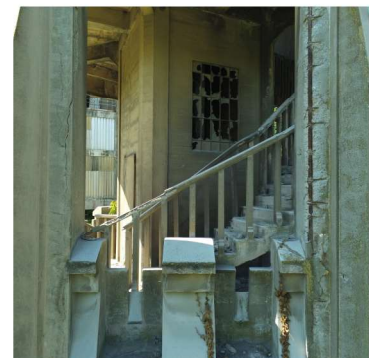
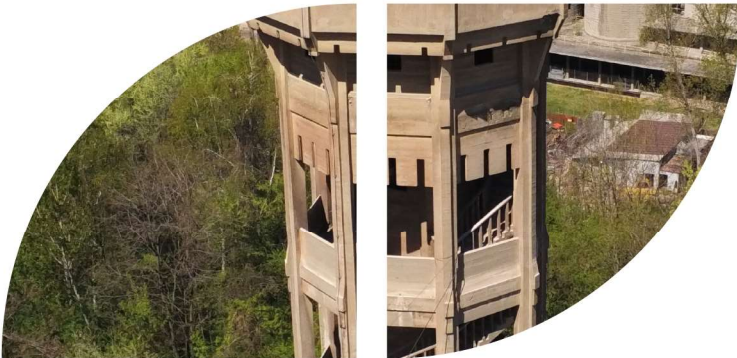
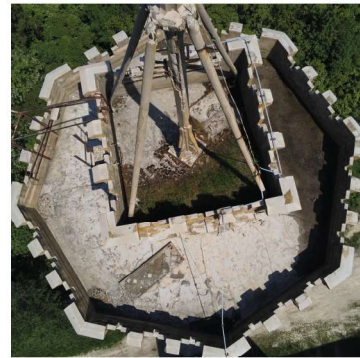




SAVREMENA GRAĐEVINSKA PRAKSA 2024

CONTEMPORARY CIVIL ENGINEERING PRACTICE 2024



ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS

Ruma,
6. i 7. jun 2024.



DRUŠTVO GRAĐEVINSKIH INŽENJERA NOVOG SADA
NOVI SAD
SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS OF NOVI SAD
NOVI SAD

KONFERENCIJA

**SAVREMENA
GRAĐEVINSKA
PRAKSA**

2024

ZBORNIK RADOVA

CONFERENCE

**CONTEMPORARY
CIVIL ENGINEERING
PRACTICE**

2024

PROCEEDINGS

Ruma, 6. i 7. jun 2024.

EDITORI ZBORNIKA SGP 2024

Prof. dr Vlastimir RADONJANIN
Profesor emeritus Radomir FOLIĆ

PROGRAMSKI ODBOR KONFERENCIJE:

Predsednik: Profesor emeritus Radomir FOLIĆ
Članovi: Prof. dr Mirjana MALEŠEV
Prof. dr Đorđe LAĐINOVIĆ
Prof. dr Ivan LUKIĆ
Prof. dr Zoran BRUJIĆ
Prof. dr Mirjana LABAN
Doc. dr Tatjana KOČETOV-MIŠULIĆ
Doc. dr Suzana DRAGANIĆ

ORGANIZACIONI ODBOR:

Predsednik: Prof. dr Vlastimir RADONJANIN
Članovi: Mirjana MANIĆ
Doc. dr Slobodan ŠUPIĆ
Dr Zoran DRAKULIĆ
Mr Radoslav LEKIĆ
Slavica STIPAC
Goran PROLIĆ
Biljana GAJDOBRANSKI
Milka BASTA
Olivera BUKVIĆ
Vladan PANTIĆ

TEHNIČKA PRIPREMA I GRAFIČKI DIZAJN:

Prof. dr Ivan LUKIĆ

CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотеке Матице српске, Нови Сад

624(082)(0.034.4)
69(082)(0.034.4)

КОНФЕРЕНЦИЈА Савремена грађевинска пракса (2024 ; Рума)

Zbornik radova [Elektronski izvor] = Proceedings / Konferencija Savremena građevinska praksa 2024 = Conference Contemporary Civil Engineering Practice 2024, Ruma, 6. i 7. jun 2024. ; [editori zbornika Vlastimir Radonjanin, Radomir Folić] ; [organizator] Društvo građevinskih inženjera Novog Sada. - Novi Sad : Društvo građevinskih inženjera Novog Sada, 2024. - 1 USB : tekst, ilustr.

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovnog ekrana. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 150. - Str. I: Uvodnik / editori = Introduction / the editors. - Bibliografija uz svaki rad. - Rezime na srp. i engl. jeziku uz svaki rad.

ISBN 978-86-918075-4-2

a) Грађевинарство -- Зборници

COBISS.SR-ID 145984521

UVODNIK

Društvo građevinskih inženjera Novog Sada i ove godine organizuje Konferenciju "Savremena građevinska praksa", koja se tradicionalno održava svake godine i na kojoj se okupljaju građevinski inženjeri ne samo iz Vojvodine, već i iz drugih delova naše zemlje, susednih država i inostranstva.

Prvi skup "Savremena građevinska praksa" održan je davne 1981. godine. Počevši od prvog skupa, pa do današnjih dana, osnovni cilj svih održanih konferencija bio je upoznavanje stručne javnosti sa aktuelnim problemima u građevinarstvu. Na konferencijama su prikazivana najnovija naučna i stručna dostignuća u oblasti projektovanja i građenja zgrada i inženjerskih objekata, kao i u oblasti procene stanja i sanacija postojećih objekata. Pored ovih tema, na većini konferencija prezentovani su i radovi o savremenim građevinskim materijalima, inovativnim tehnikama građenja, o promenama u domaćoj i evropskoj regulativi i o značajnim graditeljskim ostvarenjima. Teme su po pravilu birane tako da zadovolje zahteve inženjera u praksi i šire stručne javnosti.

Od 1999. godine pored prezentacija pozvanih predavača, uvedene su i tematske diskusije na kojima su uvek razmatrani aktuelni problemi građevinske struke. Pored toga, na ovim skupovima su prikazivani značajniji graditeljski zahvati ne samo iz naše sredine, već i šire. Po pravilu, na svim skupovima za predavače su angažovani eminentni istraživači i stručnjaci iz zemlje i inostranstva, kao i mladi inženjeri i doktori nauka iz Srbije i okolnih zemalja. Kompanije čija je oblast delovanja usko povezana sa građevinarstvom, na konferencijama predstavljaju najnovija stručna i tehnička rešenja iz oblasti svog rada i poslovanja.

Ove godine teme konferencije su raznovrsne i zahvataju različite oblasti graditeljstva: Sanacija i seizmičko ojačanje Vašingtonske Nacionalne katedrale; Termički naponi kod gravitacionih betonskih brana – iskustva i preporuke; Projektovanje i izgradnja mosta "Moračica" na autoputu "Princeza Ksenija" u Crnoj Gori; Prsline usled rane termičke kontrakcije i skupljanja u armirano-betonskim konstrukcijama; Projektovanje i izvođenje građevinskih objekata – Lična iskustva; 3D štampani betoni u Srbiji – realnost ili daleka budućnost; Procena stanja i sanacija konstrukcije vodotornja starog 120 godina; Tunel "Iriški Venac" – Izazovi i realizacija projekta savremenim metodama projektovanja i izvođenja; Specifičnosti projektovanja mostova na Moravskom Koridoru; Trajnost geopolimera armiranih vlaknima konoplje; Na putu cirkularnog građenja: drugi životni ciklus spregnutih konstrukcija od čelika i betona; Primena demontažnog konektora sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom u spojevima čeličnih i armiranobetonskih elemenata; Ponašanje pritisnutih hladno-oblikovanih čeličnih elemenata sa otvorima; Novi način proračuna dvodimenzionalnih jednačina tečenja vode i transporta materije, baziran na Letis Bolcman numeričkoj metodi.

Svim autorima radova, donatorima i prijateljima konferencije, editori upućuju veliku zahvalnost.

Editori

INTRODUCTION

The Society of Civil Engineers of Novi Sad organizes the "Contemporary Civil Engineering Practice" conference this year, which is traditionally held every year and where civil engineers gather not only from Vojvodina, but from other parts of our country and abroad.

The first meeting "Contemporary Civil Engineering Practice" was held back in 1981. Starting from the first meeting, until today, the main goal of all conferences was to introduce the professional public to current problems in construction. The conferences presented the latest scientific and professional achievements in the field of design and construction of buildings and engineering facilities, as well as in the field of condition assessment and rehabilitation of existing facilities. In addition to these topics, most of the conferences presented papers on modern construction materials, innovative construction techniques, changes in domestic and European technical regulations, and significant construction achievements. As a rule, the topics were chosen to satisfy the requirements of engineers in practice and the wider professional public.

Since 1999, in addition to presentations by invited lecturers, round tables have been introduced where current problems of the construction profession were always discussed. In addition, significant construction works were presented not only from our area, but also from beyond. As a rule, eminent researchers and experts from the country and abroad, as well as young engineers and doctors of science from Serbia and the surrounding countries, were engaged at all meetings for lecturers. Companies whose field of activity is closely related to construction, present the latest professional and technical solutions in the field of their work and business.

This year, the topics of the conference are diverse and cover different areas of construction: Restoration and seismic strengthening of the Washington National Cathedral; Thermal stresses at concrete gravity dams - experiences and recommendations; Design and construction of "Moračica" bridge on "Princess Ksenija" highway in Montenegro; Early-age thermal and shrinkage cracking in reinforced concrete structures; Design and construction of building and engineering structures – personal experiences; The 3D printed concrete – reality or far future?; Assessment and repair of the structure of water tower old 120 years; "Tunnel "Iriški Venac" – challenges and implementation of the project using modern methods of design and execution"; Specific aspects of design of bridges at Morava Corridor; Durability of the hemp fiber reinforced geopolymers; Towards circular construction: The second life cycle of steel-concrete composite structures; The application of demountable connector with mechanical coupler and rebar anchor in steel-reinforced concrete connections; Behaviour of compressed cold-formed steel members with web holes; New method of calculating two-dimensional equations of water flow and material transport, based on the Lattice Boltzmann numerical method.

Editors express their deep appreciation for all the contributions made by authors and donators.

