

Универзитет у Београду
Грађевински факултет

Урош Б. Мирковић

**ТЕРМИЧКО-НАПОНСКА АНАЛИЗА
ГРАВИТАЦИОНИХ БЕТОНСКИХ БРАНА
КОЈЕ СЕ ГРАДЕ МЕТОДОМ БЛОКОВА**

докторска дисертација

Београд, 2024.

University of Belgrade
Faculty of Civil Engineering

Uroš B. Mirković

**THERMAL-STRESS ANALYSIS
OF CONCRETE GRAVITY DAMS
WHICH ARE BUILT IN BLOCKS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

Универзитет у Београду
Грађевински факултет

Урош Б. Мирковић, маг. инж. грађ.

ТЕРМИЧКО-НАПОНСКА АНАЛИЗА ГРАВИТАЦИОНИХ БЕТОНСКИХ БРАНА
КОЈЕ СЕ ГРАДЕ МЕТОДОМ БЛОКОВА
докторска дисертација

Ментор:

проф. др Владан Кузмановић, дипл. грађ. инж.

Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Чланови комисије за одбрану докторске дисертације:

1. проф. др Љубодраг Савић, дипл. грађ. инж.

Универзитет у Београду, Грађевински факултет

2. в. проф. др Мирослав Марјановић, маг. инж. грађ.

Универзитет у Београду, Грађевински факултет

3. проф. др Мирослав Живковић, дипл. маш. инж.

Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука

Датум одбране:

Изјаве захвалности

Велику захвалност за израду ове докторске дисертације дугујем свом ментору проф. др Владану Кузмановићу, чије су ми несебична помоћ и подршка биле од непроцењивог значаја.

Такође, велику захвалност дугујем и в. проф. др Дејану Дивцу, генералном директору Института за водопривреду „Јарослав Черни“, који ми је дао прилику да се и у пословном смислу усавршавам у области брана.

Захваљујем се проф. др Љубодрагу Савићу, проф. др Мирославу Живковићу и в. проф. др Мирославу Марјановићу, члановима комисије за преглед и одбрану докторске дисертације.

Захвалност дугујем и в. проф. др Горану Тодоровићу који ми је био велика подршка приликом објаве радова на SCI листи.

Захваљујем се извршним директорима Института за водопривреду „Јарослав Черни“, Дејану Вучковићу и др Николи Миливојевићу, на разумевању током докторских студија и израде дисертације.

Захвалност упућујем и колегама др Слободану Радовановићу, в. проф. др Драгану Ракићу и мр Милану Тричковићу на подршци и саветима током спровођења нумеричких симулација применом методе коначних елемената.

Захваљујем се колегиници Јовани Ивановић и колеги Јовану Шапоњићу на стручним саветима и помоћи приликом превода радова.

Захваљујем се колегиници Маји Павић и колеги Стефану Параћу на пруженим стручним саветима и техничком уређењу дисертације.

Захваљујем се колегама Зорану Дубајићу и Владану Ђукићу који су учинили доступним значајне рачунарске и софтверске ресурсе Института.

Захваљујем се и осталим колегама Института за водопривреду „Јарослав Черни“, а који су на било који начин допринели да ова дисертација добије свој коначан облик.

И на крају, највећу захвалност дугујем својој породици која ми је дала вољу да истрајем на овом путу. Захваљујем се мајци Љиљани, оцу Бранку, брату Николи и супруги Ивани.

Рељи и Дуњи Мирковић,

у Београду, 2024.



Урош Мирковић

ТЕРМИЧКО-НАПОНСКА АНАЛИЗА ГРАВИТАЦИОНИХ БЕТОНСКИХ БРАНА КОЈЕ СЕ ГРАДЕ МЕТОДОМ БЛОКОВА

Резиме

У оквиру ове дисертације извршена је дуготрајна фазна термичко-напонска анализа гравитационе бетонске бране која се гради методом блокова. Коришћен је просторно-временски нумерички модел који се састоји од једне непреливне ламеле бране и припадајуће стенске масе.

За усвојене димензије блокова, уз чију примену се врши бетонирање, и редослед и динамику бетонирања ових блокова, извршена је термичко - напонска анализа при чему се у обзир узимају: термичка и механичка својства материјала, процес хидратације цемента, почетни и гранични услови условљени бетонирањем по блоковима и одговарајућа оптерећења. Термичка анализа узима у обзир временски зависан и нелинеаран процес ослобађања топлоте хидратације цемента. Анализа напонског стања разматра утицај дужине ламеле као и утицај контурног услова на месту дилатационе разделнице која не прихвата затезање („no tension joint“) на напоне затезања у конструкцији. Анализе обухватају период изградње, пуњења акумулације и експлоатације у укупном трајању од око пет година.

Верификација прорачуна извршена је поређењем амплитуда прорачунских температура у карактеристичним чворовима ламеле бране, код којих је изражен утицај амбијанталне температуре, са аналитичким вредностима поједностављене методе других аутора.

Анализа утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања спроведена је за четири изабране дужине ламеле. Развијени модели узимају у обзир сопствену тежину конструкције и све релевантне термичке процесе као и одговарајуће термичке и напонско-деформацијске контурне услове. Са друге стране, модели не разматрају дејства која би пореметила реалну слику чисто термичких напона затезања (хидростатички притисак и силе од узгона). Као резултат, приказана су напонска стања у одговарајућим вертикалним и хоризонталним пресецима, зоне у средњој равни у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у правцу осе бране, дијаграми напона у карактеристичним тачкама, као и дијаграми промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле за карактеристичне фазе изградње и експлоатације.

Анализа утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања спроведена је за једну изабрану дужину ламеле уз параметризацију померања потребног за активирање задатог контурног услова. Опсег вредности наведеног граничног померања изабран је искуствено, разматрајући и мерења са сличног објекта. Унутар изабраног опсега извршена је параметризација активирања контурног услова са кораком од 1,0 mm. Развијени модели, за разлику од модела који анализирају утицај дужине ламеле на термичке напоне затезања, узимају у обзир сопствену тежину конструкције, све релевантне термичке процесе али и скупљање бетона (које је уведено у модел преко номиналне величине карактеристичног блока ламеле), хидростатички притисак и силе од узгона као и одговарајуће термичке и напонско-деформацијске контурне услове. Као резултат, приказана су напонска стања у одговарајућим вертикалним и хоризонталним пресецима, зоне у средњој равни у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у правцу осе бране, дијаграми напона у карактеристичним тачкама као и дијаграми промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле за карактеристичне фазе изградње и експлоатације.

Добијени резултати температурног поља показују да на пораст температуре у телу бране највећи утицај имају процес хидратације у комбинацији са летњим температурама ваздуха у периоду грађења конструкције. Претходно наведено указује на значај контроле температура бетона приликом извођења радова у условима екстремних температура. Приказан је и утицај промене дужине ламеле на изглед температурног поља у бетону.

Добијени резултати напонског стања показују да наведени поступак моделирања омогућава анализу напона затезања и процену ризика од настанка прслина у бетону. Екстремне вредности напона затезања јављају се у процесу наглог или постепеног хлађења бетона, када долази до његовог скупљања. Приказана је могућност редукције ових напона и то избором адекватне дужине ламеле односно узимањем у обзир реалног понашања њених дилатационих разделница, чиме се, на иновативан начин, уводи нова врста разматрања проблема код ових масивних хидротехничких конструкција.

Истраживање у оквиру ове дисертације је значајно јер ће се стећи детаљнији увид у термичко-напонско понашање гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, а нарочито: показати значај избора оптималне дужине ламеле и моделирања реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице која, према својој природи, није у стању да прихвати силе затезања између суседних ламела конструкције. Избор оптималне дужине ламеле може утицати на редукцију времена и трошкова за извођење конструкције а самим тим, посредно, и на мањи утицај на околну средину у којој се конструкција налази. Моделирање реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице може допринети бољем предвиђању појава и развоја прслина услед напона затезања што директно утиче на бољу процену стања и трајности конструкције.

Кључне речи: дуготрајна фазна термичко-напонска анализа; гравитациона бетонска брана; температурно поље; напони затезања; димензије блокова; дужина ламеле; дилатациона разделница

Научна област: Грађевинско инжењерство

Ужа научна област: Хидротехничке конструкције и објекти

THERMAL - STRESS ANALYSIS OF CONCRETE GRAVITY DAMS WHICH ARE BUILT IN BLOCKS

Abstract

Within this dissertation, a long-term phase thermal-stress analysis of a concrete gravity dam, which is built using the block method, was conducted. A spatial-temporal numerical model was used, which consists of one non-overflow monolith of the dam and associated rock mass.

For the adopted dimensions of the blocks, with the application of which pouring is carried out, the sequence and dynamics of pouring of these blocks, a thermal-stress analysis was performed, taking into account: thermal and mechanical properties of the material, the process of concrete hydration, initial and boundary conditions that are conditioned by pouring per blocks and corresponding loads. The thermal analysis takes into account the time-dependent and nonlinear process of heat release due to concrete hydration. The analysis of the stress state was carried out by considering the influence of the monolith length on the thermal tension stresses as well as the influence of the boundary condition at the place of the contraction joint that does not accept tension ("no tension joint") on the tension stresses in the construction. The analysis covers the period of construction, filling of the reservoir and exploitation for a total duration of about five years.

Verification of the model was performed by comparing the calculated temperature amplitudes in the characteristic nodes of the monolith, where the influence of the ambient temperature is expressed, with the analytical values of the simplified method of other authors.

The analysis of the influence of the monolith length on the thermal tensile stresses was carried out for the four considered monolith lengths. The developed models take into account the self-weight of the structure and all relevant thermal processes as well as the corresponding thermal and stress-deformation boundary conditions. The models do not consider effects that would disturb the real picture of thermal tensile stresses (hydrostatic pressure and uplift). As a result, the stress states are shown in the corresponding vertical and horizontal sections, zones in the midplane where the tensile strength of the concrete in the direction of the dam axis was exceeded, stress diagrams at characteristic nodes, as well as diagrams of changes in the maximum tensile stresses values in the midplane for characteristic phases of construction and operation.

The analysis of the influence of the boundary condition at the place of the contraction joint on the tensile stresses was carried out for one selected length of the monolith with the parameterization of the displacement required to activate the given boundary condition. The value range of the specified limit displacement was chosen empirically, considering measurements from similar object. Within the selected range, the parameterization of the activation of the given boundary condition was performed with a step of 1.0 mm. The developed models, unlike those analyzing the effect of monolith length on thermal tensile stresses, take into account the self-weight of the structure, all relevant thermal processes, as well as concrete shrinkage (which was introduced into the model via the nominal size of the characteristic block of the monolith), hydrostatic pressure and uplift and the corresponding thermal and stress-deformation boundary conditions. As a result, the stress states are shown in the corresponding vertical and horizontal sections, zones in the midplane where the tensile strength of the concrete in the direction of the dam axis was exceeded, stress diagrams at characteristic nodes, as well as diagrams of changes in the maximum tensile stresses values in the midplane for characteristic phases of construction and exploitation.

The obtained results of the temperature field show that the concrete hydration process combined with the summer air temperatures during the construction period have the greatest influence on the rise in temperature in the body of the dam. The above indicates the

importance of concrete temperature control in extreme temperature conditions. The effects of changing the length of the monolith on the temperature field in concrete are shown.

The obtained results of the stress state show that the mentioned modeling procedure enables the analysis of the tensile stresses in the construction and the assessment of the risk of cracks in the concrete. Extreme values of tensile stress occur in the process of sudden or gradual cooling of concrete, when it shrinks. The possibility of reducing these stresses is shown by choosing an adequate monolith length, i.e. by taking into account the real behavior of its contraction joints, which, in an innovative way, introduces a new type of consideration of the problems of these massive hydrotechnical constructions.

The research within this dissertation is significant as it provides a more detailed insight into the thermal-stress behavior of gravity concrete dams which are built in blocks, particularly: demonstrating the importance of selecting the optimal monolith length and modeling realistic boundary conditions at the location of the contraction joint, which, by its nature, cannot accommodate tensile forces between adjacent monoliths. Choosing the optimal monolith length can reduce construction time and costs, thereby indirectly minimizing the environmental impact of the structure. Modeling realistic boundary conditions at the contraction joint location can improve the prediction of crack initiation and development due to tensile stresses, directly contributing to a better assessment of the structure's condition and durability.

Keywords: long-term phased thermal-stress analysis; concrete gravity dam; temperature field; tensile stresses; blocks dimensions; monolith length; contraction joint

Scientific field: Civil engineering

Scientific subfield: Hydraulic structures and objects

САДРЖАЈ

Изјаве захвалности	iv
Резиме.....	v
Abstract.....	vii
САДРЖАЈ.....	ix
1 УВОД.....	1
1.1 Предмет истраживања	1
1.2 Циљеви и задаци истраживања	2
1.3 Структура докторске дисертације	4
2 ДОСАДАШЊА ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ТЕРМИЧКО-НАПОНСКЕ АНАЛИЗЕ БЕТОНСКИХ БРАНА	5
2.1 Гравитационе бетонске бране	5
2.1.1 Бране од класичног хидротехничког бетона	5
2.1.2 Бране од ваљаног (RCC) бетона	6
2.2 Лучне бетонске бране	8
2.2.1 Бране од класичног хидротехничког бетона	8
2.2.2 Бране од ваљаног (RCC) бетона	10
2.3 Друга релевантна истраживања	10
2.4 Критички осврт на досадашња истраживања	11
3 ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА.....	13
3.1 Теоријске основе термичког прорачуна	13
3.1.1 Основне једначине преноса топлоте	13
3.1.2 Топлотна физичка својства хидротехничког бетона	15
3.1.3 Ослобађање топлоте услед процеса хидратације	16
3.1.4 Размена топлоте са површина конструкције	21
3.1.5 Почетна температура свеже бетонске мешавине	23
3.1.6 Температура припадајуће стенске масе	23
3.2 Теоријске основе напонско-деформацијског прорачуна.....	23
3.2.1 Термички напони затезања код бетонских брана	23
3.2.2 Физичко - механички параметри материјала	25
3.2.3 Оптерећења	27
3.3 Примена МКЕ у спровођењу термичко-напонског прорачуна.....	28
3.4 Карактеристике термичко-напонских анализа код бетонских брана	29
4 ПРАКТИЧНА РАЗМАТРАЊА	31

4.1	Разделнице у телу гравитационих бетонских брана.....	31
4.2	Блокови у телу гравитационих бетонских брана.....	31
4.2.1	Дуги блокови	32
4.2.2	Смакнути блокови (косе спојнице).....	32
4.2.3	Стубасти блокови (вертикалне спојнице)	33
4.2.4	Комбинација стубастих и дугих блокова	34
4.2.5	Високи блокови	34
4.3	Пример разделница и блокова у пракси.....	35
4.3.1	Блокови и радне разделнице.....	35
4.3.2	Дилатационе разделнице	36
5	МЕТОДОЛОГИЈА ПРОРАЧУНА	41
6	НУМЕРИЧКИ МОДЕЛИ ЗА ТЕРМИЧКО-НАПОНСКЕ АНАЛИЗЕ	44
6.1	Тродимензионални структурни модел бране.....	44
6.1.1	Основни подаци.....	44
6.1.2	Моделирање блокова ламеле бране	45
6.2	Тродимензионални МКЕ модел бране	47
6.2.1	Мрежа коначних елемената.....	47
6.2.2	Врста, број и показатељи квалитета 3Д коначних елемената.....	47
6.2.3	Параметри материјала за термичку анализу	48
6.2.4	Параметри материјала за напонско-деформацијску анализу.....	48
6.2.5	Контурни услови за термичку анализу	49
6.2.6	Контурни услови за напонско-деформацијску анализу	54
6.3	Оптерећења	55
6.3.1	Сопствена тежина.....	55
6.3.2	Температурно поље.....	55
6.3.3	Хидростатички притисак и силе од узгона	55
6.4	Динамика грађења бране и пуњења акумулације.....	56
7	АНАЛИЗА НАПОНСКОГ СТАЊА	58
7.1	Температурно поље	58
7.1.1	Контрола и верификација прорачунског модела	58
7.1.2	Температурно поље у фази изградње	64
7.1.3	Температурно поље у фази експлоатације.....	76
7.2	Утицај дужине ламеле на термичке напоне затезања	87
7.2.1	Напони у фази изградње	88
7.2.2	Напони у фази експлоатације	100
7.3	Утицај контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања	114

7.3.1	Напони у фази изградње	117
7.3.2	Напони у фази експлоатације	134
8	ЗАКЉУЧЦИ И СМЕРНИЦЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА	152
9	ЛИТЕРАТУРА	156
	ПРИЛОЗИ	163
	Биографија аутора	164
	Изјава о ауторству	165
	Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада.....	166
	Изјава о коришћењу	167

1 УВОД

1.1 Предмет истраживања

Непосредно по уграђивању бетона долази до повећања температуре у телу гравитационе бетонске бране услед ослобађања топлоте хидратације [1-4]. Накнадним хлађењем загрејаног бетона, које може бити нагло (резултат промене дневне или сезонске температуре ваздуха) или постепено (резултат природног процеса којим температура бетона тежи да се изједначи са просечном вишегодишњом температуром ваздуха), јавља се промена запремине конструкције, односно настају термичке дилатације бетона [5, 6]. Уколико је наведена промена запремине спречена или делимично ограничена, јављају се термички напони затезања који у конструкцији могу да изазову настанак прслина [1-4]. Прслине се временом шире, слабе отпорност бране и омогућавају провирање воде и повећање узгона [7, 8].

Претходно описани процеси доводе до смањења трајности и сигурности ових масивних бетонских конструкција [9-11]. Ефекти термичких напрезања ће у будућности бити све израженији јер су бројна истраживања предвидела глобални пораст температура изазван климатским променама.

Прекорачење вредности термичких напона затезања и појава прслина код гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, и код којих је дужина блока једнака дужини ламеле, најизраженије је у правцу осе бране (правац од једне обале реке ка другој) у средњој равни ламеле, као и на местима контакта претходно изливених и новоизливених блокова. С обзиром на захтеве у погледу употребљивости и трајности оваквих објеката, уобичајено је ограничење и одржавање термичких напона затезања испод чврстоће бетона на затезање [5].

Процес појаве прслина код гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова може се избећи мерама као што су грађење у међусобно независним ламелама, фазним бетонирањем блокова, справљањем бетонске мешавине са мањом количином цемента, употребом споровезујућег цемента, снижавањем почетне температуре мешавине коришћењем леда, хладне воде или охлађеног агрегата, као и одговарајућом негом бетона након уграђивања.

Грађење гравитационих бетонских брана у међусобно независним ламелама подразумева формирање дилатационих разделница између две суседне ламеле које омогућавају да се термички напони затезања растерете и тиме спречи или умањи процес појаве прслина. Растојање између две суседне дилатационе разделнице, које се дефинише и као дужина ламеле, одређује се термичко-напонском анализом из услова да термички напони затезања у правцу осе бране не буду прекорачени или да, уколико се јави прекорачење, не утичу на глобалну сигурност конструкције. Исправно постављеним дилатационим разделницама избегавају се и прслине услед неједнаког слегања, које може настати као резултат топографских и/или геомеханичких услова. Вододрживост бране на месту дилатационих разделница обезбеђује се повезивањем ламела заптивним тракама од еластичног материјала за заптивање [7]. Фазно бетонирање подразумева изливање (уградњу) бетонских блокова по претходно дефинисаном распореду и динамици.

На основу претходно наведеног, следи да се пројектовању гравитационих бетонских брана мора приступити пажљиво што подразумева добро познавање свих фактора који утичу на процес развоја напонског стања које доводи до појаве и пропагације прслина. Савремене методе термичко - напонског прорачуна, које се заснивају на примени методе коначних елемената (МКЕ) [12, 13], дају могућност узимања у обзир свих претходно наведених фактора.

Предмет истраживања у оквиру ове докторске дисертације је приказ дуготрајног термичко-напонског понашања једне гравитационе бетонске бране која се гради методом блокова и то у току њеног грађења, пуњења акумулације и експлоатације. Анализа напонског понашања у оквиру ове дисертације подразумева приказ утицаја дужине ламеле и контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања у конструкцији.

Истраживање је извршено тако да прорачуни, у зависности од ситуације, узимају у обзир сопствену тежину конструкције, термичке утицаје, временске деформације скупљања, хидростатички притисак воде и силе од узгона. Посебан значај у истраживању има нови приступ моделирању контурног услова на месту дилатационе разделнице која не прихвата затезање („no tension joint“).

Како је аутор имао податке о брани Платановриси (Република Грчка) [1], а која добро репрезентује једну велику гравитациону бетонску брану, исти су искоришћени за креирање прорачунских модела за потребе овог истраживања. У складу са претходним, за поједине контурне услове искоришћене су и мерене вредности са овог објекта: амбијенталне вредности температура, температуре ваздуха у галеријама бране, температуре свеже бетонске мешавине као и вредности промене нивоа воде током пуњења акумулације.

1.2 Циљеви и задаци истраживања

Ова докторска дисертација има неколико циљева у области термичко-напонске анализе гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова:

- да квалитативно и квантитативно прикаже развој термичких напрезања за време изградње, пуњења акумулације и експлоатације,
- да анализира утицај дужине ламеле (размак дилатационих разделница) на термичке напоне затезања,
- да прикаже утицај контурног услова на месту дилатационе разделнице типа „no tension joint“, односно разделнице која не прихвата затезање, на напонско понашање конструкције.

У складу са постављеним циљевима, посебни задаци истраживања у оквиру ове дисертације су:

- преглед и анализа истраживања других аутора, а која се односе на моделирање термичко-напонског понашања бетонских брана (гравитационих и лучних),
- развој и примена нумеричког модела за термичко-напонску анализу гравитационе бетонске бране која се гради методом блокова за различите дужине ламеле у току процеса изградње, пуњења акумулације и експлоатације,
- приказ утицаја промене дужине ламеле на термичке напоне затезања код гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова,

- развој и примена модела за термичко-напонску анализу гравитационе бетонске бране која се гради методом блокова са контурним условом на месту дилатационе разделнице који симулира њено реално понашање (дилатациона разделница која прихвата притисак али не прихвата затезање),
- приказ утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице која не прихвата затезање на напонско стање конструкције,
- анализа, дискусија и интерпретација резултата добијених на основу спроведених прорачуна,
- приказ смерница за даља истраживања у области гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова.

Истраживање у оквиру ове докторске дисертације спроведено је уз употребу фазне, једносмерне термичко-напонске анализе која се заснива на методи коначних елемената чиме се реалније и прецизније реализују постављени задаци. При томе, у обзир се узимају сви релевантни термички контурни услови (на површинама између блокова и стенске масе, на површинама између претходно изливених и новоизливених блокова, на површинама блокова које су у контакту са водом и ваздухом), температура стенске масе, почетна температура бетонске мешавине, као и процес хидратације цемента. Приликом спровођења напонско-деформацијске анализе, у обзир се узимају контурни услови по померањима (на доњој, узводној и низводној граници стенске масе) тако да се добије реално понашање стенске масе испод ламеле бране. За потребе анализе утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања, извршено је моделирање овог контурног услова на бочним страницама модела тако да се потпуно активирање контакта две суседне ламеле бране врши након достизања изабраног граничног померања у правцу њене осе. Опсег вредности наведеног граничног померања изабран је искуствено, разматрајући и мерења са сличног објекта. Унутар изабраног опсега од 0 до 5,0 mm извршена је параметризација активирања задатог контурног услова са кораком од 1,0 mm.

Као резултат прорачуна приказана су температурна поља и напонска стања за карактеристичне фазе (изградња, пуњење акумулације и експлоатација) уз приказ временских дијаграма температура и напона у карактеристичним тачкама конструкције. Такође, приказани су и временски дијаграми промене максималних вредности напона као и дијаграми који показују зависност промене максималних вредности напона у функцији спољашње температуре ваздуха за период грађења односно период експлоатације конструкције.

Истраживање у оквиру ове дисертације је значајно јер ће се стећи детаљнији увид у термичко-напонско понашање гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, а нарочито: показати значај избора оптималне дужине ламеле и моделирања реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице која, према својој природи, није у стању да прихвати силе затезања између суседних ламела конструкције.

Избор оптималне дужине ламеле може утицати на редукцију времена и трошкова за извођење конструкције а самим тим, посредно, и на мањи утицај на околну средину у којој се конструкција налази. Моделирање реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице може допринети бољем предвиђању појава и развоја прслина услед напона затезања што директно утиче на бољу процену стања и трајности конструкције.

1.3 Структура докторске дисертације

Истраживање у оквиру ове докторске дисертације састоји се од 9 поглавља.

У оквиру поглавља 1 дат је приказ предмета, циљева и задатака истраживања као и структуре докторске дисертације.

У оквиру поглавља 2 дат је преглед најважнијих истраживања у области термичко-напонске анализе бетонских брана (гравитационих и лучних), као и других релевантних истраживања са критичким освртом на исте.

Поглавље 3 приказује релевантна теоријска разматрања у области моделирања термичко-напонског понашања гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова. Приказане су теоријске основе термичког и напонско-деформацијског прорачуна и то само за процесе који су разматрани у оквиру овог истраживања.

У поглављу 4 приказана су практична разматрања која се односе на разделнице и блокове у телу гравитационих бетонских брана као и начин њиховог извођења за један изабрани објекат из домаће праксе (гравитациона бетонска брана ХЕ “Ђердап 1”).

У поглављу 5 приказана је методологија прорачуна која је спроведена у оквиру ове докторске дисертације. Дати су основни подаци о прорачунским моделима и њиховој структури, начину спровођења прорачуна, као и о изабраним карактеристичним временским пресецима у којима су приказани резултати. Приказан је алгоритам прорачуна у оквиру спроведеног истраживања.

У поглављу 6 приказани су тродимензионални структурни и прорачунски МКЕ модели, параметри материјала и контурни услови за спроведену термичку и напонско-деформацијску анализу. Приказана су разматрана оптерећења у зависности од спроведене анализе као и динамика грађења бране и пуњења акумулације, која има важну улогу у правилном спровођењу анализе у разматраном дугорочном периоду (у току грађења конструкције, као и за време пуњења акумулације и експлоатације).

У поглављу 7 приказане су две анализе утицаја на развој напона затезања и то: анализа утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања и анализа утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања. При томе, прва од поменутих анализа спроведена је за четири разматране дужине ламеле, док је друга спроведена за једну изабрану дужину уз параметризацију померања потребног за активирање задатог контурног услова. У оквиру овог поглавља приказани су и резултати прорачуна температурног поља за све разматране дужине ламела.

Поглавље 8 приказује закључке изведене из упоредних анализа, дискусија и интерпретација резултата из претходног поглавља, као и смернице за будућа истраживања, а која могу бити наставак истраживања спроведеног у оквиру ове докторске дисертације.

У последњем поглављу, дат је списак коришћене литературе.

Истраживање у свом обиму садржи и прилоге на пратећем CD-у.

2 ДОСАДАШЊА ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ТЕРМИЧКО-НАПОНСКЕ АНАЛИЗЕ БЕТОНСКИХ БРАНА

Бројни истраживачи су се бавили термичко-напонском анализом бетонских брана (гравитационих и лучних). У наставку овог поглавља приказана су најважнија достигнућа у овој области, према типу објекта и години спроведеног истраживања.

2.1 Гравитационе бетонске бране

2.1.1 Бране од класичног хидротехничког бетона

Majorana и група аутора су 1990. у оквиру истраживања [14] спровели једносмерну термичко-напонску анализу током процеса грађења гравитационе бетонске бране, која се састоји од само неколико блокова, и то коришћењем конститутивних модела који су у функцији старости бетона. У обзир су узети сви релевантни чиниоци током периода изградње конструкције, укључујући и процес неге бетона приликом изливања. У раду није разматрана припадајућа стенска маса као ни период експлоатације конструкције, док је прорачунски модел бране дводимензионалан.

Ishikawa је 1991. у свом истраживању [15], за усвојене параметре материјала и распоред изливања бетона, спровео нумеричке симулације са циљем одређивања термичког и напонског стања у конструкцији. У обзир је узета промена модула еластичности током времена, али нису разматране временске деформације бетона. Такође, нису разматране фазе пуњења акумулације и експлоатације објекта. Резултати прорачуна температурног поља су упоређени са резултатима мерења на објекту, при чему је добијено добро поклапање резултата.

Leger, Venturelli и *Bhattacharjee* [16, 17] су 1993. представили поступак за моделирање термичко-напонског понашања у условима екстремно ниских температура. Ефекат Сунчевог зрачења је узет у обзир повећањем средње годишње температуре на контакту бетона и ваздуха. Извршене су опсежне параметарске анализе и одређена термичка стања за појаву критичних напрезања у конструкцији. У раду није разматран утицај хидратационе топлоте на температурно поље конструкције као ни фаза изградње.

Daoud, Galanis и *Ballivy* [18] су током 1997. спровели дводимензионалну, фазну, термичку анализу бране са припадајућом стенском масом користећи геометрију бране из [16, 17]. Посебна пажња посвећена је формулисању граничног услова на површини акумулације који узима у обзир формирање и топлење леденог покривача, као и интеракцији између бране и стенске масе. У раду није разматрана топлота хидратације цемента уз претпоставку да је овај процес у конструкцији окончан након вишегодишње експлоатације.

Ganelli, Boko и *Mordini* [19] су 2012. спровели анализу утицаја спољашњих фактора (хидростатички притисак и термички утицаји) на хоризонтална померања конструкције током периода експлоатације. Истраживање, које приказује и статистички предикциони модел, показује да се утицај сезонских промена температура ваздуха простира до дубине од 8,0 m док се утицај дневних промена температура простира до дубине од 0,6 m мерено од спољашње површине бетона.

Embaby, Abdelrahman и *Sayed-Ahmed* [20, 21] су 2014. и 2018. спровели термичко-напонску анализу како би одредили утицај разматраних параметара на термички и напонски одговор конструкције у току грађења. Разматрани су утицаји редоследа и динамике изливања блокова, садржаја цемента и спољашње температуре на понашање конструкције. Такође, разматран је и утицај принудног хлађења бетона током бетонирања. Са друге стране, није разматран утицај акумулације на температурно поље конструкције. За потребе верификације модела у оквиру истраживања, коришћени су експериментални и аналитички модели аутора који су дати у [22]. Приказани резултати указују на важност адекватног редоследа и временског интервала изливања блокова, као и адекватног постављања цеви за хлађење. У истраживању се закључује да је временски интервал између изливања два блока изузетно важан у контроли температуре у бетону, као и да размак између цеви игра значајнију улогу у поређењу са пречником цеви за хлађење бетона.

Žvanut, Turk и *Kryžanowski* [23] су 2016. спровели термичку анализу постојеће залучене гравитационе бетонске бране са имплементираним системом техничког осматрања, који омогућава континуално мерење температура бетона и околине (ваздуха, воде као и Сунчевог зрачења). Приказани су резултати температурног поља који су упоређени са измереним вредностима температура у бетону, при чему је добијено добро поклапање. Приликом истраживања коришћен је дводимензионални прорачунски модел бране.

Исти аутори су 2021. у оквиру [24] спровели наставак истраживања [23], узимајући у обзир и процес преливања воде преко прелива конструкције.

2.1.2 Бране од ваљаног (RCC) бетона

Узимајући у обзир да су бетонске бране од ваљаног бетона врло сличне бранама које се граде методом блокова, са одређеним, мањим, разликама, у наставку текста приказана су и најважнија истраживања која се односе на овај тип конструкција.

Најзначајније разлике огледају се у дебљини и начину изливања слојева у односу на блокове код брана од класичног хидротехничког бетона. Слојеви су значајно мањих дебљина, при чему се бетонирање одвија брже и то разстирањем од узводног до низводног лица бране, као и од једне обале ка другој, што може довести до већег раста температура у телу бране. Дилатационе разделнице код брана од ваљаног бетона изводе се накнадним сечењем бетона. Претходно наведено има за последицу да приликом грађења конструкције нема размене топлоте између конструкције и спољашње средине са бочних страна модела (бетонирање суседних ламела бране напредује истим темпом односно није временски ни просторно смакнута).

Saetta, Scotta и *Vitaliani* [25] су 1995. приказали главне факторе који утичу на избор референтне температуре за коју се претпоставља да неће изазвати термичка напрезања у материјалу, тј. у односу на коју се рачунају термичке дилатације. У обзир су узете дневне и сезонске варијације спољашње температуре, Сунчево зрачење, као и процес хидратације цемента. Са друге стране, нису разматране временске деформације као ни процес раног старења бетона.

Cervera, Oliver и *Prato* [26, 27] као и *Luna* и *Wu* [28] су у одвојеним истраживањима током 2000. године представили термичко-напонску анализу са симулацијом процеса грађења конструкције. У оквиру [26, 27] спроведена је параметарска анализа како би се утврдио ефекат који на температурно поље имају температура свеже бетонске мешавине, датум почетка, као и брзина бетонирања. У обзир су узети сви релевантни чиниоци понашања бетона у раном узрасту као што су топлота хидратације и

временске деформације. Међутим, у раду је спроведена анализа над дводимензионалним моделом, што утиче на тачност прорачуна стања напона у конструкцији. Истраживање показује да је метод изградње брана применом ваљаног бетона повољан (у смислу контроле термичких напона) због бетонирања тањих слојева, као и због извођења радова константном брзином, при чему се јављају умеренији температурни градијенти унутар тела бране. У оквиру [28] није разматран дугорочни период експлоатације конструкције.

Amberg је 2003. у оквиру свог истраживања [29] приказао термичко понашање бране у току грађења са циљем да се оптимизује процес хлађења бране. Приликом прорачуна у обзир су узети динамика и распоред бетонирања слојева, Сунчево зрачење, процес хидратације и неге бетона. Међутим, није анализиран утицај пуњења акумулације на конструкцију.

Malkawi, Mutasher и *Qiu* [30] су 2003. извршили термичко-напонску анализу за различите дужине ламеле (15, 30 и 45 m), користећи дводимензионални и тродимензионални модел заснован на методи коначних елемената. Приликом прорачуна напонског стања, осим термичких утицаја, у обзир су узети сопствена тежина конструкције, као и оптерећење од хидростатичког притиска. На бочним странама модела задати су контурни услови у виду спречених померања управно на осу конструкције. У раду нису разматране временске деформације бетона, док примена хидростатичког оптерећења у прорачуну ремети реалан приказ термичких напона у конструкцији.

Waleed и група аутора [31] су 2004. спровели анализу утицаја почетка бетонирања на термичке напоне у конструкцији. Како би се урачунало загревање површине бетона изазвано Сунчевим зрачењем, извршена је апроксимација и то увећањем амбијенталне температуре за 1,0 °C. Приказани су резултати који показују да почетак бетонирања за време високих температура може да изазове прслине које могу да пропагирају кроз тело бране, нарочито у зони темеља. Прорачун је спроведен над дводимензионалним моделом и то само током периода изградње, што може негативно да утиче на тачност прорачуна и онемогући увид у целовиту слику термичког и напонског стања у конструкцији.

Jaafar и група аутора [32] су 2007. у оквирима свог истраживања разматрали дозвољени температурни градијент у конструкцији за који је наведено да зависи од растојања између дилатационих разделница, коефицијента термичког ширења, затезне чврстоће бетона и степена ограничености конструкције. Резултати су показали да се мањи температурни градијенти јављају приликом почетка бетонирања на нижим амбијенталним температурама. С обзиром да је у питању даљи развој претходно наведеног истраживања [31], примедбе изнете у претходном пасусу односе се и на ово истраживање.

Noorzaei и група аутора [33] спровели су, током 2009. године, тродимензионалну термичко-напонску анализу током грађења конструкције уз коришћење линеарно еластичног, као и еластопластичног модела понашања материјала (који даје реалистичнији приказ стања напона у конструкцији). Показано је да се пластификоване зоне у еластопластичном прорачуну добро поклапају са зонама у којима је, у линеарно еластичном прорачуну, прекорачен индекс појаве прслина. Температуре добијене прорачуном показале су добро слагање са температурама измереним уз помоћ термопарова у телу бране. У раду није анализиран утицај пуњења акумулације на конструкцију.

Zhang и група аутора [34] су 2011. спровели термичко-напонску анализу конструкције током зимског периода године и то са и без површинске термичке изолације различите дебљине. У раду је анализиран само период изградње конструкције.

Kurian, Kavitha и *Kuriakose* [35] су 2013. извршили термичку анализу уз варирање термичких параметара материјала (коефицијент проводљивости, специфична топлота), висине изливања слојева бетона као и почетне температуре бетонске мешавине. У раду није анализиран период експлоатације конструкције.

Кузмановић, Савић и *Младеновић* су у оквиру истраживања током 2013. и 2015. године [36, 37] представили просторни нумерички модел за фазни прорачун температурног поља и термичких напона затезања током периода грађења и експлоатације бране, као и методологију за избор оптималне дужине ламеле. На бочним странама тродимензионалног модела ламеле је, због близине суседних ламела, усвојено да нема размене топлоте са околином. Верификација модела извршена је на основу резултата мерења температура бетона у телу бране.

Khanzaei и група аутора [38] су 2015. приказали промене термичких напона у току грађења и експлоатације уз претпоставку да равно стање напона влада у ламели (стање које би одговарало незаинјектираним дилатационим разделницама), а равно стање деформација у припадајућој стенској маси (стање које би одговарало спреченим померањима на бочним границама стенске масе). Мана истраживања је спровођење прорачуна над релативно једноставним дводимензионалним моделом бране.

Ponce-Farfán, Santillán и *Toledo* су 2020. у оквиру истраживања [39] анализирали утицај изабраног модела хидратације (адијабатски и неадијабатски модели), услова средине, и датума почетка грађења на температурно поље конструкције. Приликом прорачуна, у обзир су узети и Сунчево зрачење као и испаравање воде. Приказани су резултати који показују да модел хидратације има значајан утицај на температурно поље. Приликом употребе неадијабатског модела добијају се више вредности температура у бетону у односу на адијабатски модел. Разлог наведеног је тај што се код адијабатског модела највише топлоте генерише непосредно након изливања слоја бетона, док се код неадијабатског модела највише топлоте генерише нешто касније. Наведено истраживање не узима у обзир период експлоатације конструкције.

2.2 Лучне бетонске бране

Како су код лучних бетонских брана основни принципи моделирања термичко-напонског понашања у значајним деловима слични као код гравитационих брана, у наставку текста приказана су и најважнија истраживања која се односе на овај тип конструкција. На тај начин, стиче се целокупна слика развоја анализе термичко-напонског понашања у области бетонских брана.

2.2.1 Бране од класичног хидротехничког бетона

James и *Dollar* су 2003. у оквиру истраживања [40] представили резултате термичко-напонске анализе лучне бране узимајући у обзир и понашање дилатационих разделница током периода њиховог инјектирања. Приликом истраживања у обзир су узети: нелинеарни модел понашања материјала, рано старење, временске деформације, као и процес принудног хлађења бетона.

Sheibany и *Ghaemian* су 2006. у оквиру истраживања [41] извршили термичко-напонску анализу за период експлоатације објекта. Резултати прорачуна температурног поља су,

због ефекта термичке инерције, показали кашњење у термичком одговору конструкције за 73 дана. Резултати напона затезања добијени су линеарно еластичном анализом и то разматрајући дејства чисто термичких утицаја, као и термичких утицаја у комбинацији са сопственом тежином и хидростатичким притиском. Уочено је да нема значајније разлике у величини ових напона за оба разматрана случаја. Анализа је извршена под претпоставком да се напони затезања редукују и до 35% услед процеса течења у бетону. У истраживању није разматран утицај припадајуће стенске масе на конструкцију. Такође, није разматрана ни топлота хидратације (због мале дебљине лучних бетонских брана у поређењу са гравитационим, претпостављено је да је процес хидратације завршен у првих неколико година након изградње конструкције).

Тричковић [42] је 2008. спровео термички прорачун током периода грађења и експлоатације уз примену методе коначних разлика, али над дводимензионалним моделом бране. Приказани су резултати температурног поља за случај са и без принудног хлађења конструкције (уз помоћ система убетонираних цеви).

Mirzabozorg и група аутора [43] су 2014. спровели детаљну анализу утицаја Сунчевог зрачења на температурно поље током периода експлоатације конструкције. У обзир су узети просторни положај бране, облачност и топографија терена.

Mirzabozorg и група аутора [44] су, такође током 2014. године, предложили процедуру за калибрацију модела у статичким и динамичким условима на основу геодетских мерења, података прикупљених мерењем релативног померања конструкције помоћу вискова, као и података добијених мерењем температура уз помоћ термометара у конструкцији. Аутори су извршили и анализу осетљивости у односу на величину и број коначних елемената, како по дебљини тако и по висини бране. Приликом прорачуна разматране су и дилатационе разделнице између конзола лучне бране. У истраживању није разматран утицај припадајуће стенске масе на термичко понашање конструкције.

Lamea и *Mirzabozorg* су 2015. у оквиру истраживања [45] спровели термичко - напонску анализу у оквиру које су, такође, извршили моделирање дилатационих разделница између конзола бране. У обзир су узети и ефекти Сунчевог зрачења. Моделиране дилатационе разделнице прихватају притисак и смицање, али не прихватају затезање. Приказани су резултати који показују да моделиране разделнице доводе до смањења вредности максималног напона затезања у конструкцији. Истраживање не узима у обзир период грађења конструкције.

Castilho и група аутора [46] су 2018. спровели анализу термичког понашања током изградње лучне бране са циљем моделирања и проучавања процеса хидратације цемента. Експоненцијална функција хидратације калибрисана је узимајући у обзир резултате мерења. Истраживање не узима у обзир период експлоатације конструкције.

Malm, Hellgren и *Enzell* [47] су 2020. спровели анализе које предвиђају појаву прслина услед сезонских промена температуре. У ту сврху коришћени су нелинеарни и линеарно еластични материјални модели. Посебна пажња посвећена је начину моделирања контакта између тела бране и стенске масе. Резултати прорачуна указују на опасност од појаве прслина у зони темељне спојнице са узводне и, нарочито, низводне стране конструкције. Истраживање не узима у обзир период грађења конструкције.

Leitão и *Oliveira* су 2023. у оквиру истраживања [48] спровели термичку анализу над моделом вишелучне бетонске бране са посебним акцентом на прецизном моделирању Сунчевог зрачења. Приликом прорачуна у обзир су узети и услови спољашње средине, као и температура воде у акумулацији. Сprovedено је поређење мерених и

прорачунских вредности температура у бетону (са и без утицаја сенке), при чему је добијено добро поклапање резултата.

2.2.2 Бране од ваљаног (RCC) бетона

Abdulrazeg и група аутора [49] су 2014. представили нумеричку процедуру за симулацију процеса изградње уз примену вискоеластичног материјалног модела понашања материјала. Приликом прорачуна у обзир су узети хидратација цемента, временске деформације као и процес раног старења бетона. За процену појаве прслина, као и процену степена безбедности конструкције, уведена је нова скаларна величина – тзв. *индекс појаве прслина*. Истраживање не узима у обзир период експлоатације конструкције.

Zhang и група аутора [50] су 2022. извршили симулацију термичког напрезања бране уз анализу понашања индукованих разделница током грађења и експлоатације. Приказани су резултати температурног поља за три разматране ситуације које се разликују према типу принудног хлађења током и након изградње, као и резултати термичких напона затезања.

2.3 Друга релевантна истраживања

У наставку текста приказана су и остала истраживања из области термичко-напонске анализе бетонских брана у виду прегледних радова као и радова који разматрају комбиновану употребу класичног хидротехничког и ваљаног бетона, као и употребу бетона са додатком млевеног каменог агрегата.

Aniskin и *Chuk* су 2018. у оквиру истраживања [51] спровели анализу термичких напона у зони спојнице између бетонске конструкције и стенске масе. Приликом прорачуна разматрани су следећи фактори: утрошак цемента, почетна температура бетонске мешавине, максимална ослобођена топлота приликом хидратације, висина слоја који се бетонира и брзина бетонирања. Приказани су резултати у виду номограма који омогућавају брзу процену максималних температура које се јављају у телу гравитационих брана које се граде у слојевима (ваљани бетон) или које се граде методом блокова (класичан хидротехнички бетон, за ширину блокова од 10, 15 и 20 m). Код конструкција које се граде у слојевима, приказано је да највећи утицај има почетна температура бетонске мешавине. Код конструкције која се гради методом блокова различите ширине, највећи утицај имају утрошак цемента и максимална ослобођена топлота хидратације. Наведено је и да најмањи утицај од претходно поменутих фактора има висина бетонирања елемената конструкције. Истраживање не узима у обзир период експлоатације конструкције.

Li и група аутора [52] су 2020. спровели термичко-напонску анализа једне гравитационе бетонске бране од класичног хидротехничког бетона у комбинацији са ваљаним бетоном у току изградње и експлоатације. Извршена је верификација на основу мерених вредности температура на конструкцији. Анализиране су деформације у зони контакта различитих врста бетона, као и нелинеарно понашање наведених контактних спојница. Приликом прорачуна у обзир су узети експериментални резултати параметара материјала приликом грађења, као и реална динамика грађења конструкције, распоред изливања и принудно хлађење конструкције. Међутим, у обзир нису узете временске деформације бетона, као ни бочни утицај суседних ламела на прорачун термичког и напонског стања.

Salazar и група аутора [53] су 2020. приказали критички осврт на достигнућа на пољу термичко-напонског моделирања лучних бетонских брана у претходних 10 година. У раду су приказани и резултати студије случаја која показује важност исправног одређивања температуре при којој се инјектирају дилатационе разделнице лучне бране (референтна температура) као и њен утицај на одређивање напонског стања конструкције. Приликом прорачуна утицај Сунчевог зрачења је разматран повећањем амбијенталне температуре за 3,0 °C, како би се апроксимирало загревање површине бетона изазвано овим зрачењем.

Habib и група аутора [54] су 2021. приказали опште закључке истраживања која се баве термичко-напонском анализом брана које се граде употребом ваљаног бетона. Наведено је да највећи утицај на температурно поље има топлота хидратације као и да су нивои напрезања под великим утицајем формираног температурног поља, затим датума почетка бетонирања, динамике изградње, почетне температуре бетонске мешавине, температуре ваздуха и Сунчевог зрачења. Даље је наведено и да правилно планирање изливања бетона може да оптимизује зоне са високим температурама у бетону а последично и да утиче на смањење напона затезања.

Zhang и група аутора [55] су 2021. приказали анализу утицаја екстремно ниских температура на понашање гравитационих брана од самозбијајућег (SCC) бетона са додатком млевеног каменог агрегата (RFG). Приликом истраживања у обзир није узета временска деформација скупљања бетона као ни утицај дужине ламеле на термичке напоне затезања. Приказани су резултати који показују да употреба наведене врсте бетона даје ниже температуре и термичке напоне од употребе класичног хидротехничког бетона.

2.4 Критички осврт на досадашња истраживања

Анализирајући досадашња истраживања на тему термичко-напонске анализе бетонских брана, уочено је да не постоји довољан обим истраживања која су се бавила утврђивањем оптималне дужине ламеле гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, као ни истраживања која су се бавила правилним моделирањем дилатационих разделница и њиховим утицајем на напоне затезања код поменуте врсте објеката.

Проблем одређивања дужине ламеле углавном је разматран код гравитационих брана од ваљаног бетона. *Embaby, Abdelrahman* и *Sayed-Ahmed* [20] су навели да је генерални циљ једне термичко-напонске анализе код гравитационих бетонских брана оптимизација размака између дилатационих разделница, као и дефинисање максималне дозвољене почетне температуре свежје бетонске мешавине. Такође, наведено је и да се са порастом почетне температуре свежје бетонске мешавине смањује растојање дилатационих разделница (дужина ламеле) и да ова два фактора не би требало посматрати одвојено. *Malkawi, Mutasher* и *Qiu* [30] су у оквиру истраживања извршили термичко-напонску анализу гравитационе бране од ваљаног бетона за различите дужине ламеле (15, 30 и 45 m), док су *Кузмановић, Савић* и *Младеновић* у оквиру истраживања [36, 37] приказали методологију за избор оптималне дужине ламеле код истог типа конструкција. Развијени модели аутора [36, 37] применљиви су код објеката код којих се грађење врши у слојевима дебљине до 1,0 m, за разлику од модела који су разматрани у оквиру овог истраживања, на којима је симулирано грађење над истом геометријом објекта али методом блокова (термичко-напонска анализа у случају промене технологије грађења).

Проблем моделирања дилатационих разделница доминантно је разматран у оквиру истраживања у области лучних бетонских брана. *Leger, Venturelli* и *Bhattacharjee* [16] су у истраживању навели да се контурни услови за напонско-деформацијску анализу гравитационих бетонских брана моделирају на основу крутости припадајуће стенске масе као и на основу интеракције прорачунске ламеле са суседним ламелама. Међутим, моделирање ове појаве није спроведено у оквиру наведеног истраживања. *Malm* је у оквиру истраживања [3] навео да се дилатационе разделнице, због њихове природе да не преносе силе, могу искористити за усвајање димензија једног нумеричког модела. *James & Dollar* [40] као и *Mirzabozorg* и група аутора [44], у оквиру одвојених истраживања, анализирају понашање лучних бетонских брана узимајући у обзир и дилатационе разделнице између конзола. *Lamea and Mirzabozorg* [45] моделирају дилатационе разделнице лучне бране тако да прихватају притисак и смицање али да не прихватају затезање. Приказани резултати показују да разделнице значајно утичу на расподелу напона унутар тела лучних брана у смислу умањења вредности максималног напона затезања.

На основу претходно наведеног, истраживање у оквиру ове дисертације је значајно јер ће се стећи детаљнији увид у термичко-напонско понашање гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, а нарочито: показати значај избора оптималне дужине ламеле и моделирања реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице која, према својој природи, није у стању да прихвати силе затезања између суседних ламела конструкције.

Анализирајући добијене резултате температурног поља за разматране дужине ламела уочено је да се највеће вредности температура у бетону јављају на местима изнад централне зоне, ближе низводном лицу и оне се смањују са редукцијом дужине ламеле и до 3,41 °C. Анализирајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни посматране ламела на одговарајућој амбијенталној температури у току периода изградње, уочено је да термички напони затезања расту и до 5,0 МПа док током експлоатације они опадају и до 2,70 МПа са редукцијом дужине ламеле. Смањењем дужине ламеле на 10,0 m могу се потпуно елиминисати зоне у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање. Избор оптималне дужине ламеле може утицати на редукцију времена и трошкова за извођење конструкције а самим тим, посредно, и на мањи утицај на околну средину у којој се налази.

Анализирајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури у току периода изградње, уочено је да напони затезања опадају са редукцијом граничне вредности померања и до 6,60 МПа, док током експлоатације опадају и до 4,70 МПа при промени контурног услова за 5,0 mm. Зоне у којима је прокорачена чврстоћа бетона се драстично смањују са редукцијом вредности граничних померања, тако да за вредност од 1,0 mm током грађења, односно 3,0 mm током експлоатације, готово да и не постоје, што указује да садејство са суседним ламелама даје значајно повољније резултате у смислу напона затезања. Вредност граничног померања може бити предмет анализа приликом пројектовања, тако да не дође до прекорачења чврстоће бетона на затезање током грађења и експлоатације. Другим речима, моделирање реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице може допринети бољем предвиђању појава и развоја прслина услед напона затезања што директно утиче на бољу процену стања и трајности конструкције.

3 ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА

Температурно поље гравитационе бетонске бране која се гради методом блокова, а самим тим и напонско стање које се јавља као последица термичких утицаја, зависе од параметара термичке анализе као што су:

- топлотна физичка својства бетона,
- ослобађање топлоте услед процеса хидратације,
- размена топлоте са површина бетонских блокова:
 - промена температуре спољашњег ваздуха,
 - промена температуре воде,
 - утицај Сунчевог зрачења,
- температура свеже бетонске мешавине,
- температура припадајуће стенске масе,

као и од:

- дужине ламеле,
- димензија блокова у којима се врши бетонирање,
- редоследа и динамике бетонирања,

али и:

- неге бетона у току и након изливања.

Развој савремених метода и алата омогућио је прорачун температурног поља и напонско-деформацијског стања тако да се, за усвојене вредности параметара материјала, могу одредити оптимална дужина ламеле, димензије блокова, али и редослед и динамика бетонирања и то итеративном термичко-напонском анализом. Осим наведеног, као резултат термичко-напонске анализе може се дефинисати и почетна температура бетонске мешавине, као и евентуалне мере принудног хлађења бетона у првим данима његовог изливања.

3.1 Теоријске основе термичког прорачуна

3.1.1 Основне једначине преноса топлоте

Транспорт топлоте се у природи обавља преко три основна процеса:

- провођењем (кондукцијом),
- прелазом (конвекцијом) и
- зрачењем (радијацијом).

Провођење (кондукција) је процес преноса топлоте код кога нема струјања или усмереног кретања молекула већ се енергија преноси искључиво хаотичним сударима атома [56].

Прелаз топлоте (конвекција) се дешава ако је чврсто тело у контакту са срединама другог агрегатног стања. На контакту са чврстим телом јавља се слободно или принудно струјање флуида па се размена топлоте обавља са флуида у кретању на чврсто тело и обрнуто [57].

Зрачење (радијација) се јавља код тела свих агрегатних стања на свим температурама и потиче од електромагнетног зрачења самих атома и молекула услед њиховог термалног кретања и сударања [58].

Промена температуре хомогеног изотропног тела током времена описује се Фуријеовом (*Fourier*) једначином провођења топлоте [59]:

$$\rho c \frac{dT}{d\tau} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

где су:

ρ - густина материјала [kg/m^3],

c - специфична топлота бетона [$\text{J}/(\text{kg K})$],

T - температура [$^{\circ}\text{C}$],

k - коефицијент провођења топлоте [$\text{W}/(\text{m K})$] и

Q - запреминска густина топлотног флуksа извора топлоте [W/m^3].

У практичном решавању проблема тражи се оно решење $T(x, y, z, \tau)$ једначине (1), које задовољава одговарајуће почетне и контурне услове.

Почетни услови подразумевају да је расподела температура у почетном тренутку ($\tau = 0$) позната и дата температурним пољем $T(x, y, z, 0)$, док контурни услови дефинишу размењен топлотни флуks између изливених блокова и околине:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = q_c + q_r \quad (2)$$

где су:

$\frac{\partial T}{\partial n}$ - градијенти температурног поља на површинама блокова [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$],

q_c - конвективни топлотни флуks [W/m^2] и

q_r - радијативни топлотни флуks [W/m^2].

Размењена топлота између блокова и околине путем конвекције, тј. између површина блокова и ваздуха дата је Њутновим (*Newton*) законом хлађења [57]:

$$q_c = h_c(T - T_a) \quad (3)$$

где су:

T - температура површине блока [$^{\circ}\text{C}$],

T_a - температура околног ваздуха [$^{\circ}\text{C}$] и

h_c - конвективни коефицијент [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$].

Размењена топлота зрачењем између површина блокова и околине је описана линеаризованим Штефан-Болцмановим (*Stefan-Boltzmann*) законом зрачења:

$$q_r = h_r(T - T_a) \quad (4)$$

где је h_r линеаризовани коефицијент зрачења [$\text{W/m}^2 \text{ K}$], који се дефинише преко израза датог у [41]:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T^2 + T_a^2)(T + T_a) \quad (5)$$

где су:

ε - емисивност површине блока и

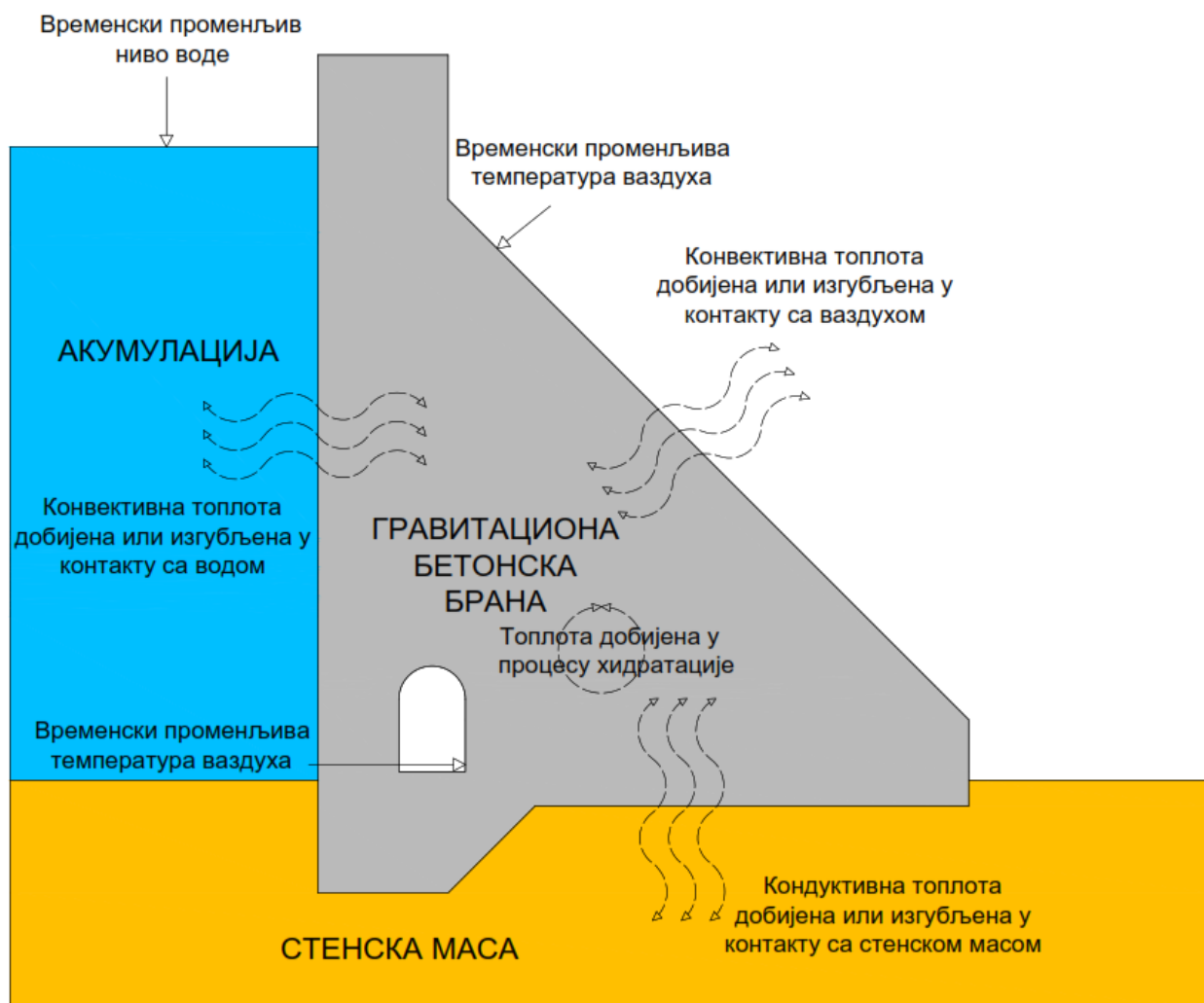
σ - Штефан-Болцманова константа ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$).

Контурни услов (2), имајући у виду изразе (3) и (4), може се написати у облику:

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T - T_a) \quad (6)$$

где је h комбиновани ($h_c + h_r$) конвективни коефицијент [$\text{W/m}^2 \text{ K}$].

На слици 1 приказани су процеси преноса топлоте код гравитационих бетонских брана који су разматрани у оквиру овог истраживања.



Слика 1. Процеси преноса топлоте који су разматрани у оквиру овог истраживања

3.1.2 Топлотна физичка својства хидротехничког бетона

Топлотна физичка својства хидротехничког бетона зависе од многих параметара, као на пример [60]:

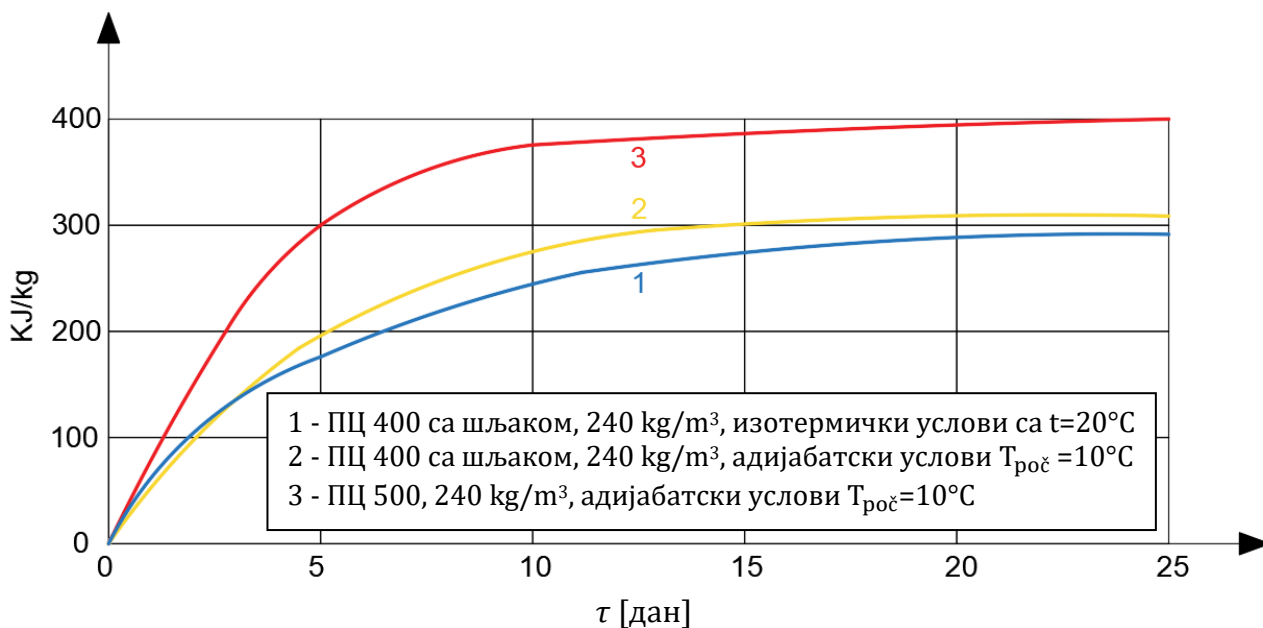
- врсте цемента,
- утрошка цемента,
- врсте агрегата,
- утрошка агрегата и,
- водоцементног фактора.

Хидротехнички бетон има следећа топлотна физичка својства:

- c - специфични топлотни капацитет; бројно је једнак количини топлоте неопходне за повећање температуре јединице масе тела за један степен [$J/(kg\ ^\circ C)$],
- $c \cdot \rho$ - специфични запремински топлотни капацитет [$J/(m^3\ ^\circ C)$] где је ρ густина [kg/m^3],
- k - коефицијент провођења топлоте; бројно је једнак густини топлотног тока услед провођења топлоте при једном $^\circ C$ [$W/(m\ ^\circ C)$],
- α - коефицијент провођења температуре $\alpha = k/(c \cdot \rho)$, бројно је једнак односу коефицијента провођења топлоте k и специфичног запреминог топлотног капацитета $c \cdot \rho$ [m^2/s]; креће се у интервалу између $0,74 \cdot 10^{-5}$ и $1,30 \cdot 10^{-5}$ за бетоне са портланд цементом [3] односно $1,0 \cdot 10^{-5}$ према [5].

3.1.3 Ослобађање топлоте услед процеса хидратације

Приликом очвршћавања бетона, у процесу хидратације, ослобађа се топлота која зависи од хемијског и минералогског састава цемента. Експерименти су показали да се у току првих 7 до 10 дана очвршћавања бетона ослобађа и до 80,0% топлоте настале хидратацијом цемента и да се у даљем процесу очвршћавања ослобађање топлоте успорава [60, 61].



Слика 2. Криве ослобађања топлоте из цемента при очвршћавању бетона [60]

Крива ослобађања хидратационе топлоте се добро апроксимира следећим изразом [60]:

$$Q_t(\tau) = Q_{max}(1 - e^{-m \cdot \tau}) \quad (7)$$

где су:

$Q_t(\tau)$ - ослобађање хидратационе топлоте из бетона у тренутку τ у [J],

Q_{max} - највећа количина хидратационе топлоте која се може издвојити из бетона датог састава при потпуној хидратацији цемента у [J],

m - емпиријски коефицијент који зависи од врсте цемента; за портланд цемент има вредност од 0,010 до 0,015 [1/h] и

τ - време [h].

Температура услед топлоте настале хидратацијом цемента утиче на појаву термичких напона затезања у брани у периоду грађења, при чему пораст температуре може износити и до 50,0°C и може се одредити помоћу израза [60]:

$$T_h = \frac{q_t \cdot K}{c \cdot \rho} \quad (8)$$

где су:

T_h - температура услед топлоте настале хидратацијом цемента [°C],

q_t - количина ослобођене топлоте [J/kg],

K - маса цемента у јединици запремине [kg/m³],

c - специфичан топлотни капацитет бетона [J/(kg K)] и

ρ - густина бетона [kg/m³].

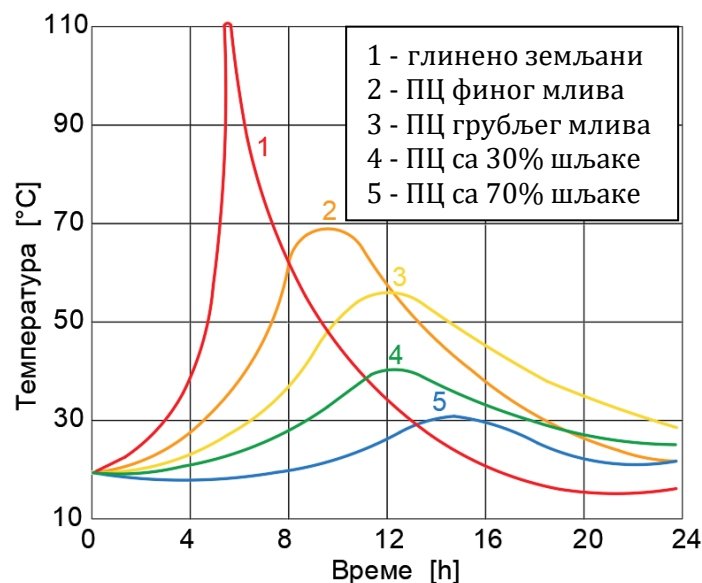
Ослобађање топлоте настале током хидратације цемента траје дуго, али се практично завршава после 30 до 40 дана [60]. На слици 2 приказане су криве ослобађања топлоте при очвршћавању бетона, и то: две са портланд цементом и шљаком и једна са портланд цементом.

За бетон који очвршћава у адијабатским условима (када нема размене топлоте са околином), а при различитој почетној температури пробних узорка, за портланд цемент марке 400 и утросак цемента 250 kg/m³, у следећој табели дају се вредности измерених температура у бетону [60].

Табела 1. Температуре у бетону узорка [°C] при различитој почетној температури узорка [60]

Време [дан]	Почетна температура узорка [°C]	
	7,0	21,50
	Температуре у бетону узорка [°C]	
0,5	/	39,30
1,0	28,20	47,0
2,0	37,30	54,20
3,0	41,80	57,40
4,0	44,50	60,10
5,0	46,30	61,90
7,0	47,90	62,60
14,0	52,20	67,40

У зависности од врсте и утрошка цемента у бетонској мешавини која је уграђена у масивну конструкцију, температура бетона у процесу његовог очвршћавања може се значајно повећати. Криве температуре хидратације различитих врста цемента приказане су на слици 3 [60].



Слика 3. Криве температуре хидратације различитих врста цемента у току очвршћавања хидротехничког бетона, према [60, 62]

Други модел, који су представили истраживачи [61] и који је примењен у [63], приликом прорачуна топлоте хидратације узима у обзир различите односе материјала у бетонској мешавини, типове цемента и друге материјале који се користе као везивна средства (као што су електрофилтерски пепео и шљака). Модел дефинише следеће величине: укупну крајњу топлоту хидратације, степен и крајњи степен хидратације, температурну осетљивост и развој температуре услед хидратације.

Укупна топлота хидратације цемента, при потпуној хидратацији, према [61] може се квантификовати следећим изразом:

$$H_{cem} = 500 \cdot p(C_3S) + 260 \cdot p(C_2S) + 866 \cdot p(C_3A) + 420 \cdot p(C_4AF) + 1186 \cdot p(FreeCaO) + 624 \cdot p(SO_3) + 850 \cdot p(MgO) \quad (9)$$

где су:

H_{cem} - укупна топлота хидратације цемента [J/g] и

$p(i)$ - садржај i -тог састојка у односу на укупан садржај цемента (видети Табелу 2).

Табела 2. Удео састојака за различите типове цемента

Тип цемента	Хемијски састав						
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	FreeCaO	SO ₃	MgO
I	0,565	0,14	0,10	0,08	0,029	0,035	0,013
II	0,51	0,24	0,053	0,166	0,004	0,025	0,009
III	0,60	0,11	0,12	0,081	0,013	0,045	0,01
IV	није у широкој употреби						
V	0,43	0,36	0,04	0,12	0,004	0,015	0,016

Укупна крајња топлота хидратације може се изразити као [61]:

$$H_T = H_u \cdot C_c \quad (10)$$

где су:

H_T - укупна крајња топлота хидратације [J/m³],

C_c - садржај везивних материјала [g/m³],

H_u - укупна топлота хидратације везивних материјала при потпуној хидратацији [J/g] која се дефинише као:

$$H_u = H_{cem} \cdot p_{cem} + 461 \cdot p_{slag} + 1800 \cdot CaO_{FA} \cdot p_{FA} \quad (11)$$

где су:

p_{cem} - садржај цемента у односу на укупан садржај везивних материјала,

p_{slag} - садржај шљаке у односу на укупан садржај везивних материјала,

CaO_{FA} - удео CaO у електрофилтерском пепелу,

p_{FA} - садржај електрофилтерског пепела у односу на укупан садржај везивних материјала.

Топлота хидратације електрофилтерског пепела је дата следећим изразом [61]:

$$h_{FA} = 1800 \cdot CaO_{FA} \quad (12)$$

при чеми је фактор 1800,0 одређен калибрацијом модела у полуадијабатском тесту.

Степен хидратације је мера степена реакције између везивних материјала и воде и дефинише се као [61]:

$$\alpha(t) = \frac{H(t)}{H_T} \quad (13)$$

где су:

$\alpha(t)$ - степен хидратације у тренутку t ,

$H(t)$ - кумулативна топлота хидратације ослобођена у тренутку t [J/m³],

H_T - укупна крајња топлота хидратације [J/m³].

Експериментално утврђени подаци о степену развоја хидратације, могу се представити одговарајућим математичким моделом. Показало се да следећа експоненцијална зависност добро описује облик развоја процеса хидратације [61], што је потврђено и тестирањем у оквиру истог истраживања:

$$\alpha(t_e) = \alpha_u \cdot \exp\left(-\left[\frac{\tau}{t_e}\right]^\beta\right) \quad (14)$$

где су:

$\alpha(t_e)$ - степен хидратације за еквивалентну старост t_e ,

τ - хидратациони временски параметар [h],

β - хидратациони параметар облика,

α_u - крајњи степен хидратације.

Функција еквивалентне старости претвара хронолошку старост очвршћавања бетона на температури T_c у еквивалентну старост очвршћавања бетона (t_e) на специфичној референтној температури T_r .

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_c}\right)\right) \cdot \Delta t \quad (15)$$

где су:

$t_e(T_r)$ - еквивалентна старост за референтну температуру очвршћавања,

Δt - хронолошки временски интервал [h],

T_c - просечна температура бетона у току временског интервала Δt [°C],

T_r - референтна температура [°C],

E - енергија активације [J/mol],

R - универзална гасна константа (8,3144 J/mol/K).

За нестационарну анализу горњи израз се може дефинисати као [61]:

$$t_e(t_n) = t_e(t_0) + \Delta t_e \quad (16)$$

где су t_0 и t_n време на почетку и на крају временског корака, респективно и

$$\Delta t_e = \exp\left(\frac{E}{R}\left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_c}\right)\right) \cdot \Delta t \quad (17)$$

Параметри регресионог модела приказани у једначини (14) имају следећу формулацију [61]:

$$\tau = 66,78 \cdot p(C_3A)^{-0,154} \cdot p(C_3S)^{-0,401} \cdot Blaine^{-0,804} \cdot p(SO_3)^{-0,758} \cdot \exp(2,187 \cdot p_{slag} \quad (18)$$

$$+ 9,5 \cdot p_{FA} \cdot p_{FA}(CaO))$$

$$\beta = 181,40 \cdot p(C_3A)^{0,146} \cdot p(C_3S)^{0,227} \cdot Blaine^{-0,535} \cdot p(SO_3)^{0,558} \cdot \exp(-0,647 \cdot p_{slag}) \quad (19)$$

$$\alpha_u = \frac{1,031 \cdot w/c}{0,194 + w/c} + 0,50 \cdot p_{FA} + 0,30 \cdot p_{slag} \leq 1,0 \quad (20)$$

где су:

$p(C_3A)$ - садржај C_3A у односу на укупан садржај цемента,

$p(C_3S)$ - садржај C_3S у односу на укупан садржај цемента,

$p(SO_3)$ - садржај SO_3 у односу на укупан садржај цемента,

$p_{FA}(CaO)$ - садржај CaO у односу на садржај електрофилтерског пепела (за класу С - 24,30%, за класу F - 10,80%) и

w/c - водоцементни фактор.

