanog betona, moglo bi se zaključiti da analiza termičkih uticaja kod RCC brana nije potrebna. Međutim, iako je toplota hidratacije relativno niska, dosadašnja iskustva pokazuju da je termički proračun neophodan, naročito kod visokih brana [1], [3]. Uzroci su kraće vreme građenja u odnosu na brane od klasičnog betona i tehnologija građenja u slojevima, što značajno smanjuje mogućnost odavanja toplote. Zbog toga po ugrađivanju betona dolazi do povećanja temperature, a nakon završetka procesa hidratacije, počinje hlađenje betona do prosečne višegodišnje temperature vazduha. Temperaturne promene izazivaju širenje i skupljanje. Pošto je promena zapremine konstrukcije ograničena, kao posledica skupljanja javljaju se termički naponi zatezanja. Ukoliko su ovi naponi veći od čvrstoće valjanog betona na zatezanje, dolazi do pojave prslina.

Da bi se izbegla pojava termičkih napona zatezanja i nastanak prslina, porast temperature u masivnim hidrotehničkim konstrukcijama mora biti strogo kontrolisan. Zato se u ovom radu prikazuje numerički postupak za proračun temperaturnog polja kod gravitacionih brana od valjanog betona. Na početku se daju teorijske osnove termičkog proračuna koje obuhvataju osnovne jednačine i termo-hemijski model.

Sledi prikaz numeričkog modela zasnovanog na programskom paketu DIANA [8], koji uzima u obzir sledeće:

- stvarnu geometriju konstrukcije

- realne početne i granične uslove
- termičke osobine RCC-a
- dinamiku građenja u slojevima.

Najpre je razvijen ravanski model poprečnog preseka kroz karakterističnu neprelivnu lamelu (prva do preliva na desnoj obali). Kalibracija i verifikacija modela izvršena je na osnovu rezultata merenja temperatura na brani Platanovrisi (Grčka, 95 m). Zatim je definisan prostorni numerički model posmatrane lamele i upoređeni su rezultati proračuna temperaturnog polja ovog modela sa rezultatima merenja i 2D modelom. Imajući sve navedeno u vidu, na kraju su izneti zaključci i preporuke za modeliranje termičkog ponašanja gravitacionih RCC brana.

2. TEORIJSKE OSNOVE MODELA

Razvoj termičkog proračuna brana od valjanog betona tekao je u skladu sa razvojem ovog tipa brana. Zbog male količine cementa u mešavini, u početku se smatralo da problem termičkih uticaja nije izražen, tj. da proračun nije potreban. Pojava prslina i procurivanje na mnogim branama izgrađenim do 1990. godine, ukazali su na neophodnost ozbiljne termičke analize.

2.1. Osnovne jednačine

Promena temperature (T) nehomogenog izotropnog tela tokom vremena (t) usled toplote hidratacije cementa opisuje se Furijevom jednačinom provodljivosti toplote:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + q, \quad (1)$$

gde je c – specifična toplota, ρ – zapreminska masa, λ – koeficijent provodljivosti toplote i q – moćnost unutrašnjih izvora toplote, koji se definiše kao funkcija adijabatskog porasta temperature (T_{ad}):

$$q = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_{ad}}{\partial t}. \quad (2)$$

Ukoliko koeficijent provodljivosti toplote ne zavisi od koordinata i temperature, jednačina (1) ima jednostavniji oblik:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \cdot \Delta T + \frac{q}{c \cdot \rho}, \quad (3)$$

gde je $\alpha_T = \lambda / (c \cdot \rho)$ – koeficijent difuzije i $\Delta T = \text{div}(\text{grad} T)$ – Laplasov operator temperature.

Da bi se od beskonačno mnogo rešenja jednačine (3) odredilo ono koje jednoznačno opisuje konkretan problem, potrebno je uvesti početne i granične uslove.

Početni uslovi karakterišu toplotno stanje tela u proizvoljno utvrđenom trenutku vremena $t = t_0$. Ako se pretpostavi da je taj trenutak vremena nulto stanje ($t_0 = 0$), za proizvoljne funkcije koordinata se dobija:

$$T(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = T(x, y, z, 0) = f(x, y, z). \quad (4)$$

Granični uslovi na konturi tela mogu biti zadati po temperaturi, po proticaju toplote i po zakonu o razmeni toplote sa spoljašnjom sredinom. Prema tome, postoje tri osnovna tipa graničnih uslova.

Prvi uslov: Na konturi G tela, u tački P , zadata je temperatura pomoću funkcije $\xi(P, t)$:

$$T \Big|_{\Gamma} = \xi(P, t). \quad (5)$$

Drugi uslov: Na konturi G tela, u tački P , zadat je proticaj toplote (toplotni fluks) pomoću funkcije $\eta(P, t)$:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \frac{1}{\lambda} \eta(P, t). \quad (6)$$

Treći uslov: Pretpostavlja se da je razmena toplote tela sa spoljašnjom sredinom po Njutnovom zakonu o razmeni toplote, prema kome je zavisnost gustine proticaja toplote (W_n) na površini tela G pri hlađenju, proporcionalna razlici temperature na površini tela i temperature sredine koja ga okružuje, odnosno da je $W_n = \alpha (\psi - T_n)$. Ako je pomoću funkcije $\psi(P, t)$ zadata temperatura sredine koja okružuje telo, treći uslov glasi:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = K [\psi(P, t) - T \Big|_{\Gamma}], \quad (7)$$

gde je n – spoljašnja normala u tački P na površini G tela, $K = \alpha / \lambda$ – relativan koeficijent odavanja toplote i α – koeficijent odavanja toplote.