The Editors

SUORGANIZATORI KONFERENCIJE

- REPUBLIKA SRBIJA
AUTONOMNA POKRAJINA VOJVODINA
POKRAJINSKI SEKRETARIJAT ZA VISOKO OBRAZOVANJE
I NAUČNOISTRAŽIVAČKU DELATNOST
- INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

DONATORI I SPONZORI KONFERENCIJE

GENERALNI

- “WISS, JANNEY, ELSTNER ASSOCIATES, Inc” – Northbrook, Illinois, SAD
- “LAFARGE BFC SRBIJA d.o.o. BEOČIN” – Beočin
- “PROJECT BIRO UTIBER” – Novi Sad

ZLATNI

- “AG UNS ARHITEKTONSKO-GRAĐEVINSKI INSTITUT” – Novi Sad
- “WIENERBERGER doo KANJIŽA” – Kanjiža

SREBRNI

- “FREYSSINET SRBIJA” – Beograd
- “MAPEI SRB d.o.o. BEOGRAD” – Leštane-Beograd
- “SIKA SRBIJA d.o.o.” – Šimanovci
- “INSTITUT ZA ISPITIVANJE, PROCENU STANJA I SANACIJU KONSTRUKCIJA DOO NOVI SAD” – Novi Sad

DONATORI

- “AXIS GRAĐEVINSKI BIRO” – Sremska Kamenica
- “DEL ING” – Beograd
- “INELAS ERECO” – Novi Beograd
- “KARIN KOMERC MD d.o.o. NOVI SAD” – Novi Sad
- “ORBIS COMPANY” – Novi Sad
- “PIRAMIDA” – Sremska Mitrovica
- “RADUN INŽENJERING” – Bačka Palanka
- Vinarija “DULKA” – Sremski Karlovci

SADRŽAJ

CONTENTS

Predrag L. POPOVIĆ, Matthew C. Farmer SANACIJA I SEIZMIČKO OJAČANJE VAŠINGTONSKE NACIONALNE KATEDRALE RESTORATION AND SEISMIC STRENGTHENING OF THE WASHINGTON NATIONAL CATHEDRAL.....	1
Vladan KUZMANOVIĆ, Uroš MIRKOVIĆ TERMIČKI NAPONI KOD GRAVITACIONIH BETONSKIH BRANA – ISKUSTVA I PREPORUKE THERMAL STRESSES AT CONCRETE GRAVITY DAMS - EXPERIENCES AND RECOMMENDATIONS	10
Mladen ULIČEVIĆ PROJEKTOVANJE I IZGRADNJA MOSTA “MORAČICA” NA AUTOPUTU “PRINCEZA KSENIJA” U CRNOJ GORI DESIGN AND CONSTRUCTION OF “MORAČICA” BRIDGE ON “PRINCESS KSENIJA” HIGHWAY IN MONTENEGRO	30
Darko NAKOV PRSLINE USLED RANE TERMIČKE KONTRAKCIJE I SKUPLJANJA U ARMIRANO-BETONSKIM KONSTRUKCIJAMA EARLY-AGE THERMAL AND SHRINKAGE CRACKING IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES.....	40
Boško STEVANOVIĆ PROJEKTOVANJE I IZVOĐENJE GRAĐEVINSKIH OBJEKATA – LIČNA ISKUSTVA DESIGN AND CONSTRUCTION OF BUILDING AND ENGINEERING STRUCTURES - PERSONAL EXPERIENCES	52
Ivan IGNJATOVIĆ, Jelena DRAGAŠ, Stefan Ž. MITROVIĆ, Milica VIDOVIĆ 3D ŠTAMPANI BETONI – REALNOST ILI DALEKA BUDUĆNOST? THE 3D PRINTED CONCRETE – REALITY OR FAR FUTURE?	76
Vlastimir RADONJANIN, Mirjana MALEŠEV, Zoran BRUJIĆ, Ivan LUKIĆ, Slobodan ŠUPIĆ, Vladan PANTIĆ UDAHNUTI NOVI ŽIVOT U VODOTORANJ STAR 120 GODINA BREATHING NEW LIFE INTO A 120-YEAR-OLD WATER TOWER	89
Milan ULJAREVIĆ TUNEL “IRIŠKI VENAC” - IZAZOVI I REALIZACIJA PROJEKTA SAVREMENIM METODAMA PROJEKTOVANJA I IZVOĐENJA TUNNEL “IRIŠKI VENAC” - CHALLENGES AND IMPLEMENTATION OF THE PROJECT USING MODERN METHODS OF DESIGN AND EXECUTION	113
Duško BOBERA, Predrag BAKIĆ, Isidora GAVRILOVIĆ-BUKVIĆ, Goran MILUTINOVIĆ, Ivana TADIĆ, Dušan SPASOJEVIĆ, Marko LEKOVIĆ SPECIFIČNOSTI PROJEKTOVANJA MOSTOVA NA MORAVSKOM KORIDORU SPECIFIC ASPECTS OF DESIGN OF BRIDGES AT MORAVA CORRIDOR	128
Bojan POLETANOVIĆ, Ildiko MERTA TRAJNOST GEOPOLIMERA ARMIRANIH VLAKNIMA KONOPLJE DURABILITY OF THE HEMP FIBRE REINFORCED GEOPOLYMERS	146
Isidora JAKOVLJEVIĆ, Milan SPREMIĆ, Zlatko MARKOVIĆ NA PUTU CIRKULARNOG GRADENJA: DRUGI ŽIVOTNI CIKLUS SPREGNUTIH KONSTRUKCIJA OO ČELIKA I BETONA TOWARDS CIRCULAR CONSTRUCTION: THE SECOND LIFE CYCLE OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES	160
Ivan MILIČEVIĆ PRIMENA DEMONTAŽNOG KONEKTORA SA MEHANIČKOM SPOJNICOM I ARMIRANIM ANKEROM U SPOJEVIMA ČELIČNIH I ARMIRANOBETONSKIH ELEMENATA THE APPLICATION OF DEMOUNTABLE CONNECTOR WITH MECHANICAL COUPLER AND REBAR ANCHOR IN STEEL-REINFORCED CONCRETE CONNECTIONS	176
Vladimir ŽIVALJEVIĆ PONAŠANJE PRITISNUTIH HLADNO-OBLIKOVANIH ČELIČNIH ELEMENATA SA OTVORIMA BEHAVIOUR OF COMPRESSED COLD-FORMED STEEL MEMBERS WITH WEB HOLES	196
Danilo STIPIĆ NOVI NAČIN PRORAČUNA DVODIMENZIONALNIH JEDNAČINA TEČENJA VODE I TRANSPORTA MATERIJE, BAZIRAN NA LETIS BOLZMAN NUMERIČKOJ METODI A NEW METHOD OF CALCULATING TWO-DIMENSIONAL EQUATIONS OF WATER FLOW AND MATERIAL TRANSPORT, BASED ON THE LATTICE BOLZMANN NUMERICAL METHOD	208

DONATORI / DONATORS

Vladan Kuzmanović¹
Uroš Mirković²

TERMIČKI NAPONI KOD GRAVITACIONIH BETONSKIH BRANA – ISKUSTVA I PREPORUKE

Rezime: U radu su prikazani prostorni numerički modeli za faznu termičko-naponsku analizu gravitacione betonske brane koja se gradi metodom blokova (prvi slučaj) i metodom valjanja (drugi slučaj). Na osnovu proračuna temperaturnog polja, uzimajući u obzir i sadejstvujuću stensku masu, određeni su termički naponi za izabrane dužine lamele (15,0 i 20,0 m kod lamele koja se gradi metodom blokova, odnosno 16,0, 20,0 i 24,0 m kod lamele koja se gradi primenom valjanog betona). Proračun je urađen za period od oko 5 godina a koji obuhvata izgradnju, punjenje akumulacije i početak eksploatacije. Na osnovu dobijenih rezultata, dati su zaključci i preporuke za proračun termičkih napona i određivanje dužine lamela kod gravitacionih betonskih brana.

Ključne reči: termički naponi, gravitaciona brana, dužina lamele, građenje, eksploatacija.

THERMAL STRESSES AT CONCRETE GRAVITY DAMS - EXPERIENCES AND RECOMMENDATIONS

Summary: This paper presents numerical models for the phase thermal-stress analysis of a concrete gravity dam that is built using the block method (first case) and the rolling method (second case). Based on the calculation of the temperature field, taking into account the accompanying rock mass, the thermal stresses were determined for the selected lengths of the monolith (15,0 and 20,0 m for the monolith built using the block method, i.e. 16,0, 20,0 and 24,0 m for the monolith which is built using RCC). The calculation was made for a period of about 5 years, which includes the construction, filling of the reservoir and the start of exploitation. Based on the obtained results, conclusions and recommendations are given for the calculation of thermal stresses and the determination of the length of the monolith in concrete gravity dams.

Key words: thermal stresses, gravity dam, monolith length, construction, exploitation

.....
¹ dr, redovni profesor, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Republika Srbija, vladak@grf.bg.ac.rs
² samostalni istraživač, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, Republika Srbija, uros.mirkovic@jcerni.rs

1. OPŠTE O GRAVITACIONIM BETONSKIM BRANAMA

Gravitacione betonske brane su masivne konstrukcije koje se dejstvu spoljašnjih uticaja suprotstavljaju isključivo svojom težinom. Drugim rečima, stabilnost brane raste sa njenom težinom. Međutim, iz ekonomskih razloga teži se da se brana izgradi uz najmanji utrošak materijala, a da ima garantovanu stabilnost.

Najvažnije prednosti ovog tipa brana su mala osetljivost na prelivanje i procurivanje, mali obim radova kao i mogućnost smeštanja evakuacionih organa, zahvata i galerija u samo telo brane.

Gravitacione betonske brane se mogu graditi u blokovima ili valjanjem, što je uslovilo i njihovu podelu na brane od klasičnog hidrotehničkog betona (građenje u blokovima) i brane od valjanog betona (građenje razastiranjem i valjanjem betona).

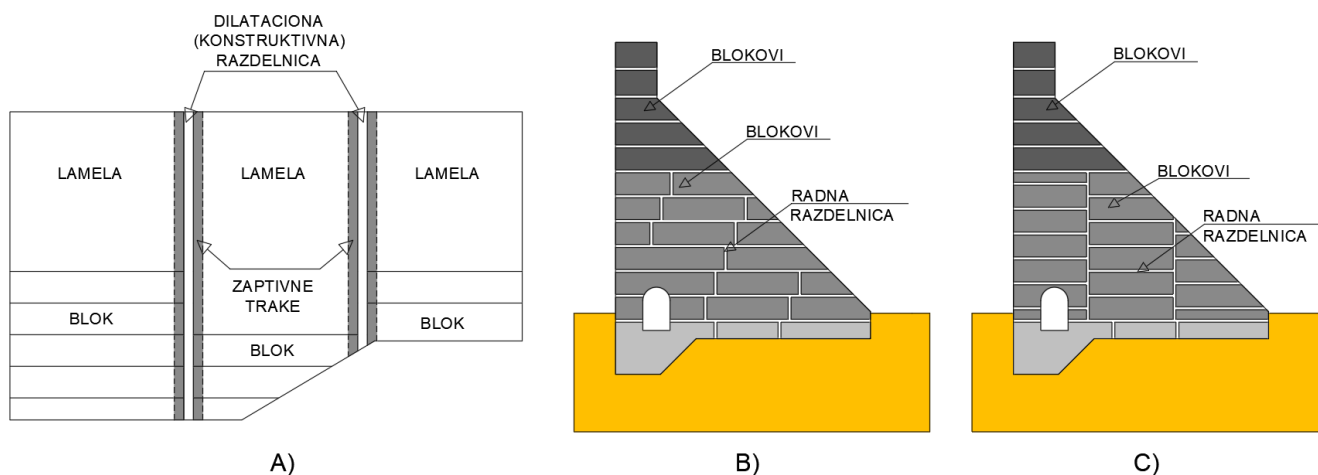
1.1. Brane od hidrotehničkog betona

Za izgradnju ovog tipa brana koristi se hidrotehnički beton koji se ugrađuje u blokovima.

Da bi se u isto vreme postigla monolitnost i ubrzalo hlađenje betona usled oslobađanja toplote hidratacije tokom građenja, lamele gravitacione betonske brane se radnim razdelnicama dele na blokove za betoniranje. Blok za betoniranje je zapremina ograničena oplatom ili betonom koju bi trebalo betonirati bez prekida u radu [1].

Dimenzije blokova i plan betoniranja usvajaju se iskustveno imajući u vidu karakteristike mešavine hidrotehničkog betona ili se dobijaju sprovođenjem termičko - naponske analize.

Postoji nekoliko načina raspoređivanja blokova unutar lamele (Slika 1): dugi blokovi, kose spojnice, vertikalne spojnice, kombinacija dugih blokova sa vertikalnim ili kosim spojnicama



Slika 1. Zaptivke, blokovi i razdelnice: (A) zaptivke između susednih lamela; (B) kombinacija dugih blokova i kosih spojnica; (C) kombinacija dugih blokova i vertikalnih spojnica [2], [3]

Dužina bloka (u pravcu ka bokovima brane) je dimenzija koja je uglavnom jednaka dužini lamele, širina bloka (u pravcu uzvodno - nizvodno) zavisi od širine lamele i ima vrednost do 25,0 m, dok visina bloka ima vrednost između 0,5 i 3 m. Betonirani blok ostaje "slobodan" da se hladi najmanje tri dana [1].

U toku građenja na dve susedne lamele održava se razlika u visinama blokova kako bi se obezbedilo dobro hlađenje i skupljanje svih lamela na pogodan način.