У методи еквивалентне старости, енергија активације дефинише температурну осетљивост бетонске мешавине. Користећи приступ еквивалентне старости, степен хидратације за било коју температуру може бити израчунат на основу степена хидратације за референтну температуру. Аутори су у [61] развили модел енергије активације који је приказан у једначини која следи, а који је независан од температуре очвршћавања [61]:

$$E = 22100,0 \cdot f_E \cdot p(C_3A)^{0,3} \cdot p(C_4AF)^{0,25} \cdot Blaine^{0,35} \quad (21)$$

где су:

$p(C_4AF)$ - садржај C_4AF у односу на укупан садржај цемента,

$Blaine$ - параметар финоће млива цемента (m^2/kg), видети табелу 3,

f_E - фактор модификације енергије активације [61] који се дефинише као:

$$f_E = 1,0 - 1,05 \cdot p_{FA} \cdot \left(1,0 - \frac{p_{FA}(C_aO)}{0,40}\right) + 0,40 \cdot p_{slag} \quad (22)$$

Табела 3. Финоћа млива (m^2/kg) за различите типове цемента

Тип цемента	Финоћа млива [m^2/kg]
I	350
II	310
III	480
IV	није у широкој употреби
V	348

Развој температуре у бетонском узорку који очвршћава у адијабатским условима (нема размене топлоте са околином) може се одредити уз помоћ једначине [61]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_H}{\rho \cdot c_p} = \frac{dH}{dt} \left(\frac{1}{\rho \cdot c_p} \right) \quad (23)$$

где су:

T - температура бетона [$^{\circ}C$],

ρ - густина бетона [kg/m^3],

c_p - специфичан топлотни капацитет бетона [$J/kg/^{\circ}C$],

Q_H - степен ослобађања топлоте [W/m^3],

H - топлота хидратације [J/m^3] једнака $H_T \cdot C_c \cdot \alpha$.

Степен ослобађања топлоте Q_H , користећи израз (16), гласи [61]:

$$Q_H(t) = H_u \cdot C_c \cdot \left(\frac{\tau}{t_e}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{\beta}{t_e}\right) \cdot \alpha(t_e) \cdot \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_c} \right) \right] \quad (24)$$

За нестационарну анализу, коришћењем израза (19), добија се:

$$Q_H(t) \cdot \Delta t = H_u \cdot C_c \cdot \left(\frac{\tau}{t_e}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{\beta}{t_e}\right) \cdot \alpha(t_e) \cdot \Delta t_e \quad (25)$$

3.1.4 Размена топлоте са површина конструкције

Размена топлоте између једне бетонске конструкције и спољашње средине настаје услед разлике температура на површинама конструкције и спољашње средине. Разлике температура последица су колебања температуре ваздуха, колебања температуре воде (у акумулацији), Сунчеве радијације као и топлоте настале хидратацијом цемента (видети поглавље 3.1.3) [60].

Промене температуре спољашњег ваздуха

Колебање температуре спољашњег ваздуха може бити дневно, услед наглих временских промена, или годишње. Дневне промене температуре мало утичу на конструкције попут гравитационих бетонских брана због њиховог малог продирања у тело бране. Нагле временске промене су ређа појава и немају строгу периодичност док су годишње промене температуре најрелевантније у прорачунима и добијају се из средњих месечних колебања температуре [60].

Промене температуре воде

У дубоким акумулацијама, температура воде може се, уколико постоје релевантна мерења температура ваздуха и воде по дубини, приказати моделом који је дефинисан у оквиру истраживања [64]. Пример примене овог модела на једној дубокој акумулацији, дат је у оквиру рада [65].

Годишња варијација температурног поља воде у акумулацији $T(y, \tau)$, моделирана према [64], је функција времена τ [mes] и дубине y [m] посматране тачке и гласи:

$$T(y, \tau) = c + (T_S - c)e^{-\alpha y} + A_0 e^{-\beta y} \cos[\omega(\tau - \tau_0 - \varepsilon(y))] \quad (26)$$

где су:

ω - кружна фреквенција за период од 12 месеци која се рачуна по формули:

$$\omega = \frac{2\pi}{12 \text{ mes}} = \frac{\pi}{6 \text{ mes}} \quad (27)$$

τ_0 - време максималне средње температуре ваздуха у околини бране [mes],

$\varepsilon(y)$ - временско кашњење температуре воде у функцији дубине које се рачуна према следећем изразу:

$$\varepsilon(y) = 2,15 - 1,3 \cdot e^{-0,085 \cdot y} \text{ [mes]} \quad (28)$$

A_0 - максимална вредност амплитуде варијације температуре воде [°C],

α, β - фактори експоненцијалног опадања температуре са порастом дубине $[\frac{1}{m}]$,

c - средња температура воде дубоко испод површине [°C],

T_S - средња температура воде на површини акумулације [°C].

Непознате величине које се морају одредити из мерених температура воде и ваздуха у дугогодишњем период су: τ_0 , A_0 , α , β , c и $T_S - c$. Ове вредности се одређују тако да одступање модела [64] од мерених вредности температуре воде буде што мање [65].

Утицај Сунчевог зрачења

Количина апсорбованог Сунчевог зрачења дата је изразом [41]:

$$q_a = a \cdot \bar{H} \quad (29)$$

где су:

a - апсорптивност површине тела,

$\bar{H}$ - укупна количина соларне енергије која стиже до површине.

Зрачење које допире до неке произвољне косе површине састоји се од три компоненте: зрачења зрака, расутог зрачења неба и околног рефлектованог зрачења. Количина овог зрачења прати цикличне сезонске варијације и она је функција географске ширине локације, оријентације и нагиба изложених површина, рефлексије површинског

покривача и времена. Проценат укупног Сунчевог зрачења које се рефлектује од тла зависи од површинског покривача. Аутори у истраживању [66] представљају вредности укупне рефлексивности тла. Рефлексивност воде је функција надморске висине и ведрих услова неба [18, 67].

За разлику од гравитационих бетонских брана, код лучних бетонских брана различити делови закривљене конструкције имају различите вредности нагиба и оријентације, тако да укупна количина Сунчевог зрачења има просторну варијацију на изложеним површинама [41].

Утицај Сунчевог зрачења на температурно поље током изградње бетонске бране може се узети у обзир и повећањем амбијенталне температуре (обично у интервалу од 1-3 °C) како би се урачунало загревање површине бетона Сунчевим зрачењем [16, 31, 53, 68] или повећањем комбинованог конвективног коефицијента бетонске површине.

3.1.5 Почетна температура свеже бетонске мешавине

Један од веома важних чинилаца који утиче на температурно поље у телу бране је почетна температура свеже бетонске мешавине (у тренутку утрађивања), тако да је снижавање ове температуре један од најефикаснијих начина ограничења пораста температуре код масивних бетонских брана [1].

У том циљу, користе се споровезујући цементи, смањује се количина цемента, додају се други везивни материјали (електрофилтерски пепео, згура, шљака и сл.), примењују се ретардери којима се успорава процес везивања цемента, или се користи лед приликом справљања бетонске мешавине.

Са становишта технологије бетона и грађења, примењују се следећи кораци: лагеревање воде у цистернама које су укопане у земљу, извођење термичке заштите силоса за цемент, заштита агрегата од директног деловања Сунца, фазно бетонирање, бетонирање ноћу, хлађење и неговање бетона након уграђивања, постављање расхладних цеви за принудно хлађење бетона, уградња префабрикованих бетонских елемената код којих је процес хидратације завршен [69].

3.1.6 Температура припадајуће стенске масе

Температура припадајуће стенске масе практично не зависи од сезонских промена температуре ваздуха и, изузев површинског слоја, може се усвојити да има константну температуру [1].

3.2 Теоријске основе напонско-деформацијског прорачуна

3.2.1 Термички напони затезања код бетонских брана

Услед неједнаког ширења и скупљања појединих делова бетонске масе, у брани се јављају напони затезања који изазивају настанак прслина. Прслине се временом шире, слабе отпорност бране на смицање, и омогућавају провирање воде и повећање узгона [7].

Термички напон затезања представља нормални напон чијим прекорачењем долази до појаве прслина у бетону. Овај напон, у тренутку t , може се израчунати према следећем изразу:

$$\sigma_z(x, y, z, \tau) = E \cdot \varepsilon_{th} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = E \cdot \alpha \cdot (T - T_{ref}) \quad (30)$$

где су:

σ_z - термички напон затезања у тренутку τ [МПа],

E - Јангов модул еластичности бетона [МПа],

ε_{th} - термичка дилатација [-],

α - коефицијент термичког ширења бетона [-],

ΔT - промена температуре [°C],

T - температура посматраног чвора [°C] и

T_{ref} - референтна температура за коју се претпоставља да нема напрезања у бетону тј. у односу на коју се рачунају термичке дилатације [°C].

Услов за појаву прслине је да максимални главни напон затезања буде већи од чврстоће бетона на затезање у посматраном тренутку (и на посматраном месту у конструкцији).

Процена појаве прслине дефинише се величином која се назива индекс прслине [49, 70, 71]:

$$I_{cr} = \frac{f_t(\tau)}{\sigma_1(\tau)} \geq 1,0 \quad (31)$$

где је:

$f_t(\tau)$ - чврстоћа бетона на затезање [МПа] и

$\sigma_1(\tau)$ максимални напон затезања у посматраном тренутку и на посматраном месту у конструкцији [МПа].

Природа прслина услед термичких напона затезања условљава њихову поделу на:

- прслине у унутрашњости тела бране које се јављају услед процеса хлађења до средње вишегодишње температуре ваздуха (овај процес хлађења може потрајати и неколико година након завршетка изградње бране) и
- прслине у површинској зони које се јављају као последица температурног градијента у бетону (овај градијент расте са наглим хлађењем површине бетона, нарочито током првих недеља након бетонирања, јер топлота ослобођена хидратацијом цемента производи високу температуру која се не може брзо ослободити док се површина бране хлади брже од унутрашњег дела конструкције) [27, 35].

Услед утицаја температуре, прекорачење чврстоће бетона на затезење по правилу настаје у правцу осе бране. Због тога се прслине углавном јављају у вертикалној равни, по висини попречног пресека бране [1].

Ширина прслина и растојање попречних пресека у којима су се појавиле прслине зависе од степена ограничености. Степен ограничености је мера ограничености промене запремине тела (броне). На ограниченост промене запремине утичу средина у којој је брана темељена, друге конструкције са којима је брана у контакту и претходно изливени блокови бетона. Због тога се дефинише степен ограничености померања конструкције и степен ограничености померања темеља. Степен ограничености померања конструкције зависи од односа крутости претходно изливеног и новоизливеног блока бетона, смичуће чврстоће између блокова, облика попречног

пресека конструкције, ограничености скупљања површине блока (услед различите брзине хлађења спојница у односу на унутрашњост блока) као и близине суседних ламела. На ограниченост померања темеља првенствено утиче величина силе трења између конструкције и средине, однос модула еластичности бетона и модула еластичности стенске масе, као и дужина бране у зони темељне спојнице[1].

Процес појаве прслина код гравитационих бетонских брана може се избећи грађењем конструкције у међусобно независним ламелама [72], фазним бетонирањем блокова (или тањих слојева у случају брана од ваљаног бетона) у дужим временским интервалима, справљањем бетона са мањом количином цемента, употребом споровезујућег цемента, снижавањем температуре коришћењем леда, хладне воде или охлађеног агрегата, одговарајућом негом бетона након уграђивања [73, 74] као и уградњом префабрикованих бетонских елемената код којих је процес хидратације завршен.

Термичко-напонску анализу гравитационих бетонских брана требало би изводити у нестационарном стању због релативно високе топлотне инерције ових масивних бетонских конструкција. Најпре се спроводи термичка анализа а затим се добијено температурно поље уводи као улаз у напонско-деформацијску анализу [8].

3.2.2 Физичко - механички параметри материјала

Модул еластичности

Модул еластичности бетона, као и његов однос према модулу деформације средине у којој се темељи конструкција имају значајан утицај на расподелу напона у конструкцији. Вредности модула еластичности, иако нису директно пропорционалне чврстоћи бетона, прате исти тренд, при чему бетони веће чврстоће имају већу вредности модула еластичности. На модул еластичности значајно утичу пропорције мешавине, цемент, агрегат, додаци и старост бетона.

Средња вредност модула еластичности бетона 28 дана након уградње (E_{cm}), дата је у табели 3.1 SRPS EN 1992-1-1 [5] и варира између 27,0 и 44,0 GPa за бетоне класе од C12/15 до C90/105. Модул еластичности се заснива на следећој релацији [5]:

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (32)$$

где су:

E_{cm} – средњи модул еластичности бетона (секантни) [GPa] и,

f_{cm} – средња вредност чврстоће бетонског цилиндра при притиску [MPa].

Поасонов коефицијент

Поасонов коефицијент (ν) за очврсли бетон креће се у интервалу од 0,10 до 0,20. Истраживања спроведена у [75] показала су да Поасонов коефицијент може да варира и у току процеса очвршћавања.

Запреминска тежина

Према SRPS EN 1991-1-1 [76] запреминска тежина бетона (γ) уобичајене тежине износи 24,0 KN/m³ док за бетоне са уобичајеним процентом челика за армирање и претходно напрезање, као и за млади, неочврсли бетон, износи 25,0 KN/m³. Како је у анализама стабилности бетонских брана сопствена тежина повољно оптерећење, *Ridas* смернице

за сигурност брана [77] препоручују коришћење вредности запреминске тежине у износу $23,0 \text{ KN/m}^3$.

Временске деформације

Скупљање бетона може изазвати појаву прслина и значајно смањити очекивани животни век бетонске конструкције. Скупљање може бити рано и дуготрајно при чему се рано скупљање у великој мери може смањити правилном негом бетона у првим сатима након изливања (уградње) бетона [78]. Скупљање, такође, може бити резултат и губитка влаге (скупљање услед сушења) или унутрашњих реакција у бетону (аутогено скупљање) [3].

Бетонске хидротехничке конструкције углавном имају масивне попречне пресеке при чему су поједини делови пресека изложени дејству воде што доводи до неуједначеног скупљања дуж пресека као и између делова различитих дебљина.

Према моделу [79], укупна временска деформација скупљања се дефинише као:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (33)$$

где су:

ε_{cs0} – номинални коефицијент скупљања,

β_s – коефицијент који описује развој скупљања у времену,

t – старост бетона (дан) и

t_s – старост бетона (дан) на почетку процеса скупљања.

Номинални коефицијент скупљања може се добити из израза:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm})\beta_{RH} \quad (34)$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10 \beta_{sc}(9 - \frac{f_{cm}}{f_{cm0}})] 10^{-6} \quad (35)$$

где су:

f_{cm} – средња вредност чврстоће бетона при старости од 28 дана [МПа],

$f_{cm0} = 10,0 \text{ МПа}$,

β_{sc} – коефицијент који зависи од типа цемента ($\beta_{sc} = 4,0$ за споровезујуће цементе SL, $\beta_{sc} = 5,0$ за нормалне или брзовезујуће цементе N и R и $\beta_{sc} = 8,0$ за брзовезујуће цементе великих чврстоћа RS).

$$\beta_{RH} = -1,55\beta_{sRH} \quad \text{за } 40,0 \% \leq RH < 99,0\% \quad (36)$$

$$\beta_{RH} = +0,25 \quad \text{за } RH \geq 99,0\%$$

где је:

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3 \quad (37)$$

при чему су:

RH – релативна влажност средине (%),

$RH_0 = 100\%$.

Развој скупљања у времену дат је следећом релацијом:

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0,5} \quad (38)$$

где су:

$h = 2A_c/u$ – номинална величина елемента, при чему је A_c површина попречног пресека док је u обим елемента који је у контакту са спољашњом средином.

$t_1 = 1 \text{ dan}$,

$h_0 = 100 \text{ mm}$.

Течење бетона, за разлику од скупљања, има повољан утицај на конструкцију јер смањује напрезања која изазивају запреминске деформације.

3.2.3 Оптерећења

Сопствена тежина

Сопствена тежина једне конструкције се израчунава на основу израза:

$$F = \sum V \cdot \gamma \quad (39)$$

где су:

V - запремина конструкције [m^3] и

γ - запреминска тежина материјала конструкције [kg/m^3].

Сопствена тежина конструкције подразумева и тежину пратеће сталне опреме на објекту (на пример припадајућа хидромеханичка опрема код брана), коју је потребно нанети на конструкцију, водећи рачуна о месту на коме се налази и начину ослањања.

Хидростатички притисак и силе од узгона

За меродавни ниво воде у акумулацији и одговарајућу коту доње воде одређују се хидростатички притисак и силе од узгона који делује на конструкцију бране. Хидростатички притисак је функција дубине воде и њене запреминске тежине. Силе од узгона зависе од коте доње воде (потисак), разлике коте горње и доње воде (филтрациони део узгона) и њене запреминске тежине.

$$p = \rho \cdot g \cdot h [\text{Pa}] \quad (40)$$

где су:

ρ - густина воде [kg/m^3],

g - убрзање силе Земљине теже [m/s^2] и

h - дубина на месту посматране тачке [m].

Термички утицаји

Код гравитационих бетонских брана термички утицаји (видети поглавље 3.2.1) се јављају ослобађањем топлоте хидратације (видети поглавље 3.1.3) и разменом топлоте са површина бетонских блокова (видети поглавље 3.1.4) као последица температурног градијента на површинама или унутар тела конструкције. Термички утицаји се морају разматрати као нестационарни (зависно од времена) због велике термичке инерције које имају масивне бетонске конструкције.

Препорука је да се за референтну температуру, за коју се претпоставља да нема напрезања у бетону тј. у односу на коју се рачунају термичке дилатације, усвоји приближно средња годишња температура бетона из прорачуна температурног поља [16] односно температура која се јавља 30 дана након бетонирања блока јер температурно поље постаје квазистационарно а бетон достиже своју пуну чврстоћу [25].

3.3 Примена МКЕ у спровођењу термичко-напонског прорачуна

Узимајући у обзир одговарајуће контурне услове, а у одсуству аналитичких решења овог сложеног феномена, термичко-напонска анализа се може спровести нумерички, применом методе коначних елемената. Дискретизацијом, проблем се своди на систем нелинеарних диференцијалних једначина првог реда чији је матрични облик [43]:

$$[C]\{\dot{T}\} + [\hat{K}]\{T\} = \{f_Q\} + \{f_q\} \quad (41)$$

где су:

$[C]$ - матрица топлотног капацитета,

$\{\dot{T}\}$ - временски извод температуре,

$[\hat{K}]$ - матрица топлотне проводљивости,

$\{T\}$ - вектор температуре у чвору,

$\{f_Q\}$ - вектор топлоте хидратације и

$\{f_q\}$ - вектор конвекције кроз површину,

Горе наведене величине, дефинишу се на следећи начин [43]:

$$[C] = \iiint \rho c [N][N]^T dV \quad (42)$$

$$[\hat{K}] = \iiint \left[k_x \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + k_y \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + k_z \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right] dV \quad (43)$$

$$\{f_Q\} = \iiint Q [N]^T dV \quad (44)$$

$$\{f_q\} = - \oint (q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z) [N]^T dA \quad (45)$$

где су n_x , n_y и n_z јединични нормални вектори на разматраној површини док се q_x , q_y и q_z дефинишу као [43]:

$$q_x = k_x \frac{\partial T}{\partial x} N_i \quad (46)$$

$$q_y = k_y \frac{\partial T}{\partial y} N_i \quad (47)$$

$$q_z = k_z \frac{\partial T}{\partial z} N_i \quad (48)$$

где су k_x , k_y и k_z коефицијенти проводљивости бетона у x , y и z правцу респективно, док је N_i функција облика чвора i у разматраном елементу.

Веза између вектора померања чвора и вектора сила, које се јављају као последица разлике између срачунатих температура у чвору и референтне температуре, за коју се претпоставља да нема напрезања у материјалу, може се представити на следећи начин [41]:

$$[K]\{u\} = \{F_t\} \quad (49)$$

$$[K] = \oint \int [B]^T [D] [B] d\Omega \quad (50)$$

$$\{F_t\} = \oint \int [B]^T [D] \{\varepsilon_{th}\} d\Omega \quad (51)$$

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (52)$$

где су:

$[K]$ - матрица крутости,

$\{u\}$ - вектор померања чвора,

$\{F_t\}$ - вектор сила,

$[B]$ - матрица извода интерполационих функција,

$[D]$ - конститутивна матрица,

$\{\varepsilon_{th}\}$ - вектор термичких дилатација,

α - коефицијент термичког ширења,

T - срачунате температуре у чворовима и,

T_{ref} - референтна температура.

3.4 Карактеристике термичко-напонских анализа код бетонских брана

Термичко-напонска анализа бетонских брана представља сложен проблем у областима теорије конструкција и хидротехничких конструкција, који карактеришу: спрегнутост, фазност и нелинеарност прорачуна.

Спрегнута („coupled“) термичко-напонска анализа подразумева утицај термичког прорачуна на напонско-деформацијски и обрнуто. Она може бити једносмерна, или двосмерна. Уколико температура утиче на деформацију и обрнуто, деформација на температуру, анализа је двосмерна. У супротном, анализа је једносмерна.

Код фазног прорачуна, на почетку сваке прорачунске фазе дефинише се активни део модела јер се његови елементи „рађају“ сукцесивно један за другим у тачно дефинисаним временским интервалима („birth and death element“).

Код вискоеластичних материјала историја деформација утиче на вредност напона у тренутку прорачуна. Резултати прорачуна из претходне фазе се памте и користе као почетне вредности за наредну фазу.

Постоје различите врсте нелинеарности које могу утицати на понашање бетонске конструкције:

- нелинеарност граничних услова (одизање конструкције, контакт конструкција, динамички утицаји),

- нелинеарност материјала (пластично понашање материјала, лом/прслине, оштећења, течење материјала) и
- геометријска нелинеарност (велике ротације или деформације).

Термичка анализа је нелинеарна ако постоји утицај Сунчевог зрачења, временска или температурна зависност термичко-механичких параметара бетона, анизотропија проводљивости бетона или ослобађање топлоте услед процеса хидратације [1, 41].

Напонско-деформацијска анализа је нелинеарна ако постоји нелинеарност граничних услова која подразумева, на пример, увођење одизања ослонаца или међусобног контакта конструкција. Контактни гранични услови се могу увести у прорачун коришћењем конструктивних елемената за повезивање или дефинисањем модела нелинеарног понашања који укључује велику носивост на притисак и нулту носивост на затезање. Приликом прорачуна напонског стања масивних бетонских конструкција требало би користити линеарну везу између напона и деформација. На овај начин се прорачун спроводи са одређеним степеном конзервативности, што конструкцији даје виши степен сигурности и омогућава проверу њеног понашања за примењена оптерећења. Са друге стране, у проценама стања постојећих конструкција, требало би користити нелинеарну везу између напона и деформација са циљем утврђивања стварног стања објекта [3, 63].

Постепеним увођењем различитих нелинеарности у прорачун, осигурава се стабилност сваког појединачног нелинеарног прорачуна [63].

4 ПРАКТИЧНА РАЗМАТРАЊА

4.1 Разделнице у телу гравитационих бетонских брана

Гравитационе бране се граде у ламелама које допуштају да дилатациона (конструктивна) разделница „ради“, чиме омогућава да се термички напони растерете и спречи настанак прслина. Дужина ламеле је обично између 6,0 и 16,0 m [60], односно 9,0 и 20,0 m [80], а одређује се из услова да термички напони затезања у правцу осе бране не буду прекорачени [60]. Вододрживост бране се обезбеђује повезивањем ламела заптивним тракама (слика 4. А), обично од бакарног лима, гуме, ПВЦ-а или неког другог еластичног материјала за заптивање.

Дилатационе разделнице углавном нису конструисане да преносе силе па се нумерички модел може дефинисати тако да се његове границе налазе на местима ових разделница. Многе бране су изграђене тако да дилатационе разделнице преносе смичуће силе у смеру тока реке, али без могућности да прихвате силе затезања као и силе смицања у вертикалном правцу [3].

За разлику од дилатационих разделница, радне разделнице или спојнице (слика 4. Б, Ц) су привременог карактера и морају да обезбеде добру везу између блокова како би се добила монолитна конструкција ламеле. Радне разделнице, које могу бити вертикалне, хоризонталне и косе, имају улогу смањења почетних напрезања и могућности појаве прслина услед ширења и скупљања и омогућавају брже одавање топлоте средини која окружује бетон. Радне разделнице се претходно припремају тако да се обезбеди добра веза старог и новог бетонског блока конструкције [7].

Код неких шема бетонирања, хоризонталне радне разделнице не леже у истој равни већ образују изломљене површине (слика 4. Ц) чиме се постиже већа отпорност на смицање у случају да се прслина јави у самој разделници [7].

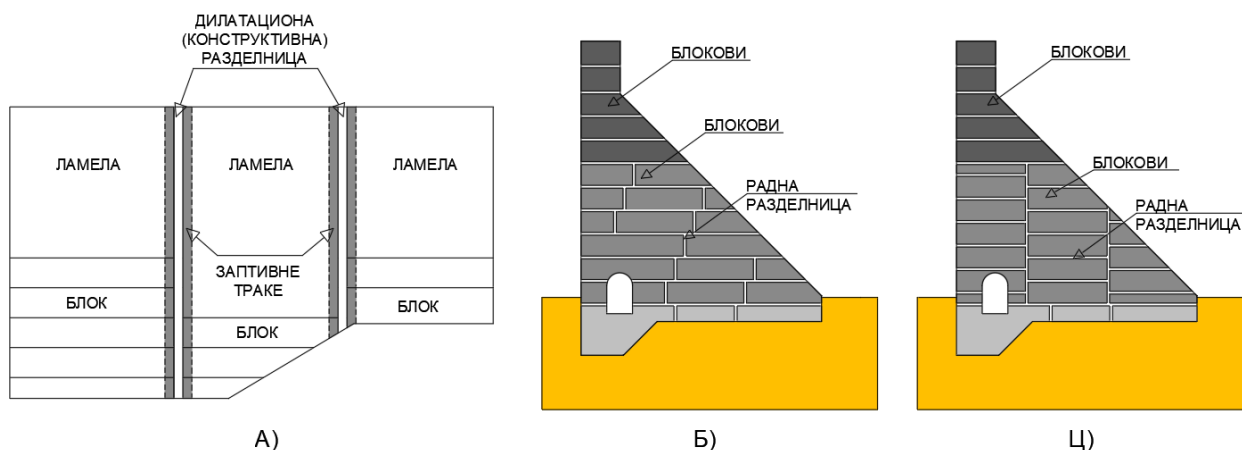
4.2 Блокови у телу гравитационих бетонских брана

За изградњу брана користи се хидротехнички бетон довољне чврстоће, вододрживости и отпорности на мраз. Осим тога, пошто је по правилу реч о масивном бетону, потребно је да има и следеће особине: ниску топлоту хидратације, мале запреминске деформације и ниску цену [7].

Да би се у исто време постигла монолитност и убрзало хлађење бетона услед хидратационе топлоте, током грађења ламеле гравитационе бетонске бране се радним разделницама деле на блокове за бетонирање [60]. Блок за бетонирање је запремина ограничена оплатом или бетоном коју би требало бетонирати без прекида у раду [60].

Димензије блокова и план бетонирања претпостављају се искуствено имајући у виду карактеристике мешавине хидротехничког бетона, а коначно се усвајају спровођењем термичко-напонске анализе.

Постоји неколико начина распоређивања блокова унутар ламеле (слика 4.): дуги блокови, косе спојнице, вертикалне спојнице, комбинација дугих блокова са вертикалним или косим спојницама.



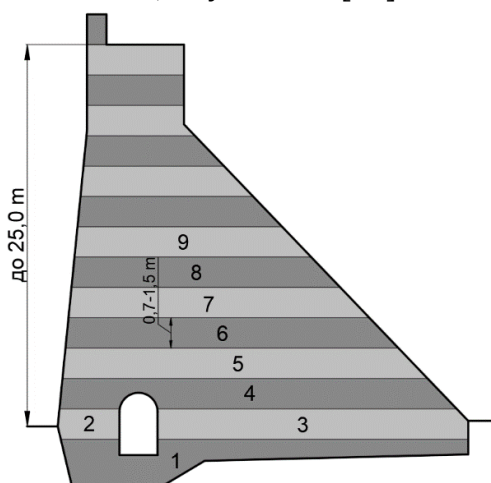
Слика 4. Заптивке, блокови и разделнице: (А) заптивке између суседних ламела; (Б) комбинација дугих блокова и косих спојница; (Ц) комбинација дугих блокова и вертикалних спојница [7]

Дужина блока (у правцу ка боковима бране) је димензија која је углавном једнака дужини ламеле, ширина блока (у правцу узводно - низводно) зависи од ширине ламеле и има вредност до 25,0 m, док висина блока има вредност између 0,5 и 3 m. Бетонирани блок остаје "слободан" да се хлади најмање три дана [60].

У току грађења на две суседне ламеле одржава се разлика у висинама блокова како би се обезбедило добро хлађење и скупљање свих ламела на погодан начин.

4.2.1 Дуги блокови

Начин грађења дугим блоковима (слика 5.) обично се примењује код гравитационих бетонских брана висине до 25,0 m. Висина дугог блока је од 0,70 до 1,50 m. За уграђивање бетона оваквим начином требало би да се обезбеди да разлика између спољашње и унутрашње температуре при грађењу и експлоатацији не буде већа од 20 °C. Уколико не може да се испуни овај услов, а брана се гради на овакав начин, по правилу се прибегава вештачком хлађењу бетона [60].

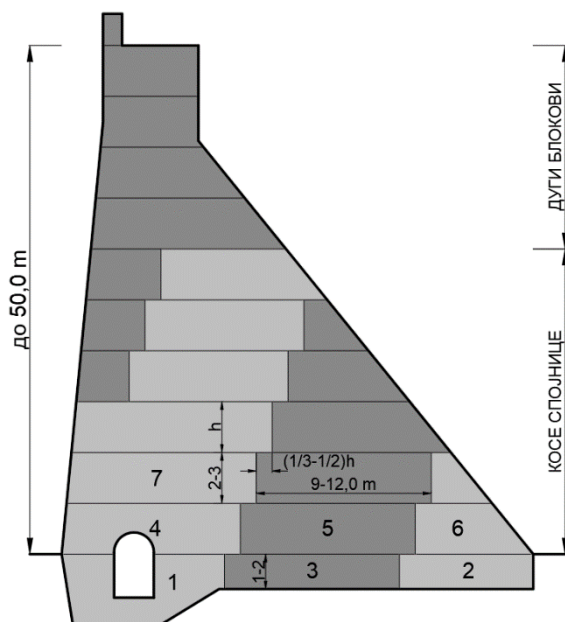


Слика 5. Фазе бетонирања дугим блоковима (бројевима је означен редослед бетонирања) [60]

4.2.2 Смакнути блокови (косе спојнице)

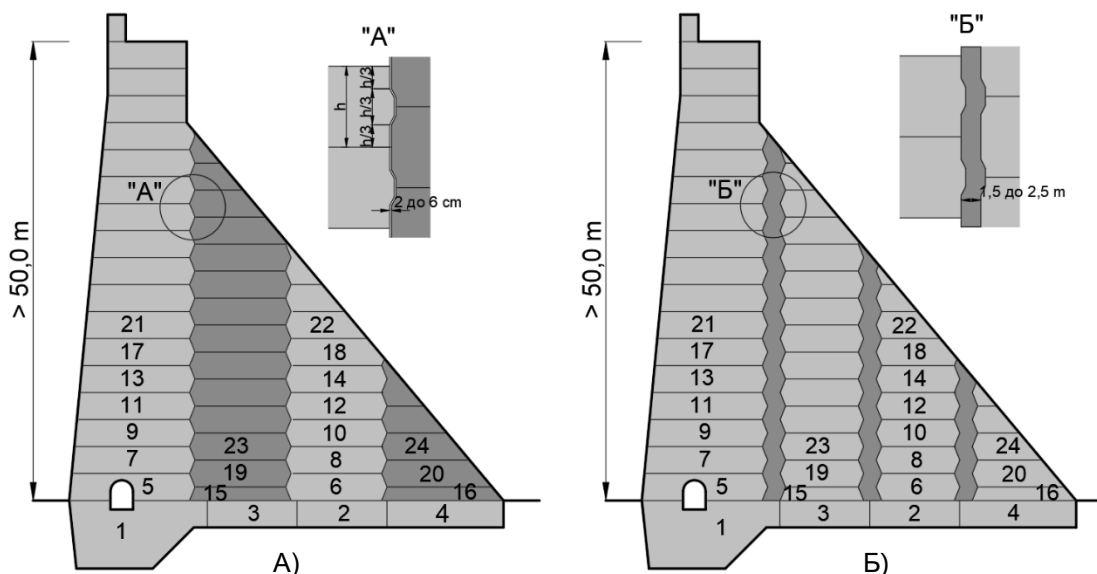
Овај начин бетонирања (слика 6.) углавном се примењује код брана висине до 50,0 m. Ширина блока је од 9,0 до 12,0 m. Висина блока у зони темеља износи од 1,0 до 2,0 m, а изнад темеља од 2,0 до 3,0 m. Преклапање блокова се врши у износу од $h/3$ до $h/2$, где је

h висина блока. Обично се месечно бетонира до 4,0 m по висини бране. Бетонирање се врши са прескакањем суседних блокова, али је дозвољен и другачији редослед. Постоји и комбинација начина бетонирања косих спојница са начином бетонирања дугим блоковима (слика 6.) [60].



Слика 6. Фазе бетонирања косим спојницама у комбинацији са начином бетонирања дугим блоковима (бројевима је означен редослед бетонирања) [60]

4.2.3 Стубасти блокови (вертикалне спојнице)



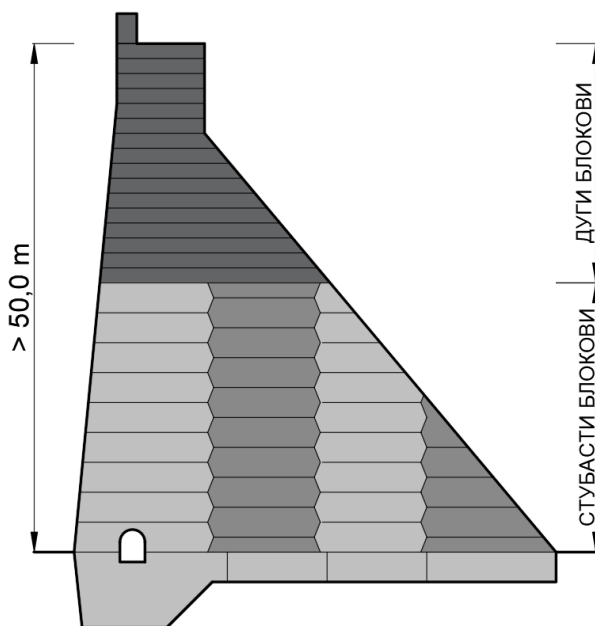
Слика 7. Фазе бетонирања стубастим блоковима (вертикалне спојнице) са уским разделницама (А) и са широким разделницама и простором за накнадно бетонирање (Б). Бројевима је означен редослед бетонирања [60].

Највише бране у свету су изведене примењујући вертикалне спојнице тј. стубасте блокове (слика 7.). Овакви типови блокова примењују се код брана висине преко 50,0 m. Ширина блока је до 15,0 m, а висина блока до 3,0 m. Блокови су назубљени у вертикалном правцу. Радна разделница између стубастих блокова може бити уска и широка. У широкој радној разделници оставља се простор у који се постављају цеви за

инјектирање, тј. монолитизацију бетона, и то тек када стубасти блокови достигну висину преко 20,0 m. Овим начином може да се бетонира и до 10,0 m месечно [60].

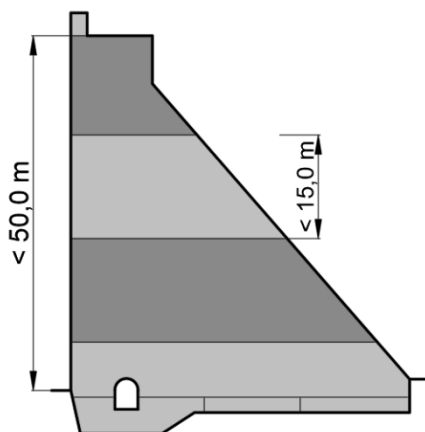
4.2.4 Комбинација стубастих и дугих блокова

Бетонирање ламеле гравитационе бетонске бране комбинацијом стубастих и дугих блокова се примењује код брана висине преко 50,0 m. Најпре се изводе блокови са вертикалним спојницама, затим се врши инјектирање, а након тога се изводе дуги блокови, и то само при врху бране (слика 8.) [60].



Слика 8. Комбинација стубастих и дугих блокова при бетонирању гравитационе бране [60]

4.2.5 Високи блокови



Слика 9. Фазе бетонирања високим блоковима при бетонирању гравитационе бране [60]

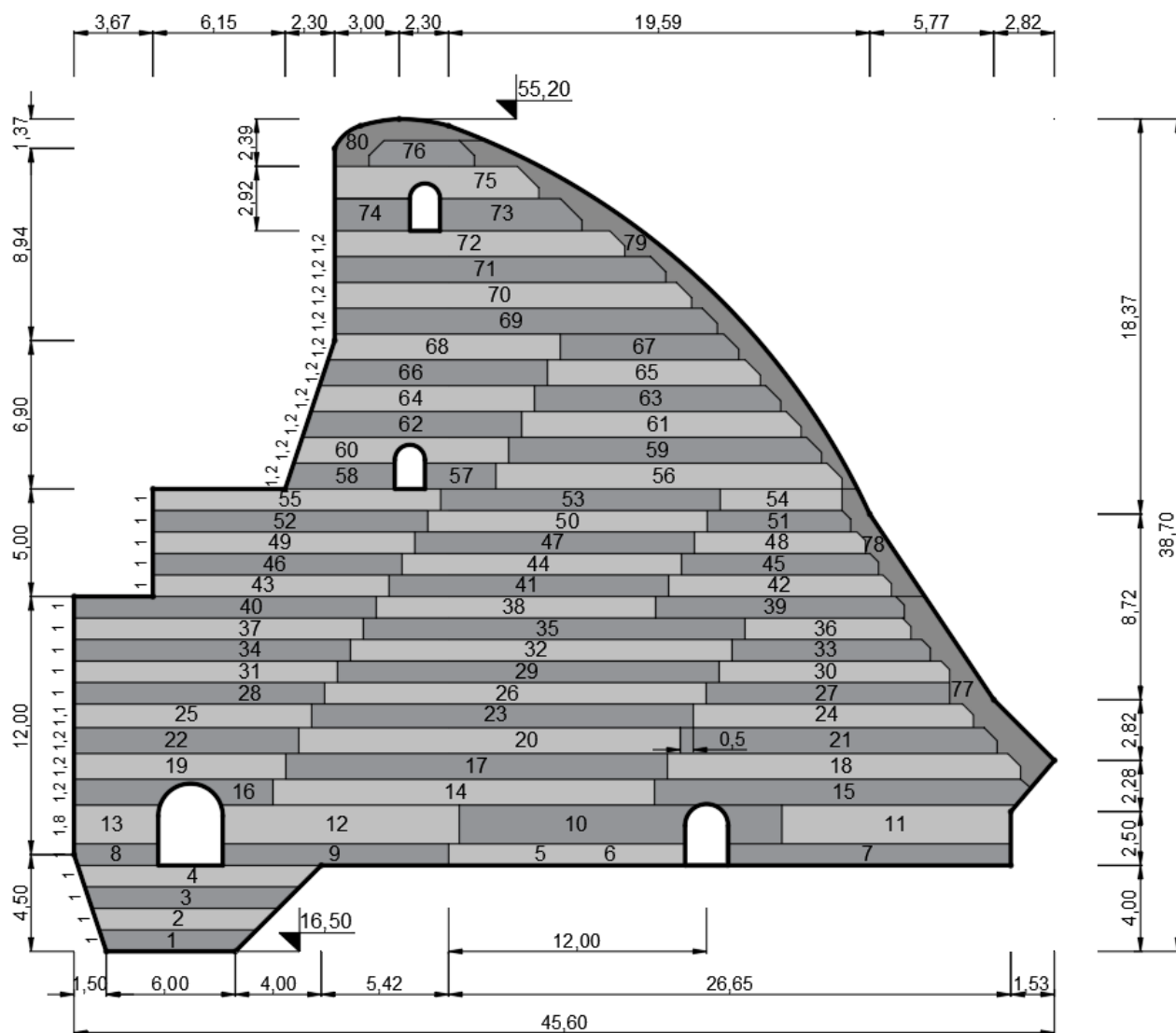
Овај начин грађења (слика 9.) се примењује код брана висине до 50,0 m у крајевима где владају изузетно ниске температуре, а грађевинска сезона је веома кратка. Ширина блока је једнака ширини целе ламеле. Висина блока је до 15,0 m. Брана је монолитна јер има свега неколико хоризонталних радних разделница. Због великих димензија блока, висока температура у средини блока се јавља услед хидратације цемента, што изазива појаву прслина дубоких и до 0,80 m. Често се током експлоатације ове пукотине саме

затварају. Овај начин бетонирања нарочито је употребљаван у Русији и Канади, па се често зове и "канадска метода" за бетонирање [60].

4.3 Пример разделница и блокова у пракси

4.3.1 Блокови и радне разделнице

У пракси се често комбинују различите методе бетонирања блокова. На слици 10 може се видети примена комбинације косих спојница и дугих блокова при бетонирању једне преливне ламеле бране ХЕ "Ђердап 1" [60].



Слика 10. Гравитациона бетонска брана ХЕ "Ђердап 1" - план бетонирања блокова за преливно поље преливне бране [60]

Детаљније гледано, прва 4 блока на узводном зубу ламеле изведена су као дуги блокови висине 1,0 m како би се испратила геометрија поменутог зуба.

Блокови 5-13, висине од 1,0 до 1,80 m изводе се као блокови који се налазе до саме стенске масе и они најчешће одступају од неке од метода по којима се врши бетонирање блокова (слике 7. и 8.). Разлог за то је неопходност постизања довољне висине ламеле како би се отпочело са применом поступка неке од метода за

бетонирање блокова, тј. како би се изашло из зоне која је блиска темељној спојници ламеле бетонске бране и стенске масе.

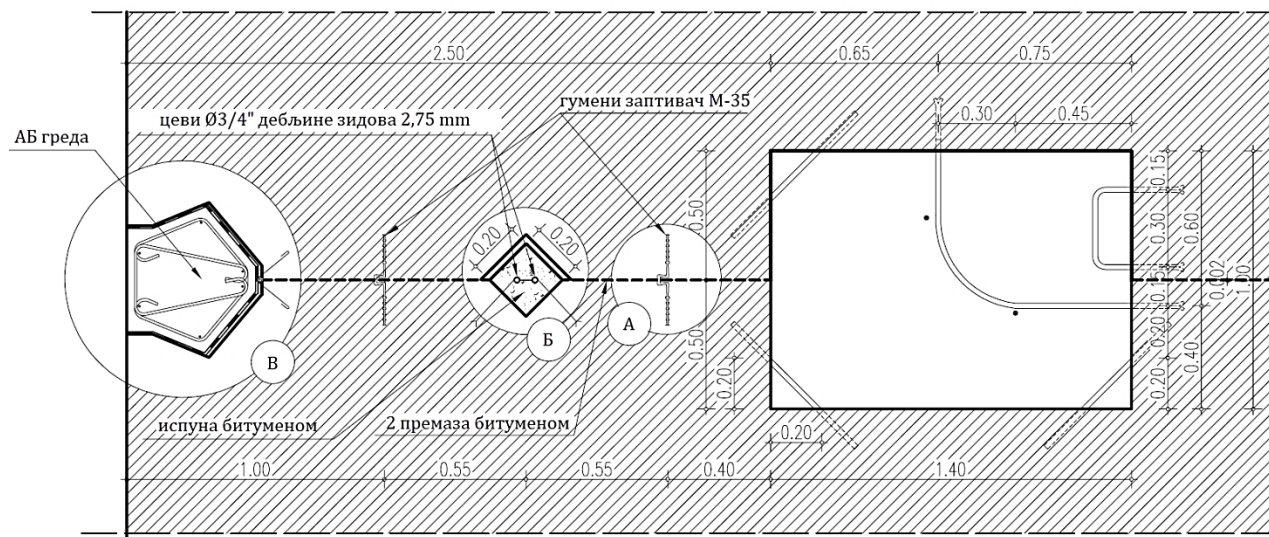
Блокови који следе и које носе ознаку од 14 до 40, реализовани су као косе спојнице висине од 1,0 до 1,20 m, што је и типично за бране које су висине до 50 m (видети поглавље 4.2.2). Исто важи и за комплет блокова косих спојница са ознаком од 41 до 55, висине 1,0 m, као и за комплет блокова косих спојница са ознаком од 56 до 68, висине 1,20 m.

Блокови од 69 до 76 су дуги блокови карактеристични за завршне блокове при врху ламеле бране.

Блокови са ознаком од 77 до 80 су блокови контурног слоја бетона и они су неправилног облика, са једне стране оивичени геометријом претходно изливених блокова ламеле, а са друге пројектованом геометријом преливне ивице.

4.3.2 Дилатационе разделнице

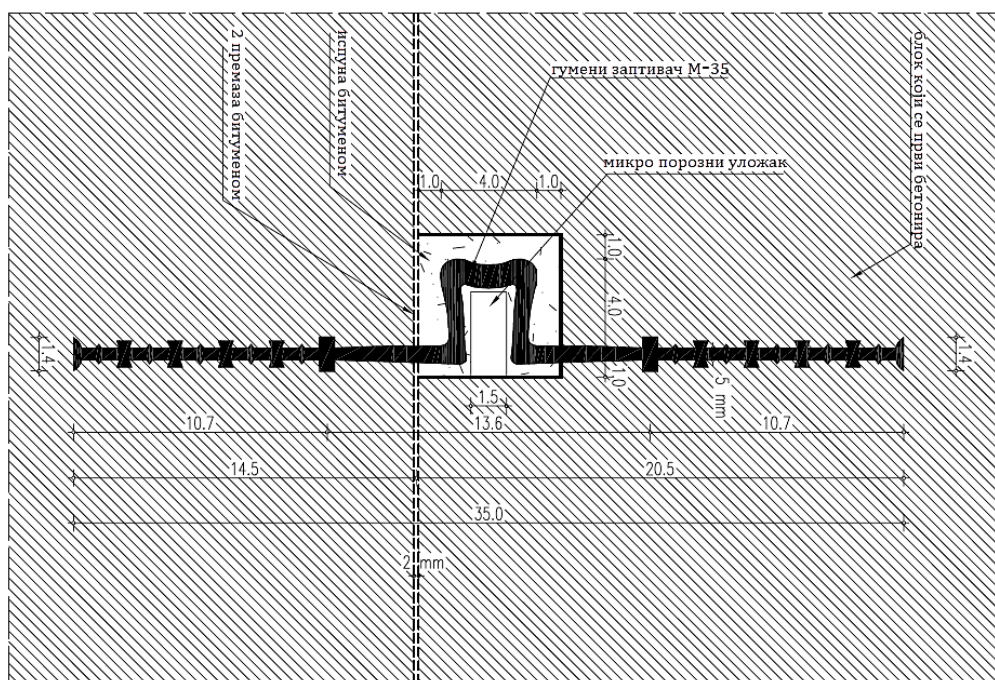
На гравитационој бетонској брани ХЕ „Ђердап 1“ пројектована је и изведена глатка равна дилатациона разделница ширине 2,0 mm (слика 11.) [60].



Слика 11. Хоризонтални пресек кроз изведену дилатациону разделницу између две преливне ламеле гравитационе бетонске бране ХЕ „Ђердап 1“ [81]

Избетонирана ламела је и два пута премазана бутуменом, чиме је формирана дилатациона разделница [60].

Заптивање дилатационе разделнице са узводне стране је изведено са четири заптивке и то на следећи начин: на узводној површини је вертикална греда од армираног бетона, на 100,0 cm од узводне површине је прва заптивна трака од гуме отпорне на битумен и ширине 35,0 cm (слика 12.), на 155,0 cm је оса окна са битуменом (у њему се налазе две цеви кроз које пролази загрејана водена пара, а око њих, у окну, се налази битумен), и на 210,0 cm друга заптивна трака (иста као прва). На контакту ламела, у свакој дилатационој разделници, налази се контролни шахт димензија 140,0 x 100,0 cm, који служу за контролу процуривања воде (ако је има) и комуникацију са осталим галеријама [60].



Слика 12. Детаљ „А“ са изведене дилатационе разделнице између две преливне ламеле гравитационе бетонске бране ХЕ „Ђердап 1“ [81]



Слика 13. Попречни пресек кроз осу ламеле 3 бране ХЕ „Ђердап 1“ са приказом положаја мерних места на дилатационој разделници [82]

Изглед две изведене дилатационе разделнице бране ХЕ „Ђердап 1“, гледано из галерија бране, приказан је на слици 13 (место осматрања између ламеле 3 и ламеле 4 (D-09) на

коти 24,0 mmn као и место осматрања између ламеле 2 и ламеле 3 (D-25) на коти 50,0 mmn).

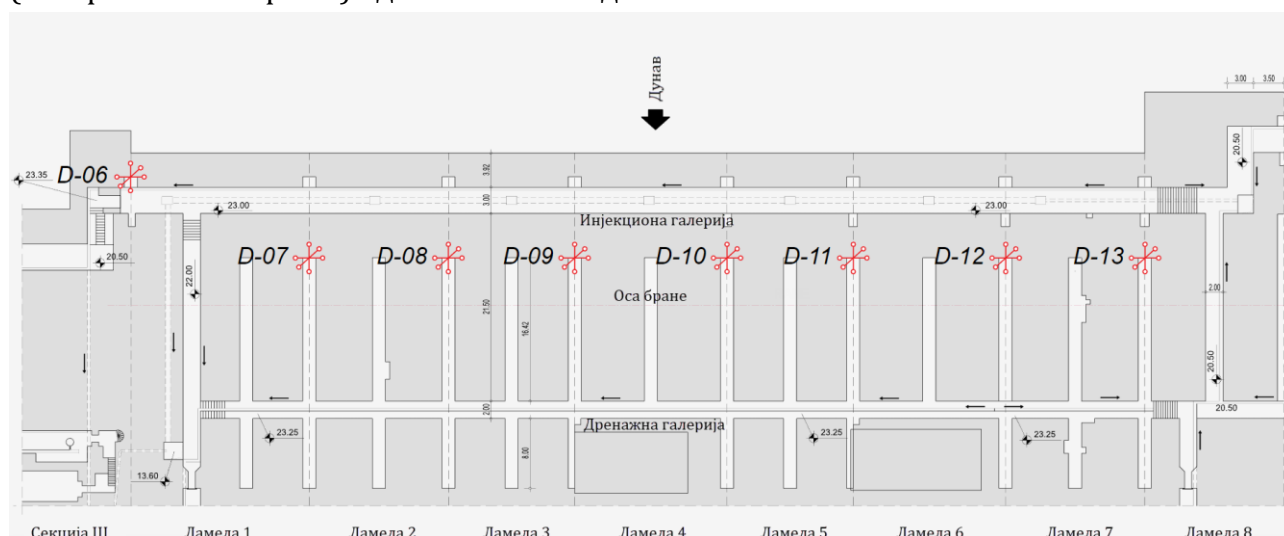
Резултати мерења „рада“ разделнице (отварање - затварање као и хоризонтално и вертикално смицање у зони разделнице) добијају се мерењем помоћу мерних инструмената (дилатометар или компаратер) током периода експлоатације објекта. Резултати мерења представљају „рад“ разделнице у односу на нулто (почетно) мерење.

Компаратер је савремени преносни механички уређај који се користи за праћење рада дилатационих разделница или прслина. Мерење се обавља постављањем инструмента на одговарајуће ослоње који су уграђени са обе стране разделнице или прслине која се осматра (слика 14.).

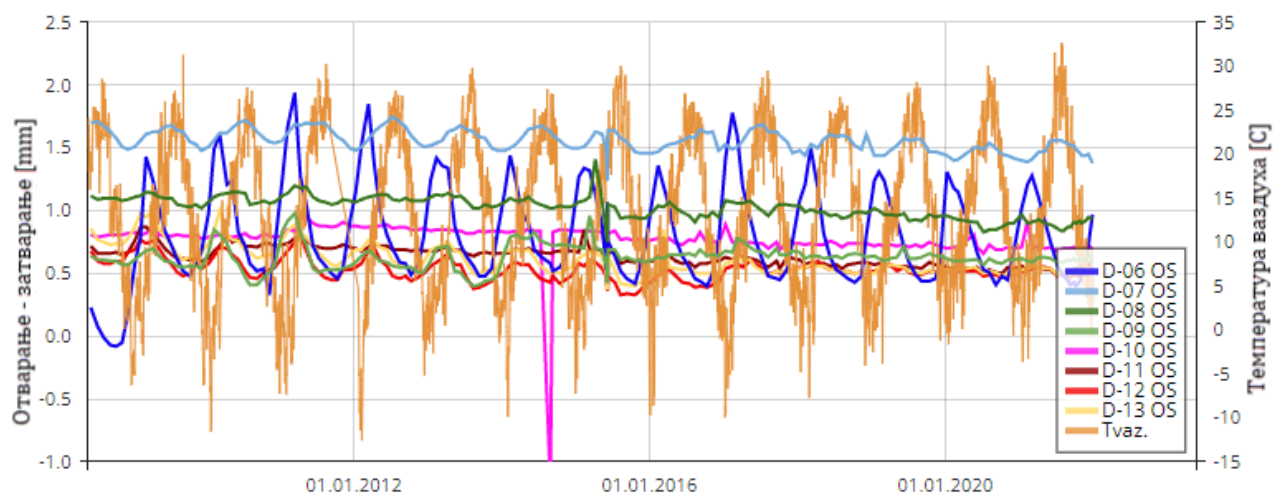


Слика 14. Компаратер постављен на мерне ослоње
(у положају за мерење вертикалног смицања) [82]

На слици 15 приказани су положаји места осматрања „рада“ разделница од секције III до ламеле 8 у инјекционој и слепим дренажним галеријама (24,0 mmn) бране ХЕ „Ђердап 1“ док су на слици 16 приказани резултати мерења „рада“ ових разделница (отварање - затварање) од 01.01.2008. године.



Слика 15. Положај места осматрања „рада“ разделница од секције III до ламеле 8
у инјекционој и слепим дренажним галеријама (24,0 mmn) бране ХЕ „Ђердап 1“ [82]



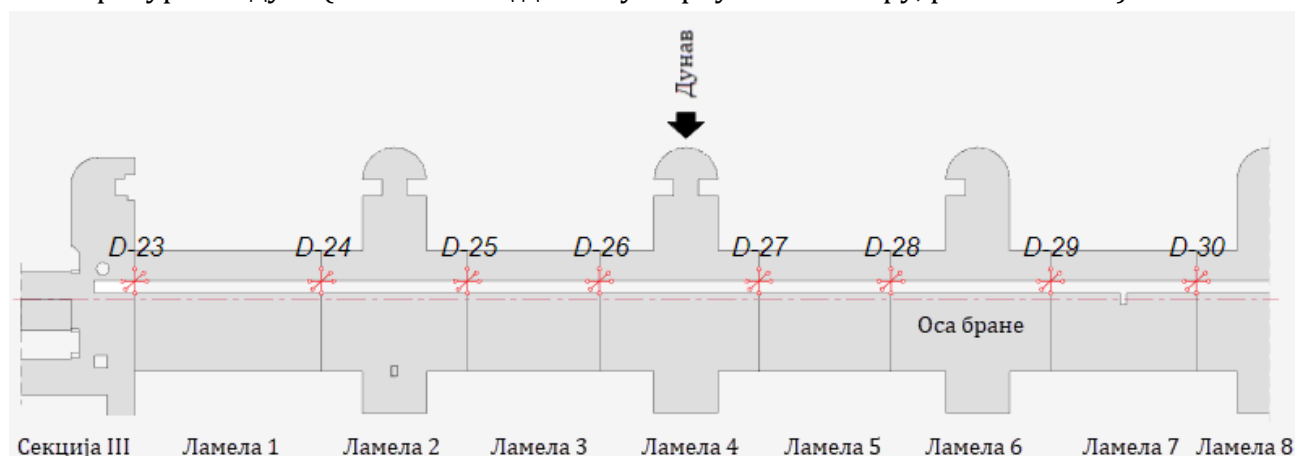
Слика 16. Мерења „рада“ разделница (отварање - затварање) од секције III до ламеле 8 у инјекционој и слепим дренажним галеријама (24,0 mmm) бране ХЕ „Ђердап 1“ [82]

Такође, на слици 17 приказани су положаји места осматрања „рада“ разделница од секције III до ламеле 8 у у галерији на коти 50,0 mmm бране ХЕ „Ђердап 1“ док су на слици 18 приказани резултати мерења „рада“ ових разделница (отварање - затварање) од 01.01.2008. године.

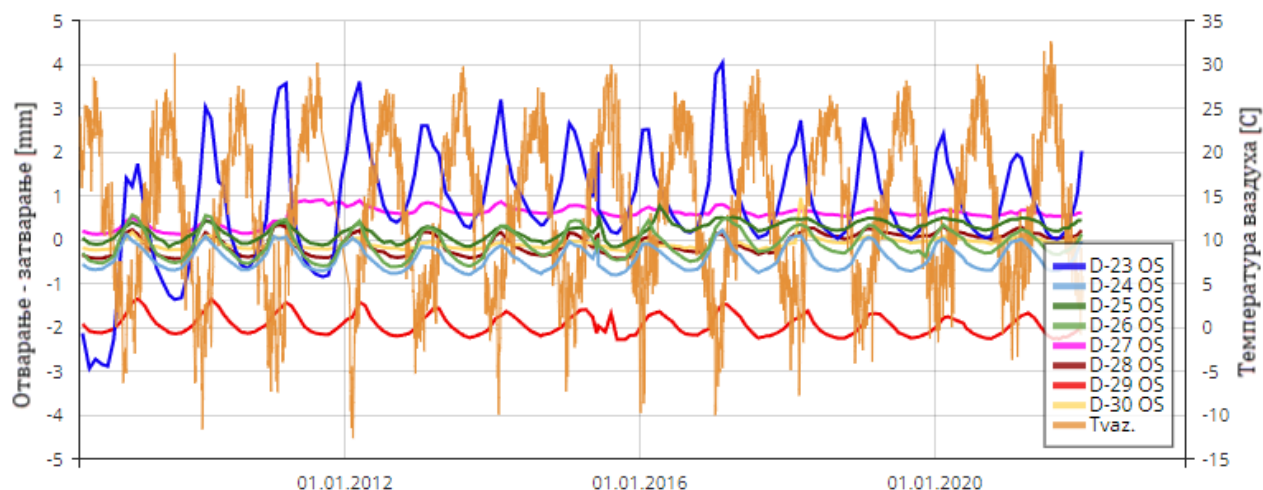
Из наведених мерења отварања и затварања разделница може се уочити да сва мерења имају изразит сезонски карактер односно да се, гледано упоредо са приказаним вредностима мерења спољашње температуре ваздуха, дилатационе разделнице отварају на нижим температурама (услед скупљања суседних ламела хлађењем) односно затварају на вишим температурама (услед ширења суседних ламела загревањем).

Такође, може се уочити да су амплитуде приказаних мерења израженије на вишим котама (кота 50,0 mmm) у односу на ниже (кота 24,0 mmm). Овај феномен може се објаснити чињеницом да амплитуда продора спољашње температуре ваздуха опада са приближавањем унутрашњим (нижим) зонама конструкције.

У току једне календарске године, екстремне вредности отварања и затварања разделнице јављају се са одређеним кашњењем у односу на екстремне вредности температура ваздуха (за око месец дана – у марту и септембру, респективно).



Слика 17. Положај места осматрања „рада“ разделница од секције III до ламеле 8 у галерији на коти 50,0 mmm бране ХЕ „Ђердап 1“ [82]



Слика 18. Мерења „рада“ разделница (отварање - затварање) од секције III до ламеле 8 у галерији на коти 50,0 mnn бране ХЕ „Ђердап 1“ [82]

Вредности промене „рада“ разделнице (отварање и затварање) за приказани објекат и издвојена места осматрања крећу се оријентационо у интервалу 0,25-0,50 mm за нижу коту (слика 16.) односно 0,50-1,0 mm за вишу коту (слика 18.). Изузетак су мерења на споју секције III електране и ламеле 1 преливне бране које, због различите масивности ових конструкција, показују знатно веће промене: 1,0-1,50 mm за нижу коту (слика 16.), односно 3,0-4,0 mm за вишу коту (слика 18.).

5 МЕТОДОЛОГИЈА ПРОРАЧУНА

Нумерички МКЕ модел за потребе овог истраживања генерисан је на основу геометријског структурног модела непреливне ламеле гравитационе бетонске бране Платановрисис (Република Грчка), висине 95,0 m, који је приказан у наредном поглављу. Моделом је обухваћена и садејствујућа стенска маса.

У оквиру истраживања спроведена је једносмерна, дуготрајна, фазна, термичко-напонска анализа. За усвојене димензије блокова, редослед и динамику бетонирања, почетне температуре бетонске мешавине и параметре материјала, извршени су прорачуни који, у анализи утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања, у обзир узимају:

- сопствену тежину конструкције (у складу са поглављем 6.3.1),
- термичке утицаје (у складу са поглављем 6.3.2),
- термичке контурне услове (у складу са поглављем 6.2.5) и
- напонско-деформацијске контурне услове (у складу са поглављем 6.2.6).

У анализи утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на термичке напоне затезања, прорачуни узимају у обзир и:

- временске деформације бетона (у складу са поглављем 6.2.4),
- хидростатички притисак и силе од узгона (у складу са поглављем 6.3.3) и
- додатни контурни услов на месту дилатационе разделнице који симулира њено реално понашање (разделница која не прихвата затезање, у складу са поглављем 6.2.6).

Табела 4. Структура извршених анализа

Ознака	Опис прорачуна	Дужина ламеле (L)			
		20,0 m (L-20)	15,0 m (L-15)	12,5 m (L-12,5)	10,0 m (L-10)
I	само термички утицаји	✓	✓	✓	✓
II	(I) "+" скупљање бетона	✗	✓	✗	✗
III	(II) "+" хидростатички притисак и силе од узгона	✗	✓	✗	✗
IV	(III) "+" моделирање контакта између суседних ламела*	✗	✓	✗	✗
	* извршена је и параметризација активирања задатог контурног услова унутар изабраног опсега граничне вредности померања (од 0 до 5,0 mm) са кораком од 1,0 mm				

Структура извршених анализа дата је у табели 4. Део резултата истраживања (I за L-20 и L-15) публикован је у раду [83], док је део резултата истраживања (промена само температурног поља за I за све дужине ламеле) публикован у раду [84].

Анализа утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања спроведена је за четири претпостављене дужине ламеле (од 20,0 до 10,0 m). Анализе утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на термичке напоне затезања спроведене су за једну изабрану дужину ламеле (15,0 m). За потребе анализе утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на термичке напоне затезања, извршено је моделирање овог контурног услова на бочним странама модела и то тако да се потпуно активирање контакта две ламеле дешава након достизања померања у интервалу од 0-5,0 mm (параметарска анализа рада дилатационе разделнице).

Прорачуни су спроведени за период од око 5 година и обухватају процес изградње, пуњења акумулације и експлоатације објекта. Период изградње обухвата првих 512. дана са 78 прорачунских фаза (за сваки блок бране) и кораком прорачуна од 1,5 дана. Период од завршетка изградње до почетка пуњења акумулације обухвата време од 512. до 1080. дана са кораком прорачуна од 2,25 дана. Период пуњења акумулације са експлоатационим периодом обухвата преостали део анализираног времена (од 1080. до 1804. дана) са истим кораком прорачуна (од 2,25 дана).

Резултати прорачуна температурног поља и напонског стања у телу бране приказани су у изабраним карактеристичним временским пресецима:

- 84. дан од почетка грађења конструкције (10. јануар друге године, 15 дана од завршетка блока 16 и у тренутку завршетка прве паузе при извођењу радова),
- 283. дан од почетка грађења конструкције (27. јул друге године, 40 дана од завршетка блока 52 и у току друге (летње) паузе при извођењу радова),
- 512. дан од почетка грађења конструкције (13. март треће године, након изливања последњег блока 78),
- 1080. дан од почетка грађења конструкције (02. октобар четврте године, у току пуњења акумулације),
- 1505. дан од почетка грађења конструкције (01. децембар пете године, у току експлоатације објекта) и
- 1804. дан од почетка грађења конструкције (25. септембар шесте године, у току експлоатације објекта).

Након спроведених прорачуна извршене су интерпретација, упоредна анализа, и дискусија добијених резултата.

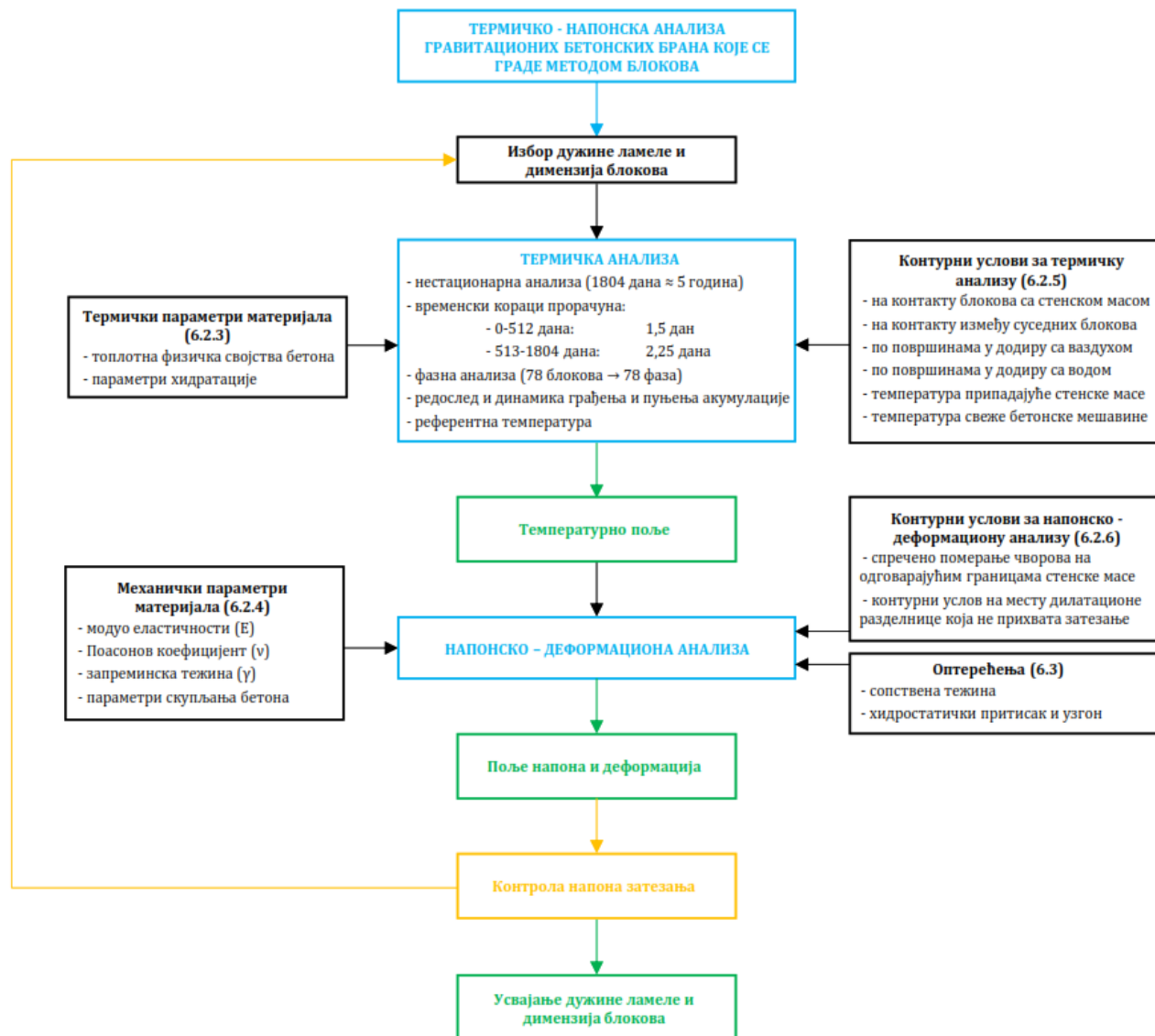
Термички прорачун се спроводи тако што се задају термички параметри материјала (видети поглавље 6.2.3) и контурни услови за термичку анализу (видети поглавље 6.2.5). Као резултат добијају се температурна поља за сваку од фаза прорачуна. Добијена температурна поља преносе се у одговарајући корак напонско-деформацијског прорачуна.

У спроведеном истраживању термичка анализа је нелинеарна због узимања у обзир временски зависног процеса ослобађања топлоте услед хидратације цемента. Из улазних параметара хидратације примењени софтвер, „LUSAS Academic“ [63], аутоматски израчунава количину и брзину ослобађања топлоте услед хидратације цемента при изливању нових блокова, а на основу релација које су дате у поглављу 3.1.3.

За напонско-деформацијску анализу неопходно је дефинисати механичке параметре материјала (видети поглавље 6.2.4), одговарајуће контурне услове за напонско-деформацијску анализу (видети поглавље 6.2.6) и оптерећења (видети поглавље 6.3).

Помоћу модула „Nonlinear and Transient“ [63] програм аутоматски конвертује модел из термичке у напонску анализу, узимајући у обзир разматране нелинеарности (развој топлоте хидратације као и контурни услов на месту дилатационе разделнице), историје деформација (видети поглавље 3.4) и временске домене сваке фазе прорачуна. Приликом прорачуна напонског стања коришћена је линеарна зависност између напона и деформација.

На слици 19 приказан је алгоритам прорачуна у оквиру спроведеног истраживања.



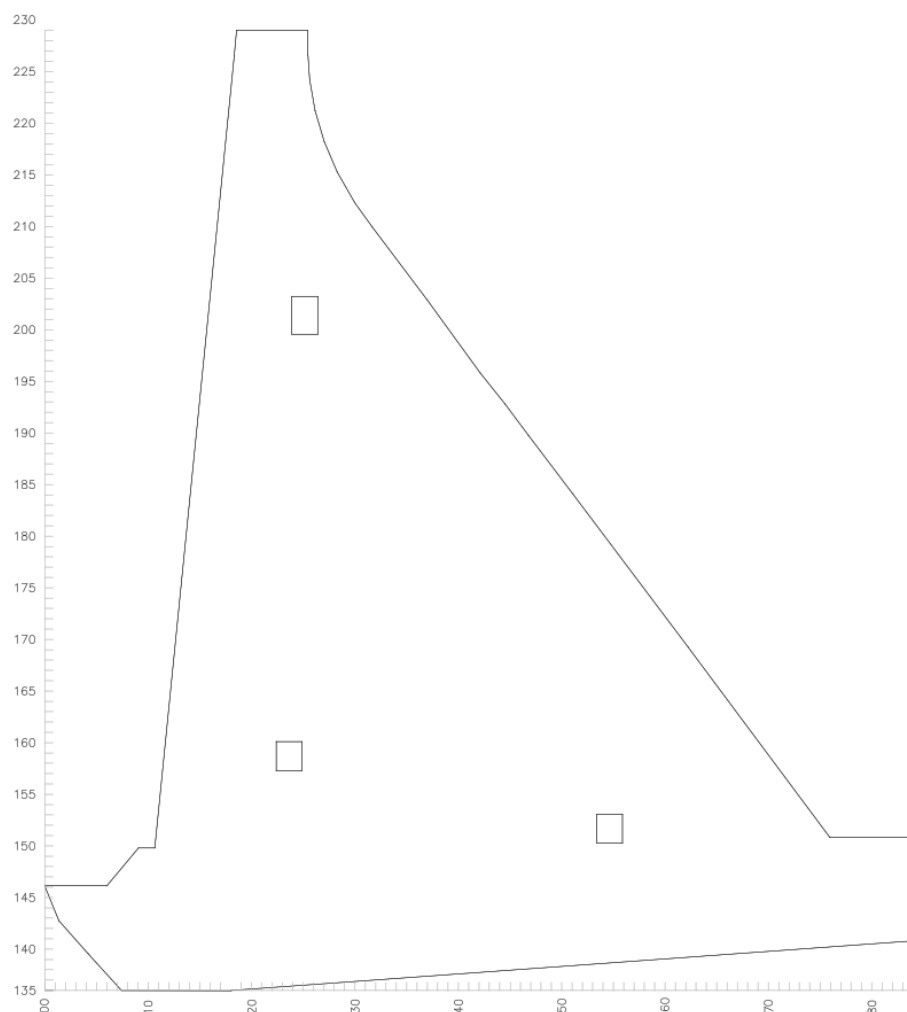
Слика 19. Алгоритам прорачуна у оквиру спроведеног истраживања

6 НУМЕРИЧКИ МОДЕЛИ ЗА ТЕРМИЧКО-НАПОНСКЕ АНАЛИЗЕ

6.1 Тродимензионални структурни модел бране

6.1.1 Основни подаци

Тродимензионални структурни модел бране обухвата једну непреливну ламелу гравитационе бетонске бране (која се састоји од 78 блокова) и припадајућу стенску масу (слике 20. и 21.).