2.2. Termo-hemijski model

Termičko ponašanje valjanog betona u velikoj meri zavisi od procesa hidratacije vezivnih materijala. Zbog toga se mora definisati odgovarajući termički model za određivanje količine oslobođene toplote hidratacije. U ovom radu primenjen je postupak zasnovan na stepenu reakcije (r) [8]. Stepenu reakcije ima vrednosti od 0 do 1 i predstavlja odnos oslobođene količine toplote do posmatranog trenutka vremena t i ukupne količine toplote hidratacije:

$$r(t) = \int_0^t q(\tau) d\tau \quad / \quad \int_0^\infty q(\tau) d\tau \quad (8)$$

Količina oslobođene toplote je funkcija istorije temperature i može se definisati kao:

$$q = \alpha \cdot q_r(r) \cdot q_T(T) \quad (9)$$

gde je α – maksimalna vrednost priraštaja toplote hidratacije, $q_r(r)$ – deo priraštaja toplote koji zavisi od stepena reakcije (obično se određuje preprocesiranjem uz zadavanje specifične toplote, adijabatskog porasta temperature i početnog stepena reakcije) i $q_T(T)$ – deo priraštaja toplote hidratacije u zavisnosti od temperature:

$$q_T(T) = e^{\frac{-C_A(r,T)}{T+273}} \quad (10)$$

gde je e – osnova prirodnog logaritma i $C_A(r,T)$ – Arrheniusova konstanta.

3. NUMERIČKI MODEL

Numerički model se zasniva se na metodi konačnih elemenata i formiran je korišćenjem programskog paketa Diana [8]. Primenom teorije konačnih elemenata na jednačinu (1), dobija se jednačina provođenja toplote u obliku:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{T}} = \mathbf{Q} \quad (11)$$

gde su:

\mathbf{K} – matrica provodljivosti toplote

\mathbf{C} – matrica specifičnog toplotnog kapaciteta

\mathbf{Q} – vektor čvornog proticaja

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{k} \cdot \mathbf{B} dV + \int_B \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{N} dB \quad (12)$$

$$\mathbf{C} = \int_V \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{N} dV \quad (13)$$

$$\mathbf{Q} = \int_V \mathbf{N}^T \cdot q dV + \int_B \mathbf{N}^T \cdot \varphi_B dB + \int_B \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{K} \cdot T_E dB \quad (14)$$

Ukoliko je problem linearan, pri rešavanju jednačine (14) može se primeniti direktna vremenska integracija, koristeći generalizovano trapezno pravilo. To znači da se za svaki vremenski korak Δt , jednačina rešava u trenutku $t + \alpha \Delta t$. Na raspolaganju su različite metode, u zavisnosti od vrednosti parametra α :

- $\alpha = 0$ predstavlja Ojlerovu (Euler) eksplicitnu integraciju prvog reda tačnosti i ograničenog vremenskog koraka da bi rešavanje bilo stabilno;

- $\alpha = 1/2$ je za Krank-Nicolsonovu (Crank-Nicolson) integraciju drugog reda tačnosti;
- $\alpha = 2/3$ koristi se u Galekrinovoj integraciji prvog reda tačnosti;
- $\alpha = 1$ je kod Ojlerove implicitne integracije prvog reda tačnosti, bez oscilacija.

Korišćenjem jednačine jednačine (14) i direktne vremenske integracije, dobija se "efektivna jednačina":

$$\mathbf{K}^* \cdot \mathbf{T}^* = \mathbf{Q}^* \quad (15)$$

u kojoj su:

\mathbf{K}^* – efektivna matrica kondukcije

\mathbf{T}^* – vektor temperatura u čvorovima

\mathbf{Q}^* – efektivni vektor toplotnog fluksa.

Jednačina (15) može se rešavati *implicitno*, ili *eksplicitno*.

Kod *implicitne vremenske integracije*, važi:

$$\alpha > 0 \quad \text{i} \quad \mathbf{T}^* = \mathbf{T}^{t+\alpha \Delta t} \quad (16)$$

pri čemu je izvod temperature po vremenu:

$$\dot{\mathbf{T}}^{t+\alpha \Delta t} = \frac{\mathbf{T}^{t+\alpha \Delta t} - \mathbf{T}^t}{\alpha \Delta t} \quad (17)$$

efektivna matrica provodljivosti toplote:

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{C}^{t+\alpha \Delta t} + \alpha \Delta t \mathbf{K}^{t+\alpha \Delta t} \quad (18)$$

i efektivni vektor čvornih proticaja:

$$\mathbf{Q}^* = \alpha \Delta t \mathbf{Q}^{t+\alpha \Delta t} + \mathbf{C}^{t+\alpha \Delta t} \mathbf{T}^t \quad (19)$$

U slučaju da se provodljivost toplote i specifična toplota menjaju kroz vreme (problem je "vremenski nelinearan"), pa je:

$$\mathbf{K}^{*(i)} \mathbf{T}^{*(i+1)} = \mathbf{Q}^{*(i)} \quad (20)$$

Ekstrapolacija za $\alpha < 1$ glasi:

$$\mathbf{T}^{t+\alpha \Delta t} = \mathbf{T}^t + \dot{\mathbf{T}}^{t+\alpha \Delta t} \Delta t \quad (21)$$

Kod *eksplicitne vremenske integracije*, važi:

$$\alpha = 0 \quad \text{i} \quad \mathbf{T}^* = \mathbf{T}^{t+\alpha \Delta t} \quad (22)$$

Izvod temperature po vremenu je:

$$\dot{\mathbf{T}}^t = \frac{\mathbf{T}^{t+\Delta t} - \mathbf{T}^t}{\Delta t} \quad (23)$$

efektivna matrica provodljivosti toplote glasi:

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{C}^t \quad (24)$$

i efektivni vektor čvornih proticaja:

$$\mathbf{Q}^* = \Delta t \mathbf{Q}^t - \Delta t \mathbf{K}^t \mathbf{T}^t + \mathbf{C}^t \mathbf{T}^t \quad (25)$$