1.2. Brane od valjanog betona

Gravitacione brane od valjanog betona predstavljaju relativno noviji tip betonskih brana, koji je u svetu počeo intenzivno da se primenjuje. Naziv valjani beton (Roller Compacted Concrete - RCC) ukazuje na jednu od dve osnovne karakteristike ovog materijala. To je tehnološki postupak transporta, razastiranja i zbijanja betona mehanizacijom za nasute zemljane brane (Slika 2). Na taj način omogućeni su izuzetno veliki dnevni učinci i značajno skraćanje vremena građenja. Druga bitna karakteristika valjanog betona je vrlo kruta konsistencija betonske mešavine sa malom količinom cementa i značajnim dodatkom pucolana.

S obzirom na ovakve osobine mešavine, 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. Uzroci su kraće vreme građenja u odnosu na brane od klasičnog betona i tehnologija građenja u slojevima, što značajno smanjuje mogućnost odavanja toplote sa slobodnih površina brane. Zbog toga, po ugrađivanju betona, dolazi do povećanja temperature, a nakon završetka procesa hidratacije, počinje hlađenje betona do prosečne višegodišnje temperature vazduha.



Slika 2. Izgradnja brane od valjanog (RCC) betona [4]

Razvoj termičkog proračuna brana od valjanog betona tekao je paralelno sa razvojem ovog tipa brana. Zbog male količine cementa u mešavini, u početku se smatralo da problem termičkih uticaja nije izražen, da proračun nije potreban i da se RCC brane transverzalnim razdelnicama ne moraju deliti na lamele. Pojava prslina i procurivanje na većini američkih brana izgrađenih do 1990. godine, ukazala je na neophodnost termičkog proračuna. U svetu su od tada urađena brojna eksperimentalna istraživanja termičkih karakteristika valjanog betona, objavljen veliki broj radova o uticaju temperature kod RCC brana i date određene preporuke za proračun dužine lamela .

2. PRSLINE USLED TERMIČKIH NAPONA ZATEZANJA

Usled nejednakog širenja i skupljanja betona, u telu brane se javljaju naponi zatezanja koji mogu izazvati nastanak prslina. Prsline se vremenom šire, slabe otpornost brane na smicanje, i omogućavaju proviranje vode i povećanje uzgona [5].

Priroda prslina usled termičkih napona zatezanja uslovljava njihovu podelu na:

- prsline u unutrašnjosti tela brane koje se javljaju usled procesa hlađenja do srednje višegodišnje temperature vazduha (ovaj proces hlađenja može potrajati i nekoliko godina nakon završetka izgradnje brane) i
- prsline u površinskoj zoni koje se javljaju kao posledica termičkog gradijenta u betonu (raste sa naglim hlađenjem površine betona, naročito tokom prvih nedelja nakon betoniranja) [6], [7].

Širina prslina i rastojanje poprečnih preseka u kojima su se pojavile prsline zavise od stepena ograničenosti. Stepenn ograničenosti je mera ograničenosti promene zapremine tela (brane). Na ograničenost promene zapremine utiču sredina u kojoj je brana temeljena, druge konstrukcije sa kojima je brana u kontaktu i prethodni blokovi betona. Zbog toga se definiše stepenn ograničenosti pomeranja konstrukcije i stepenn ograničenosti pomeranja temelja [5].

Stepenn ograničenosti pomeranja konstrukcije zavisi od odnosa krutosti prethodnog i novog bloka betona, smičuće čvrstoće između blokova, oblika poprečnog preseka konstrukcije, ograničenosti skupljanja površine bloka (usled različite brzine hlađenja spojnice u odnosu na unutrašnjost bloka) kao i blizine susednih lamela. Na ograničenost pomeranja temelja prvenstveno utiče veličina sile trenja između konstrukcije i sredine, odnos modula elastičnosti betona i modula elastičnosti stenske mase, kao i dužina brane u zoni temeljne spojnice [5].

2.1. Uslov za pojavu prslina

Termički napon zatezanja predstavlja normalni napon čijim prekoračenjem dolazi do pojave prslina u betonu. Ovaj napon može se izračunati prema sledećem izrazu:

$$\sigma_z(x, y, z, \tau) = E \cdot \varepsilon_{th} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = E \cdot \alpha \cdot (T - T_{ref}) \quad (1)$$

gde su:

σ_z - termički napon zatezanja u trenutku τ [MPa],

E - Yung-ov moduo elastičnosti betona [MPa],

ε_{th} - termička dilatacija [-],

α - koeficijent termičkog širenja betona [-],

ΔT - promena temperature [°C],

T - temperatura posmatranog čvora [°C] i

T_{ref} - referentna temperatura za koju se pretpostavlja da nema naprezanja u betonu [°C].

Uslov za pojavu prsline je da maksimalni glavni napon zatezanja bude veći od čvrstoće betona na zatezanje u posmatranom trenutku (i na posmatranom mestu u konstrukciji).

Procena pojave prsline definiše se indeksom prsline [8], [9], [10]:

$$I_{cr} = \frac{f_t(t)}{\sigma_1(t)} \geq 1,0 \quad (2)$$

gde je:

$f_t(\tau)$ - čvrstoća betona na zatezanje [MPa] i

$\sigma_1(\tau)$ - maksimalni napon zatezanja u posmatranom trenutku i na posmatranom mestu u konstrukciji [MPa].

2.2. Mere za sprečavanje pojave prslina

Proces pojave prslina kod gravitacionih betonskih brana može se izbeći građenjem konstrukcije u međusobno nezavisnim lamelama [11], faznim betoniranjem blokova (ili tanjih slojeva u slučaju brana od valjanog betona) u dužim vremenskim intervalima, spravljanjem betona sa manjom količinom cementa, upotrebom sporovezujućeg cementa, snižavanjem temperature korišćenjem leda, hladne vode ili ohlađenog agregata, odgovarajućom negom betona nakon ugrađivanja [12], [13] kao i ugradnjom prefabrikovanih betonskih elemenata kod kojih je proces hidratacije završen. Na osnovu prethodno navedenog, sledi da se pri projektovanju gravitacionih betonskih brana mora pristupiti pažljivo što podrazumeva dobro poznavanje svih parametara i faktora koji utiču na proces razvoja naponskog stanja koje dovodi do pojave i propagacije prslina. Savremene metode termičko-naponskog proračuna, koje se zasnivaju na primeni metode konačnih elemenata (MKE), daju mogućnost obuhvata velikog broja parametara i faktora od značaja prilikom računarskog modeliranja ovog fenomena.

3. DUŽINA LAMELE GRAVITACIONE BETONSKE BRANE

U cilju sprečavanja mogućnosti nastanka prslina usled termičkih napona zatezanja, gravitacione betonske brane se vertikalnim razdelnicama dele na lamele (Slika 1). Zazor (otvor) između lamela (dilataciona ili konstruktivna razdelnica) omogućava da se termički naponi rasterete i spreči nastanak prslina.

Vododrživost brane se obezbeđuje povezivanjem lamela zaptivnim trakama, obično od bakarnog lima, gume, PVC-a ili nekog drugog elastičnog materijala za zaptivanje.

Ispravno postavljenim dilatacionim razdelnicama izbegavaju se i prsline i usled nejednakog sleganja, koje može nastati kao rezultat topografskih i/ili geomehaničkih uslova.

Dužina lamele obično iznosi između 6,0 i 16,0 m i određuje se iz uslova da pri uobičajenim opterećenjima ne dođe do pojave napona zatezanja, odnosno da se usled izuzetnih opterećenja i temperature ne pojave prsline u betonu.

4. PRIKAZ MKE MODELA ZA PRORAČUN TERMIČKIH NAPONA ZATEZANJA

U ovom radu, na proračunskim modelima koji simuliraju proces izgradnje gravitacionih betonskih brana, izvršena je fazna jednosmerna termičko-naponska analiza, uzimajući u obzir sledeće termičke granične uslove: na kontaktu između blokova i stenske mase, na kontaktu između starih i novoizličenih blokova/slojeva, na površinama koje su u kontaktu sa vazduhom i vodom, kao i temperature pripadajuće stenske mase i sveže betonske mešavine.

Analiza se sprovodi tokom dugog perioda koji podrazumeva izgradnju, punjenje rezervoara i proces eksploatacije objekta.

Kao rezultat proračuna prikazana su naponska stanja u pravcu ose brane za karakteristične faze izgradnje i eksploatacije.

Faza izgradnje obuhvata period od 0 do 512. dana, 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).

Karakteristični datumi pri građenju brane su:

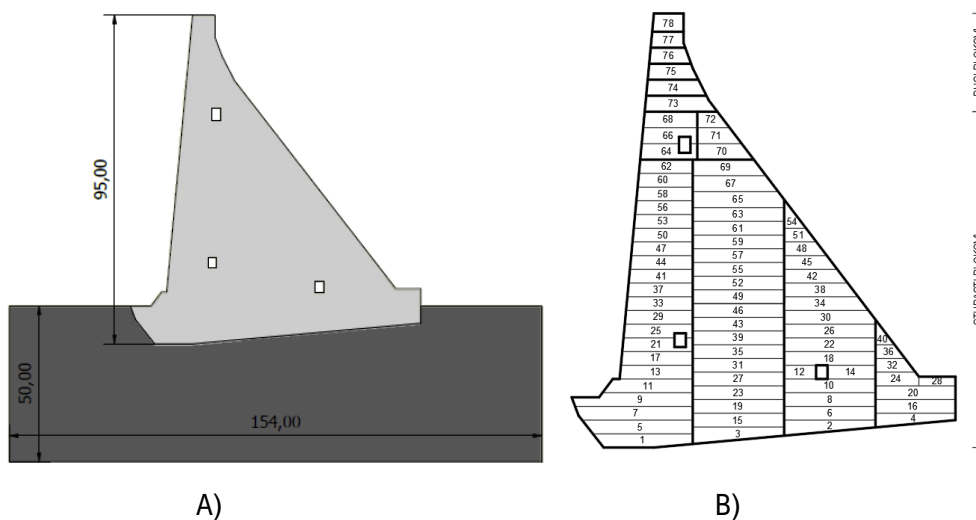
- datum početka građenja - 18.10. prve godine (godina u toku koje je počelo građenje),
- prva (zimski) pauza od 12 dana u periodu od 15.12. do 27.12. prve godine,
- druga (letnja) pauza od 135 dana u periodu od 20.06. do 02.11. druge godine,
- treća (zimski) pauza u periodu od 15.12. do 27.12. druge godine,
- punjenje akumulacije u periodu od 27.05. do 20.11. četvrte godine.

Dinamika građenja brane 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 odnosno betoniranjem u slojevima.

4.1. Brane koje se grade metodom blokova

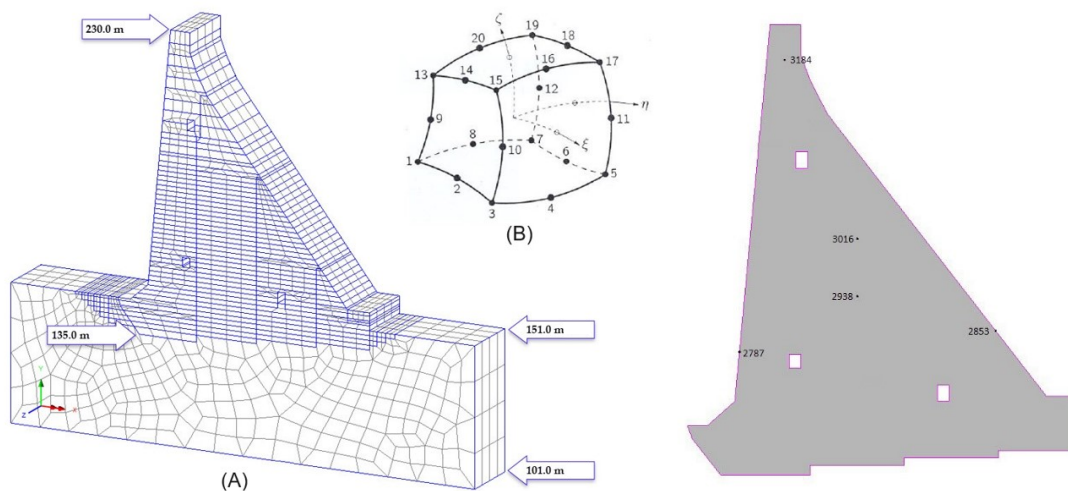
Trodimenzionalni geometrijski model za termičko-naponsku analizu obuhvata jednu lamelu brane sa pripadajućom stenskom masom (Slika 3A).

