

Uroš Mirković¹, Vladan Kuzmanović², Goran Todorović³

ТЕРМИЧКА АНАЛИЗА ГРАВИТАЦИОНЕ БЕТОНСКЕ БРАНЕ У ФАЗИ ИЗГРАДНЈЕ И ЕКСПЛОАТАЦИЈЕ

Rezime:

Termičko ponašanje gravitacionih betonskih brana presudno zavisi od početnih i graničnih uslova, karakteristika mešavine i dimenzija blokova. U radu je prikazan prostorni numerički model za faznu termičku analizu visoke gravitacione betonske brane. Za usvojene dimenzije blokova, redosled betoniranja i dinamiku građenja određivano je temperaturno polje, uzimajući u obzir toplotu hidratacije betona i sadejstvujuću stensku masu. Na osnovu dobijenih rezultata, dati su zaključci i preporuke za proračun temperaturnog polja kod gravitacionih betonskih brana.

Ključne reči: numerički model, termička analiza, gravitaciona brana, građenje, eksploatacija

THERMAL ANALYSIS OF CONCRETE GRAVITY DAM UNDER CONSTRUCTION AND DURING OPERATION

Summary:

The thermal behavior of concrete gravity dams crucially depends on the initial and boundary conditions, the characteristics of the mixture and the dimensions of the blocks. This paper presents numerical model for transient thermal analysis of a high concrete gravity dam. The temperature field was determined for the predefined dimensions of the blocks and placement schedule, taking into account hydration heat and the surrounding rock mass. Based on the obtained results, conclusions and recommendations for concrete gravity dams thermal analysis are given.

Key words: numerical model, thermal analysis, gravity dam, construction, exploitation

¹ mast. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Republika Srbija, uros.mirkovic@jcemi.rs

² dr, redovni profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Republika Srbija, vladak@grf.bg.ac.rs

³ dr, redovni profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Republika Srbija, todor@grf.bg.ac.rs

1. TRANSPORT TOPLOTE

Transport toplote se u prirodi obavlja preko tri osnovna procesa: provođenjem (kondukcijom), prelazom (konvekcijom) i zračenjem (radijacijom).

Provođenje (kondukcija) je proces prenosa toplote kod koga nema strujanja ili usmerenog kretanja molekula već se energija prenosi isključivo haotičnim sudarima atoma. Ovaj vid je dominantan unutar čvrstih tela jer su svi susedni atomi vezani jakim hemijskim vezama.

Prelaz toplote (konvekcija) se dešava ako je čvrsto telo u kontaktu sa sredinama drugog agregatnog stanja (gas - čvrsto telo, tečnost – čvrsto telo). Tu postoji slobodno ili prinudno strujanje fluida na kontaktu sa telom pa se razmena toplote obavlja sa fluida u kretanju na čvrsto telo i obrnuto.

Zračenje (radijacija) se javlja kod tela svih agregatnih stanja na svim temperaturama i potiče od elektromagnetnog zračenja samih atoma i molekula usled njihovog termalnog kretanja i sudaranja.

2. TEMPERATURNI UTICAJI U HIDROTEHNIČKOM BETONU

Usled nejednakog širenja i skupljanja betona u telu brane, javljaju se naponi zatezanja koji izazivaju nastanak prslina. Prsline se vremenom šire, slabe otpornost brane na smicanje, i omogućavaju proviranje vode i povećanje uzgona. [1]

Ovi uticaji se ublažavaju građenjem u međusobno nezavisnim lamelama, koristeći sporovezujuće cemente kod kojih se proces vezivanja i oslobađanja toplote obavlja sporije, spravljanjem betona sa manjom količinom cementa, snižavanjem temperature betonske mešavine korišćenjem hladne vode za spravljanje betona, hlađenjem agregata, hlađenjem i negovanjem betona nakon ugrađivanja i faznim betoniranjem.