3.1. Nelinearan temperaturni problem

Ako su provodljivost toplote, specifična toplota, i/ili granični uslovi funkcija temperature, problem je nelinearan u materijalnom smislu, tj. kaže se da postoji fizička nelinearnost problema. U tom slučaju, moguće je samo iterativno rešavanje sistema jednačina. U ovom radu granični uslovi su funkcija temperature, pa je pri rešavanju jednačine (11), korišćen je inkrementalno-iterativni postupak za rešavanje sistema nelinearnih jednačina. To znači da se u (i+1) iteraciji inkrement (promena) temperature ΔT računa kao:

$$\mathbf{K}^{* \text{ incr}} \cdot \Delta \mathbf{T} = \mathbf{Q}^{* (i)} - \mathbf{K}^{* \text{ sec}(i)} \cdot \mathbf{T}^{* (i)}, \quad (26)$$

$$\mathbf{T}^{* (i+1)} = \mathbf{T}^{* (i)} + \Delta \mathbf{T}. \quad (27)$$

Efektivna sekantna matrica provodljivosti toplote određuje se u svakoj iteraciji, a efektivni inkrement provodljivosti može se takođe određivati u svakoj iteraciji (regularna Njutn-Rafsonova metoda):

$$\mathbf{K}^{\text{ incr}} = \mathbf{K}^{\text{ sec}(i)}, \quad (28)$$

ili samo na početku vremenskog koraka (modifikovana Njutn-Rafsonova metoda):

$$\mathbf{K}^{\text{ incr}} = \mathbf{K}^{\text{ sec}(1)}. \quad (29)$$

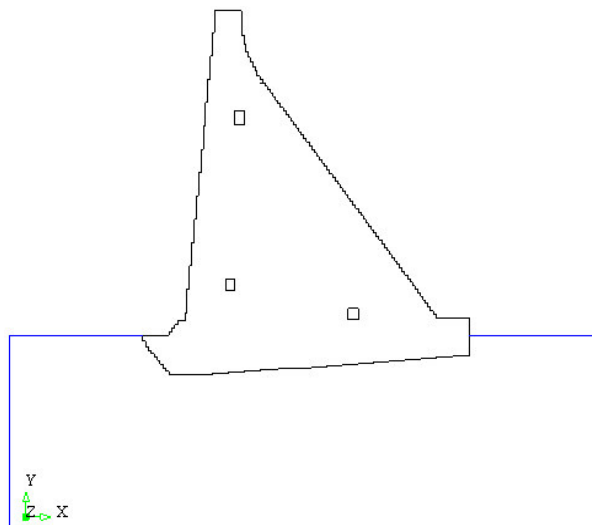
Provera postignute tačnosti u obe metode vrši se preko norme inkrementa vektora temperature:

$$|\Delta \mathbf{T}| \leq \varepsilon \times |\mathbf{T}^{* (1)}|. \quad (30)$$

Kalibracija i verifikacija modela izvršena je na osnovu rezultata merenja temperatura na brani Platanovrisi [7]. Ova brana je visoka 95 m, izgrađena je na reci Mesta, na severu Grčke i predstavlja najvišu RCC branu u Evropi. Dužina u kruni iznosi 280 m, a širina je 7 m. Konture su stepenaste, u nagibu V:H = 10:1 (uzvodna), odnosno V:H = 1:0,75 (nizvodna). Preliv ima pet polja, sa ustavama, dužine 80 m. Brana je građena u slojevima debljine 30 cm i pomoću vertikalnih transverzalnih razdelnica podeljena je na 13 lamela, slika 2.

3.1. Ravanski model M1

Poprečni presek (presek 2-2, na slici 2) karakteristične neprelivne lamele modeliran je ravanskim modelom M1, slika 1. Pri tome su realno uzete dimenzije i oblik poprečnog preseka: širina brane u kruni, stepenasti nagibi kontura, visina brane, dimenzije zuba i temeljne spojnice, kao i sve tri galerije.



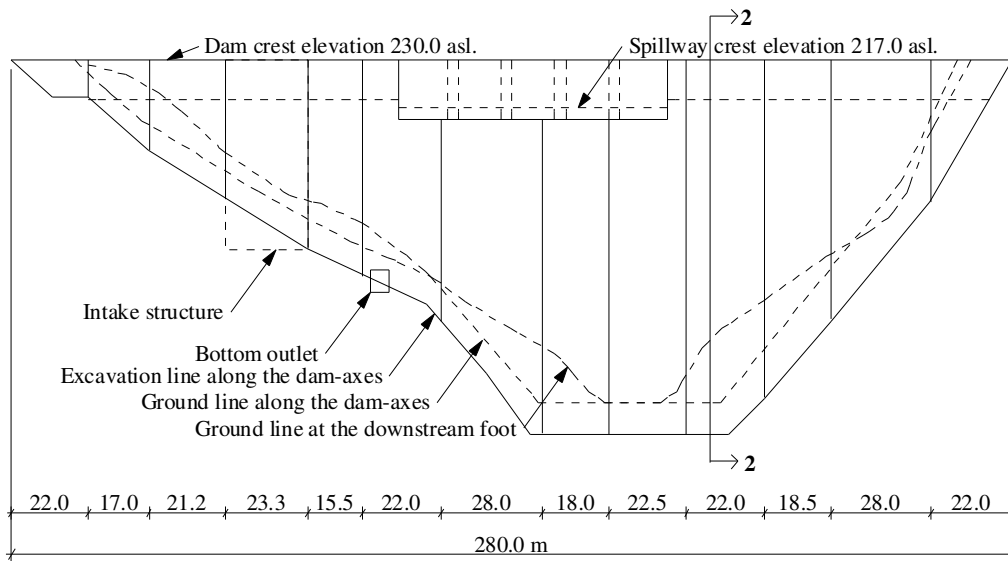
Slika 1. Geometrija ravanskog modela M1

Sadejstvo konstrukcije i stenske mase u kojoj je brana temeljena uzeto je u obzir uvođenjem dela modela u steni. S obzirom na prirodu problema, usvojeno je da model obuhvata stenu po 35 m uzvodno i nizvodno od brane i 50 m ispod kote dna reke. Na taj način je obezbeđeno odgovarajuće modeliranje pojava u zoni temeljne spojnice i razmena toplote.

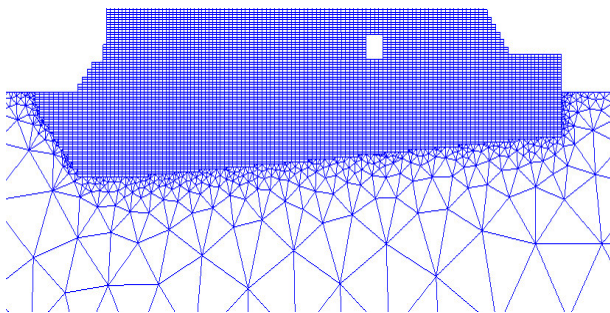
Mreža konačnih elemenata proističe iz geometrije modela i tehnologije građenja brane Platanovrisi u slojevima. Svaki sloj predstavlja novu fazu, čime je omogućena realna simulacija dinamika građenja. Model ima 313 slojeva visine po 30 cm, koji su predstavljeni pravougaonim izoparametarskim konačnim elementima odnosa strana približno 1:2 (slika 4).

