

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Нелинеарна анализа

Број индекса: 345/2013

Милан Љ. Бојовић

Анализа филтрационих и напонско-деформацијских
процеса бетонске гравитационе бране
мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. проф. др Мирослав Живковић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Резиме

На основу формираног модела бране, применом методе коначних елемената, извршена је анализа стабилности три ламеле бране ХЕ Ђердап 1. Анализа стабилности подразумева извршавање прорачуна на основу којих се добијају вредности напона и деформација, а затим на основу методе редуковане смичуће чврстоће одређивање степена сигурности. За модел бране спроводи се и филтрациони прорачун на основу кога се добијају филтрационе силе које се користе у прорачуну чврстоће.

За моделирање бетона и стенске масе коришћени су еласто-пластични материјални модели. Моделирана стенска маса посматрана је као хомогена и њено понашање је моделирано Мор-Кулоновим материјалним моделом. Овај материјални модел коришћен је и за моделирање ињекционе завесе испод бране. Понашање бетона моделирано је Хук-Брауновим материјалним моделом.

Abstract

Based on formed model of dam and using finite element method, stability analysis was performed for the three lamellas of dam Đerdap 1. Stability analysis includes execution of calculations which as result gives stresses and strains values after witch, using Strength Reduction Method, safety factor was determined. Also, for the dam model filtration calculations were carried out to determine filtration forces that are used in strength calculations.

For modeling concrete and rock elastic-plastic material model was used. Modeled rock was regarded as homogenous and its behavior was modeled with Mohr-Coulomb material model. Same material model was used to model injection curtain beneath dam. Behavior of concrete was modeled with Hoek-Brown material model.

Садржај:

1. Увод.....	1
2. Теоријске основе	2
2.1. Уопштено о филтрационој и напонско деформацијској анализи	2
2.2. Моделирање филтрационих процеса.....	3
2.2.1 Основне једначине струјања течности кроз порозну средину	3
2.2.2 Примена методе коначних елемената за моделирање филтрационих процеса	4
2.3. Моделирање напонско-деформационих процеса	7
2.3.1 Конститутивне релације теорије пластичности	7
2.4. Материјални модели.....	11
2.4.1 Мор-Кулонов материјални модел	11
2.4.2 Хук-Браун материјални модел	12
2.5. Глобални степен сигурности	14
3. Модел бетонске гравитационе бране	17
3.1. Опште карактеристике бране	17
3.2. Приказ геометрије ламела.....	20
3.3. Мрежа коначних елемената	21
3.4. Опис и начин укључења конструктивних детаља и значајних места у модел	23
3.4.1 Дилатационе спојнице.....	23
3.4.2 Заптивке на дилатационим спојницама	24
3.4.3 Шахте и галерије у телу бране и слапишта	27
3.4.4 Дренажни систем	28
3.4.5 Анкери	28
3.5. Оптерећења и гранични услови	30
3.5.1 Сопствена тежина.....	30
3.5.2 Оптерећење од моста	30
3.5.3 Додатно оптерећење	31
3.5.4 Хидростатички притисак.....	33
3.5.5 Филтрационе силе.....	34
3.5.6 Оптерећење од притиска воде на уставе	34
3.5.7 Температурни утицај.....	35

3.5.8 Фазе оптерећивања модела	36
3.5.9 Границе модела	37
3.5.10 Гранични услови.....	37
3.6. Усвајање материјалних модела и параметара материјала	39
4. Приказ и дискусија резултата	40
4.1. Резултати филтрационих прорачуна	40
4.2. Резултати напонско деформационих прорачуна.....	50
4.3. Добијени степени сигурности.....	61
5. Закључак.....	62
Литература	63

Ова страница је намерно остављена празна

1. Увод

У раду је извршена анализа филтрационих и напонско-деформацијских процеса методом коначних елемената.

На основу 3Д геометрије ламела 4, 5 и 6 направљена је мрежа коначних елемената. При креирању мреже узето је у обзир постојање система дренаже, дилатационих спојница, анкера, крана, друмског моста па се у моделу разликују следеће групе елемената:

- Околна стенска маса (3Д елементи)
- Бетонска брана (3Д елементи)
- Испуне галерија (3Д елементи)
- Фугенбанди (2Д елементи)
- Дилатациони зазори (2Д елементи)
- Дренажни канали (1Д елементи)
- Анкери (1Д елементи)

На основу формираног модела бране, применом методе коначних елемената, извршена је анализа филтрационих и напонско-деформацијских процеса на основу којих се добијају вредности напона и деформација, а затим на основу методе редуковане смичуће чврстоће одређивање степена сигурности.

2. Теоријске основе

У овом поглављу дате су теоријске основе филтрационе анализе, као и теоријске основе материјалних модела коришћених за симулацију механичког понашања бране и околне стенске масе. Поред тога, у раду је приказан начин одређивања глобалног степена сигурности методом редуковања смичуће чврстоће.

2.1. Уопштено о филтрационој и напонско деформацијској анализи

Спровођењем филтрационе анализе се добија општа филтрациона слика која подразумева поље потенцијала, дубину воде, поље брзина, поље градијената и распоред филтрационих сила у моделу за одговарајуће коте горње и доње воде. Филтрационе силе које се добијају у овој анализи представљају оптерећење које се користи у напонско-деформацијској анализи. Теоријске основе прорачуна филтрације су дате у поглављу 2.2.

Напонско-деформацијском анализом се добијају вредности напона, померања и деформација на моделу. За моделирање механичког понашања бетона и стенске масе се користе еласто-пластични модели материјала, чије су теоријске основе изложене у поглављима 2.4.1 и 2.4.2.

Одређивање глобалног фактора сигурности се односи на цео модел бране и стенске масе. Глобална сигурност објекта се анализира постепеним редуковањем смичуће чврстоће (*eng. Shear Strength Reduction*) материјала (бетона и стене) која се редукује фактором редуковања све до настанка слома у бетону или стени. Максимална вредност фактора редуковања при коме је конструкција стабилна представља глобални фактор сигурности објекта. Анализа глобалног фактора сигурности је дата у поглављу 2.5.

2.2. Моделирање филтрационих процеса

Филтрациони процеси се моделирају применом диференцијалних једначина струјања флуида кроз порозну средину за стационарне и не стационарне услове који се изводе на основу Дарсијевог закона и једначине континуитета флуида.

Анализом струјања воде кроз порозну средину одређује се поље потенцијала порних притисака, градијената и брзина флуида, положаја слободне површине флуида и протоци кроз задате контуре, за дефинисане контурне услове и у општем случају у функцији времена [1].

2.2.1 Основне једначине струјања течности кроз порозну средину

Основна величина од које се полази у теорији струјања течности кроз (порозну средину) тло је укупни потенцијал φ , дефинисан као

$$\varphi = \frac{p}{\gamma} + h \quad (1.1)$$

где је p порни притисак течности, γ специфична тежина течност, а h висина мерног места у вертикалном правцу, мерена у односу на изабрану референтну раван (најчешће је референтна раван ниво мора).

Средња брзина течности q , позната и као Дарсијева брзина, представља запремину течности која прође кроз јединичну површину порозне средине. Она се може изразити применом Дарсијевог закона према

$$\mathbf{q} = -k\mathbf{i} \quad (1.2)$$

где је $\mathbf{i}$ градијент потенцијала φ дефинисан једначином

$$\mathbf{i} = \nabla \phi \quad (1.3)$$

а $\mathbf{k}$ је матрица пермеабилности, која за ортотропни материјал има облик

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

где су k_x , k_y и k_z коефицијенти филтрације у x, y, z правцу. Оператор ∇ је

$$\nabla^T = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right] \quad (1.5)$$

На основу једначине континуитета $\nabla^T \mathbf{q} = 0$ и Дарсијевог закона (1.2), изводи се хидродинамичка једначина за нестационарно струјање, која има следећи облик:

$$\nabla^T (\mathbf{k} \nabla \phi) + Q = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1.6)$$

где је Q запремински флуks (извор или понор, као количина течности по јединици запремине порозне средине), S је ефективна порозност слоја подељена са дебљином слоја за слободно струјање, а специфична издашност (акумулативност) за ограничено (потопљено) струјање. Уколико је струјање стационарно десна страна једначине (1.6) је једнака нули.