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



Slika 3. Trodimenzionalni geometrijski model brane (A) i podela brane na blokove (B)

Nakon formiranja geometrijskog modela, formiran je i trodimenzionalni MKE model prikazane lamele brane (Slika 4). MKE model, pored lamele brane, obuhvata i deo pripadajuće stenske 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 4. A) MKE model lamele sa pripadajućom stenskom masom B) heksaedarski konačni element korišćen prilikom generisanja mreže lamele C) karakteristični čvorovi lamele brane [14]

Verifikacija modela sprovedena je na osnovu rezultata amplituda oscilovanja temperatura u betonu u izabranim kontrolnim čvorovima kod kojih je uočljiv uticaj prodora spoljašnje temperature vazduha i to uz pomoć pojednostavljene metode proračuna koja je predstavljena u [15] i [16], a koja je pogodna za ovu branu.

4.1.1 Konturni uslovi

U analizi temperaturnog polja uzeti su u obzir sledeći slučajevi konturnih uslova: kontakt blokova i stenske mase, kontakt prethodno i sveže izbetoniranih blokova, kontakt dela površine blokova i vazduha, kontakt dela površine blokova i vode, temperatura sveže betonske mešavine (početni uslov).

Po površinama blokova koje su u dodiru sa vazduhom zadaju se izmerene spoljašnje temperature vazduha date u [3], [17] a koje se kreću u intervalu od $-1,80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $33,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri tome, u obzir je uzeto i vremenski i prostorno "smaknuto" betoniranje blokova susednih lamela čime se obezbeđuje pravilno hlađenje sveže izbetoniranog bloka razmatrane lamele sa svih strana [17].

Po svim betonskim površinama u galerijama, koje su u dodiru sa vazduhom, zadaju se izmerene srednje mesečne temperature vazduha koje su date u [3], [17] a koje se kreću u intervalu od $10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $22,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Punjenje akumulacije sprovedeno je u tri koraka. Temperatura vode po dubini je usvojena kao konstantna u iznosu $9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperatura pripadajuće stenske mase je usvojena kao srednja višegodišnja vrednost u iznosu $13,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vrednosti korišćenih temperatura betonske mešavine date su u [3], [17] i kreću u intervalu od $9,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $13,10\text{ }^{\circ}\text{C}$. U proračunu naponskog stanja, zadati su granični uslovi po pomeranjima: na donjoj, uzvodnoj i nizvodnoj granici stenske mase sprečeno je pomeranje čvorova u svim pravcima. S obzirom da je solid pripadajuće stenske mase relativno mali, na ovaj način omogućeno je realno ponašanje stenske mase ispod lamele brane kao i njena deformacija usled sopstvene težine.

4.1.2 Opterećenja

Sopstvena težina brane i okolne stenske mase se uzima kao inicijalno opterećenje modela na osnovu koga se definiše početno naponsko stanje. Izračunavanje napona i pomeranja usled sopstvene težine vrši se u prvom koraku svake od faza betoniranja blokova. Dobijene vrednosti napona predstavljaju početno naponsko stanje za sledeće korake jedne faze.

Delovanje hidrostatičkog pritiska i uzgona nije razmatrano jer bi se na ovaj način „maskirao“ doprinos i uticaj temperature na naponsko stanje u telu brane. Temperaturno polje za odgovarajući proračunski korak preuzima se iz prethodno sprovedenog termičkog proračuna uz pomoć jednosmerne spregnute analize (temperatura utiče na deformaciju, ali ne i obrnuto).

Na početku svake faze definiše se aktivan deo modela, s obzirom na mogućnost da se iz faze u fazu pojavljuju novi aktivni delovi modela.

4.1.3 Parametri materijala

Za proračun temperaturnog polja brane korišćeni su parametri koji su dati u Tabeli 1, Tabeli 2 i Tabeli 3.

Tabela 1. Termički parametri betona [14]

Oznaka	Parametar	Vrednost	Jedinica
k	Koeficijent provođenja toplote	1,80	W/(m K)
c	Specifičan toplotni kapacitet	950,0	J/(kg K)
α	Koeficijent termičkog širenja	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$1/^{\circ}\text{C}$
h_1	Kombinovani konvektivni koeficijent (vazduh-beton)	20,10	W/(m ² K)
h_2	Kombinovani konvektivni koeficijent (voda-beton)	500,0	W/(m ² K)

Tabela 2. Parametri hidratacije betona [14]

Parametar	Vrednost	Jedinica
Udeo cementa (tipa I) u masi betona	50,0	kg/m ³
m (za portland cement)	$12,5 \cdot 10^{-3}$	1/h
Vodocementni faktor	0,47	-
Udeo letećeg pepela u masi betona	225,0	kg/m ³
Udeo CaO u letećem pepelu	17,0	%

Tabela 3. Termički parametri stenske mase [14]

Oznaka	Parametar	Vrednost	Jedinica
k	Koeficijent provođenja toplote	2,40	W/(m K)
c	Specifičan toplotni kapacitet	880,0	J/(kg K)
α	Koeficijent termičkog širenja	$9,0 \cdot 10^{-6}$	1/°C

Za proračun naponskog stanja betonske konstrukcije brane korišćeni su parametri koji su dati u Tabeli 4 i Tabeli 5.

Tabela 4. Mehanički parametri betona [3]

Oznaka	Parametar	Vrednost	Jedinica
ρ	Gustina	2360.0	kg/m ³
E	Modul elastičnosti	30.0	GPa
ν	Poasonov koeficijent	0.20	-

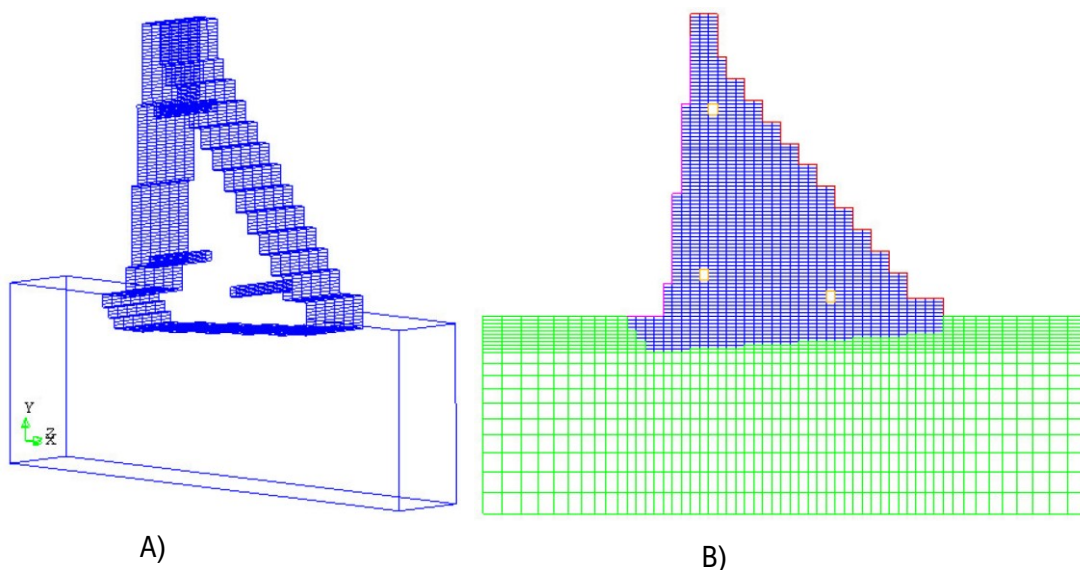
Tabela 5. Mehanički parametri stenske mase [3]

Oznaka	Parametar	Vrednost	Jedinica
ρ	Gustina	2430.0	kg/m ³
E	Modul elastičnosti	20.0	GPa
ν	Poasonov koeficijent	0.20	-

4.2. Brane od valjanog betona

Trodimenzionalni geometrijski model za termičko-naponsku analizu obuhvata jednu lamelu brane sa pripadajućom stenskom masom (Slika 5A).

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 m i širinom od 5,0 m, čime je dobijen generalizovani nagib od 1,2 : 1.



Slika 5. Trodimenzionalni geometrijski (A) i MKE (B) model brane [18]

MKE model (Slika 5B), pored lamele brane, obuhvata i deo pripadajuće stenske mase. Svaki sloj predstavlja novu fazu građenja čije je trajanje jednako zbiru trajanja stvarnih slojeva. Model brane sastoji se od 95 slojeva debljine 1,0 m.

Granični uslovi na levom i desnom kraju lamele su, zbog blizine susednih lamela, usvojeni tako da nema razmene toplote sa okolinom.

Kalibracija modela izvršena je za period izgradnje i punjenja akumulacije, dok je verifikacija modela izvršena za period od punjenja akumulacije do kraja posmatranog perioda. 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. Dobijeno je dobro poklapanje rezultata proračuna sa merenjima [18].

4.2.1 Konturni uslovi

Termički konturni uslovi podrazumevaju konstantnu temperaturu na spoljašnjoj površini stenske mase i vremenski promenljivu temperaturu na uzvodnom i nizvodnom licu brane, u galerijama, po kruni brane odnosno na trenutnom gornjem sloju (tokom procesa izgradnje).

Na spoljnoj konturi stenske mase zadata je srednja višegodišnja temperatura vazduha od 13,0°C. Na ostalim spoljašnjim površinama temperature su date kao vremenske funkcije, definisane prema dostupnim in situ merenjima [5], [17] a koje se kreću u intervalu od -1,80 °C do 33,0 °C. Konturni uslov sa uzvodne strane uzima u obzir i uticaj punjenja akumulacije. Temperatura vode po dubini je usvojena kao konstantna u iznosu 9,0°C.

Po svim betonskim površinama u galerijama, koje su u dodiru sa vazduhom, zadaju se izmerene srednje mesečne temperature vazduha koje su date u [5], [17] a koje se kreću u intervalu od 10,0 °C do 22,0 °C. Vrednosti korišćenih temperatura betonske mešavine date su u [5], [17] i kreću u intervalu od 9,50 °C do 13,10 °C. Razmena toplote na bočnim površinama lamele nije dozvoljena jer slojevi od valjanog betona nisu smaknuti kao što je to slučaj sa blokovima kod gravitacionih betonskih brana koje se grade metodom blokova.

Kao i kod prethodno prikazanog MKE modela brane koja se gradi u blokovima, u proračunu naponskog stanja zadati su granični uslovi po pomeranjima: na donjoj, uzvodnoj i nizvodnoj granici stenske mase sprečeno je pomeranje čvorova u svim pravcima.

4.2.2 Opterećenja

Kao i kod gravitacionih betonskih brana koje se grade metodom blokova, sopstvena težina brane i okolne stenske mase se uzima kao inicijalno opterećenje modela. Dobijene vrednosti napona predstavljaju početno naponsko stanje i tako za svaku narednu fazu koja uzima u obzir izlivanje novih slojeva betona. Delovanje hidrostatičkog pritiska i uzgona takođe nije razmatrano jer bi se na ovaj način „maskirao“ doprinos i uticaj temperature na naponsko stanje u telu brane.

I ovde se temperaturno polje za odgovarajući proračunski korak preuzima se iz prethodno sprovedenog termičkog proračuna uz pomoć jednosmerne spregnute analize (temperatura utiče na deformaciju, ali ne i obrnuto).