Sadejstvjuća stenska masa modelirana je mrežom sa trougaonim elementima, koja je progušćena u zoni temeljne spojnice. Imajući u vidu prirodu termičkih problema, u ostalom delu modela stene usvojena je grublja mreža (slika 3).

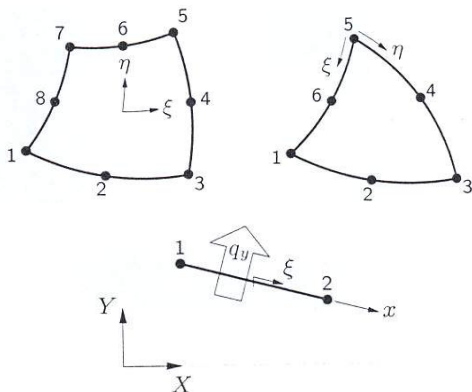
Razmena toplote između brane i sredine omogućena je uvođenjem graničnih elemenata na svim slobodnim betonskim konturama. Usvojeni su linijski elementi, (slika 4) koji obezbeđuju poklapanje sa čvorovima konačnih elemenata. Model M1 ima ukupno 39.090 elemenata, a maksimalan broj aktivnih elemenata iznosi 20.564 (18.668 konačnih i 1.896 graničnih).



Slika 2. Podužni presek brane Platanovrisi



Slika 3. Mreža konačnih elemenata u zoni temelja



Slika 4. Usvojeni elementi: četvorougaoni za telo brane, trougaoni za stenu i linijski granični elementi

Pri građenju brane Platanovrisi korišćene su tri vrste betona: valjani beton u telu brane (RCC), klasičan (konturni-FC) beton u zoni krune brane, uzvodnog i

nizvodnog lica, kao i izravnavajući beton u temelju (LC). Količine cementa, pepela i vode po jedinici zapremine za sve tri vrste betona prikazane su u tabeli 1. Na osnovu opsežnih laboratorijskih ispitivanja i *in situ* merenja, usvojene su termičke osobine (tabela 2).

Tabela 1. Količine cementa, pepela i vode po m³ betona

Vrsta betona	Cement (kg/m ³)	Pepeo (kg/m ³)	Voda (kg/m ³)
Valjani	50	225	128
Konturni	140	175	173
Izravnavajući	100	225	187

Tabela 2. Osobine materijala usvojene u modelu M1

Osobina	RCC	FC	LC	Stena
ρ [$\cdot 10^3$ kg/m ³]	2,36	2,45	2,43	2,43
E_∞ [GPa]	24,0	26,0	26,0	20,0
$T_{ad, max}$ [°C]	26,0	37,0	35,5	/
λ [W/(m \cdot °C)]	1,8	1,9	1,9	2,4
c [$\cdot 10^3$ J/(kg \cdot °C)]	0,95	1,00	1,00	0,88
α [$\cdot 10^{-5}$ 1/°C]	1,15	1,15	1,15	0,90
α_T [$\cdot 10^{-6}$ m ² /s]	0,80	0,78	0,78	1,12
C_A [$\cdot 10^{-3}$ °K]	4,70	5,00	5,00	/

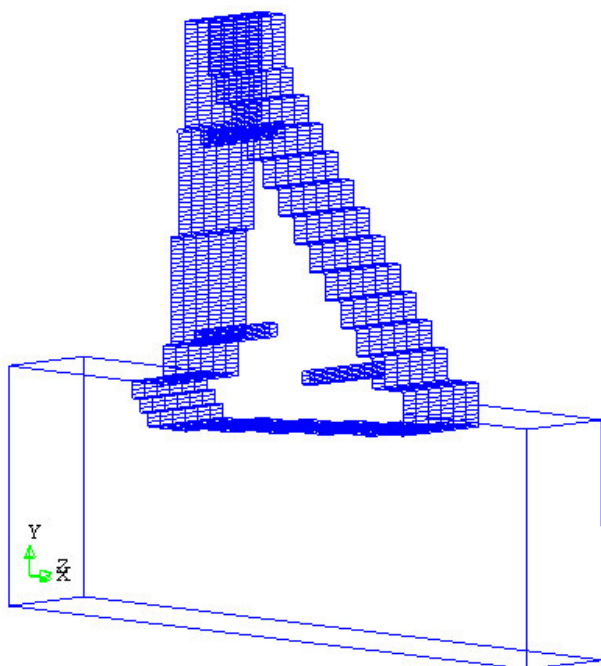
Granični uslovi modela M1 obuhvataju konstantnu temperaturu na spoljašnjim konturama stene i promenljivu temperaturu na uzvodnoj i nizvodnoj konturi, u galerijama i na kruni brane. Na spoljašnjim

konturama stene usvojena je srednja višegodišnja temperatura vazduha od $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na ostalim konturama granični uslovi zadati su preko vremenskih krivih kojima je definisana promena spoljašnje temperature u funkciji vremena, prema rezultatima merenja, [6]. Vremenske krive za horizontalne spojnice, uzvodnu i nizvodnu konturu zadate su sa dnevnim promenama temperature. Granični uslov na uzvodnoj konturi uzeo je u obzir punjenje akumulacije i temperaturu vode, a na nizvodnoj konturi uticaj osunčanosti.

Početni uslovi predstavljaju vrednosti temperature u čvorovima konačnih elementa, tako što je za svaki sloj zadata izmerena početna temperatura mešavine u trenutku ugrađivanja. Ove temperature kretale su se u intervalu od $7,4$ do $13,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pošto je izgradnja brane Platanovrisi trajala od oktobra 1995. do marta 1997. godine, najniže početne temperature imali su slojevi ugrađivani u toku januara, a najviše slojevi rađeni u maju i junu 1996. godine.

3.2. Prostorni model

Prostorni numerički model odgovara prvoj neprelivnoj lameli na desnoj obali, slika 5.