Посебно се напомиње да су коефицијенти филтрације $k_i(p)$ и специфична акумулативност $S(p)$ нелинеарне функције порног притиска p . Ове зависности се одређују емпиријским и експерименталним методама.

Уколико нису познате вредности коефицијента филтрације $k_i(p)$ и специфичне акумулативности $S(p)$ у незасићеној средини (изнад слободне површине где је $p < 0$), препорука је да се у тој области користе коефицијенти чије су вредности 1000 пута мање од вредности коефицијената за $p \geq 0$.

Гранични услови који у решавању проблема струјања кроз порозну средину описаног горњим једначинама могу бити:

а) задати потенцијал

$$\phi = \bar{\phi}(t) \text{ на } \Gamma_1 \quad (1.7)$$

б) задати површински проток (флуks)

$$q_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \bar{q}(t) \text{ на } \Gamma_2 \quad (1.8)$$

в) на слободној површини и површини са цурењем важи

$$p = 0, \quad \phi = z(t), \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \text{ на } \Gamma_3 \quad (1.9)$$

где је n нормала на граничну површину, а t време.

2.2.2 Примена методе коначних елемената за моделирање филтрационих процеса

Проблем моделирања филтрационих процеса, дефинисан претходно наведеним једначинама је очигледно нелинеаран и решава се инкрементално-итеративним поступцима применом нумеричких метода. За нумеричко решавање ове врсте проблема

је коришћена метода коначних елемената (МКЕ). Пролазна претпоставка у МКЕ се састоји у томе да се поље физичке величине у коначном елементу изрази помоћу вредности те величине у чворовима коначног елемента, тако да у случају потенцијала Φ можемо увести апроксимацију

$$\phi = \mathbf{H}\Phi \quad (1.10)$$

где је Φ вектор вредности потенцијала у чворовима коначног елемента, а $\mathbf{H}$ интерполациона матрица облика,

$$\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \dots h_N] \quad (1.11)$$

Овде су $h_k(r, s, t)$ интерполациони полиноми за природне координате (r, s, t) коначног елемента, док је N број чворова.

Заменом (1.10) у (1.3) добија се коначан израз за рачунање градијента потенцијала $\mathbf{i}$, у интеграционој тачки елемента,

$$\mathbf{i} = \mathbf{B}\Phi \quad (1.12)$$

Матрица $\mathbf{B}$ представља матрицу извода интерполационих функција по Декартовим координатама и дефинисана је једначином

$$\mathbf{B} = \nabla \mathbf{H} \quad (1.13)$$

Дарсијева брзина $\mathbf{q}$, у интеграционој тачки, рачуна се директно из израза (1.2) уз коришћење (1.12).

У случају нестационарног струјања, при извођењу једначине баланса коначног елемента полази се од основне диференцијалне једначине облика (1.6). Ако се користи имплицитна интеграција конститутивних релација по времену, онда једначина (1.6) треба да буде задовољена на крају сваког корака интеграције $t + \Delta t$.

Усвајањем апроксимације

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{{}^{t+\Delta t}\phi - {}^t\phi}{\Delta t} \quad (1.14)$$

где леви индекси $t + \Delta t$ и t означавају вредност на крају и на почетку корака, за основну једначину (1.6), се долази до инкременталне једначине баланса коначног елемента облика

$$(\mathbf{K} + \mathbf{S}) {}^{t+\Delta t}\Phi = {}^{t+\Delta t}\mathbf{f} + \mathbf{S} {}^t\Phi \quad (1.15)$$

где је $\mathbf{S}$ матрица издашности дефинисана изразом

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\Delta t} \int_V \mathbf{S} \mathbf{H}^T \mathbf{H} dV \quad (1.16)$$

$\mathbf{K}$ је матрица филтрационе проводности

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} dV \quad (1.17)$$

док је ${}^{t+\Delta t} \mathbf{f}$ вектор протока услед задатих спољашњих флуксева

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{f} = \int_V {}^{t+\Delta t} \mathbf{Q} \mathbf{H}^T dV - \int_A {}^{t+\Delta t} \bar{\mathbf{q}} \mathbf{H}^T dA \quad (1.18)$$

Пошто су функције коефицијената филтрације $k_i(p)$ и специфична акумулативност $S(p)$, нелинеарне функције порног притиска p , проблем постаје нелинеаран и решава се инкрементално-итеративним поступцима. Заменом прираштаја вектора потенцијала $\Delta \Phi^{(i)}$ између две итерације, претходне $i-1$ и текуће i

$${}^{t+\Delta t} \Phi^{(i)} = {}^{t+\Delta t} \Phi^{(i-1)} + \Delta \Phi^{(i)} \quad (1.19)$$

у једначини (1.15), добијамо инкрементално итеративну једначину

$$({}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i-1)} + {}^{t+\Delta t} \mathbf{S}^{(i-1)}) \Delta \Phi^{(i)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{f} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^{u(i-1)} \quad (1.20)$$

где је ${}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^{u(i-1)}$ вектор протока у чворовима

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^{u(i-1)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{S}^{(i-1)} ({}^{t+\Delta t} \Phi^{(i-1)} - {}^t \Phi) + {}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i-1)} {}^{t+\Delta t} \Phi^{(i-1)} \quad (1.21)$$

Итеративни поступак се наставља све док не буде задовољен критеријум конвергенције

$$\frac{\|\Delta \Phi^{(i)}\|}{\|\Delta \Phi^{(1)}\|} < \varepsilon \quad (1.22)$$

где је $\|\Delta \Phi^{(1)}\|$ норма прираштаја вектора вредности потенцијала у свим чворовима модел у првој итерацији, а ε је задата толеранција.

Када буде задовољен критеријум конвергенције (1.22), на основу потенцијала (1.19), одређује се вредност градијента потенцијала (1.12), Дарсијева брзина (1.2), порни притисак из (1.1) и проток у свим чворовима модела

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{f}^p = {}^{t+\Delta t} \mathbf{S}^{(i)} ({}^{t+\Delta t} \Phi^{(i)} - {}^t \Phi) + {}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i)} {}^{t+\Delta t} \Phi^{(i)} \quad (1.23)$$

Проток по контури једнак је алгебарском збиру протока по чворовима који чине задату контуру.

У случају нестационарног струјања на почетку прорачуна се решава нулти корак у коме се одреди поље потенцијала у моделу на основу кога се дефинише слободна површина. Уколико је струјање стационарно у свим претходним изразима треба изоставити матрицу издашности S .

2.3. Моделирање напонско-деформационих процеса

2.3.1 Конститутивне релације теорије пластичности

Применом дефиниције теорије пластичности, до пластичних деформација у материјалу ће доћи у случају када се напонска тачка нађе на површи течења. Уколико се напонска тачка налази унутар ове површи, у текућој конфигурацији постоји само прираштај еластичних деформација.

У случају еласто-пластичних деформација, прираштај укупне деформације може бити представљен као збир еластичног и пластичног прираштаја деформације:

$$d\mathbf{e} = d\mathbf{e}^E + d\mathbf{e}^P \quad (1.24)$$

где је $d\mathbf{e}^E$ прираштај еластичног дела деформације, док је $d\mathbf{e}^P$ прираштај пластичног дела деформације.

У инкременталној теорији пластичности у сваком тренутку важи да је једначина површи течења:

$$f \leq 0, \quad d\lambda \geq 0 \quad \text{и} \quad f \cdot d\lambda = 0 \quad (1.25)$$

За случај када је напонска тачка у области еластичности, односно када нема пластичних деформација, важи да је:

$$f < 0 \quad \text{и} \quad d\lambda = 0 \quad (1.26)$$

У случају када се напонска тачка нађе на површи течења, односно када постоји пластично течење, важи да је:

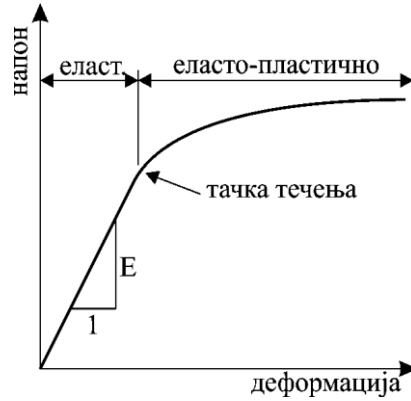
$$d\lambda > 0 \quad (1.27)$$

Како би трећа једнакост у (1.25) била задовољена, у случају када се напонска тачка нађе на површи течења, важе следеће једнакости:

$$f = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T d\boldsymbol{\sigma} = 0 \quad (1.28)$$

што представља Прагеров услов конзистентности на основу кога може бити израчунат прираштај пластичне деформације.