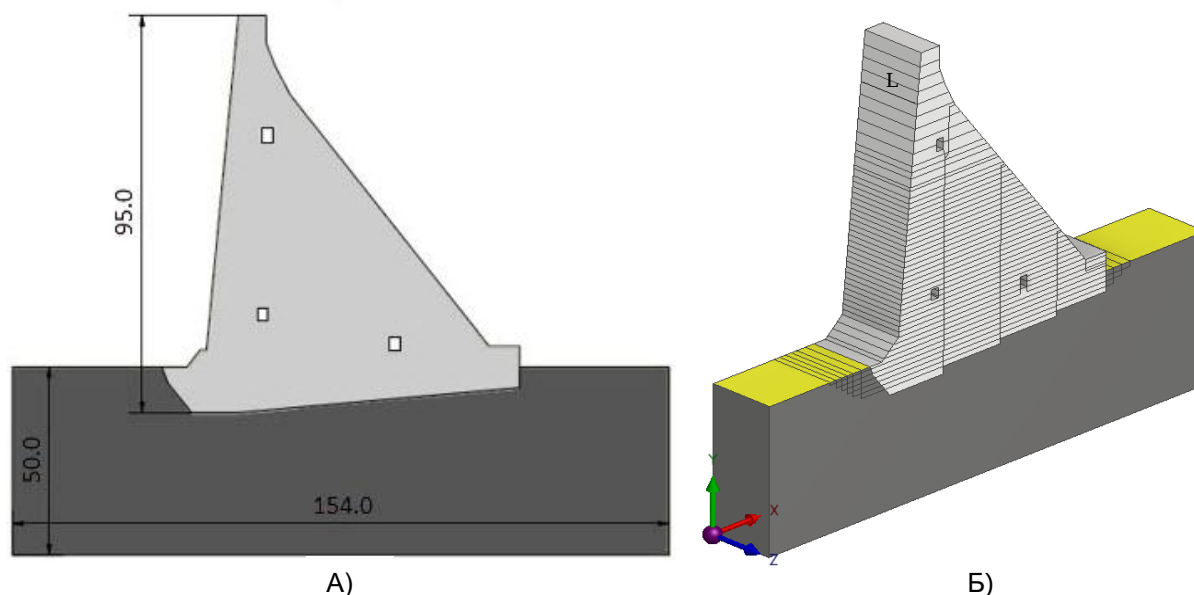


Слика 20. Карактеристичан попречни пресек ламеле бране (приказане осе су у m)

Основни подаци о геометрији конструкције [1]:

- грађевинска висина (m): 95,0
- кота круне бране (mnm): 230,0
- најнижа кота темељења (mnm): 135,0
- ширина у круни (m): 7,0
- највећа ширина на коти темељења (m): 76,0

- нагиб узводне контуре (вертикално:хоризонтално): 1:0,1
- нагиб низводне контуре (вертикално:хоризонтално): 1:0,75



Слика 21. Карактеристичан попречни пресек модела (А);
3Д приказ модела са 78 блокова (Б)

Припадајућа стенска маса приказаног модела је димензија 154,0 x 50,0 m (слика 21.). Кота дна стенске масе модела је на 101,0 mnm, док је горња кота стенске масе 151,0 mnm. Узводна и низводна граница стенске масе је око 35,0 m узводно и низводно од ивица бране. Моделирањем припадајуће стенске масе на наведени начин, обезбеђено је и одговарајуће моделирање појава у зони темељне спојнице као и размена топлоте између стене и бране.

Дужина ламеле (слика 21. Б) варирана је у опсегу од 10,0 до 20,0 m како би се спровела анализа утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања (видети поглавље 7.2).

Локални координатни систем модела постављен је са координатним почетком као на слици 21, са позитивним смером X осе у правцу тока реке и Z осе ка десном боку бране. Y оса је вертикална, са позитивним смером навише.

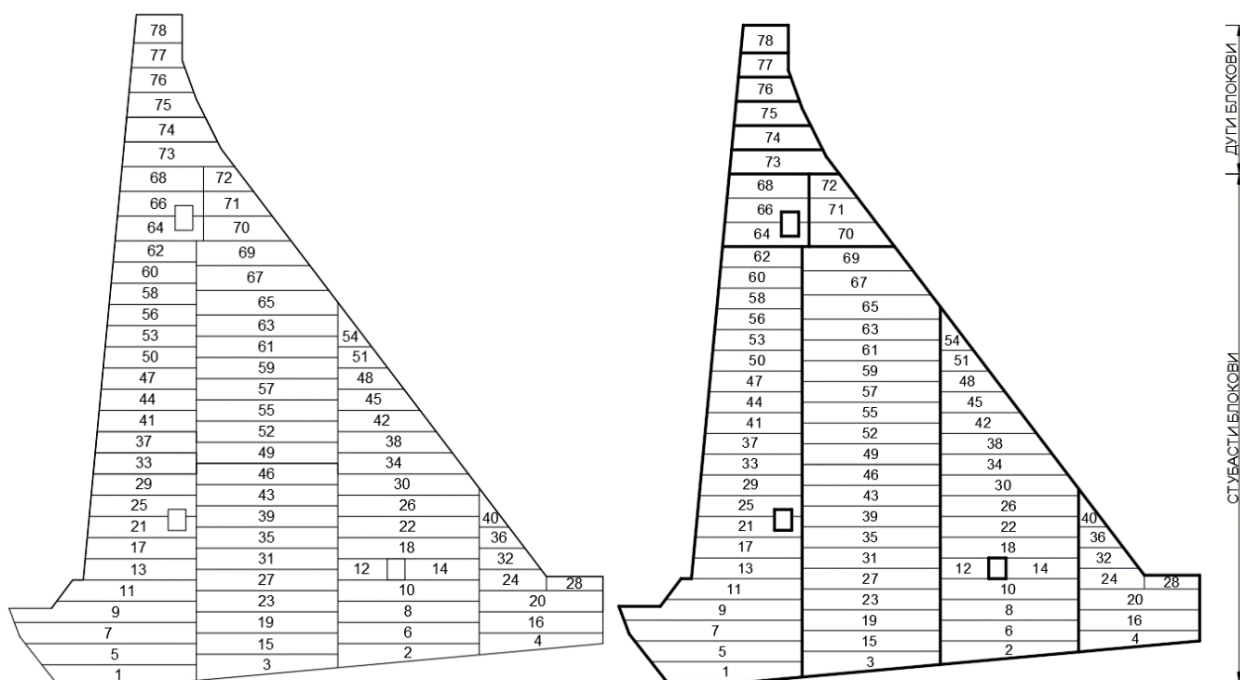
6.1.2 Моделирање блокова ламеле бране

Тело посматране непреливне ламеле гравитационе бетонске бране, за разлику од ламеле која је приказана у [36, 37], подељено је на 78 блокова (слика 22.). Укупан број солида (запреминских тела од којих ће се касније генерисати мрежа коначних елемената) ламеле бране је 153. Број солида већи је од броја блокова ламеле због природе мреже коначних елемената - странице суседних запреминских тела морају се међусобно поклапати како би се извршило правилно спајање тачака мреже коначних елемената блокова ламеле бране.

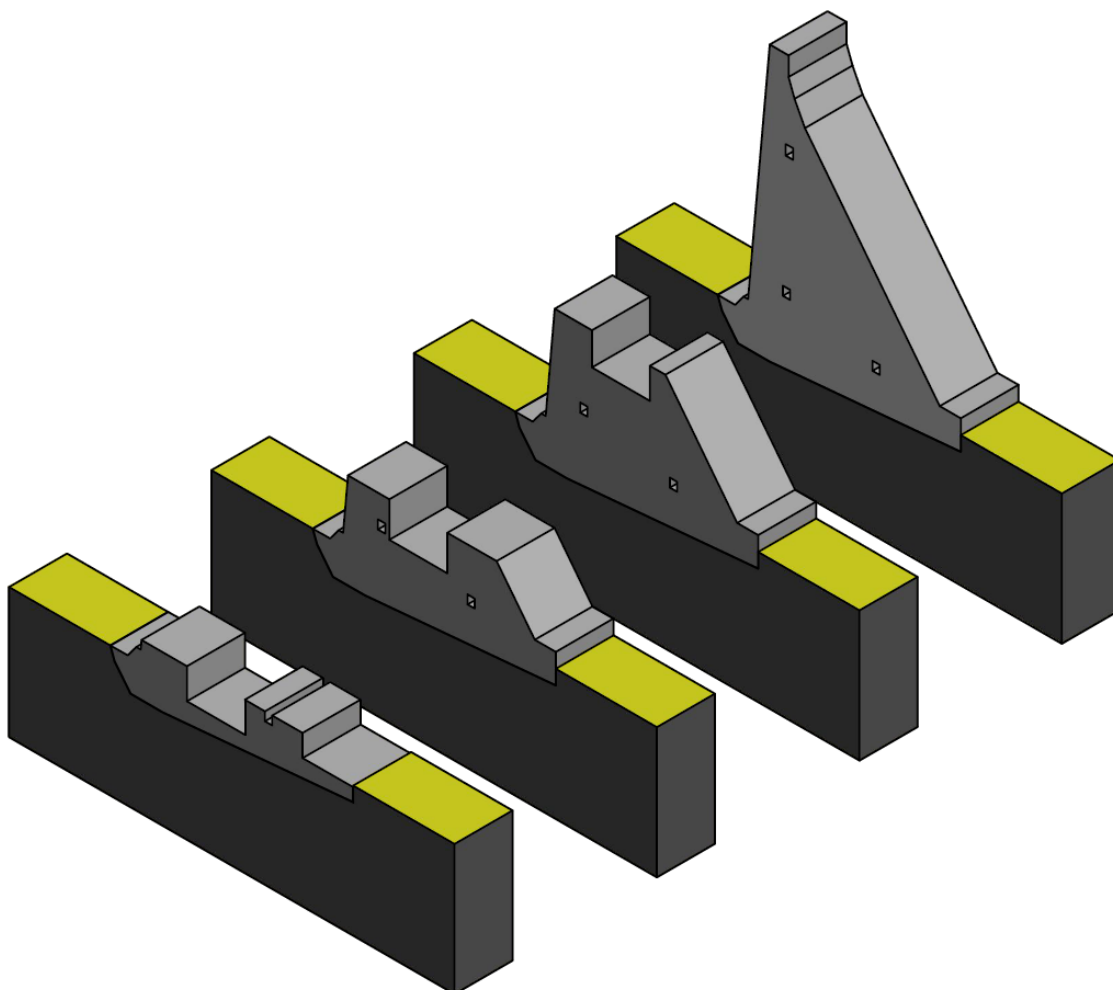
Блокови модела су распоређених комбиновањем дугих блокова и вертикалних спојница, дужине која је једнака дужини ламеле (од 10,0 до 20,0 m у зависности од прорачунске варијанте), просечне ширине 20,0 m и висине (изузев блокова 40 и 54): 3,0 m (блокови 1-63), 3,50 m (блокови 64-77) и 4,0 m (блок 78).

Припадајућа стенска маса моделирана је уз помоћ 28 солида, због горе наведене природе мреже коначних елемената. Приказ блокова и усвојеног плана бетонирања дат

је на слици 22. Брзина бетонирања износи 4,50 дан/блок. На слици 23 дат је изометријски приказ појединих фаза бетонирања ламеле.



Слика 22. Блокови структурног модела ламеле гравитационе бетонске бране
(бројевима је означен редослед бетонирања)

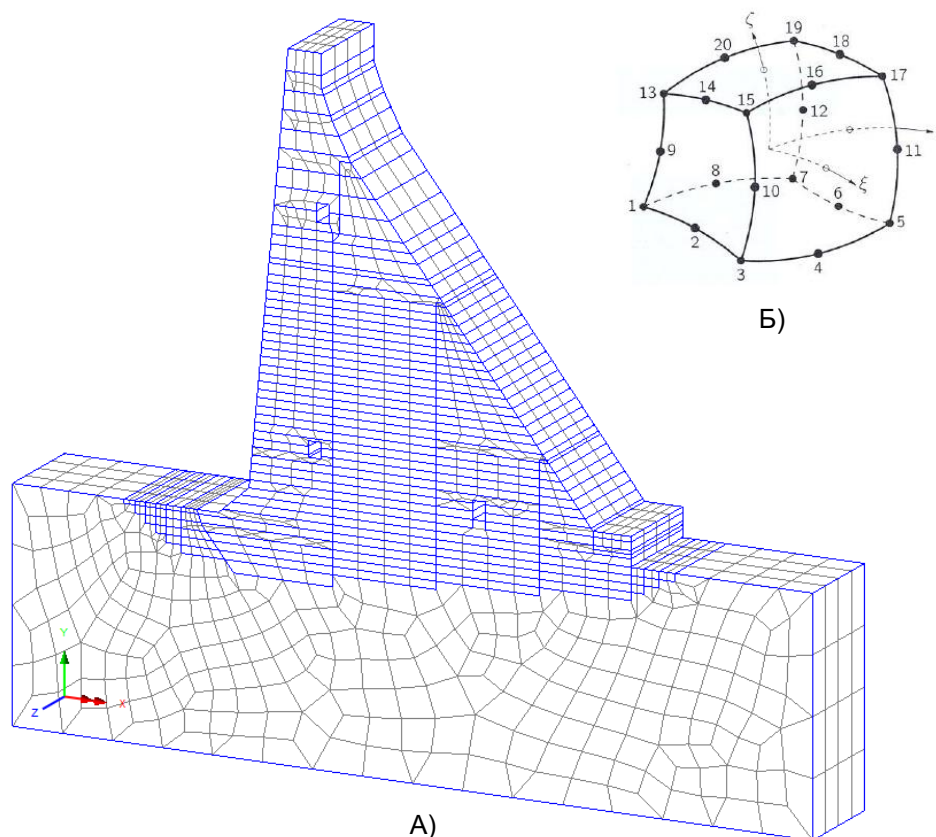


Слика 23. Изометријски приказ појединих фаза грађења

6.2 Тродимензионални МКЕ модел бране

6.2.1 Мрежа коначних елемената

За потребе моделирања термичких и напонско-деформацијских процеса, формиран је тродимензионални МКЕ модел приказане ламеле бране у програму „LUSAS Academic“ [63].



Слика 24. Приказ мреже (А) и хексаедарског коначног елемента (Б)

Мрежа коначних елемената проистиче из геометрије модела и технологије грађења бране у блоковима. Сваки блок представља нову фазу, чиме је омогућена реална симулација усвојене динамике грађења. На слици 24 приказана је мрежа коначних елемената за комплетан тродимензионални модел ламеле са припадајућом стенском масом.

6.2.2 Врста, број и показатељи квалитета 3Д коначних елемената

Мрежа коначних елемената модела креирана је коришћењем хексаедарских коначних елемената НХ8М (слика 24. Б). Модел се састоји од 5335 чворова и 4068 елемената. Као показатељи квалитета генерисаних коначних елемената коришћени су уобичајени квалитативни услови за коначне елементе, критеријум квалитета преко Јакобијана и контрола урушавања елемената.

Критеријум квалитета преко Јакобијана пореди облик коначног елемента са идеалним обликом елемента истог типа. Валидни елементи имају вредност Јакобијана између 0 и 1, где прва вредност представља идеално обликован а друга потпуно деформисан елемент.

Урушени (раван) елемент узрокује грешку при прорачуну или даје нетачне резултате. Код тетраедарског елемента, овај критеријум представља растојање нормале сваког лица елемента до наспрамног чвора за посматрано лице. Софтвер одређује однос најдуже и најкраће измерене вредности, као показатељ урушавања коначног елемента. Уобичајена гранична вредност поменути величине износи 10.

6.2.3 Параметри материјала за термичку анализу

За термички прорачун коришћени су следећи усвојени термички и параметри хидратације бетона:

- бетон у телу бране:

- коефицијент провођења топлоте: $k = 1,80 \text{ W/(m K)}$,
- специфичан топлотни капацитет: $c = 950,0 \text{ J/(kg K)}$,
- коефицијент термичког ширења: $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$,
- комбиновани конвективни коефицијент (ваздух-бетон): $h_1 = 20,10 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$,
- комбиновани конвективни коефицијент (вода-бетон): $h_2 = 500,0 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$,
- параметри хидратације цемента:
 - удео цемента (типа I) у маси бетона: $50,0 \text{ kg/m}^3$,
 - m (емпиријски коефицијент цемента): $12,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/h}$,
 - водоцементни фактор: $0,47$,
 - удео летећег пепела у маси бетона: $225,0 \text{ kg/m}^3$,
 - удео CaO у летећем пепелу: $17,0 \%$,
 - претпостављена температура очвршћавања: $25,50 \text{ }^\circ\text{C}$,

- стенска маса:

- коефицијент провођења топлоте: $k = 2,40 \text{ W/(m K)}$,
- специфичан топлотни капацитет: $c = 880,0 \text{ J/(kg K)}$,
- коефицијент термичког ширења: $\alpha = 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

6.2.4 Параметри материјала за напонско-деформацијску анализу

За напонско-деформацијски прорачун коришћени су следећи усвојени параметри материјала:

- бетон у телу бране:

- густина: $\rho = 2360,0 \text{ kg/m}^3$,
- модул еластичности: $E = 30,0 \text{ GPa}$,
- Поасонов коефицијент: $\nu = 0,20$,
- чврстоћа на затезање: $f_t = 2,70 \text{ MPa}$,
- скупљање:
 - модел: CEB-FIP 90,
 - врста цемента: споровезујући (SL),

- релативна влажност средине (RH): 65,0%,
- $h = 2A_c/u$ 5,22,
- средња чврстоћа на притисак (28 дана): $f_{cm} = 28,53 \text{ MPa}$,

Скупљање бетона уведено је у модел преко номиналне величине карактеристичног блока ламеле, узимајући у обзир површину попречног пресека блока као и обим блока који је у контакту са спољашњом средином.

- стенска маса:

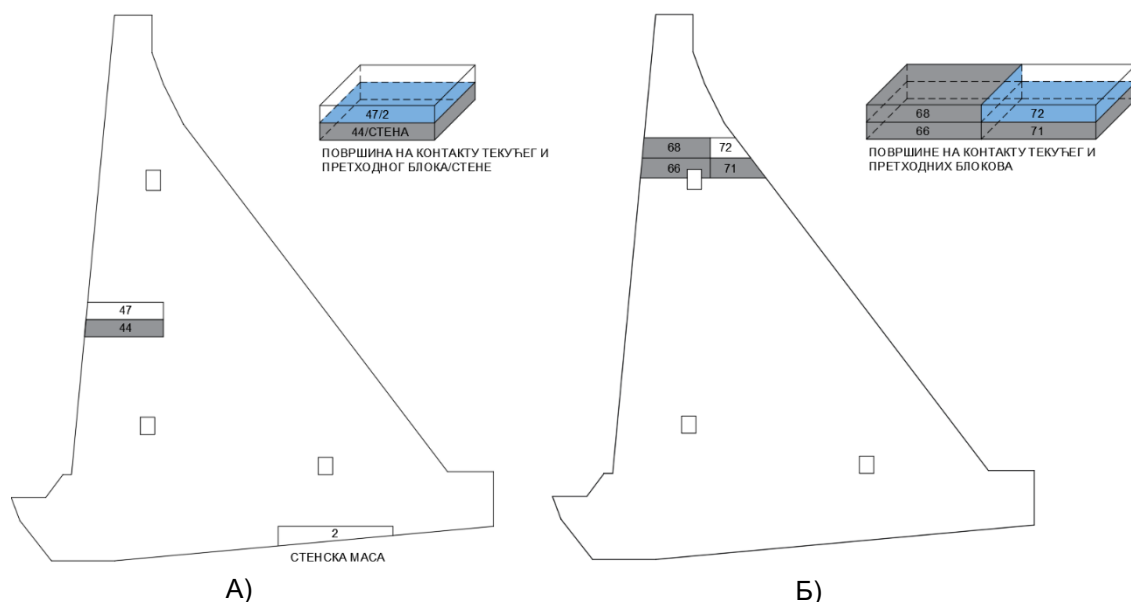
- густина: $\rho = 2430,0 \text{ kg/m}^3$,
- модул еластичности: $E = 20,0 \text{ GPa}$,
- Поасонов коефицијент: $\nu = 0,20$.

6.2.5 Контурни услови за термичку анализу

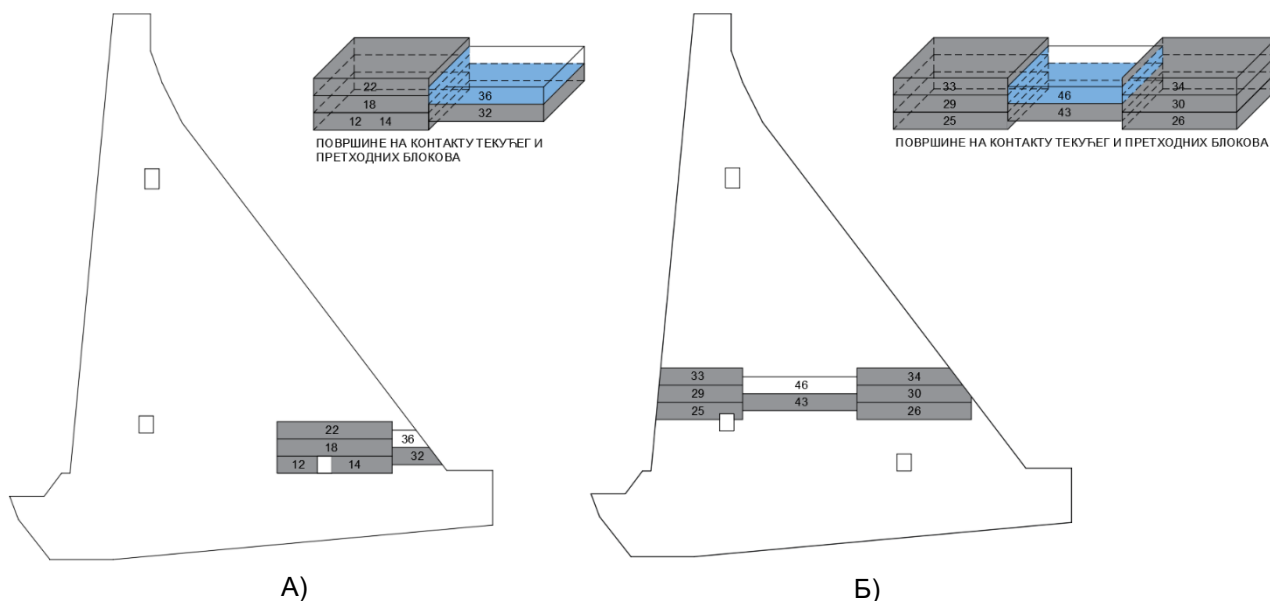
У термичкој анализи узимају се у обзир следећи типови контурних услова: Тип I - на контакту блокова са стенском масом као и на контакту претходних и новоизливених блокова, Тип II - по површинама блокова које су у додиру са ваздухом, Тип III - по површинама блокова које су у додиру са водом, Тип IV - температура припадајуће стенске масе и Тип V - температура свеже бетонске мешавине.

- Тип I - Контурни услови на контакту блокова са стенском масом односно на контакту претходних и новоизливених блокова

Бетонској ламели бране додељује се термички гранични услов (free thermal support) који дозвољава слободно провођење топлоте између блокова и стенске масе (слика 25., А - плаво) као и између свих суседних блокова посматране ламеле на местима контактних површина (слика 25. А, 25. Б и 26. - плаво).



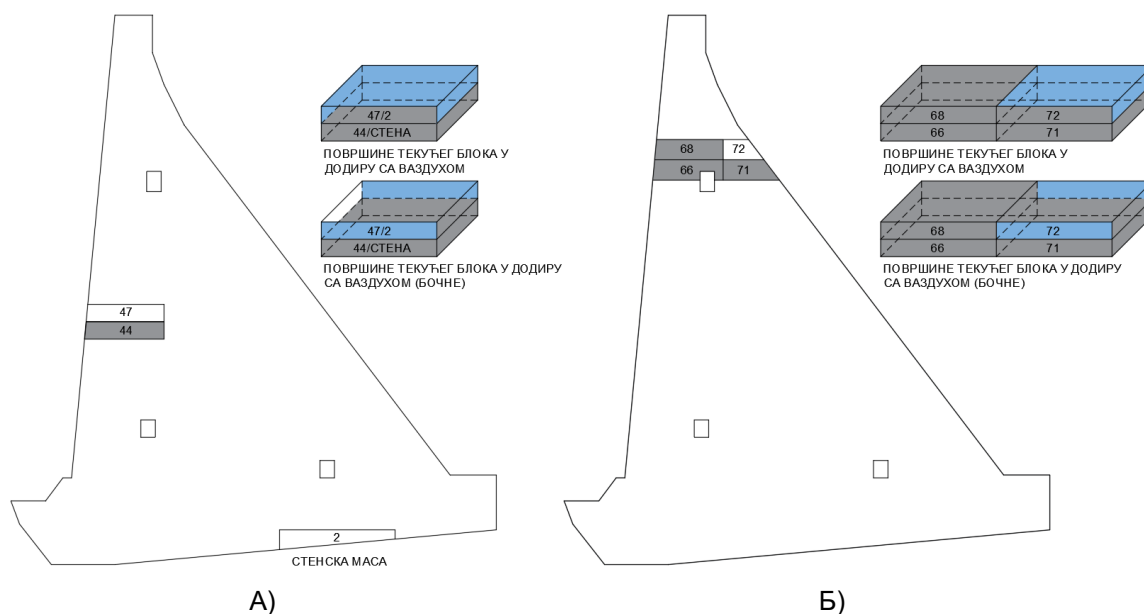
Слика 25. Контурни услови на контакту блокова са стенском масом (А) као и на контакту претходних и новоизливених блокова (А и Б) (бетонирање блока није смакнуто)



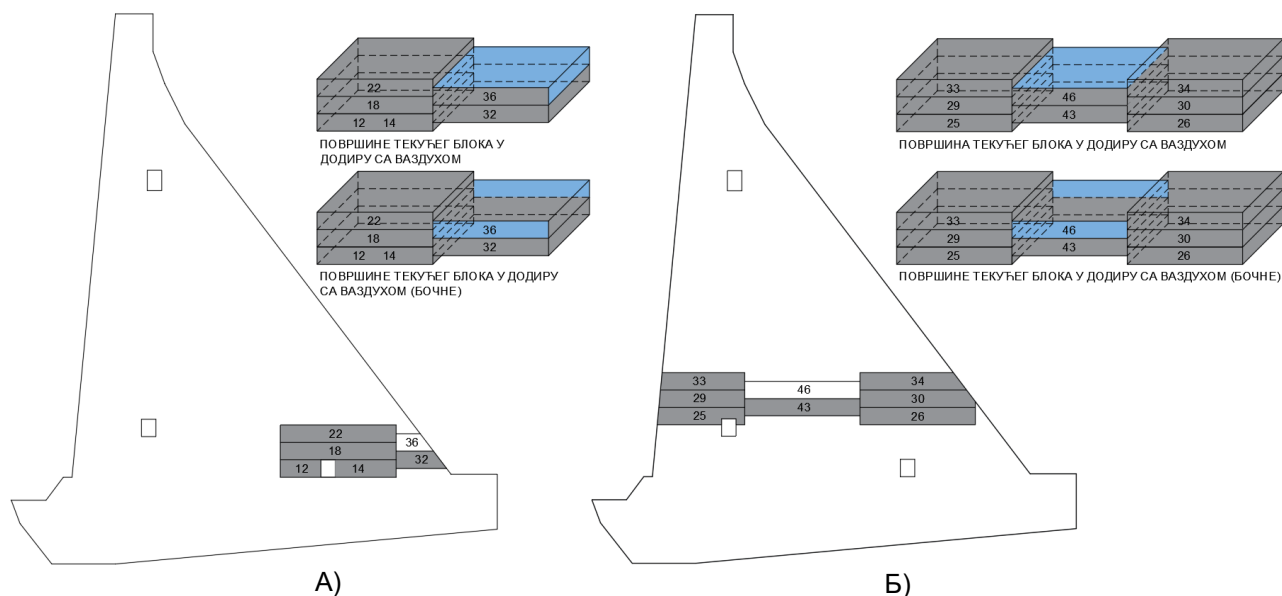
Слика 26. Контурни услови на контакту претходних и новоизливених блокова (А и Б)
(смакнуто бетонирање блока)

- Тип II - Контурни услови по површинама блокова које су у додиру са ваздухом

По површинама блокова које су у додиру са ваздухом (слике 27. и 28. - плаво) задају се, у свакој од фаза прорачуна, измерене спољашње температуре ваздуха [85] у току грађења и експлоатације објекта које се крећу у интервалу од $-2,0$ до $33,0^{\circ}\text{C}$. Вредности измерених спољашњих температура ваздуха дате су у табели 5.



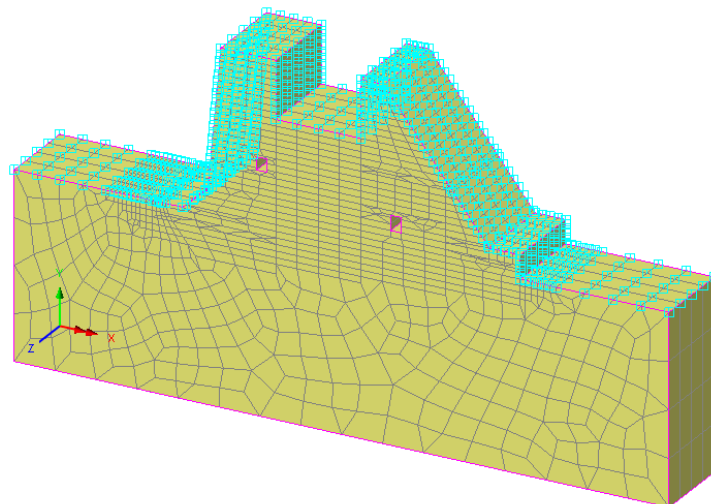
Слика 27. Контурни услови по површинама у додиру са ваздухом за блокове на контакту са стенском масом (А) као и за претходно и новоизливане блокове (А и Б) (бетонирање блока није смакнуто)



Слика 28. Контурни услови по површинама у додиру са ваздухом за претходно и новоизливане блокове (А и Б) (смакнуто бетонирање блока)

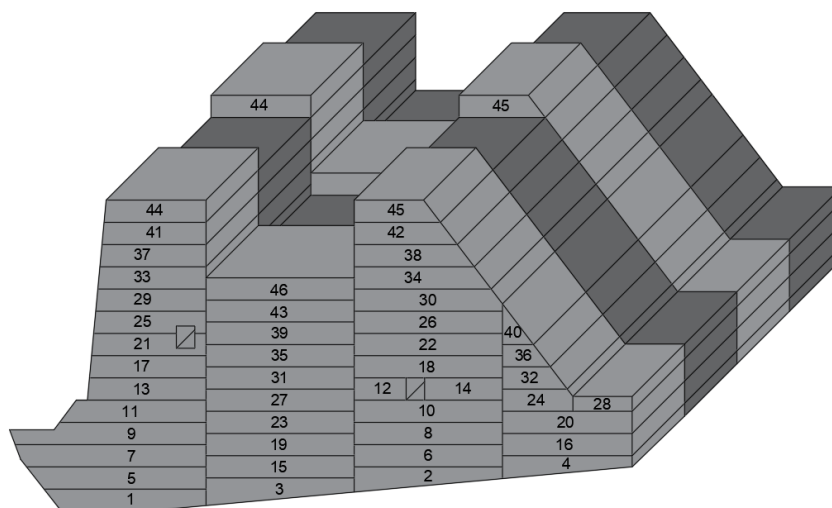
Табела 5. Измерене вредности [85] спољашње температуре ваздуха T_a [$^{\circ}\text{C}$]

Месец и дан/Време	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
X 8-23	10,2	11,5	12,7	13,9	15,5	18,0	20,5	19,0	15,4	12,4	10,7	9,0
X-XI 23-8	4,2	5,4	6,7	7,9	9,1	9,5	10,0	9,4	7,5	5,4	4,2	3,0
XI 8-23	4,6	5,2	5,8	6,5	7,4	9,0	10,6	9,6	7,9	6,4	5,2	4,0
XI-XII 23-8	2,2	2,4	2,6	2,8	3,3	4,5	5,8	5,4	4,5	3,7	2,8	2,0
XII 8-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	2,5	4,5	3,6	2,5	1,8	1,0	0,0
XII-I 23-8	6,2	6,4	6,6	6,8	7,1	7,5	7,9	7,3	7,0	6,8	6,4	6,0
I 8-23	-1,8	-1,6	-1,4	-1,2	-0,5	1,5	3,6	3,3	2,7	-0,4	-1,2	-2,0
I-II 23-8	1,2	1,4	1,6	1,8	2,2	3,0	3,8	3,3	2,5	1,8	1,5	1,0
II 8-23	2,0	2,0	2,0	2,0	2,4	4,0	5,6	5,4	4,5	3,6	2,9	2,0
II-III 23-8	0,2	0,4	0,6	0,8	1,4	3,4	5,6	5,4	4,5	3,3	1,6	0,0
III 8-18	1,2	1,4	1,6	1,8	2,3	3,5	4,8	3,7	2,5	2,0	1,6	1,0
III 18-31	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	2,5	3,7	4,0	4,0	3,5	2,2	1,0
IV 1-14	4,6	4,7	4,8	4,9	5,4	7,5	9,6	10,0	9,0	7,4	6,0	4,5
IV 15-28	4,6	4,2	3,7	3,3	3,9	8,5	13,1	14,0	13,5	11,7	8,3	5,0
IV-V 29-11	15,2	16,0	16,7	17,4	18,4	20,5	22,6	23,0	21,5	19,1	16,8	14,5
V 12-26	13,0	14,1	15,1	16,2	17,7	21,0	24,3	24,3	23,0	20,3	16,2	12,0
V-VI 27-9	15,2	14,9	14,6	14,2	14,9	19,5	24,1	25,0	24,0	21,7	18,6	15,5
VI 10-24	17,0	17,0	17,0	17,0	17,9	22,5	27,1	28,0	26,5	23,7	20,3	17,0
VI-VII 25-7	21,2	20,9	20,6	20,2	21,0	26,0	31,0	31,3	29,5	26,9	24,2	21,5
VII 8-22	24,0	22,9	21,9	20,8	20,9	25,5	30,1	30,1	28,5	26,7	25,8	25,0
VII-VIII 23-5	20,7	19,5	20,0	21,7	23,8	28,0	32,2	33,0	32,0	29,5	25,7	22,0
VIII 6-19	20,3	18,7	19,0	20,7	22,7	26,0	29,3	30,7	29,5	27,0	24,5	22,0
VIII-IX 20-2	16,2	15,3	16,0	17,7	19,6	22,5	25,4	24,7	23,5	22,0	19,5	17,0
IX 3-9	15,2	14,3	14,7	16,0	17,5	20,0	22,5	23,0	22,0	20,2	18,1	16,0



Слика 29. Приказ задатог контурног услова по површинама блокова које су у додиру са ваздухом (у једној изабраној фази током изградње ламеле)

Контурни услов по бочним површинама (ка обалама) блокова, које су у додиру са ваздухом, задаје се узимајући у обзир временски и просторно смакнуто бетонирање блокова суседних ламела (слика 30.). На овај начин симулира се реално хлађење свеже избетонираног блока ламеле (са свих страна).



Слика 30. Усвојени редослед бетонирања блокова непарних (светло сиво) и парних (тамно сиво) ламела гравитационе бетонске бране

По свим површинама галерија задају се измерене унутрашње температуре ваздуха $T_{ag,sr}$ у току грађења и експлоатације [85], које се крећу у интервалу од 10,0 до 22,0 °C (табела 6).

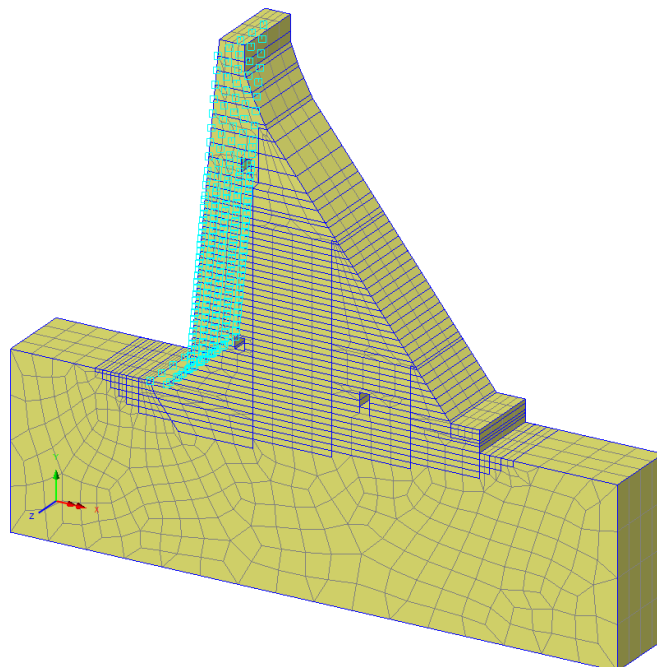
Табела 6. Измерене средње месечне вредности [85] температуре ваздуха у галеријама бране

Месец	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$T_{ag,sr}$ (°C)	10,0	10,0	12,0	14,0	16,0	20,0	22,0	22,0	20,0	16,0	12,0	10,0

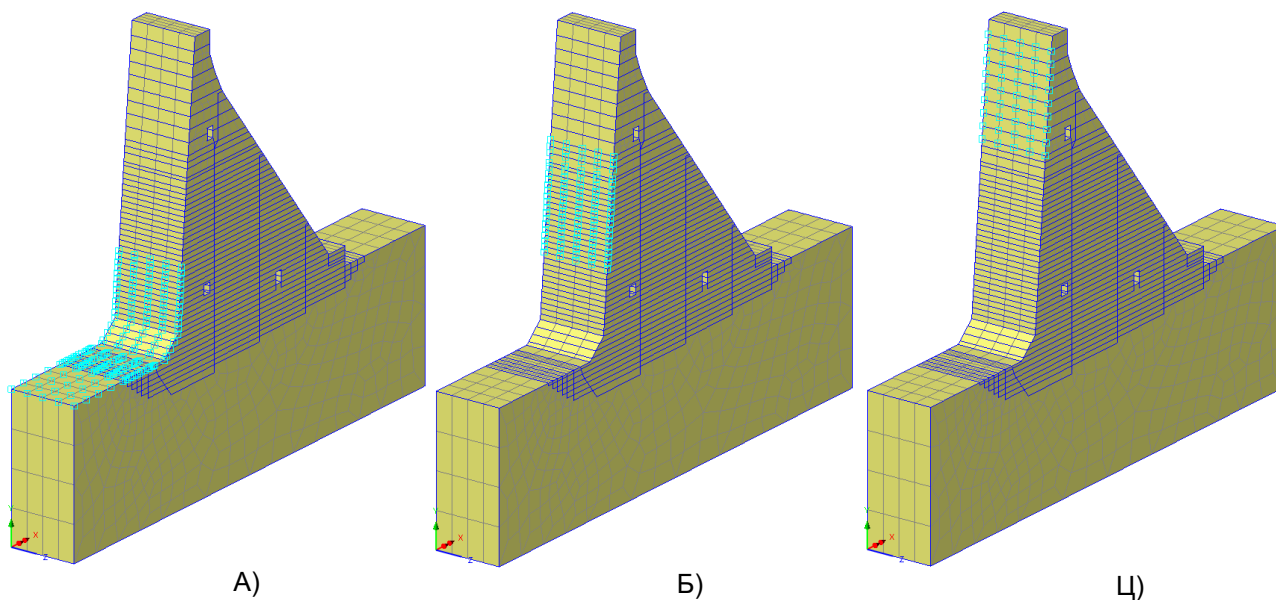
- Тип III - Контурни услови по површинама блокова које су у додиру са водом

Пуњење акумулације до коте 225,0 mm (слика 31.) спроведено је у корацима (слика 32.). По свим оквашеним површинама блокова са узводне стране задата је вредност температуре воде у акумулацији која износи 9,0°C [85].

Температура воде са узводне стране по дубини је константна због струјања воде услед рада захвата за електрану у зони узводног лица бране (у прорачуну није примењен модел расподеле температуре воде по дубини [64] који је карактеристичан за дубоке акумулације, видети поглавље 3.1.4). Са низводне стране, приказана непреливна ламела бране није у контакту са доњом водом тако да утицај температуре доње воде на конструкцију није разматран.



Слика 31. Приказ задатог контурног услова по површинама блокова које су у додиру са водом на узводном лицу ламеле бране



Слика 32. Приказ задатог контурног услова, у корацима, по површинама блокова које су у додиру са водом, на узводном лицу ламеле бране (важи принцип суперпозиције $A+B$ и $A+B+Ц$)

- Тип IV - Температура припадајуће стенске масе

Температура припадајуће стенске масе је усвојена као константна средња вишегодишња вредност и износи $13,0^{\circ}\text{C}$.

- Тип V - Температура свеже бетонске мешавине

Температура свеже бетонске мешавине узима вредност из интервала од 9,50 до 13,10 °C [85] у зависности од периода године у којем се врши њено справљање и транспорт (табела 7).

Табела 7. Измерене средње месечне вредности [85] температуре свеже бетонске мешавине

Месец	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI
$T(x,y,z,\tau = 0)$ (°C)	10,0	9,7	9,5	9,5	9,7	9,7	12,3	13,1	12,9

Утицај Сунчевог зрачења није разматран у оквиру овог истраживања.

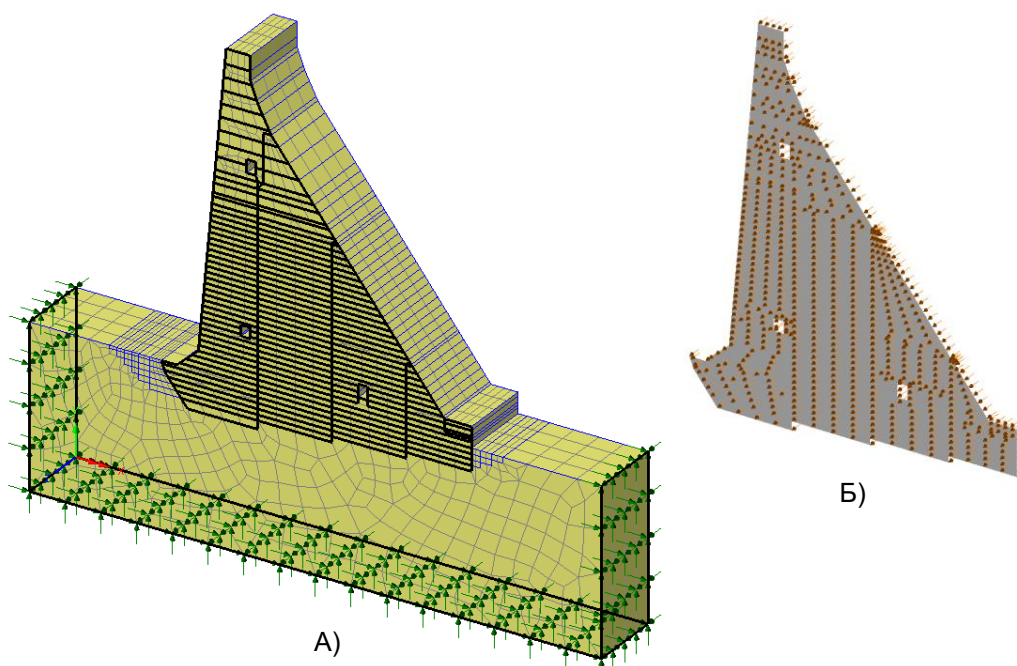
6.2.6 Контурни услови за напонско-деформацијску анализу

У прорачуну напонског стања, контурни услов по померањима задат је тако да је на доњој, узводној и низводној граници стенске масе спречено померање чворова (u) у свим правцима (слика 33. А).

$$u_x = u_y = u_z = 0 \quad (53)$$

На овај начин омогућено је реално понашање стенске масе као и њена деформација услед сопствене тежине у поређењу са традиционалним прорачунским моделима бетонских брана који су моделирани без припадајуће стенске масе (у зони темељне спојнице спречено померање у свим правцима).

Алтернативно, гранични услови дуж стенске масе могу се задати и тако да су на узводној, низводној и бочним границама стенске масе спречена померање чворова у управном правцу посматране границе а на доњој граници спречена померање чворова у свим правцима. Уколико би границе припадајуће стенске масе биле на великој удаљености од објекта, могло би се по свим бочним границама, као и на доњој граници, спречити померање у свим правцима.



Слика 33. Контурни услов за спровођење напонске анализе у зони стенске масе (А)
и на местима дилатационих разделница (Б)

За потребе анализе утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на термичке напоне затезања, извршено је моделирање овог контурног услова на бочним страницама модела (слика 33. Б).

$$u_z = 0 \quad (54)$$

Активирање контурног услова (54) врши се након достизања задате граничне вредности померања (у правцу осе бране) која симулира контакт две суседне ламеле (слика 34.). Уколико се, након контакта, вредност померања смањи испод задате граничне вредности, овај контурни услов има могућност деактивације.



Слика 34. Контурни услов у функцији граничне вредности померања (у mm)

Унутар изабраног опсега граничне вредности померања (од 0 до 5,0 mm), у оквиру овог истраживања, извршена је параметризација активирања задатог контурног услова са кораком од 1,0 mm.

6.3 Оптерећења

6.3.1 Сопствена тежина

На основу дефинисане геометрије модела и специфичних тежина материјала, добија се оптерећење услед сопствене тежине. Сопствена тежина бране и околне стенске масе узима се као иницијално оптерећење у моделу, на основу кога се дефинише почетно напонско стање.

Израчунавање напона и померања услед сопствене тежине врши се у првом кораку сваке од фаза бетонирања блокова. Добијене вредности напона представљају почетно напонско стање за следеће кораке једне фазе у којима се разматра утицај осталих оптерећења на брану.

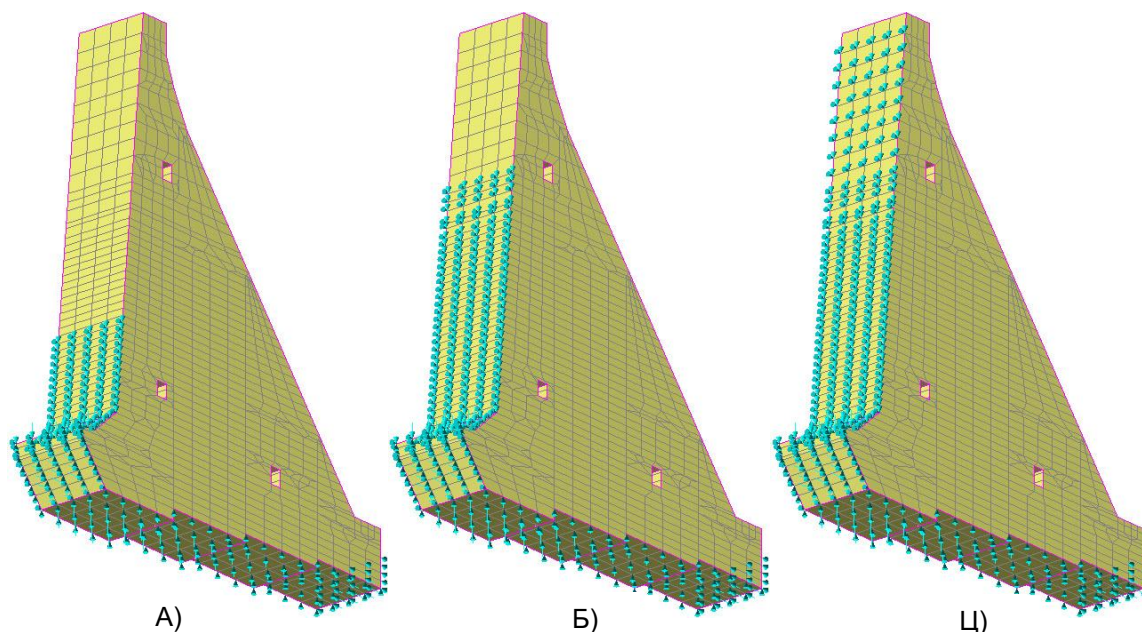
6.3.2 Температурно поље

Температурно поље за одговарајући прорачунски корак преузима се из термичког прорачуна (видети поглавље 7.1) уз помоћ једносмерне спрегнуте (coupled) анализе која је претходно описана у оквиру поглавља 3.4.

6.3.3 Хидростатички притисак и силе од узгона

Деловање хидростатичког притиска (задаје се на све оквашене површине бране) и сила од узгона (задају се дуж темељне спојнице) није разматрано приликом анализе утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања (видети поглавље 7.2) јер би се на овај начин „маскирао“ реалан утицај температуре на напонско стање у телу бране.

Деловање хидростатичког притиска и сила од узгона узето је у обзир у другом делу анализе, приликом одређивања утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања (видети табелу 4 и поглавље 7.3).



Слика 35. Оптерећење на конструкцију од хидростатичког притиска и сила од узгона
(по корацима пуњења акумулације А, Б и Ц)

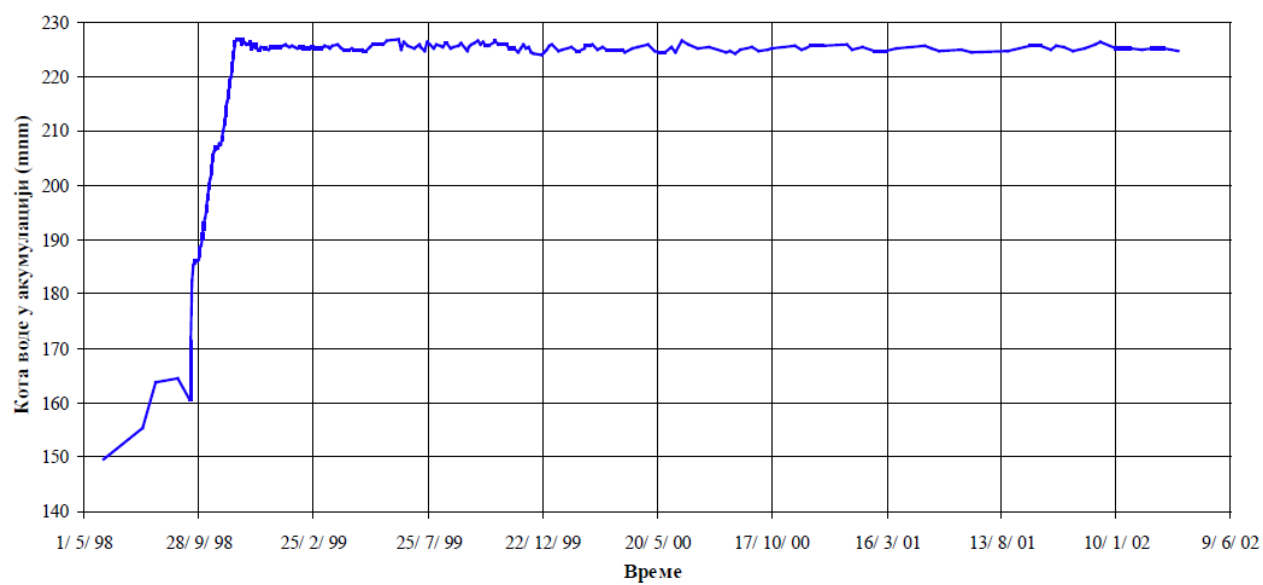
6.4 Динамика грађења бране и пуњења акумулације

Нумерички модел ламеле бране узима у обзир и карактеристичне датуме приликом грађења конструкције и то:

- датум почетка грађења - 18. октобар прве године (година у току које је почело грађење),
- прва (зимска) пауза од 12 дана у периоду 15 - 27. децембра прве године,
- друга (летња) пауза од 135 дана у периоду 20. јуна - 02. новембра друге године,
- трећа (зимска) пауза од 12 дана у периоду 15 - 27. децембра друге године и
- пуњење акумулације у периоду 27. маја - 20. новембра четврте године.

На слици 36 приказан је дијаграм пуњења акумулације [85] у току четврте године од почетка грађења конструкције. Пуњење је трајало скоро 6 месеци а након завршетка тог процеса ниво воде се, у наредне три године, кретао углавном око коте 225,0 mnm. Одступања од овог нивоа су у статичком смислу занемарљива, јер је најнижа кота износила 224,40 mnm, а највиша 226,30 mnm. Због тога је у прорачуну, након пуњења акумулације, усвојен сталан ниво воде у акумулацији на коти 225,0 mnm.

Динамика грађења бране по блоковима дефинисана је тако да прати претходно наведене карактеристичне датуме и периоде са одговарајућом прерасподелом контурних услова над измењеном геометријом модела која је условљена бетонирањем по блоковима.

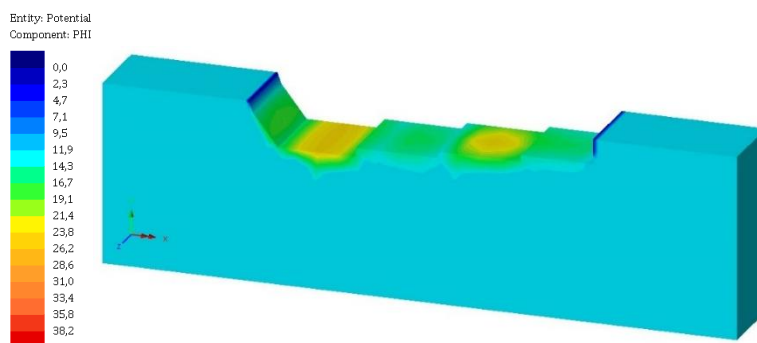


Слика 36. Пуњење и ниво воде у акумулацији у фази експлоатације [1]

7 АНАЛИЗА НАПОНСКОГ СТАЊА

7.1 Температурно поље

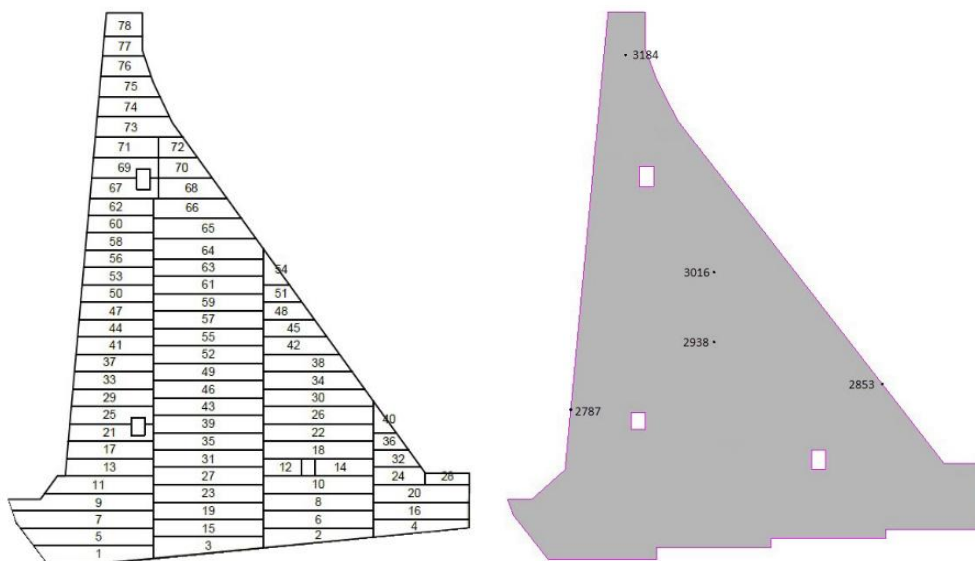
Резултати прорачуна температурног поља у припадајућој стенској маси ламеле бране (слика 37.) показују да је оно константно и једнако задатој температури од 13,0 °C, осим у делу непосредно испод темељне спојнице јер је омогућен процес провођења топлоте између стенске масе и конструкције. Узимајући у обзир чињеницу да стенска маса није предмет анализа овог рада, овај део модела ће бити изостављен из приказа у резултатима у наставку текста.



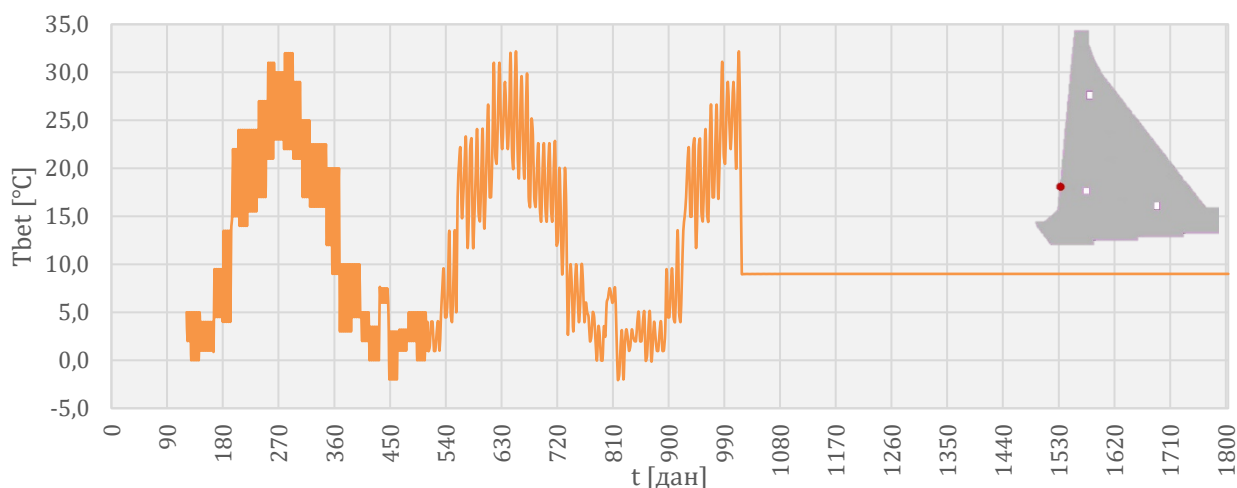
Слика 37. Приказ температурног поља у стенској маси (L-20, 84. дан - 10. јануар друге године)

7.1.1 Контрола и верификација прорачунског модела

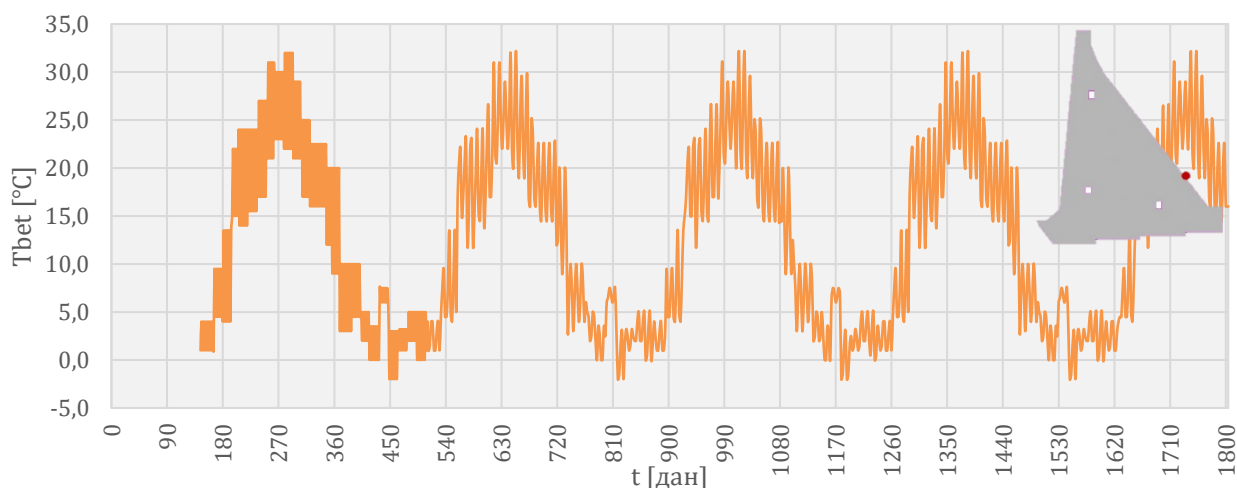
У циљу контроле формираног прорачунског модела у односу на задате контурне услове, изабрани су карактеристични контролни чворови у средњој равни ламеле на узводном и низводном лицу, у средишњем делу ламеле и у зони круне бране (слика 38.) у којима су посматрани резултати промене температуре бетона у функцији времена и дужине ламеле.



Слика 38. Карактеристични контролни чворови у средњој равни прорачунских модела



Слика 39. Температура бетона у чвору 2787

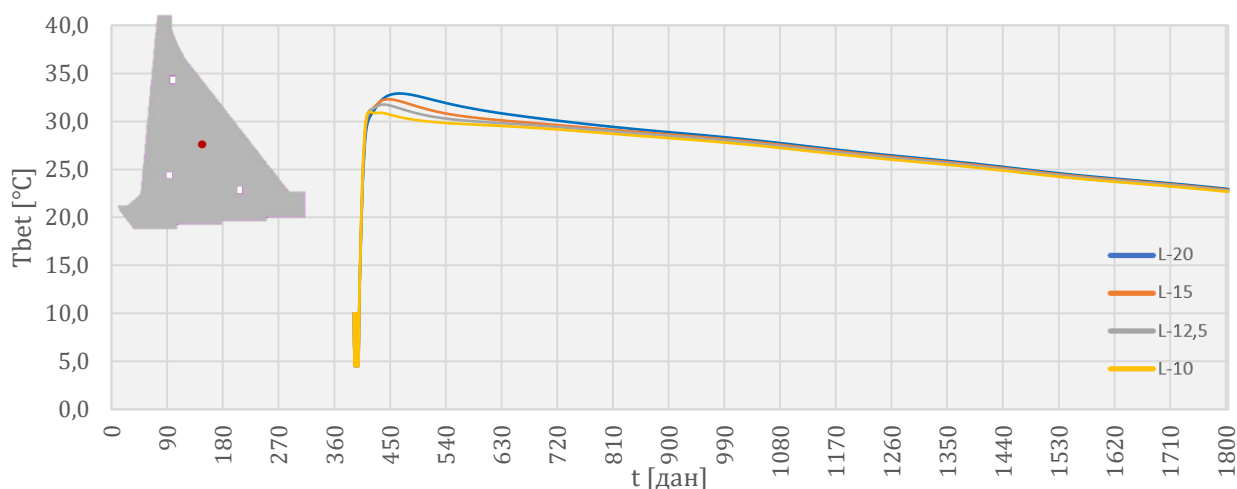


Слика 40. Температура бетона у чвору 2853

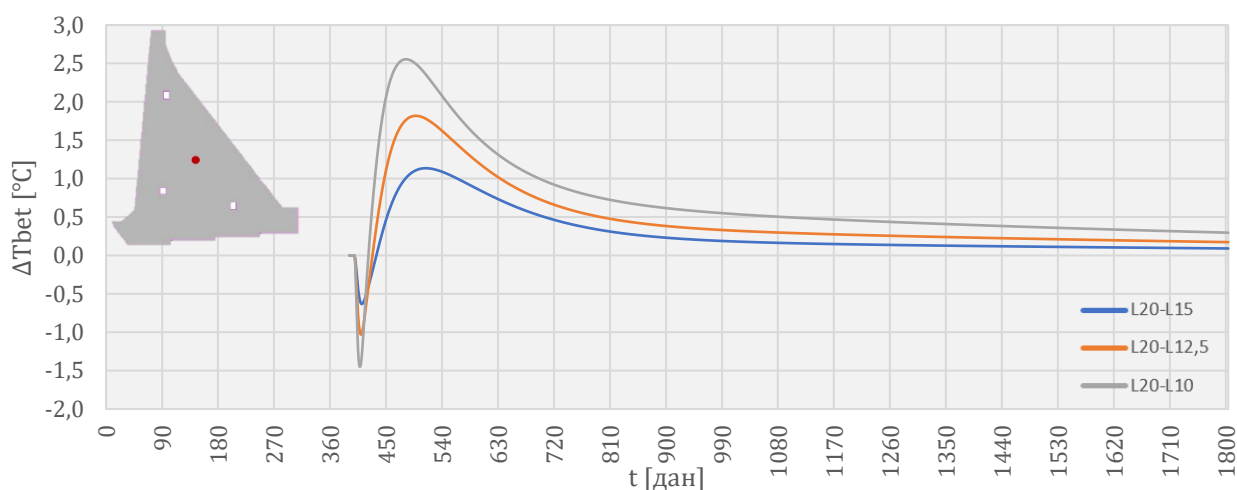
На слици 39 приказана је рачунска температура бетона у чвору 2787, који се налази у средњој равни ламеле, на узводном лицу, на средини блока 25, током периода изградње и експлоатације. Дијаграм се односи на све разматране дужине ламеле. Чвор је од тренутка бетонирања блока (121. дан од почетка грађења конструкције) па све до тренутка када је оквашен водом из акумулације (1020. дана од почетка грађења конструкције) изложен температури ваздуха која се периодично мења на годишњем нивоу (од -2,0 до 33,0 °C). Након пуњења акумулације, температура у чвору је једнака температури воде и износи 9,0 °C. На слици се могу уочити промене температуре чвора на годишњем нивоу (дуге периоде) и дневном нивоу (кратке периоде) које су последица промена температуре ваздуха током годишњих и дневних осцилација.

За разлику од температуре бетона у чвору 2787, рачунска температура бетона у чвору 2853, који се налази у средњој равни ламеле, на низводном лицу, на средини блока 30 (слика 40.), је од тренутка бетонирања блока (162. дан од почетка грађења конструкције) па све до краја разматраног прорачунског периода (1804. дан од почетка грађења конструкције) под утицајем температуре ваздуха која се периодично мења на годишњем нивоу (од -2,0 до 33,0 °C). И у овом чвору се могу уочити промене температуре чвора на годишњем и дневном нивоу у виду дугих и кратких осцилација. Како ламела бране није у контакту са доњом водом, утицај температуре воде у

чворовима на низводној страни ламеле не постоји. Дијаграм се односи на све разматране дужине ламеле.



Слика 41. Температура бетона у чвору 2938

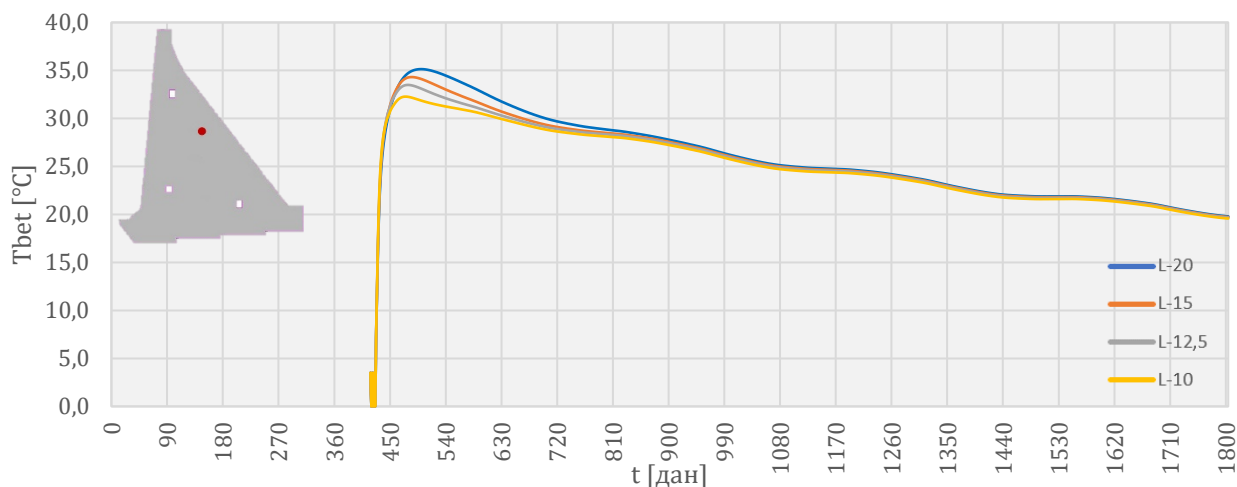


Слика 42. Промена температуре бетона у чвору 2938 при промени дужине ламеле

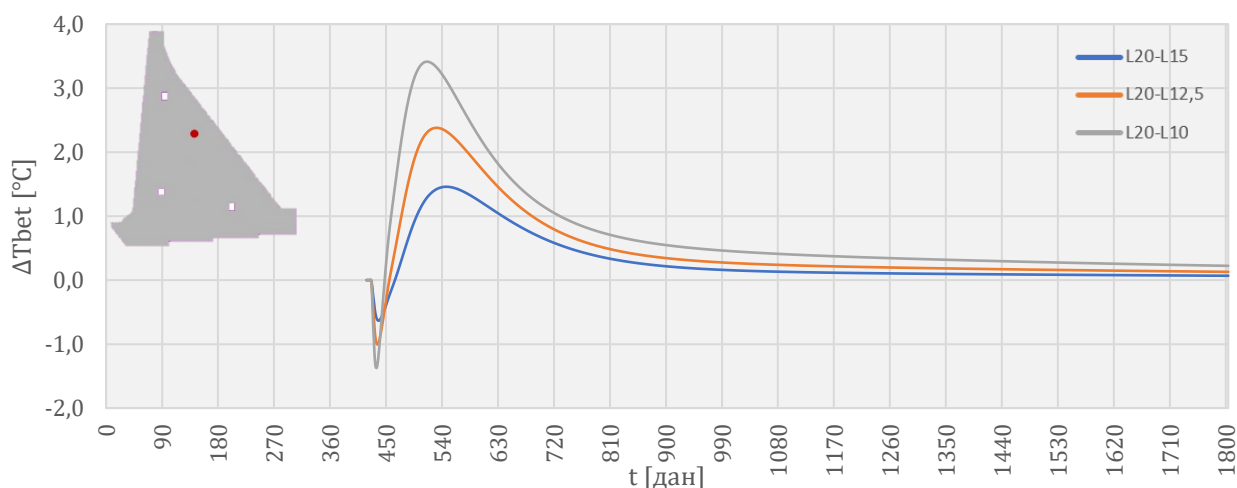
Рачунска температура бетона у чвору 2938, који се налази у средњој равни ламеле, у централној зони бране, на средини горње стране блока 55, приказана је на слици 41. Чвор је одмах након бетонирања блока (391. дан од почетка грађења конструкције) био изложен температурама ваздуха (које су се кретале у интервалу од 4,50 до 10,0 °C). Наведене осцилације између ове две вредности се уочавају на слици 41 у првих 9 дана прорачуна. Тек након 9 дана, преко чвора 2938 је избетониран блок 57, а затим и преостали блокови, па температура у овом чвору почиње да расте, услед сада доминантног утицаја хидратације цемента, и достиже следеће максималне вредности у зависности од разматране дужине ламеле: 32,90 °C (L-20), 32,30 °C (L-15), 31,75 °C (L-12,5) и 30,99 °C (L-10).

Такође, максималне вредности температура у бетону јављају се у различитим тренуцима у зависности од разматране дужине ламеле: након 74 дана (L-20), након 55 дана (L-15), након 48 дана (L-12,5) и након 25 дана (L-10). Након достизања максималне вредности, евидентан је процес хлађења бетона у посматраном чвору који се не завршава ни у крајњем прорачунском тренутку, у којем има следеће вредности: 22,95 °C (L-20), 22,86 °C (L-15), 22,78 °C (L-12,5) и 22,65 °C (L-10). На слици 42 приказане су промене вредности израчунатих температура у чвору 2938 које се јављају са променом

дужине ламеле, а у односу на вредности температура које су добијене у термичком прорачуну за ламелу дужине 20,0 m. Са наведене слике се може уочити да максимална вредност промене температуре у посматраном чвору износи 1,14 °C за редукцију од 5,0 m, 1,82 °C за редукцију од 7,50 m, односно 2,55 °C за редукцију дужине ламеле од 10,0 m.