4.2.3 Parametri materijala

U modelu su korišćene tri vrste betona - beton u telu brane, konturni beton i izravnavajući beton na kontaktu sa temeljom. Sastav vezivnih materijala u betonu kao i termički i mehanički parametri materijala, prikazani su u Tabeli 6, Tabeli 7 i Tabeli 8.

Tabela 6. Odnos vezivnih materijala i vode u betonu [19]

Oznaka	Cement	Leteći pepeo	Voda	Jedinica
Beton u telu brane	50,0	225,0	128,0	kg/m ³
Konturni beton	140,0	175,0	173,0	kg/m ³
Izravnavajući beton	100,0	225,0	187,0	kg/m ³

Tabela 7. Termički parametri betona i stenske mase [19]

Oznaka	Parametar	Beton u telu brane	Konturni beton	Izravnavajući beton	Stenska masa	Jedinica
ρ	Gustina	2360,0	2450,0	2430,0	2430,0	kg/m ³
$T_{ad,max}$	Adijabatski porast temperature	26,0	37,0	35,50	/	°C
k	Koeficijent provođenja toplote	1,80	1,90	1,90	2,40	W/(m K)
c	Specifičan toplotni kapacitet	950,0	1000,0	1000,0	880,0	J/(kg K)
α	Koeficijent termičkog širenja	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	1/°C
C_A	Arhenijusova konstanta	4700,0	5000,0	5000,0	/	K

Tabela 8. Mehanički parametri betona [19]

	Oznaka	Starost (dani)	7	10	28	91	182	Jedinica
Beton u telu brane	f_c	Čvrstoća betona na pritisak	17,53	20,67	28,53	32,07	33,13	MPa
	f_t	Čvrstoća betona na zatezanje	1,70	1,90	2,37	2,50	2,58	MPa
	E	Modul elastičnosti	16,60	18,12	21,50	22,44	23,10	MPa
Konturni beton	f_c	Čvrstoća betona na pritisak	21,20	25,50	32,0	37,33	38,86	MPa
	f_t	Čvrstoća betona na zatezanje	1,93	2,17	2,58	2,73	2,81	MPa
	E	Modul elastičnosti	18,40	20,05	22,70	24,10	25,30	MPa

5. PRIKAZ NAPONSKOG STANJA SA UTICAJEM DUŽINE LAMELE

Kada se govori o termičkim naponima zatezanja kod gravitacionih betonskih brana, po pravilu se misli na normalne napone koji deluju u pravcu ose brane. S obzirom na usvojeni koordinatni sistem u modelu, to su σ_z naponi i, po konvenciji, pozitivni su naponi zatezanja. Rezultati koji slede, prikazani su u srednjoj ravni lamele jer se očekuje da su σ_z naponi u ovoj ravni najveći.

5.1. Brane koje se grade metodom blokova

S obzirom na to da je analiza naponskog stanja relevantna samo za betonski deo lamele, prikaz naponskog stanja stenske mase biće isključen iz prikaza na slikama koje slede. Ekstremne vrednosti napona zatezanja se, u ovakvim modelima, gotovo uvek javljaju na mestima gde se susreću konačni elementi stenske mase i betonske konstrukcije. Modelirani spoj pomenutih materijala nije u potpunosti realan (jer je kontinualan) i uzrok je pojave ekstremnih napona zatezanja usled različite krutosti ova dva materijala. Iz datog razloga, temeljna spojnica je isključena iz prikaza i to izostavljanjem blokova koji se nalaze do nje (blokovi 1-4).

Analiza uticaja dimenzija blokova na naponsko stanje izvršena je promenom samo jedne dimenzije kod svih blokova modela - dimenzija u pravcu dužine lamele i to sa 20,0 na 15,0 m. U skladu sa tim, moglo bi se reći da ova analiza ujedno obuhvata i analizu uticaja dužine lamele na naponsko stanje u telu brane. Na osnovu dobijenih rezultata, uočeno je da svi blokovi brane prilikom građenja prolaze kroz slična naponska stanja (Slike 6-8). Odmah nakon betoniranja jednog bloka dolazi do njegovog zagrevanja i širenja usled oslobađanja toplote hidratacije, pri čemu se, zbog ograničene deformacije usled susedstva sa susednim blokovima, javljaju naponi pritiska u bloku i njegovoj užoj zoni. Zagrevanje betona jednog bloka može biti dodatno potpomognuto i ekstremno visokim temperaturama vazduha u dužem vremenskom periodu. Naknadno, u procesu hlađenja betona, koje može biti naglo (rezultat nagle promene

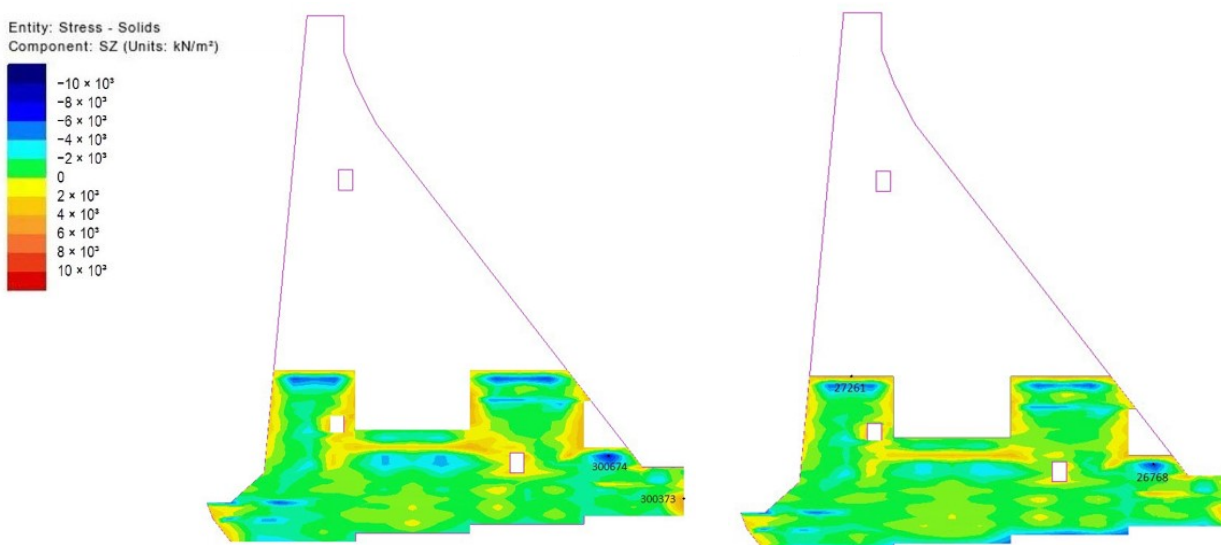
sezonske temperature) ili postepeno (rezultat prirodnog procesa kojim temperatura betona teži da se izjednači sa prosečnom godišnjom temperaturom vazduha), dolazi do njegovog skupljanja i, usled ograničene deformacije zbog sadejstva sa susednim blokovima, naponi pritiska prelaze u napone zatezanja [3].

Slike potvrđuju da je uticaj dinamike građenja (brže napredovanje blokova između vertikalnih spojnica) doprineo prekoračenju čvrstoće betona na zatezanje u unutrašnjim zonama. Primetan je i uticaj naglog hlađenja betona u površinskim zonama na prekoračenje čvrstoće betona na zatezanje [3]. Na Slikama 9-13 prikazane su vrednosti napona σ_z za dve razmatrane dužine lamele u funkciji od vremenskog perioda nakon završetka izgradnje i temperature vazduha, u karakterističnim tačkama.. Na Slici 14 prikazana je razlika ekstremnih vrednosti σ_z razmatranih dužina lamela u funkciji perioda nakon završetka izgradnje i spoljašnje temperature vazduha T_{vaz} [3].

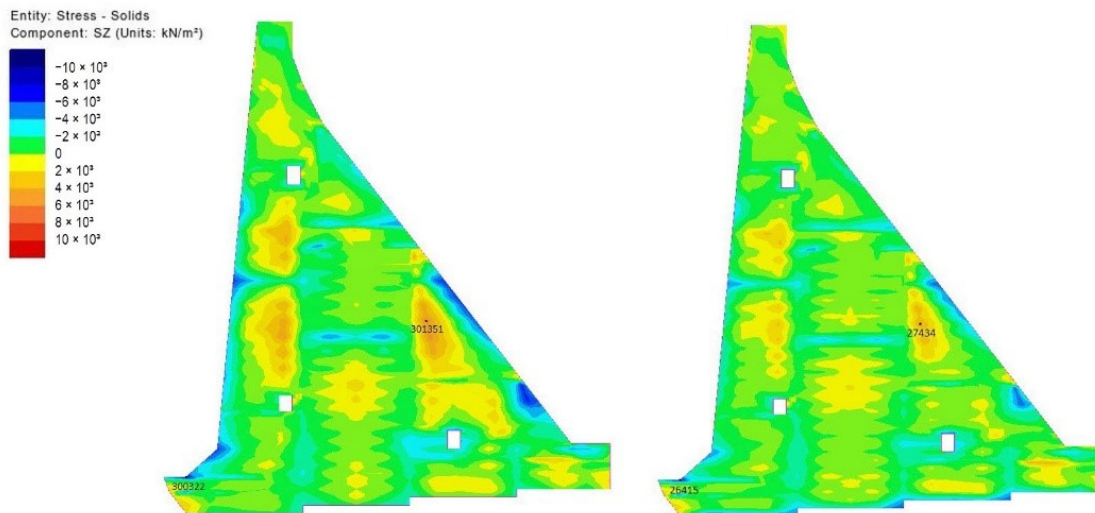
Redukcijom dužine lamele za 5.0 m (sa 20.0 m na 15.0 m) ekstremna vrednost termičkog napona zatezanja opada za 0,93 MPa (i do 16,0%) prosečno (0,70 MPa (i do 12,0%) zimi i 1,10 MPa (i do 20,0%) leti). Ovo smanjenje nastaje kao rezultat manjeg oslobađanja toplote hidratacije cementa u lameli dužine 15,0 m u poređenju sa lamelom dužine 20,0 m. Ova redukcija značajno doprinosi i smanjenu zona u kojima je prekoračena čvrstoća betona na zatezanje [3].