Зависност између напона и деформација у случају еласто-пластичних деформација у материјалу је приказана на слици 2.1. Јасно је да је напон директно пропорционалан деформацији (линеарно понашање) све до тачке течења, након чега се јављају и пластичне деформације, па релација између напона и деформација постаје нелинеарна.



Слика 2.1 Еласто-пластично понашања материјала

Како појаву напона у материјалу изазива само еластични део деформације, у случају коришћења прираштаја напона и деформације, овај израз гласи:

$$d\sigma = C^E de^E \quad (1.29)$$

где C^E представља еластичну конститутивну матрицу. Применом (1.24) и (1.29) добија се:

$$d\sigma = C^E (de - de^P) \quad (1.30)$$

$\partial f / \partial \sigma$ у општем случају:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} = \left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_x} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{xy}} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{yz}} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{zx}} \right] \quad (1.31)$$

Прираштај напона $d\sigma$ може бити представљен у векторском облику као:

$$d\sigma^T = \left[d\sigma_x \quad d\sigma_y \quad d\sigma_z \quad d\sigma_{xy} \quad d\sigma_{yz} \quad d\sigma_{zx} \right] \quad (1.32)$$

Коришћењем услова течења:

$$de^P = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (1.33)$$

и (1.30), једначина (1.28) постаје:

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \left(C^E de - d\lambda C^E \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right) \quad (1.34)$$

па једначина (1.34) може бити написана у облику:

$$df = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T \left(\mathbf{C}^E d\mathbf{e} - d\lambda \mathbf{C}^E \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right) - d\lambda H = 0 \quad (1.35)$$

одакле се може израчунати скалар $d\lambda$ као

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T \mathbf{C}^E d\mathbf{e}}{H + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T \mathbf{C}^E \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}}} \quad (1.36)$$

Коначно, применом (1.36) и (1.33) прираштај напона (1.30) може бити израчунат као

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}^E d\mathbf{e} - \frac{\mathbf{C}^E \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T \mathbf{C}^E}{H + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T \mathbf{C}^E \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}}} d\mathbf{e} \quad (1.37)$$

што може бити записано и краће у облику

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}^{EP} d\mathbf{e} \quad (1.38)$$

Упоредивањем једначина (1.37) и (1.38) следи да је

$$\mathbf{C}^{EP} = \mathbf{C}^E - \frac{\mathbf{C}^E \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T \mathbf{C}^E}{H + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}^T \mathbf{C}^E \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}}} \quad (1.39)$$

што представља еласто-пластичну конститутивну матрицу или тангентну матрицу [2].

За одређивање равнотежне конфигурације у нелинеарној анализи најчешће се користи метода повратног мапирања (*eng. Return Mapping Algorithm*). При коришћењу ове методе, први корак је одређивање такозваног пробног решења [3]. Полази се од претпоставке да у текућем кораку постоје само еластичне деформације, па се применом Хуковог закона израчунава пробни напон ${}^{t+\Delta t} \boldsymbol{\sigma}^E$ као:

$${}^{t+\Delta t} \boldsymbol{\sigma}^E = \mathbf{C}^E {}^{t+\Delta t} \mathbf{e}'' = \mathbf{C}^E \left({}^{t+\Delta t} \mathbf{e} - {}^t \mathbf{e}^P \right) \quad (1.40)$$

где је $\mathbf{C}^E$ еластична конститутивна матрица, ${}^{t+\Delta t} \mathbf{e}''$ тензор еластичне деформације на крају временског корака (под претпоставком да у току прираштаја Δt није дошло до појаве пластичних деформација), ${}^{t+\Delta t} \mathbf{e}$ тензор укупне деформације у тренутку $t + \Delta t$, док је ${}^t \mathbf{e}^P$ тензор пластичне деформације у претходном кораку (тренутку t). Након тога се, коришћењем пробних напона, израчунава вредност функције течења:

$${}^{t+\Delta t} f^E = {}^{t+\Delta t} f \left({}^{t+\Delta t} \boldsymbol{\sigma}^E, \kappa^E \right) \quad (1.41)$$

Уколико је, применом пробних напона, задовољено:

$${}^{t+\Delta t} f^E \leq 0 \quad (1.42)$$

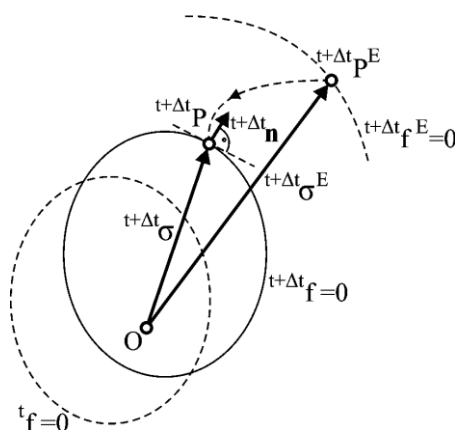
у текућем кораку постоје само еластичне деформације, односно није дошло до појаве пластичног течења и напон ${}^{t+\Delta t} \sigma^E$ се сматра тачним, након чега се прелази у следећи корак интеграције напона. Уколико је вредност функције течења:

$${}^{t+\Delta t} f^E > 0 \quad (1.43)$$

у текућем кораку, поред еластичних, постоје и пластичне деформације, односно дошло је до појаве пластичног течења, па је неопходно кориговати пробни напон у складу са изразом:

$${}^{t+\Delta t} \sigma = {}^{t+\Delta t} \sigma^E - C^E d\epsilon^P \quad (1.44)$$

тако да буде задовољена једначина (1.28).



Слика 2.2 Шематски приказ методе Return mapping

Шематски приказ методе Return mapping-пластичног коректора је приказан на слици 2.2. Дакле, потребно је кориговати решење које одговара напонској тачки ${}^{t+\Delta t} P^E$ и наћи ново решење које одговара тачки ${}^{t+\Delta t} P$, тако да буде задовољен услов на крају корака ${}^{t+\Delta t} f = 0$. За израчунавање прираштаја пластичне деформације користи се услов течења дефинисан једначином (1.33).

2.4. Материјални модели

2.4.1 Мор-Кулонов материјални модел

Мор-Кулонов материјални модел (енг. *Mohr-Coulomb*) представља један од најчешће коришћених материјалних модел за симулацију механичког понашања гранулираних материјала [4]. Овај модел дефинише директну зависност смичућег напона а површи течења τ од нормалног напона σ . На основу ове законитости, до пластичног течења у материјалу ће доћи када смијући напон достигне вредност изражену једначином:

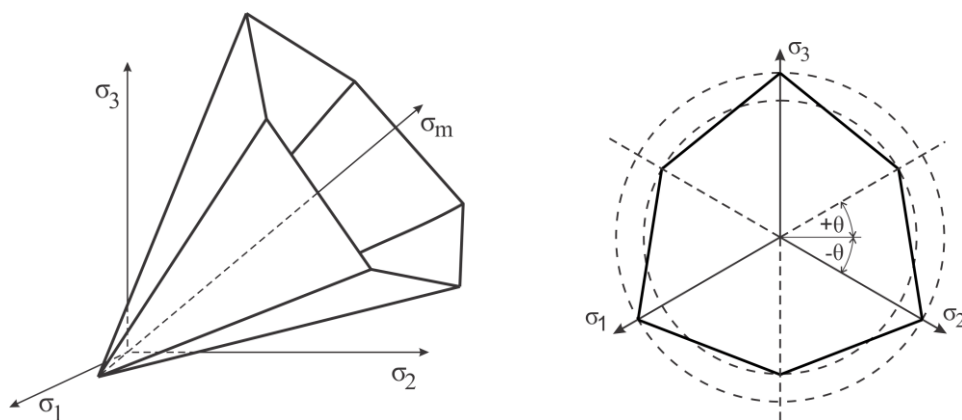
$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1.45)$$

За дефинисање овог услова неопходна су три параметра: кохезија материјала (c), угао унутрашњег трења (ϕ) и угао дилатације (ψ).