Слика 43. Температура бетона у чвору 3016

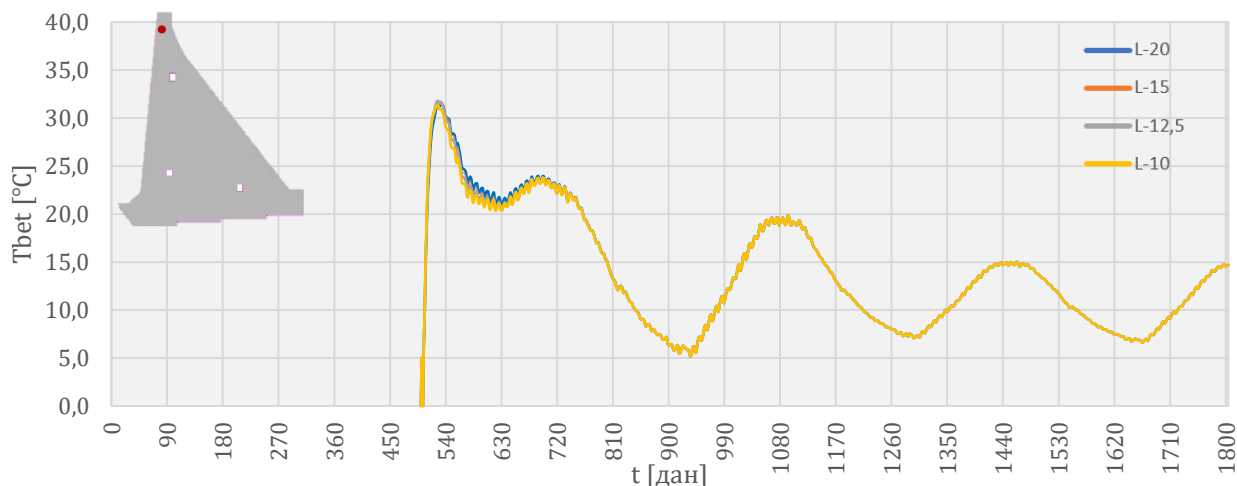


Слика 44. Промена температуре бетона у чвору 3016 при промени дужине ламеле

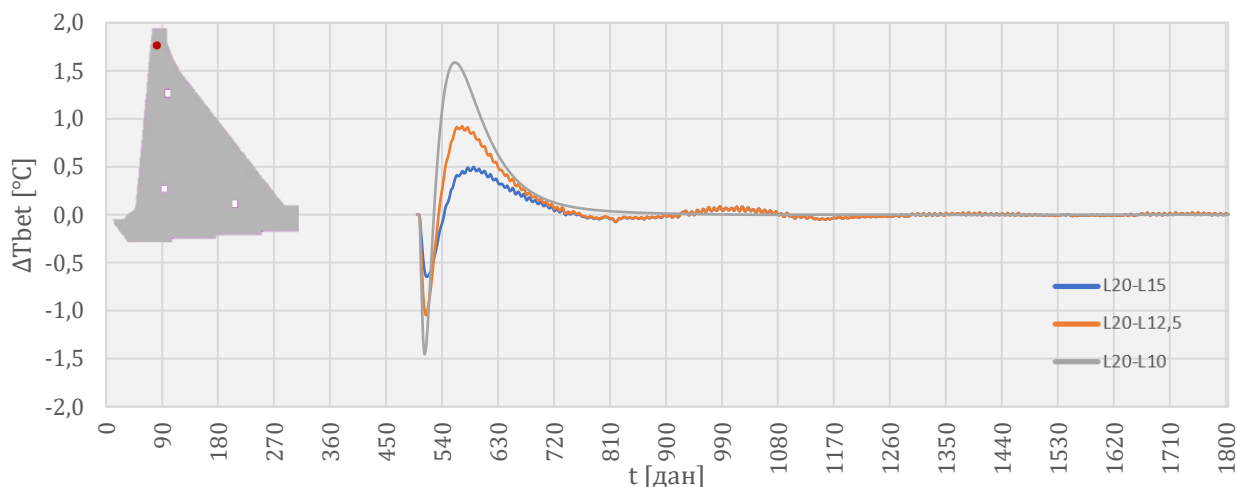
Рачунска температура бетона у чвору 3016, који се налази у средњој равни ламеле, изнад централне зоне, а ближе низводном лицу, на средини горње странице блока 61, приказана је на слици 43. Чвор је одмах након бетонирања блока (418. дан од почетка грађења конструкције) био изложен температурама ваздуха (које су се кретале у интервалу од 0,0 до 3,50 °C). Наведене осцилације између ове две вредности се уочавају на слици 43, такође у првих 9 дана прорачуна. Након 9 дана, преко чвора 3016 је избетониран блок 63, а затим и преостали блокови па, слично као и код чвора 2938, температура и у овом чвору почиње да расте услед сада доминантног утицаја хидратације цемента и достиже следеће максималне вредности у зависности од разматране дужине ламеле: 35,13 °C (L-20), 34,31 °C (L-15), 33,49 °C (L-12,5) и 32,27 °C (L-10).

Такође, и максималне вредности температура у бетону јављају се у различитим тренуцима у зависности од разматране дужине ламеле: након 83 дана (L-20), након 66 дана (L-15), након 60 дана (L-12,5) и након 56 дана (L-10). Након достизања максималне вредности, евидентан је процес хлађења бетона у посматраном чвору који се не

завршава ни у крајњем прорачунском тренутку, у којем има следеће вредности: 19,80 °C (L-20), 19,73 °C (L-15), 19,67 °C (L-12,5) и 19,57 °C (L-10). На слици 44 приказане су промене вредности израчунатих температура у чвору 3016 које се јављају са променом дужине ламеле, а у односу на вредности температура које су добијене у термичком прорачуну за ламелу дужине 20,0 m. Са наведене слике се може уочити да максимална вредност промене температуре у посматраном чвору износи 1,46 °C за редукцију од 5,0 m, 2,38 °C за редукцију од 7,50 m, односно 3,41 °C за редукцију дужине ламеле од 10,0 m.



Слика 45. Температура бетона у чвору 3184



Слика 46. Промена температуре бетона у чвору 3184 при промени дужине ламеле

Рачунска температура бетона у чвору 3184, који се налази у средњој равни ламеле, у зони круне бране, на средини горње странице блока 76, приказана је на слици 45. Чвор је након бетонирања блока (500. дан од почетка грађења конструкције) био изложен температурама ваздуха (које су се кретале у интервалу од 0,0 до 5,0 °C). Наведене осцилације између ове две вредности се на слици 45 уочавају током прва 4,5 дана прорачуна. Након 4,5 дана, преко њега је избетониран блок 77, а затим и завршни блок 78. Слично као и код чворова 2938 и 3016, температура и у овом чвору, након бетонирања блокова изнад, почиње да расте услед ослобађања топлоте хидратације цемента и достиже следеће максималне вредности у зависности од разматране дужине ламеле: 31,47 °C (L-20), 31,82 °C (L-15), 31,79 °C (L-12,5) и 31,31 °C (L-10). И у овом чвору се максималне вредности температура у бетону јављају у различитим тренуцима у зависности од разматране дужине ламале: након 32 дана (L-20), након 27 дана (L-15 и

L-12,5) и након 25 дана (L-10). Након достизања максималне вредности, евидентан је процес хлађења бетона, али уз знатан утицај сезонских промена температуре ваздуха услед близине овог чвора круни бране. Овај процес се не завршава ни у крајњем прорачунском тренутку, у којем чвор у бетону има вредност од 14,68 °C за све разматране дужине ламеле. Може се рећи да температура бетона у овом чвору, услед његовог положаја, тежи средњој годишњој температури ваздуха. Брже хлађење бетона у чвору 3184, у односу на чворове 3016 и 2938, може се приписати управо утицају температуре ваздуха којој је чвор 3184 изложенији у току грађења и експлоатације. Чворови 2938 и 3016 су смештени дубље у маси бетона, а амплитуда продора спољашње температуре ваздуха опада са приближавањем централном делу ламеле бране. На слици 46 приказане су промене вредности израчунатих температура у чвору 3184 које се јављају са променом дужине ламеле, а у односу на вредности температура које су добијене у термичком прорачуну за ламелу дужине 20,0 m. Са наведене слике се може уочити да максимална вредност промене температуре у посматраном чвору износи 0,50 °C за редукцију од 5,0 m, 0,92 °C за редукцију од 7,50 m, односно 1,59 °C за редукцију дужине ламеле од 10,0 m.

Са слика 42., 44. и 46. се може уочити да је промена температуре бетона у почетном делу дијаграма негативна. Наведена појава се може објаснити већим утицајем амбијенталних температура на ламеле мањих дужина (односно на мање димензије блокова). Тек када се избетонирају блокови изнад, утицај хидратације постаје доминантнији па промена постаје позитивна.

У циљу верификације прорачуна температурног поља, у контролним чворовима 3016 и 3184, код којих се на претходно приказаним сликама уочава амплитуда продора температуре ваздуха, извршен је и прорачун аналитичке вредности наведене амплитуде уз помоћ поједностављене методе која је приказана у оквиру приручника америчког института за бетон [86]. Принцип примене ове методе приказан је и у оквиру истраживања које су спровели и *Léger, Venturelli* и *Bhattacharjee* [17]. Наведени израз има следећи облик:

$$\frac{R_x}{R_0} = \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{h^2 \cdot \theta}}\right) \quad (55)$$

где је:

$$h^2 = \frac{k}{c \cdot \rho} \quad (56)$$

при чему су:

R_x – вредност амплитуде осциловања температуре у изабраној тачки у унутрашњости бетонске конструкције [°C],

R_0 – вредност амплитуде осциловања температуре у тачки на површини бетонске конструкције [°C],

x – удаљеност посматране тачке од спољашње површине бетонске конструкције [m],

h^2 – дифузивност бетона [m²/dan],

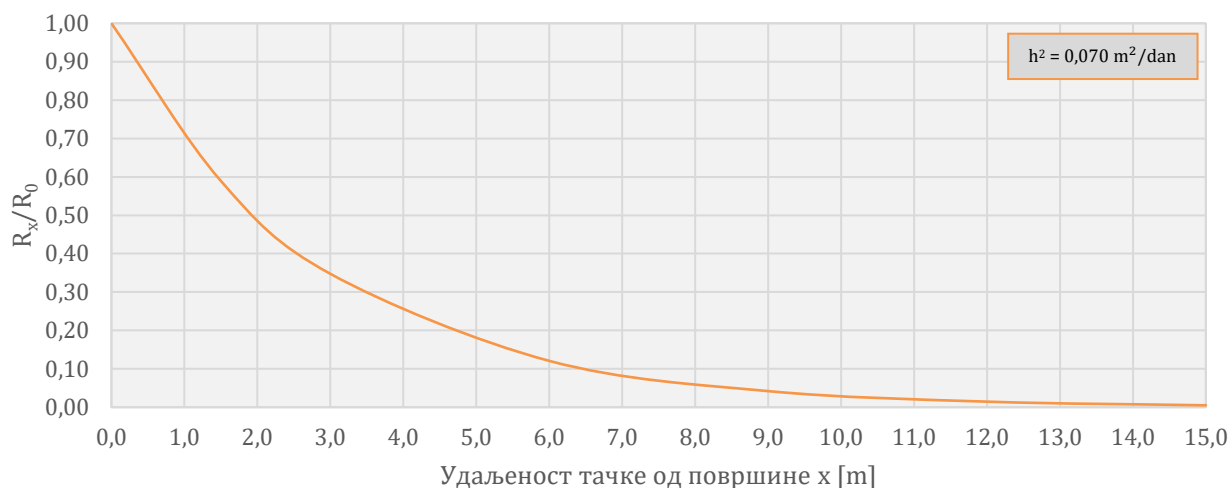
θ – период осциловања температуре ваздуха (365 дана),

k – коефицијент провођења топлоте [J/(dan m K)],

c – специфичан топлотни капацитет бетона [J/(kg K)] и

ρ – густина бетона [kg/m³].

Верификација је спроведена за последњих 12 месеци експлоатационог периода конструкције (за чвор 3016) односно за последњих 16 месеци експлоатационог периода конструкције (за чвор 3184), јер је у наведеном периоду бетон у унутрашњости конструкције у процесу хлађења, изван утицаја процеса хидратације у бетону, а у зони утицаја спољашњих температура ваздуха. Вредност амплитуде осциловања за чвор 3016 (који је од најближе спољашње површине удаљен 11,25 m) израчунате аналитички износи 0,38 °C док вредност амплитуде која је добијена прорачуном на моделу износи 0,41 °C. Такође, вредност амплитуде осциловања за чвор 3184 (који је од најближе спољашње површине удаљен 3,80 m) која је израчуната аналитички износи 5,29 °C, док је вредност добијена прорачуном на моделу 4,43 °C. Приликом израчунавања наведених аналитичких вредности амплитуда за R_0 је коришћена вредност 20,18 °C (на основу података температуре ваздуха који су дати у оквиру поглавља 6.2.5). Дијаграм зависности односа амплитуда од удаљености тачке од спољашње површине гравитационе бетонске бране, која је анализирана у оквиру овог истраживања, приказан је на слици 47.



Слика 47. Зависност односа амплитуда $\frac{R_x}{R_0}$ од удаљености тачке од спољашње површине анализиране бетонске конструкције према [17, 86].

На основу приказаних резултата у контролним чворовима, може се закључити да формиран прорачунски модели приказују реално понашање конструкције са становишта примењених контурних услова и резултата прорачуна.

7.1.2 Температурно поље у фази изградње

Пораст температуре услед ослобађања топлоте хидратације цемента изражен је у унутрашњим деловима конструкције. Претходно наведено се може уочити на сликама 48. и 50. (84. и 283. дан током периода грађења) као и на сликама 49. и 51. (512. дан, одмах по завршетку процеса грађења) за све анализиране дужине ламела. На наведеним сликама, ови делови конструкције се препознају као наранџасто-црвене зоне са температурама бетона до 41,44 °C.

Утицај зимских температура ваздуха на приповршинске зоне бране евидентан је на сликама 48. и 50. (84. дан) као и на сликама 49. и 51. (512. дан) за све анализиране дужине ламела. Утицај зимских температура утиче на хлађење површинске зоне, што доводи до скупљања бетона и појаве напона затезања.

На сликама 48. и 50. (283. дан), које приказују температурно поље у тренутку летњег прекида бетонирања које траје 135 дана (од 20. јуна до 02. новембра друге године), може се запазити утицај летњих температура на површине у додиру са ваздухом. Овакви екстремни услови, у комбинацији са порастом температуре услед хидратације цемента, утичу на пораст температура (и до 41,0 °C) у разматраним ламелама различитих дужина. Утицај високих температура ваздуха у току летње паузе одражава се и на изглед температурног поља у тренутку завршетка изградње ламеле (слике 49. и 51. - 512. дан), на којима се уочава да су температуре бетона у централној зони пресека и даље знатно увећане. Високе температуре ваздуха у дугом временском периоду утичу на појаву већег температурног градијента током хладних дана. Овај процес доводи до скупљања бетона (услед хлађења) и до појаве термичких напона затезања који, када су прекорачени, доводе до настанка и развоја прслина у бетону. Из наведеног следи да су летње паузе приликом бетонирања, као и одговарајућа нега бетона за време паузе (коришћење покривки, квашење бетона), изузетно важни како би се спречило прекомерно загревање конструкције. Процес и начин неге бетона за време летње паузе није разматран у оквиру овог истраживања.

На сликама 49. и 51. (512. дан) уочава се да на процес хлађења могу утицати и галерије у телу бране око којих се, у приказаном временском пресеку, формирају зоне утицаја ниских температура које су задате као контурни услов. Као што је наведено и у оквиру истраживања [1], вредности овог контурног услова, који је задат по обиму свих галерија, а самим тим и његов утицај на изглед температурног поља, требало би узети са извесном дозом резерве јер су, услед недостатка комплетних мерења, наведене вредности усвојене на основу средњих месечних вредности мерења спољашњих температура ваздуха.

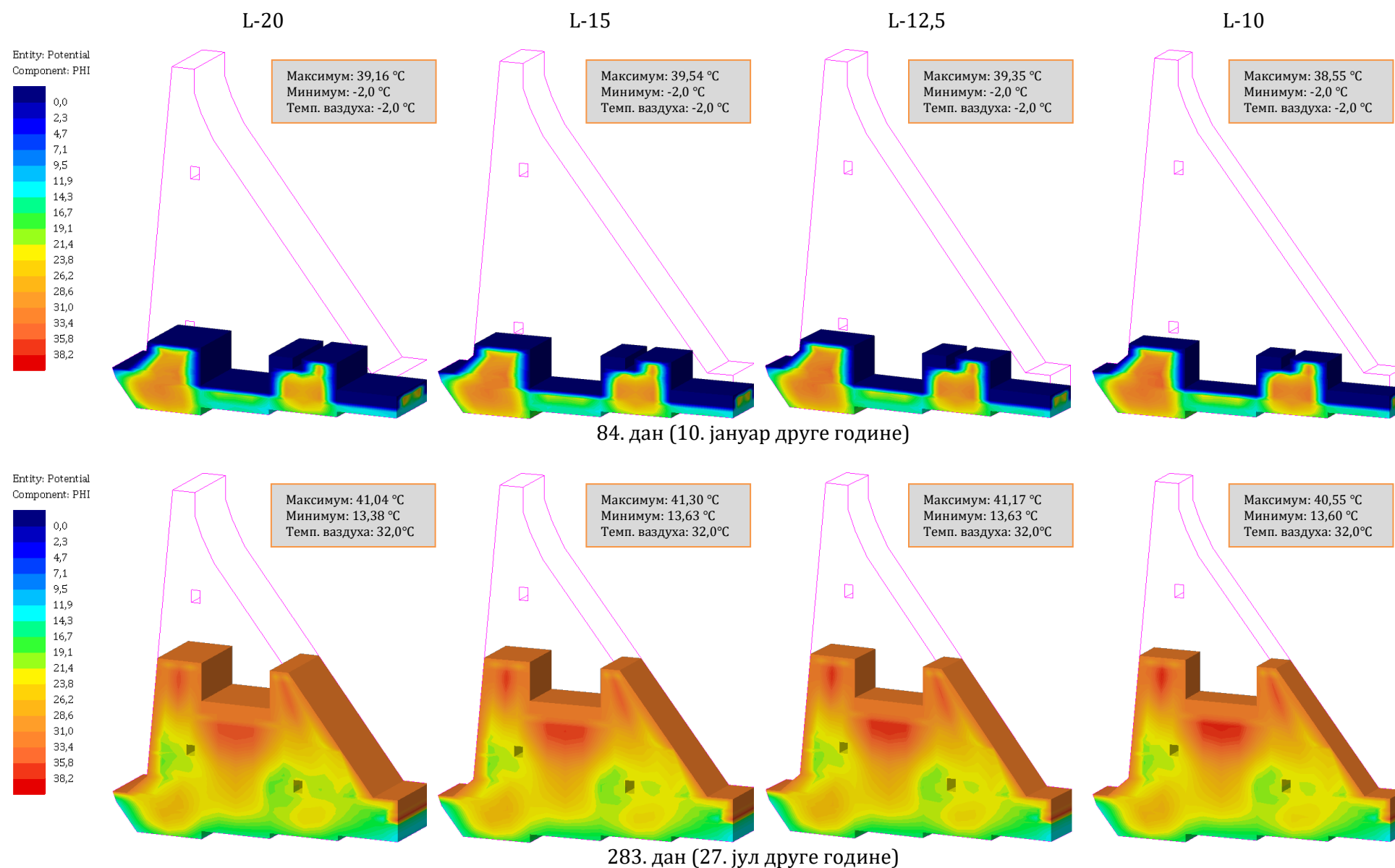
На сликама 52. и 53. приказан је изглед температурног поља у одабраним хоризонталним пресецима у току грађења за све разматране дужине ламела и то: пресек на коти 146,50 mnm (за 84. дан), пресек на коти 169,0 mnm (за 283. дан) и пресек на коти 162,75 mnm (за 512. дан). Положај наведених хоризонталних пресека одабран је тако да најбоље приказује зоне са увећаним вредностима температура у бетону као и промену ових температура са променом дужине ламеле. На истим сликама, испрекиданим линијама су означени положаји попречних и подужних пресека (узводно-низводно и ка обалама реке, респективно) наведених хоризонталних равни у којима су приказане промене температура са променом дужине ламеле (слике 54 - 62.).

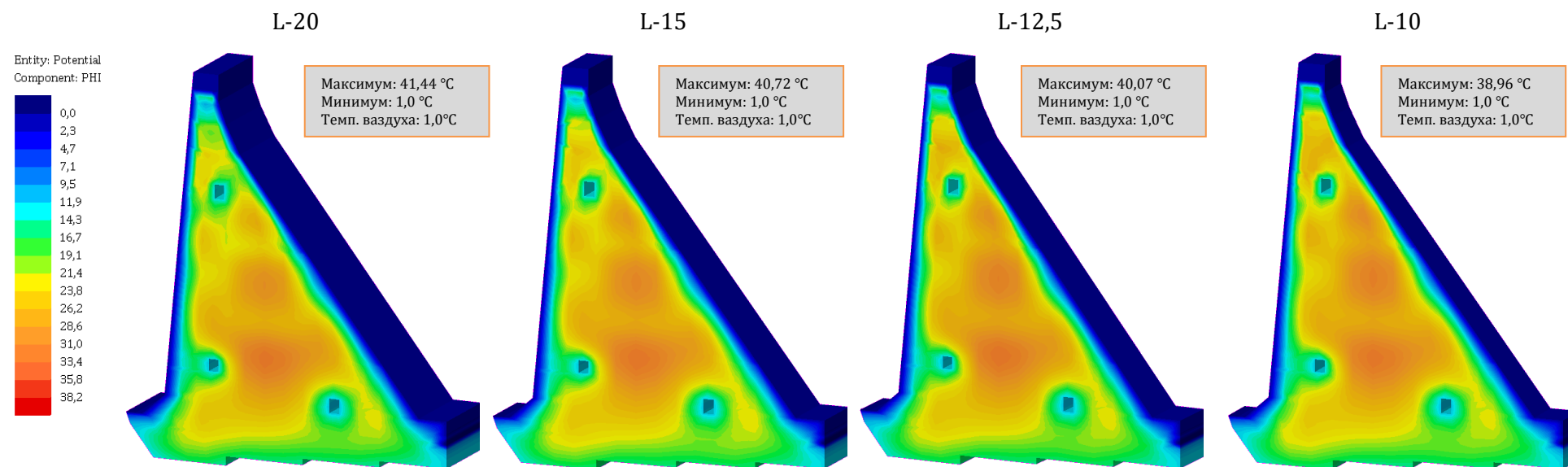
На сликама 54. до 56. приказани су дијаграми температура у бетону у хоризонталном пресеку на 146,50 mnm у ламелама разматраних дужина за 84. дан од почетка грађења конструкције (узводно-низводно и ка обалама реке). На основу дијаграма може се закључити да приказане температуре, опадају са редукцијом дужине ламеле и то за максимално: 0,39 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 1,11 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно 2,26 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m. Наведене максималне вредности промена се не налазе на местима максималних вредности температура у посматраном пресеку.

На сликама 57. до 59. приказани су дијаграми температура у бетону у хоризонталном пресеку на 169,0 mnm у ламелама разматраних дужина за 283. дан од почетка грађења конструкције (узводно-низводно и ка обалама реке). На основу дијаграма може се закључити да приказане температуре опадају са редукцијом дужине ламеле и то за максимално: 0,89 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 1,40 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно 1,64 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m. Као и код претходних дијаграма, у хоризонталном пресеку

за 84. дан, максималне вредности промена се не налазе на местима максималних вредности температура у посматраном пресеку.

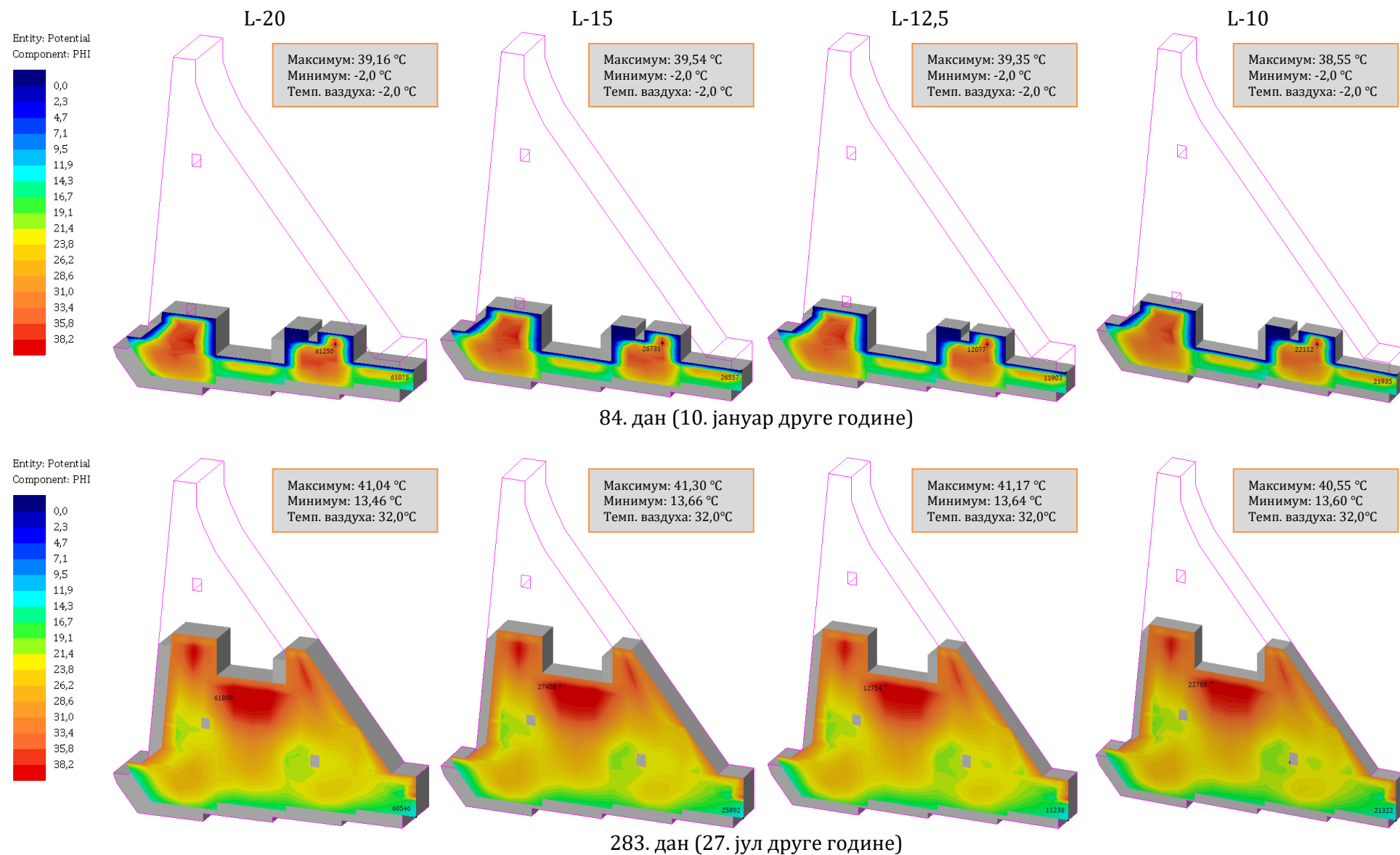
На сликама 60. до 62. приказани су дијаграми температура у бетону у хоризонталном пресеку на 162,75 mm у ламелама разматраних дужина за 512. дан од почетка грађења конструкције (узводно-низводно и ка обалама реке). На основу дијаграма може се закључити да приказане температуре опадају са редукијом дужине ламеле и то за максимално: 0,56 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 0,82 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно 1,09 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m. За разлику од претходно приказаних дијаграма, у хоризонталним пресецима за 84. и 283. дан, овде се максималне вредности промена налазе управо на местима максималних вредности температура у посматраном пресеку.

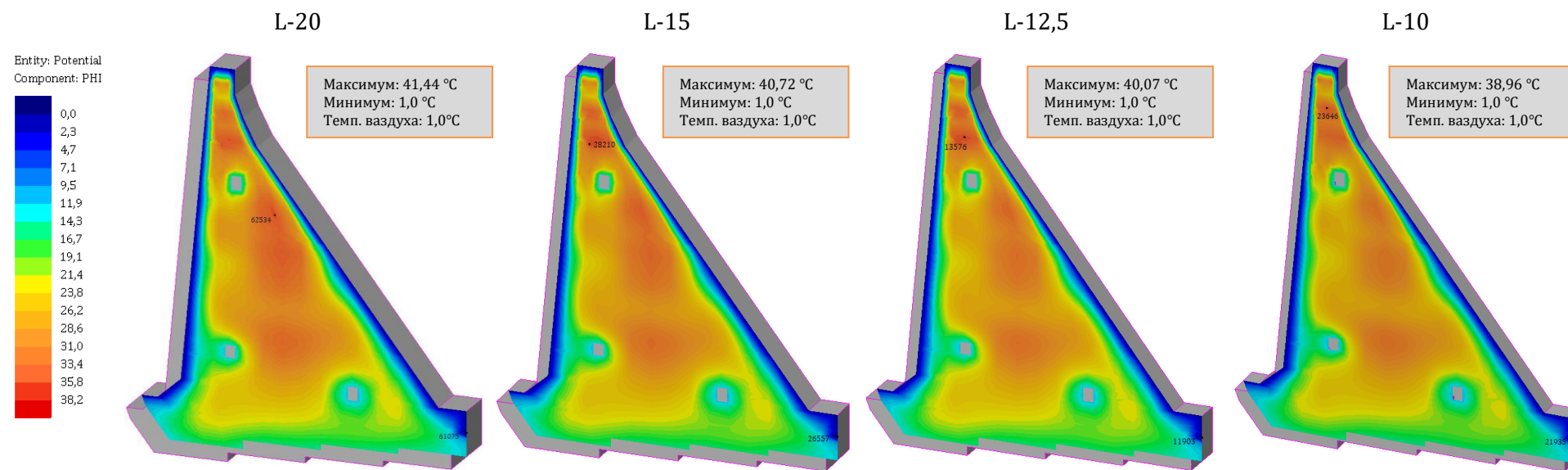




512. дан (13. март треће године)

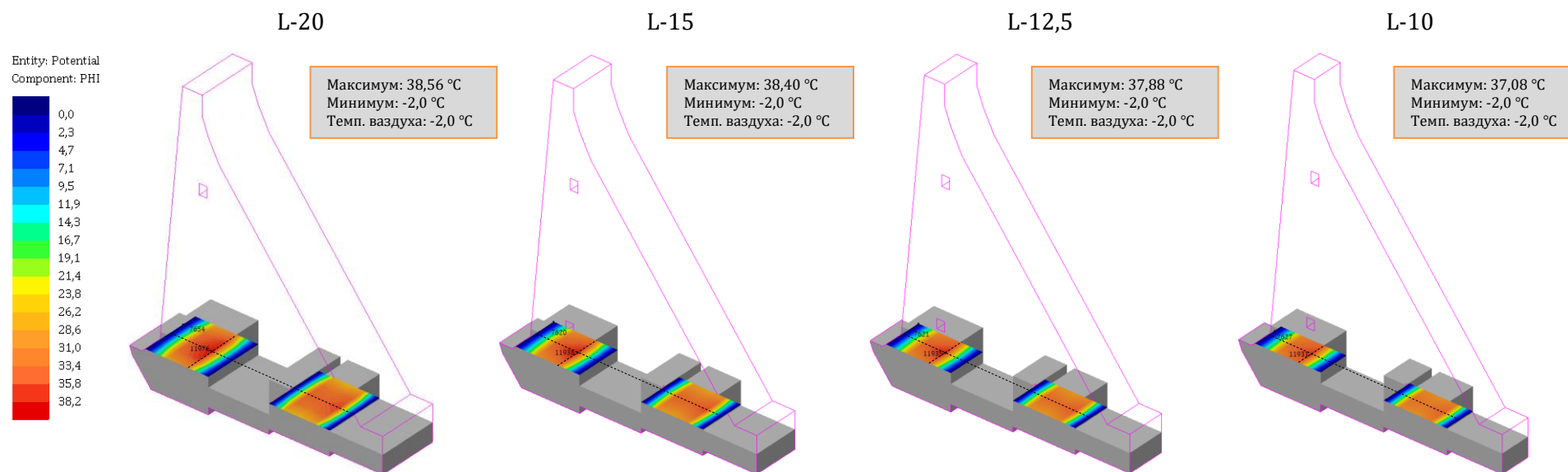
Слика 49. Температурно поље за различите дужине ламеле



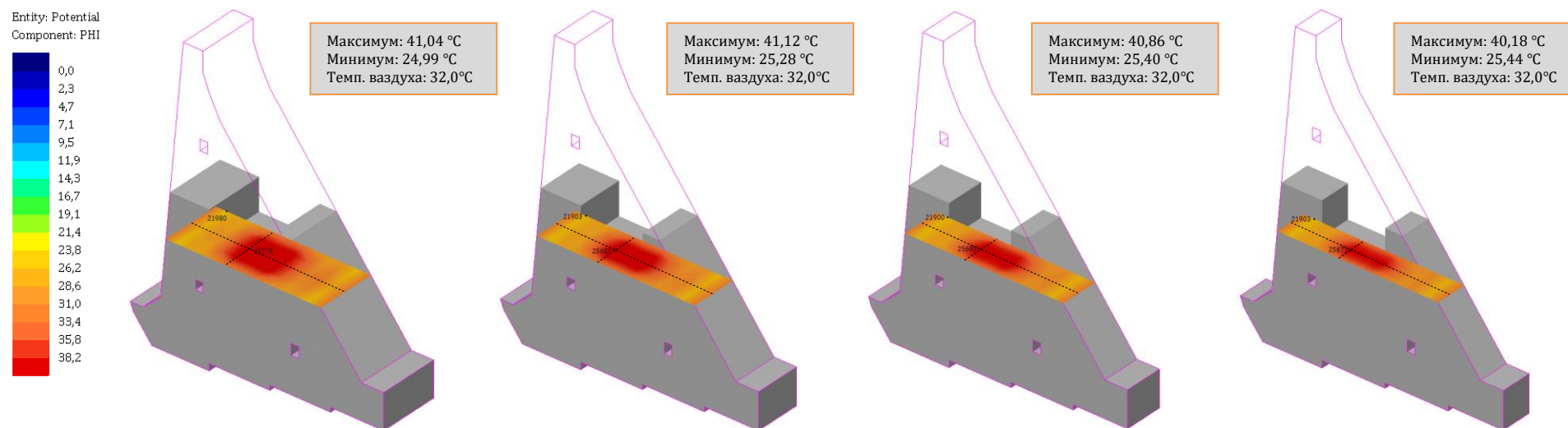


512. дан (13. март треће године)

Слика 51. Температурно поље у средњој равни ламеле различитих дужина

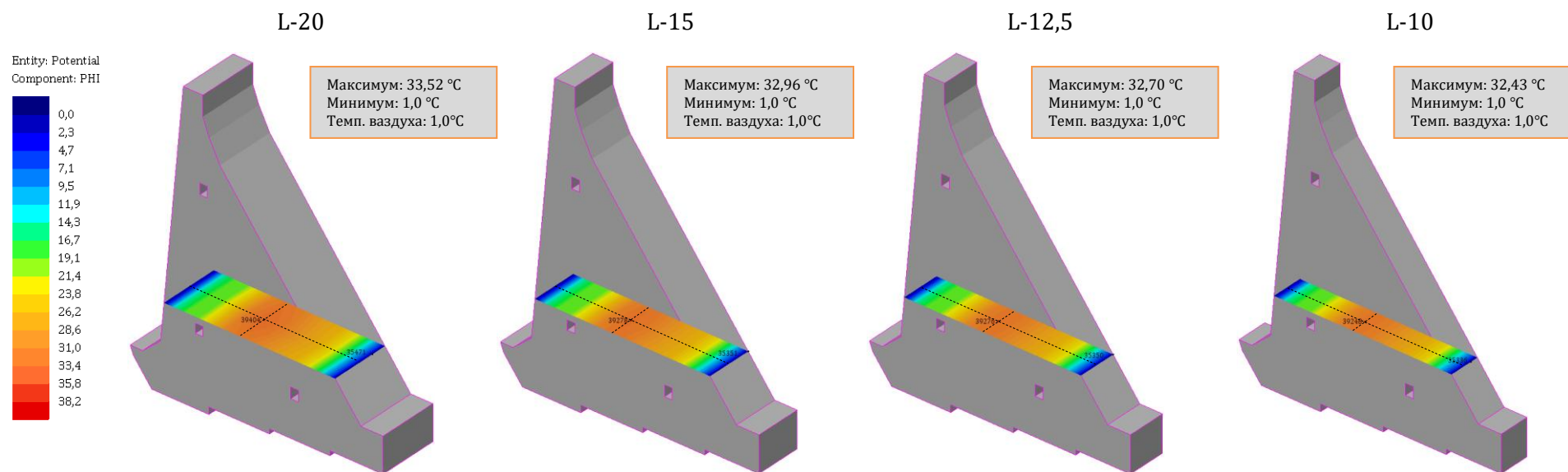


84. дан (10. јануар друге године); раван на коти 146,50 mm



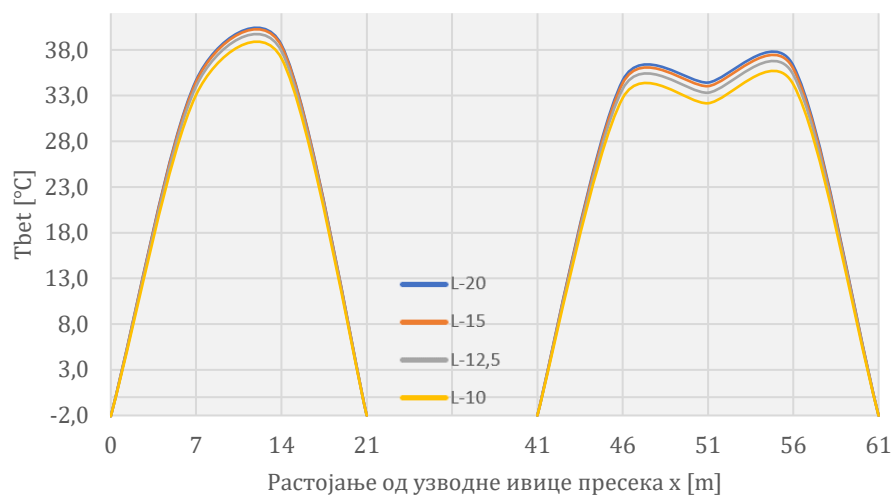
283. дан (27. јул друге године); раван на коти 169,0 mm

Слика 52. Температурно поље кроз изабрану хоризонталну раван ламела различитих дужина

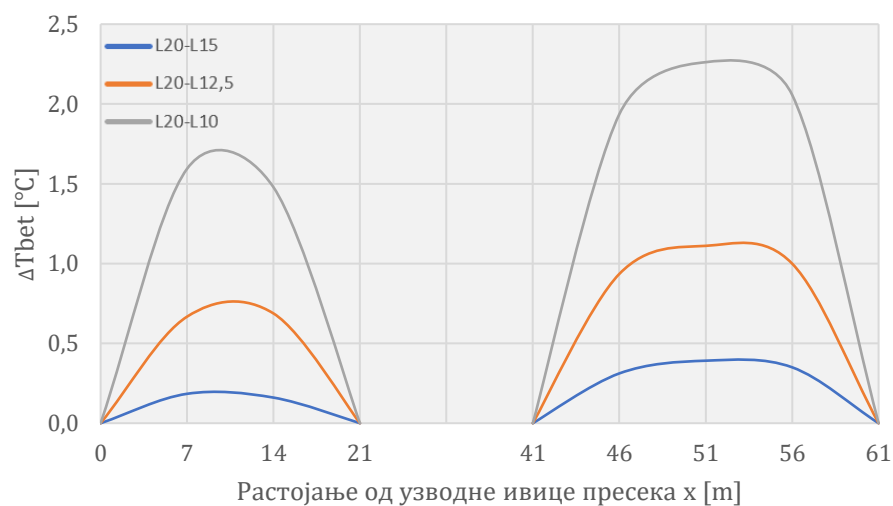


512. дан (13. март треће године); раван на коти 162,75 mnm

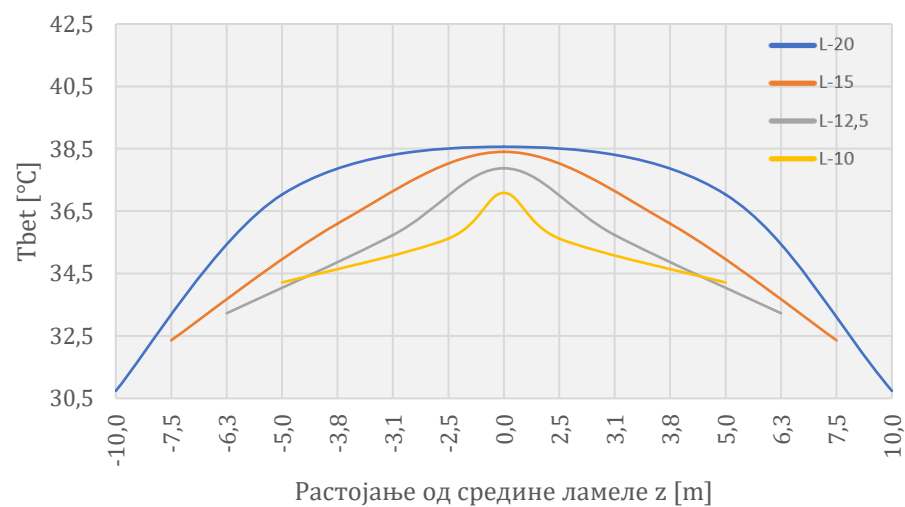
Слика 53. Температурно поље кроз изабрану хоризонталну раван ламела различитих дужина



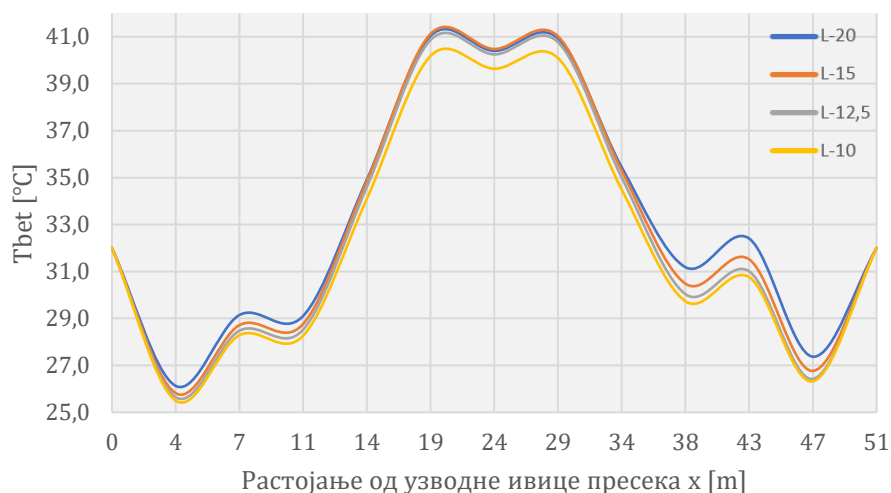
Слика 54. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 146,50 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (84. дан)



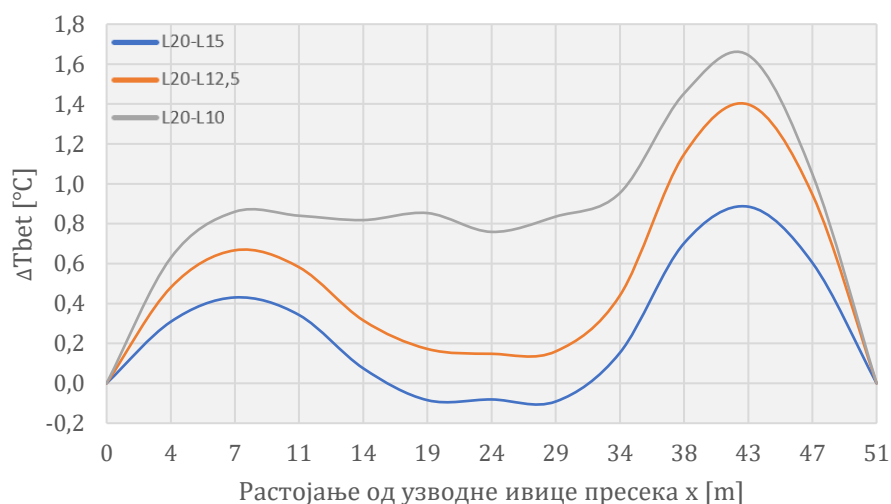
Слика 55. Промена температура у бетону у средини хоризонталног пресека на 146,50 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (84. дан)



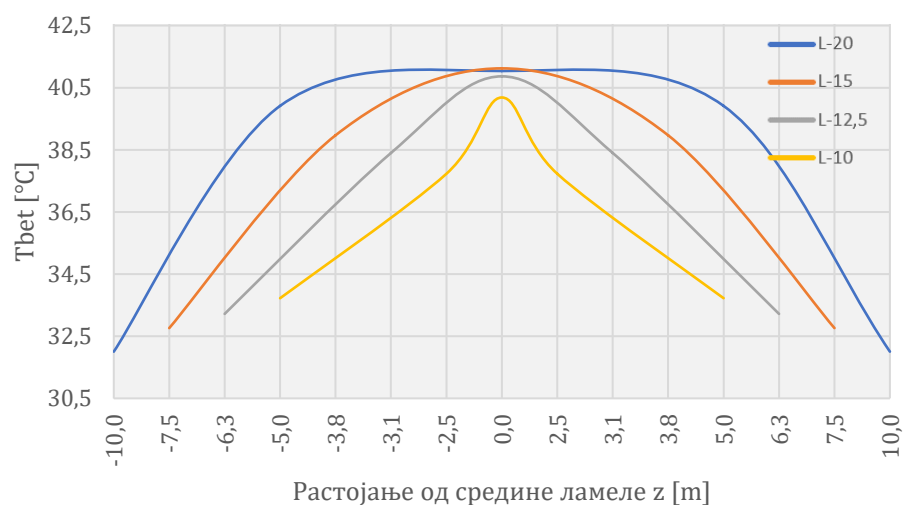
Слика 56. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 146,50 мпм (ка обалама реке) за ламеле различитих дужина (84. дан)



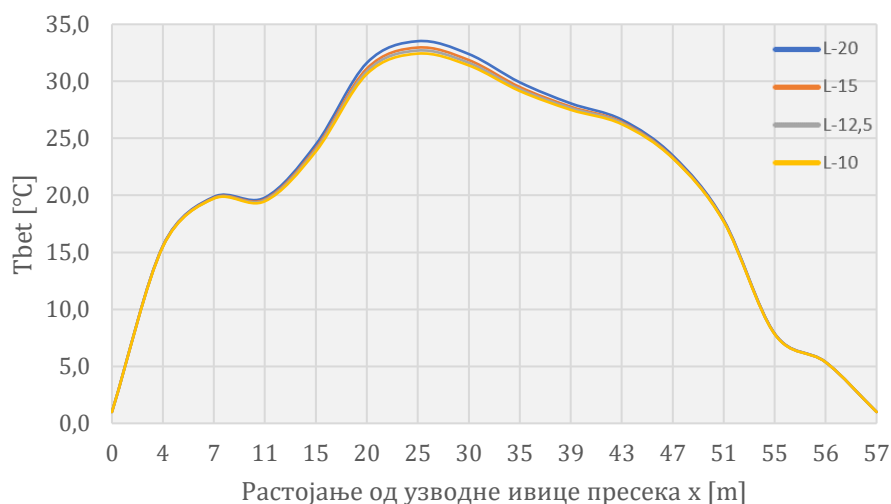
Слика 57. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 169,0 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (283. дан)



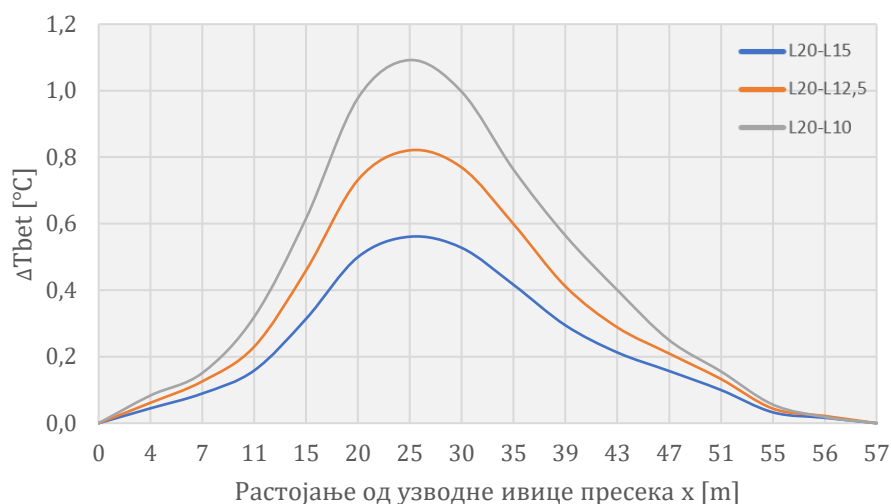
Слика 58. Промена температура у бетону у средини хоризонталног пресека на 169,0 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (283. дан)



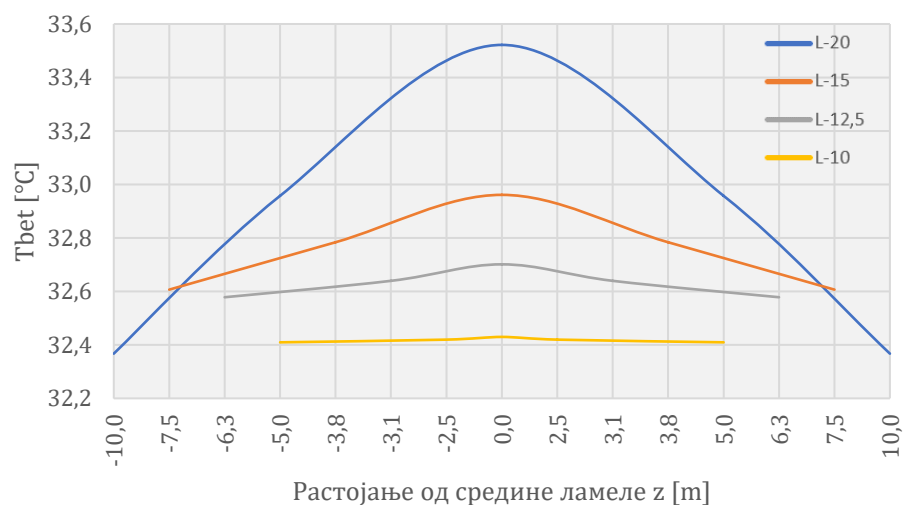
Слика 59. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 169,0 мпм (ка обалама реке) за ламеле различитих дужина (283. дан)



Слика 60. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 162,75 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (512. дан)



Слика 61. Промена температура у бетону у средини хоризонталног пресека на 162,75 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (512. дан)



Слика 62. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 162,75 мпм (ка обалама реке) за ламеле различитих дужина (512. дан)

7.1.3 Температурно поље у фази експлоатације

Одмах након завршетка грађења започиње процес постепеног хлађења конструкције. На сликама 63. и 64. као и на сликама 65. и 66. овај процес се уочава као редукција обима наранџасто - жуте зоне у централном делу попречног пресека ламеле. На сликама 64. и 66. се уочава да се хлађење не завршава у потпуности ни последњег прорачунског дана, односно ни после 3,5 године од тренутка бетонирања последњег блока конструкције, као последица процеса који су се одвили у фази изградње конструкције.

Утицај зимских температура ваздуха на приповршинске зоне ламеле бране евидентан је на сликама 63. и 65. (1505. дан) за све анализиране дужине ламела. Као и код фазе изградње конструкције, утицај зимских температура доводи до наглог хлађења објекта у површинској зони, што утиче на скупљање бетона и појаву напона затезања.

На сликама 63. и 65. (1080. дан) и на сликама 64. и 66. (1804. дан) може се видети да на процес хлађења конструкције утиче и температура воде током пуњења акумулације, као и током експлоатације (плаво обојене зоне у зони контакта са акумулацијом).

На сликама 63. и 65. (1505. дан) може се уочити да на процес хлађења и даље утичу галерије у телу бране око којих се формирају зоне утицаја ниских температура. И овде важи напомена за мерења дата у претходном поглављу, јер су наведене вредности температура, задате као контурни услов по спољним површинама галерија, одређене на основу средњих месечних вредности мерења спољашњих температура ваздуха [1].

На сликама 67. и 68. приказан је изглед температурних поља у одабраним хоризонталним пресецима током експлоатације за све разматране дужине ламела и то: пресеци на котама 205,0, 172,0 и 155,0 mm за 1080. и 1505. дан и пресеци на котама 205,0, 170,50 и 155,0 mm за 1804. дан. Положај наведених хоризонталних пресека одабран је тако да што боље прикаже вредности температура по висини ламеле као и промену ових температура са променом дужине ламеле. Резултати у приказаним пресецима приказују добро слагање са контурним условима као и знатан утицај ослобођене хидратационе топлоте и током фазе експлоатације. На истим сликама, испрекиданим линијама су означени положаји попречних и подужних пресека (узводно-низводно и ка обалама реке, респективно), у хоризонталној равни у којој се јавља максимална температура, у којима су приказане промене температура са променом дужине ламеле.

На сликама 69. до 71. приказани су дијаграми температура у бетону у хоризонталном пресеку на 172,0 mm у ламелама разматраних дужина за 1080. дан од почетка грађења конструкције (узводно-низводно и ка обалама реке). На основу дијаграма може се закључити да приказане температуре опадају са редукцијом дужине ламеле и то за максимално: 0,17 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 0,31 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно 0,51 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m. Наведене максималне вредности промена се налазе на местима максималних вредности температура у посматраном пресеку.

На сликама 72. до 74. приказани су дијаграми температура у бетону у хоризонталном пресеку на 172,0 mm у ламелама разматраних дужина за 1505. дан од почетка грађења конструкције (узводно-низводно и ка обалама реке). На основу дијаграма може се закључити да приказане температуре опадају са редукцијом дужине ламеле и то за максимално: 0,11 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 0,22 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно 0,50 °C при промени дужине

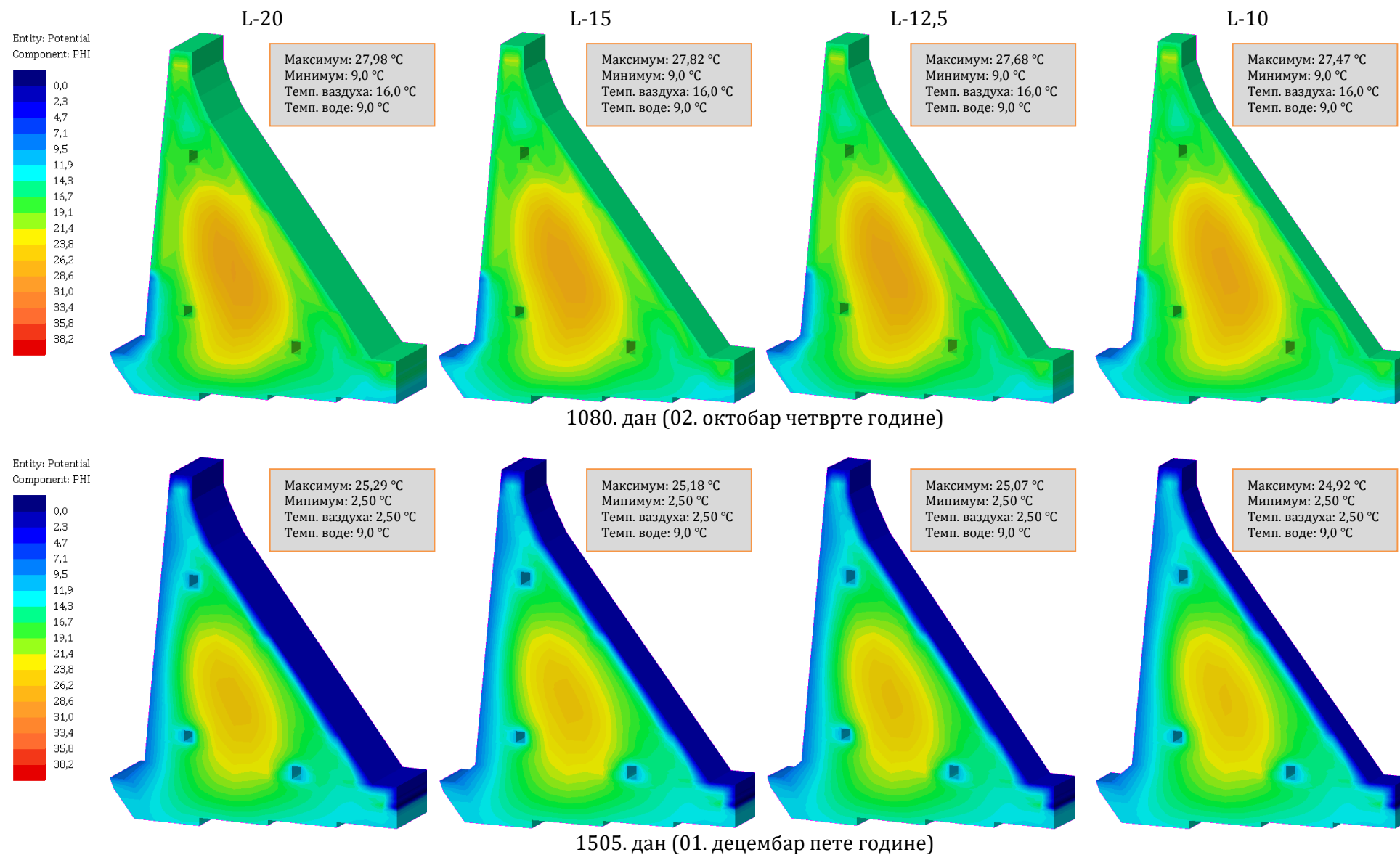
ламеле са 20,0 m на 10,0 m. Наведене максималне вредности промена се, такође, налазе на местима максималних вредности температура у посматраном пресеку.

На сликама 75. до 77. приказани су дијаграми температура у бетону у хоризонталном пресеку на 170,50 mm у ламелама разматраних дужина за 1804. дан (последњи прорачунски дан) од почетка грађења конструкције (узводно-низводно и ка обалама реке). На основу дијаграма може се закључити да приказане температуре опадају са редукцијом дужине ламеле и то за максимално: 0,09 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 0,17 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно 0,29 °C при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m. Као и код претходна два пресека током експлоатације и овде се наведене максималне вредности промена налазе на местима максималне вредности температура у посматраном пресеку.

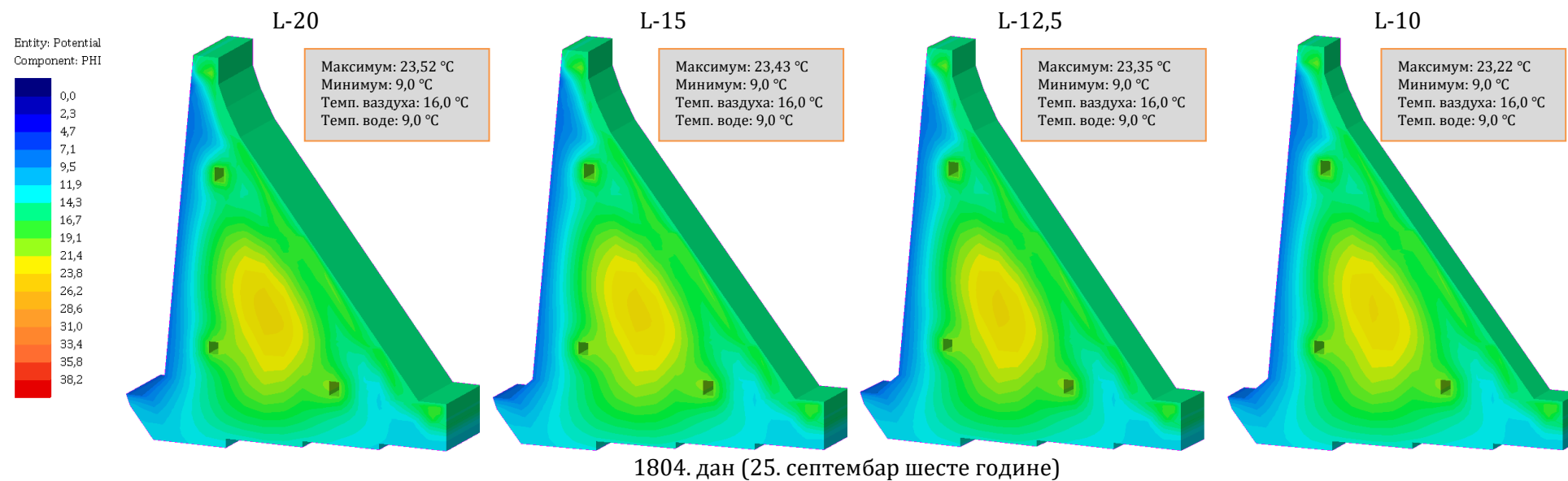
Резултати прорачуна температурног поља показују осетљивост на промену дужине ламеле конструкције. За изабране карактеристичне тачке у унутрашњости конструкције максималне вредности температура износе од 35,13 °C до 30,99 °C. Вредности су највеће на местима изнад централне зоне, ближе низводном лицу и смањују се са редукцијом дужине ламеле и до 3,41 °C. Максималне вредности температура у бетону, у изабраним карактеристичним тачкама, јављају се у различитим временским тренуцима у зависности од разматране дужине ламеле. Кашњење у достизању максималне вредности температуре износи и до 49 дана приликом промене дужине ламеле за 10,0 m, а за тачку у централној зони ламеле бране. У изабраним хоризонталним равнима, у којима су приказане вредности промене максималне температуре са променом дужине ламеле, за карактеристичне временске пресеке током процеса грађења добијени су резултати који показују да је највећа промена температуре 2,26 °C за 84. дан од почетка грађења конструкције и при промени дужине ламеле за 10,0 m. У изабраним хоризонталним равнима, у којима су приказане вредности промене максималне температуре са променом дужине ламеле, за карактеристичне временске пресеке током експлоатације, добијени су резултати који показују да је највећа промена температуре 0,51 °C за 1080. дан од почетка грађења конструкције, такође при промени дужине ламеле за 10,0 m.

Смањење температура у бетону са променом дужине ламеле је мање током периода експлоатације него током периода изградње, што се може објаснити и тежњом бетона да се изједначи са просечном вишегодишњом температуром ваздуха. Такође, требало би имати у виду и да је током експлоатације процес хидратације завршен, као и да суседне ламеле више нису смакнуте, као што је то случај током грађења, а што је додатно утицало на процес хлађења бетона.

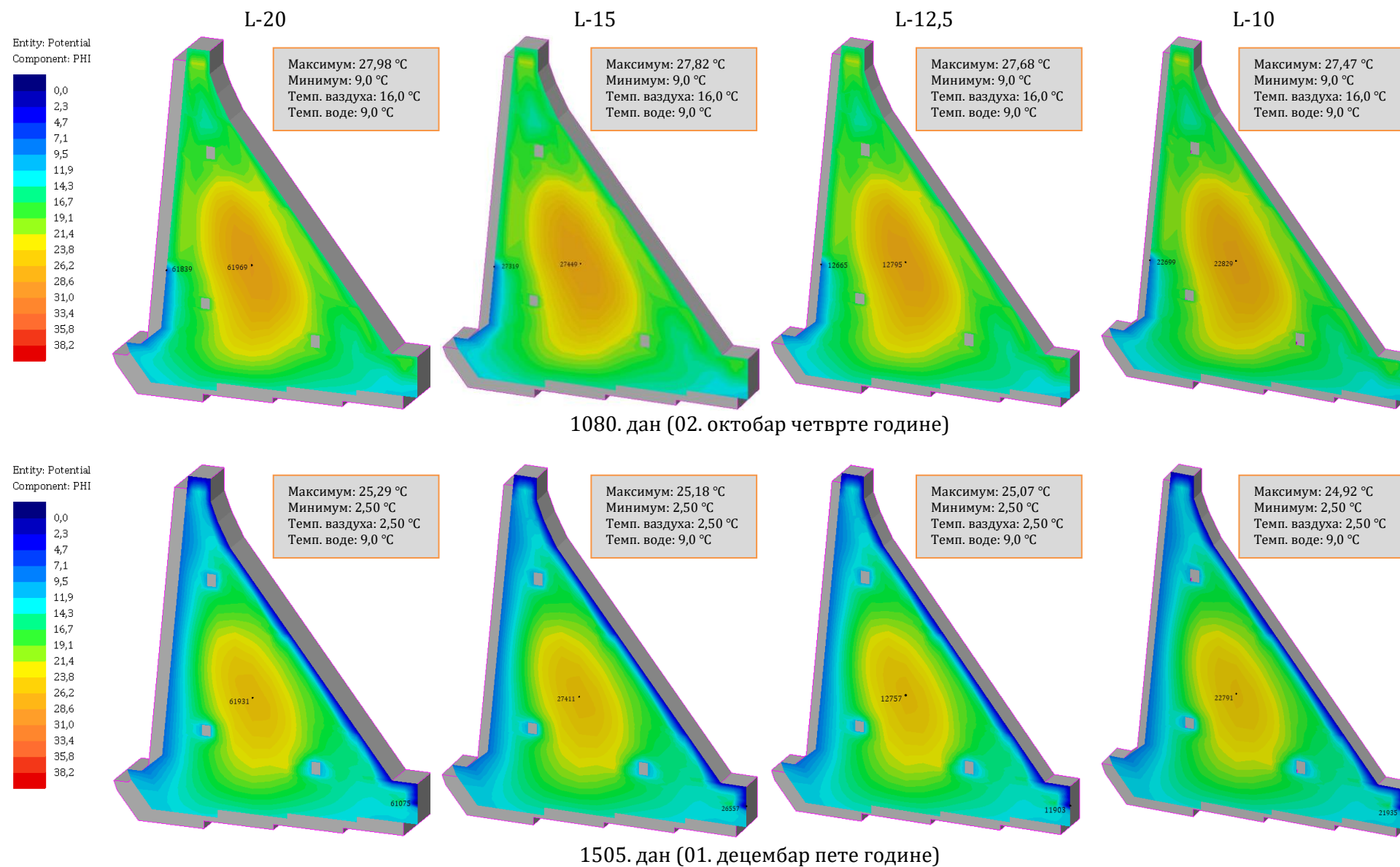
Приказани резултати температурног поља показују и да на пораст температуре у телу бране највећи утицај имају процес хидратације цемента у комбинацији са летњим температурама ваздуха у току грађења. Претходно наведено указује на значај контроле температуре бетона у условима екстремних амбијенталних температура (спровођењем мера приликом справљања мешавине, током као и након уградње – принудно хлађење, прекиди бетонирања, адекватна нега и заштита површина бетона) као и на значај избора адекватне дужине ламеле. На термичко понашање гравитационе бетонске бране која се гради методом блокова значајан утицај може да има и динамика изливања блокова. Утицај амбијенталних температура је израженији код ламела мањих дужина (односно код мањих димензија блокова) док је утицај хидратације цемента израженији код ламела већих дужина.