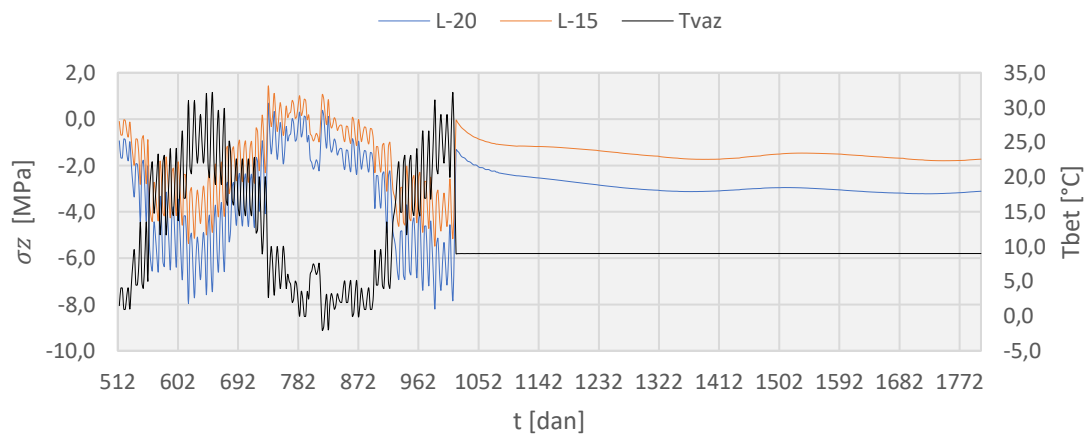
Slika 6. Prikaz napona σ_z u srednjoj ravni lamele dužine 20,0 m (levo) i 15,0 m (desno) za 84. dan (10. januar druge godine) [3]



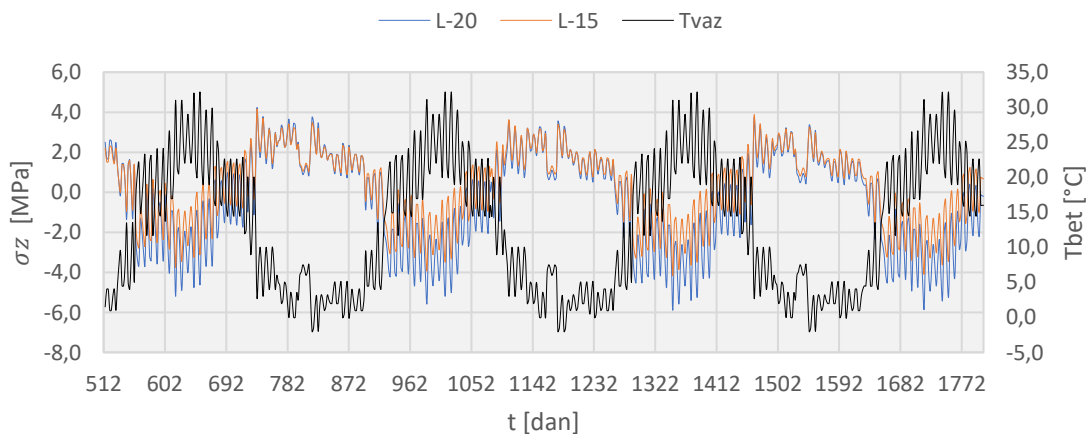
Slika 7. Prikaz napona σ_z u srednjoj ravni lamele dužine 20,0 m (levo) i 15,0 m (desno) za 167. dan (01. april druge godine)



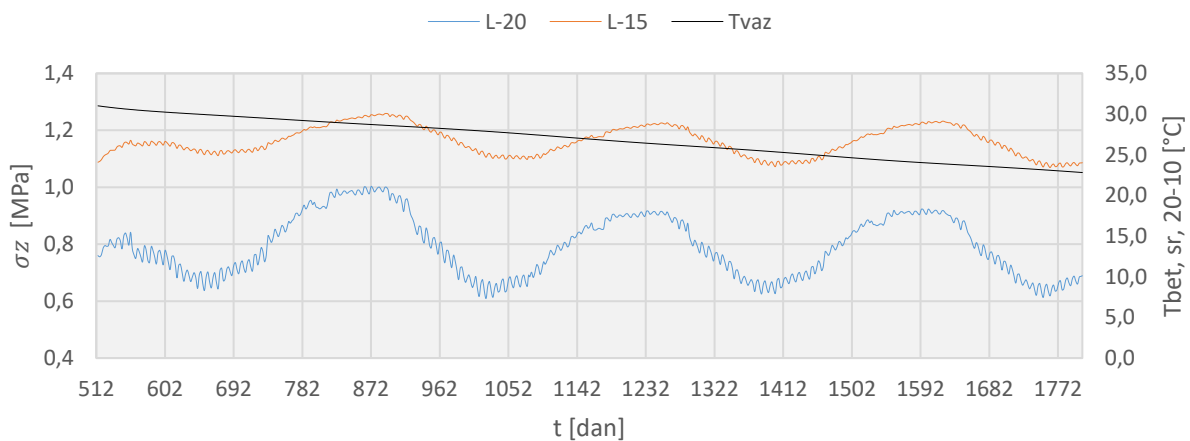
Slika 8. Prikaz napona σ_z u srednjoj ravni lamele dužine 20,0 m (levo) i 15,0 m (desno) za 1804. dan (25. septembar šeste godine) [3]



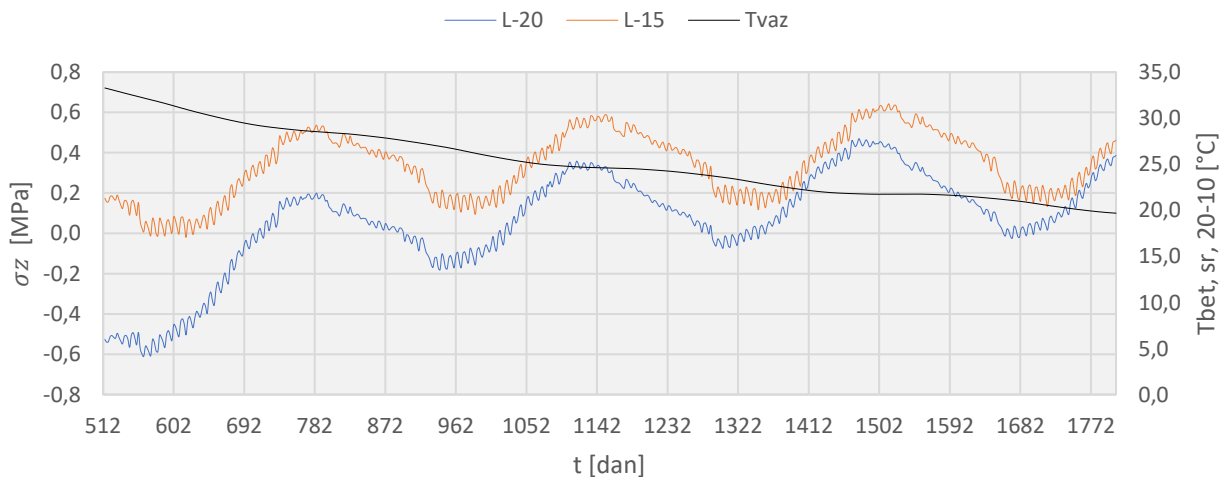
Slika 9. Prikaz napona σ_z [MPa] u čvoru 2787 za razmatrane dužine lamele u funkciji temperature vazduha i perioda nakon završetka izgradnje



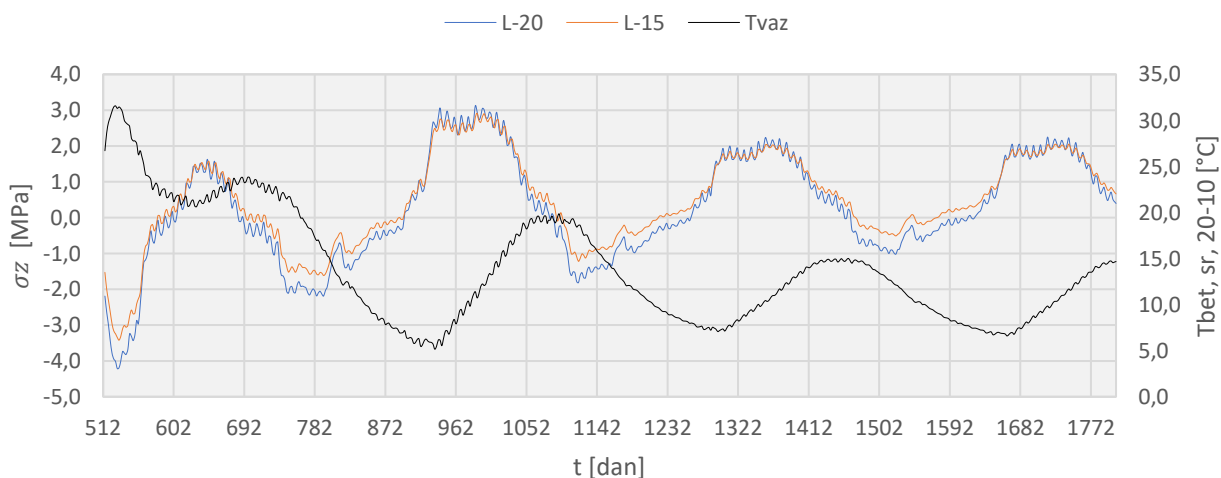
Slika 10. Prikaz napona σ_z [MPa] u čvoru 2853 za razmatrane dužine lamele u funkciji temperature vazduha i perioda nakon završetka izgradnje



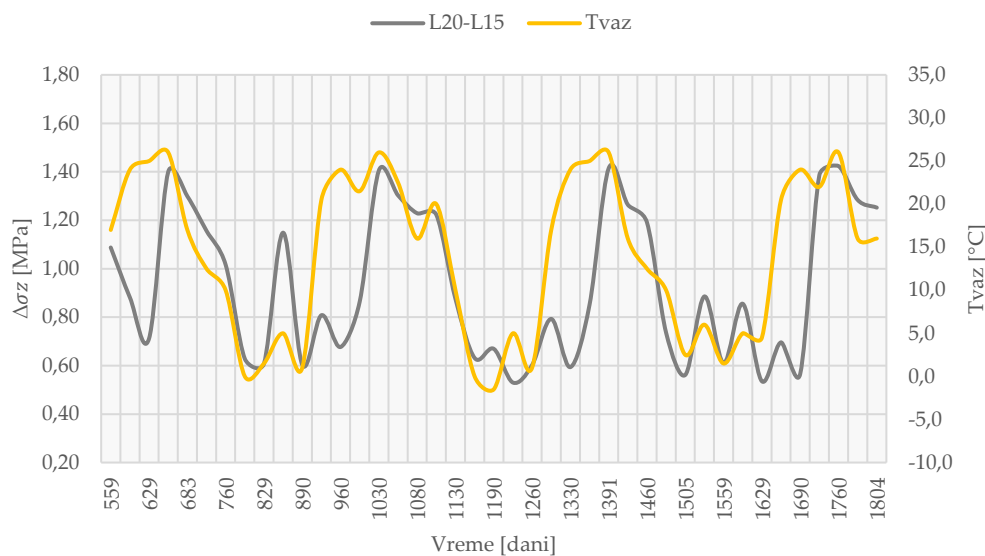
Slika 11. Prikaz napona σ_z [MPa] u čvoru 2938 za razmatrane dužine lamele u funkciji temperature vazduha i perioda nakon završetka izgradnje



Slika 12. Prikaz napona σ_z [MPa] u čvoru 3016 za razmatrane dužine lamele u funkciji temperature vazduha i perioda nakon završetka izgradnje



Slika 13. Prikaz napona σ_z [MPa] u čvoru 3184 za razmatrane dužine lamele u funkciji temperature vazduha i perioda nakon završetka izgradnje



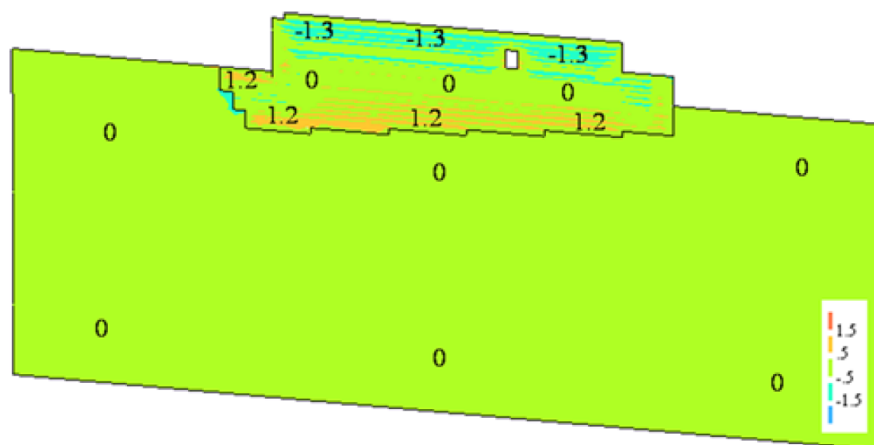
Slika 14. Razlika ekstremnih vrednosti napona σ_z [MPa] za razmatrane dužine lamele u funkciji perioda nakon završetka izgradnje [3]

5.2. Brane od valjanog betona

Naponsko stanje modela koji simulira građenje i eksploataciju gravitacione betonske brane od valjanog (RCC) betona predstavljeno je kontur-plot i vremenskim dijagramima za izabrane karakteristične datume i slojeve.