Максимални напон затезања у материјалу σ_i је дефинисан изразом:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (1.46)$$

Површ течења овог модела има облик неправилне шестостране пирамиде чија се оса поклапа са хидростатичком осом у простору главних напона и приказана је на слици 2.3



Слика 2.3 Површ течења Мор-Кулоновог материјалног модела

Једначина површи течења овога материјалног модела изражена коришћењем инваријанта напона има облик:

$$f = \frac{I_1}{3} \sin \phi + \sqrt{J_{2D}} \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right) - c \cos \phi \quad (1.47)$$

Док се једначина површи пластичног потенцијала у општем случају разликује од површи течења (не асоцијативни услов течења) и дефинисана је једначином:

$$g = \frac{I_1}{3} \sin \psi + \sqrt{J_{2D}} \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \psi \right) \quad (1.48)$$

Вектор прираштаја пластичне деформације има правац спољашње нормале на површ пластичног потенцијала. За случај када су површи течења и пластичног потенцијала једнаке ($f = g$), односно у случају асоцијативног услова течења, прираштај пластичне деформације је управан и на површ течења, док је у случају неасоцијативног услова течења прираштај пластичне деформације управан само на површ пластичног потенцијала.

Величине I_1 и J_{2D} у једначинама (1.47) и (1.48) представљају прву инваријанту напона и другу инваријанту девијатора напона, дефинисане изразима:

$$I_1 = \text{tr}(\sigma) = \sigma_m = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (1.49)$$

$$J_{2D} = \frac{1}{2} \left[(\text{tr} \mathbf{s})^2 - \text{tr} \mathbf{s}^2 \right] = I_2 + \frac{1}{3} I_1^2 \quad (1.50)$$

док величина θ представља Лодеов угао, дефинисан:

$$\theta = \frac{1}{3} \arcsin \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_{3D}}{J_{2D}^{3/2}} \right) \quad \pi/6 \leq \theta \leq \pi/2 \quad (1.51)$$

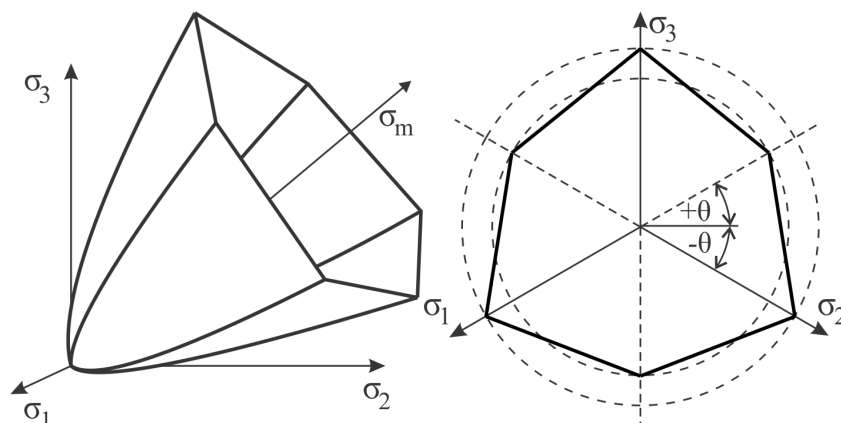
2.4.2 Хук-Браун материјални модел

Хук-Браунов материјални модел (енг. *Hook-Brown*) представља један од најважнијих и најчешће коришћених модела за описивање механичког понашања стенске масе [4]. Први пут је уведен осамдесетих година прошлог века за описивање чврстоће непоремећене (интактне) стенске масе. Овај модел дефинише зависности највећег и најмањег главног напона и има облик:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{1 + m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}}} \quad (1.52)$$

где σ_{ci} представља једноосну притисну чврстоћу непоремећене стенске док је m_i материјална константа која зависи од врсте стене.

Површ течења овог материјалног модел представља неправилну шестострану пирамиду хиперболоидних страница чија се оса у простору главних напона, поклапа са хидростатичком осом као што је приказано на слици 2.4.



Слика 2.4 Површ течења Хук-Брауновог материјалног модела

Једначина површи течења овог модел је функција напона и применом инваријанти напона, гласи

$$f = \frac{I_1}{3} m_b \sigma_{ci} + m_b \sigma_{ci} \sqrt{J_{2D}} \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \right) - s \theta_{si}^2 + 4 J_{2D} \cos^2 \theta \quad (1.53)$$

Једначина површи пластичног потенцијала у општем случају има другачији облик од једначина површи течења има следећи облик:

$$g = \frac{I_1}{3} m_{dil} \sigma_{ci} + m_{dil} \sigma_{ci} \sqrt{J_{2D}} \frac{\sqrt{3}}{2} - s \sigma_{ci}^2 + 3 J_{2D} \quad (1.54)$$

Величине I_1 и J_{2D} у једначинама (1.53) и (1.54) представљају инваријанте напона, док θ Лодеев угао. Константе m_b , m_{dil} и s представљају параметре материјал који се одређују експериментално. Параметар m_b може бити израчунат коришћењем параметра m_i дефинисаног претходно, применом следеће једначине:

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (1.55)$$

Док параметар s може бити израчунат коришћењем израза:

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (1.56)$$

У једначинама (1.55) и (1.56) величина GSI представља геолошки индекс чврстоће, док је D фактор поремећености стене. Фактор поремећености се креће у границама од 0 (за потпуно непоремећену стену) до 1 (за потпуно поремећену стену).

2.5. Глобални степен сигурности

Глобални степен сигурности објекта, применом методе редуковања смичуће чврстоће, представља однос смичуће чврстоће материјала и смичућих напона у материјалу [4]. Другим речима, до губитка стабилности бране ће доћи у случају када смичући напони у материјалу τ превазиђу вредност смичуће чврстоће материјала τ_f , што може бити написано у облику:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1.57)$$

При нумеричкој анализи стабилности бране, најпре је неопходно одредити почетно напонско стање укључујући сва оптерећења која делују на брану. У том случају је вредност фактора редуковања смичуће чврстоће $F=1$ што одговара номиналној смичућој чврстоћи материјала бране. Фактор редуковања се постепено повећава, чиме се смањује смичућа чврстоћа материјала, све док не дође до губитка стабилности објекта. Губитак стабилности у нумеричким прорачунима представља немогућност постизања конвергенције решења у оквиру унапред задатих критеријума или се манифестује наглим повећањем прираштаја померања. Глобални степен сигурности бране представља максималну вредност фактора редуковања смичуће чврстоће за који је објекат стабилан, односно за који постоји конвергенција нумеричких решења.

Као главне предности овог начина одређивања степена сигурности се могу издвојити:

- површ по којој долази до потенцијалног клизања косина услед губитка стабилности се одређује аутоматски, док се при коришћењу аналитичких метода њен облик усваја унапред,
- методу редуковања смичуће чврстоће је могуће примењивати за различите случајеве оптерећења, а не само за анализу дејства сопствене тежине,
- поља напона, деформација, померања и порних притисака се добијају аутоматски.

Треба напоменути да решења добијена применом методе редуковања смичуће чврстоће одговарају решењима добијеним применом традиционалних, аналитичких метода при коришћењу оптималног квалитета мреже коначних елемената. Другим речима, степен сигурности одређен применом ове методе зависи од квалитета мреже коначних елемената, па се коришћењем веће густине мреже у зонама модела где се очекује појава клизних површи, решења добијена применом ове методе приближавају аналитичким решењима.