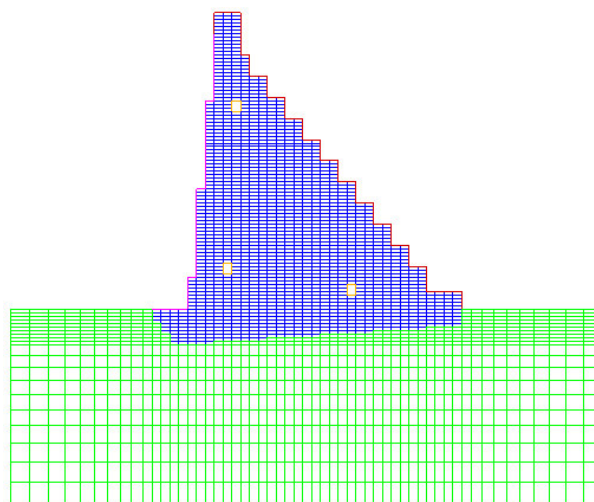


Slika 5. Geometrija prostornog modela

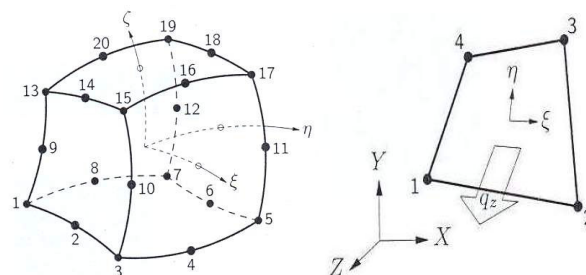
Uzvodna kosina brane aproksimirana je sa tri stepenaste vertikalne površine koje daju generalizovani nagib od 10:1. Nizvodna kosina je takođe stepenasta, sa visinom

stepenika od $6,0\text{ m}$ i širinom od $5,0\text{ m}$, čime je dobijen generalizovani nagib od $1,2 : 1$. Visina, širina u kruni, dimenzije zuba i temeljne spojnice, broj, položaj i dimenzije galerija, odgovaraju geometriji ove lamele na brani Platanovrisi.

Mreža konačnih elemenata prostornog modela pre svega je uslovljena brojem uslovnih jednačina problema i vremenom trajanja proračuna. Zbog toga je umesto debljine slojeva od po 30 cm , usvojena je zamenjujuća debljina slojeva od $1,0\text{ m}$, slika 6.



Slika 6. Mreža konačnih elemenata u srednjoj ravni prostornog modela



Slika 7. Tipovi elemenata 3D modela

Svaki zamenjujući sloj predstavlja novu (zamenjujuću) fazu građenja čije je trajanje jednako zbiru trajanja stvarnih slojeva koji su aproksimirani zamenjujućim slojem. Početni i granični uslovi, kao i termičke i mehaničke osobine betona u 3D modelu usvojeni su analogno kao u ravanskom modelu. Jedina razlika su granični uslovi na levom i desnom kraju lamele, gde je zbog blizine susednih lamela usvojeno je da nema razmene toplote sa okolinom.

Konačni i granični elementi 3D modela prikazani su na slici 7. Telo brane i stena modelirani su tipom CHX60 konačnog elementa sa 20 čvorova i 60 stepeni slobode pomeranja. Granični elementi su ravanski, tipa BQ4HT, sa 4 čvora, koji opisuju granice kod prostornog potencijalnog strujanja.

4. KALIBRACIJA I VERIFIKACIJA MODELA

Kalibracija modela izvršena je na ravanskom modelu M1 i to na osnovu rezultata merenja u fazi građenja brane i punjenja akumulacije. Nakon definisanja svih potrebnih parametara, urađen je proračun koji obuhvata petogodišnji period - od početka građenja, do oktobra 2000. godine (za koji je autor dobio originalne rezultate merenja sa brane Platanovrisi).

Verifikacija modela odnosi se na vremenski period od punjenja akumulacije do završetka proračuna. Upoređene su računске vrednosti temperatura sa odgovarajućim rezultatima merenja, i to: ekstremne temperature, temperature u karakterističnim čvorovima, temperature duž srednje linije i temperaturno polje na nivou čitavog poprečnog preseka. Sledi kratak prikaz rezultata poređenja, tj. verifikacije modela.

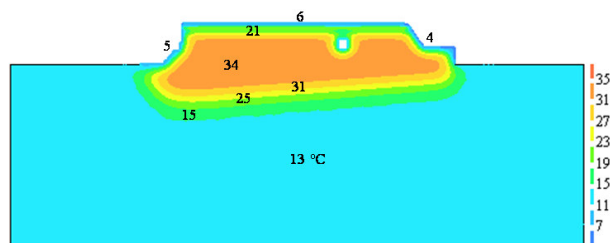
Tabela 3. Poređenje izmerenih i računskih T_{max} u prvom tromesečju 1996.

Datum merenja	Poslednji izgrađeni sloj	Izmereno		Model M1	
		T_{max} (°C)	Broj sloja	T_{max} (°C)	Broj sloja
9.1.'96.	71	35,0	30	34,2	29
6.2.'96.	96	34,5	36	33,8	33
4.3.'96.	119	34,2	39	33,5	36
1.4.'96.	153	34,1	37	33,4	34

Kao što se iz vidi iz tabele 3, u periodu od januara do aprila 1996. godine, veoma je dobro slaganje rezultata merenja maksimalnih temperatura i računskih vrednosti dobijenih modelom M1. U posmatranom periodu, maksimalne računске temperature manje su za 2,2 % od izmerenih, a zona u kojoj se javljaju je niža prosečno za 0,7 m. Ako se imaju u vidu dimenzije brane i činjenica da su termometri bili postavljeni samo u srednjoj ravni i u svakom drugom sloju, odstupanje zona je zanemarljivo.