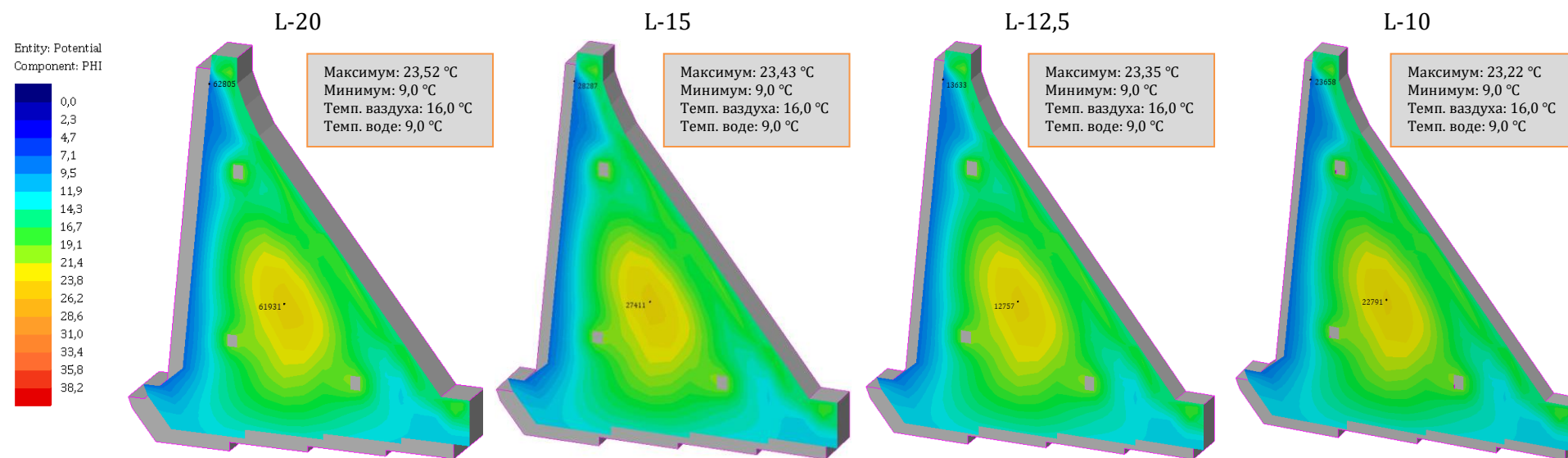
Слика 63. Температурно поље за различите дужине ламеле



Слика 64. Температурно поље за различите дужине ламеле

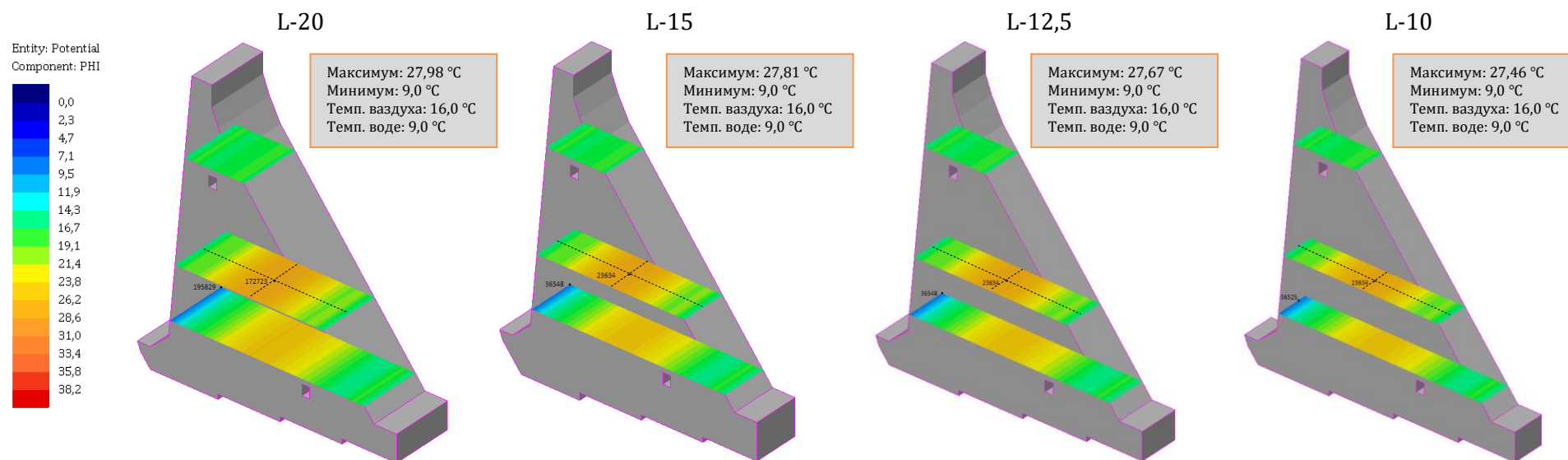


Слика 65. Температурно поље у средњој равни ламела различитих дужина

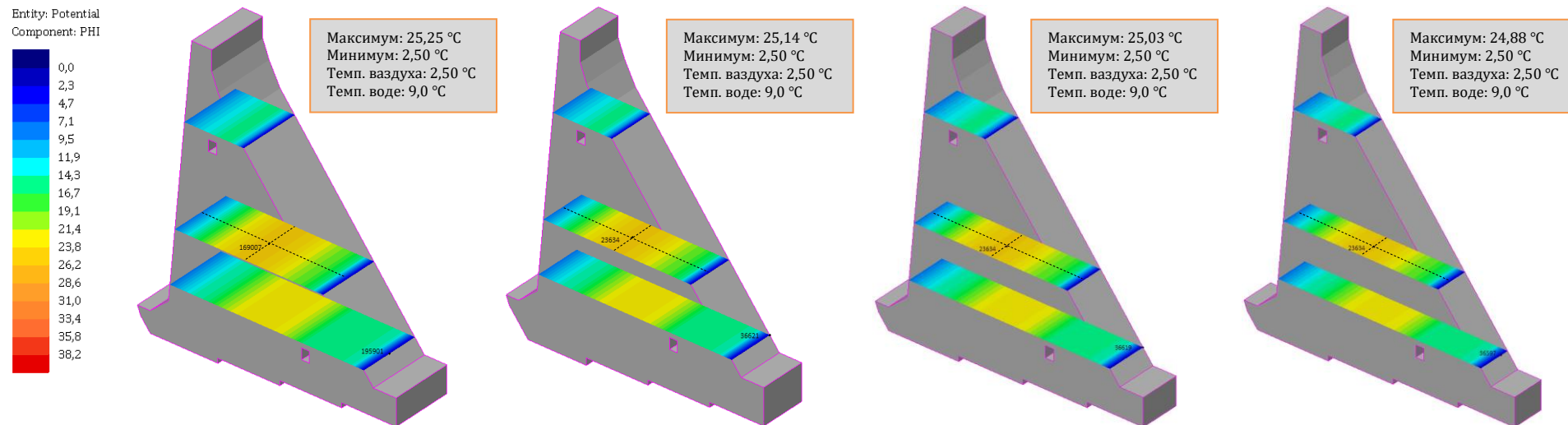


1804. дан (25. септембар шесте године)

Слика 66. Температурно поље у средњој равни ламела различитих дужина

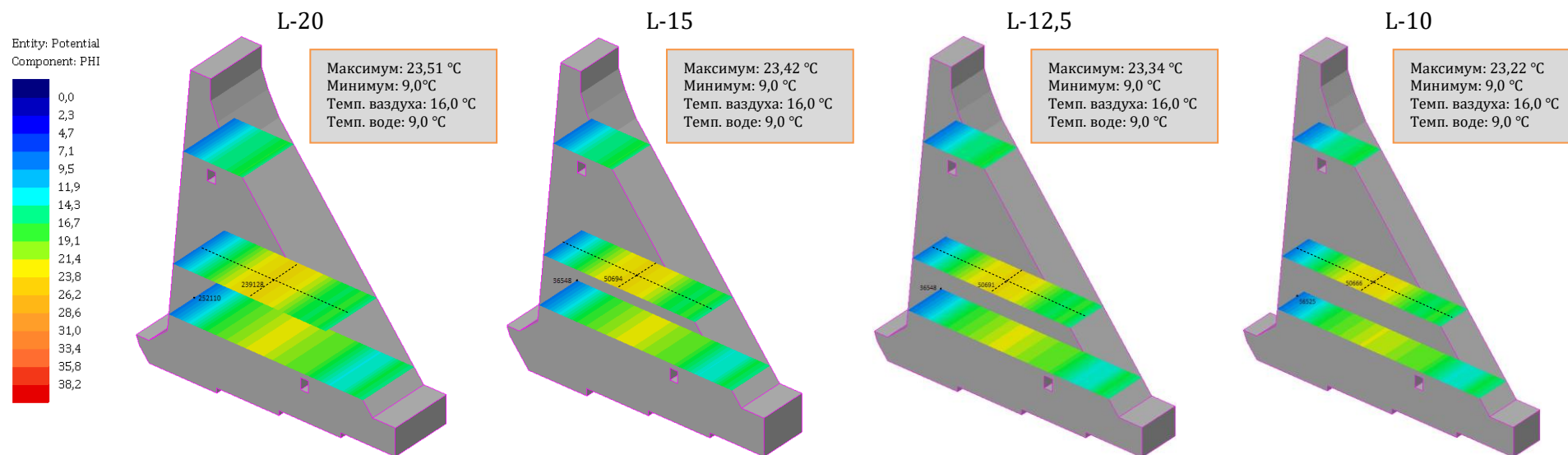


1080. дан (02. октобар четврте године); равни на коти 205,0; 172,0 и 155,0 mnm



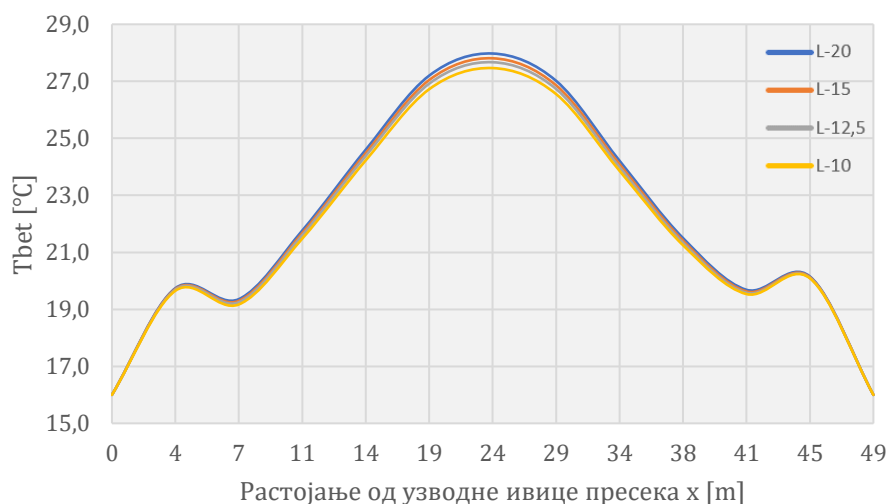
1505. дан (01. децембар пете године); равни на коти 205,0; 172,0 и 155,0 mnm

Слика 67. Температурно поље кроз изабране хоризонталне равни ламела различитих дужина

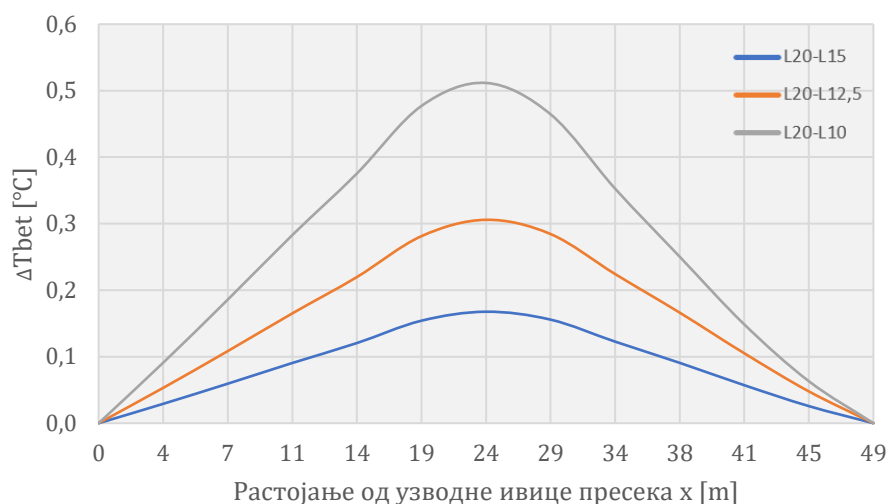


1804. дан (25. септембар шесте године); равни на коти 205,0; 170,50 и 155,0 mnm

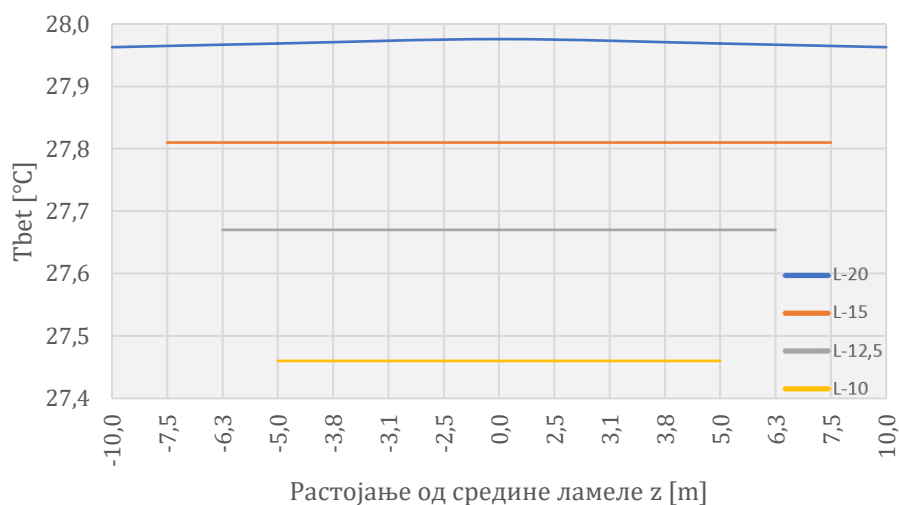
Слика 68. Температурно поље кроз изабране хоризонталне равни ламела различитих дужина



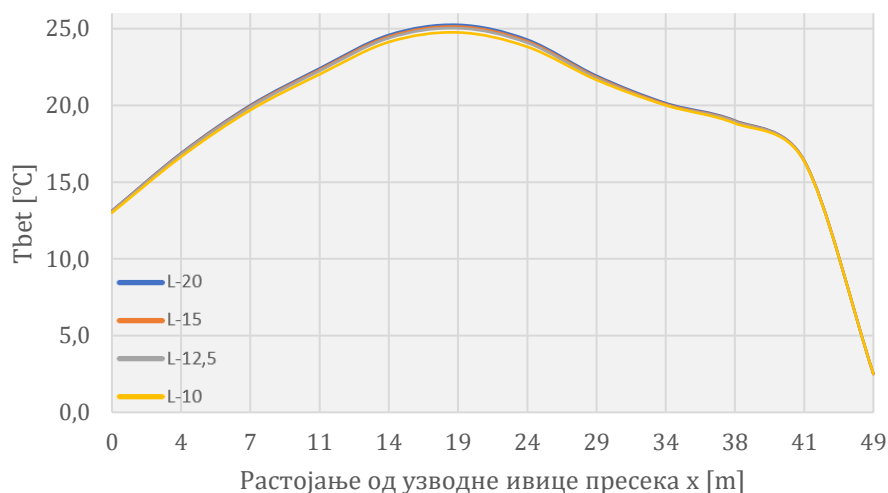
Слика 69. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 172,0 тпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (1080. дан)



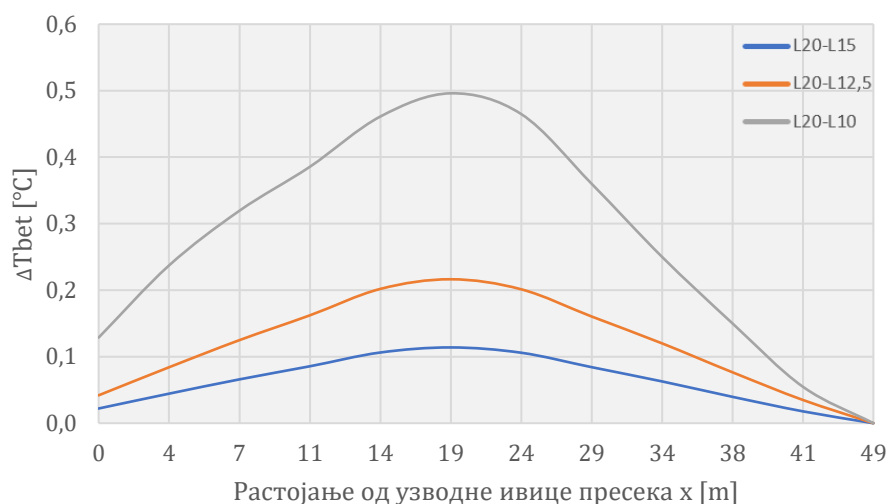
Слика 70. Промена температура у бетону у средини хоризонталног пресека на 172,0 mnt (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (1080. дан)



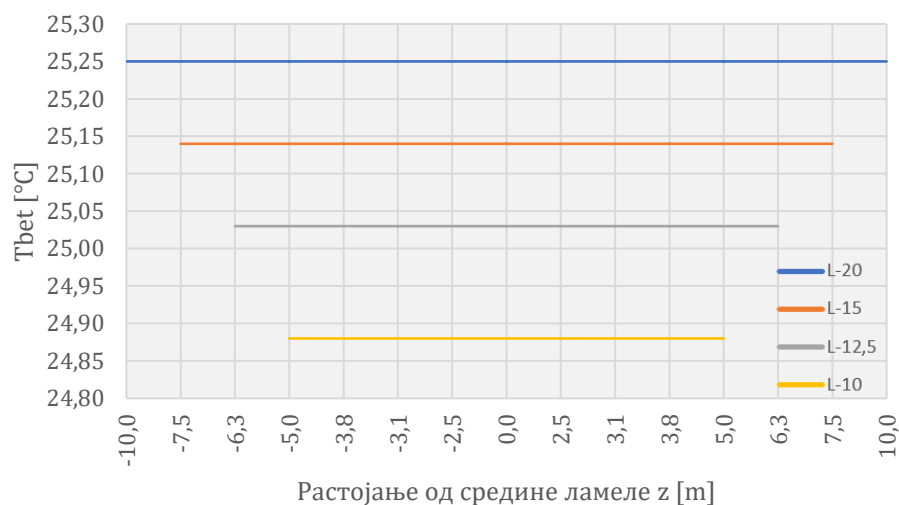
Слика 71. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 172,0 тпм (ка обалама реке) за ламеле различитих дужина (1080. дан)



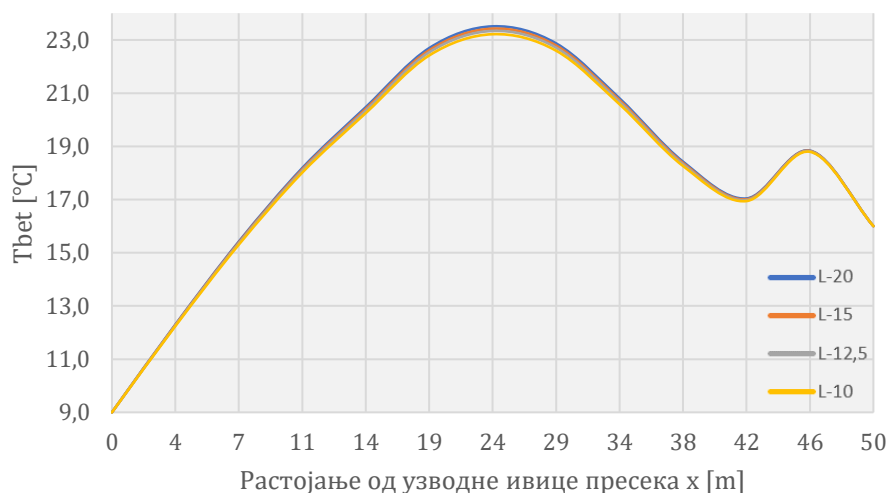
Слика 72. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 172,0 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (1505. дан)



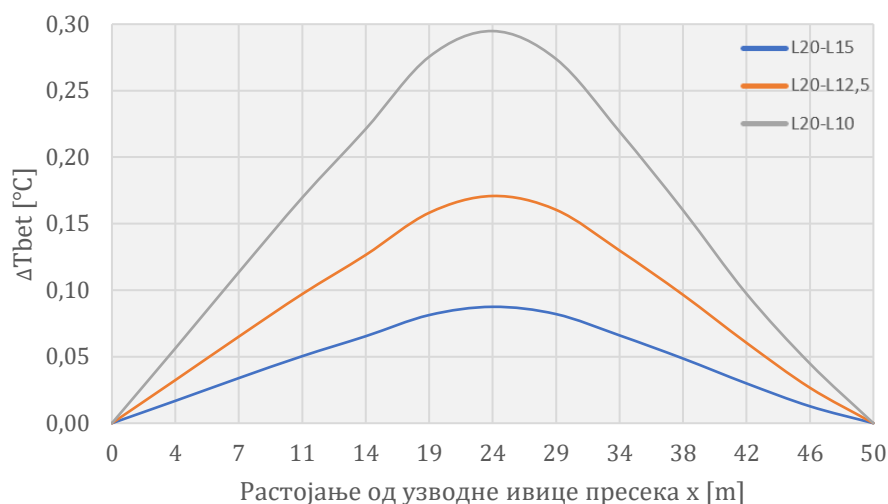
Слика 73. Промена температура у бетону у средини хоризонталног пресека на 172,0 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (1505. дан)



Слика 74. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 172,0 мпм (ка обалама реке) за ламеле различитих дужина (1505. дан)



Слика 75. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 170,50 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (1804. дан)



Слика 76. Промена температура у бетону у средини хоризонталног пресека на 170,50 мпм (узводно-низводно) за ламеле различитих дужина (1804. дан)



Слика 77. Температуре у бетону у средини хоризонталног пресека на 170,50 мпм (ка обалама реке) за ламеле различитих дужина (1804. дан)

7.2 Утицај дужине ламеле на термичке напоне затезања

Дужина ламеле је растојање у правцу подужне осе бране, између две суседне дилатационе разделнице. На положај и број дилатационих разделница утичу: топографске карактеристике терена, усвојена метода грађења и технологија уграђивања бетона и напонско стање у телу бране услед термичких процеса. Ако се има у виду да су гравитационе бетонске бране изузетно масивне конструкције, највећи број дилатационих разделница ради се управо у циљу ограничавања термичких напона затезања [1].

Када се говори о термичким напонима затезања код гравитационих бетонских брана, по правилу се мисли на нормалне напоне који делују у правцу осе бране. С обзиром на усвојени координатни систем модела у оквиру овог истраживања, то су σ_z напони који се у програму [63] обележавају са SZ. По конвенцији, позитивни су напони затезања.

Усвојена дужина ламеле једне гравитационе бетонске бране постаје она код које је прекорачење чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламеле у потпуности елиминисано или највећим делом ограничено тј. код које нема опасности од појаве и развоја прслина услед прекорачења ових напона.

У оквиру овог поглавља извршен је приказан утицаја редукције дужине ламеле на термичке напоне затезања у конструкцији при чему је редукција дужине извршена три пута, са почетних 20,0 m на коначних 10,0 m.

Развијени прорачунски модели, за потребе анализе утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања, узимају у обзир сопствену тежину конструкције и све релевантне термичке процесе (видети табелу 4) као и одговарајуће термичке и напонско-деформацијске контурне услове (у складу са поглављем 6.2). Са друге стране, поменути модели не разматрају дејстава која би пореметила реалну слику чисто термичких напона затезања (као што су, на пример, хидростатички притисак и силе од узгона).

На контакту стенске масе и бетонске конструкције, уколико тај контакт није моделиран као спојница која не прихвата затезање, готово увек долази до појаве локалних концентрација напона затезања услед различитих крутости ова два материјала [52]. Како поменута зона контакта није предмет овог истраживања, а није моделирана на начин како је то претходно поменуто, изостављена је из приказа резултата и то искључивањем бетонских блокова који се налазе у контакту са стенском масом (блокови 1 до 4).

Као резултат прорачуна приказана су напонска стања у одговарајућим вертикалним и хоризонталним пресецима, зоне у средњој равни у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у правцу осе бране, дијаграми напона у карактеристичним тачкама, као и дијаграми промена максималне вредности напона затезања у средњој равни за карактеристичне фазе изградње и експлоатације. Резултати у вертикалним пресецима се односе на средњу раван ламела јер су σ_z (SZ) напони у овој равни највећи.

На основу добијених резултата, може се уочити да сви блокови бране приликом грађења пролазе кроз слична напонска стања. Након бетонирања једног блока долази до његовог ширења које је изазвано загревањем услед ослобађања топлоте хидратације. Због ограничене деформације, услед садејства са суседним блоковима, јављају се напони притиска у блоку и његовој ужој зони (свеже избетонирани блокови у горњим деловима ламеле на сликама 78. и 79.). Загревање бетона једног блока може бити додатно потпомогнуто и екстремно високим температурама ваздуха у дужем временском периоду (као што је претходно описано у оквиру поглавља 7.1.2). Током процеса хлађења бетона долази до његовог скупљања и, услед ограничене деформације

због садејства са суседним блоковима, напони притиска прелазе у напоне затезања. Хлађење бетона може бити нагло (резултат нагле промене сезонске температуре), што утиче на појаву напона затезања у површинским зонама као на сликама 78. (84. дан), 79. и 92. (1505. дан), или постепено (резултат природног процеса којим температура бетона тежи да се изједначи са просечном вишегодишњом температуром ваздуха), што утиче на појаву напона затезања у унутрашњости конструкције, као на слици 93. Максималне вредности термичких напона затезања у анализираном периоду увек се јављају за време ниских спољашњих температура ваздуха.

7.2.1 Напони у фази изградње

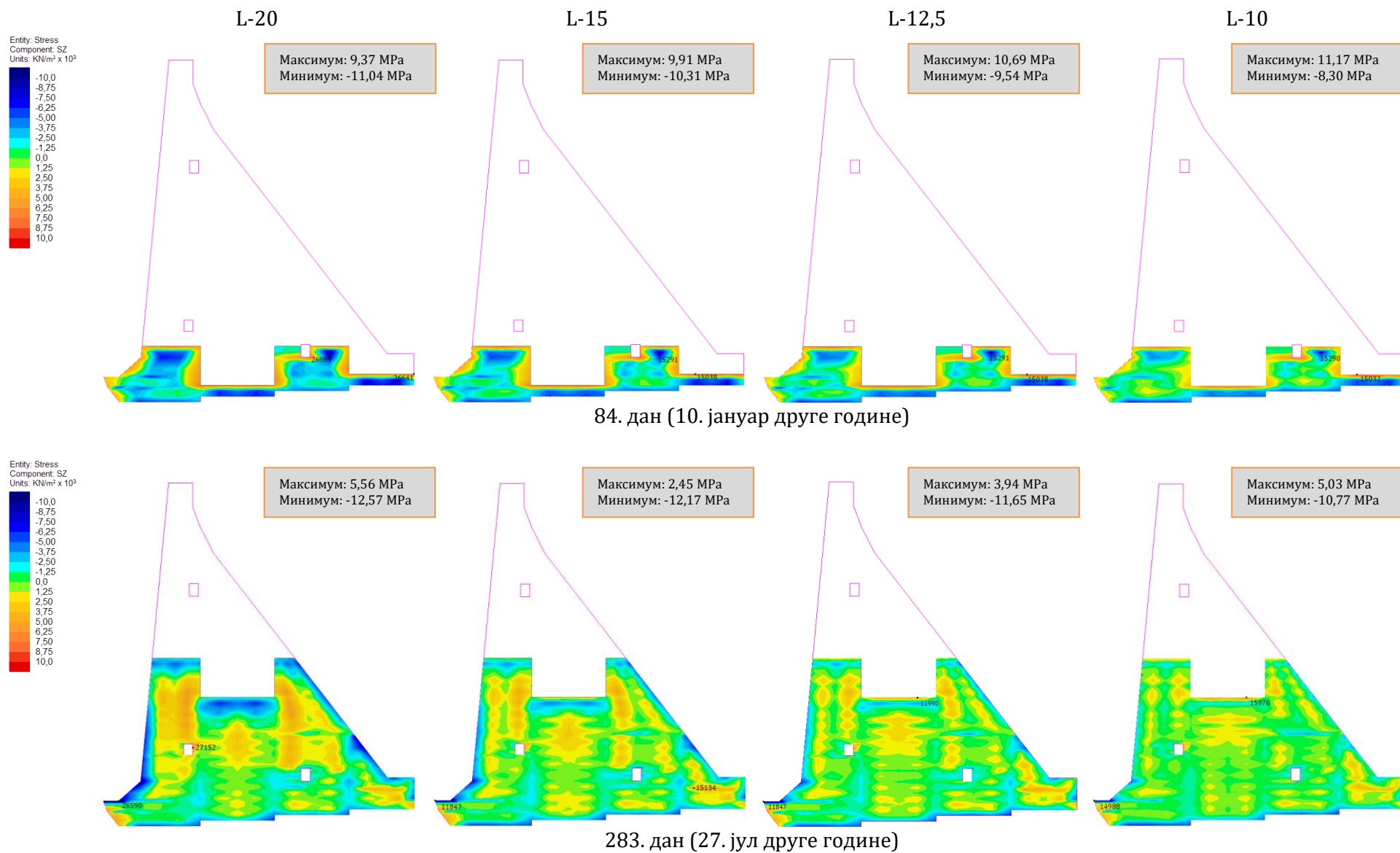
Имајући у виду резултате температурног поља ламеле за 84. дан (слика 48.) и 512. дан (слика 49.), која је под утицајем зимских температура ваздуха, може се закључити да су максимални термички напони затезања у току периода изградње (слика 78. – 84. дан и слика 79.) последица наглог хлађења бетона бране у површинској зони. Управо је процес наглог хлађења бетона одговоран за појаву највиших вредности термичких напона затезања у целом прорачунском периоду (слика 79., у зони круне бране). Вредности максималних напона затезања, који се током периода изградње јављају углавном у површинској зони, значајно премашују чврстоћу бетона на затезање (и преко 10,0 МПа). Високе вредности термичких напона затезања (и преко 5,0 МПа) у току периода изградње јављају се и у средини блокова који су бетонирани методом стубастих блокова (видети поглавље 4.2.3 као и слике 22., 78. и 79.), при чему су ови блокови, због бржег напредовања, изабраних димензија и веће изложености амбијенталним условима (током летње паузе), остали топлији од суседних блокова. На овај начин ствара се велики температурни градијент у односу на суседне, хладније, блокове што доводи до скупљања и појаве увећаних напона затезања. На претходно наведеним сликама 78. и 79. евидентан је процес опадања напона затезања у унутрашњим зонама ламеле са редукцијом њене дужине.

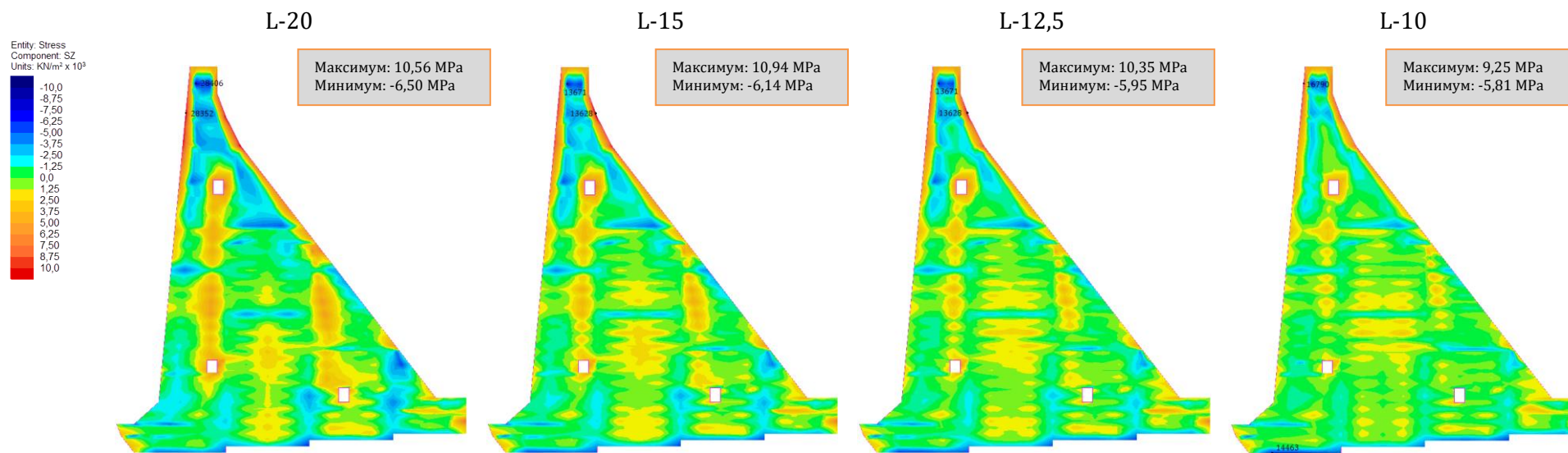
На сликама 80. и 81. приказана су напонска стања у одабраним хоризонталним пресецима у току грађења за све разматране дужине ламела и то: пресек на коти 146,50 mm (за 84. дан), пресек на коти 169,0 mm (за 283. дан) и пресек на коти 162,75 mm (за 512. дан). Положај наведених хоризонталних пресека одабран је тако да најбоље приказује зоне са увећаним вредностима напона затезања у бетону као и промену ових напона са променом дужине ламеле.

На сликама 82. и 83. приказане су зоне (обележене црвеном бојом) у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у карактеристичним временским пресецима у средњој равни ламела различитих дужина. Наведене слике јасније потврђују да је у зонама које су бетониране методом стубастих блокова, ка узводном и низводном лицу конструкције а изнад доње и средње галерије, прекорачена чврстоћа бетона на затезање док је утицај наглог хлађења бетона одговоран за прекорачење чврстоће бетона на затезање у површинским зонама.

На сликама 84. до 88. приказане су вредности напона σ_z у карактеристичним тачкама конструкције (слика 38.) током периода изградње, у функцији израчунатих температура бетона T_{bet} , а које су приказане и у поглављу 7.1.1. Ради једноставнијег приказа, температуре бетона у посматраном чвору дате су као средња вредност за све четири разматране дужине ламеле.

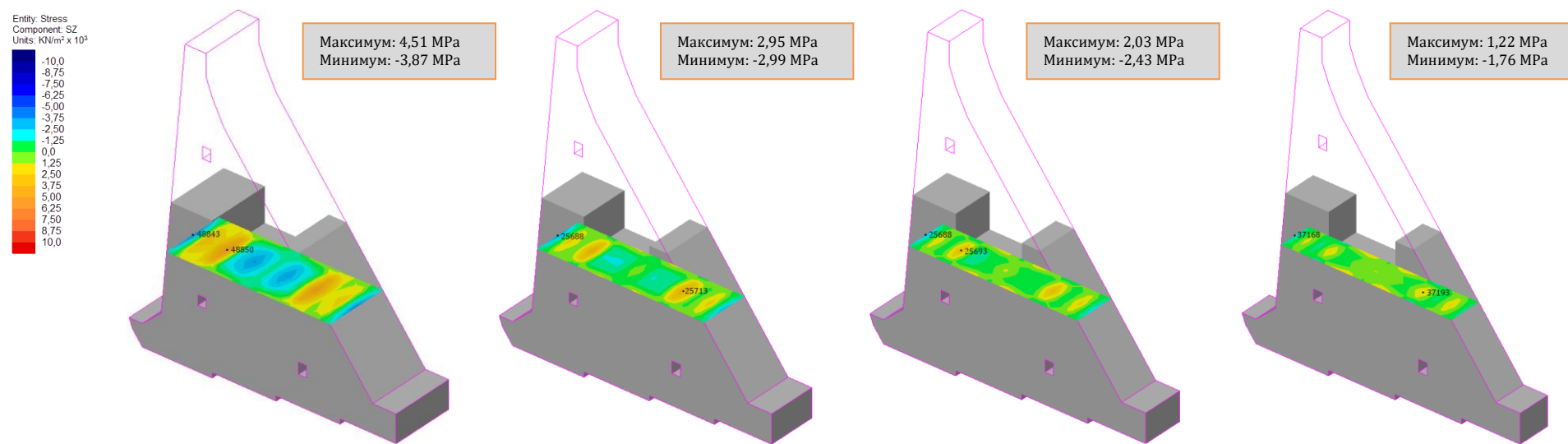
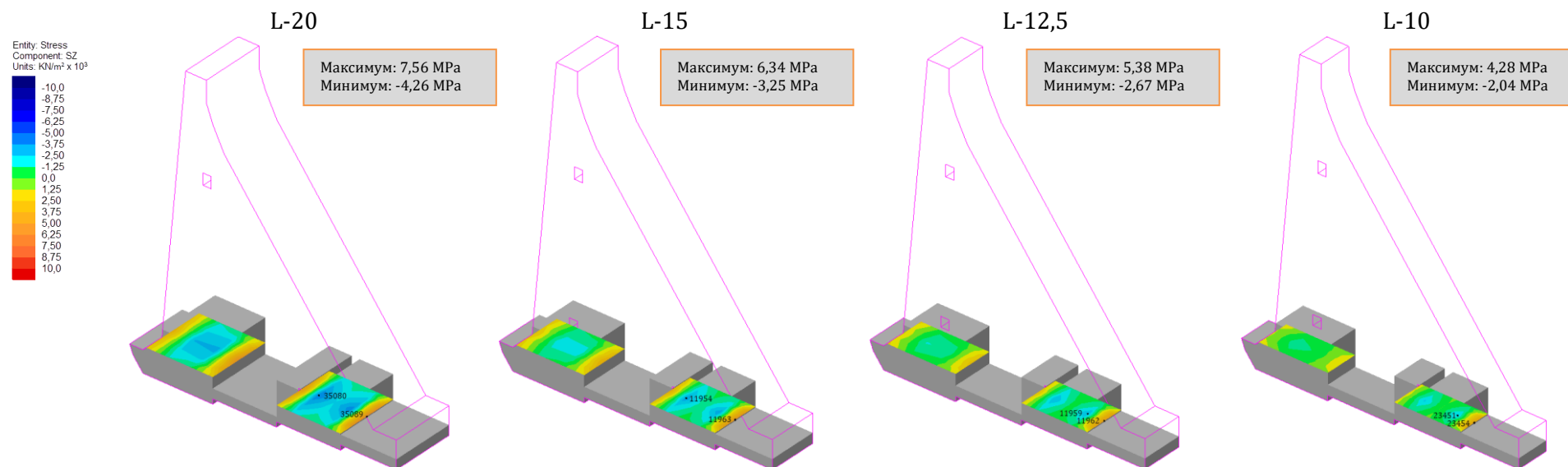
Позитивне вредности напона σ_z , према конвенцији програма [63], одговарају напонима затезања, док негативне вредности одговарају напонима притиска у посматраном чвору конструкције.



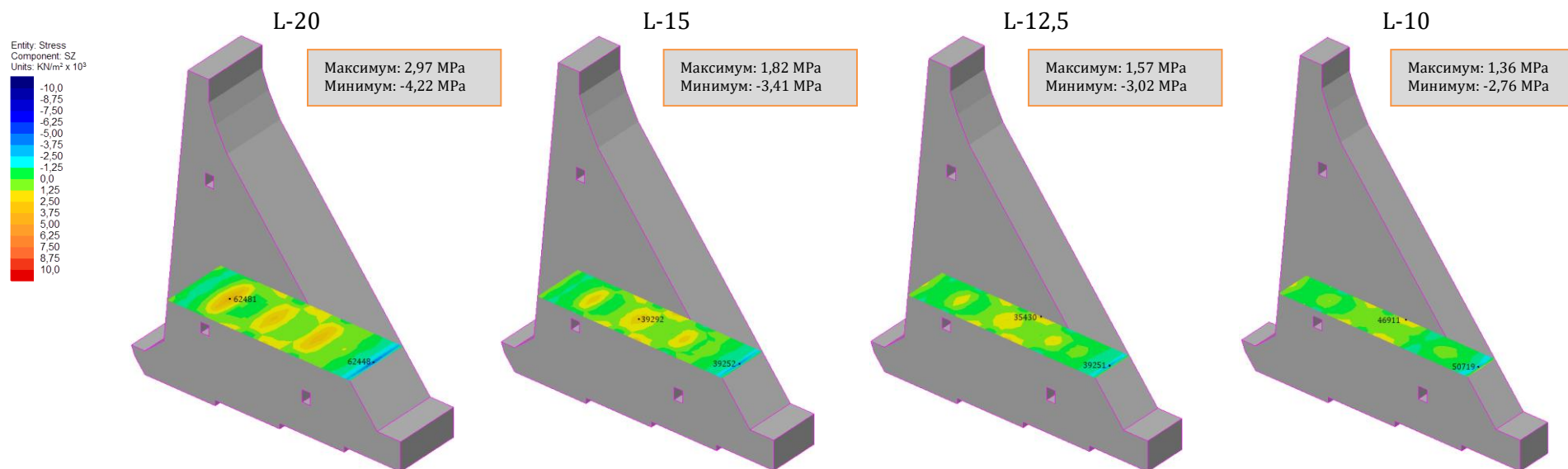


512. дан (13. март треће године)

Слика 79. Стање напона σ_z у средњој равни ламела различитих дужина

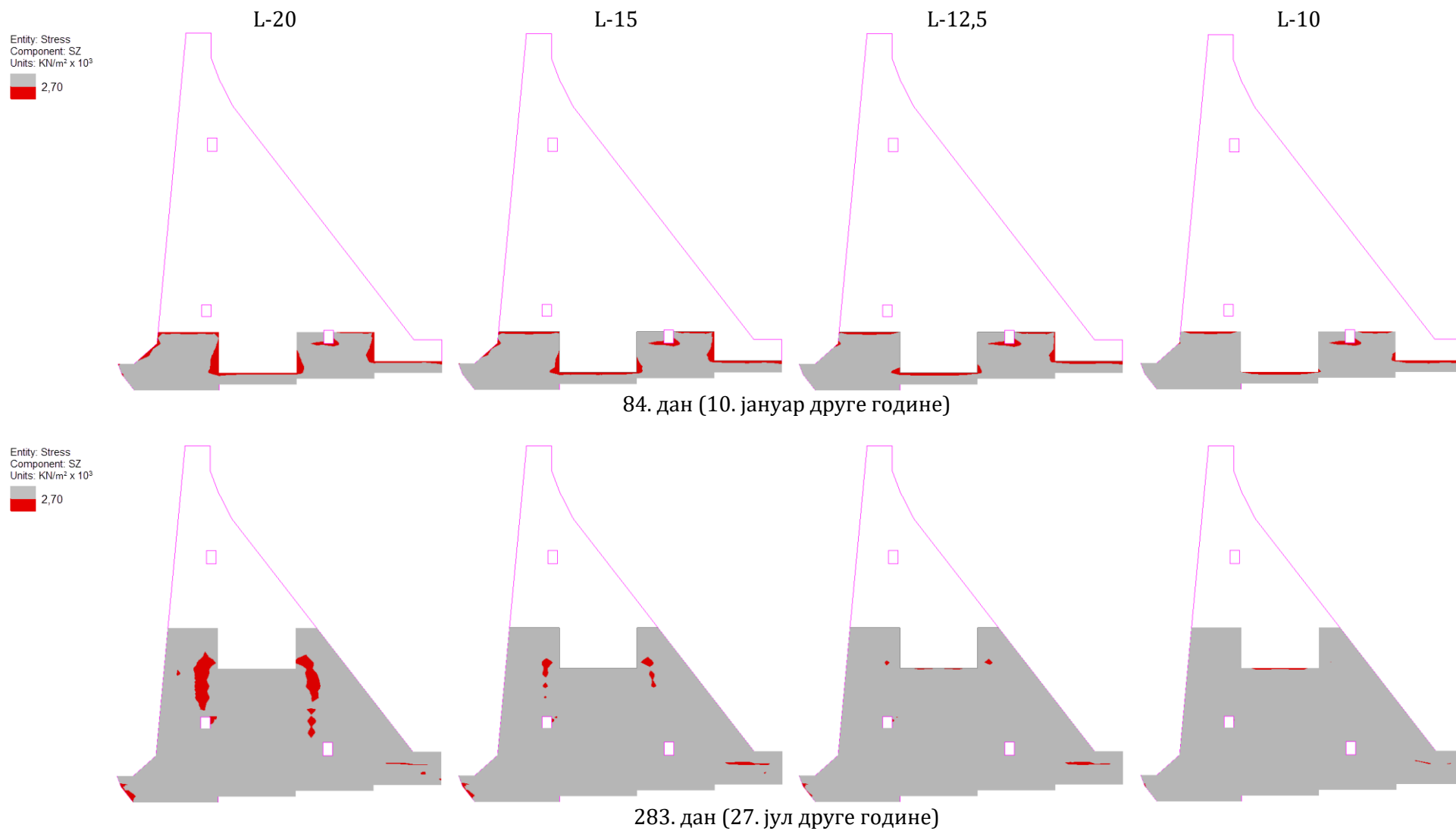


Слика 80. Стање напона σ_z у изабраној хоризонталној равни ламела различитих дужина

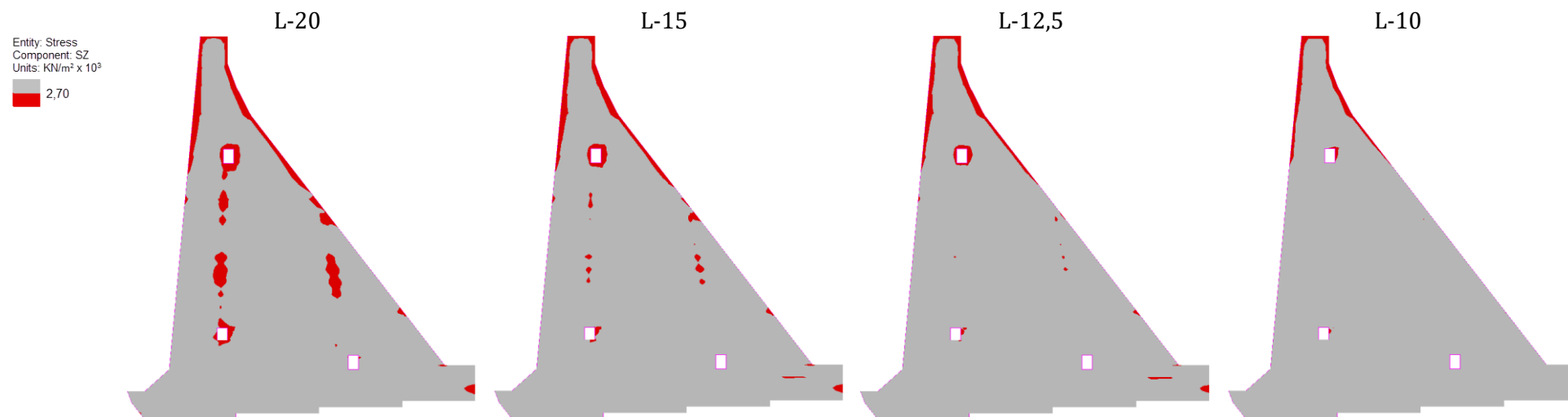


512. дан (13. март треће године); раван на коти 162,75 mnm

Слика 81. Стање напона σ_z у изабраној хоризонталној равни ламела различитих дужина



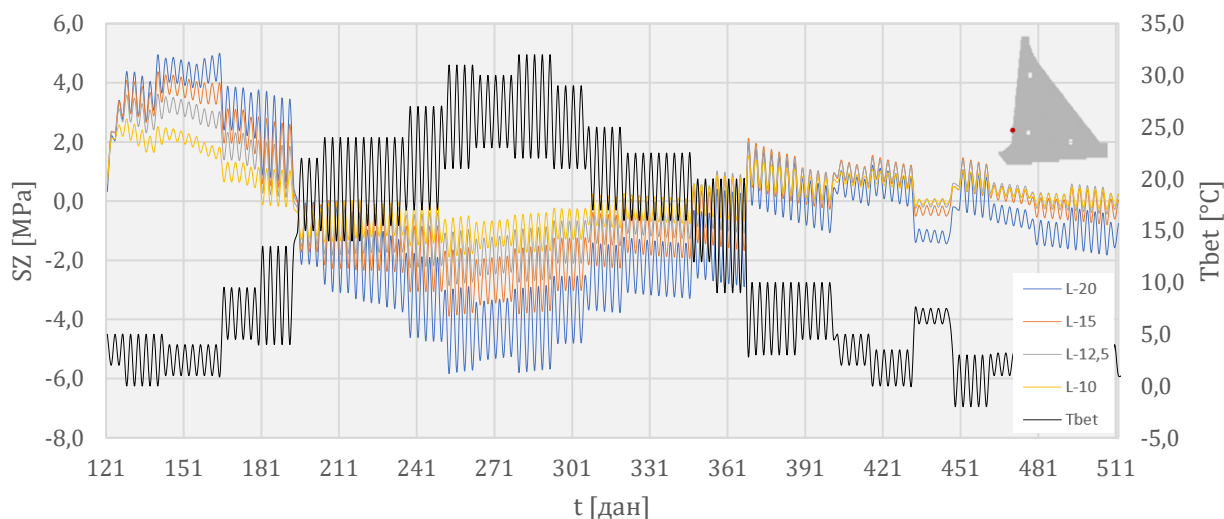
Слика 82. Зоне у којима је прекорачена чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламела различитих дужина



512. дан (13. март треће године)

Слика 83. Зоне у којима је прекорачена чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламела различитих дужина

На слици 84 приказана је вредност напона σ_z у чвору 2787, који се налази у средњој равни ламеле и то на средини узводне стране блока 25, током периода изградње. Чвор је од тренутка бетонирања, у периоду грађења, изложен температури ваздуха која се периодично мења на годишњем нивоу (од $-2,0$ до $33,0$ °C) па температура бетона у посматраном чвору прати сезонске и дневне осцилације температуре ваздуха. У складу са променама температура бетона у посматраном чвору, може се уочити и промена напона за разматране дужине ламеле. Са опадањем температура расту напони затезања док са порастом температура расту напони притиска.

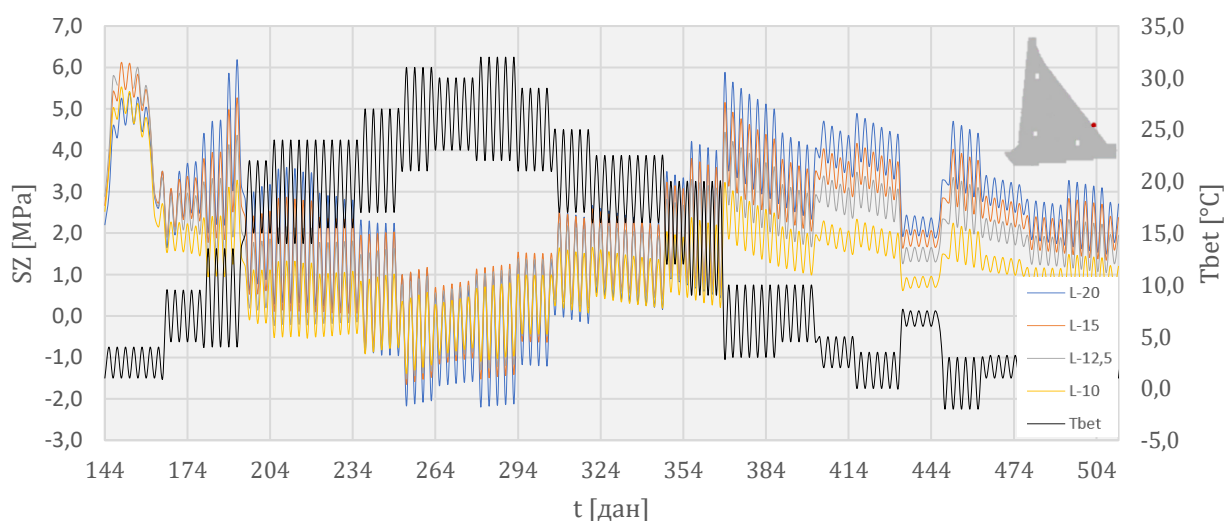


Слика 84. Вредност напона σ_z у чвору 2787 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности напона у чвору 2787 крећу се у интервалу:

- од 4,96 до -5,83 МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 4,37 до -3,89 МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 3,61 до -2,85 МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 2,78 до -1,89 МПа за ламелу дужине 10,0 m.

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 2853, који се налази у средњој равни ламеле на средини низводне стране блока 30, приказана је на слици 85.

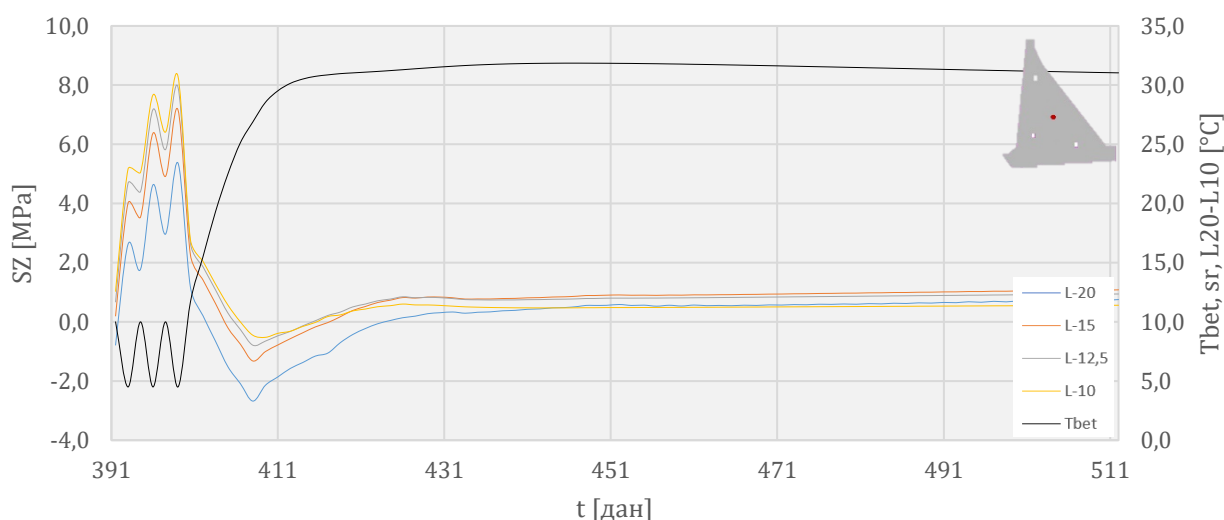


Слика 85. Вредност напона σ_z у чвору 2853 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

Чвор је у периоду грађења такође под утицајем ваздуха чија се температура периодично мења на годишњем нивоу (од $-2,0$ до $33,0$ °C). Као и код чвора 2787 и овде су уочљиве промена напона са сезонском и дневном променом температуре бетона у посматраном чвору. Вредности напона у чвору 2853 крећу се у интервалу:

- од 6,19 до $-2,20$ МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 6,12 до $-1,65$ МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 6,00 до $-1,52$ МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 5,53 до $-1,39$ МПа за ламелу дужине 10,0 m.

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 2938, који се налази у средњој равни ламеле, у централној зони бране, на средини горње стране блока 55, приказана је на слици 86. Чвор је након бетонирања блока (391. дан од почетка грађења конструкције) изложен ниским температурама ваздуха па се, последично, у њему јављају и увећани напони затезања проузроковани наглим хлађењем бетона. Након 9 дана, преко њега је избетониран блок 57, а затим и преостали блокови. Температура у овом чвору почиње да расте услед ослобађања топлоте хидратације цемента (до максималне вредности од $31,86$ °C) па напони затезања прелазе у напоне притиска. Са постепеним хлађењем бетона, напони притиска теже ка напонима затезања (од око $0,80$ МПа, у просеку, за све разматране дужине ламела).



Слика 86. Вредност напона σ_z у чвору 2938 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

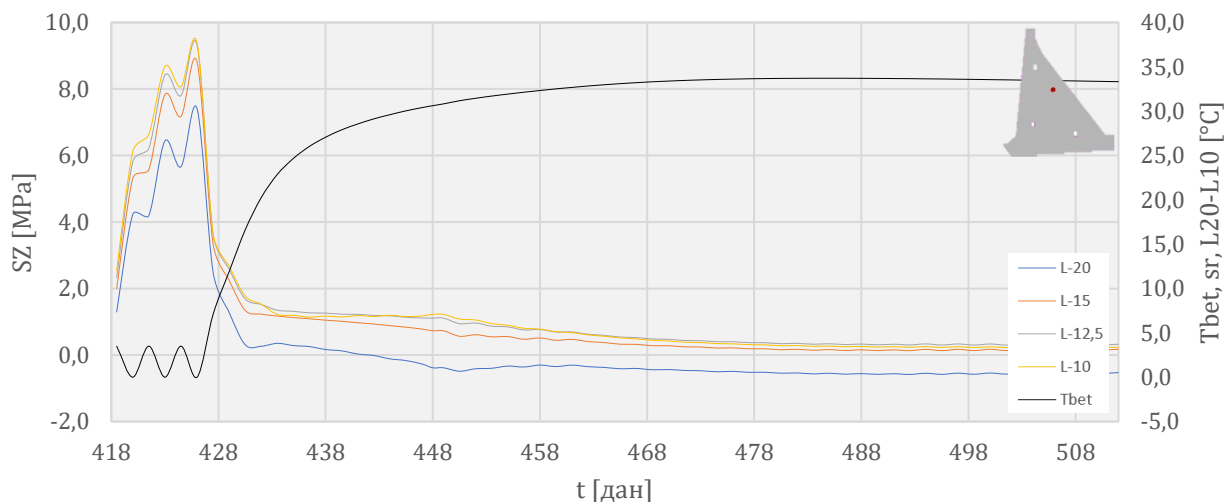
Вредности напона у чвору 2938 крећу се у интервалу:

- од 5,37 до $-2,68$ МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 7,16 до $-1,32$ МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 7,93 до $-0,79$ МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 8,30 до $-0,52$ МПа за ламелу дужине 10,0 m.

Може се јасно уочити и да напони затезања, због положаја чвора у блоку, расту са редукцијом дужине ламеле у првим данима након изливања блока.

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 3016, који се налази у средњој равни ламеле, изнад централне зоне ламеле бране а ближе низводном лицу, на средини горње стране блока 61, приказана је на слици 87. Слично као и код чвора 2938, чвор 3016 је након бетонирања блока (418. дан од почетка грађења конструкције)

изложен ниским вредностима температуре ваздуха. Након 9 дана, преко њега је избетониран блок 63 а затим и преостали блокови. И овде је уочљив процес промене напона услед пораста температура у бетону. Температура почиње да расте услед ослобађања топлоте хидратације цемента (до максималне вредности од 33,71 °C) па напони затезања теже ка напонима притиска (-0,53 МПа за ламелу дужине 20,0 m, док за остале дужине ламеле остају благо позитивни, са просечном вредности од 0,25 МПа).



Слика 87. Вредност напона σ_z у чвору 3016 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}
Вредности напона у чвору 3016 крећу се у интервалу:

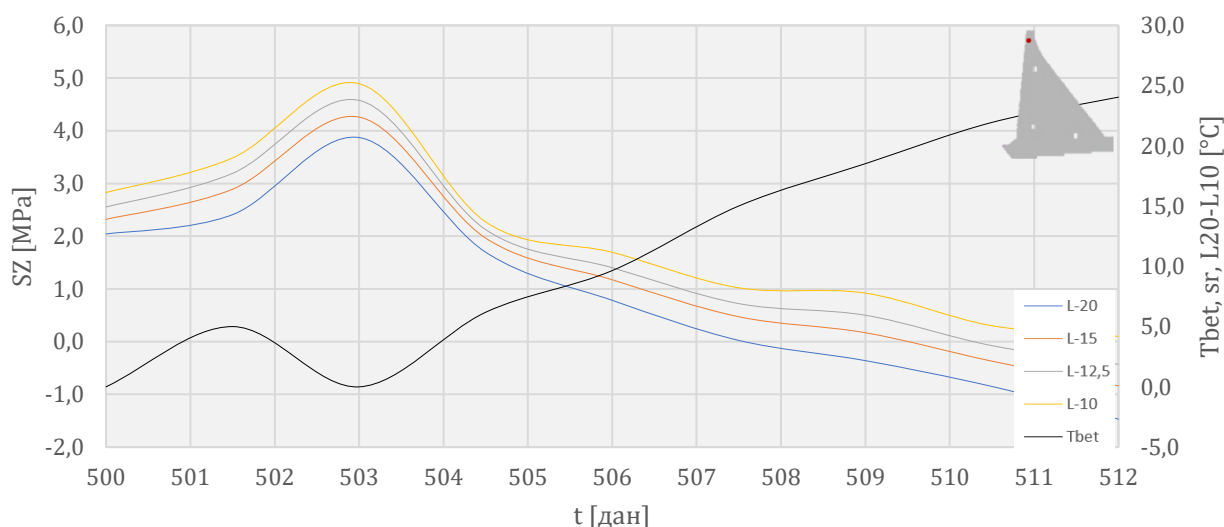
- од 7,41 до -0,58 МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 8,81 до 0,13 МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 9,32 до 0,30 МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 9,38 до 0,22 МПа за ламелу дужине 10,0 m.

И код овог чвора се може јасно уочити да напони затезања, због положаја чвора у блоку, расту са редукцијом дужине ламеле у првим данима након изливања блока.

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 3184, који се налази у средњој равни ламеле, на средини горње стране блока 76, приказана је на слици 88. Чвор је након бетонирања блока (500. дан од почетка грађења конструкције) изложен температури ваздуха (која се креће у интервалу од 0,0 до 5,0 °C) па температура бетона у посматраном чвору прати наведене промене температуре ваздуха. Ниске температуре у бетону доводе до увећаних напона затезања. Након 4,5 дана, преко блока 76 избетониран је блок 77 а затим и завршни блок 78. Слично као и код чворова 2938 и 3016, температура бетона почиње нагло да расте услед ослобађања топлоте хидратације цемента (до максималне вредности од 24,04 °C) што доводи до пада напона затезања у посматраном чвору и њиховог преласка у напоне притиска (од око -0,65 МПа, у просеку за све разматране дужине ламела). Вредности напона у чвору 3184 крећу се у интервалу:

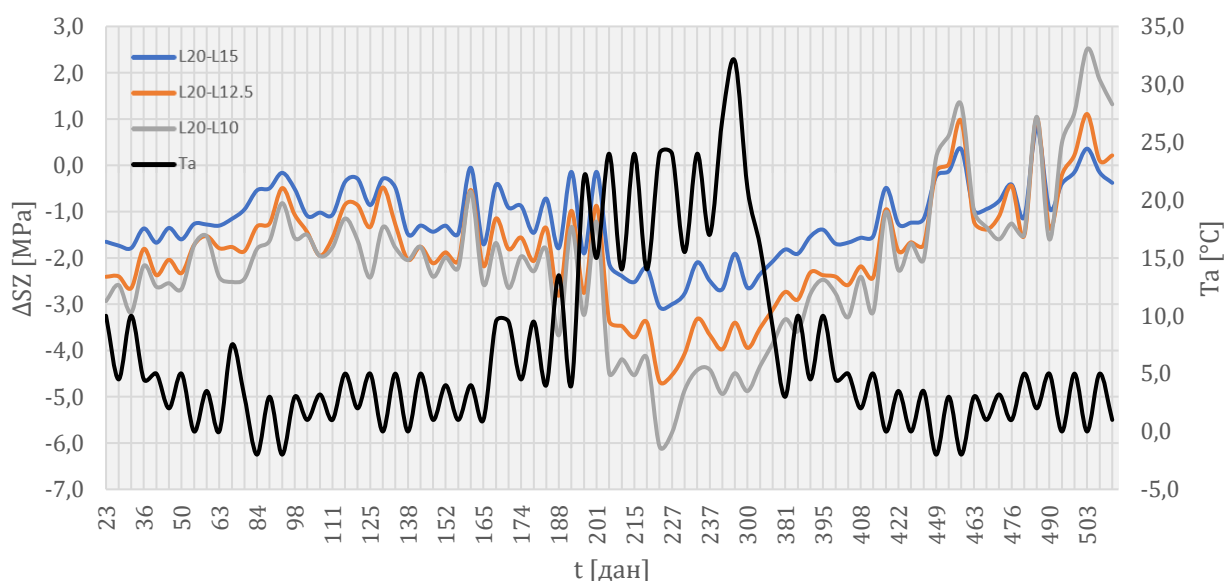
- од 3,87 до -1,47 МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 4,26 до -0,84 МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 4,58 до -0,43 МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 4,89 до 0,10 МПа за ламелу дужине 10,0 m.

Поново се уочава раст напона затезања са редукцијом дужине ламеле у првим данима након изливања блока.



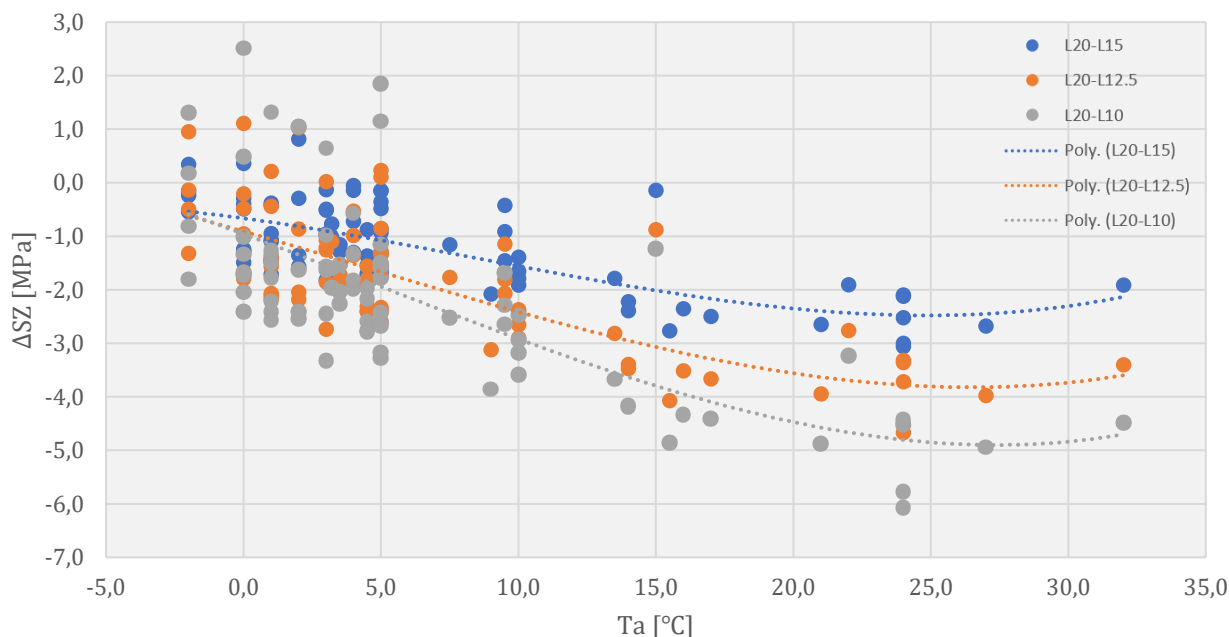
Слика 88. Вредност напона σ_z у чвору 3184 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

На слици 89 приказана је промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у фази изградње, у функцији редукције дужине ламеле и спољашње температуре ваздуха. Са наведеног дијаграма може се уочити да максималне вредности термичких напона затезања у току грађења расту са редукцијом дужине ламеле (негативна промена напона $\Delta\sigma_z$) и до 3,05 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 4,67 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно и до 6,07 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m. Како се приказане вредности максималних напона затезања јављају у површинској зони конструкције, наведена појава се објашњава већим деформацијама скупљања услед хлађења код ламела мањих дужина услед мањег степена ограничености површинских блокова ламела мањих дужина. Такође, на ову појаву утиче и лакше хлађење ламела мањих дужина. Изузетак је крајњи период фазе изградње у којем се максималне вредности термичких напона затезања полако „премештају“ у унутрашњост конструкције (слично понашање као током експлоатације – видети поглавље 7.2.2).

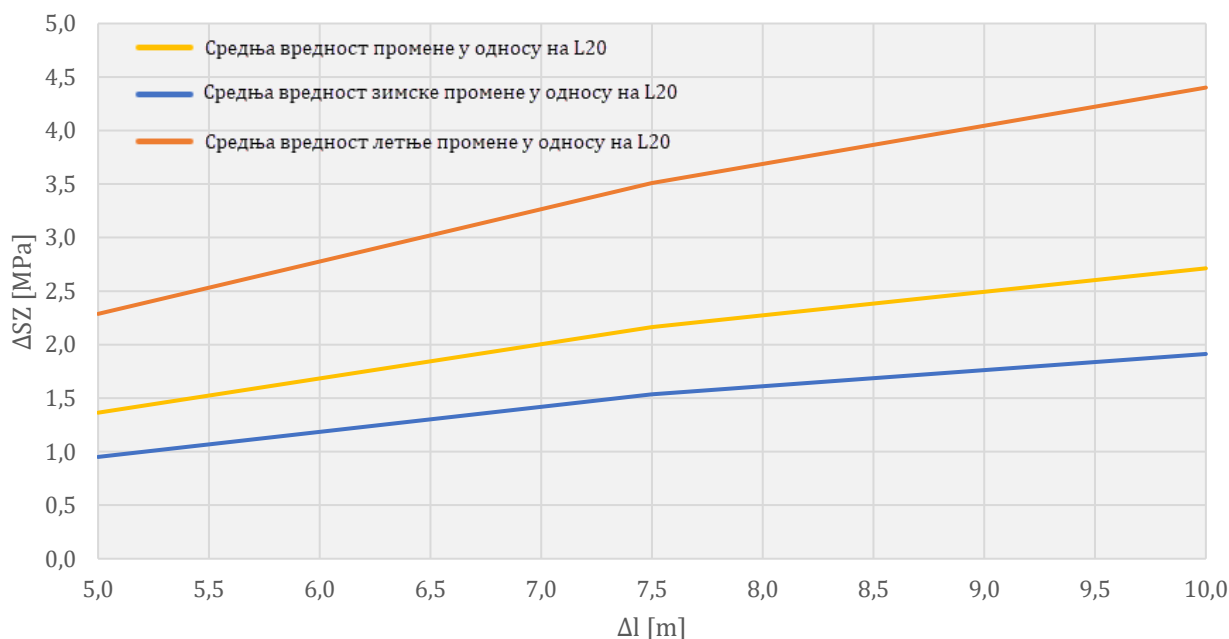


Слика 89. Промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламела у фази изградње у функцији редукције дужине ламеле и спољашње температуре ваздуха T_a

На слици 90 приказана је промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у функцији редукције дужине ламеле и спољашње температуре ваздуха за период изградње конструкције. Са наведеног дијаграма се може уочити да је промена максималних вредности термичких напона затезања са редукцијом дужине ламеле у току грађења конструкције већа за време виших температура ваздуха док се за време ниских температура ваздуха јављају највеће вредности термичких напона затезања у разматраном прорачунском периоду. Максималне вредности просечних промена напона затезања у функцији температуре су око 2,40 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m на температури од око 24,0 °C, око 3,90 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m на температури од око 26,0 °C односно око 5,0 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m на температури од око 27,0 °C.



Слика 90. Просечна промена максималних напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламела у фази изградње у функцији редукције дужине ламеле и спољашње температуре ваздуха T_a



Слика 91. Раст максималних вредности напона затезања σ_z у средњој равни ламеле у фази изградње у функцији редукције дужине ламеле l

На слици 91 приказан је раст максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у функцији промене дужине ламеле Δl и то у виду средње, средње зимске и средње летње промене за период изградње конструкције. Разматрани су један карактеристичан зимски и један карактеристичан летњи циклус. На основу дијаграма може се закључити да приказани термички напони затезања у току периода изградње расту са редукцијом дужине ламеле и то за просечно 1,36 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 2,16 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно и 2,71 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m.

7.2.2 Напони у фази експлоатације

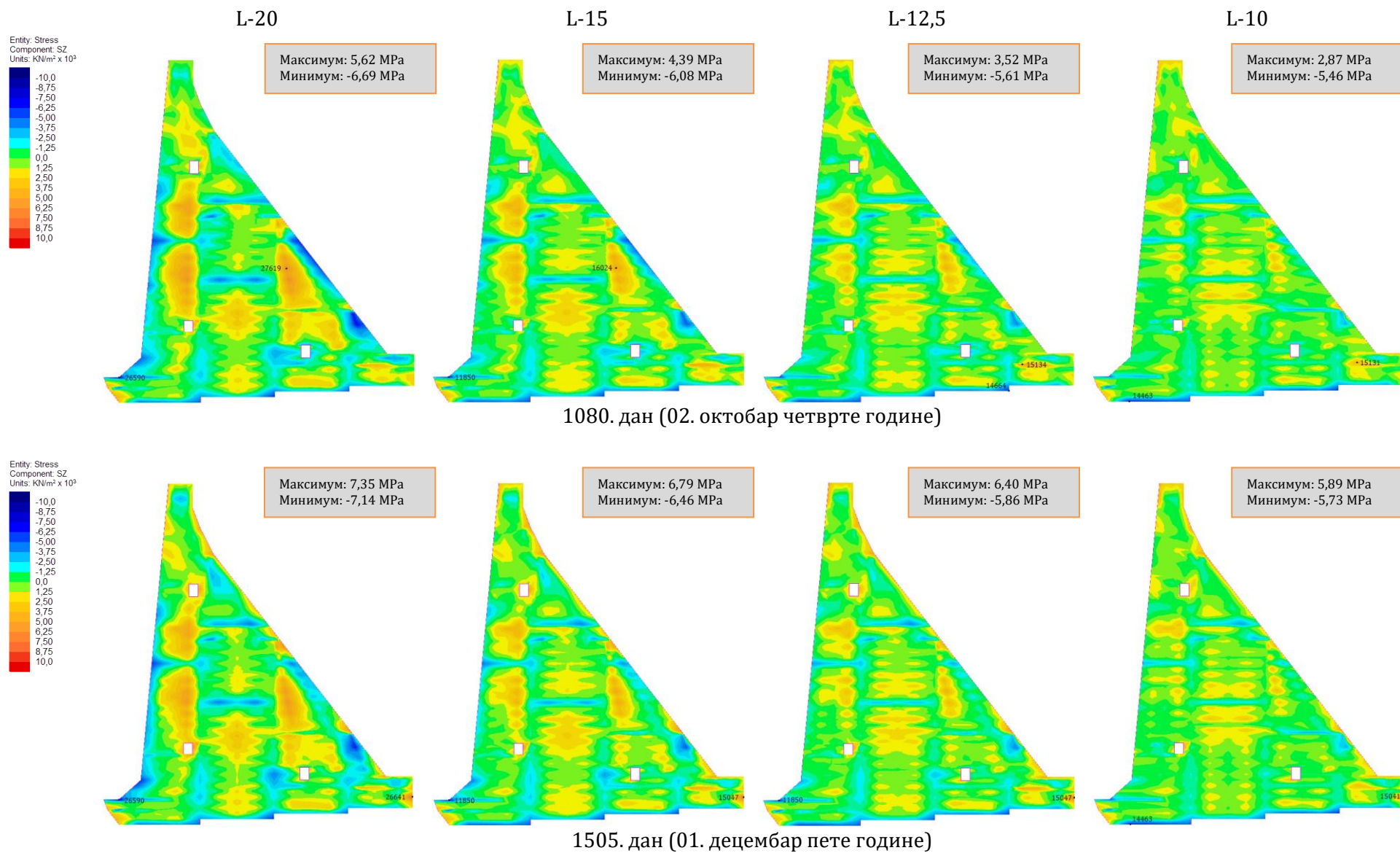
Посматрајући резултате температурног поља током експлоатације (слике 63. до 68.) може се закључити да су максимални термички напони затезања током периода експлоатације последица постепеног хлађења бетона у унутрашњој зони конструкције (слике 92. и 93.). Наведени процес нарочито је изражен у срединама блокова који су бетонирани методом стубастих блокова (видети поглавље 4.2.3). Због бржег напредовања, изабраних димензија и веће изложености амбијенталним условима (током летње паузе), ови блокови су остали топлији од суседних блокова (слика 22., слике 92. и 93.). На овај начин се, како је већ наведено и у оквиру претходног поглавља, ствара температурни градијент у односу на суседне зоне, што доводи до појаве термичких напона затезања. На сликама 92. и 93. евидентан је и процес опадања напона затезања са редукцијом дужине ламеле.

На сликама 94. и 95. приказана су напонска стања у одабраним хоризонталним пресецима током експлоатације за све разматране дужине ламела и то: пресек на коти 172,0 mm (за 1080. и 1505. дан) и пресек на коти 170,50 mm (за 1804. дан). Као и у фази изградње, и овде је положај наведених хоризонталних пресека одабран тако да најбоље приказује зоне са увећаним вредностима напона затезања у бетону као и промену ових напона са променом дужине ламеле.

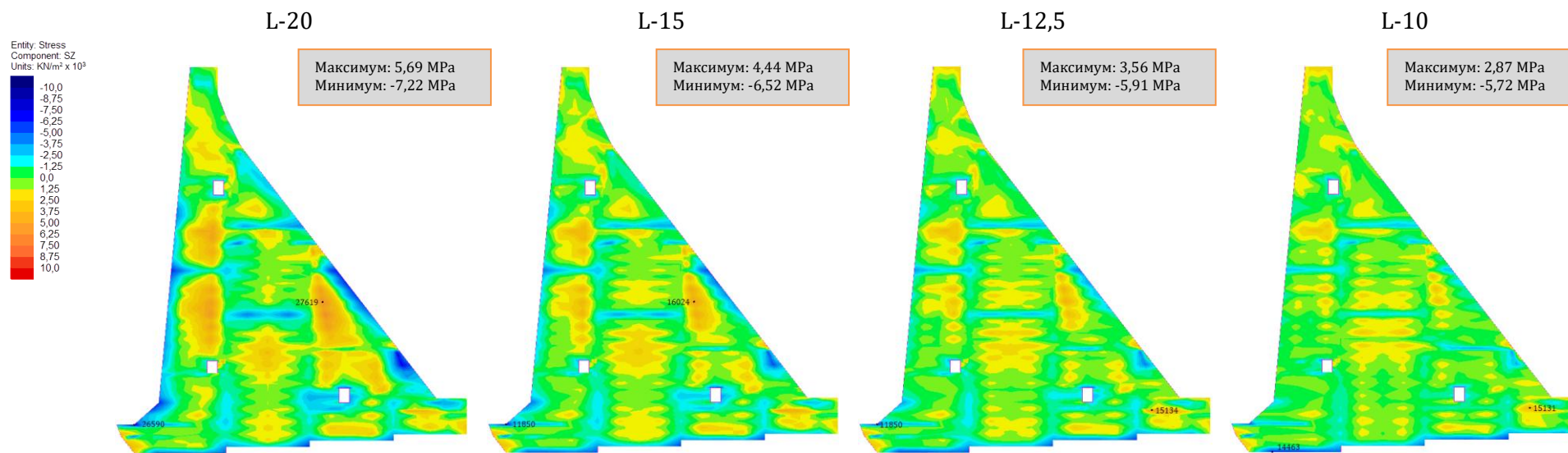
На сликама 96. и 97. приказане су зоне (обележене црвеном бојом) у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у карактеристичним временским тренуцима у средњој равни ламела различитих дужина. На сликама се јасније уочава да је у стубовима који су бетонирани методом стубастих блокова, ка узводном и низводном лицу конструкције а изнад доње и средње галерије у телу бране, прекорачена чврстоће бетона на затезање и током експлоатације. Иако пуњење акумулације доприноси процесу хлађења попречног пресека конструкције (слике 63. и 65., плаво обојене зоне на месту контакта са акумулацијом), у зони контакта воде са браном нема појаве прекорачења чврстоће бетона на затезање. Смањењем дужине ламеле на 10,0 m, током експлоатације се скоро потпуно елиминишу зоне у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање.

На сликама 98. до 102. приказане су вредности напона σ_z у карактеристичним тачкама конструкције (слика 38.) током експлоатације, у функцији израчунатих температура бетона T_{bet} које су приказане у оквиру поглавља 7.1.1. Као и код периода грађења, ради једноставнијег приказа, температуре бетона у посматраном чвору приказане су као средња вредност за све разматране дужине ламеле.