Као што је раније речено, за прецизну напонско-деформацијску анализу применом методе коначних елемената од кључног значаја је прецизно одређивање параметара материјалних модела коришћених при анализи. Поред ових параметара, неопходно је и

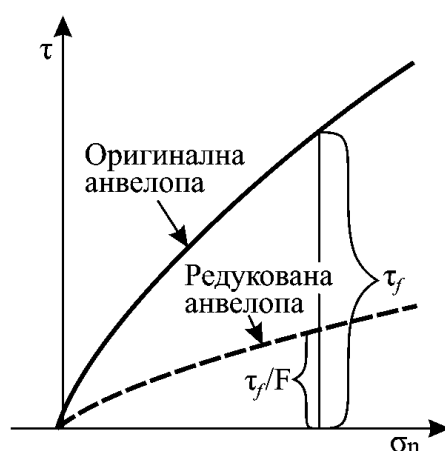
прецизно одређивање Јанговог модула еластичности E и Поасоновог коефицијента ν . Међутим, ове константе је готово немогуће прецизно одредити за материјал тла. Како константе E и ν у највећој мери утичу на вредности померања при деформацијама у области еластичности, док је њихов утицај на понашање конструкције након појаве пластичних деформација мали, њихов утицај на степен сигурности је незнатан. Из тог разлога, прецизно одређивање ових константи није од пресудног значаја у одређивању степена сигурности применом методе редуковања смичуће чврстоће.

Поступак одређивања смичуће чврстоће при коришћењу материјалних модела са нелинеарним површима течења може бити подељен на следеће кораке:

- редуковање номиналне анvelope лома фактором F ,
- одређивање нових константи модела које описују редуковану анvelopeу,
- коришћење нових константи у поновљеној напонско-деформацијској анализи.

Овај поступак се понавља до достизања граничне стабилности објекта, односно док постоји конвергенција нумеричких решења. Максимална вредност фактора редуковања смичуће чврстоће за коју је испуњен услов стабилности представља степен сигурности објекта.

Редукована анvelopeа лома τ_{red} добијена редуковањем напона лома τ фактором редуковања смичуће чврстоће F је приказана на следећој слици:



Слика 2.5 Редуковање анvelopeа лома материјалног модела

Вредности материјалних константи које описују редуковану анvelopeу лома се одређују такозваним фитовањем кривих, односно израчунавају се нове константе применом неке од метода за одређивање минималног одступања. Најпознатија међу њима је метода најмањих квадрата, при чему се одређују нови параметри материјалног модела који описују редуковану анvelopeу уз критеријум да је грешка одступања двеју кривих минимална, што може бити записано једначином:

$$\varepsilon(\sigma_n) = (\tau^{apr} - \tau^{red})^2 \quad (1.58)$$

Редукована анVELOпа овог модела и њена апроксимација се најчешће не поклапају у потпуности, као што је то приказано на следећој слици, али је њихово одступање сведено на најмању меру.



Слика 2.6 Редукована и апроксимирана анVELOпа лома нелинеарних модела

3. Модел бетонске гравитационе бране

На основу формираног модела бране, применом методе коначних елемената, извршена је анализа стабилности три ламеле бране ХЕ Ђердап 1. Анализа стабилности подразумева извршавање прорачуна на основу којих се добијају вредности напона и деформација, а затим на основу методе редуковане смичуће чврстоће одређивање степена сигурности.

За моделе ламела бране спроводе се филтрациони, напонско-деформациони прорачун и анализа глобалне стабилности припадајуће ламеле и околне стенске масе. За моделирање бетона и стенске масе користе се еласто-пластични материјални модели.

3.1. Опште карактеристике бране

Преградно место хидроенергетског система „Ђердап 1“ налази се на стационажи 942,95 km речног тока Дунава. Систем чине следећи хидрограђевински објекти повезани у једну функционалну целину (у редоследу од наше обале до државне границе са Румунијом):

- насута брана са платоом,
- двостепена бродска преводница са командним торњем и предпристаништима,
- електрана са монтажним блоком и анексима,
- преливна брана са седам преливних поља.

Уз насуту брану, са низводне стране налази се командно-управна зграда, радионице, узводни анекс командно-управне зграде и депонија затварача. Изнад средње главе преводнице, конзолних препуста стубова улазних грађевина електране и преливне бране постављен је бетонски мост на коти 72.50 mnm.



Слика 3.1 - ХЕ „Ђердап 1“

Преливна бетонска брана је масивна армирано-бетонска гравитациона брана. Фундирана је углавном на кристаластим шкриљцима који су поремећени и тектонски оштећени. Изведена је инјекциона завеса и дренажни систем у темељима бране. Са наше стране, постоји 7 преливних поља, дужине по 25 m и 6.5 стубова ширине по 7 m. То је укупно 14 ламела, ширине углавном по 16 m. Најнижа кота фундирања је 15.5 mnm, кота прелива је 55.20 mnm, кота стуба 77.0 mnm. Максимални капацитет једног преливног поља је 1100 m³/s. Унутар бране постоје следеће галерије: инјекциона, систем дренажних галерија, контролне галерије на коти 38.0 mnm и 50.0 mnm.

На брану се надовезује слапиште, армирано-бетонска конструкција дужине око 30 m. У низводном делу слапишта смештена је слапишна галерија.

Електрану чине сама машинска зграда са монтажним блоком, умирујући базен са разделним зидовима и слапиште темељног испуста. Машинска зграда је армирано-бетонска конструкција, издељена дилатационим спојницама на три блока, а посебно је монтажни блок. Укупна дужина је 214 m. Ширина у темељној спојници је 84 m. Најнижа кота фундирања је 1.80 mnm. Највиша кота крова је 77.8 mnm, па је укупна грађевинска висина 76 m. Фундирање машинске зграде изведено је на чвршћим партијама кристаластих стена са прослојцима мекших гнајсева. Трећи блок до преливне бране фундиран је прелазној зони од чвршћих ка оштећеним кристаластим стенама.

У темељима монтажног блока изведени су базени црпне станице дренажне, мокре и суве галерије, из којих се пумпама избацује сва вода дренирана из објекта, у слапиште темељног испуста.

Бродску преводницу чине: узводна и низводна комора, узводна, средња и низводна глава, узводно и низводно предпристаниште. Габарити комора су 310x34x16 m. Узводна комора је фундирана на коти 47.50 mnm, а низводна на 29.50 mnm. Узводна комора је подељена на 18, а низводна на 21 ламелу.

Узводно предпристаниште чини, на обалној страни 7 бетонских стубова, а на речној бетонски зид. Низводно предпристаниште има бетонски зид и на обалној и на речној страни. Дужина оба предпристаништа је 580 m, а ширина 100 m.

Насута брана се састоји из саме бране и насутог платоа уз десни бок узводне коморе бродске преводнице. Брану чини водонепропусно глинено језгро, које је обавијено филтерским слојем од шљунковитог материјала и насутог дела од стенског материјала. По дужини бране, у темељу језгра, налази се инјекциона галерија.

Датум почетка радова: 7. септембар 1964. године

Датум завршетка радова: 16. мај 1972. године

Почетак првог пуњења акумулације: април 1971. године

Кота нормалног нивоа воде: 68.00 mnm

Кота минималног нивоа воде:	63.00 mnm
Кота максималног нивоа воде:	69.50 mnm
Дужина бране по круни:	1278 m
преливна брана	441 m
електране	2 x 214 m
преводнице	2 x 53 m
насута брана на левој обали	117 m
насута брана на десној обали	186 m

Инсталисани протицај износи $9600 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Инсталисана снага је 2100 MW.