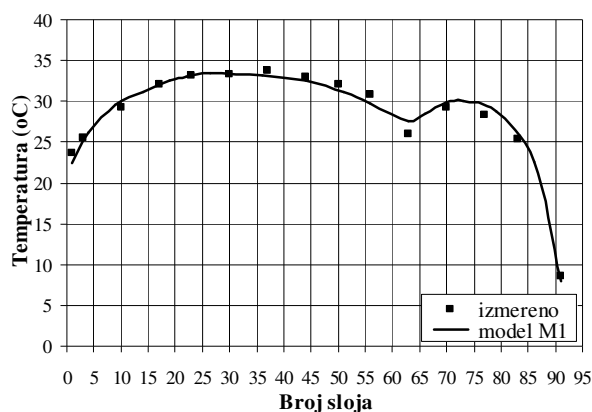
Izgled temperaturnog polja na dan 9. 1. 1996. godine prikazan je na slici 8. Temperature na spoljašnjim konturama su praktično jednake zadatom graničnom

uslovu. U stenskoj masi temperatura iznosi 13 °C, što je srednja višegodišnja temperatura, osim u temeljnoj spojnici na kontaktu brane i stene, gde se primećuje zagrevanje stene od cca 2 °C do dubine od oko 5 m.



Slika 8. Slika temperaturnog polja na dan 9.1.1996.

Da bi se stekla potpunija slika o slaganju rezultata merenja i računskih vrednosti temperatura, izvršice se poređenje temperatura u srednjoj liniji brane.

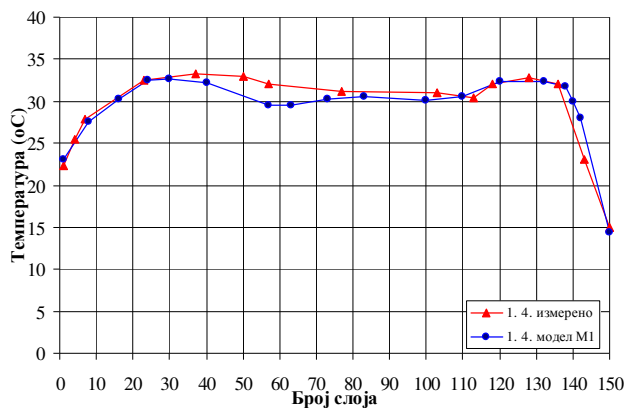


Slika 9. Poređenje temperatura u srednjoj liniji brane na dan 1.2.1996.

Sa slike 9. se vidi da je 1. 2. 1996. godine (brana je bila izgrađena do 91 sloja) najveće odstupanje u srednjoj liniji brane bilo u oblasti oko sloja 63, gde postoji i pad temperature. Razlog je novogodišnja pauza u izgradnji brane na koti 155,9 mm (sloj 63), koja je trajala 13 dana. U tom periodu površina horizontalne spojnice je bila prekrivena termoizolacionim trakama za koje autor nije imao precizne podatke o termičkim karakteristikama. I pored toga, maksimalno odstupanje je manje od 5,5 %.

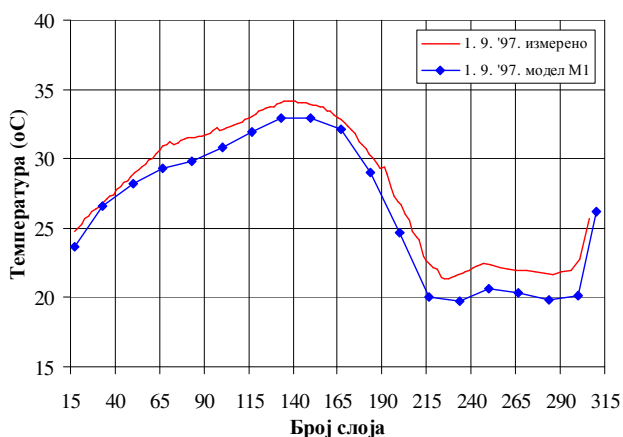
Sa slike 10. uočava se veoma dobro slaganje izmerenih i računskih vrednosti temperatura: na kontaktu sa stenom izmereno je 22,3 °C, a sračunato 23,1 °C; granični uslov na sloju 150 davao je 15,0 °C, a računska vrednost je

14,4 °C. Ovakav trend je i duž srednje linije, osim između sloja 40 i sloja 75, gde su odstupanja od 3 do 7%.



Slika 10. Poređenje temperatura u srednjoj liniji brane na dan 1.4.1996.

U cilju ocene dobijenih rezultata posle izgradnje brane, sračunate vrednosti temperatura porede se sa izmerenim vrednostima u srednjoj liniji brane na dan 1. 9. 1997. Sa slike 11. se vidi da kriva računskih vrednosti u potpunosti prati oblik krive rezultata merenja, s tim da su računski vrednosti niže za 1 do 2 °C, odnosno 3 do 9 %. Najveća odstupanja su od sloja 215 do sloja 300, odnosno u zoni od gornje galerije do krune brane. Ova odstupanja su posledica nepotpunih rezultata merenja temperature vazduha u galerijama i na spoljašnjim konturama, tj. nedovoljno precizno zadatih graničnih uslova.

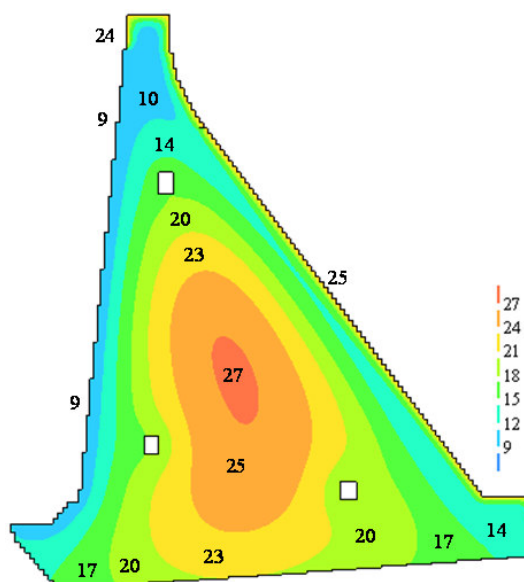


Slika 11. Poređenje temperatura u srednjoj liniji pre punjenja akumulacije, na dan 1.9.1997.

Izgled temperaturnog polja (slika 12.) dobijenog na modelu M1 nakon punjenja akumulacije, prikazan je na

dan 15. 6. 1999. godine. Maksimalna temperatura iznosi 27,4 °C i javlja se u središnjem delu brane, oko sloja 120. Minimalna temperatura je na uzvodnoj konturi i jednaka je temperaturi vode od 8,8 °C. Na nizvodnoj konturi i kruni brane temperatura betona je od 24 do 25 °C, u zonama oko galerija od 17 do 18 °C (u skladu sa graničnim uslovima), a na kontaktu sa stenom od 16 do 21 °C.