Za izgradnju brana najčešće se koristi hidrotehnički beton, koji mora da obezbedi dovoljnu čvrstoću, otpornost na mraz i vododrživost, a da, sa druge strane, ima nisku toplotu hidratacije i male zapreminske deformacije. [1]

3. BLOKOVI U POPREČNOM PRESEKU GRAVITACIONE BRANE

Da bi postigla monolitnost i ubrzalo hlađenje betona usled hidratacione toplote, gravitacione betonske brane se radnim razdelnicama dele na blokove za betoniranje. Blok za betoniranje je zapremina ograničena oplatom ili betonom koju bi trebalo odjednom betonirati.

U izvođačkoj praksi se koristi nekoliko načina (metoda) raspoređivanja blokova unutar lamele: dugi, kosi, stubasti blokovi, kombinacija stubastih i dugih blokova, visoki blokovi. Izbor dimenzija i rasporeda blokova (tj. metode građenja) zavisi od termičkog proračuna i tehničko-ekonomske analize.

Dužina bloka (posmatrano u pravcu ose brane) po pravilu je jednaka dužini lamele i određuje se iz uslova da ne dođe do pojave prslina (obično vertikalnih) usled skupljanja betona. Širina bloka (u pravcu uzvodno-nizvodno) zavisi od širine lamele i obično iznosi do 25,0 m. Visina bloka se obično kreće između 0,5 i 3 m. [2]

4. TERMIČKA SVOJSTVA HIDROTEHNIČKOG BETONA

Za proračun temperaturnog polja gravitacionih betonskih brana (i drugih masivnih hidrotehničkih konstrukcija), osim toplotne provodnosti hidrotehničkog betona, uzimaju se u obzir i toplotna fizička svojstva stene u koju je temeljena betonska hidrotehnička konstrukcija, izdvajanje toplote iz hidrotehničkog betona i razmena toplote između površine betonskih blokova i spoljašnje sredine.

Hidrotehnički beton ima sledeća termička svojstva [2]:

- c - specifični toplotni kapacitet; brojno je jednak količini toplote neophodne za povećanje temperature jedinice mase tela za jedan stepen [$J/(kg^{\circ}C)$],
- $c \cdot \rho$ - specifični zapreminski toplotni kapacitet [$J/(m^3^{\circ}C)$],
- λ - toplotna provodnost koja karakteriše intenzivnost procesa provođenja toplote u telu; brojno je jednak gustini toplotnog fluksa usled provođenja toplote kada je razlika temperatura površina između kojih se provodi toplota $1^{\circ}C$ ($1 K$) [$W/(m^{\circ}C)$],
- α - koeficijent toplotne difuzivnosti $\alpha = \lambda/(c \cdot \rho)$, brojno je jednak odnosu toplotne provodnosti λ i specifičnog zapreminskog toplotnog kapaciteta $c \cdot \rho$ [m^2/s].

Toplotna fizička svojstva hidrotehničkog betona zavise od mnogih parametara, kao na primer vrste cementa, utroška cementa, vrste agregata, utroška agregata i vodocementnog faktora.

Izdvajanje toplote iz betona zavisi od hemijskog i mineraloškog sastava cementa, jer se u procesu očvršćavanja betona iz njega izdvaja značajna količina toplote u reakcijama hidratacije cementa. Eksperimenti su pokazali da se u toku prvih 7 do 10 dana očvršćavanja betona izdvaja od 70 do 80% toplote nastale hidratacijom cementa i da se u daljem procesu izdvajanje toplote usporava. Temperatura usled toplote nastale hidratacijom cementa daje najveće napone i prrsline u brani u periodu građenja. [2]