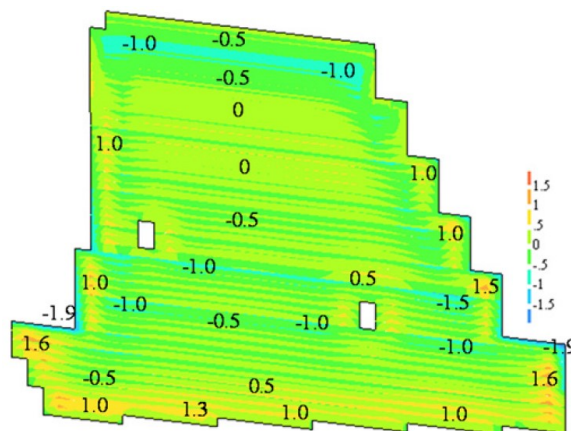
Proračun termičkih napona zatezanja izvršen je za tri različite vrednosti dužine lamele: 16,0 m, 20,0 m i 24,0 m. Rezultati u srednoj ravni su prikazani za lamelu dužine 16,0 m, dok su preostala dva modela iskorišćena za procenu uticaja dužine lamele na termičke napone zatezanja.

Polje napona u telu brane i stenskoj masi, u srednjoj ravni lamele, 9. januara druge godine od početka građenja (83. dan), prikazano je na Slici 15. Naponi u stenskoj masi su jednaki nuli, osim u zoni kontakta, ispod nagnute uzvodne površine preseka. U telu brane, naponi zatezanja su manji od 1,2 MPa. Naponi zatezanja se javljaju u donjoj zoni srednje ravni (jer je beton već dostigao maksimalnu temperaturu i počeo da se hladi), dok se u gornjoj zoni javljaju naponi pritiska (temperatura betona još uvek raste i beton se širi). Može se uočiti i koncentracija napona duž horizontalnih susednih slojeva. Ovo je posledica razlike u krutosti prethodnog i sledećeg sloja valjanog betona. Radi jednostavnosti, stenska masa je na narednim slikama izostavljena iz prikaza [19].



Slika 15. Prikaz napona σ_z u srednjoj ravni lamele dužine 16,0 m za 83. dan (09. januar druge godine) [19]

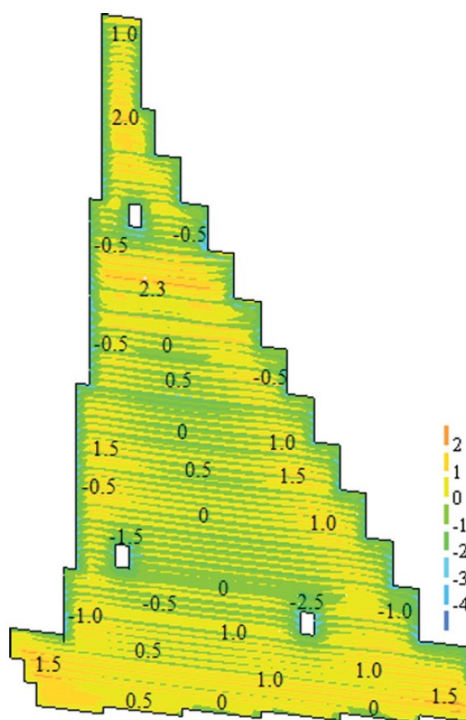
Na Slici 16 prikazano je polje napona 167. dan nakon početka betoniranja. Brana je bila visoka 46,0 m, sa 153 sloja valjanog betona. Maksimalni zatezni napon od 1,6 MPa nastao je u blizini uzvodne i nizvodne površine [19].



Slika 16. Prikaz napona σ_z u srednjoj ravni lamele dužine 16,0 m za 167. dan (01. april druge godine) [19]

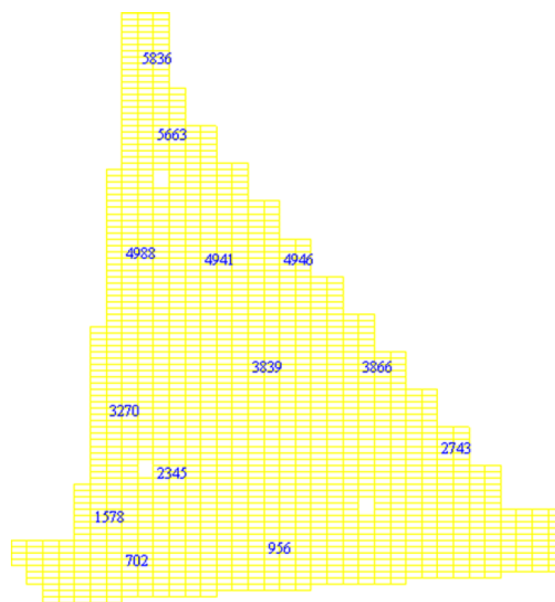
Polje napona u srednjoj ravni lamele na kraju proračuna prikazano je na Slici 17. Akumulacija je puna i brana se nalazi u periodu eksploatacije. Mogu se uočiti niske vrednosti napona pritiska i zatezanja u celoj srednjoj ravni lamele.

Uvećane vrednosti napona zatezanja se javljaju u zoni temelja, i u zoni oko gornje galerije [19].



Slika 17. Prikaz napona σ_z u srednjoj ravni lamele dužine 16,0 m za 1811. dan (02. oktobar šeste godine) [3]

Najpogodniji način da se sagleda evolucija napona tokom vremena je posmatranje napona karakterističnih elemenata u srednjoj ravni lamele brane (Slika 18.) Analizirani su rezultati za elemente: 702, 2743, 3839, 4988 i 5836 [3].



Slika 18. Prikaz karakterističnih čvorova u srednjoj ravni lamele (02. oktobar šeste godine) [3]

Na Slikama 19 i 20 može se primetiti da se za sve razmatrane karakteristične čvorove u prvih 5 do 10 dana nakon ugradnje razvijaju naponi pritiska, kao posledica visoke hidratacione toplote. Kada temperatura počne da pada, beton počinje da se skuplja i javljaju se termički naponi zatezanja. Maksimalne vrednosti napona zatezanja zavise od gradijenta temperature i trenutne krutosti valjanog betona.

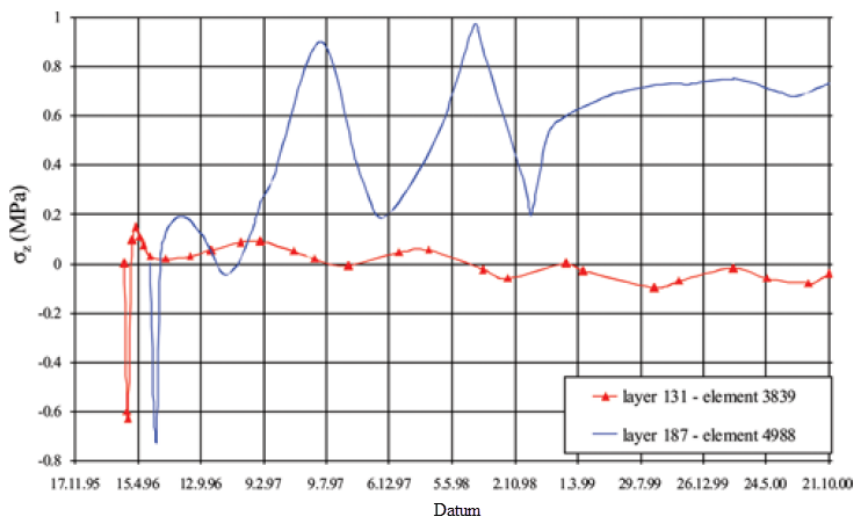
Čvor 3839 je unutar tela brane. Prve nedelje nakon izlivanja, javljaju se naponi pritiska (σ do 0,7 MPa). Otprilike nedelju dana kasnije, razvija se maksimalni napon zatezanja (0,2 MPa). Nakon toga, do kraja proračunskog perioda, napon zatezanja se smanjuje, oscilujući oko nule.

Čvor 4988 se nalazi blizu uzvodnog lica, pa je uticaj graničnih uslova mnogo izraženiji nego u čvorovima unutar brane. Prvi pik napona zatezanja, koji je rezultat hlađenja izlivenog betona, je znatno niži (0,2 MPa). Do punjenja akumulacije, naponi zatezanja osciliraju između 0,2 i 1,0 MPa, u zavisnosti od temperature vazduha. Nakon toga, oscilacije se smanjuju, zbog konstantne temperature vode u akumulaciji.

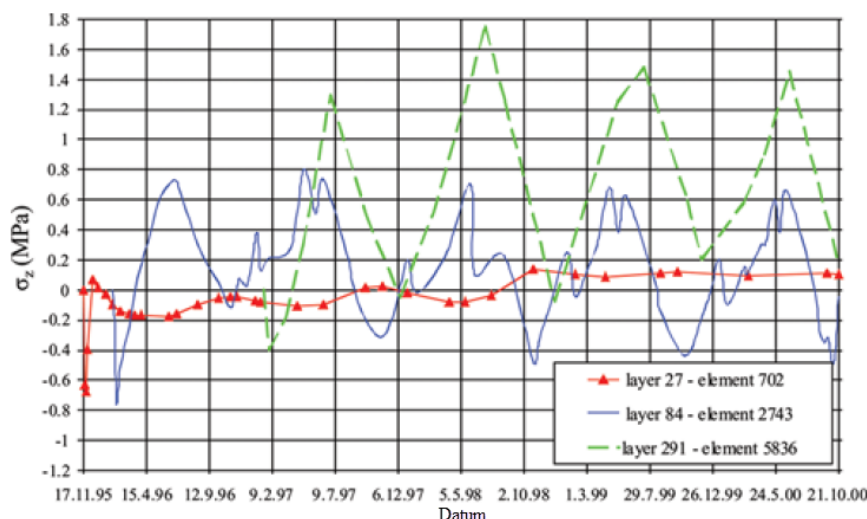
Čvor 702 je unutar tela brane, ali relativno blizu uzvodne površine. Nakon početne faze u kojoj se javljaju naponi pritiska i zatezanja, na napone nastavlja da utiče granični uslovi po temperaturi vazduha.

U čvoru 2743 se oseća veliki uticaj temperature vazduha sa nizvodne strane.

Čvor 5836 u zoni krune brane je pod uticajem i uzvodnih i nizvodnih konturnih uslova.