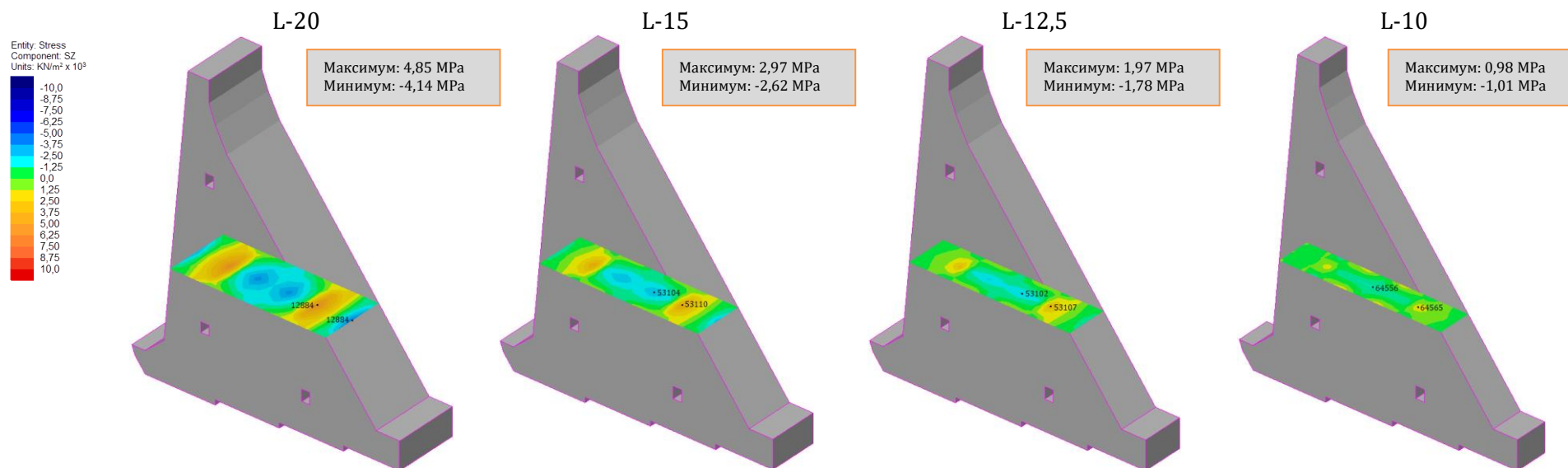
Позитивне вредности напона σ_z , према конвенцији програма [63], одговарају напонима затезања, док негативне вредности одговарају напонима притиска.



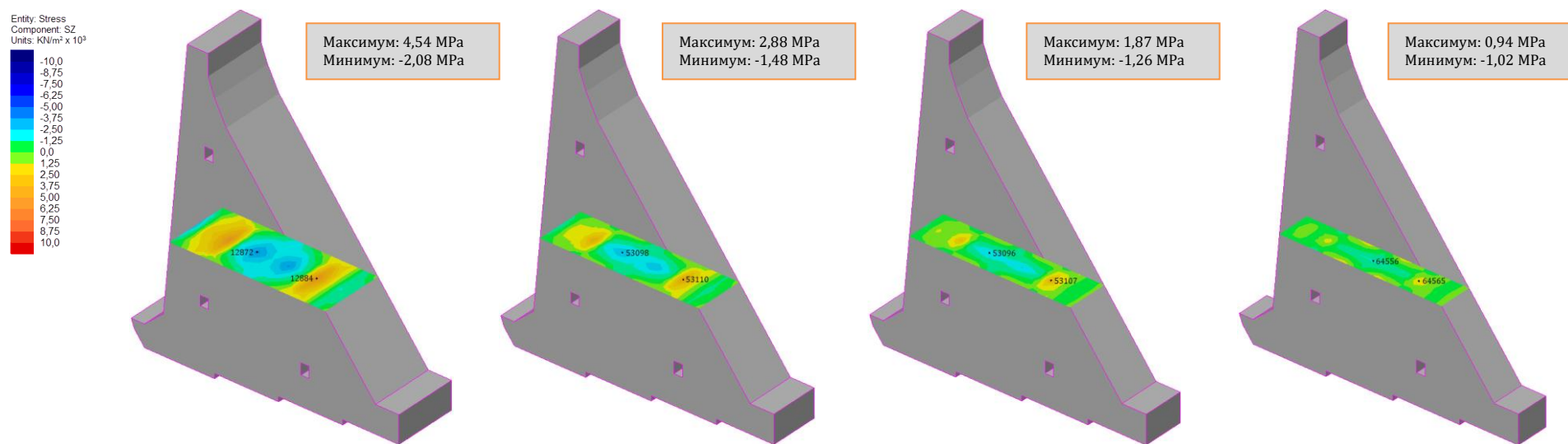
Слика 92. Стање напона σ_z у средњој равни ламела различитих дужина



1804. дан (25. септембар шесте године)
Слика 93. Стање напона σ_z у средњој равни ламела различитих дужина

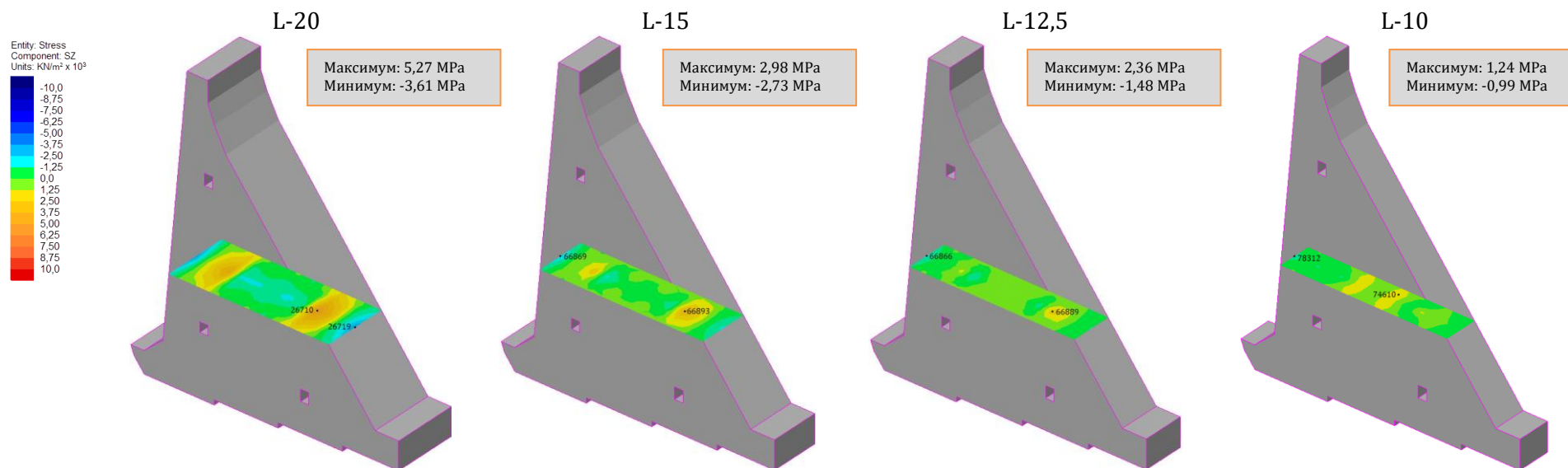


1080. дан (02. октобар четврте године); раван на коти 172,0 mm

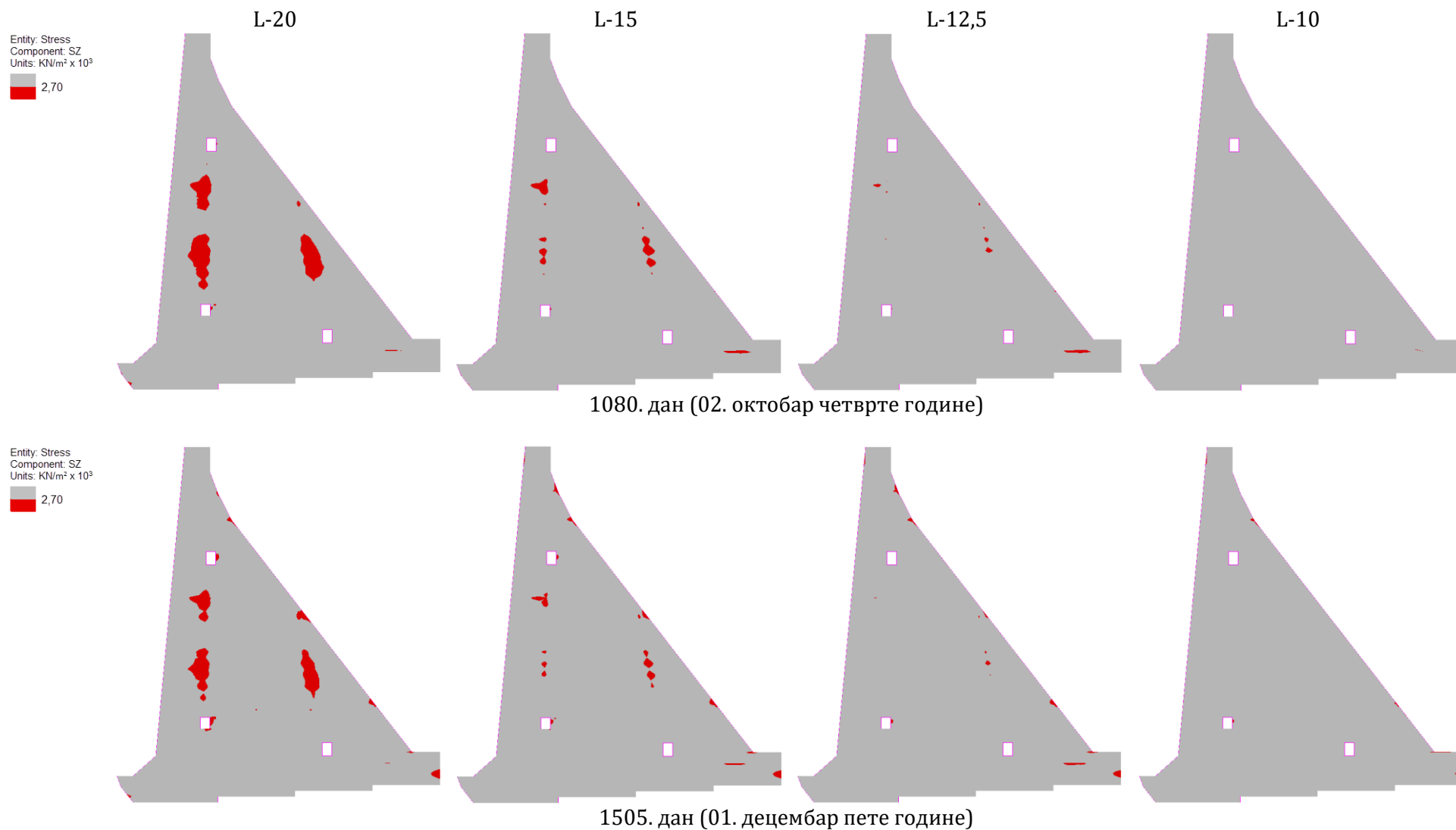


1505. дан (01. децембар пете године); раван на коти 172,0 mm

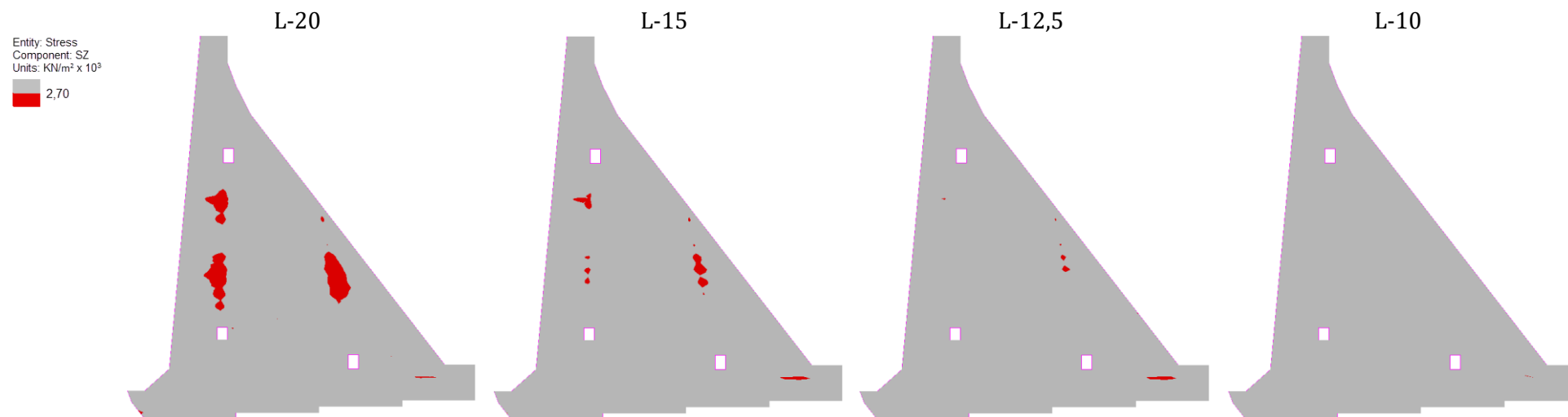
Слика 94. Стање напона σ_z у изабраној хоризонталној равни ламела различитих дужина



1804. дан (25. септембар шесте године); раван на коти 170,50 mnm
Слика 95. Стање напона σ_z у изабраној хоризонталној равни ламела различитих дужина



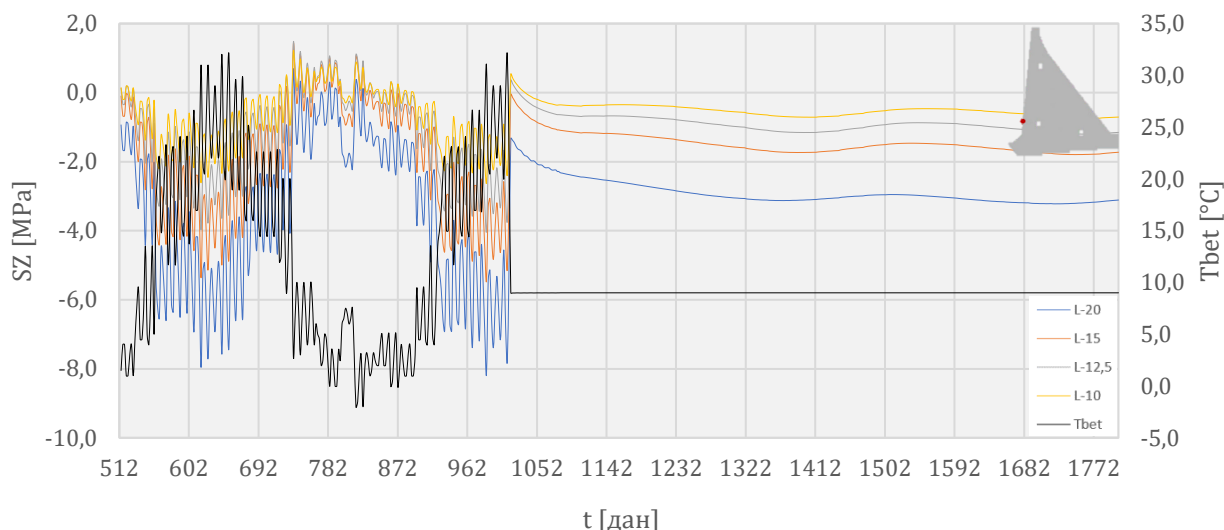
Слика 96. Зоне у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у средњој равни ламела различитих дужина



1804. дан (25. септембар шесте године)

Слика 97. Зоне у којима је прекорачена чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламела различитих дужина

На слици 98 приказана је вредност напона σ_z у чвору 2787 током периода експлоатације. Температура бетона у посматраном чвору прати сезонске и дневне осцилације температуре ваздуха (од $-2,0$ до $33,0$ °C) све до тренутка када је оквашен водом из акумулације (1020. дана од почетка грађења конструкције) константне температуре ($9,0$ °C). Са сезонском и дневном променом температуре бетона (до тренутка квашења), може се уочити и промена напона за разматране дужине ламеле. Након што је чвор оквашен водом долази и до промене понашања напона σ_z али они доминантно остају у границама напона притиска за све разматране дужине ламеле.



Слика 98. Вредност напона σ_z у чвору 2787 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности напона у чвору 2787 до тренутка квашења крећу се у интервалу:

- од $0,61$ до $-8,17$ МПа за ламелу дужине $20,0$ m,
- од $1,38$ до $-5,46$ МПа за ламелу дужине $15,0$ m,
- од $1,44$ до $-4,02$ МПа за ламелу дужине $12,5$ m и
- од $1,19$ до $-2,62$ МПа за ламелу дужине $10,0$ m.

Вредности напона у чвору 2787 након тренутка квашења крећу се у интервалу:

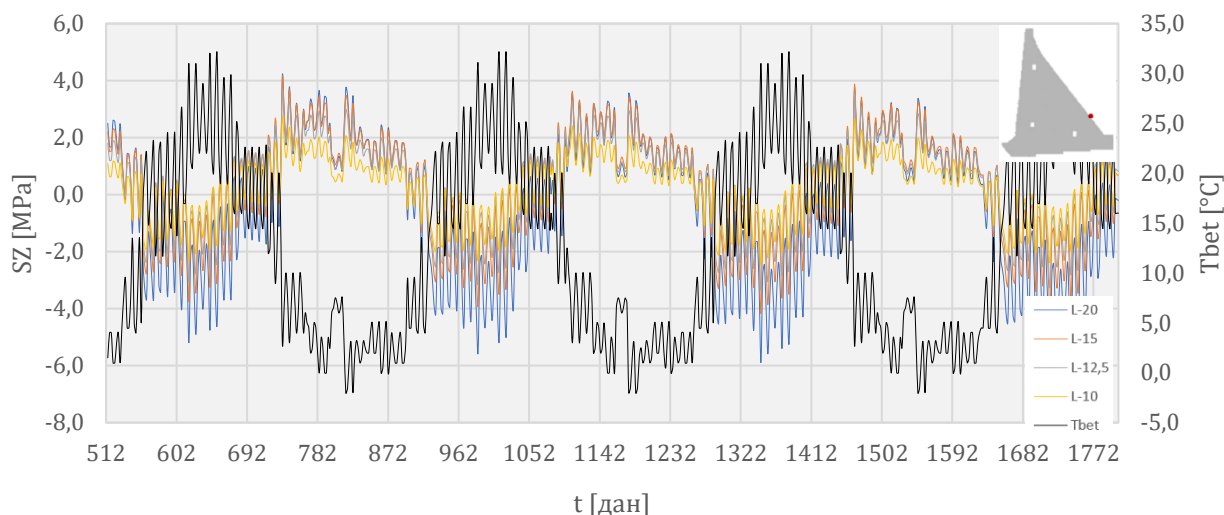
- од $-1,38$ до $-3,22$ МПа за ламелу дужине $20,0$ m,
- од $-0,14$ до $-1,80$ МПа за ламелу дужине $15,0$ m,
- од $0,26$ до $-1,20$ МПа за ламелу дужине $12,5$ m и
- од $0,43$ до $-0,74$ МПа за ламелу дужине $10,0$ m.

Може се уочити да напони затезања углавном бележе тренд раста са редукцијом дужине ламеле и до тренутка квашења као и након тренутка квашења али уз изразиту промену понашања амплитуда осциловања ових напона.

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 2853 приказана је на слици 99. Чвор је, с обзиром да не постоји утицај доње воде на разматрану непреливну ламелу, под утицајем ваздуха чија се температура периодично мења на дневном и годишњем нивоу (од $-2,0$ до $33,0$ °C). Као и код чвора 2787 и овде су уочљиве промене напона за разматране дужине ламеле са осцилацијама температура бетона (смена напона притиска и затезања). Вредности напона крећу се у следећем интервалу (при

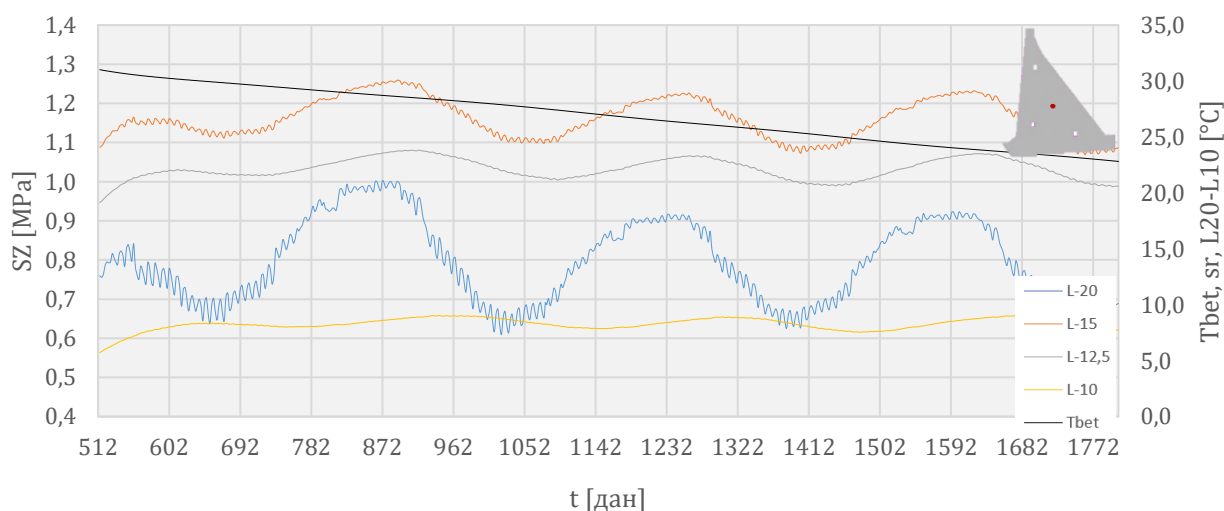
чему се уочава опадање максималних вредности напона затезања са редукцијом дужине ламеле):

- од 4,15 до -5,90 МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 4,10 до -4,17 МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 3,66 до -3,36 МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 2,73 до -2,48 МПа за ламелу дужине 10,0 m.



Слика 99. Вредност напона σ_z у чвору 2853 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 2938 приказана је на слици 100. На слици се уочава процес постепеног хлађења бетона (до вредности од 22,81 °C) који се не завршава ни у крајњем прорачунском тренутку. Последице, и напони σ_z имају позитивне вредности (затезање) и они опадају са редукцијом дужине ламеле. Међутим, ако се погледају резултати за овај чвор током периода изградње (слика 86.), може се уочити да су израженији напони притиска у периоду након бетонирања код ламеле дужине 20,0 m утицали на криву напона током експлоатације у смислу њеног „померања“ ка вредностима притиска, па ова крива показује мало другачије понашање од наизглед очекиваног. Овај чвор, током периода експлоатације, има најмање амплитуде осциловања напона затезања.



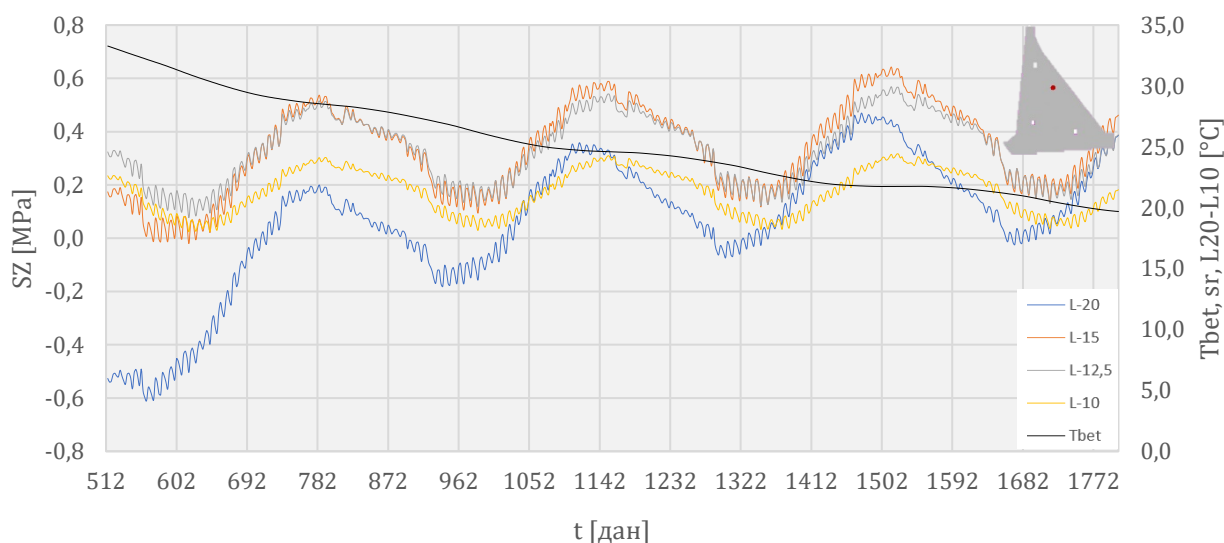
Слика 100. Вредност напона σ_z у чвору 2938 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности напона у чвору 2938 крећу се у интервалу:

- од 1,0 до 0,61 МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 1,26 до 1,07 МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 1,08 до 0,95 МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 0,66 до 0,56 МПа за ламелу дужине 10,0 m.

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 3016 приказана је на слици 101. Напони σ_z , осим мањим делом за ламеле дужине 20,0 m и 15,0 m, имају позитивне вредности (затезање) које благо расту са постепеним хлађењем конструкције (до вредности од 19,69 °C). Напони затезања имају ниже вредности у односу на чвор 2938 док су амплитуде осциловања нешто израженије. Такође, они опадају са редукцијом дужине ламеле, међутим и овде су израженији напони притиска у периоду након бетонирања блока за ламелу дужине 20,0 m (слика 87.) утицали на криву напона током експлоатације у смислу њеног „померања“ ка вредностима притиска. Вредности ових напона крећу се у интервалу:

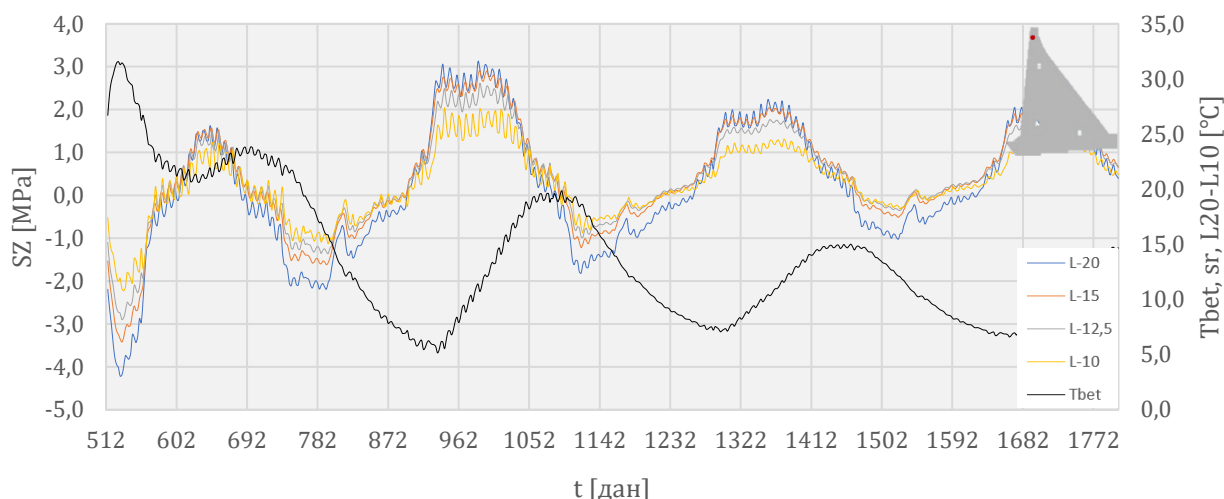
- од 0,47 до -0,61 МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 0,64 до -0,02 МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 0,57 до 0,08 МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 0,32 до 0,02 МПа за ламелу дужине 10,0 m.



Слика 101. Вредност напона σ_z у чвору 3016 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 3184 приказана је на слици 102. И на овој слици је евидентан процес постепеног хлађења бетона (до вредности од 14,68 °C), али уз знатан утицај сезонских промена температуре ваздуха услед близине изабраног чвора круни бране. Уочава се смена напона притиска и затезања у овом чвору. Вредности напона крећу се у интервалу:

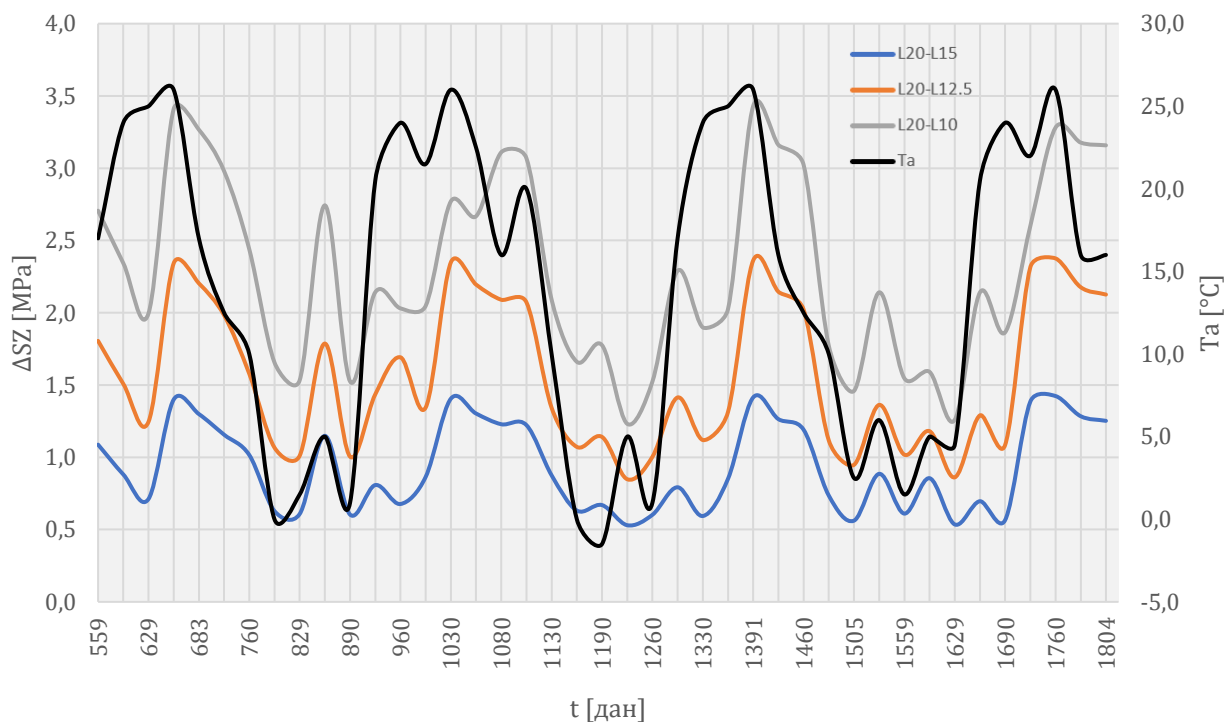
- од 3,12 до -4,21 МПа за ламелу дужине 20,0 m,
- од 2,91 до -3,42 МПа за ламелу дужине 15,0 m,
- од 2,61 до -2,90 МПа за ламелу дужине 12,5 m и
- од 2,04 до -2,22 МПа за ламелу дужине 10,0 m.



Слика 102. Вредност напона σ_z у чвору 3184 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

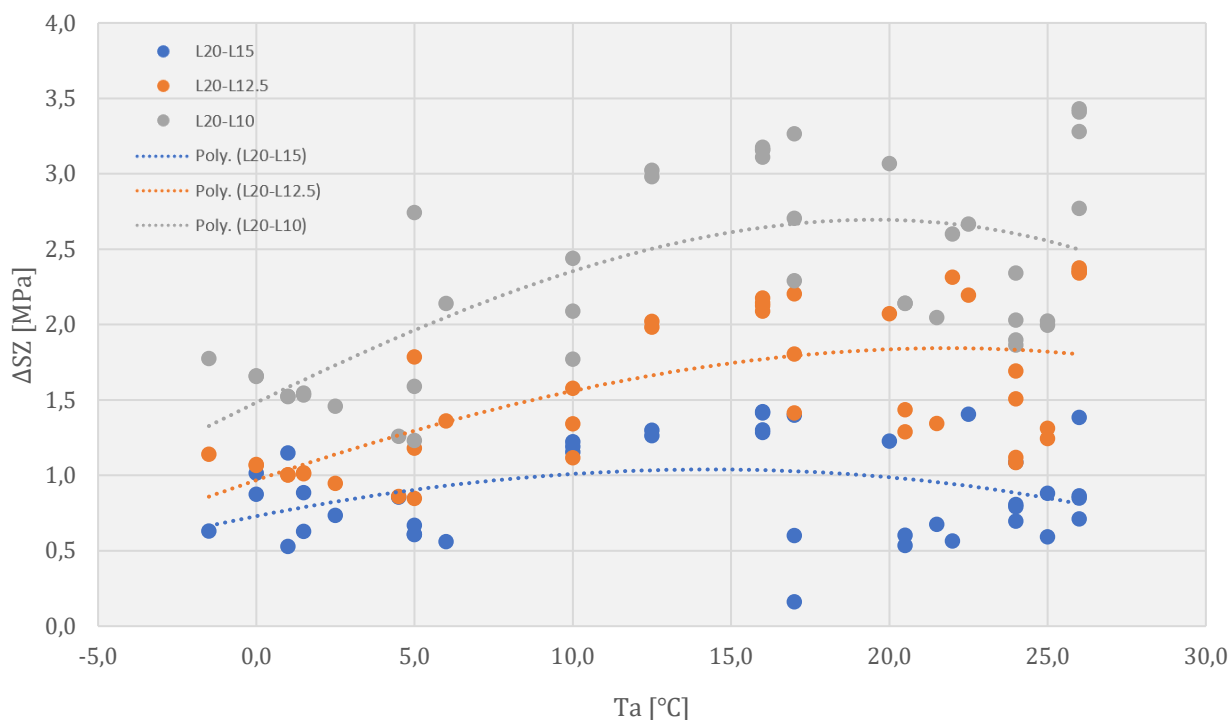
И код чвора 3184 може се уочити опадање максималних вредности напона затезања са редукијом дужине ламеле.

На слици 103 приказана је промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у функцији редукције дужине ламеле, периода експлоатације и спољашње температуре ваздуха. Са наведеног дијаграма може се уочити да максималне вредности термичких напона затезања током експлоатације, а које се јављају у унутрашњости ламеле, опадају са редукцијом дужине ламеле (позитивна промена напона $\Delta\sigma_z$) и до 1,42 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, 2,38 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m односно и до 3,43 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m.

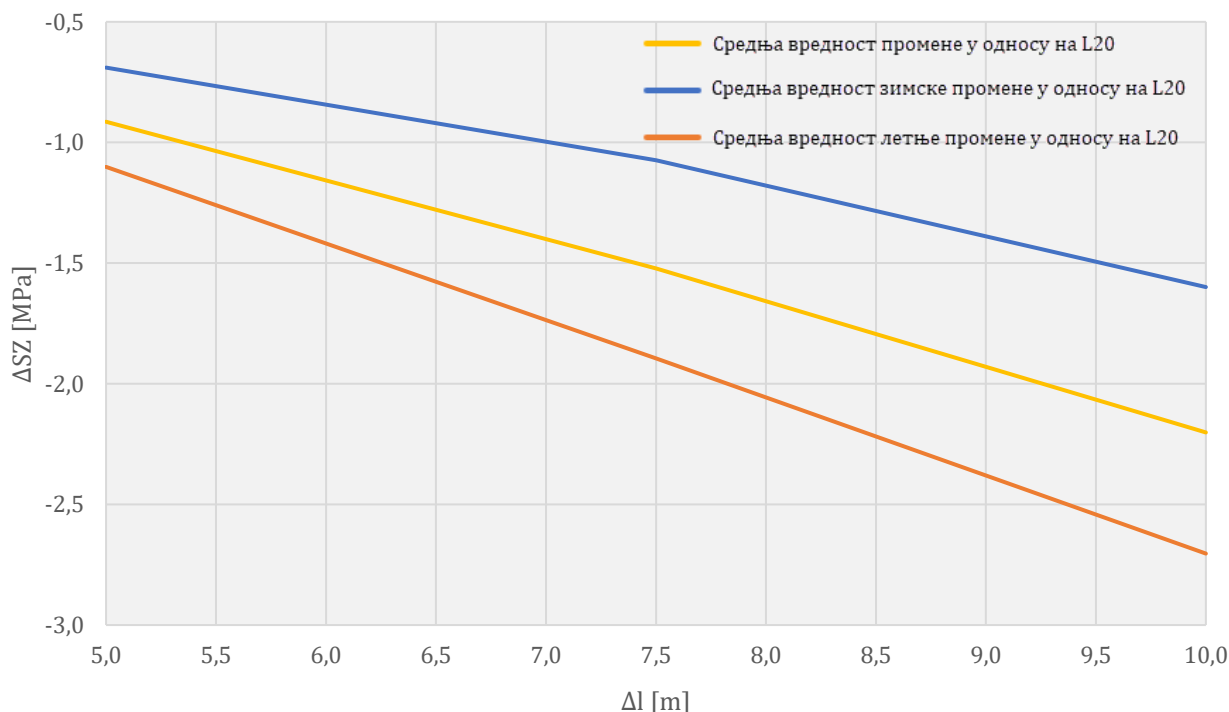


Слика 103. Промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламела током експлоатације у функцији редукције дужине ламеле и спољашње температуре ваздуха T_a

На слици 104 приказана је промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у функцији редукције дужине ламеле и спољашње температуре ваздуха током периода експлоатације конструкције.



Слика 104. Просечна промена максималних напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламела током експлоатације у функцији редукције дужине ламеле и спољашње температуре ваздуха T_a



Слика 105. Смањење максималних вредности напона затезања σ_z у средњој равни ламеле током експлоатације у функцији редукције дужине ламеле l

Са наведеног дијаграма може се уочити да је промена максималних вредности термичких напона затезања са редукцијом дужине ламеле током експлоатације

конструкције већа за време виших температура ваздуха (као и код фазе грађења) док се за време ниских температура јављају највеће вредности термичких напона затезања у разматраном прорачунском периоду. Максималне вредности просечних промена напона затезања у функцији температуре су око 1,0 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m на температури од око 15,0 °C, око 1,80 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m на температури од око 21,0 °C односно око 2,70 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m на температури од око 19,0 °C.

На слици 105 приказана је редукција максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у функцији промене дужине ламеле Δl и то у виду средње, средње зимске и средње летње промене током експлоатације. Разматрани су један карактеристичан зимски и један карактеристичан летњи циклус. На основу дијаграма може се закључити да приказани термички напони затезања током периода експлоатације опадају са редукцијом дужине ламеле и то за просечно 0,91 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 15,0 m, односно 1,52 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 12,5 m и 2,20 МПа при промени дужине ламеле са 20,0 m на 10,0 m.

Предложени поступак моделирања омогућава анализу термичких напона затезања код брана које се граде методом блокова, као и процену могућности настанка прслина у било ком тренутку током грађења и експлоатације. Након бетонирања једног блока долази до његовог ширења које је изазвано загревањем услед ослобађања топлоте хидратације. Због ограничене деформације, услед садејства са суседним блоковима, јављају се напони притиска у блоку. На загревање блока могу утицати и високе температуре ваздуха у дужем временском периоду. Током процеса хлађења бетона долази до његовог скупљања и, услед ограничене деформације због садејства са суседним блоковима, напони притиска прелазе у напоне затезања. Хлађење бетона може бити нагло (резултат нагле промене сезонске температуре), што утиче на појаву напона затезања у површинским зонама или постепено (резултат природног процеса којим температура бетона тежи да се изједначи са просечном вишегодишњом температуром ваздуха), што утиче на појаву напона затезања у унутрашњости конструкције. Већи температурни градијенти доводе до већих вредности напона затезања у конструкцији.

Максимални термички напони затезања у току периода изградње последица су наглог хлађења бетона бране у површинској зони. Екстремне вредности термичких напона затезања током грађења и експлоатације јављају се и у блоковима који су бетонирани методом стубастих блокова. Због бржег напредовања, веће површине контакта са спољашњом средином, изложености високим температурама током грађења и саме величине ових блокова, у наведеним зонама долази до појаве великог температурног градијента у односу на суседне блокове што доводи до скупљања и појаве увећаних напона затезања.

Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури у току периода изградње, уочено је да термички напони затезања расту са редукцијом дужине ламеле и до 5,0 МПа при промени дужине ламеле за 10,0 m. Наведена појава се објашњава већим деформацијама скупљања услед хлађења код ламела мањих дужина услед мањег степена ограничености површинских блокова, као и лакшим (бржим) хлађењем ламела мањих дужина. Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури током експлоатације, уочено је да термички напони затезања опадају са редукцијом дужине ламеле и до 2,70 МПа при промени дужине ламеле за 10,0 m. Смањењем дужине ламеле

на 10,0 m за разматрану ламелу могу се потпуно елиминисати зоне у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање.

Промена максималних вредности термичких напона затезања са редукијом дужине ламеле током грађења и експлоатације конструкције је већа за време виших температура ваздуха док се за време ниских температура јављају највеће вредности термичких напона затезања у разматраном прорачунском периоду.

7.3 Утицај контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања

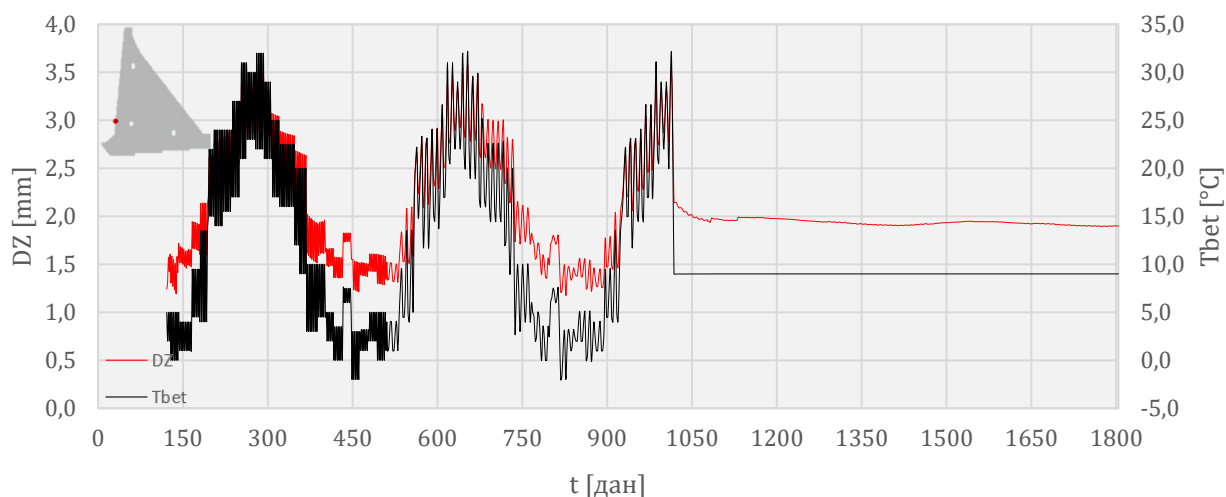
У досадашњој пракси термичко-напонских анализа гравитационих бетонских брана од класичног хидротехничког бетона које се граде методом блокова, прорачунски модел чини једна ламела бране јер се претпоставља да дилатационе разделнице нису предвиђене да прихвате било какве силе. Као последица наведене претпоставке, поменути прорачунски модели дефинишу се тако да се њихове границе налазе управо на местима ових дилатационих разделница.

Међутим, реално понашање дилатационих разделница условљено је њиховим положајем између две масивне бетонске ламеле гравитационе бране које „раде“ у складу са сезонским променама спољашње температуре ваздуха као и физичко-хемијским процесима који се одвијају у самом материјалу (хидратација цемента, реолошки процеси, старење, алкално-силикатне реакције и друго). Пример изведене дилатационе разделнице на брани ХЕ „Ђердап 1“ са резултатима мерења отварања и затварања приказан је у поглављу 4.3.2.

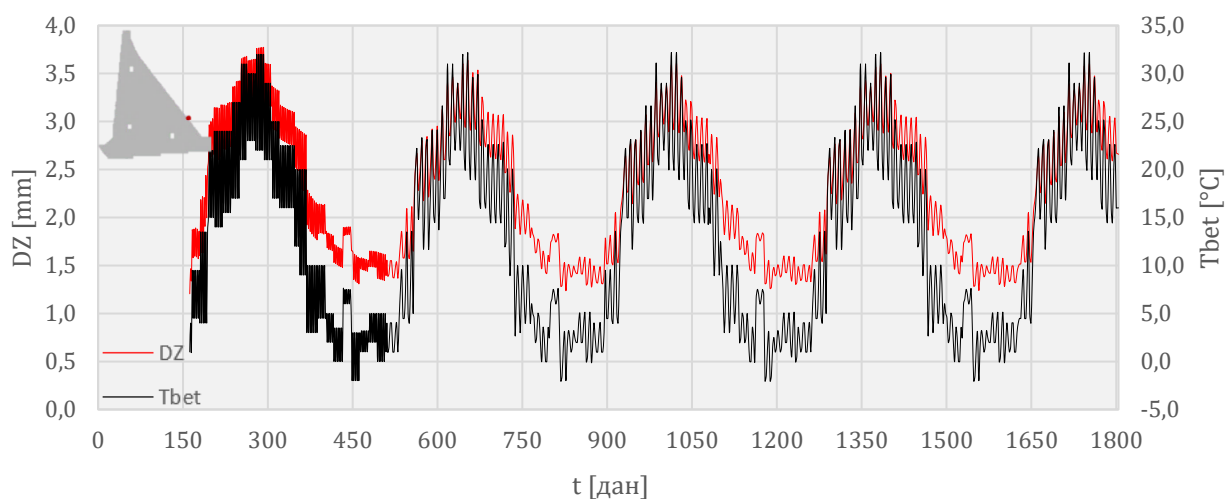
На основу наведеног може се закључити да дилатациона разделница између суседних ламела бране може да се „затвори“ приликом њиховог ширења (на вишим температурама), односно да се „отвори“ приликом њиховог скупљања (на нижим температурама). Ако претпоставимо да оваква разделница нема могућност прихватања сила затезања (приликом скупљања суседних ламела) јер је њен капацитет на затезање минималан (видети конструктивне детаље који су приказани у оквиру поглавља 4.3.2, слике 11. и 12.) преостаје могућност задавања контурног услова који може прихватити само напоне притиска (приликом ширења суседних ламела). Ова могућност је оправдана имајући у виду да су суседне ламеле лево и десно од дилатационе разделнице веома масивне и практично се додирују. Како конструкција у правцу осе бране „ради“, наведени контакт ће се остварити након достизања померања која симулира додиривање суседних ламела (видети поглавље 6.2.6).

Развијени прорачунски модели за потребе анализе утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања обухватају једну ламелу дужине 15,0 m и узимају у обзир сопствену тежину конструкције и све релевантне термичке процесе (видети табелу 4), скупљање бетона, хидростатички притисак и силе од узгона као и одговарајуће термичке и напонско-деформацијске контурне услове (у складу са поглављима 6.2.5 и 6.2.6).

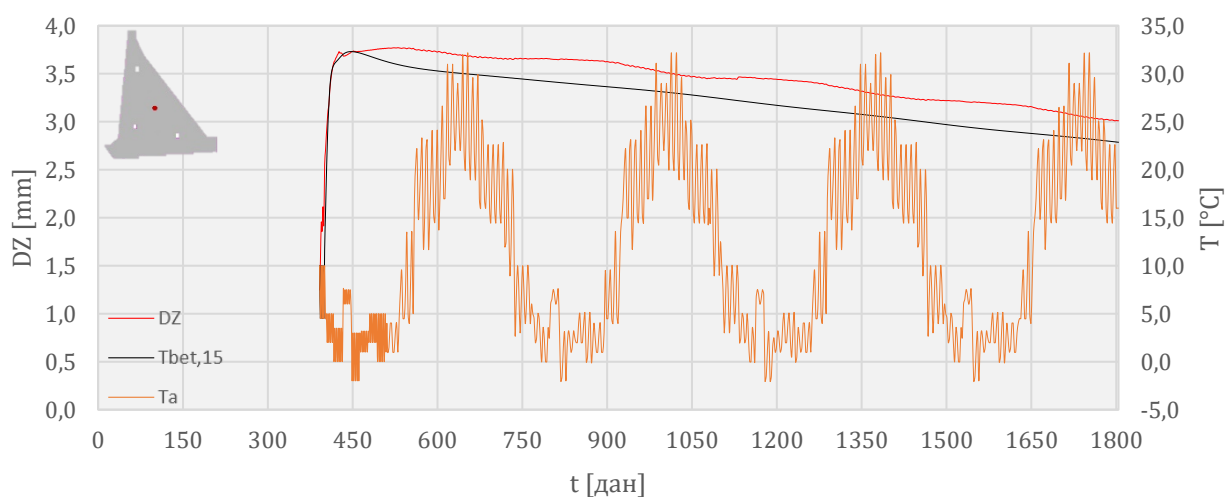
Након задавања контурног услова на месту дилатационе разделнице извршена је параметарска анализа „рада“ разделнице тако да се активирање контакта дешава након достизања граничног померања у интервалу од 0 до 5 mm. Опсег параметризације граничног померања изабран је имајући у виду ред величине „рада“ разделнице приказаног примера из праксе (поглавље 4.3.2) као и вредности померања у правцу осе бране тачака на бочним страницама модела које се налазе наспрам карактеристичних тачака са слике 38. Вредности померања поменутих тачака у правцу осе бране пре задавања бочног контурног услова на месту дилатационе разделнице приказане су на сликама које следе, а за прорачун III из табеле 4. Ове вредности померања су, према конвенцији програма, позитивне на десној половини модела ламеле, док су на левој негативне. По апсолутној вредности, наведене вредности померања, посматрано симетрично у односу на средњу раван ламеле, су исте.



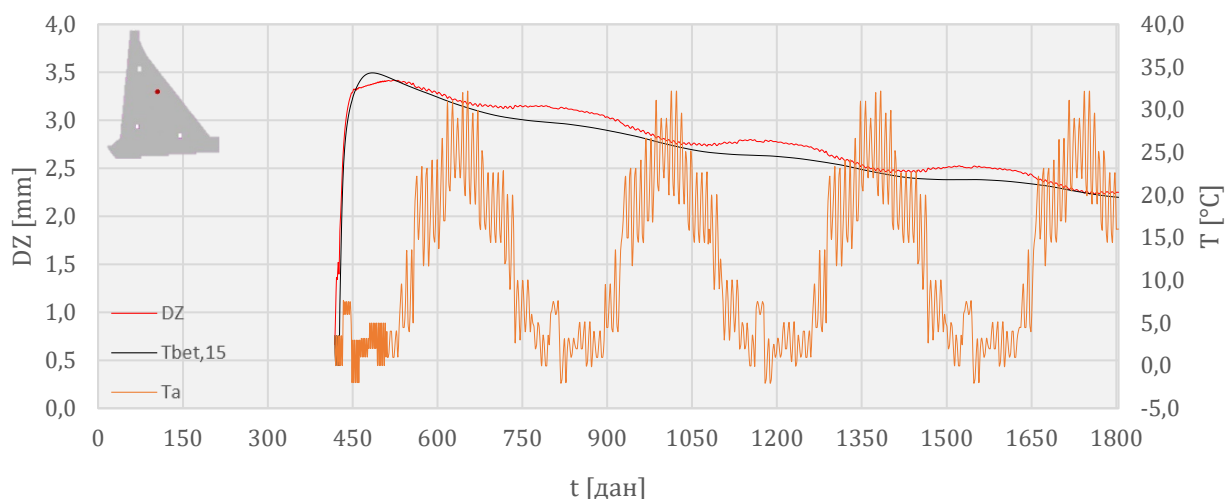
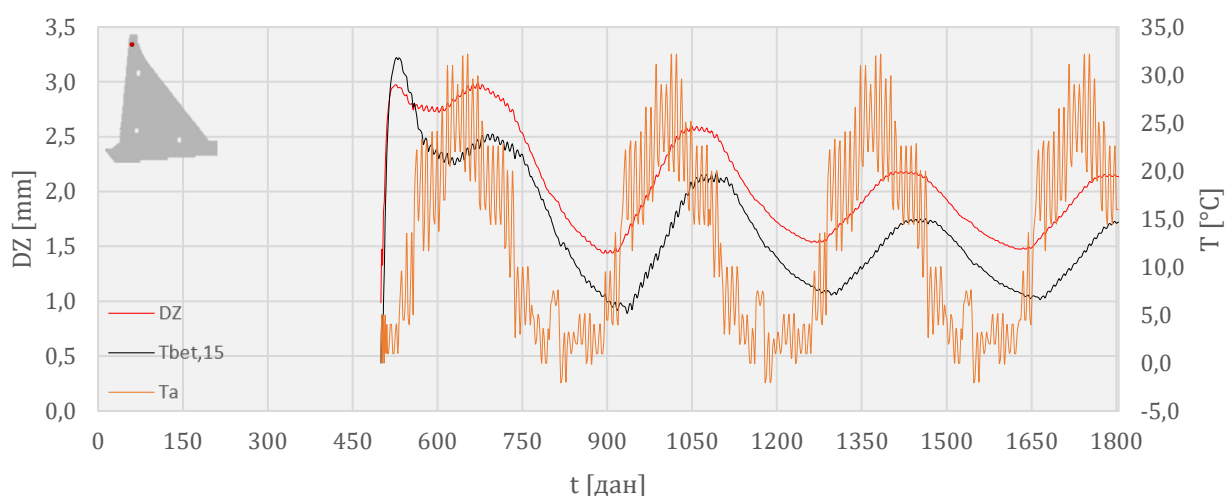
Слика 106. Померање D_z чвора 4905 на бочној страници модела наспрам чвора 2787



Слика 107. Померање D_z чвора 4971 на бочној страници модела наспрам чвора 2853



Слика 108. Померање D_z чвора 5056 на бочној страници модела наспрам чвора 2938

Слика 109. Померање D_z чвора 5134 на бочној страници модела наспрам чвора 3016Слика 110. Померање D_z чвора 5303 на бочној страници модела наспрам чвора 3184

Као резултат прорачуна утицаја контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања приказана су напонска стања у одговарајућим вертикалним и хоризонталним пресецима, зоне у средњој равни у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у правцу осе бране, дијаграми напона у карактеристичним тачкама као и дијаграми промена максималних вредности напона затезања у средњој равни за карактеристичне фазе изградње и експлоатације. Резултати у вертикалним пресецима се односе на средњу раван ламела јер су σ_z (SZ) напони у овој равни највећи.

Као и у претходном поглављу (7.2), контакт стенске масе и бетонске конструкције није моделиран посебно па је поменута зона изостављена из приказа резултата и то искључивањем бетонских блокова који се налазе у контакту са стенском масом (блокови 1 до 4).

На основу добијених резултата може се уочити да сви блокови посматране ламеле приликом грађења пролазе кроз напонска стања онако како је то већ напоменуто у поглављу 7.2 са разликом да моделирана дилатациона разделница уноси значајне напоне притиска, у зависности од задате граничне вредности померања. Већи притисци у пресеку јављају се за задата мања гранична померања. Због тога ће се напонска стања у изабраним карактеристичним вертикалним и хоризонталним пресецима увек приказивати паралелно са вредностима померања како би се стекао

реалан увид на утицај моделиране разделнице на напонско стање у конструкцији (слике 111. до 122. и 133. до 144.).

7.3.1 Напони у фази изградње

Посматрајући резултате температурног поља који су приказани у оквиру поглавља 7.1.2, као и резултате напонско-деформацијске анализе који су приказани на сликама 111. до 122. може се закључити да су максимални напони затезања (и преко 10,0 МПа за гранични услов 5,0 mm, односно и преко 8,0 МПа за гранични услов 0,0 mm) у току периода изградње последица наглог хлађења бетона бране у површинској зони. Високе вредности напона затезања јављају се и у средини блокова који су бетонирани методом стубастих блокова и који су напредовали у односу на суседне блокове (видети поглавље 4.2.3). Ове зоне су биле изложеније условима спољашње средине. У наведеним зонама се, због већег температурног градијента у односу на суседне, хладније, блокове јављају увећане вредности напона затезања.

На сликама 111. до 116. (на којима су приказани напони у средњој равни заједно са померањима у правцу осе бране на бочним страницама модела) евидентан је процес опадања напона затезања са редукцијом задате граничне вредности померања.

Вредности максималних напона у средњој равни за 84. дан (слика 111.) крећу се у следећим интервалима:

- од 9,90 МПа до -10,25 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 9,77 МПа до -10,59 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 9,0 МПа до -12,74 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 8,15 МПа до -13,80 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

При томе, максимална померања DZ у равни дилатационе разделнице (слика 112.) износе:

- 4,81 mm за модел са контурним условом 5,0 mm,
- 3,00 mm за модел са контурним условом 3,0 mm,
- 1,0 mm за модел са контурним условом 1,0 mm и
- 0,0 mm за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у средњој равни за 283. дан (слика 113.) крећу се у следећим интервалима:

- од 4,32 МПа до -12,01 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 4,14 МПа до -14,42 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 2,02 МПа до -17,51 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -0,68 МПа до -18,94 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

При томе, максимална померања DZ у равни дилатационе разделнице (слика 114.) износе:

- 5,00 mm за модел са контурним условом 5,0 mm,
- 3,00 mm за модел са контурним условом 3,0 mm,
- 1,00 mm за модел са контурним условом 1,0 mm и

- 0,00 mm за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у средњој равни за 512. дан (слика 115.) крећу се у следећим интервалима:

- од 10,92 МПа до -6,17 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 10,70 МПа до -7,04 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 6,05 МПа до -10,83 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 4,79 МПа до -11,88 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

При томе, максимална померања DZ у равни дилатационе разделнице (слика 116.) износе:

- 5,00 mm за модел са контурним условом 5,0 mm,
- 3,00 mm за модел са контурним условом 3,0 mm,
- 1,00 mm за модел са контурним условом 1,0 mm и
- 0,00 mm за модел са контурним условом 0,0 mm.

Важно је уочити да се увећане вредности напона затезања задржавају (али и редукују) у површинским зонама као последица наглог хлађења конструкције услед ниских температура ваздуха (слике 111. и 112. као и слике 115. и 116.).

На сликама 117. до 122. приказана су напонска стања као и померања у правцу осе бране у одабраним хоризонталним пресецима у току грађења за поједине вредности граничних померања и то: пресек на коти 146,50 mm (за 84. дан), пресек на коти 169,0 mm (за 283. дан) и пресек на коти 162,75 mm (за 512. дан). Положај наведених хоризонталних пресека одабран је тако да одговара пресецима у оквиру анализе утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања. И овде изабрани пресеци добро приказују зоне са увећаним вредностима напона затезања у бетону као и промену ових напона са редукацијом вредности граничних померања.

Вредности максималних напона у равни на коти 146,50 mm за 84. дан (слика 117.) крећу се у следећим интервалима:

- од 8,79 МПа до -4,89 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 8,79 МПа до -4,92 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 3,53 МПа до -8,27 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 2,06 МПа до -9,20 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у равни на коти 169,0 mm за 283. дан (слика 119.) крећу се у следећим интервалима:

- од 1,28 МПа до -5,90 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 0,80 МПа до -13,14 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од -4,75 МПа до -14,15 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -6,11 МПа до -14,55 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у равни на коти 162,75 mm за 512. дан (слика 121.) крећу се у следећим интервалима:

- од 5,45 МПа до -3,53 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,

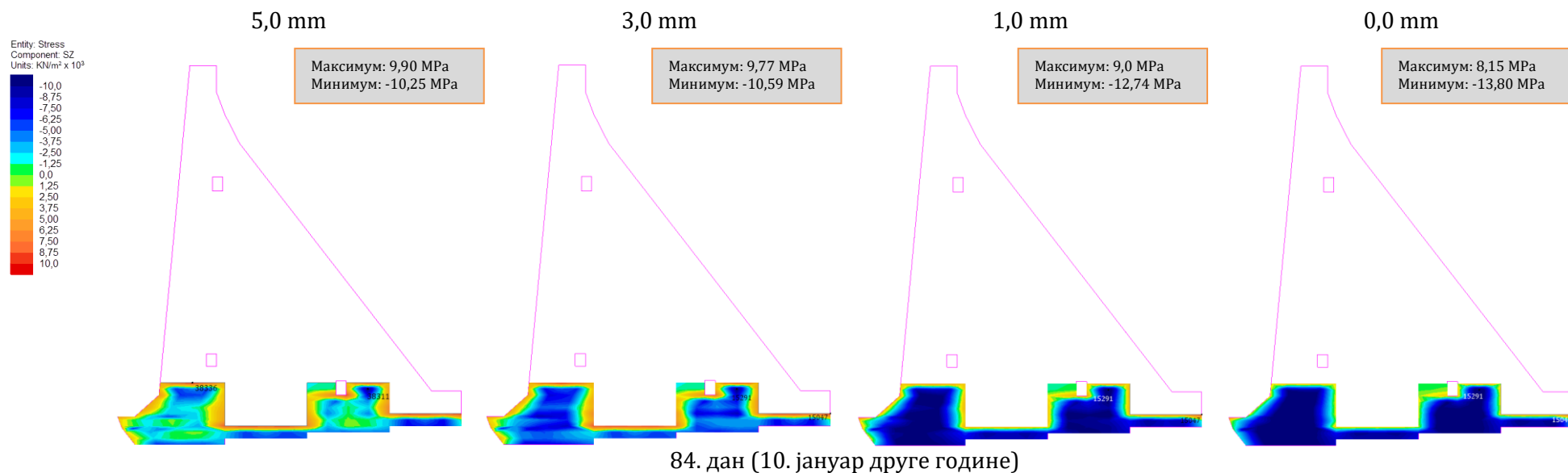
- од 5,39 МПа до -9,38 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 1,99 МПа до -10,25 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 0,74 МПа до -11,54 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

При томе, максимална померања DZ у равнима на приказаним котама на месту дилатационе разделнице (слике 118., 120. и 122.) углавном достижу максималне вредности задатог контурног услова.

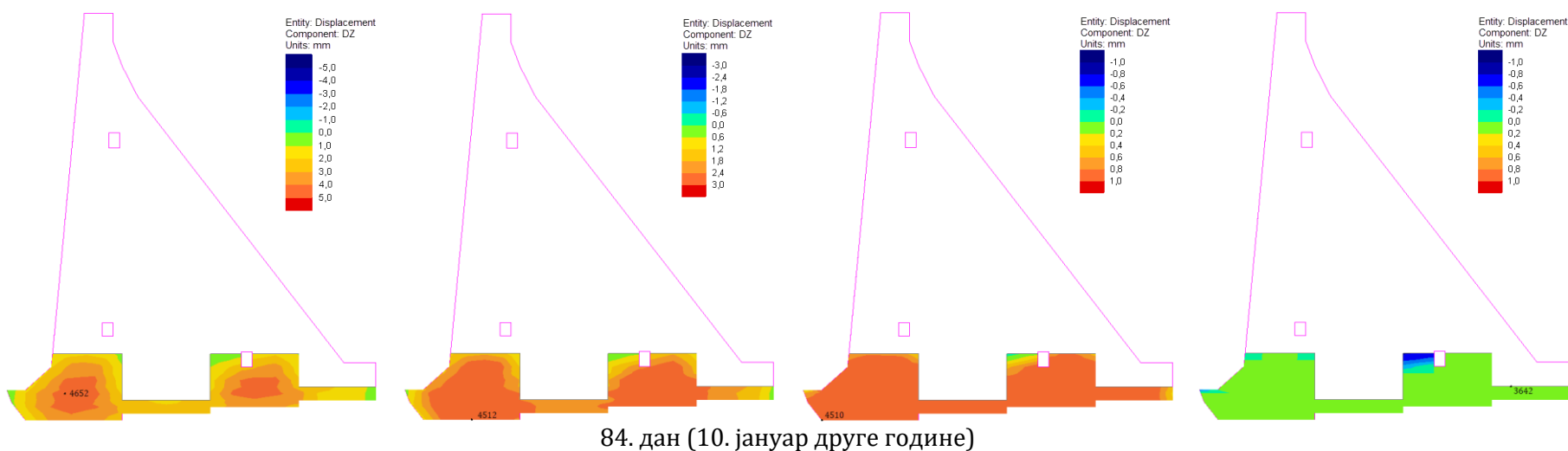
На сликама 123. и 124. приказане су зоне (обележене црвеном бојом) у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у карактеристичним тренуцима у средњој равни ламеле за поједине разматране вредности граничних померања. На наведеним сликама се уочава да је процес наглог хлађења бетона одговоран за прекорачење чврстоће бетона на затезање у површинским зонама. У унутрашњим деловима конструкције, зоне грађене методом стубастих блокова и даље показују прекорачења чврстоће бетона на затезање. Међутим, наведене зоне значајно губе на свом интензитету са редукцијом вредности граничних померања. За вредност граничног померања од 5,0 mm присутне су у одређеној мери у површинској зони, између доње и горње узводне галерије и местимично ка низводном лицу бране, за вредност од 3,0 mm се јављају само у површинској зони док за вредност од 1,0 mm готово да и не постоје.

На сликама 125. до 129. приказане су вредности напона σ_z у карактеристичним тачкама конструкције (слика 38.) у функцији граничног померања, периода изградње конструкције и израчунатих температура бетона T_{bet} а које су приказане у оквиру поглавља 7.1.1 за ламелу дужине 15,0 m.

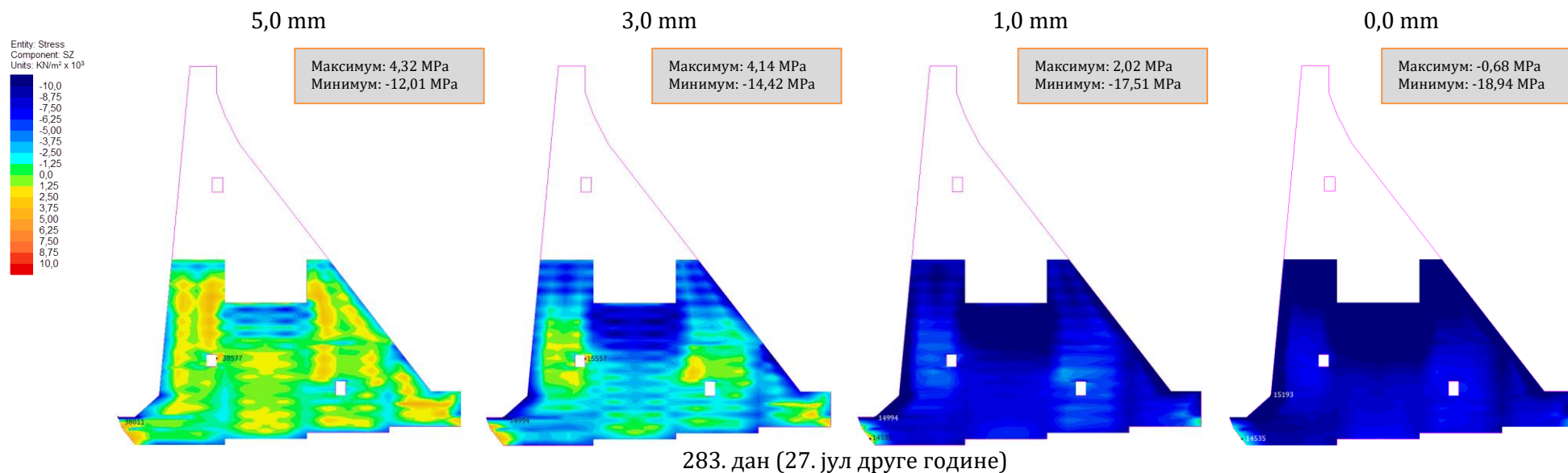
Позитивне вредности напона σ_z , према конвенцији програма [63], одговарају напонима затезања, док негативне вредности одговарају напонима притиска у посматраном чвору конструкције.