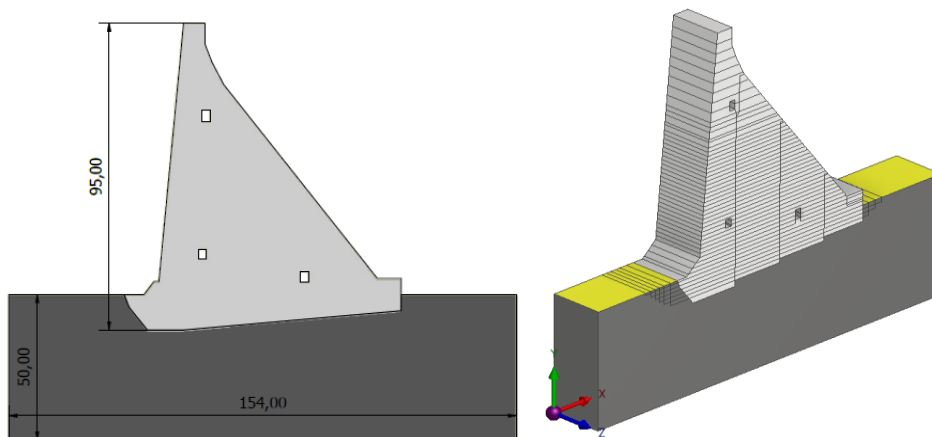
5. OPIS MODELA

5.1. TRODIMENZIONALNI GEOMETRIJSKI MODEL BRANE

Trodimenzijski geometrijski model za termički proračun brane obuhvata jednu lamelu brane sa pripadajućom stenskom masom (Slika 1).

Lokalni koordinatni sistem brane postavljen je sa koordinatnim početkom kao na Slici 1, sa pozitivnim smerom X ose u pravcu toka reke i Z ose ka desnom boku brane. Y osa je vertikalna osa sa pozitivnim smerom naviše.

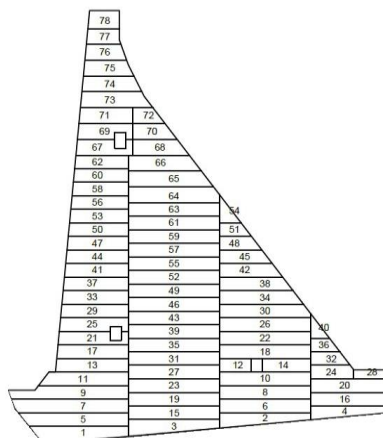
Pripadajuća stenska masa prikazanog modela je dimenzija $154,0 \times 20,0 \times 50,0$ m (L:B:H). Uzvodna i nizvodna ivica stenske mase je oko $35,0$ m uzvodno i nizvodno od ivica brane. Najniža kota modela je na $101,0$ mm (kota dna stenske mase) a najviša na $230,0$ mm (kota krune brane), dok je gornja kota stenske mase $151,0$ mm. Modeliranjem pripadajuće stenske mase na pomenuti način, obezbeđeno je i odgovarajuće modeliranje pojava u zoni temeljne spojnice i razmena toplote između stene i brane.



Slika 1 - Trodimenzionalni geometrijski model nepelivne lamele

Telo brane (tj. posmatrane lamele) je modelirano zapreminskim telima (3D solidima) koja čine lamelu sastavljenu od 78 blokova. Blokovi tela brane su stubastog tipa, dužine koja je jednaka dužini lamele (20,0 m), prosečne širine 20,0 m i visine - 3,0 m (blokovi 1-63), 3,5 m (blokovi 64-77), odnosno 4,0 m (blok 78).

Prikaz blokova sa usvojenim planom betoniranja dat je na Slici 2.