Slika 19. Razvoj napona u čvoru 3839 i 4988 [3]

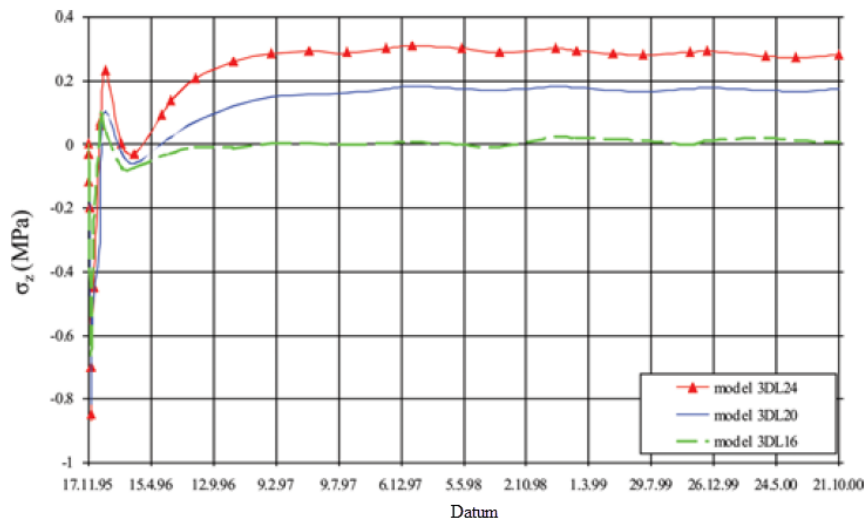


Slika 20. Razvoj napona u čvoru 702, 2743 i 5836 [3]

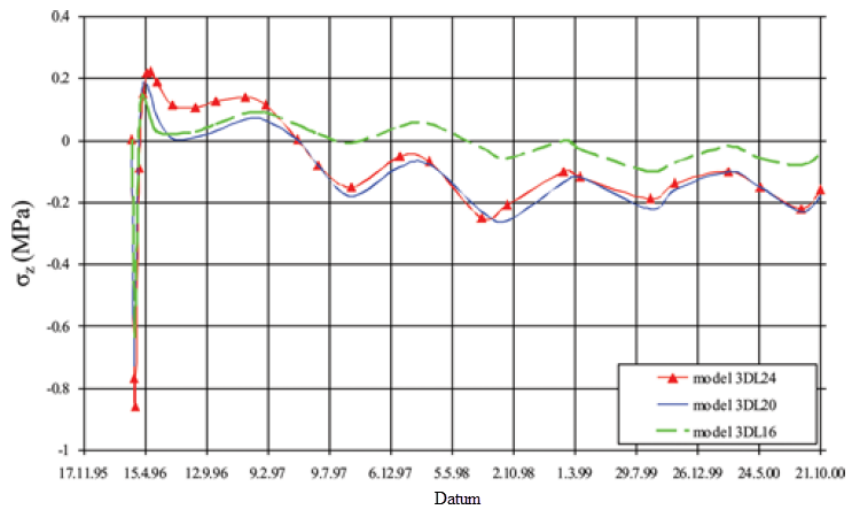
Rezultati u čvoru 956, koji se nalazi u centralnom donjem delu brane, blizu zone spojnice, prikazani su na Slici 21. Naponi zatezanja u ovom čvoru najmanje zavise od konturnih uslova na uzvodnom i nizvodnom licu i u galerijama. Zbog toga, ovi naponi brzo konvergiraju do krajnjih vrednosti, uz neznatne sezonske oscilacije (izuzev početnih vrednosti). Srednja kvadratna devijacija između modela 3DL24 i 3DL20 je 0,12 MPa, a između modela 3DL20 i 3DL16 je 0,14 MPa.

Naponi u centralnom delu lamele brane prikazani su na Slici 22. Nakon pojave početnih napona pritiska (od 0,6 MPa do 0,9 MPa, u zavisnosti od modela), javljaju se naponi zatezanja u sva tri modela. Naponi postepeno opadaju uz blage oscilacije pod uticajem nizvodnih graničnih uslova. Srednja kvadratna devijacija između 3DL24 i 3DL20 je 0,09 MPa, a 0,11 MPa između 3DL20 i 3DL16.

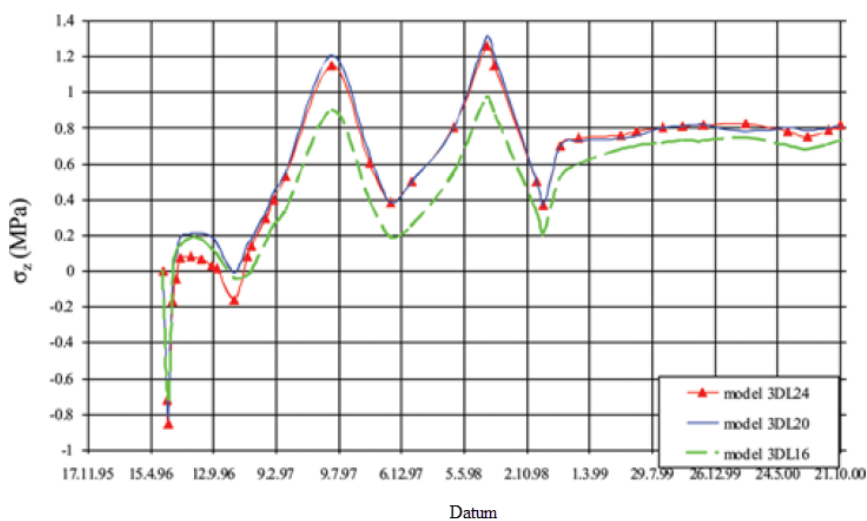
Naponi u uzvodnom čvoru (Slika 23) prate sezonske temperaturne oscilacije, izazvane graničnim uslovima. Najveći naponi zatezanja javljaju se nakon završetka betoniranja, a pre punjenja akumulacije. Nakon punjenja akumulacije, naponi slabo osciluju oko 0,7 i 0,8 MPa, kod sva tri modela. Za razliku od prethodnih čvorova, srednja kvadratna devijacija između 3DL24 i 3DL20 je zanemarljiva (0,07 MPa), u poređenju sa devijacijom od 0,16 MPa, između 3DL20 i 3DL16.



Slika 21. Naponi u čvoru 956, sloj 31, u zavisnosti od dužine lamele [3]



Slika 22. Naponi u čvoru 3839, sloj 131, u zavisnosti od dužine lamele [3]



Slika 23. Naponi u čvoru 4988, sloj 187, u zavisnosti od dužine lamele [3]

6. ZAKLJUČAK

U procesu hlađenja betona dolazi do njegovog skupljanja i, usled ograničene deformacije, javljaju se naponi zatezanja.

Na osnovu sprovedene termičko-naponske analize lamele gravitacione betonske brane koja se gradi metodom blokova i prikazanih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Ekstremne vrednosti termičkih napona zatezanja javljaju se kao posledica naglog hlađenja betona usled niskih temperatura u površinskoj zoni kao i hlađenjem blokova između vertikalnih spojnica u unutrašnjosti konstrukcije a koji su brže napredovali u odnosu na betoniranje preostalog dela objekta. Pri tome je u betonu, zbog bržeg napredovanja, zaostala toplota oslobođena u procesu hidratacije cementa. Odavanjem toplote i hlađenjem ovih blokova javljaju se termički naponi zatezanja;
- Redukcijom dužine lamele za 5,0 m (sa 20,0 m na 15,0 m) ekstremna vrednost termičkog napona zatezanja smanjuje se za prosečno 0,93 MPa (i do 16,0%) uz očiglednu redukciju zona u kojima je prekoračena čvrstoća betona na zatezanje. Smanjenje ekstremnog termičkog napona zatezanja je 0,70 MPa (i do 12,0%) zimi i 1,10 MPa (i do 20,0%) leti.

Na osnovu sprovedene termičko-naponske analize lamele gravitacione betonske brane koja se gradi u slojevima i prikazanih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Veće oscilacije napona zatezanja, izazvane uticajem graničnih uslova, su najizraženije u zoni nizvodnog lica, krune brane i uzvodnog lica, pre punjenja akumulacije. Elementi udaljeni od spoljašnjih površina pokazuju blage oscilacije napona;
- Maksimalne vrednosti napona zatezanja javljaju se u sloju br. 215, koji je prvi sloj betoniran posle letnje pauze (od 20. juna do 2. novembra druge godine). Ovo ukazuje na to da su dugi prekidi betoniranja povoljni za razvoj visokih napona zatezanja;
- Naponi u kruni brane takođe pokazuju intenzivne sezonske oscilacije zbog blizine spoljašnje površine.
- Na osnovu prikazanih rezultata, njihovog srednjeg kvadratnog odstupanja u karakterističnim čvorovima, evidentno je da termički naponi zatezanja kod brana od valjanog betona zavise od dužine lamele. Srednja kvadratna devijacija termičkih napona između 3DL24 i 3DL20 je 0,1 MPa a između 3DL20 i 3DL16 - 0,2 MPa. Povećanjem dužine lamele sa 20,0 m na 24,0 m, maksimalni termički naponi zatezanja se povećavaju za oko 0,3 MPa (12,0 %). Smanjenjem dužine lamele sa 20,0 m na 16,0 m, maksimalni termički naponi zatezanja se smanjuju za oko 0,2 MPa (7,0 %).

Iz svega navedenog sledi da proračun termičko-naponskog stanja treba da predstavlja neizostavan deo projekta svake masivne betonske konstrukcije, a naročito visokih gravitacionih betonskih brana. Prostorni numerički modeli po pravilu su bazirani na metodi konačnih elemenata, a analiza mora biti fazna, pri čemu se u prvoj fazi određuje temperaturno polje u karakterističnim vremenskim trenucima, a u drugoj naponsko stanje usled uticaja temperature i ostalih opterećenja.

Na termičke napone dominantno utiču početni uslovi kao što su temperatura sveže betonske mešavine, i adijabatski porast temperature, odnosno granični uslovi poput temperature vazduha i vode, ili uticaja insolacije nizvodne kosine brane.

Pojava napona zatezanja najefikasnije se može kontrolisati pravilnim projektovanjem betonske mešavine, adekvatnom metodologijom izgradnje i ograničavanjem dužine lamela gravitacionih betonskih brana.

7. LITERATURA

- [1] Petrović, P. Hidrotehničke Konstrukcije, drugi deo; Građevinski Fakultet: Beograd, Srbija, 2002.
- [2] Savić Lj.: Uvod u hidrotehničke građevine, drugo izdanje, Građevinski fakultet, Beograd, 2009.
- [3] Mirković, U., Kuzmanović, V., & Todorović, G. (2022). Long-Term Thermal Stress Analysis and Optimization of Contraction Joint Distance of Concrete Gravity Dams. *Applied Sciences*, 12(16), 8163.
- [4] <https://theconstructor.org/concrete/roller-compacted-concrete/5863/>
- [5] Kuzmanović V.: Prilog termičkom proračunu gravitacionih brana od valjanog betona, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd, 2007.
- [6] Cervera, M., Oliver, J., & Prato, T. (2000). Simulation of construction of RCC dams. II: stress and damage. *Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1062-1069.
- [7] Kurian, T., Kavitha, P. E., & Kuriakose, B. (2013). Numerical analysis of temperature distribution across the cross section of a concrete dam during early ages. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 1, 26-31.
- [8] Abdulrazeg, A. A., Noorzaei, J., Jaafar, M. S., Khanehzaei, P., & Mohamed, T. A. (2014). Thermal and structural analysis of RCC double-curvature arch dam. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(3), 434-445.
- [9] Noorzaei, J., Bayagoob, K. H., Thanoon, W. A., & Jaafar, M. S. (2006). Thermal and stress analysis of Kinta RCC dam. *Engineering Structures*, 28(13), 1795-1802.
- [10] Bayagoob, K. H., & Bamaga, S. O. (2019). Construction of roller compacted concrete dams in hot arid regions. *Materials*, 12(19), 3064.
- [11] USACE. Gravity Dam Design; US Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA, 1995; p. 2-1.
- [12] Bofang, Z. Introduction. In *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2014; pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407723-2.00001-4>.
- [13] Bofang, Z. Precooling and Surface Cooling of Mass Concrete. In *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2014; pp. 401–408. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407723-2.00018-X>.
- [14] Mirković U, Kuzmanović V, Todorović G. Influence of Monolith Length on Temperature Field of Concrete Gravity Dams. *Applied Sciences*. 2024; 14(8):3248. <https://doi.org/10.3390/app14083248>
- [15] Léger, P.; Venturelli, J.; Bhattacharjee, S.S. Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams. Part 2: Behavior. *Can. J. Civ. Eng.* 1993, 20, 1018–1029.
- [16] ACI. Manual of Concrete Practice. Part 1; American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, 1981.
- [17] Platanovryssi Hydroelectric Project. Measurement Results; Public Power Corporation: Athens, Greece, 2004.
- [18] Kuzmanović, V. Termičko ponašanje gravitacionih RCC brana I deo – proračun temperaturnog polja, *Vodoprivreda* 2008, 40, 145-155
- [19] Kuzmanović, V.; Savić, Lj.; Mladenović, N. Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams. *J. Therm. Stresses* 2013, 36, 112–134. <https://doi.org/10.1080/01495739.2013.764795>.