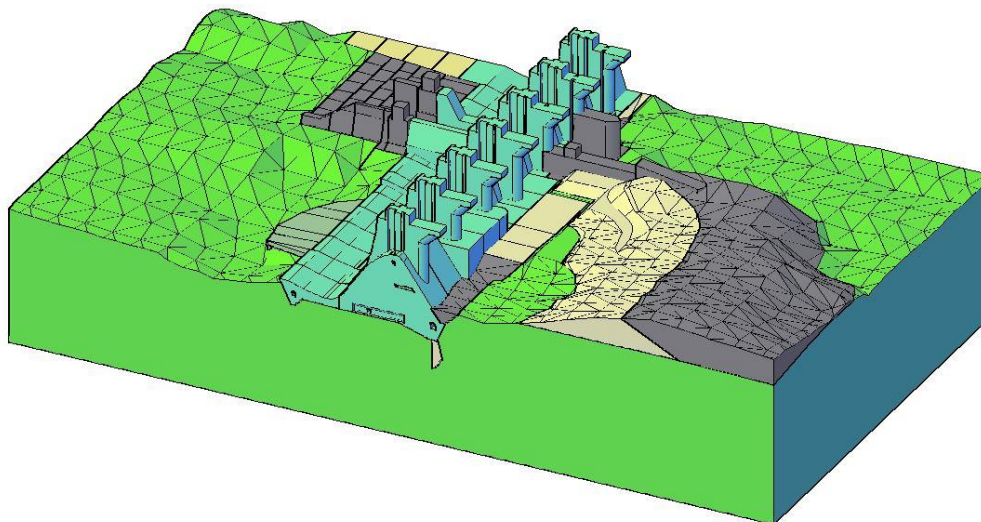
Укупан број хидроагрегата је 12, односно по 6 у свакој електрани, појединачне снаге 175 MW, са вертикалном осом и турбинама типа Каплан, пречника радног кола 9.5 m и бројем обртаја 71.5 у мин.

Просечна годишња производња електричне енергије за режим рада 69.5/63 (кота горње воде/кота доње воде) износи 11500 GWh.

3.2. Приказ геометрије ламела

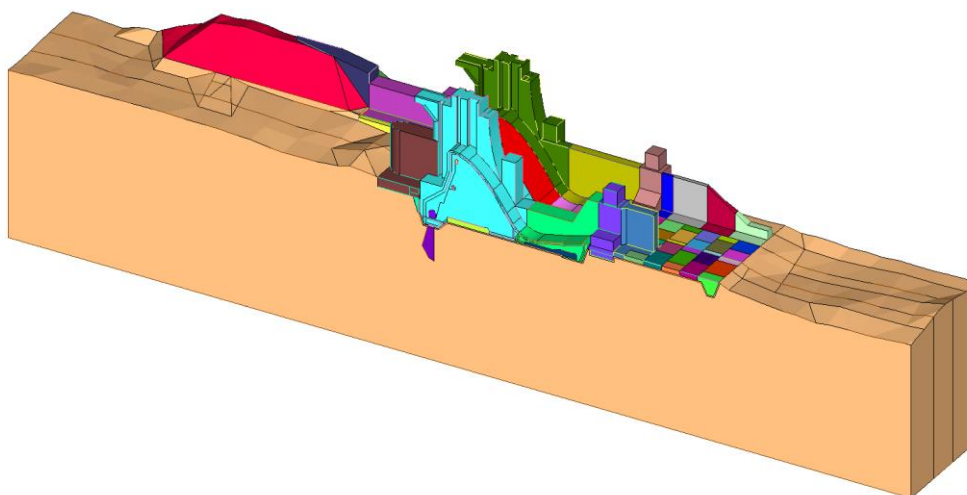
Преливни део са стубовима хидроелектране „Ђердап 1“ приказан је на слици 3.2. Модел на слици представља стање терена са загатом према последњим подводним снимцима из 2014 године.

У раду су моделиране три изабране ламеле (ламела 4, 5 и 6) у циљу приказа методологије прорачуна.

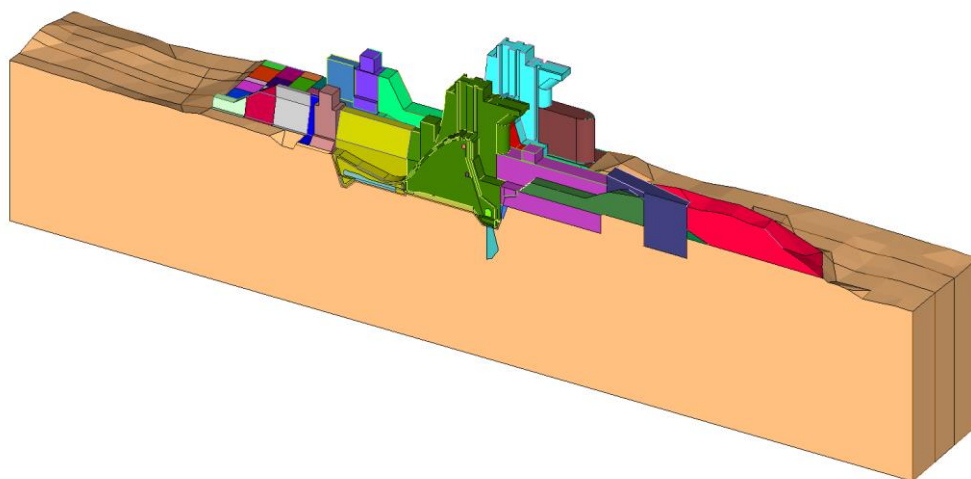


Слика 3.2 Изглед солида терена и загата према последњим подводним снимцима из 2014.

У домен модела једне ламеле, поред саме бетонске конструкције, улази у склоп више солида који представљају елементе инјекционе завесе, бетонског тепиха и више различитих области које су део стенске масе и корита реке. Поменути солиди приказани су на сликама 3.3 и 3.4 различитим бојама.



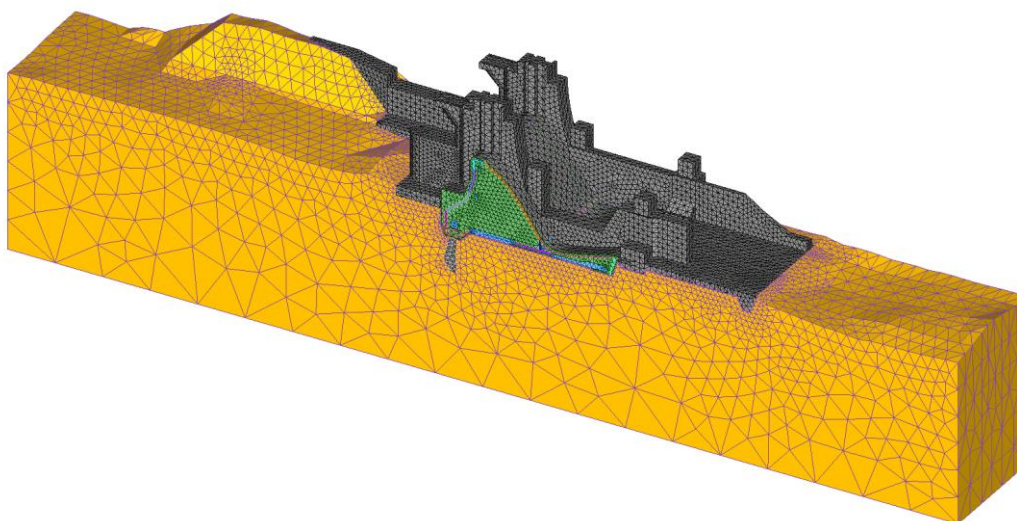
Слика 3.3 Приказ геометрије ламела 4, 5 и 6



Слика 3.4 Приказ геометрије ламела 4, 5 и 6

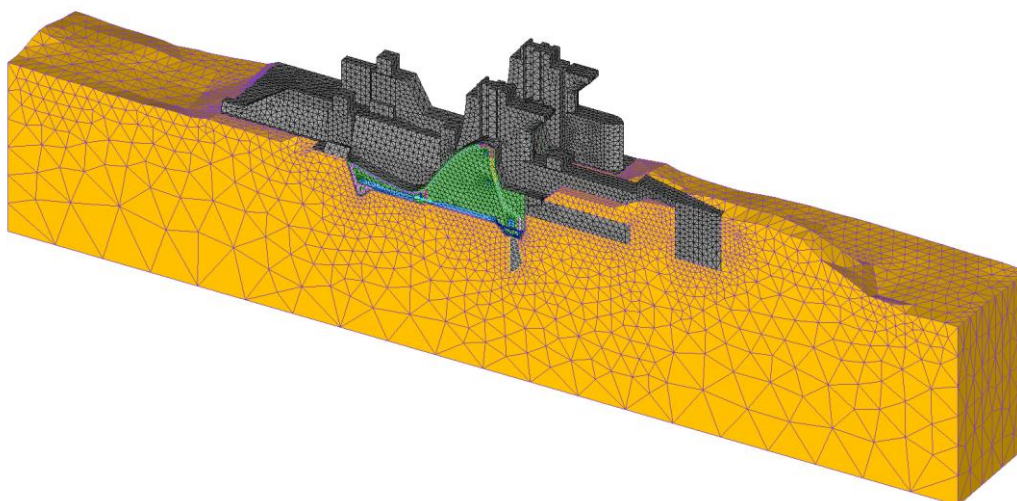
3.3. Мрежа коначних елемената

Да би се испунио услов оптималног броја коначних елемената, дефинисане су различите величине елемената по запремини у различитим зонама модела. У телу бране су генерисани елементи просечне величине 2m, док је у стенској маси задата иницијална величина елемената од 5m са фактором раста 100 израженим у процентима. На овај начин се на границама модела, далеко од преградне конструкције, добију елементи величине 10m чиме је значајно смањен број елемената (слике 3.5 и 3.6).