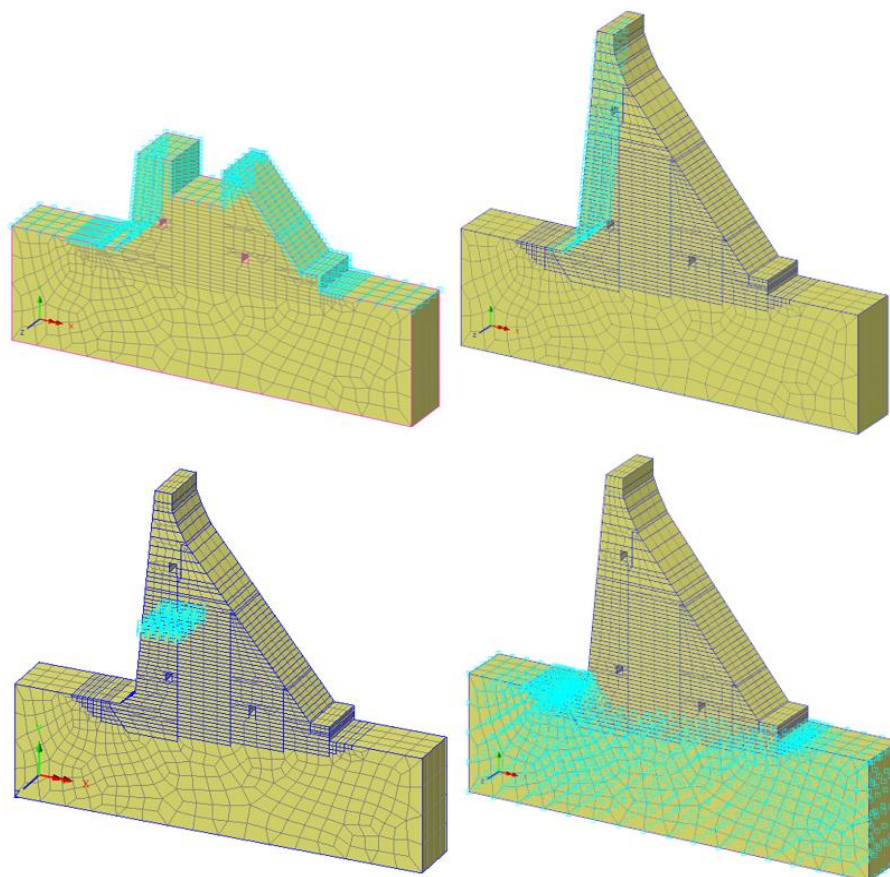
Slika 2 - Blokovi u poprečnom preseku lamele sa planom betoniranja

5.2. TRODIMENZIONALNI MKE MODEL BRANE

5.2.1. Mreža konačnih elemenata

Za potrebe modeliranja termičkih procesa formiran je, u programu LUSAS, trodimenzionalni MKE model lamele. MKE model, pored tela brane, obuhvata i deo pripadajuće stense mase.

Svaki blok predstavlja novu fazu, čime je omogućena realna simulacija dinamike građenja. Mreža konačnih elemenata modela brane je kreirana korišćenjem heksaedarskih konačnih elemenata HX8M. Model se sastoji od 4068 elemenata i 5335 čvorova.



Slika 3 - Konturni uslovi za sprovođenje termičkog proračuna (odozgo sa leve strane u smeru kazaljke na satu: površina betona u dodiru sa vazduhom, površina betona u dodiru sa vodom, temperatura pripadajuće stenske mase i temperatura sveže betonske mešavine)

5.2.2. Konturni uslovi

Za sprovođenje termičkog proračuna uzeti su u obzir sledeći granični uslovi (Slika 3):

- površina betona u dodiru sa vazduhom (temperature vazduha se kreću u rasponu od $-2,0$ do $33,0$ °C, dok se temperatura vazduha u galerijama kreće od $10,0$ do $22,0$ °C),
- površina betona u dodiru sa vodom (temperatura vode je usvojena kao konstantna i iznosi $9,0$ °C),
- temperatura pripadajuće stenske mase (usvojena kao konstantna i iznosi $13,0$ °C),
- temperatura sveže betonske mešavine (kreće se u intervalu od $9,50$ do $13,10$ °C).

5.2.3. Parametri materijala za termičku analizu

Za termički proračun betonske konstrukcije brane korišćeni su sledeći parametri betona brane:

- toplotna provodnost:	$\lambda = 1,80 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
- specifična toplota:	$c = 950,0 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
- koeficijent termičkog širenja:	$\alpha' = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/^\circ\text{C}$
- koeficijent konvekcije:	$K=6,13 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$
- koeficijent radijacije:	$R = 14,0 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}^4)$
- referentna temperatura:	$13,0 \text{ }^\circ\text{C}$
- parametri hidratacije betona:	
- udeo cementa (tip I) u masi betona:	$50,0 \text{ kg}/\text{m}^3$
- vodocementni faktor:	$0,47$
- udeo letećeg pepela u masi betona:	$225,0 \text{ kg}/\text{m}^3$
- udeo CaO u letećem pepelu:	$17,0 \%$
- pretpostavljena temperatura očvršćavanja:	$25,50 \text{ }^\circ\text{C}$

dok su za parametre stenske mase usvojeni:

- toplotna provodnost:	$\lambda = 2,40 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
- specifična toplota:	$c = 880,0 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
- koeficijent termičkog širenja:	$\alpha = 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1}/^\circ\text{C}$

5.2.4. Faze proračuna

Termički proračun je sproveden za fazu izgradnje, fazu punjenja akumulacije i fazu eksploatacije. Faza izgradnje obuhvata period od 0 do 512. dana sa 78 proračunskih podfaza jednakog trajanja (za svaki od blokova), faza od završetka izgradnje do početka punjenja akumulacije obuhvata period od 512 do 1080. dana, dok preostali deo analiziranog vremena obuhvata period punjenja akumulacije zajedno sa eksploatacionim periodom (1080-1804. dan).

Termička analiza koja se vrši kada su toplotna provodnost, specifična toplota ili granični uslovi funkcije temperature je nelinearna u materijalnom smislu i kaže se da postoji fizička nelinearnost problema [3].

5.2.5. Dinamika građenja brane i punjenja akumulacije

Karakteristični datumi pri građenju brane su:

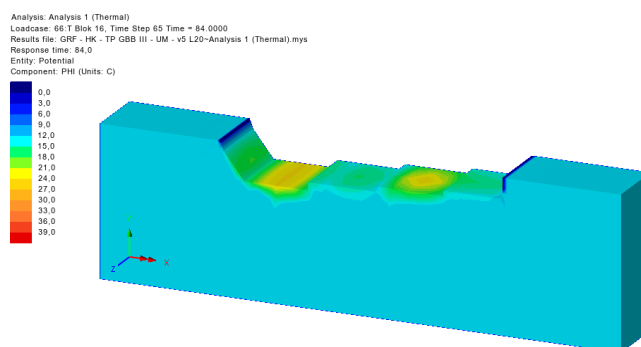
- datum početka građenja - 18.10.,
- prva pauza od 12 dana (od 15.12. do 27.12. iste godine),
- druga (letnja) pauza od 135 dana (od 20.06. do 02.11. druge godine),
- treća pauza (od 15.12. do 27.12. druge godine),
- punjenje akumulacije u periodu od 27.05. do 20.11. četvrte godine.

Dinamika građenja brane po blokovima definisana je tako da prati prethodno navedene datume i pauze sa odgovarajućom preraspodelom graničnih i konturnih uslova nad izmenjenom geometrijom modela koja je uslovljena betoniranjem po blokovima.

Ukupan broj dana koji su korišćeni pri proračunu je 1804 (obuhvaćena je i eksploatacija objekta u toku pete godine od početka građenja).

6. PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA TEMPERATURNOG POLJA

Temperatura u stenskoj masi uvek je jednaka zadatoj srednjoj višegodišnjoj temperaturi od 13,0 °C, osim u delu stene neposredno ispod temeljne spojnice, gde je nekoliko stepeni viša (Slika 4). Iz pomenutog razloga, na narednim slikama stenska masa će biti izuzeta iz prikaza.



Slika 4 - Prikaz temperature u stenskoj masi (13,0 °C)