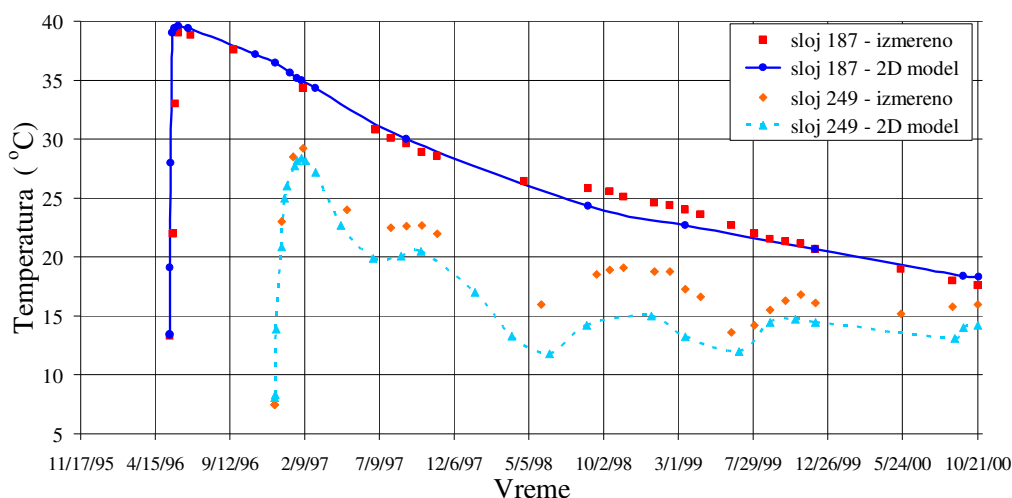
Ako se navedeni rezultati uporede sa rezultatima merenja, uočava se veoma dobro slaganje: maksimalna računski temperatura odstupa za 0,2 °C (izmereno 27,2 °C); minimalna temperatura se razlikuje za 0,8 °C (izmereno 8,0 °C), dok je oko galerija odstupanje zanemarljivo, osim oko gornje galerije gde je cca 2 °C.



Slika 12. Temperaturno polje na dan 15.6.1999.

Za ilustraciju promene temperature u karakterističnim čvorovima, na slici 13. prikazani su čvorovi u srednjoj liniji preseka, u sloju 187 (na koti 193,1 mm) i sloju 249 (na koti 211,7 mm). Sloj 187 je ispod gornje galerije, a sloj 249 u blizini krune brane.

Za sloj 187 slaganje rezultata je izuzetno dobro od trenutka ugrađivanja termometra sredinom maja 1996., do kraja razmatranog perioda. Grafik rezultata proračuna u potpunosti prati oblik grafika izmerenih vrednosti, a odstupanja su praktično zanemarljiva. Najveća su do 1,4 °C, tj. manje od 6 % (od jeseni 1998. do leta 1999. godine). U ostalom delu grafika odstupanja su do 3 %.



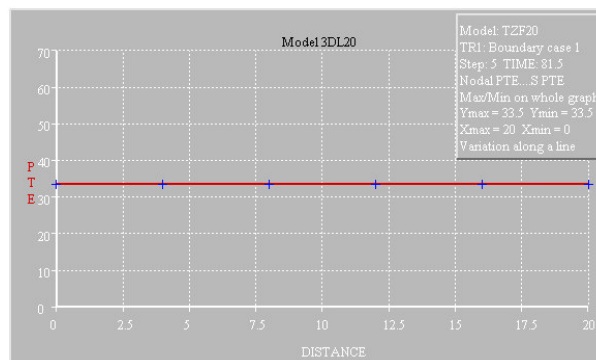
Slika 13. Promene temperature u karakterističnim čvorovima

Sloj 249 se nalazi u suženom delu poprečnog preseka, između gornje galerije i krune brane. U ovoj zoni veliki je uticaj graničnih uslova na promene temperaturnog polja, što utiče na relativno velika odstupanja rezultata proračuna u odnosu na izmerene vrednosti. Najbolje slaganje je od završetka ovog sloja, do proleća 1997. godine. U tom periodu odstupanja su manja od 1 °C. U preostalom delu grafika, uočava se dobro slaganje oblika, ali su računске temperature manje u proseku za 2,4 °C. Najveća odstupanja su od proleća 1998. do proleća 1999. godine i iznose 2,5 do 4,1 °C. Na osnovu svih dosadašnjih razmatranja, proističe da su ova odstupanja najvećim delom posledica nepotpunih rezultata merenja temperature vazduha, tj. nedovoljno precizno zadatog graničnog uslova.

5. PROSTORNO TEMPERATURNO POLJE

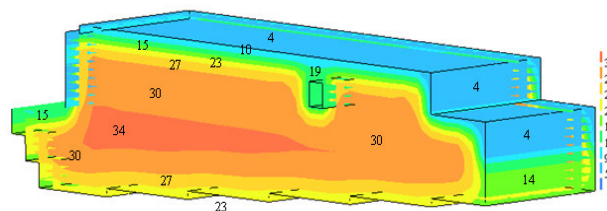
S obzirom na usvojeni granični uslov prema susednim lamelama, u 3D modelu kondukcija (provođenje) i konvekcija (razmena) toplote između lamele i spoljašnje sredine postoji samo u "x" pravcu (uzvodno-nizvodno) i "y" pravcu (gore-dole). Zbog toga je temperatura konstantna duž linija koje su paralelne podužnoj osi brane, odnosno duž linija koje spajaju levu i desnu granicu lamele, slika 14.

Sa slike 14. vidi se da je na dan 9. 1. 1996. godine temperatura konstantna duž linija koja spaja čvorove 5153 i 5260 na granicama lamele. Isto važi i za svaku drugu paralelnu liniju, kao i za bilo koji drugi datum.