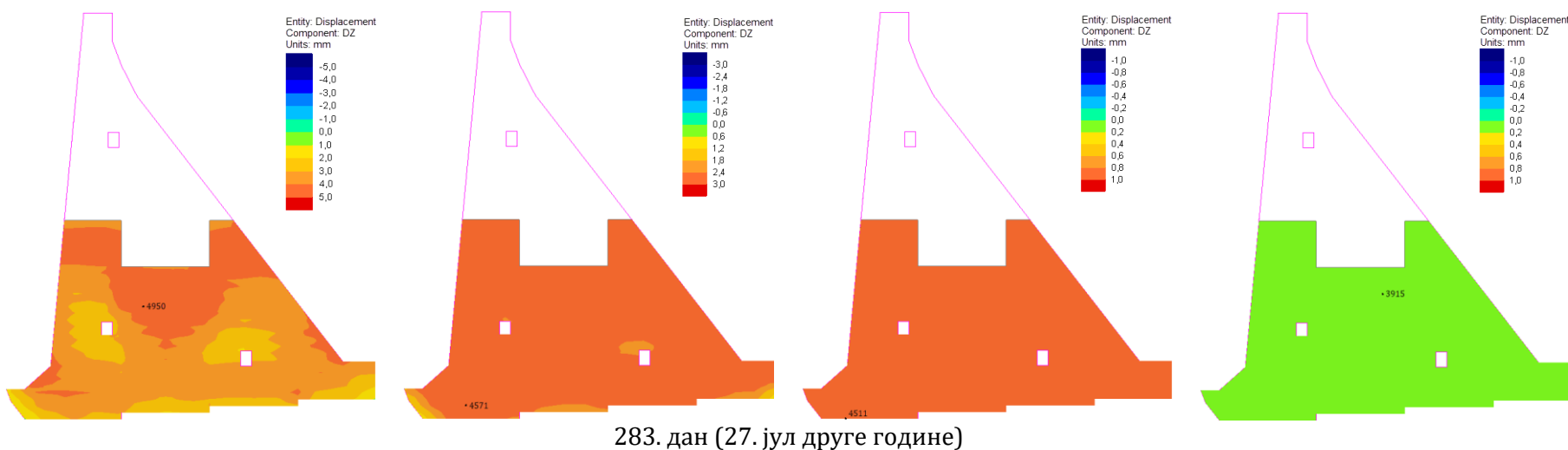
Слика 111. Стање напона σ_z у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



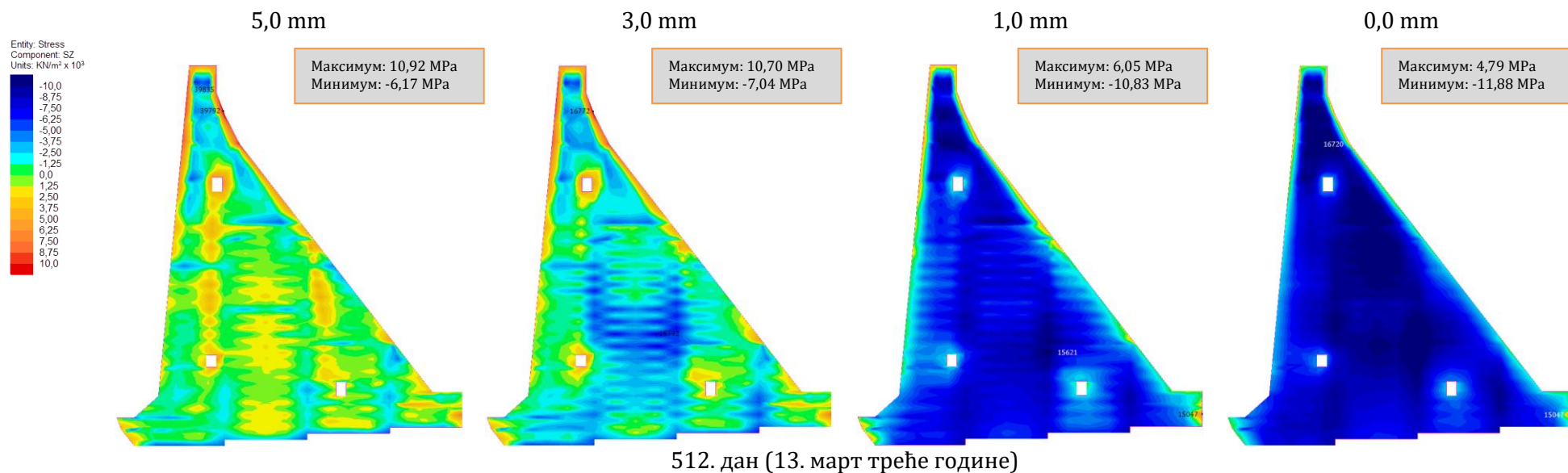
Слика 112. Померање D_z на месту дилатационе разделнице ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



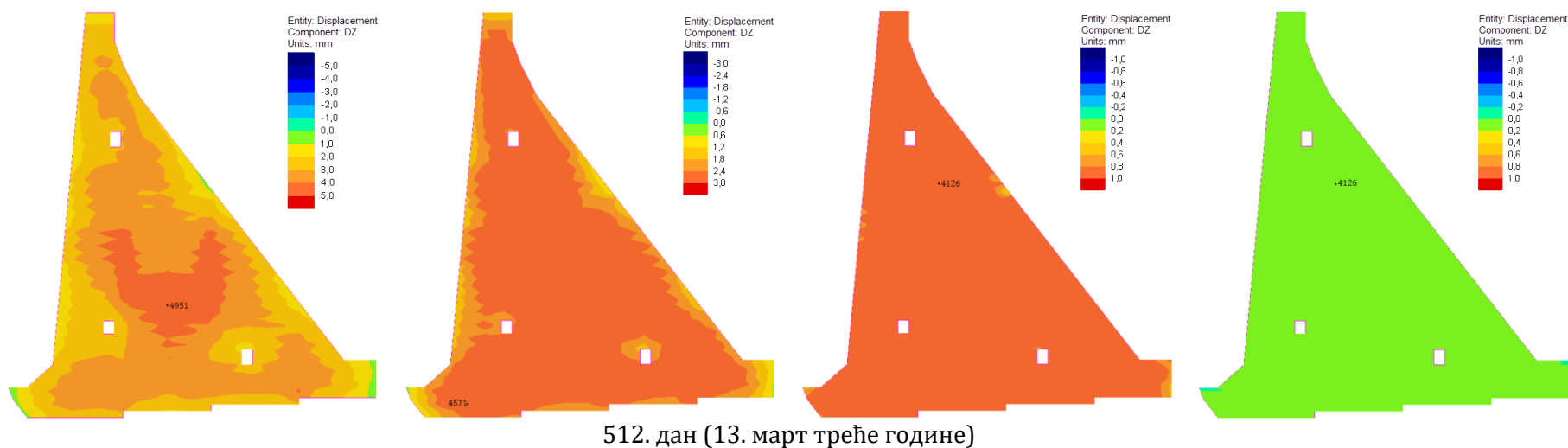
Слика 113. Стање напона σ_z у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



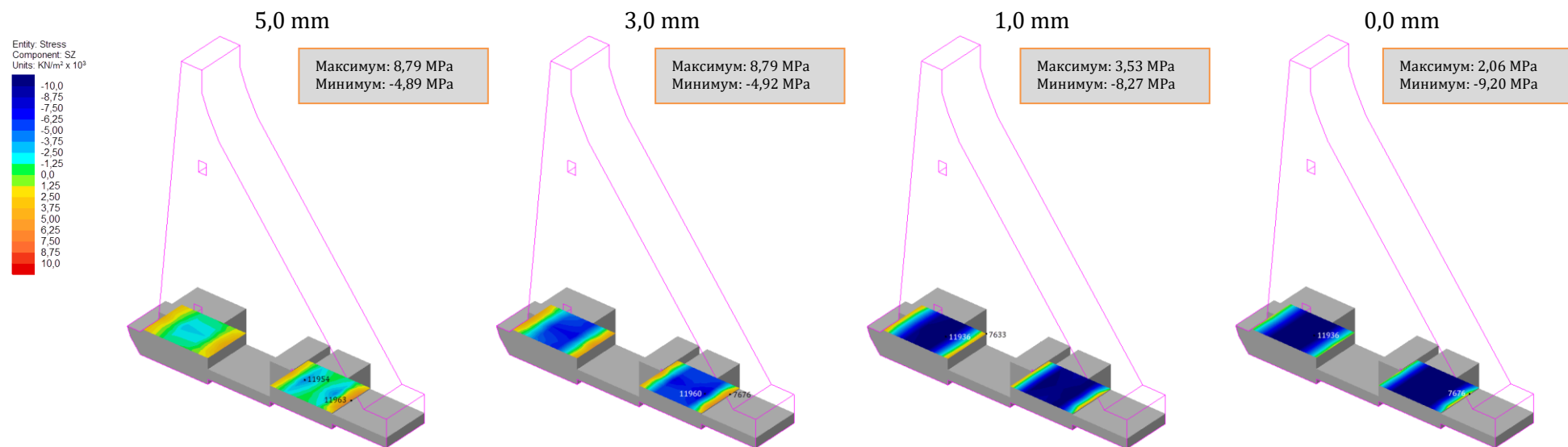
Слика 114. Померање D_z на месту дилатационе разделнице ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



Слика 115. Стање напона σ_z у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања

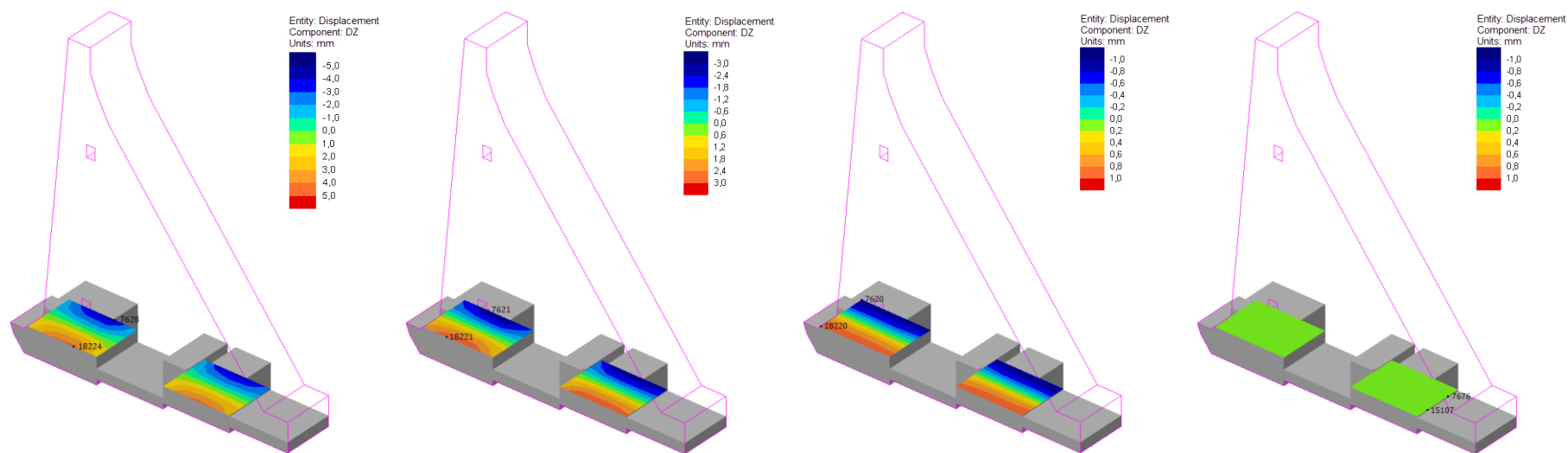


Слика 116. Померање D_z на месту дилатационе разделнице ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



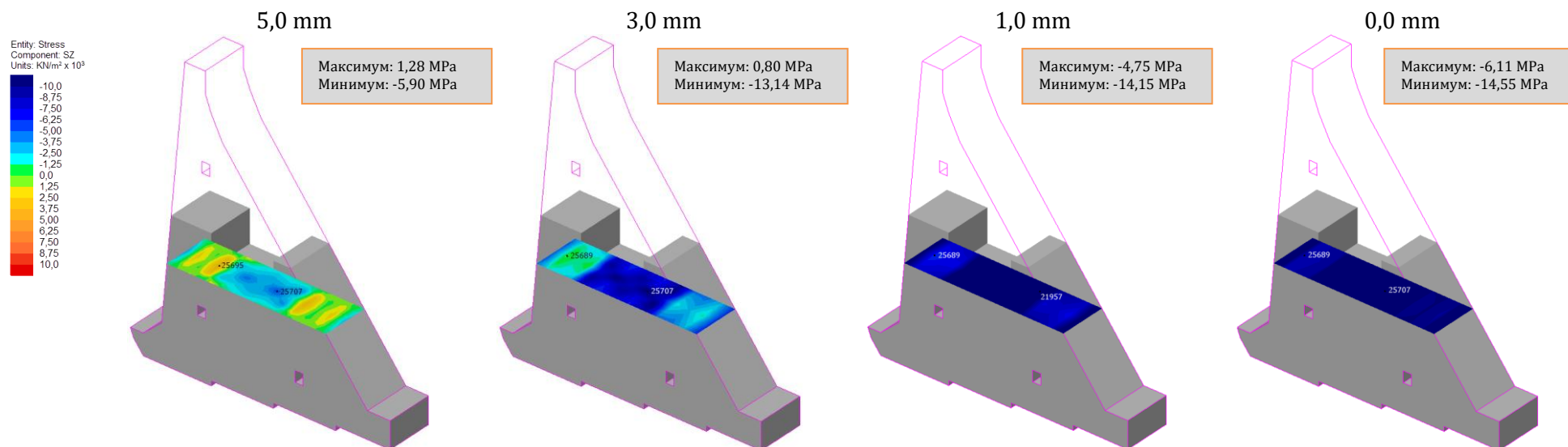
84. дан (10. јануар друге године); раван на коти 146,50 mm

Слика 117. Стање напона σ_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



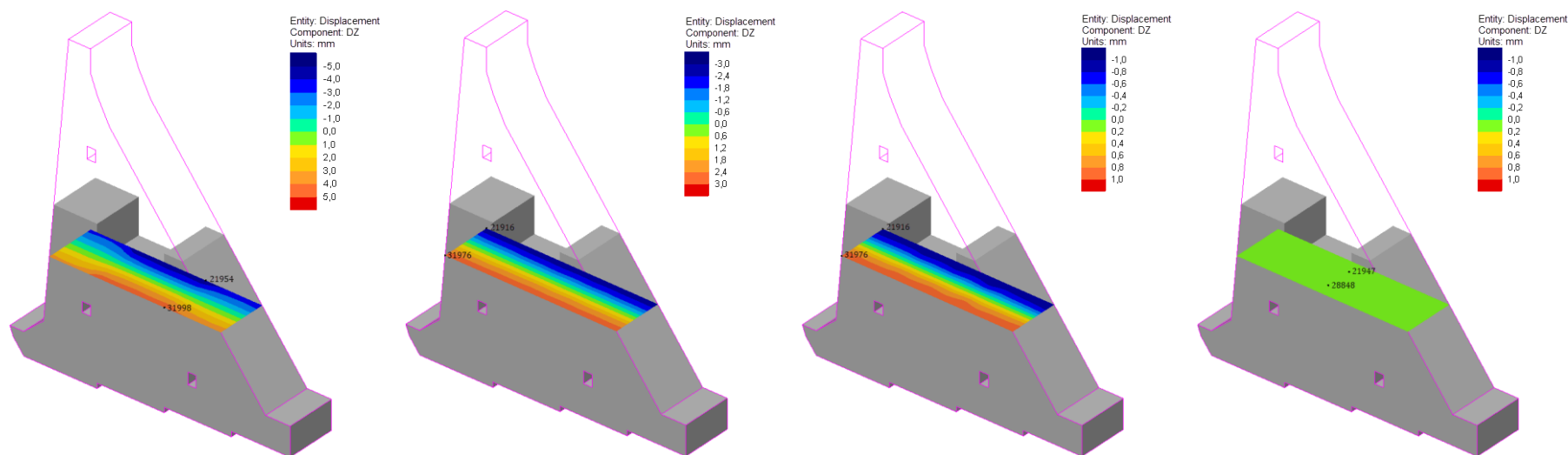
84. дан (10. јануар друге године); раван на коти 146,50 mm

Слика 118. Померање D_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



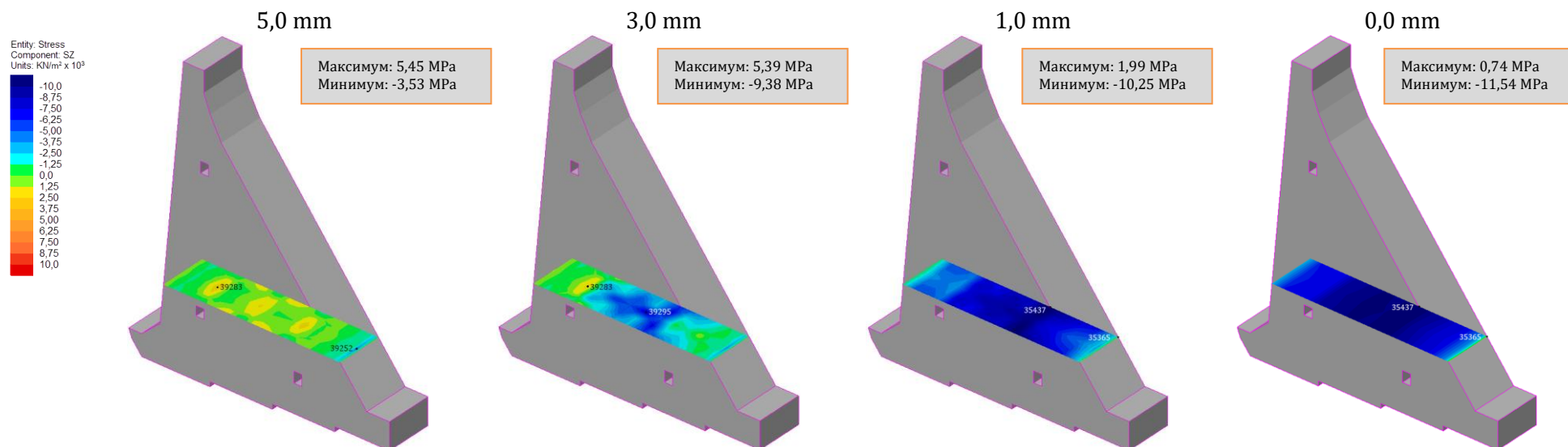
283. дан (27. јул друге године); раван на коти 169,0 mm

Слика 119. Стање напона σ_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



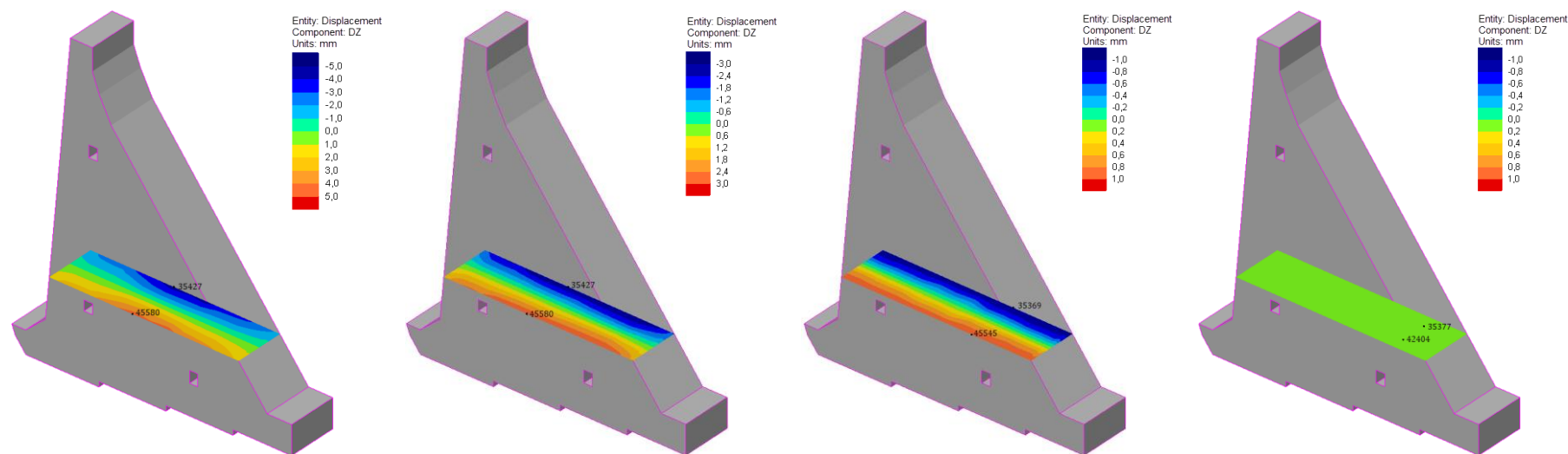
283. дан (27. јул друге године); раван на коти 169,0 mm

Слика 120. Померање D_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



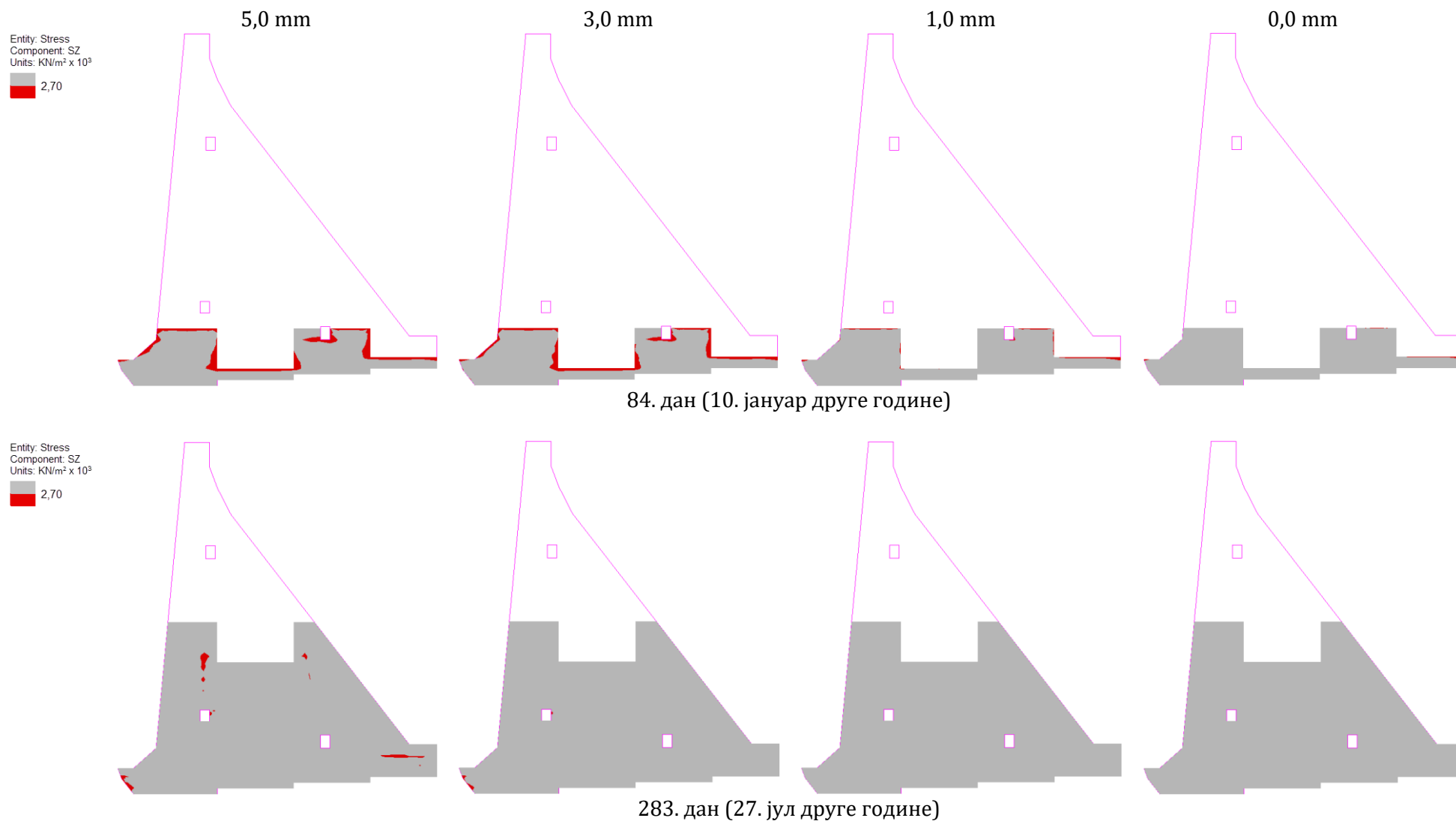
512. дан (13. март треће године); раван на коти 162,75 mm

Слика 121. Стање напона σ_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања

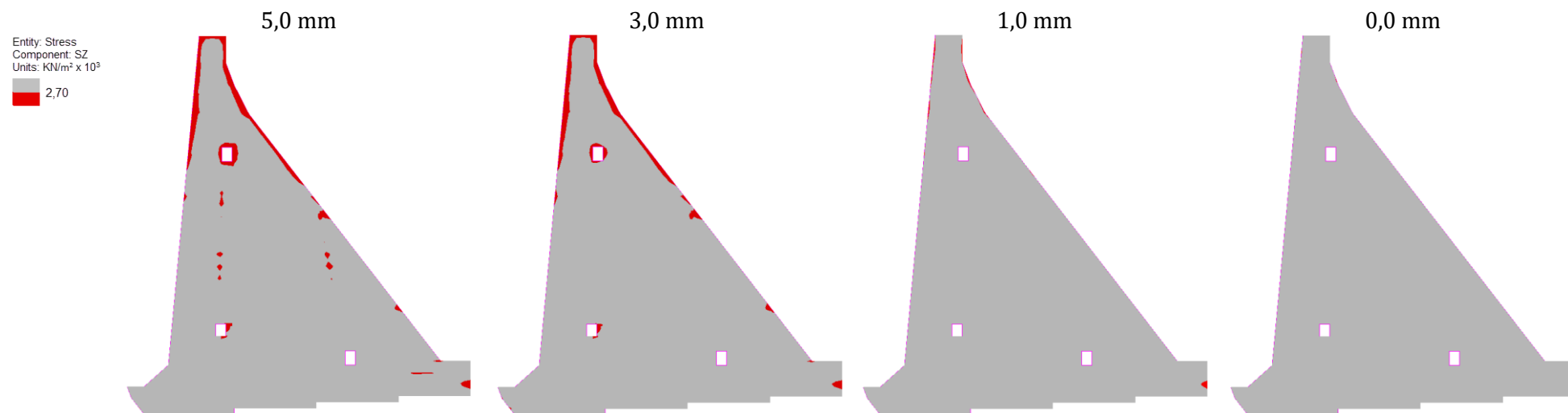


512. дан (13. март треће године); раван на коти 162,75 mm

Слика 122. Померање D_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



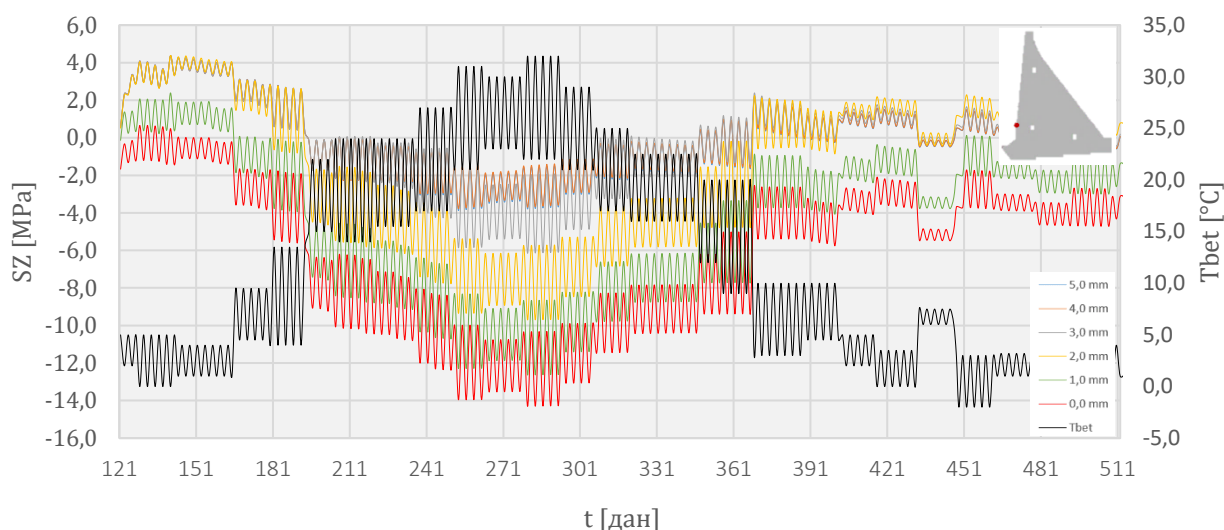
Слика 123. Зоне у којима је прекорачена чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



512. дан (13. март треће године)

Слика 124. Зоне у којима је прекорачена чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања

На слици 125 приказана је вредност напона σ_z у чвору 2787, који се налази у средњој равни ламеле и то на средини узводне стране блока 25, током периода изградње. Чвор је од тренутка бетонирања у периоду грађења изложен температури ваздуха која се периодично мења на годишњем нивоу (од $-2,0$ до $33,0$ °C) па температура бетона у посматраном чвору прати сезонске и дневне осцилације температуре ваздуха. Са сезонском и дневном променом температуре бетона у посматраном чвору, може се уочити и промена напона за разматране вредности граничних померања. Са опадањем температура расту напони затезања док са порастом температура расту напони притиска.



Слика 125. Вредност напона σ_z у чвору 2787 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

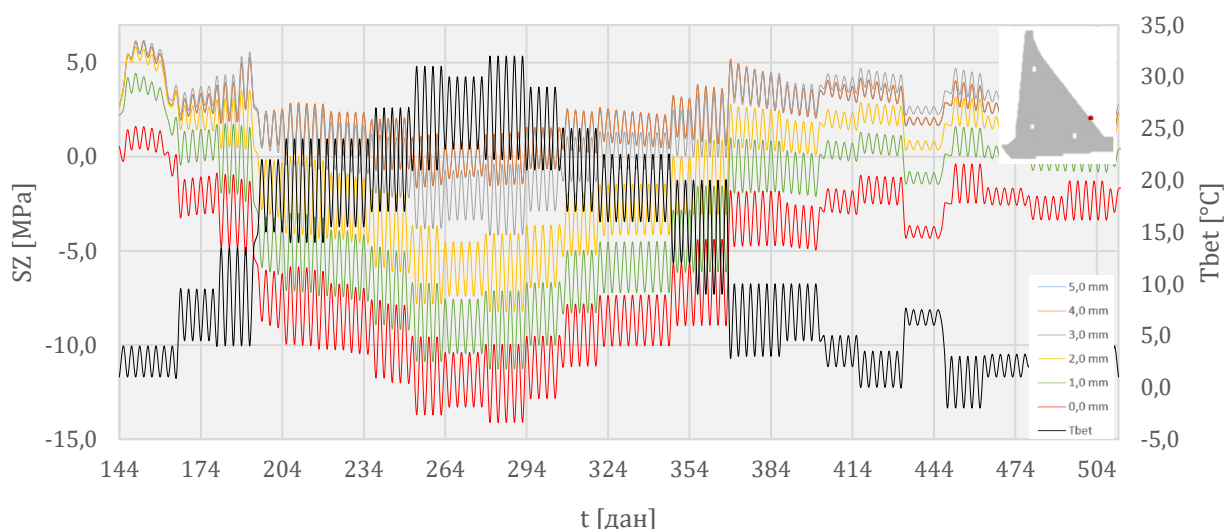
- од 4,38 МПа до -3,83 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 4,37 МПа до -3,78 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 4,37 МПа до -6,15 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 4,38 МПа до -9,71 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од 2,39 МПа до -12,64 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 0,65 МПа до -14,31 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 2853, који се налази у средњој равни ламеле на средини низводне стране блока 30, приказана је на слици 126. Чвор је у периоду грађења такође под утицајем ваздуха чија се температура периодично мења на годишњем нивоу (од $-2,0$ до $33,0$ °C). Као и код чвора 2787 и овде су уочљиве промене напона за разматране вредности граничних померања са сезонском и дневном променом температуре бетона у посматраном чвору.

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

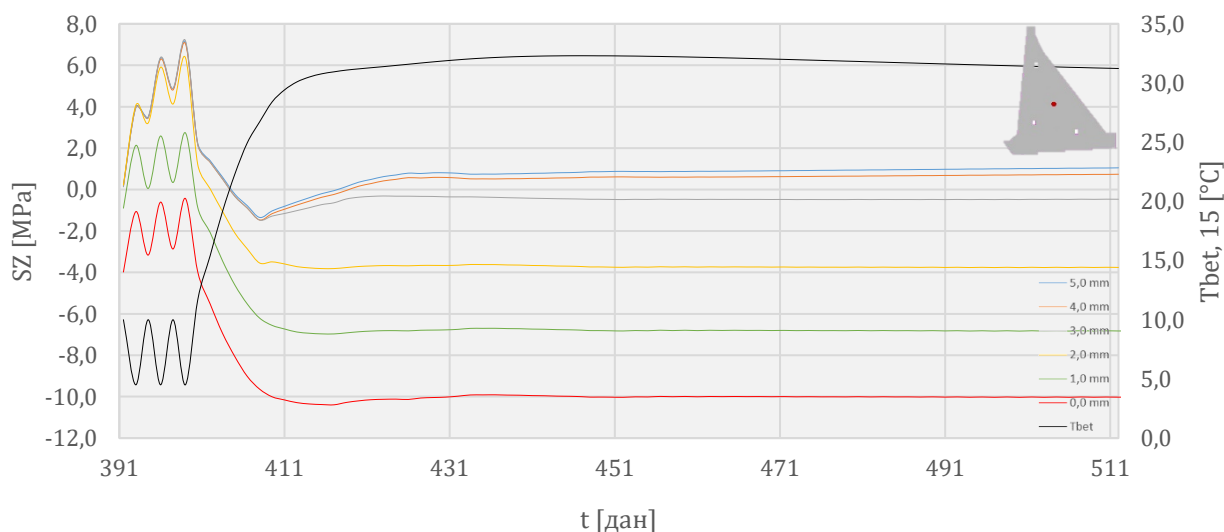
- од 6,12 до -1,65 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 6,12 до -1,67 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 6,19 до -4,17 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 5,84 до -8,23 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,

- од 4,43 до -11,28 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 1,61 до -14,12 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.



Слика 126. Вредност напона σ_z у чвору 2853 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 2938, који се налази у средњој равни ламеле, у централној зони бране, на средини горње стране блока 55, приказана је на слици 127. Чвор је након бетонирања блока (391. дан од почетка грађења конструкције) изложен ниским температурама ваздуха па се последично у њему јављају и увећани напони затезања проузроковани наглим хлађењем бетона. Вредности напона су прекорачене за контурни услов од 2,0 mm до 5,0 mm. Након 9 дана, избетониран је блок 57 а затим и преостали блокови. Температура у овом чвору почиње да расте услед ослобађања топлоте хидратације цемента (до максималне вредности од 32,30 °C) па напони затезања прелазе у напоне притиска. За посматрани чвор су уочљиве промене напона у функцији разматраних вредности граничних померања - са смањењем вредности граничних померања притисци у чвору расту. У случају у којем је потпуно спречено померање на бочним странама конструкције, може се уочити да у чвору влада искључиво напонско стање притиска.

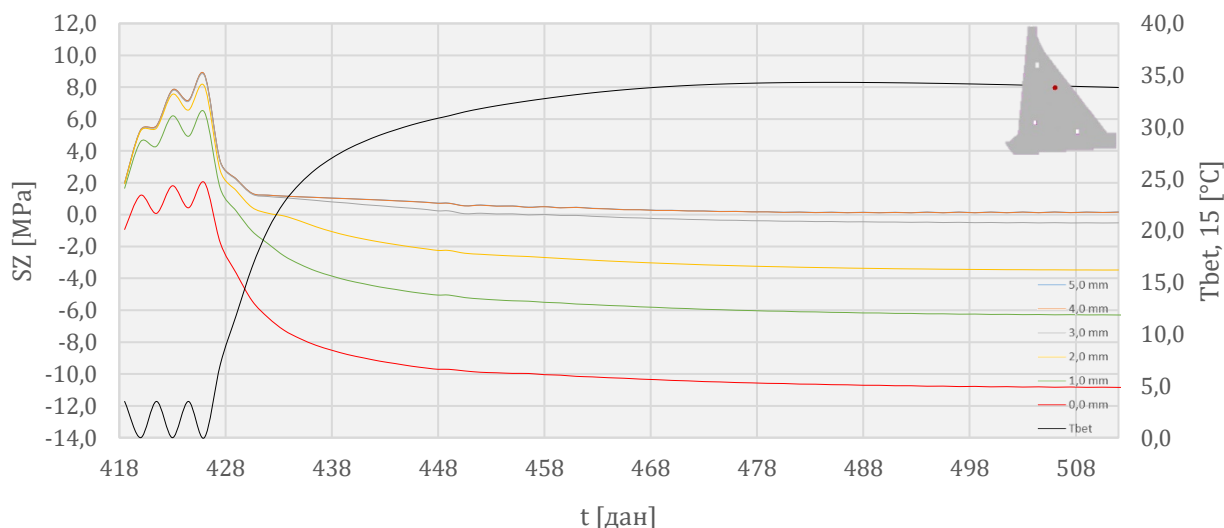


Слика 127. Вредност напона σ_z у чвору 2938 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

- од 7,13 до -1,35 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 7,05 до -1,47 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 7,20 до -1,47 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 6,37 до -3,82 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од 2,74 до -6,97 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -0,43 до -10,39 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 3016, који се налази у средњој равни ламеле, изнад централне зоне ламеле бране а ближе низводном лицу, на средини горње стране блока 61, приказана је на слици 128. Слично као и код чвора 2938, чвор 3016 је након бетонирања блока (418. дан од почетка грађења конструкције) изложен ниским вредностима температуре ваздуха. Вредности напона су прекорачене за све контурне услове осим за вредност од 0,0 mm. Након 9 дана, избетониран је блок 63 а затим и преостали блокови. И овде је уочљив процес промене напона услед пораста температура у бетону (до максималне вредности од 34,31 °C) као и раст напона притиска са смањењем вредности граничних померања на месту дилатационе разделнице.



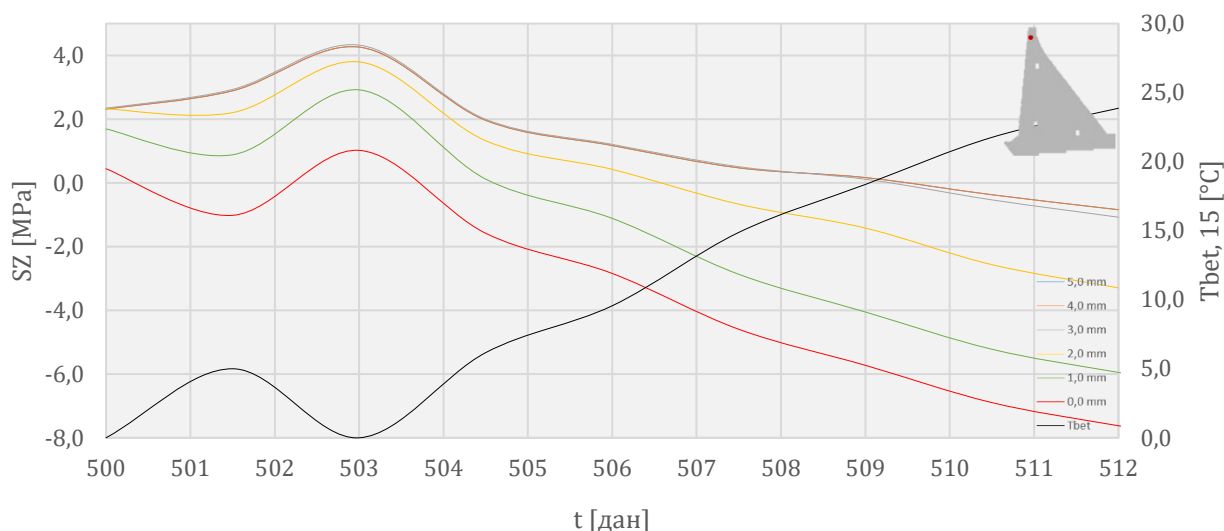
Слика 128. Вредност напона σ_z у чвору 3016 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

- од 8,80 до 0,12 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 8,81 до 0,11 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 8,74 до -0,52 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 8,07 до -3,48 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од 6,44 до -6,30 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 2,02 до -10,84 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредност напона σ_z током периода изградње у чвору 3184, који се налази у средњој равни ламеле, на средини горње стране блока 76, приказана је на слици 129. Чвор је након бетонирања блока (500. дан од почетка грађења конструкције) изложен температури ваздуха (која се креће у интервалу од 0,0 до 5,0 °C) па температура бетона

у посматраном чвору прати наведене промене температуре ваздуха. Ниске температуре у бетону и овде доводе до увећаних напона затезања. Након 4,5 дана, преко блока 76, којем припада посматрани чвор, је избетониран блок 77 а затим и завршни блок 78. Слично као и код чворова 2938 и 3016, температура бетона почиње нагло да расте услед ослобађања топлоте хидратације цемента (до максималне вредности од 23,87 °C) што доводи до пада напона затезања у посматраном чвору (који полако прелази у напоне притиска. На слици се, такође, може уочити раст напона притиска са смањењем вредности граничних померања на месту дилатационе разделнице.

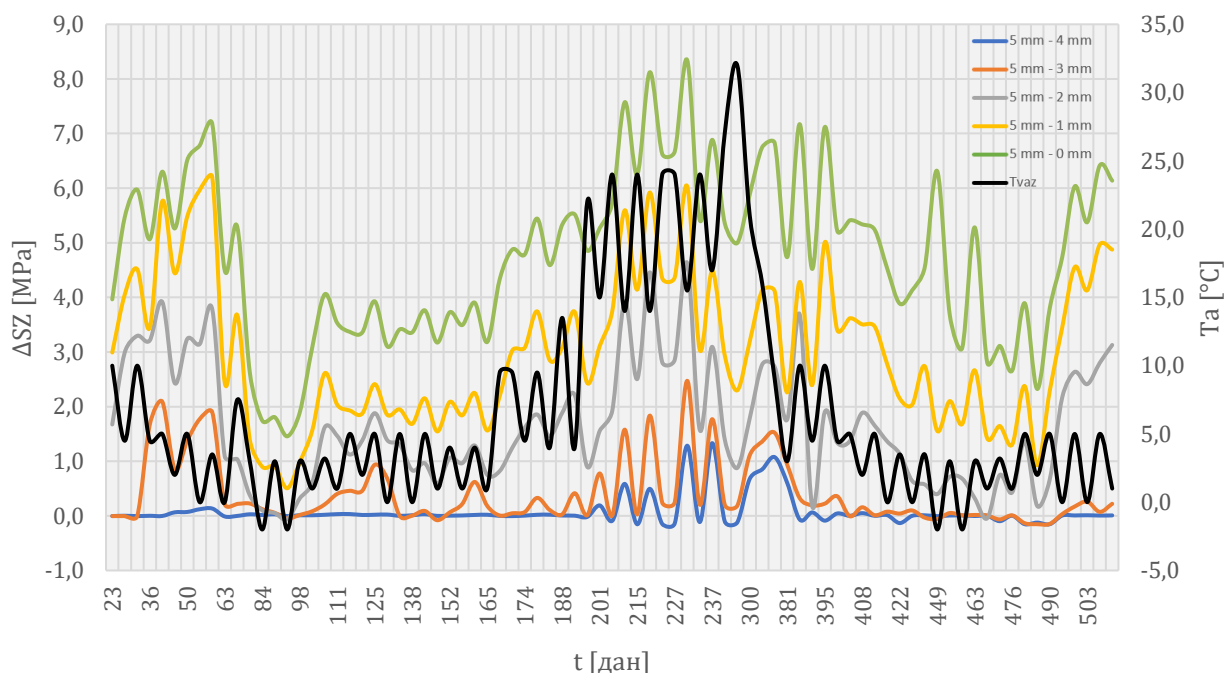


Слика 129. Вредност напона σ_z у чвору 3184 у фази изградње у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

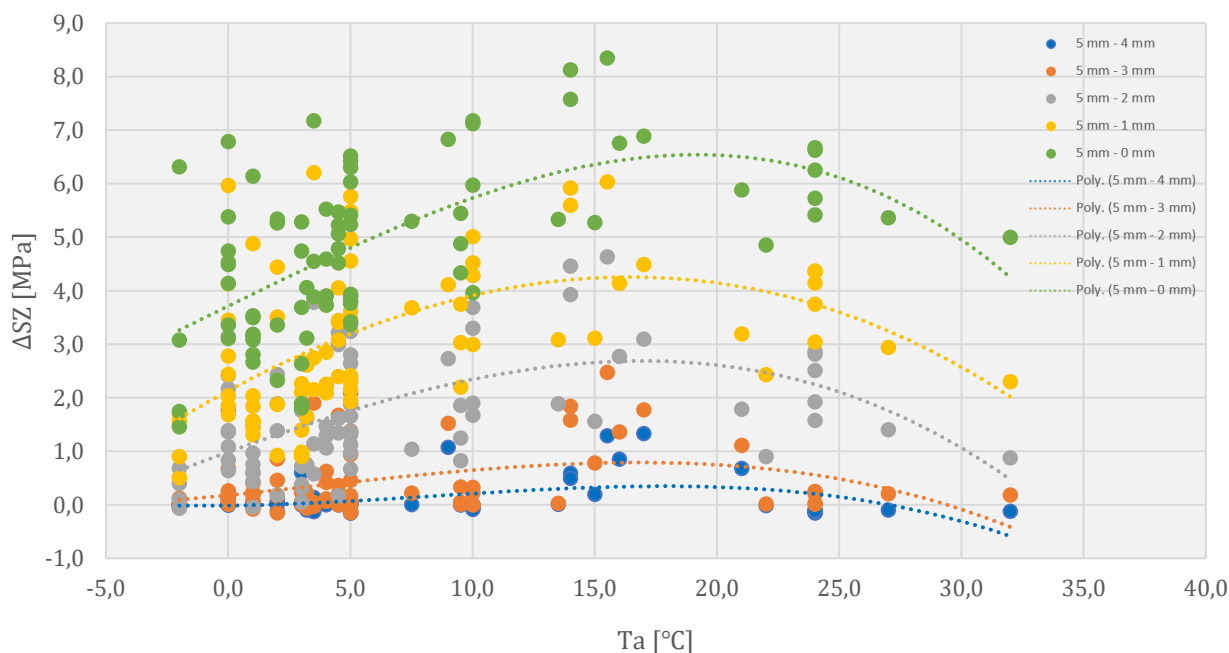
- од 4,26 МПа до -0,84 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 4,26 МПа до -0,84 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 4,32 МПа до -1,08 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 3,80 МПа до -3,30 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од 2,92 МПа до -5,95 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 1,02 МПа до -7,62 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

На слици 130 приказана је промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле $\Delta\sigma_z$ у функцији промене граничног померања задатог контурним условом, периода изградње и спољашње температуре ваздуха. Са наведеног дијаграма може се уочити да максималне вредности напона затезања у току грађења конструкције опадају са редукцијом вредности граничног померања на месту дилатационе разделнице (позитивна промена напона $\Delta\sigma_z$) и до 1,33 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 4,00 mm, 2,47 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 3,0 mm, 4,63 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 2,0 mm, 6,20 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 1,0 mm односно и до 8,34 МПа при промени дужине ламеле са 5,00 mm на 0,0 mm. Наведена појава се објашњава мањим деформацијама скупљања услед хлађења код ламела са мањим вредностима граничних померања јер је граничним условом претходно спречено и њено ширење услед загревања. Са дијаграма се уочава и да промена максималних вредности напона значајно прати сезонско осциловање спољашње температуре ваздуха.



Слика 130. Промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламеле у фази изградње у функцији промене граничног померања задатог контурним условом и спољашње температуре ваздуха T_a

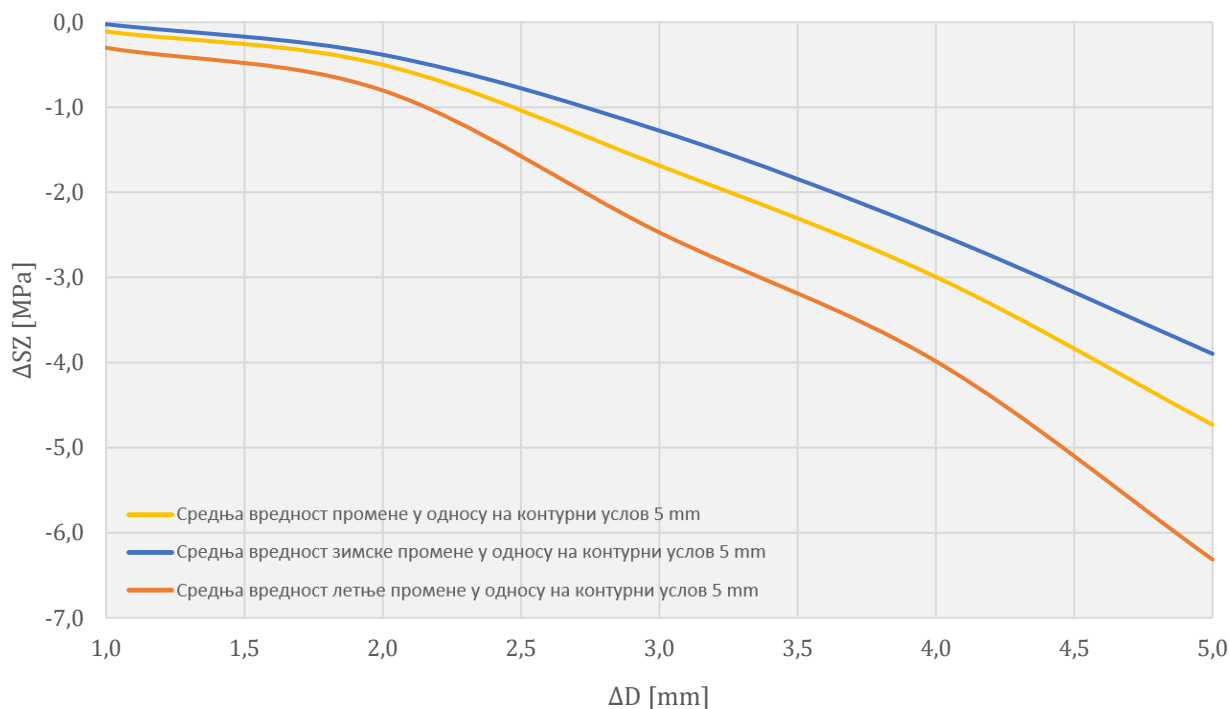
На слици 131 приказана је промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле $\Delta\sigma_z$ у функцији промене граничног померања задатог контурним условом (у односу на вредност од 5,0 mm) и спољашње температуре ваздуха за период изградње конструкције. Са наведеног дијаграма се може уочити и да је промена максималних вредности напона затезања са редукцијом вредности граничног померања у току грађења конструкције већа за време виших температура ваздуха док се за време ниских температура ваздуха јављају највеће вредности напона затезања у разматраном прорачунском периоду.



Слика 131. Просечна промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламеле у фази изградње у функцији промене граничног померања задатог контурним условом и спољашње температуре ваздуха T_a

Максималне вредности просечних промена напона затезања у функцији температуре су око 0,30 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 4,0 mm на температури од око 17,0 °C, око 0,80 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 3,0 mm на температури од око 18,0 °C, око 2,70 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 2,0 mm на температури од око 18,0 °C, око 4,20 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 1,0 mm на температури од око 18,0 °C, односно око 6,60 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 0,0 mm на температури од око 19,0 °C.

На слици 132 приказана је промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле $\Delta\sigma_z$ у функцији промене граничног померања ΔD и то у виду средње, средње зимске и средње летње промене за период изградње конструкције. Разматрани су један карактеристичан зимски и један карактеристичан летњи циклус.



Слика 132. Смањење максималних вредности напона затезања σ_z у средњој равни ламеле у фази изградње у функцији редукације граничног померања задатог контурним условом

На основу дијаграма може се закључити да максимални напони затезања у току периода изградње опадају са редукацијом вредности граничног померања, што није био случај када на бочним страницама модела нема задатог контурног услова (видети поглавље 7.2.1). Напони затезања опадају за просечно 0,11 МПа при промени вредности граничног померања са 5,0 mm на 4,0 mm, затим за 0,50 МПа при промени са 5,0 mm на 3,0 mm, онда за 1,69 МПа при промени са 5,0 mm на 2,0 mm, па за 2,99 МПа при промени са 5,0 mm на 1,0 mm и 4,73 МПа при промени са 5,0 mm на 0,0 mm.

7.3.2 Напони у фази експлоатације

Посматрајући резултате температурног поља који су приказани у оквиру поглавља 7.1.3, као и резултате напонско-деформацијске анализе који су приказани на сликама 133. до 144. може се закључити да су максимални напони затезања током периода експлоатације последица постепеног хлађења блокова у унутрашњости конструкције а нарочито оних који су бетонирани методом стубастих блокова и који су брже напредовали у односу на бетонирање преосталог дела конструкције. Ове зоне су биле изложеније условима спољашње средине.

На сликама 133. до 138. (на којима су приказани напони у средњој равни заједно са померањима у правцу осе бране на бочним страницама модела) евидентан је процес опадања напона затезања са редукијом задате граничне вредности померања. И овде је важно уочити да се увећане вредности напона затезања задржавају (али и редукују) у површинским зонама као последица наглог хлађења конструкције услед ниских температура ваздуха (слике 135. и 136.).

Вредности максималних напона у средњој равни за 1080. дан (слика 133.) крећу се у следећим интервалима:

- од 4,24 МПа до -5,93 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 3,60 МПа до -6,27 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 2,56 МПа до -9,06 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 0,22 МПа до -10,01 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

При томе, максимална померања DZ у равни дилатационе разделнице (слика 134.) износе:

- 5,00 mm за модел са контурним условом 5,0 mm,
- 3,00 mm за модел са контурним условом 3,0 mm,
- 1,00 mm за модел са контурним условом 1,0 mm и
- 0,00 mm за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у средњој равни за 1505. дан (слика 135.) крећу се у следећим интервалима:

- од 6,85 МПа до -6,13 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 6,85 МПа до -6,24 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 5,76 МПа до -8,32 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 4,26 МПа до -10,30 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

При томе, максимална померања DZ у равни дилатационе разделнице (слика 136.) износе:

- 4,95 mm за модел са контурним условом 5,0 mm,
- 3,00 mm за модел са контурним условом 3,0 mm,
- 1,00 mm за модел са контурним условом 1,0 mm и
- 0,00 mm за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у средњој равни за 1804. дан (слика 137.) крећу се у следећим интервалима:

- од 4,35 МПа до -6,19 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 3,60 МПа до -6,30 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 2,52 МПа до -8,23 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 0,39 МПа до -10,45 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

При томе, максимална померања DZ у равни дилатационе разделнице (слика 138.) износе:

- 4,74 mm за модел са контурним условом 5,0 mm,
- 3,00 mm за модел са контурним условом 3,0 mm,
- 1,00 mm за модел са контурним условом 1,0 mm и
- 0,00 mm за модел са контурним условом 0,0 mm.

На сликама 139. до 144. приказана су напонска стања у одабраним хоризонталним пресецима током експлоатације за поједине разматране вредности граничних померања и то: пресек на коти 172,0 mm (за 1080. и 1505. дан) и пресек на коти 170,50 mm (за 1804. дан). Као и у фази изградње, и овде је положај наведених хоризонталних пресека одабран тако да одговара пресецима у оквиру анализе утицаја дужине ламеле на термичке напоне затезања – изабрани пресеци добро приказују зоне са увећаним вредностима напона затезања у бетону као и промену ових напона са променом вредности граничних померања.

Вредности максималних напона у равни на коти 172,0 mm за 1080. дан (Слика 139.) крећу се у следећим интервалима:

- од 2,14 МПа до -2,34 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 1,87 МПа до -7,42 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од -1,81 МПа до -8,57 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -5,28 МПа до -9,14 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у равни на коти 172,0 mm за 1505. дан (Слика 141.) крећу се у следећим интервалима:

- од 2,26 МПа до -2,71 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 2,19 МПа до -6,07 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 0,97 МПа до -7,73 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од 0,14 МПа до -8,29 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности максималних напона у равни на коти 170,50 mm за 1804. дан (Слика 143.) крећу се у следећим интервалима:

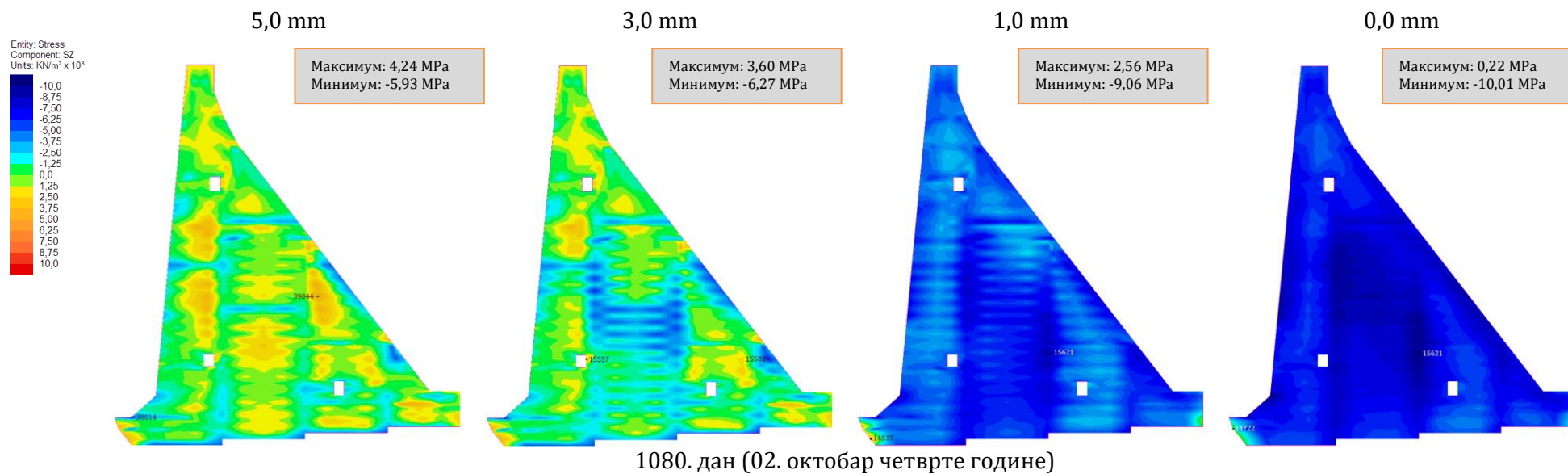
- од 2,60 МПа до -2,21 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 2,14 МПа до -4,71 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од -0,05 МПа до -6,95 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -4,60 МПа до -7,50 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Као и у фази изградње, и током експлоатације максимална померања DZ у равнима на приказаним котама на месту дилатационе разделнице (слике 140., 142. и 144.) углавном достижу максималне вредности задатог контурног услова.

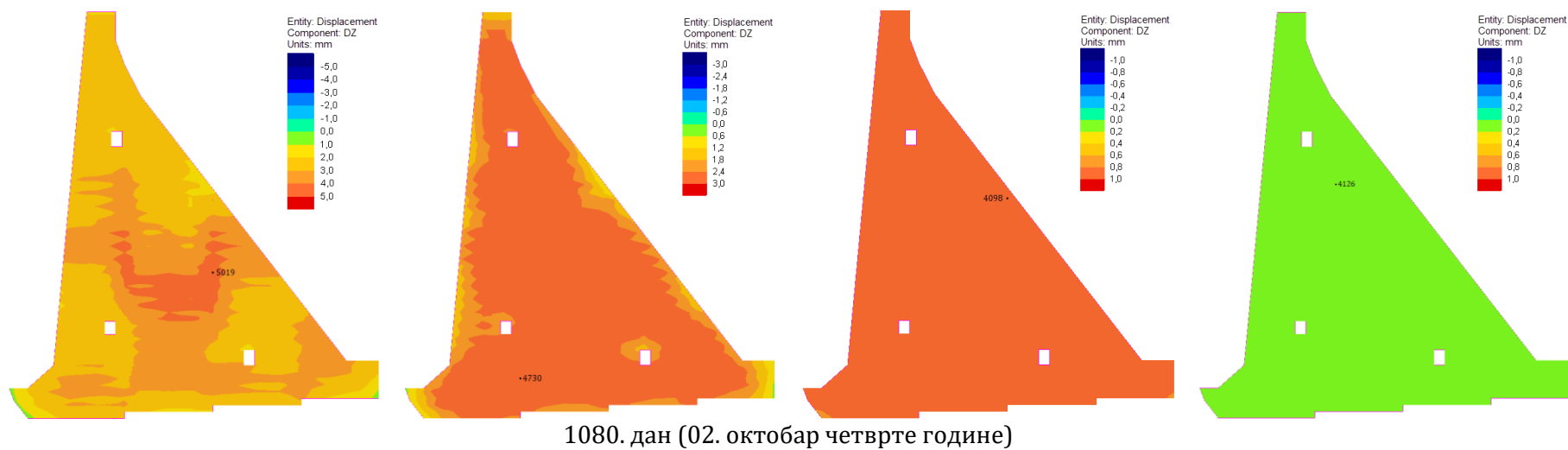
На сликама 145. и 146. приказане су зоне (обележене црвеном бојом) у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање у карактеристичним временским пресецима у средњој равни ламеле за поједине разматране вредности граничних померања. На наведеним сликама се поново уочава да је, за гранично померање од 5,0 mm, у стубовима који су бетонирани методом стубастих блокова, ка узводном и низводном лицу конструкције а изнад доње и средње галерије у телу бране, дошло до прекорачења чврстоће бетона на затезање. Прекорачење се јавља током грађења али се задржава и током експлоатације. Као и током грађења, ове зоне значајно губе на свом интензитету са редукцијом вредности граничних померања и за вредност од 3,0 mm готово да и не постоје, што, посматрајући и резултате током периода изградње (поглавље 7.3.1), указује на значај узимања у обзир и суседних ламела конструкције приликом прорачуна а које утичу на смањење напона затезања у телу гравитационе бетонске бране (реалнији увид у стање напона у конструкцији). Иако пуњење акумулације доприноси процесу хлађења читавог попречног пресека конструкције (слике 63. и 65., плаво обојене зоне са узводне стране у зони контакта са акумулацијом) у зони контакта воде са узводним лицем конструкције нема појаве прекорачења чврстоће бетона на затезање.

На сликама 147. до 151. приказане су вредности напона σ_z током експлоатације у карактеристичним тачкама конструкције (слика 38.) у функцији граничног померања и израчунатих температура бетона T_{bet} а које су приказане у оквиру поглавља 7.1.1 за ламелу дужине 15,0 m.

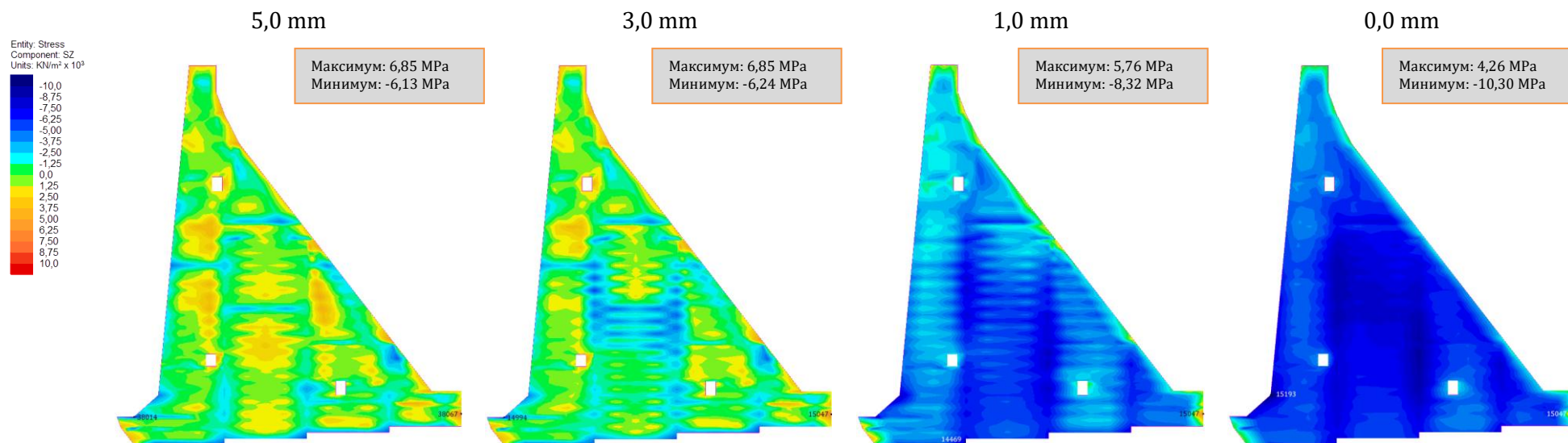
Позитивне вредности напона σ_z , према конвенцији програма [63], одговарају напонима затезања, док негативне вредности одговарају напонима притиска у посматраном чвору конструкције.



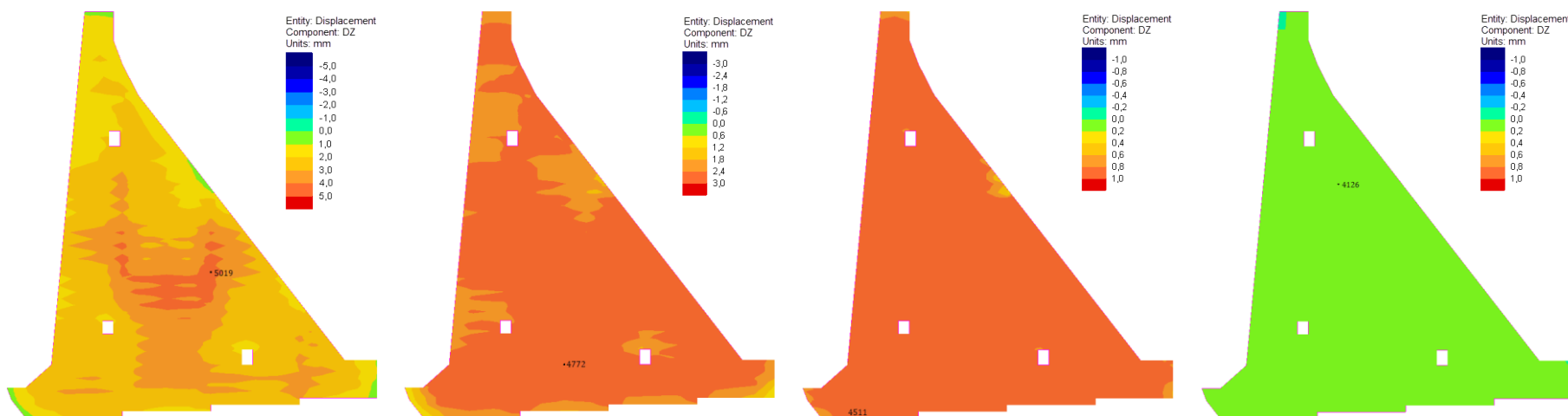
Слика 133. Стање напона σ_z у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



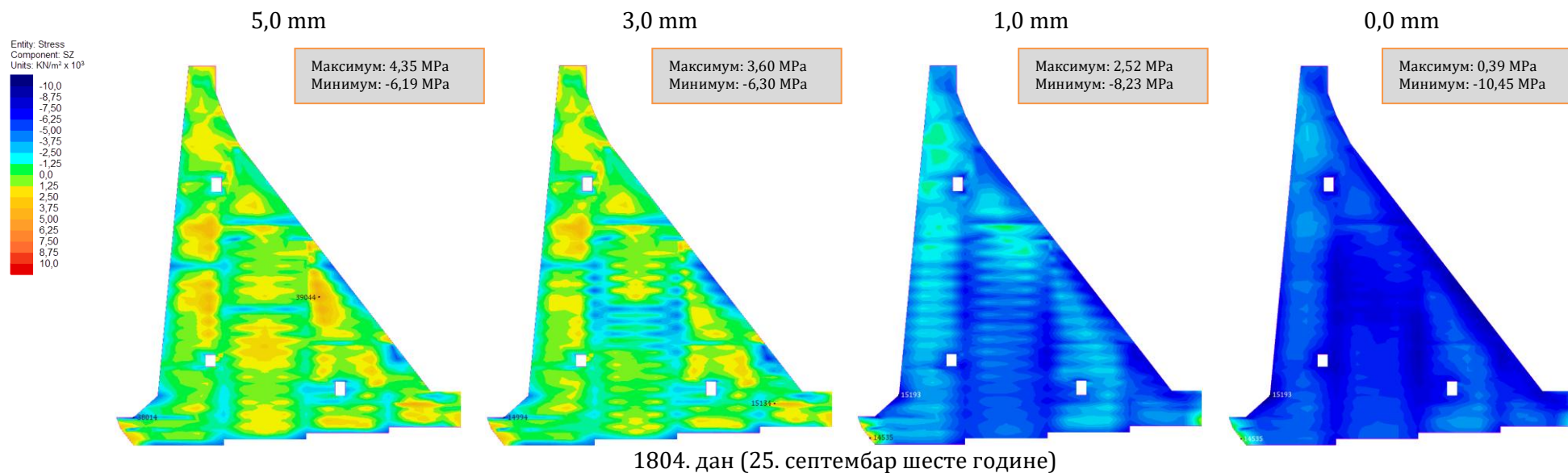
Слика 134. Померање D_z на месту дилатационе разделнице ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



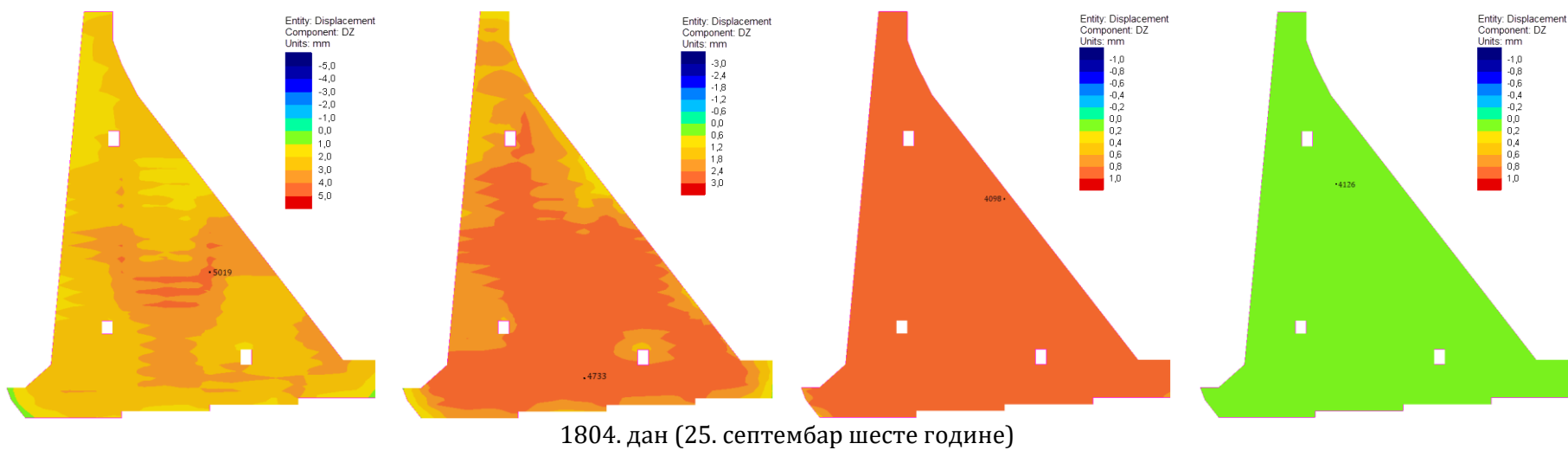
Слика 135. Стање напона σ_z у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



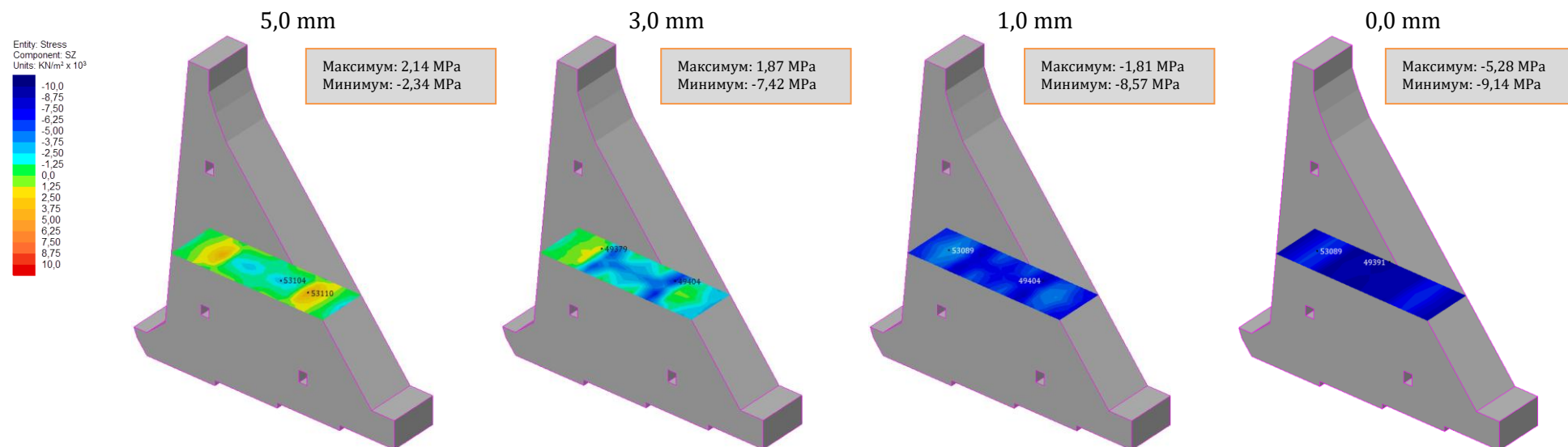
Слика 136. Померање D_z на месту дилатационе разделнице ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



Слика 137. Стање напона σ_z у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања

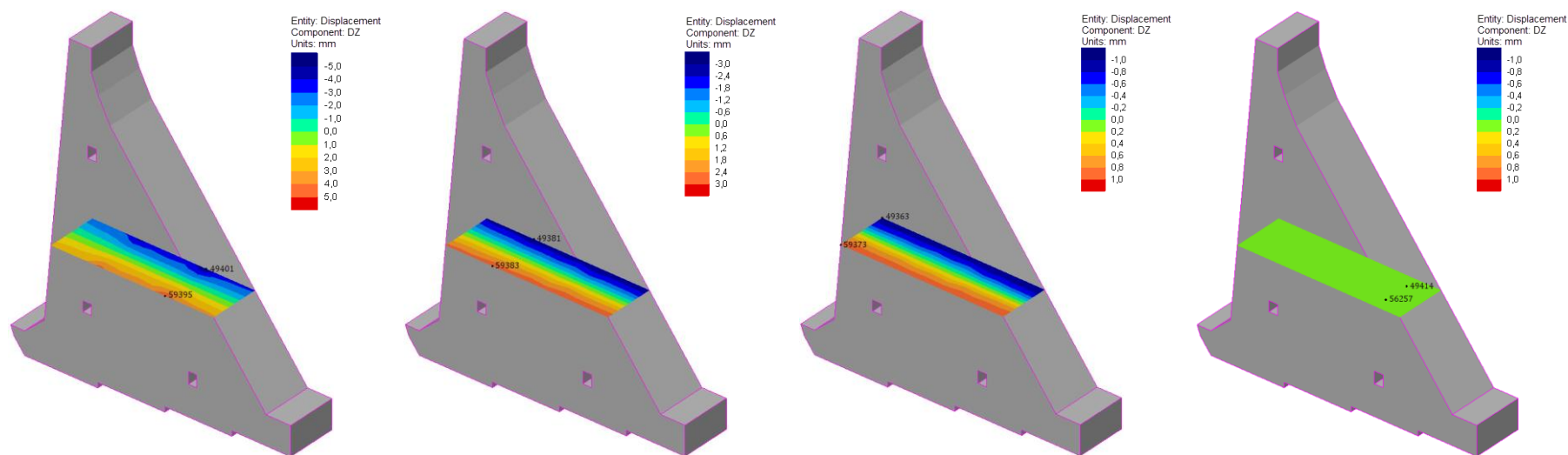


Слика 138. Померање D_z на месту дилатационе разделнице ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



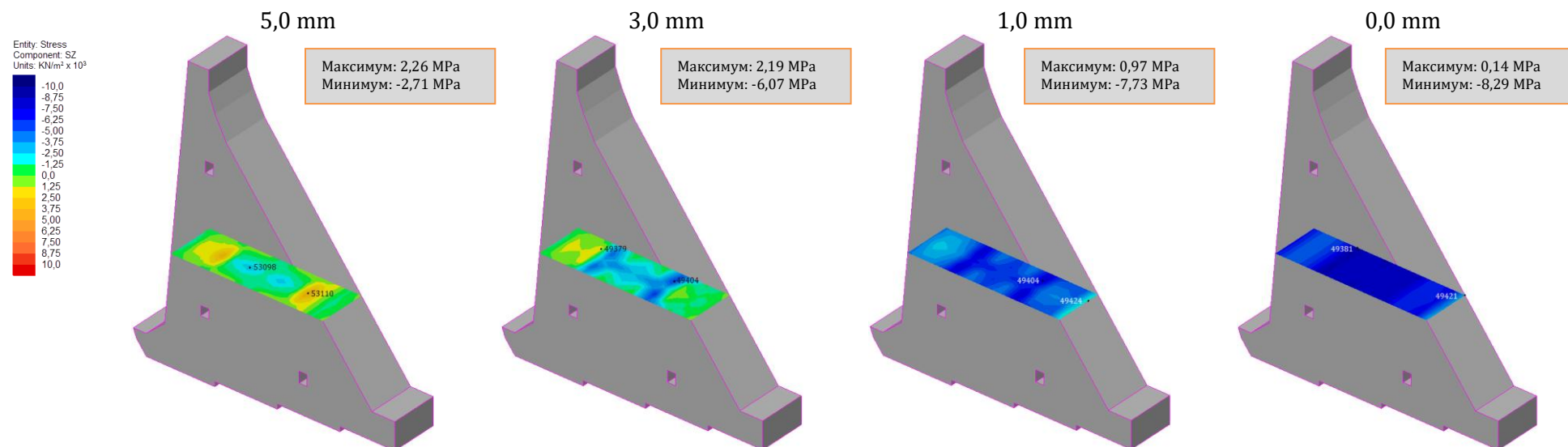
1080. дан (02. октобар четврте године); раван на коти 172,0 mm