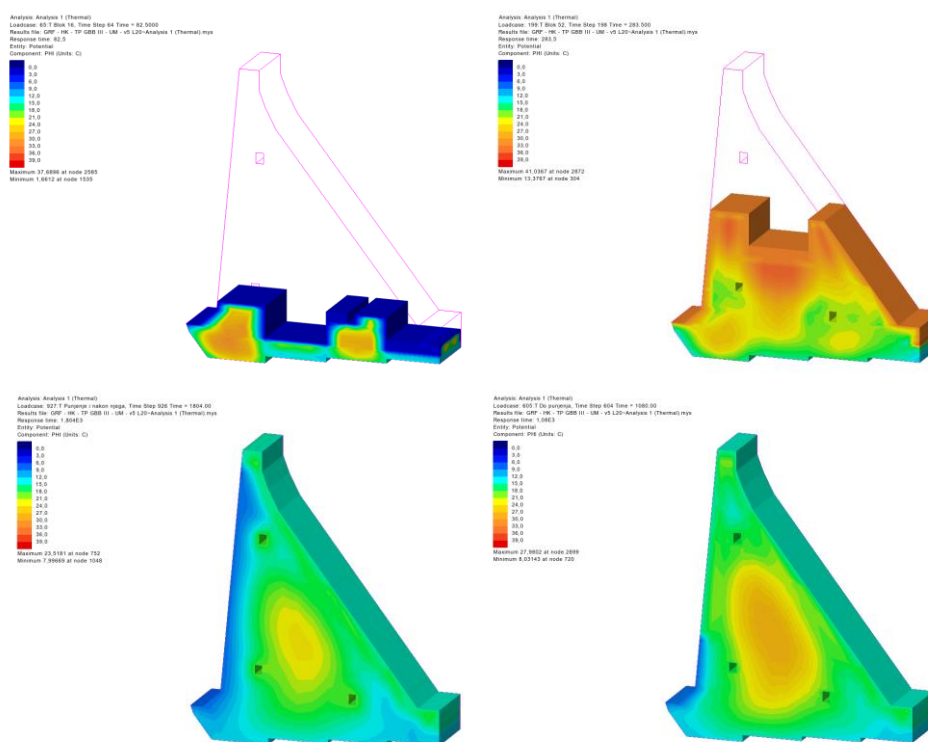
Temperaturno polje u telu brane prikazano je u pojedinim fazama (Slika 5) i to za:

- 84. dan od početka izgradnje konstrukcije (15 dana od završetka bloka 16 a u trenutku završetka prve pauze u izvođenju radova),
- 283. dan od početka izgradnje konstrukcije (40 dana od završetka bloka 52 a u toku druge pauze u izvođenju radova),
- 1080. dan od početka izgradnje konstrukcije, u toku punjenja akumulacije,
- 1804. dan od početka izgradnje konstrukcije, u vreme eksploatacije objekta.

Temperaturno polje za 84. dan ima maksimum od 37,7 °C i minimum od 1,7 °C. Maksimum se nalazi u središnjem delu bloka 9 bliže njegovoj nizvodnoj stranici, dok se minimum nalazi između blokova 16 i 20 na nizvodnom licu brane, bliže levoj stranici bloka i na kontaktu sa stenskom masom. Prikazani korak ove faze građenja pokazuje dobro slaganje sa graničnim uslovima. Temperatura vazduha u datom trenutku 10.01. iznosila je 3,0 °C. Temperatura sveže betonske mešavine pri betoniranju bloka 16 (69. dan) iznosila je 9,5 °C, a temperature prethodno izbetoniranih blokova kretale su se u intervalu od 9,50 do 10,0 °C. Adijabatski porast temperature u masi betona je izražen i očekivan, dok je ka spoljnim konturama blokova evidentan proces hlađenja izazvan uticajem vremenskih prilika (zimski period godine).

Temperaturno polje za 283. dan ima maksimum od 41,0 °C i minimum od 18,3 °C. Maksimum se nalazi na polovini visine bloka 49, u unutrašnjem delu i bliže uzvodnom licu bloka dok se minimum, izuzimajući beton do stenske mase uzvodno i nizvodno koji se u ograničenoj zoni ohladio do temperature iste, u središnjem delu bloka 3, bliže levoj stranici lamele. Prikazani korak ove faze građenja pokazuje dobro slaganje sa graničnim uslovima. Temperatura vazduha u datom trenutku 27.07. iznosila je 32,0 °C. Može se videti značajan uticaj letnjih temperatura na površine koje su u dodiru sa vazduhom, zbog čega je i uvedena letnja pauza i obustava radova. Efekat hlađenja betona u ovom radu nije razmatran, ali je svakako jedan od važnih procesa koji se primenjuje pri betoniranju masivnih konstrukcija pri visokim spoljnim temperaturama. Sa