Slika 14. Temperatura duž linije paralelne osi brane u sredini sloja 31 na dan 9.1.1996., 3D model

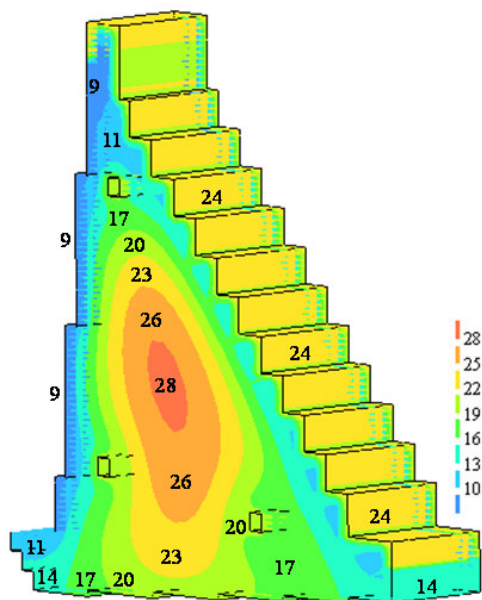
Rezultati proračuna temperatura pomoću prostornog modela u potpunosti odgovaraju rezultatima dobijenim primenom ravanskog modela i imaju veoma dobro slaganje sa rezultatima merenja, što se može videti poređenjem slike 15. i slike 8., odnosno slike 16. i slike 12.



Slika 15. Temperaturno polje na dan 9.1.1996. 3D model

Uočava se da je odstupanje temperatura u fazi građenja praktično zanemarljivo, jer je manje od 1 °C. Zone u

kojima se javljaju najveće temperature odstupaju manje od 2 m, tj. manje manje od dva zamenjujuća sloja.



Slika 16. Temperaturno polje na dan 15.6.1996.
3D model

Slično je i u fazi eksploatacije, slika 16., na kojoj je prostorno polje temperature u 3D modelu, na dan 15. 6. 1999. godine. I ova slika pokazuje da temperatura praktično ne zavisi od koordinate z. Sa slike se vidi da je maksimalna temperatura 28,6 °C, što je 1,2 °C više od temperature u modelu M1 (videti sliku 12), odnosno 1,4 °C više nego što je toga dana izmereno.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanog uočava se da ravanski model verno opisuje termičke procese u toku građenja brane Platanovrissi. Grafici računskih temperatura svojim oblikom dobro prate grafike izmerenih vrednosti. Veoma dobra slaganja pokazuju i maksimalne temperature, jer su odstupanja manja od 1 °C.

U toku prvih šest meseci od početka građenja, najveća odstupanja temperatura manja su od 2,5 °C, što iznosi 3 do 7 %. Nešto veća odstupanja javljaju se tokom letnjih meseci 1996. godine i neposredno po završetku građenja, kada su u središnjem delu poprečnog preseka računске temperature niže za cca 10 %. Iako su navedena odstupanja u zadovoljavajućim ganicama, autor smatra da bi slaganja bila još bolja da su dostupni rezultati merenja temperatura vazduha bili potpuniji.

U fazi eksploatacije odstupanja su zanemarljiva, osim na nizvodnoj konturi, gde je odstupanje do 12 % (zbog veće osunčanosti gornjeg dela brane i različitog ugla pod kojim padaju Sunčevi zraci, što nije obuhvaćeno modelom zbog nedostatka podataka merenja).

U skladu sa realnim graničnim uslovima, vrednosti temperatura u prostornom modelu su konstantne duž linija paralelnih podužnoj osi brane, između dve susedne transverzalne razdelnice. Slaganje rezultata proračuna 3D temperaturnog polja sa ravanskim modelom i rezultatima merenja temperatura je veoma dobro, što je osnova za korektan proračun naponskog stanja u telu brane. To znači da je za proračun temperaturnog polja kod RCC brana dovoljan ravanski model poprečnog preseka.

Iz navedenog sledi da primenom neustaljenog faznog termičkog proračuna, predloženi modeli korektno analiziraju termičke procese, koji se javljaju kod RCC brana. Na taj način omogućava se pravilan izbor mešavine i odgovarajuće tehnologije građenja, sa ciljem ograničavanja porasta temperature, smanjenja termičkih napona i onemogućavanja pojave prslina.

LITERATURA

- [1] Aniskin A. N. A.: Temperature regime of a gravity dam from rolled concrete, *Power Technology and Engineering*, Vol. 40, No. 1, (2006)
- [2] Cervera M., Oliver J. and Prato T.: Simulation of Construction of RCC Dams. I: Temperature and Aging, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No 9, (2000)
- [3] Cifres E. and Lancha J. C.: Prediction of the thermal state of dams using mathematical models. Application to the Algar dam (Valencia-Spain), *Proceedings of the International Symposium on RCC Dams*, 591-610., Spain, (1995)
- [4] Kuzmanović V.: Prilog termičkom proračunu gravitacionih brana od valjanog betona, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd, (2007)
- [5] Kuzmanović V., Savić Lj. i Milovanović B.: Brane od valjanog betona, monografija, Građevinski fakultet, Beograd, (2003)
- [6] "Malcolm Dunstan & Associates Consulting Engineers", *Review of the Properties of the Concretes in Platanovryssi Dam*, England, (1996)

- [7] Public Power Corporation of Greece: Platanovyssi Hydroelectric Project, Measurement Results, (2004)
- [8] TNO Building and Construction Research: Diana User`s Manual, Delft, The Netherlands, (2002)
- [9] Witasse R. and Hendriks M.: Finite element modelling of early age concrete behavior using Diana, Finite Elements in Civil Engineering Applications, Lisse, ISBN 90 5809 530 4, (2002).

THERMAL BEHAVIOUR OF GRAVITY ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS PART ONE - THERMAL FIELD ANALYSIS

by

Vladan KUZMANOVIĆ,
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

This paper presents 2D and 3D numerical models for unsteady phased thermal analysis of RCC dams. The time evolution of a thermal field has been modeled with actual dam shape, RCC technology and adequate description of material properties. Model calibration and verification has been applied to the field investigations of the Platanovyssi dam in Greece, the highest RCC dam in Europe. The results of a long-term thermal

analysis, with actual initial and boundary conditions, have shown a good agreement with the observed temperatures. Having this in mind, recommendations are given for thermal analysis of RCC gravity dams.

Key words: numerical model, phased nonlinear analysis, unsteady temperature field, gravity dam, roller compacted concrete.

Redigovano 25.12.2008.