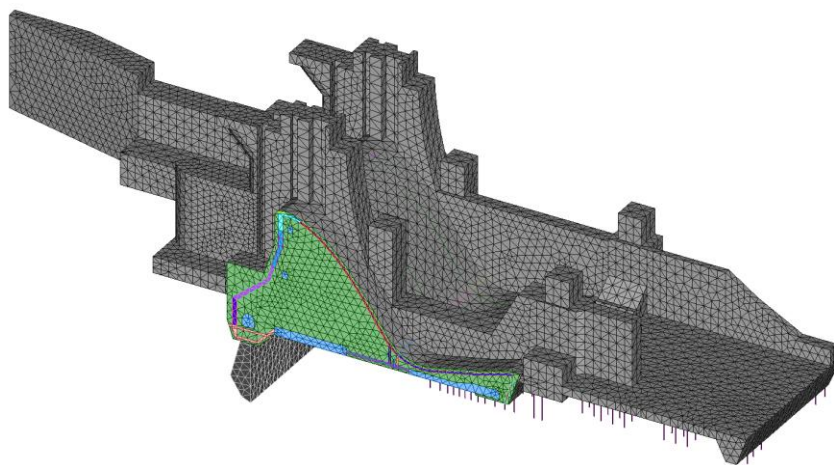
Слика 3.5 Приказ мреже према последњим подводним снимцима (из 2014. године)

Мрежа коначних елемената за ламеле 4, 5 и 6 је креирана коришћењем тетраедарских коначних елемената са међучворовима (10 чворова по елементу). Модел се састоји од 336229 чворова и 244769 елемената.

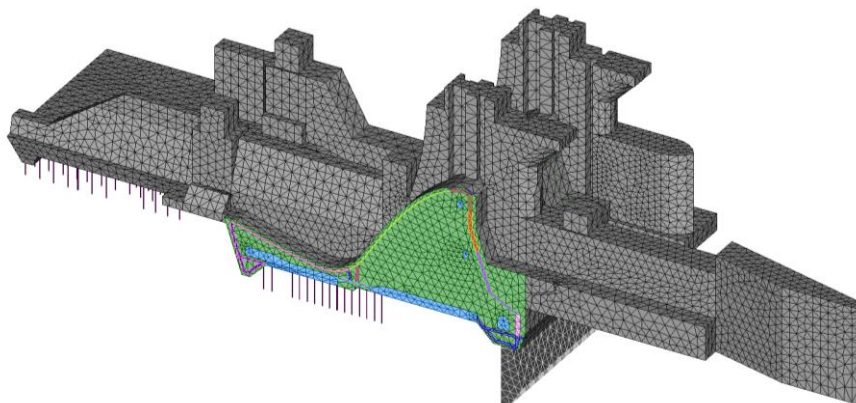


Слика 3.6 Приказ мреже према последњим подводним снимцима (из 2014. године)

На сликама 3.7 и 3.8 приказана је увећано модел коначних елемената без укључених елемената стенске масе. На овим сликама се поред тетраедарских коначних елемената бетона виде и остали креирани елементи, као што су елементи љуске којима је узет у обзир зазор између ламела и обезбеђено протицање воде бочним странама ламеле; 1Д елементи дренажних цеви и елементи штапа којима су представљени анкери.



Слика 3.7 Приказ мреже без стенске масе



Слика 3.8 Приказ мреже без стенске масе

3.4. Опис и начин укључења конструктивних детаља и значајних места у модел

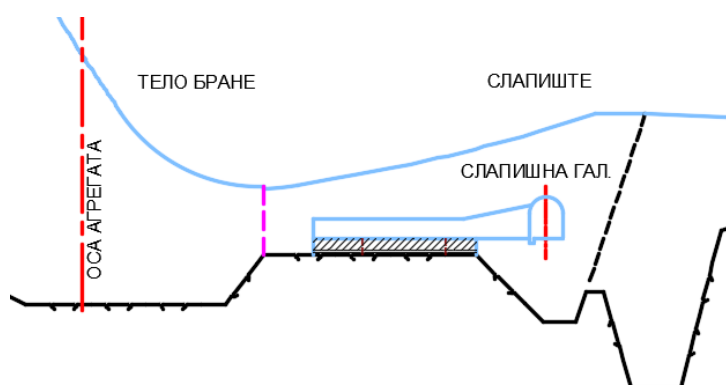
Хидроелектрана „Ђердап 1“ поред своје комплексне геометрије укључује више сложених система и елемената неопходних да обезбеде њену целокупну функцију и очувају сигуран рад. Због тога на преливном делу бране постоји систем дренаже процедурне воде, систем устава, елементи фугенбанда за спречавање продор воде између суседних ламела, елементи анкера за додатно осигуравање конструкције од утицаја воде из акумулације и узгонских сила, додатни елементи моста, крана, мерне опреме и др.

Поменути системи и елементи су анализирани у циљу њиховог што реалнијег представљања на моделу. У раду је дат опис поменутих система и елемената и начин њиховог укључења на моделу.

3.4.1 Дилатационе спојнице

Дилатационе спојнице представљају зазор између две суседне ламеле и зазор између тела бране слапишта ламеле, стиснута је бетон на бетон и одвајање је извршено са два премаза битулитом. Заштита спојнице између суседних ламела, односно заптивање изведено је фугенбандима по целом ободу спојнице и анкеровано у стену, изузев на дужини дренажних галерија.

Предвиђена ширина дилатационих спојница између две суседне ламеле је 2mm. У зависности од доба године спојнице се отварају и затварају. Годишњи рад спојнице је оквирно до 5mm и оне омогућавају узајамно релативно померање суседних ламела у сва три правца.



Слика 3.9 Приказ дилатационе спојнице између тела бране и слапишта на ламели 10

Спојница између тела бране и слапишта (слика 3.9 магента), као и остале дилатационе спојнице које постоје између слапишта и ризберме или бетонског тепиха су слично изведене. У зависности од сложености њихове геометрије условљена су ограничења узајамног померања суседних целина објекта.

Узајамно релативно померање суседних ламела у сва три правца у моделу је остварено независним дефинисањем чворова на границама између две ламеле. Чворови који леже у заједничкој равни између две ламеле нису спојени при анализи чврстоће чиме је омогућено независно кретање ламела у сва три правца.