druge strane, u nižim delovima lamele, evidentan je prethodni uticaj zimskih temperatura koje su dovele do hlađenja ovog dela konstrukcije pa se u njemu i javljaju minimalne temperature betona u ovoj fazi građenja. Temperatura sveže betonske mešavine pri betoniranju bloka 52 iznosila je 10,85 °C. Temperature prethodno izbetoniranih blokova kretale su se u intervalu od 9,50 do 13,10 °C. Temperature vazduha u prvoj i drugoj galeriji iznose 22,0 °C. Adijabatski porast temperature u masi betona je izražen i očekivan, dok je ka spoljnim konturama blokova evidentan pad tih temperatura u odnosu na unutrašnjost lamele.



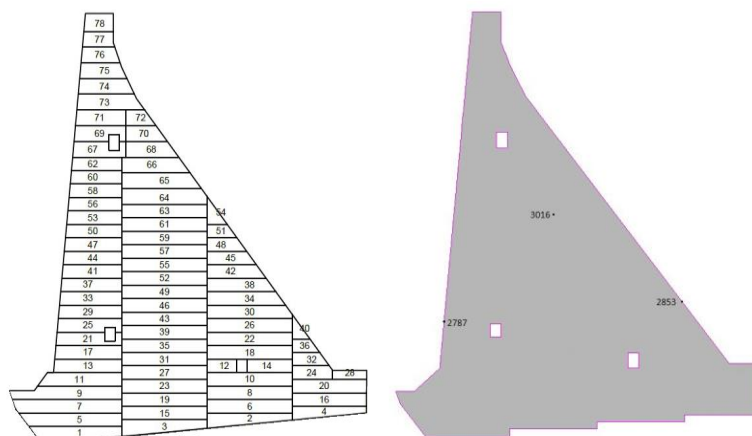
Slika 5 - Temperaturna polja za datume 10.01. (84. dan)-gore levo; 27.07. (283. dan)-gore desno, 02.10. (1080. dan)-dole desno i 25.09. (1804. dan od početka građenja)-dole levo

Temperaturno polje za 1080. dan ima maksimum od 28,0 °C i minimum od 8,0 °C. Maksimum se nalazi na u središtu bloka 52, dok se minimum nalazi na uzvodnoj levoj ivici bloka 33 u njenoj polovini visine. Prikazani korak ove faze pokazuje dobro slaganje sa graničnim uslovima. Temperatura vazduha u datom trenutku 02.10. iznosila je 16,0 °C. Temperature vazduha u sve tri galerije iznose 16,0 °C. Sa uzvodne strane prisutan je uticaj temperature vode pri punjenju akumulacije (9,0°C). Upravo se u ovoj zoni uočavaju minimalne temperature betona. Adijabatski porast temperature u masi betona je još uvek prisutan, dok je ka spoljnim konturama blokova evidentan pad tih temperatura u odnosu na unutrašnjost lamele. Proces hlađenja cele konstrukcije je u toku.

Temperaturno polje za 1804. dan ima maksimum od 23,5 °C i minimum od 8,0 °C. Maksimum se nalazi između blokova 49 i 52 uz levu stranicu blokova dok se minimum nalazi na uzvodnoj levoj ivici između blokova 76 i 77. Prikazani korak ove faze eksploatacije pokazuje dobro slaganje sa graničnim uslovima. Temperatura vazduha u datom trenutku 25.09. iznosila je 16,0 °C. Temperature vazduha u sve tri galerije iznose 20,0 °C. Sa uzvodne strane uočava se značajan uticaj temperature vode akumulacije (9,0 °C). U ovoj zoni nalazi se i minimalna ekstremna vrednost temperature betona. Adijabatski porast temperature u masi betona je još uvek prisutan, dok je ka spoljnim konturama blokova evidentan pad tih temperatura u odnosu na unutrašnjost lamele. Proces hlađenja cele konstrukcije je u toku.

7. TEMPERATURA U KARAKTERISTIČNIM ČVOROVIMA

U cilju praćenja promene temperature betona, izabrani su karakteristični čvorovi na uzvodnom i nizvodnom licu i u sredini lamele (Slika 6).