Слика 139. Стање напона σ_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



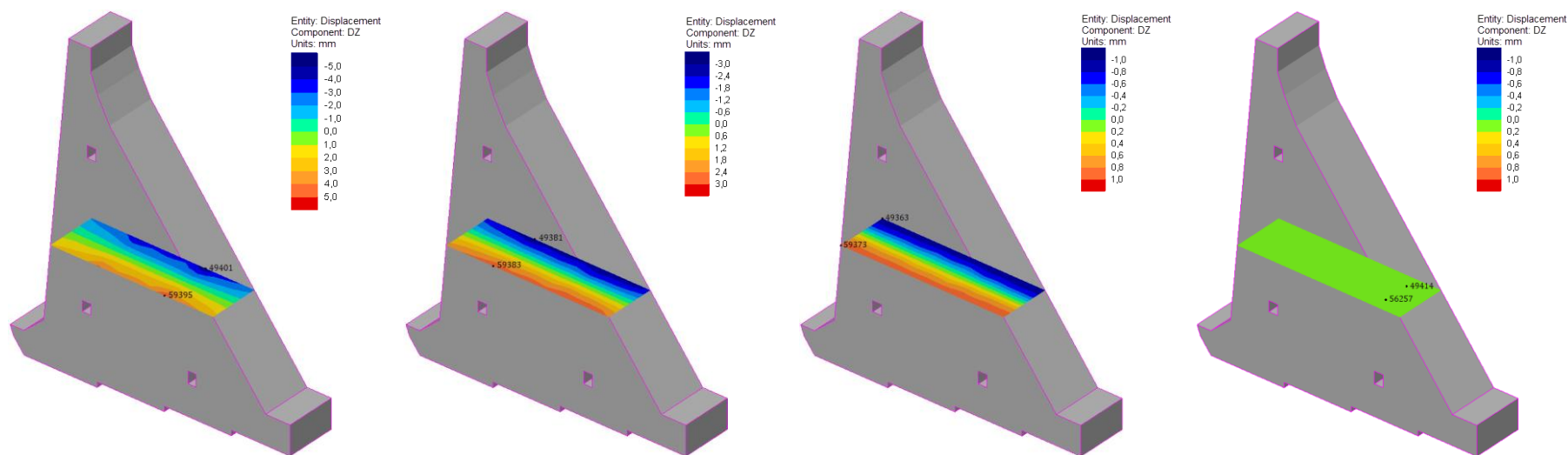
1080. дан (02. октобар четврте године); раван на коти 172,0 mm

Слика 140. Померање D_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



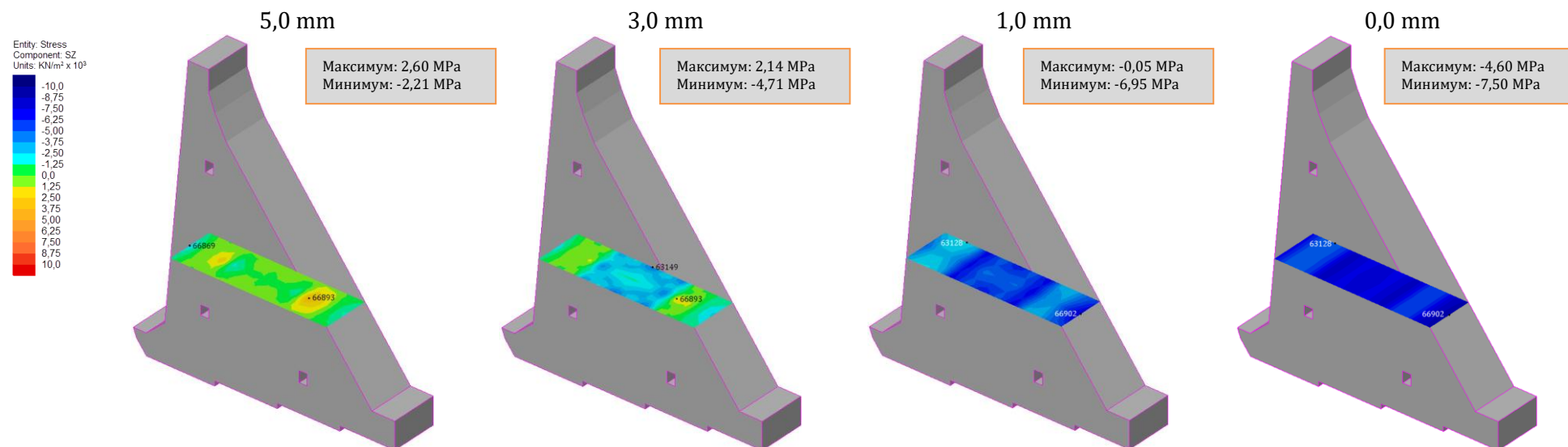
1505. дан (01. децембар пете године); раван на коти 172,0 mm

Слика 141. Стање напона σ_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



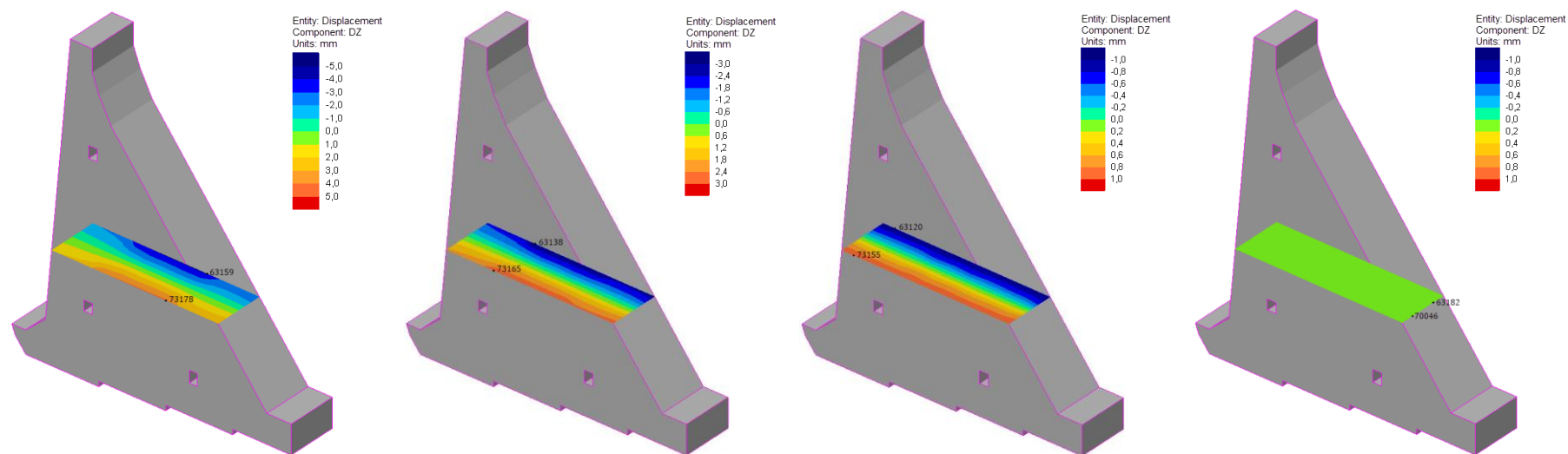
1505. дан (01. децембар пете године); раван на коти 172,0 mm

Слика 142. Померање D_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



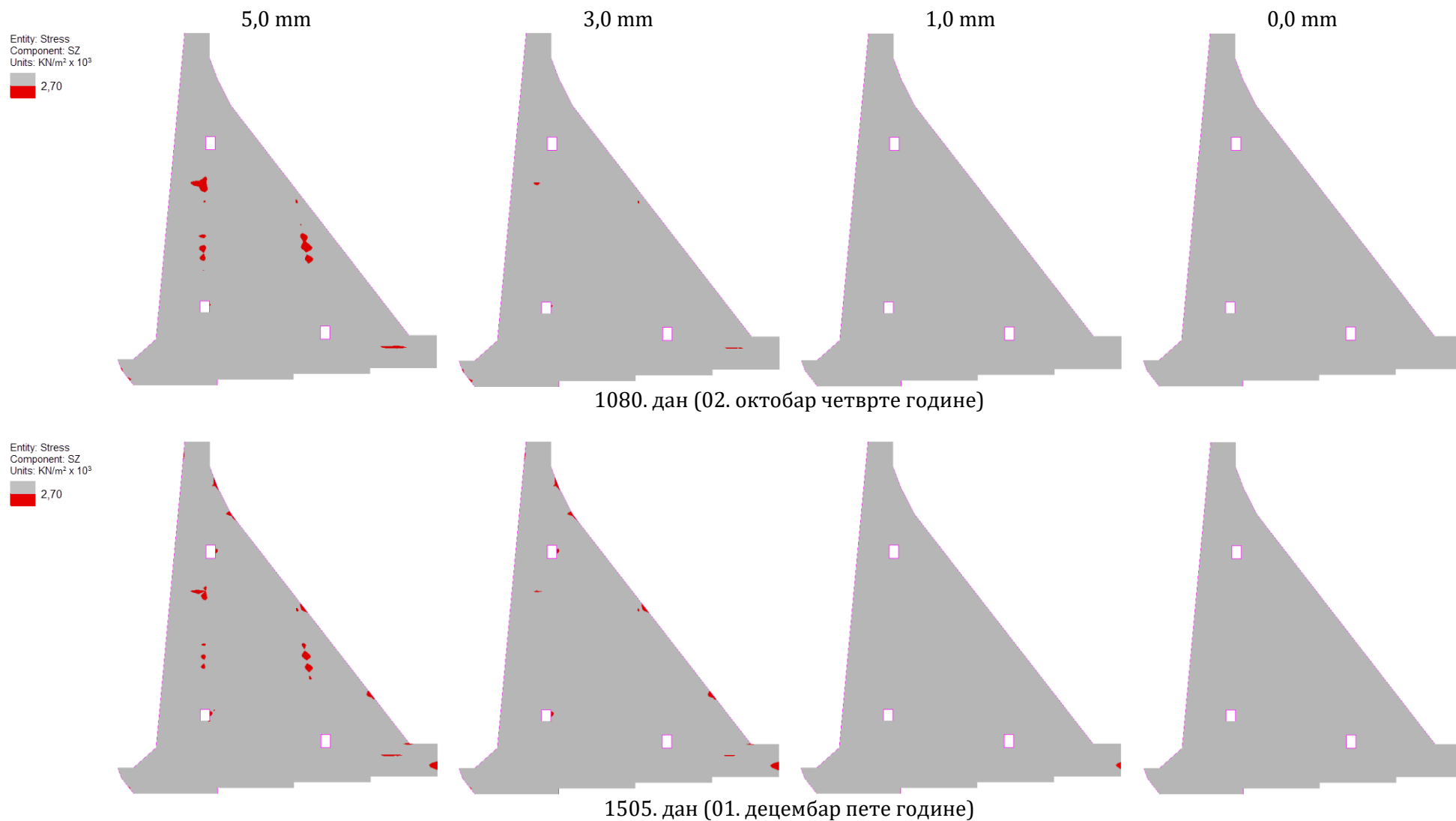
1804. дан (25. септембар шесте године); раван на коти 170,50 mm

Слика 143. Стање напона σ_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања

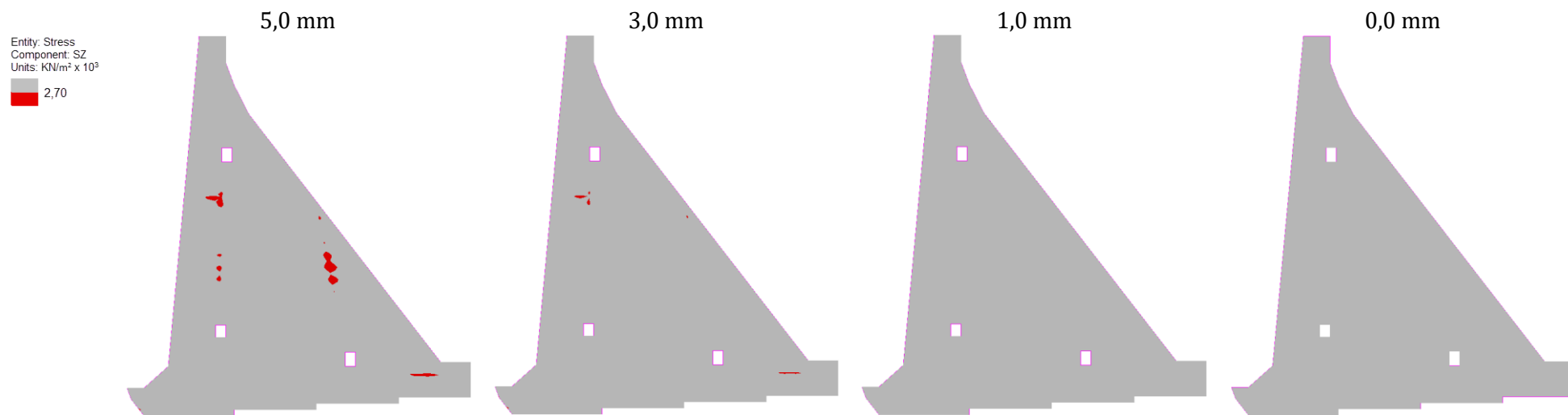


1804. дан (25. септембар шесте године); раван на коти 170,50 mm

Слика 144. Померање D_z кроз хоризонталну раван ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



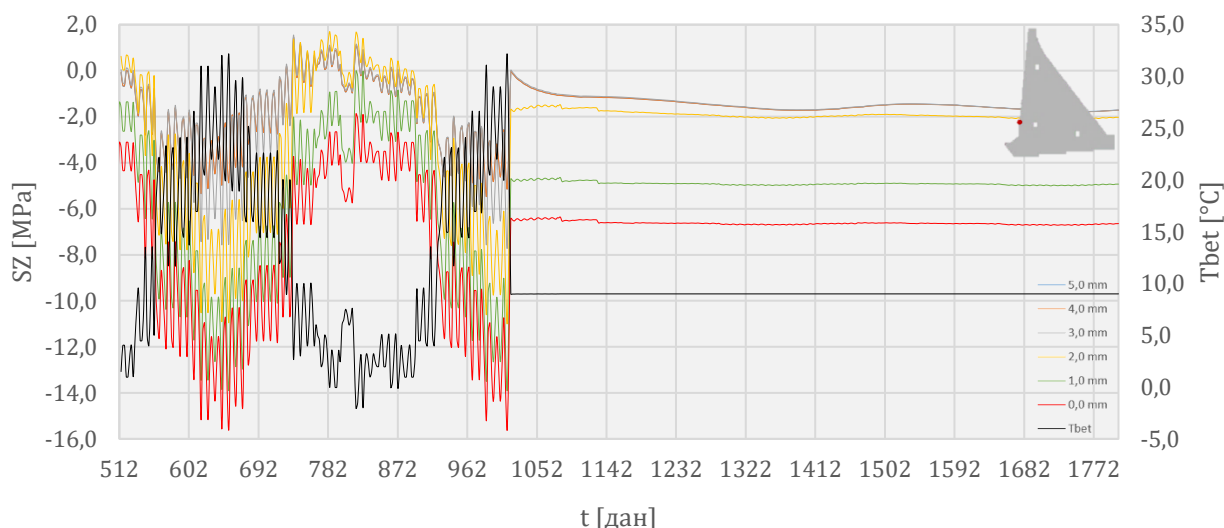
Слика 145. Зоне у којима је прекорачена чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања



1804. дан (25. септембар шесте године)

Слика 146. Зоне у којима је прекорачена чврстоће бетона на затезање у средњој равни ламеле L-15 са моделом контакта након достизања задатог померања

На слици 147 приказана је вредност напона σ_z у чвору 2787 током периода експлоатације. Температура бетона у посматраном чвору прати сезонске и дневне осцилације температуре ваздуха све до тренутка када је оквашен водом из акумулације (1020. дана од почетка грађења конструкције) константне температуре (9,0 °C). Са сезонском и дневном променом температуре бетона (до тренутка квашења), може се уочити и промена напона за разматране вредности граничних померања (са опадањем температура расту напони затезања док са порастом температура расту напони притиска). Након што је чвор оквашен водом долази и до промене понашања напона σ_z али они доминантно остају у границама напона притиска за све разматране вредности граничних померања.



Слика 147. Вредност напона σ_z у чвору 2787 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности напона у чвору 2787 до тренутка квашења крећу се у интервалу:

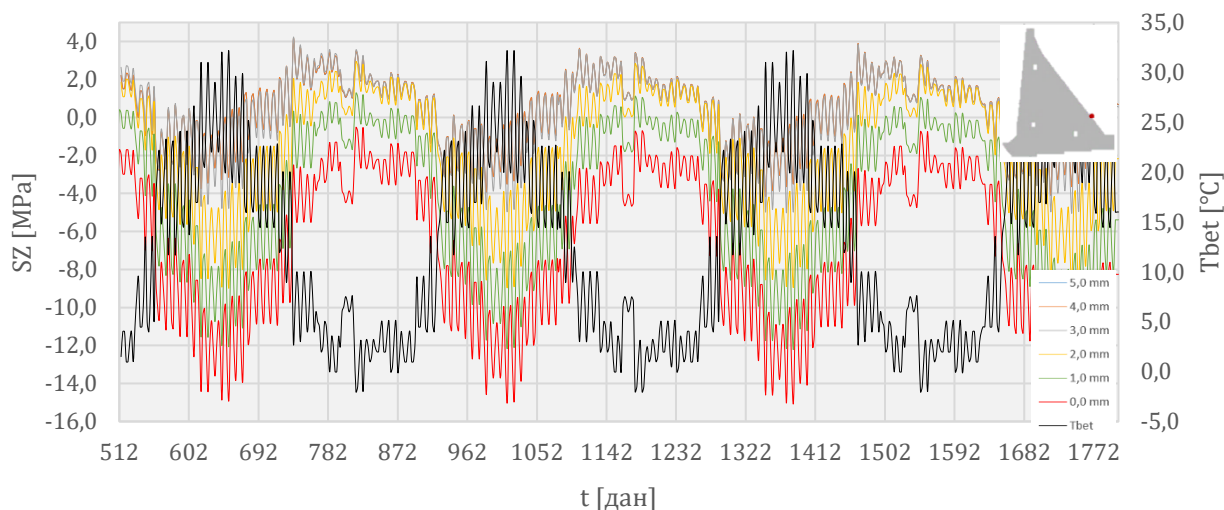
- од 1,39 МПа до -5,44 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 1,40 МПа до -5,45 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 1,49 МПа до -7,65 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 1,69 МПа до -10,93 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од -0,01 МПа до -13,84 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -1,90 МПа до -15,56 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредности напона у чвору 2787 након тренутка квашења крећу се у интервалу:

- од -0,13 МПа до -1,78 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од -0,13 МПа до -1,79 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од -0,07 МПа до -1,78 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од -1,48 МПа до -2,13 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од -4,64 МПа до -5,01 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -6,36 МПа до -6,72 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 2853 приказана је на слици 148. Чвор је и током периода експлоатације, с обзиром да не постоји утицај доње воде

на разматрану непреливну ламелу конструкције, под утицајем ваздуха чија се температура периодично мења на дневном и годишњем нивоу. Као и код чвора 2787 и овде су уочљиве промене напона за разматране вредности граничних померања са осцилацијама температура бетона.

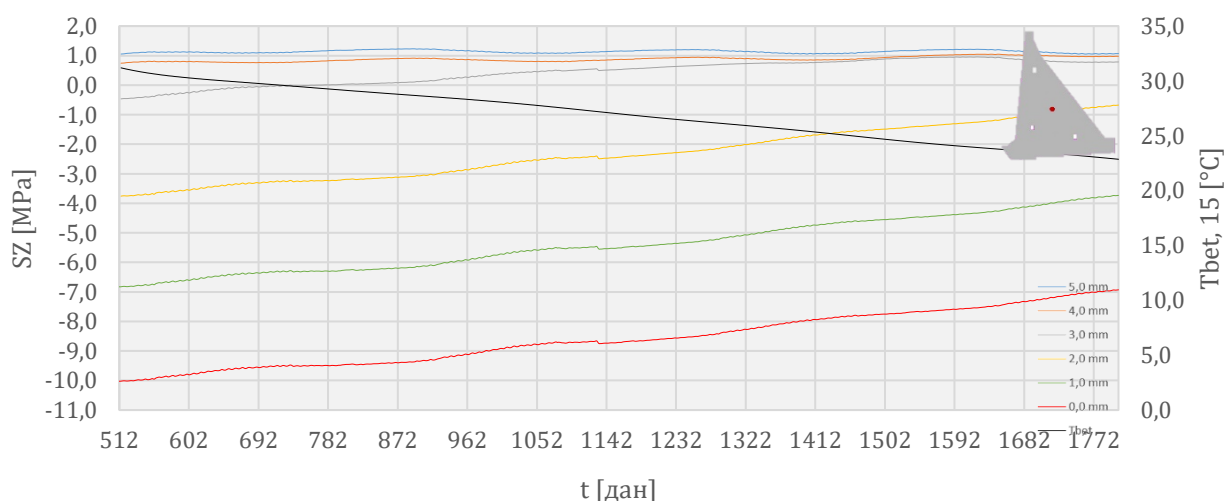


Слика 148. Вредност напона σ_z у чвору 2853 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

- од 4,09 до -4,17 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 4,11 до -4,16 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 4,16 до -5,02 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 2,92 до -8,92 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од 1,27 до -12,16 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -0,53 до -15,03 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 2938 приказана је на слици 149. На слици се уочава процес постепеног хлађења бетона који се не завршава ни у крајњем прорачунском тренутку. Последишно, и напони σ_z расту (од притиска ка затезању).



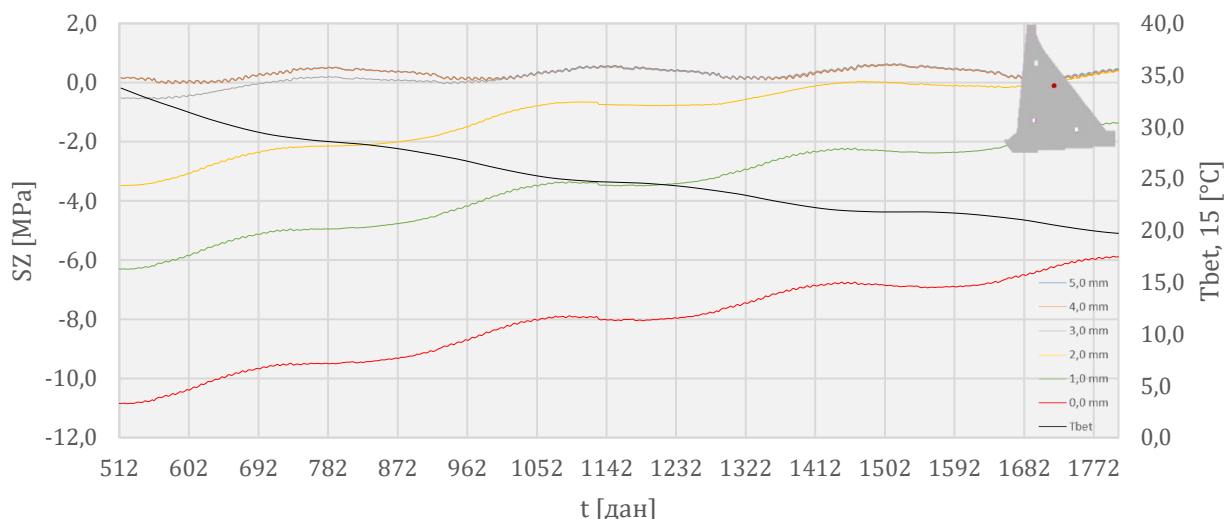
Слика 149. Вредност напона σ_z у чвору 2938 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

- од 1,05 МПа до 1,23 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 1,05 МПа до 0,74 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 0,95 МПа до -0,46 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од -0,68 МПа до -3,76 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од -3,73 МПа до -6,83 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -6,93 МПа до -10,02 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

За вредности граничних померања од 5,0-3,0 mm ове вредности напона су доминантно у затезању, док су за преостале вредности разматраних померања они у притиску (напони затезања расту са порастом вредности граничног померања).

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 3016 приказана је на слици 150. Слично као и код чвора 2938, на слици се уочава процес постепеног хлађења бетона (до вредности од 19,73 °C). Напони σ_z расту (од притиска ка затезању) са постепеним хлађењем конструкције.



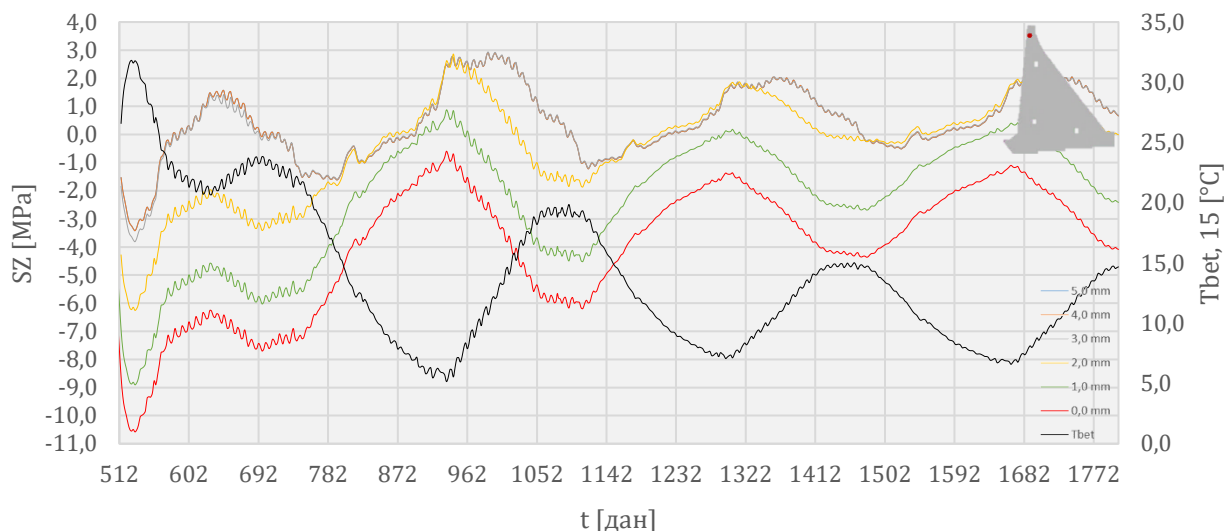
Слика 150. Вредност напона σ_z у чвору 3016 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

Вредности ових напона крећу се у интервалу:

- од 0,63 МПа до -0,03 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 0,61 МПа до -0,04 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 0,64 МПа до -0,55 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 0,39 МПа до -3,48 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од -1,35 МПа до -6,31 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -5,87 МПа до -10,85 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

За вредности граничних померања од 5,0-3,0 mm вредности напона су такође доминантно у затезању, док су за преостале вредности разматраних померања у притиску (напони затезања расту са порастом вредности граничног померања). Напони затезања имају мање вредности у односу на чвор 2938 док су амплитуде осциловања израженије.

Вредност напона σ_z током периода експлоатације у чвору 3184 приказана је на слици 151. И на овој слици је евидентан процес постепеног хлађења бетона (до вредности од 14,68 °C) али уз знатан утицај сезонских промена температуре ваздуха услед близине изабраног чвора круни бране. Код напона σ_z уочава се смена притиска и затезања за вредности граничних померања од 5,0-2,0 mm, уз благи раст затезања са постепеним хлађењем конструкције. Вредности напона за преостала разматрана гранична померања су доминантно у притиску.



Слика 151. Вредност напона σ_z у чвору 3184 током експлоатације у функцији температуре бетона T_{bet}

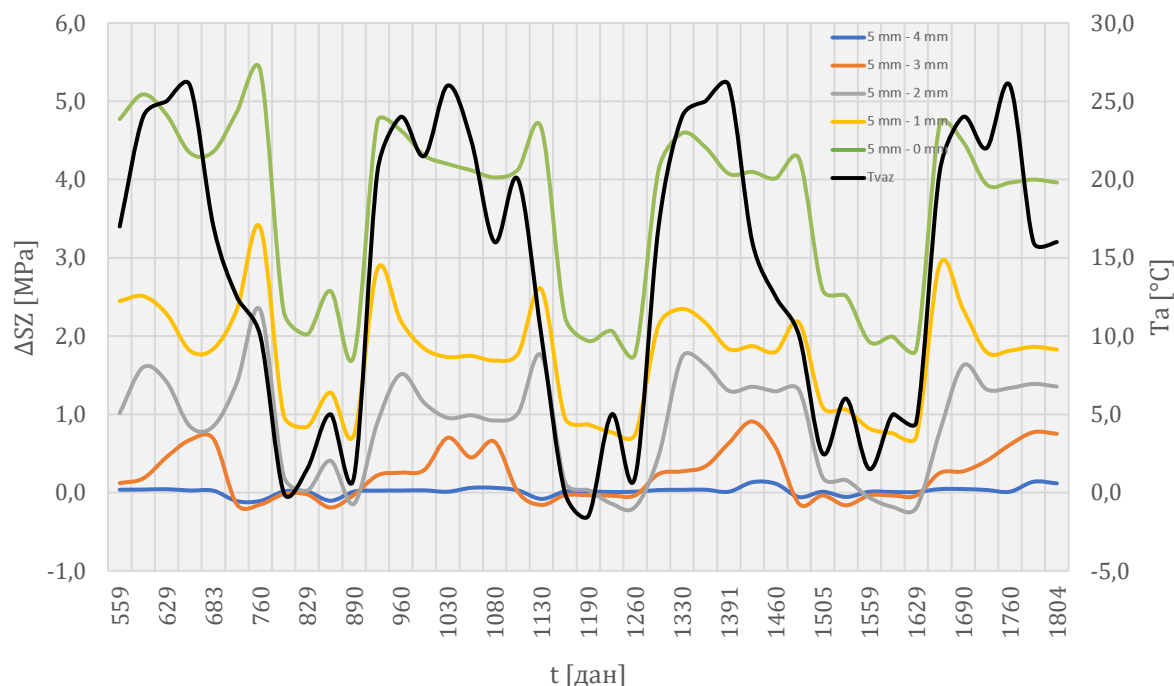
Вредности ових напона крећу се у интервалу:

- од 2,91 до -3,42 МПа за модел са контурним условом 5,0 mm,
- од 2,91 до -3,42 МПа за модел са контурним условом 4,0 mm,
- од 2,94 до -3,81 МПа за модел са контурним условом 3,0 mm,
- од 2,86 до -6,26 МПа за модел са контурним условом 2,0 mm,
- од 0,88 до -8,90 МПа за модел са контурним условом 1,0 mm и
- од -0,60 до -10,58 МПа за модел са контурним условом 0,0 mm.

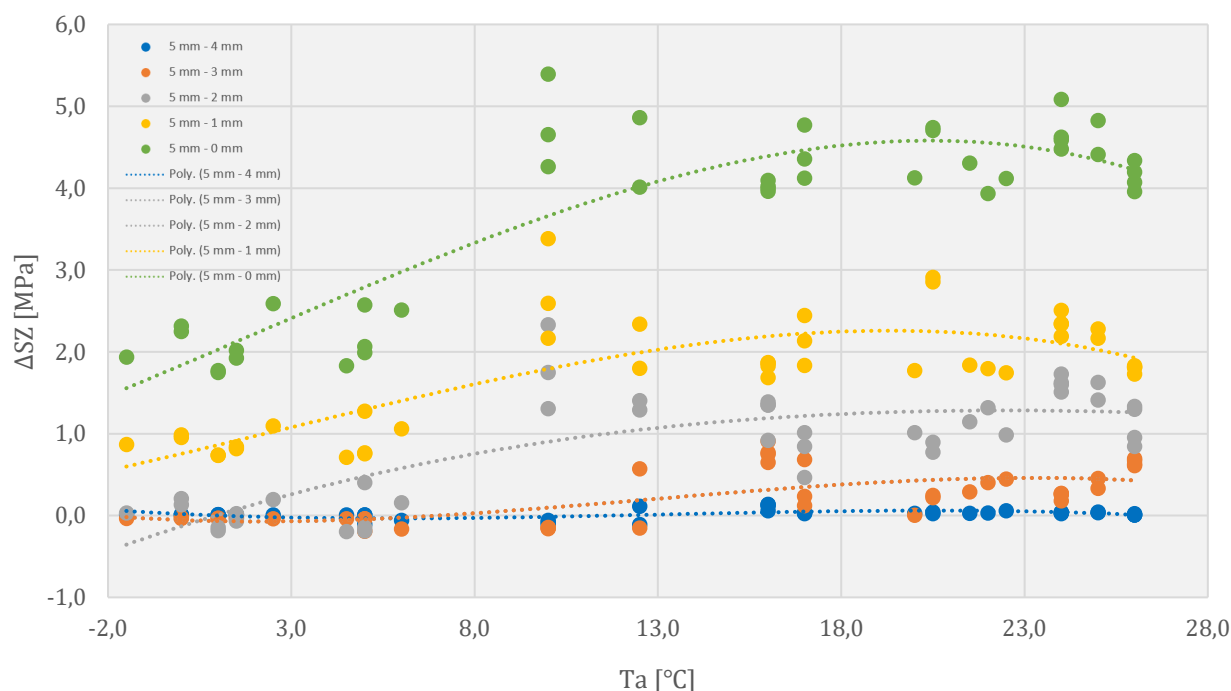
На слици 152 приказана је промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле $\Delta\sigma_z$ током периода експлоатације у функцији промене граничног померања задатог контурним условом (у односу на вредност од 5,0 mm), и спољашње температуре ваздуха. Са наведеног дијаграма може се уочити да максималне вредности напона затезања током експлоатације конструкције опадају са редукацијом граничног померања на месту дилатационе разделнице (позитивна промена напона $\Delta\sigma_z$) и до 0,14 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 4,00 mm, 0,91 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 3,0 mm, 2,33 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 2,0 mm, 3,39 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 1,0 mm односно и до 5,39 МПа при промени дужине ламеле са 5,00 mm на 0,0 mm.

На слици 153 приказана је промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле $\Delta\sigma_z$ у функцији промене граничног померања задатог контурним условом и спољашње температуре ваздуха током периода експлоатације конструкције. Са наведеног дијаграма се може уочити да је промена максималних вредности напона затезања са редукацијом вредности граничног померања током експлоатације већа за

време виших температура ваздуха (као и код фазе грађења) док се за време ниских температура јављају највеће вредности напона затезања у разматраном прорачунском периоду.



Слика 152. Промена максималних вредности напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламеле током експлоатације у функцији промене граничног померања задатог контурним условом и спољашње температуре ваздуха T_a

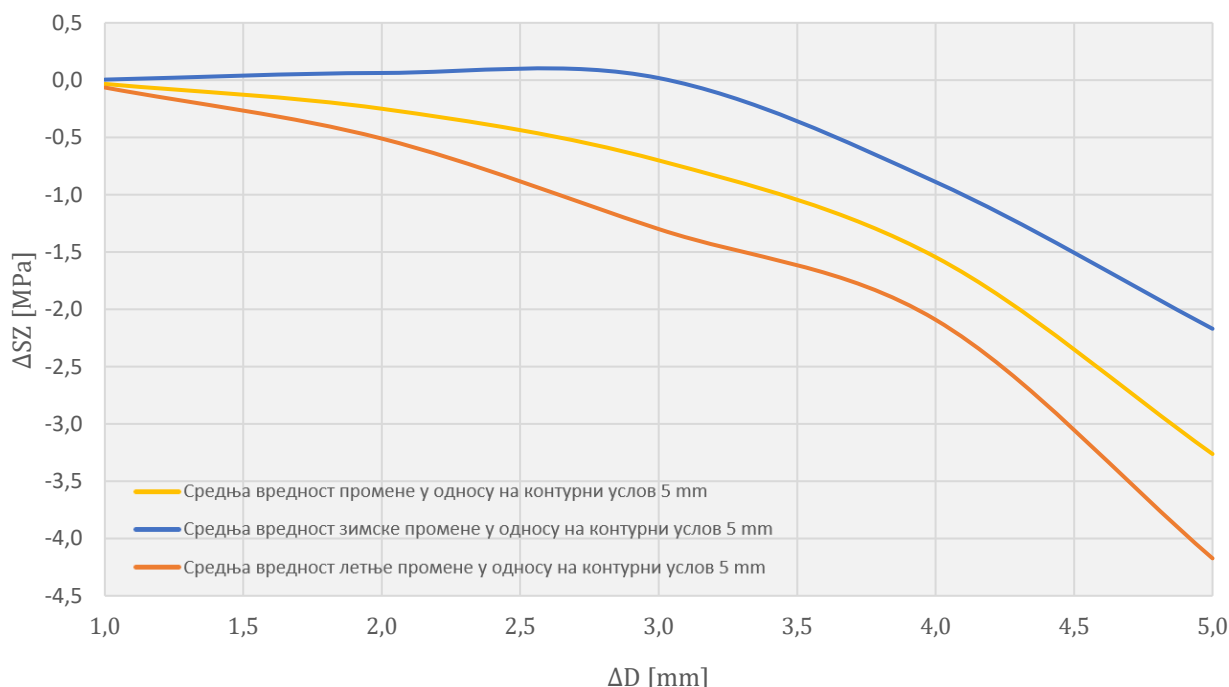


Слика 153. Просечна промена максималних напона затезања $\Delta\sigma_z$ у средњој равни ламеле током експлоатације у функцији промене граничног померања задатог контурним условом и спољашње температуре ваздуха T_a

Максималне вредности просечних промена напона затезања у функцији температуре су око 0,10 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 4,0 mm на температури од око 20,0 $^{\circ}\text{C}$, око 0,50 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 3,0 mm на

температури од око 23,0 °C, око 1,20 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 2,0 mm на температури од око 23,0 °C, око 2,20 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 1,0 mm на температури од око 20,0 °C, односно око 4,70 МПа при промени контурног услова са 5,0 mm на 0,0 mm на температури од око 20,50 °C.

На слици 154 приказана је промена максималних вредности напона затезања у средњој равни ламеле $\Delta\sigma_z$ у функцији промене граничног померања ΔD и то у виду средње, средње зимске и средње летње промене током периода експлоатације конструкције. Разматрани су један карактеристичан зимски и један карактеристичан летњи циклус. На основу дијаграма може се закључити да приказани максимални напони затезања током периода експлоатације опадају са редукцијом вредности граничног померања и то за просечно 0,03 МПа при промени вредности граничног померања са 5,0 mm на 4,0 mm, затим за 0,25 МПа при промени са 5,0 mm на 3,0 mm, онда за 0,70 МПа при промени са 5,0 mm на 2,0 mm, односно за 1,54 МПа при промени са 5,0 mm на 1,0 mm и за 3,26 МПа при промени са 5,0 mm на 0,0 mm. Ово би, другим речима, значило да у садејству са суседним ламелама, разматрана ламела показује значајно повољније резултате у смислу напона затезања.



Слика 154. Смањење максималних вредности напона затезања σ_z у средњој равни ламеле током експлоатације са редукцијом граничног померања задатог контурним условом

Приказани поступак моделирања приказао је могућност редукције напона затезања ламеле узимањем у обзир реалног понашања дилатационих разделница чиме се уводи нова врста разматрања овог проблема код масивних хидротехничких конструкција и даје реалан приказ стања напона у конструкцији. У оквиру овог истраживања по први пут је извршено моделирање контурног услова на бочним страницама модела тако да потпуно активирање контакта две суседне ламеле бране настаје након достизања изабраног граничног померања у правцу осе бране, што је у складу са реалним понашањем дилатационих разделница које нису у стању да пренесу силе затезања али могу да пренесу силе притиска.

Максимални напони затезања у току периода изградње и експлоатације последица су наглог хлађења бетона бране у површинској зони као и постепеног хлађења у унутрашњости блокова који су бетонирани методом стубастих блокова и који су

напредовали у односу на суседне блокове (појава великог температурног градијента). Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури у току периода изградње, уочено је да напони затезања опадају са редукијом граничне вредности померања и до 6,60 МПа при промени контурног услова за 5,0 mm. Наведена појава се објашњава мањим деформацијама скупљања услед хлађења код ламела са мањим вредностима граничних померања, јер је граничним условом претходно спречено и њено ширење услед загревања. Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури током експлоатације, уочено је да напони затезања такође опадају са редукијом граничне вредности померања и до 4,70 МПа при промени контурног услова за 5,0 mm.

Зоне у којима је прокорачена чврстоћа бетона се драстично смањују са редукијом вредности граничних померања, тако да за вредност од 1,0 mm током грађења, односно 3,0 mm током експлоатације, готово да и не постоје, што указује да садејство са суседним ламелама даје значајно повољније резултате у смислу напона затезања. Вредност граничног померања може бити предмет додатних анализа приликом пројектовања, тако да не дође до прекорачења чврстоће бетона на затезање током грађења и експлоатације.

Промена максималних вредности напона затезања услед редукије вредности граничног померања током грађења и експлоатације такође је већа за време виших температура ваздуха, док се за време ниских температура јављају највеће вредности термичких напона затезања у разматраном прорачунском периоду.

8 ЗАКЉУЧЦИ И СМЕРНИЦЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру дисертације нумерички је анализирано термичко-напонско понашање гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, узимајући у обзир релевантна оптерећења и контурне услове за период грађења, пуњења акумулације и вишегодишње експлоатације. Анализа температурног поља спроведена је за четири изабране дужине ламеле, док је анализа напонског стања спроведена разматрајући утицај дужине ламеле на термичке напоне затезања, као и утицај контурног услова на месту дилатационе разделнице (која не прихвата затезање) на напоне затезања у конструкцији. На основу анализа приказаних у претходним поглављима, следе закључци груписани по целинама истраживања.

У делу који се односи на преглед досадашњих истраживања уочено је да постоји ограничен обим истраживања која су се бавила анализом дужине ламела гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, као и истраживања која су се бавила моделирањем дилатационих разделница код поменуте врсте објеката. Највећи део истраживања у области термичко-напонске анализе бетонских брана односи се на бране од ваљаног бетона, што се може објаснити предностима које даје примена ове врсте бетона (значајно бржа уградња и ниска топлота хидратације). Проблем моделирања дилатационих разделница углавном је разматран код лучних бетонских брана.

У делу који се односи на прорачун температурног поља уочено је да приказани резултати показују осетљивост на промену дужине ламеле конструкције. Иако је максимално смањење температура са редукцијом дужине ламеле реда величине неколико степени, утицај на напонско стање је веома значајан.

Смањење температура у бетону са променом дужине ламеле је мање током периода експлоатације него током периода изградње, што се може објаснити и тежњом бетона да се изједначи са просечном вишегодишњом температуром ваздуха. Такође, требало би имати у виду и да је током експлоатације процес хидратације завршен, као и да суседне ламеле више нису смакнуте, као што је то случај током грађења, а што је додатно утицало на процес хлађења бетона.

Приказани резултати температурног поља показују и да на пораст температуре у телу бране највећи утицај имају процес хидратације цемента у комбинацији са летњим температурама ваздуха у току грађења. Претходно наведено указује на значај контроле температуре бетона у условима екстремних амбијенталних температура (спровођењем мера приликом справљања мешавине, током као и након уградње – принудно хлађење, прекиди бетонирања, адекватна нега и заштита површина бетона) као и на значај избора адекватне дужине ламеле. На термичко понашање гравитационе бетонске бране која се гради методом блокова значајан утицај може да има и динамика изливања блокова. Утицај амбијенталних температура је израженији код ламела мањих дужина (односно код мањих димензија блокова) док је утицај хидратације цемента израженији код ламела већих дужина.

У делу који се односи на утицај дужине ламеле на термичке напоне затезања уочено је да предложени поступак моделирања омогућава анализу термичких напона затезања код брана које се граде методом блокова, као и процену могућности настанка прслина у било ком тренутку током грађења и експлоатације. Након бетонирања једног блока долази до његовог ширења које је изазвано загревањем услед ослобађања топлоте хидратације. Због ограничене деформације, услед садејства са суседним блоковима,

јављају се напони притиска у блоку. На загревање блока могу утицати и високе температуре ваздуха у дужем временском периоду. Током процеса хлађења бетона долази до његовог скупљања и, услед ограничене деформације због садејства са суседним блоковима, напони притиска прелазе у напоне затезања. Хлађење бетона може бити нагло (резултат нагле промене сезонске температуре), што утиче на појаву напона затезања у површинским зонама или постепено (резултат природног процеса којим температура бетона тежи да се изједначи са просечном вишегодишњом температуром ваздуха), што утиче на појаву напона затезања у унутрашњости конструкције. Већи температурни градијенти доводе до већих вредности напона затезања у конструкцији.

Максимални термички напони затезања у току периода изградње последица су наглог хлађења бетона бране у површинској зони. Екстремне вредности термичких напона затезања током грађења и експлоатације јављају се и у блоковима који су бетонирани методом стубастих блокова. Због бржег напредовања, веће површине контакта са спољашњом средином, изложености високим температурама током грађења и саме величине ових блокова, у наведеним зонама долази до појаве великог температурног градијента у односу на суседне блокове што доводи до скупљања и појаве увећаних напона затезања. Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури у току периода изградње, уочено је да термички напони затезања расту са редукцијом дужине ламеле, при чему се наведена појава објашњава већим деформацијама скупљања услед хлађења код ламела мањих дужина услед мањег степена ограничености површинских блокова, као и лакшим (бржим) хлађењем ламела мањих дужина. Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури током експлоатације, уочено је да термички напони затезања опадају са редукцијом дужине ламеле. Смањењем дужине ламеле на могу се потпуно елиминисати зоне у којима је прекорачена чврстоћа бетона на затезање.

Промена максималних вредности термичких напона затезања са редукцијом дужине ламеле током грађења и експлоатације конструкције је већа за време виших температура ваздуха док се за време ниских температура јављају највеће вредности термичких напона затезања у разматраном прорачунском периоду.

У делу који се односи на утицај контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања приказана је могућност редукције напона затезања ламеле узимањем у обзир реалног понашања дилатационих разделница чиме се уводи нова врста разматрања овог проблема код масивних хидротехничких конструкција и даје реалан приказ стања напона у конструкцији. Уочено је да се у досадашњој пракси термичко-напонских анализа гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова претпостављало да дилатационе разделнице нису предвиђене да прихвате било какве силе. Као последица наведене претпоставке, прорачунски модели су се дефинисали тако да се њихове границе налазе управо на местима ових дилатационих разделница и углавном без задавања било каквих бочних контурних услова. У оквиру овог истраживања по први пут је извршено моделирање контурног услова на бочним страницама модела тако да потпуно активирање контакта две суседне ламеле бране настаје након достизања изабраног граничног померања у правцу осе бране, што је у складу са реалним понашањем дилатационих разделница које нису у стању да пренесу силе затезања али могу да пренесу силе притиска.

Максимални напони затезања у току периода изградње и експлоатације последица су наглог хлађења бетона бране у површинској зони као и постепеног хлађења у

унутрашњости блокова који су бетонирани методом стубастих блокова и који су напредовали у односу на суседне блокове (појава великог температурног градијента). Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури у току периода изградње, уочено је да напони затезања опадају са редукцијом граничне вредности померања. Наведена појава се објашњава мањим деформацијама скупљања услед хлађења код ламела са мањим вредностима граничних померања, јер је граничним условом претходно спречено и њено ширење услед загревања. Посматрајући просечну промену максималних вредности напона затезања у средњој равни ламела на одговарајућој амбијенталној температури током експлоатације, уочено је да напони затезања такође опадају са редукцијом граничне вредности померања. Зоне у којима је прокорачена чврстоћа бетона се драстично смањују са редукцијом вредности граничних померања, што указује да садејство са суседним ламелама даје значајно повољније резултате у смислу напона затезања. Вредност граничног померања може бити предмет додатних анализа приликом пројектовања, тако да не дође до прекорачења чврстоће бетона на затезање током грађења и експлоатације.

Промена максималних вредности напона затезања услед редукције вредности граничног померања током грађења и експлоатације такође је већа за време виших температура ваздуха, док се за време ниских температура јављају највеће вредности термичких напона затезања у разматраном прорачунском периоду.

Сагледавањем свих фактора који утичу и који би могли утицати на термичко-напонско понашање гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, смернице за даља истраживања могу се поделити на следеће целине:

- У делу рада који се односи на структурни и МКЕ модел: у зони темељне спојнице може се анализирати интеракција конструкције и стенске масе тако да се појава нереалних напона затезања сведе на минималан ниво;
- У делу рада који се односи на понашање материјала: могло би се анализирати рано старење и течење материјала, зависност термичких и механичких својстава материјала од температуре и садржаја влаге, као и употреба сложених конститутивних модела материјала који могу да симулирају еласто-пластично понашање са оштећењем и појавом прслина;
- У делу рада који се односи на оптерећења и контурне услове: може се анализирати и утицај Сунчевог зрачења, принудног система за хлађење као и неговање бетона током периода грађења;
- У делу рада који се односи на спроведене напонско-деформацијске анализе: утицај контурног услова на месту дилатационе разделнице на напоне затезања може се анализирати и за преостале дужине ламела које су коришћене у оквиру овог истраживања (табела 4), као и утицај референтне температуре бетона, те утицај распореда и димензија блокова и динамике бетонирања на напонско стање у конструкцији.

Како би се извели адекватни закључци, претходно наведено је неопходно сукцесивно примењивати над развијеним моделима.

- У делу рада који се односи на верификацију и валидацију развијених модела: употреба система мониторинга у фази изградње и експлоатације брана у циљу боље верификације и валидације нових модела који би били израђени према методологији и смерницама из овог истраживања;

- Развијени модели могли би, уз примену масовних прорачуна, анализу осетљивости параметара и употребу већег броја контролних чворова, дати прецизније резултате прорачуна и још бољи увид у термичко понашање конструкције.

Резултати спроведене анализе побољшавају разумевање термичко-напонских процеса код гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова, што може утицати на доношење одлука током фаза пројектовања објекта или процене стања током његове експлоатације. Указано је на значај избора оптималне дужине ламеле и моделирања реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице која, према својој природи, није у стању да прихвати силе затезања између суседних ламела конструкције. Избор оптималне дужине ламеле може утицати на редукацију времена и трошкова за извођење конструкције а самим тим, посредно, и на мањи утицај на околну средину у којој се конструкција налази. Моделирање реалног контурног услова на месту дилатационе разделнице може допринети бољем предвиђању појава и развоја прслина услед напона затезања што директно утиче на бољу процену стања и трајности конструкције.

Генерални закључци овог истраживања могу се применити и на друге масивне бетонске конструкције, али, с обзиром на разлике у геометрији ових конструкција и климатске услове у којима се налазе, за сваку је потребно спровести посебну термичко-напонску анализу.

9 ЛИТЕРАТУРА

1. Kuzmanović, V. Thermal-Stress Analysis of Roller Compacted Concrete Dams. Ph.D. Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Beograd, Serbia, 2007.
2. Blomdahl, J.; Malm, R.; Nordström, E.; Hassanzadeh, M. Minimiarmering i Vattenkraftens Betongkonstruktioner; Energiforsk: Stockholm, Sweden, 2016; pp. 48–50.
3. Malm, R. Guideline for FE Analyses of Concrete Dams; Energiforsk: Stockholm, Sweden, 2016; pp. 100–102.
4. Tanchev, Lj. Dams and Appurtenant Hydraulic Structures, 2nd ed.; Taylor & Francis Group: London, U.K., 2014; pp. 551–563.
5. SRPS EN 1992-1-1:2015: Design of Concrete Structures - General Rules and Rules for Buildings, Institute for standardization of Serbia, Belgrade.
6. SRPS EN 1992-1-2:2014: Design of Concrete Structures - General Rules - Structural Fire Design, Institute for standardization of Serbia, Belgrade.
7. Savić, Lj. Uvod u Hidrotehničke Građevine, 2nd ed.; Građevinski fakultet: Beograd, Srbija, 2009; pp. 100–103.
8. Cotoi, T. (2015). Dam Engineering. Available online: <http://www.scribd.com/doc/280436707/Dam-Engineering-GRV-BUTT> (accessed on 5 May 2019).
9. ICOLD (International Commission on Large Dams). Dam Safety Guidelines; ICOLD Bulletin 59, ICOLD: Paris, France, 1987.
10. ICOLD (International Commission on Large Dams). Basic Elements in a Dam Safety Process; ICOLD Bulletin 138; ICOLD: Paris, France, 2009.
11. Jansen, R.B. Dams and Public Safety; US Department of the Interior, Bureau of Reclamation: Denver, CO, USA, 1983; pp. 89–98.
12. Oñate, E. Structural analysis with the finite element method. Linear statics: vol. 1: Basis and Solids. Springer Science & Business Media, 2009.
13. Oñate, E. Structural analysis with the finite element method. Linear statics: vol. 2: Beams, Plates and Shells. Springer Science & Business Media. 2013.
14. Majorana, C.E., Zavarise, G., Borsetto, M. & Giuseppetti, M. (1990). Nonlinear analysis of thermal stresses in mass concrete castings. Cement and Concrete Research, 20(4), pp. 559–578.
15. Ishikawa, M. (1991). Thermal stress analysis of a concrete dam. Computers & structures, 40(2), 347–352.
16. Léger, P., Venturelli, J., & Bhattacharjee, S. S. (1993). Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams. Part 1: modelling. Canadian journal of civil engineering, 20(6), 999–1017.
17. Léger, P., Venturelli, J., & Bhattacharjee, S. S. (1993). Seasonal temperature and stress distributions in concrete gravity dams. Part 2: behaviour. Canadian journal of civil engineering, 20(6), 1018–1029.

18. Daoud, M., Galanis, N., & Ballivy, G. (1997). Calculation of the periodic temperature field in a concrete dam. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 24(5), 772-784.
19. Ganelli, F., Beko, A., & Mordini, A. (2012). Structural assessment of the Mignano solid-gravity dam based on the monitoring data. *Structural engineering international*, 22(1), 130-138.
20. Embaby, R. A., Abdelrahman, A. A., & Sayed-Ahmed, E. Y. (2014, September). Concrete gravity dams: coupled thermal-stress numerical analysis. In *IABSE Symposium Report* (Vol. 102, No. 37, pp. 467-474). International Association for Bridge and Structural Engineering.
21. Sayed-Ahmed, E. Y., Abdelrahman, A. A., & Embaby, R. A. (2018). Concrete dams: thermal-stress and construction stage analysis. *Dams and Reservoirs*, 28(1), 12-30.
22. Ayotte, E.; Massicotte, B.; Houde, J.; Gocevski, V. Modeling the thermal stresses at early ages in a concrete monolith. *ACI Mater. J.* 1997, 94, 577–587.
23. Žvanut, P., Turk, G. & Kryžanowski, A. (2016). Effects of changing surrounding conditions on the thermal analysis of the Moste concrete dam. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), p.04015029.
24. Žvanut, P., Turk, G. and Kryžanowski, A. (2021). Thermal analysis of a concrete dam taking into account insolation, shading, water level and spillover. *Applied Sciences*, 11(2), p.705.
25. Saetta, A., Scotta, R., & Vitaliani, R. (1995). Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads. *Journal of Structural Engineering*, 121(3), 446-457.
26. Cervera, M., Oliver, J., & Prato, T. (2000). Simulation of construction of RCC dams. I: temperature and aging. *Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1053-1061
27. 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.
28. Luna, R., & Wu, Y. (2000). Simulation of temperature and stress fields during RCC dam construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(5), 381-388.
29. Amberg, F. (2003, September). Thermal analysis of a RCC dam during construction. In *7th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Bucarest.
30. Husein Malkawi, A. I., Mutasher, S. A., & Qiu, T. J. (2003). Thermal-structural modeling and temperature control of roller compacted concrete gravity dam. *Journal of performance of constructed facilities*, 17(4), 177-187.
31. Waleed, A. M., Jaafar, M. S., Noorzaei, J., Bayagoob, K. H., & Amini, R. (2004). Effect of Placement Schedule on the Thermal and Structural Response of R CC Dams, Using Finite Element Analysis. In *Geo Jordan 2004: Advances in Geotechnical Engineering with Emphasis on Dams, Highway Materials, and Soil Improvement* (pp. 94-104).
32. Jaafar, M. S., Bayagoob, K. H., Noorzaei, J., & Thanoon, W. A. (2007). Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams. *Advances in Engineering Software*, 38(11-12), 886-895.
33. Noorzaei, J., Bayagoob, K. H., Abdulrazeg, A. A., Jaafar, M. S., & Mohammed, T. A. (2009). Three dimensional nonlinear temperature and structural analysis of roller compacted concrete dam. *Computer Modeling in Engineering and Sciences (CMES)*, 47(1), 43.

34. Zhang, X. F., Li, S. Y., Li, Y. L., Ge, Y., & Li, H. (2011). Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions. *Advances in Engineering Software*, 42(11), 939-943.
35. 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.
36. Kuzmanović, V., Savić, L., & Mladenović, N. (2013). Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of RCC dams. *Journal of Thermal Stresses*, 36(2), 112-134.
37. Kuzmanović, V.; Savić, Lj.; Mladenović, N. Thermal-stress behaviour of RCC gravity dams. *FME Trans.* 2015, 43, 30–34.
38. Khanzaei, P., Abdulrazeg, A. A., Samali, B., & Ghaedi, K. (2015). Thermal and structural response of RCC dams during their service life. *Journal of Thermal Stresses*, 38(6), 591-609.
39. Ponce-Farfán, C., Santillán, D., & Toledo, M. Á. (2020). Thermal simulation of rolled concrete dams: influence of the hydration model and the environmental actions on the thermal field. *Water*, 12(3), 858.
40. James, R. J., & Dollar, D. A. (2003). Thermal engineering for the construction of large concrete arch dams. In *Proceedings of the... ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference* (Vol. 2003, No. 6, p. 97).
41. Sheibany, F., & Ghaemian, M. (2006). Effects of environmental action on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam. *Journal of Engineering Mechanics*, 132(5), 532-544.
42. Tričković, M. (2008). Contribution to methods for thermal calculation of arch dam, Monograph of Jaroslav Černi Water Institute, Belgrade, Serbia.
43. Mirzabozorg, H., Hariri-Ardebili, M. A., Shirkhan, M., & Seyed-Kolbadi, S. M. (2014). Mathematical modeling and numerical analysis of thermal distribution in arch dams considering solar radiation effect. *The Scientific World Journal*, 2014.
44. Mirzabozorg, H., Hariri-Ardebili, M. A., Heshmati, M., & Seyed-Kolbadi, S. M. (2014). Structural safety evaluation of Karun III Dam and calibration of its finite element model using instrumentation and site observation. *Case Studies in Structural Engineering*, 1, 6-12.
45. Lamea, M., & Mirzabozorg, H. (2015). Evaluating sensitivity of an AAR-affected concrete arch dam to the effects of structural joints and solar radiation. *Strength of Materials*, 47(2), 341-354.
46. Castilho, E., Schclar, N., Tiago, C., & Farinha, M. L. B. (2018). FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam. *Engineering Structures*, 174, 165-177.
47. Malm, R., Hellgren, R., & Enzell, J. (2020). Lessons learned regarding cracking of a concrete arch dam due to seasonal temperature variations. *Infrastructures*, 5(2), 19
48. Leitão, N.S. & Oliveira, S. (2023). Insights about Modelling Environmental Spatiotemporal Actions in Thermal Analysis of Concrete Dams: A Case Study. *Thermo*, 3(4), pp.605-624.
49. 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.

50. Zhang, X., Yan, T., Liu, Q., Zhang, X., & Wang, L. (2022). Cracking analysis of induced joints in roller compacted concrete arch dam. *Alexandria Engineering Journal*, 61(5), 3599-3612.
51. Aniskin, N., & Chyk, N. C. (2018, June). Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 365, No. 4, p. 042083). IOP Publishing.
52. Li, M., Si, W., Du, S., Zhang, M., Ren, Q., & Shen, Y. (2020). Thermal deformation coordination analysis of CC-RCC combined dam structure during construction and operation periods. *Engineering Structures*, 213, 110587.
53. Salazar, F., Vicente, D. J., Irazábal, J., De-Pouplana, I., & San Mauro, J. (2020). A review on thermo-mechanical modelling of arch dams during construction and operation: effect of the reference temperature on the stress field. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(5), 1681-1707.
54. Habib, A., Houri, A. A., Habib, M., Elzokra, A., & Yildirim, U. (2021). Structural Performance and Finite Element Modeling of Roller Compacted Concrete Dams: A Review. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18.
55. Zhang, Y., Pan, J., Sun, X., Feng, J., Sheng, D., Wang, H., ... & Zhan, Q. (2021). Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions. *Engineering Structures*, 230, 111721.
56. Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids* (2nd ed.). Oxford University Press.
57. Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer* (4th ed.). Wiley.
58. Modest, M. F. (2013). *Radiative Heat Transfer* (3rd ed.). Academic Press.
59. Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
60. Petrović, P. *Hidrotehničke Konstrukcije, drugi deo*; Građevinski fakultet: Beograd, Srbija, 2002.
61. Schindler, A. K., & Folliard, K. J. (2003, August). Influence of supplementary cementing materials on the heat of hydration of concrete. In *Advances in Cement and Concrete IX Conference*, Copper Mountain Conference Resort in Colorado.
62. Пахомов В. А., Гончаров В. В., (1974). *Бетон и железобетон в гидротехническом строительстве*, Будівельник, Киев
63. LUSAS. Available online: <https://www.lusas.com> (accessed on 1 March 2022)
64. Zhu, B., 1997. Prediction of water temperature in deep reservoirs. *Dam Engineering*, 8, pp.13-26.
65. Mirković, U., Ivanović, J., Pavić, M., Radovanović, S., Mirković, N., Gospavić, R. and Todorović, G., 2019. A method of determining parameters of Bofang model on the example of "Bileca" reservoir. *Zbornik radova 7. Međunarodne konferencije-Savremena dostignuća u građevinarstvu 2019*, pp.695-705.
66. Jorgensen, S.E. and Gromiec, M.J., 1989. Mathematical submodels in water quality systems.
67. Chapra, S. C. (1998). *Surface water quality modeling*, McGraw-Hill, New York, 560-589
68. Su, H., Li, J. and Wen, Z., 2014. Evaluation of various temperature control schemes for crack prevention in RCC arch dams during construction. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, pp.3559-3569.

69. Stojić, P. Hidrotehničke građevine, knjiga III; Građevinski fakultet: Split, Hrvatska, 1999.
70. 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.
71. Bayagoob, K. H., & Bamaga, S. O. (2019). Construction of roller compacted concrete dams in hot arid regions. *Materials*, 12(19), 3064.
72. USACE. Gravity Dam Design; US Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA, 1995; p. 2-1.
73. 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>.
74. 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>.
75. Byfors J. (1980): Plain Concrete at Early Ages, Swedish Cement and Concrete Research Institute, FO 3:80, Stockholm.
76. SRPS EN 1991-1-1: 2012 Actions on Structures-Part 1-1: General Actions - Densities, Self-Weight, Imposed Loads for Buildings, Institute for standardization of Serbia, Belgrade.
77. RIDAS, 2017. Swedish Hydropower Companies Guidelines for Dam Safety, Application Guideline 7.3 Concrete Dams.
78. Holt E (2001): Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete. PhD thesis, University of Washington, Seattle, 209 pp.
79. CEB-FIP Model Code 1990. Model Code for Concrete Structures 1990. Euro-International Concrete Committee. 1991.
80. Institut za ispitivanje materijala SR Srbije, Odeljenje za beton (1972). Temperaturni uticaji u masivnom betonu
81. Energoprojekt - Hidroinženjering. HE „Đerdap 1“ - Projekat izvedenog stanja, građevinski deo, Beograd, 2005.
82. Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”. Sistem za upravljanje bezbednošću brane HE “Đerdap 1”, Beograd, 2023.
83. 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.
84. Mirković, U., Kuzmanović, V. & Todorović, G. (2024). Influence of Monolith Length on Temperature Field of Concrete Gravity Dams. *Applied Sciences*, 14(8), p.3248.
85. Platanovryssi Hydroelectric Project. Measurement Results; Public Power Corporation: Athens, Greece, 2004.
86. ACI. 1981. Manual of concrete practice. Part 1. American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
87. Bofang, Z. On pipe cooling of concrete dams, *J. Hydraul. Eng.* 2010, 5, 505-513.
88. Bofang, Z. Compound Methods for Computing the Effect of Pipe Cooling in Concrete Dams. *Water Resour. Hydropower Eng.* 2013, 34, 47-50.

89. Majorana, C. E., Zavarise, G., Borsetto, M., & Giuseppetti, M. (1990). Nonlinear analysis of thermal stresses in mass concrete castings. *Cement and Concrete Research*, 20(4), 559-578.
90. Léger, P., Côté, P., & Tinawi, R. (1996). Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams. *Computers & structures*, 60(4), 601-611.
91. de Araújo, J., & Awruch, A. M. (1998). Cracking safety evaluation on gravity concrete dams during the construction phase. *Computers & structures*, 66(1), 93-104.
92. ICOLD (International Commission on Large Dams). *Dam Monitoring —General Considerations*; ICOLD Bulletin 60; ICOLD: Paris, France, 1998.
93. Cervera, M., Oliver, J., & Prato, T. (1999). Thermo-chemo-mechanical model for concrete. I: Hydration and aging. *Journal of engineering mechanics*, 125(9), 1018-1027.
94. Cervera, M., Oliver, J., & Prato, T. (1999). Thermo-chemo-mechanical model for concrete. II: Damage and creep. *Journal of engineering mechanics*, 125(9), 1028-1039.
95. Swiss Committee on Dams. *Methods of analysis for the prediction and the verification of dam behaviour*. In *Proceedings of the 21st Congress of the International Commission on Large Dams*, Montreal, Switzerland, 16-20 June 2003.
96. Fairbairn, E. M., Silvos, M. M., Toledo Filho, R. D., Alves, J. L., & Ebecken, N. F. (2004). Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms. *Computers & structures*, 82(2-3), 281-299.
97. Shamsai, A., Ghaemian, M., & Azimfar, S. M. (2009, March). Thermo-Mechanical Analysis of Roller Compacted Concrete (RCC) Dams (Jahgin Dam). In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2009* (pp. 398-408). Society of Exploration Geophysicists.
98. Kim, S.G.; Wang, K.; Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. *Masters Abstr. Int.* 2010, 49, 3.
99. Abdulrazeg, A. A., Noorzaei, J., Khanehzaei, P., Jaafar, M. S., & Mohammed, T. A. (2010). Effect of temperature and creep on roller compacted concrete dam during the construction stages. *Computer Modeling in Engineering and Sciences (CMES)*, 68(3), 239.
100. Jia, C., Shao, A., Li, Y., & Ren, Q. (2010, March). Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction. In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1-5). IEEE.
101. Schlar, N. A. (2011). Environmental thermal actions-thermal analysis of Alto Lindoso dam.
102. Zheng, K. H., & Zheng, B. Y. (2011). Analysis of high concrete arch dam thermal-creep-stress. In *Advanced Materials Research* (Vol. 243, pp. 4496-4500). Trans Tech Publications Ltd.
103. Fujun, C., Guohua, F., Xiaogang, M., & Zhinong, H. (2012). Simulation analysis of crack cause of concrete overflow dam for Hadashan Hydro Project by 3-D FEM. *Systems Engineering Procedia*, 3, 48-54.
104. Hariri-Ardebili, M. A., Mirzabozorg, H., & Ghaemian, M. (2013). Pulvino and peripheral joint effects on static and seismic safety of concrete arch dams. *Scientia Iranica*, 20(6), 1579-1594.

105. Žvanut, P., Turk, G., & Kryžanowski, A. (2016). Effects of changing surrounding conditions on the thermal analysis of the Moste concrete dam. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), 04015029.
106. Colombo, M., Domaneschi, M., & Ghisi, A. (2016). Existing concrete dams: loads definition and finite element models validation. *Structural Monitoring and Maintenance*, 3(2), 129.
107. Aniskin, N., & Trong, C. N. (2018). The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 196, p. 04059). EDP Sciences.
108. Aniskin, N. A., & Chuc, N. T. (2019). Temperature regime and thermal stress in a concrete massif with pipe cooling. *Power Technology and Engineering*, 52(6), 638-643.
109. Chen, H., & Liu, Z. (2019). Temperature control and thermal-induced stress field analysis of GongGuoQiao RCC dam. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(4).
110. Bui, K. A., Sanchaen, P., Tanapornraweekit, G., Tangtermsirikul, S., & Nanakorn, P. (2019). An evaluation of thermal effects on behavior of a concrete arch dam. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 41(5).
111. Cha, S. L., & Jin, S. S. (2020). Prediction of thermal stresses in mass concrete structures with experimental and analytical results. *Construction and Building Materials*, 258, 120367.
112. Zhao, Y., Li, G., Fan, C., Pang, W., & Wang, Y. (2021). Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
113. Žvanut, P., Turk, G., & Kryžanowski, A. (2021). Thermal Analysis of a Concrete Dam Taking into Account Insolation, Shading, Water Level and Spillover. *Applied Sciences*, 11(2), 705.
114. Hou, C., Chai, D., Cheng, H., Ning, S., Yang, B., & Zhou, Y. (2022). Simulation Feedback of Temperature Field of Super-High Arch Dam during Operation and Its Difference with Design Temperature. *Water*, 14(24), 4028.

ПРИЛОЗИ

Као пратећи материјал овог истраживања, аутор у електронском облику прилаже и:

1. Структурне моделе разматраних ламела различитих дужина (у .igs формату)
2. Улазне податке за термички прорачун (у .xlsx формату),
3. Отворене прорачунске фајлове свих модела (у .mdl формату) коришћених у оквиру истраживања а према ознакама које су наведене у табели 4.

Аутор дозвољава коришћење наведених материјала за даља истраживања уз његову писану сагласност.

Биографија аутора

Урош Мирковић је рођен 14. августа 1991. године у Лазаревцу, Република Србија.

Основну школу „Милорад Лабудовић Лабуд“ завршио је у месту Барошевац са одличним успехом и бројним оствареним признањима, као носилац Вукове дипломе и ученик генерације.

Школске 2006/2007. године уписао је Гимназију у Лазаревцу, природно-математички смер, где је матурирао 2010. године са одличним успехом, као носилац Вукове дипломе. Током гимназије био је стипендиста града Лазаревца за остварене средњошколске резултате.

На Грађевински факултет Универзитета у Београду уписао се школске 2010/2011. године. Основне студије на модулу за Конструкције завршио је 2015. године са просечном оценом 8,12 (осам и 12/100). Синтезни пројекат из области Металне конструкције у зградарству под насловом „Прорачун челичне индустријске хале“ одбранио је 26. јуна 2015. године са оценом 10 код ментора проф. др Милана Спремића. Током основних студија био је стипендиста Министарства просвете Републике Србије и града Лазаревца за остварене академске резултате. Мастер студије на модулу за Конструкције завршио је 2016. године са просечном оценом 9,43 (девет и 43/100). Мастер рад из области Механика стена и подземне конструкције под насловом „Упоредна анализа варијантних решења грађења доводног тунела ХЕ „Дабар““ одбранио је 9. децембра 2016. године са оценом 10 код ментора проф. др Дејана Дивца.

Докторске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2017/2018. године. Све предмете на докторским студијама положио је у предвиђеном року, са просечном оценом 9,75. Као докторанд, добитник је награде из фонда проф. др Миливоја Симића за најбољи студентски рад реализован у сарадњи са Лабораторијама за електронику и грађевинску физику у школској 2019/2020. години као и награде за радове изложене на Симпозијуму Друштва грађевинских конструктора Србије (ДГКС) у Аранђеловцу 2020. год. У публикацијама и на скуповима у земљи и иностранству, као аутор и коаутор, објавио је 16 радова углавном из области брана и тунела, од којих су три на SCI листи (M22).

У периоду од 6. марта 2017. до данас запослен је у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“ као мастер инжењер грађевинарства и ангажован на пословима пројектовања нових и санацији постојећих објеката геотехнике и хидротехнике, изради студија и експертиза из поменутих области. Стручни испит у Инжењерској комори Србије положио је 5. децембра 2020. године за област грађевинско инжењерство, ужа стручна област - грађевинске конструкције. Поседује лиценцу за обављање стручних послова израде техничке документације као и лиценцу за извођача радова за обављање стручних послова грађења објеката, односно извођења радова издате од стране Министарства грађевинарства, саобраћаја и инфраструктуре дана 26. марта 2021. године.

Поседује знање енглеског и руског језика.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Урош Мирковић

Број индекса 901/17

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Термичко-напонска анализа гравитационих бетонских брана

које се граде методом блокова

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 09.12.2024.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Урош Мирковић

Број индекса 901/17

Студијски програм Грађевинарство

Наслов рада Термичко-напонска анализа гравитационих бетонских брана које се граде методом блокова

Ментор проф. др Владан Кузмановић, дипл. грађ. инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 09.12.2024.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Термичко-напонска анализа гравитационих бетонских брана

које се граде методом блокова

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 09.12.2024.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.