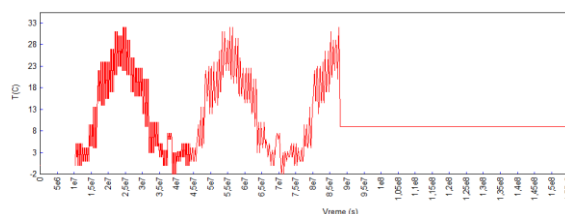


Slika 6 - Karakteristični čvorovi za prikaz promene temperature betona

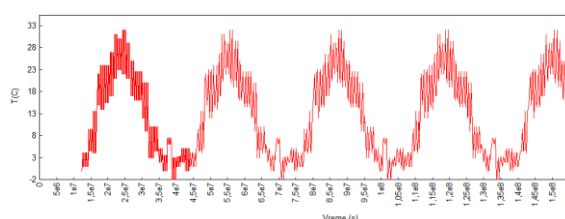
Na slici 7 prikazana je temperatura betona u čvoru koji se nalazi na uzvodnoj stranici bloka 25. Iz dijagrama se može zaključiti da je blok od trenutka izgradnje (121. dan od početka građenja konstrukcije) pa sve do trenutka kada ga je okvasila voda akumulacije (konstantne temperature) bio izložen temperaturi vazduha.

Na slici 8 prikazana je temperatura betona u čvoru koji se nalazi na nizvodnoj stranici bloka 34. Iz dijagrama se može zaključiti da je čvor bloka od trenutka izgradnje (162. dan od početka građenja konstrukcije) pa sve do kraja proračuna bio izložen temperaturi vazduha.

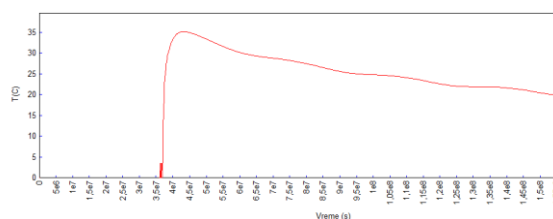
Na slici 9 prikazana je temperatura betona u čvoru koji se nalazi na gornjoj stranici bloka 61. Iz dijagrama se može zaključiti da je čvor bloka od trenutka izgradnje (418. dan od početka građenja konstrukcije) kratak vremenski period bio izložen temperaturi vazduha (decembar) nakon čega su preko njega izbetonirani drugi blokovi. Nakon betoniranja blokova iznad, temperatura u čvoru bloka počinje naglo da raste usled oslobađanja toplote hidratacije dostižući, u određenom trenutku, svoju ekstremnu vrednost. Nakon toga, do kraja proračuna evidentan je proces hlađenja betona.



Slika 7 - Temperatura betona ($^{\circ}\text{C}$) u čvoru 2787 (uzvodna kontura brane)



Slika 8 - Temperatura betona ($^{\circ}\text{C}$) u čvoru 2853 (nizvodna kontura)



Slika 9 - Temperatura betona ($^{\circ}\text{C}$) u čvoru 3016 (u masi lamele)

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da je proračun temperaturnog polja dao očekivane vrednosti temperatura u telu brane. Proračuni su pokazali da najveći uticaj imaju: adijabatski porast temperature mešavine betona, granični uslov po temperaturi vazduha, kao i prekidi u betoniranju. Zbog toga su veoma značajni kontrola temperature mešavine, odgovarajuća nega betona kao i odgovarajuće pauze prilikom izgradnje konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Savić Lj.: Uvod u hidrotehničke građevine, drugo izdanje, Građevinski fakultet, Beograd, 2009.
- [2] Petrović P.: Hidrotehničke konstrukcije, drugi deo, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [3] Kuzmanović V.: Prilog termičkom proračunu gravitacionih brana od valjanog betona, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd, 2007.
- [4] Kuzmanović V., Savić Lj., and Stefanakos J.: Long-term thermal two and three dimensional analysis of roller compacted concrete dams supported by monitoring verification. Canadian Journal of Civil Engineering, 37 (4), pp.600-610, 2010.