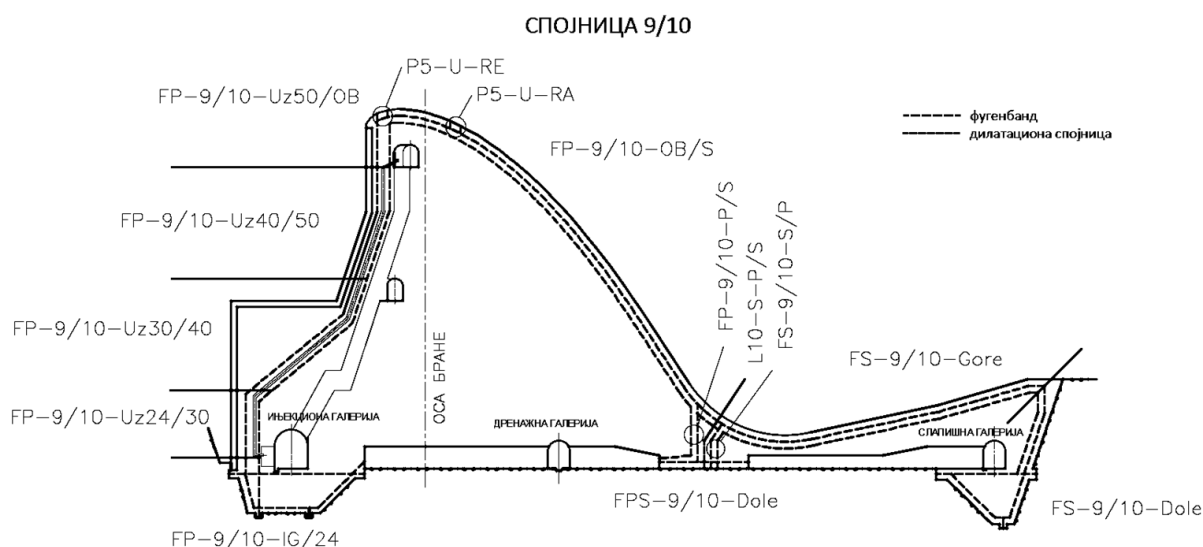
У равни спојнице направљени су 2Д елементи са међучворовима који омогућавају, односно онемогућавају проток воде кроз спојницу. Контролом дебљине ови елементи могу се представити различите величине зазора између поменутих бетонских сегмената.

3.4.2 Заптивке на дилатационим спојницама

Заштита спојница од продора воде изведена је по целом ободу спојнице (слика 3.1) и заптивка је анкерована у стену, изузев на дужини дренажних галерија.

Узводна заштита се обезбеђује са два гумена заптивача (фугенбанда) М-35 (слика 3.1) на 1 и 2.1m низводно од узводног лица бране, између којих је, ради веће сигурности, канал димензија 20x20cm испуњен битуменом.

На слици 3.1 приказано је зонирање фугенбанда са дефинисаним ознакама сегмената.



Слика 3.10 Шема ознака сегмената фугенбанда на репрезентативној спојници

FP-9/10-IG/24 – зона око инјекционе галерије до коте 24 мнм,

FP-9/10-Uz24/30 – узводна зона између кота 24 и 30

FP-9/10-Uz30/40 – узводна зона између кота 30 и 40 мнм,

FP-9/10-Uz40/50 – узводна зона између кота 40 и 50 мнм,

FP-9/10-Uz50/OB – узводна зона изнад коте 50 мнм до осе бране,

P5-U-RE – зона заустављања протицања воде испод ремонтне уставе поља пет

P5-U-RA – зона заустављања протицања воде испод радне уставе поља пет

FP-9/10-OB/S – низводна зона од осе бране до слапишта,

FP-9/10-P/S – у зони спојнице ламеле 9 и 10 од прелива ка слапишту

L10-S-P/S – зона спојнице између тела бране и слапишта

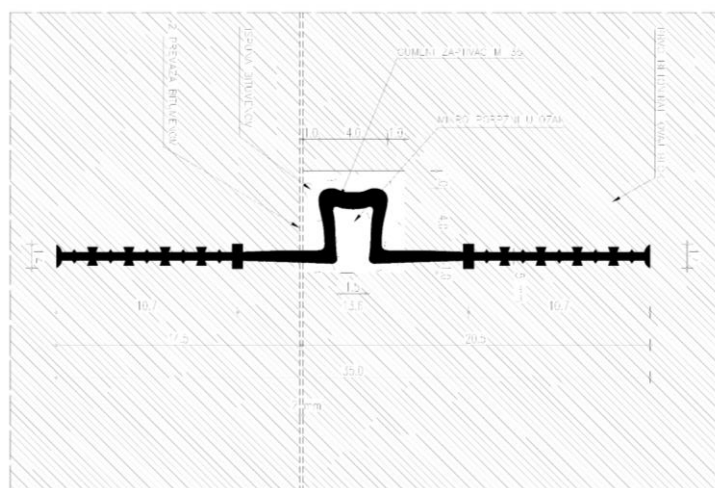
FS-9/10-S/P – у зони спојнице ламеле 9 и 10 од слапишта ка преливу

FS-9/10-Gore – у зони слапишта са горње стране.

FS-9/10- Dole – у зони зуба слапишта са доње стране и

FPS-9/10- Dole – у зони темељне спојнице прелива и слапишта са доње стране.

Зонирање фугенбанда извршено је у циљу симулирања пробоја воде кроз одређени део фугенбанда. Оваквим зонирање је могуће дозволити протицање воде кроз фугенбанд и у прорачуну филтрације анализирати ново настало стање. Поред филтрационих прорачуна отварање одређених фугенбанда може имати негативан утицај на стабилност бране, због тога је потребно након филтрационих прорачуна извршити прорачун чврстоће.



Слика 3.11 Детаљ гуменог заптивача (фугенбанда) М-35 на дилатационим спојницама [5]

На спојницама између слапишта и низводних бетонских елемената (ако постоје) продор воде треба да буде омогућен.

Протицање воде између ламела у филтрационим анализама је спречено коришћењем фугенбанда који су моделирани 2Д елементима са међучворовима, а који су генерисани на основу постојећих чворова тетраедарских коначних елемената бране.

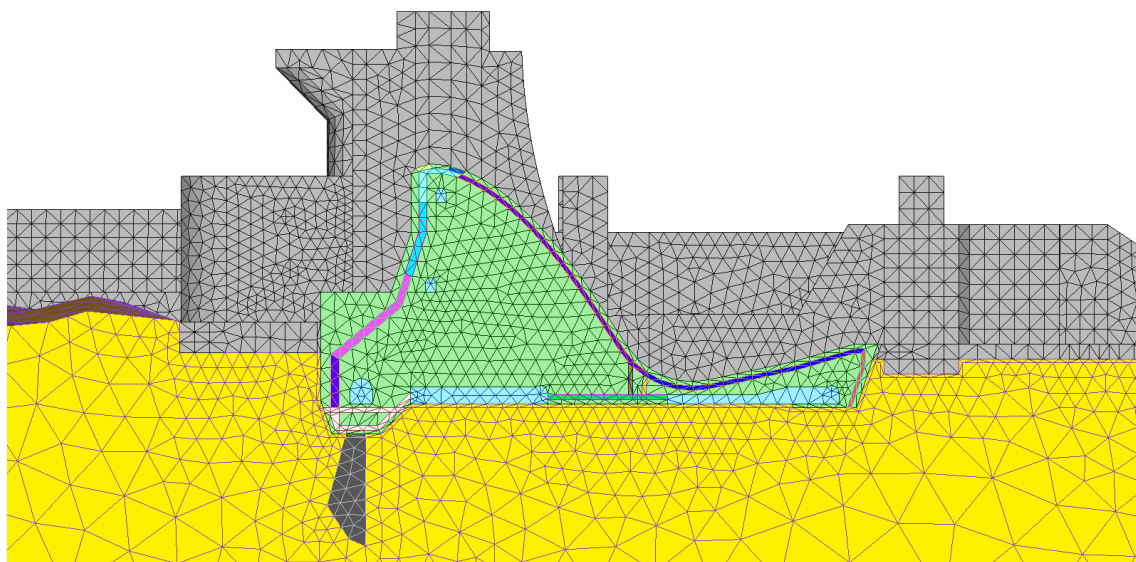
Применом ових елемената онемогућен је проток воде унутар контуре спољашњег фугенбанда (на 1 m низводно од узводног лица бране) на месту спојница ламела. Ово је постигнуто задавањем малих вредности коефицијената филтрације 2Д елементима. Ови елементи су дефинисани у простору између два фугенбанда, правећи заштитну траку која онемогућује продор воде.

На споју тела бране и слапишта такође су генерисани 2Д коначни елементи, коришћењем постојеће мреже. Ови елементи за разлику од елемената између ламела, треба да омогуће протицање воде кроз спој. Проток кроз спој се контролише променом коефицијента филтрације. Коначни елементи на спојевима, 2Д и 3Д, имају заједничке чворове, односно извршено је спајање њихових преклопљених чворова.

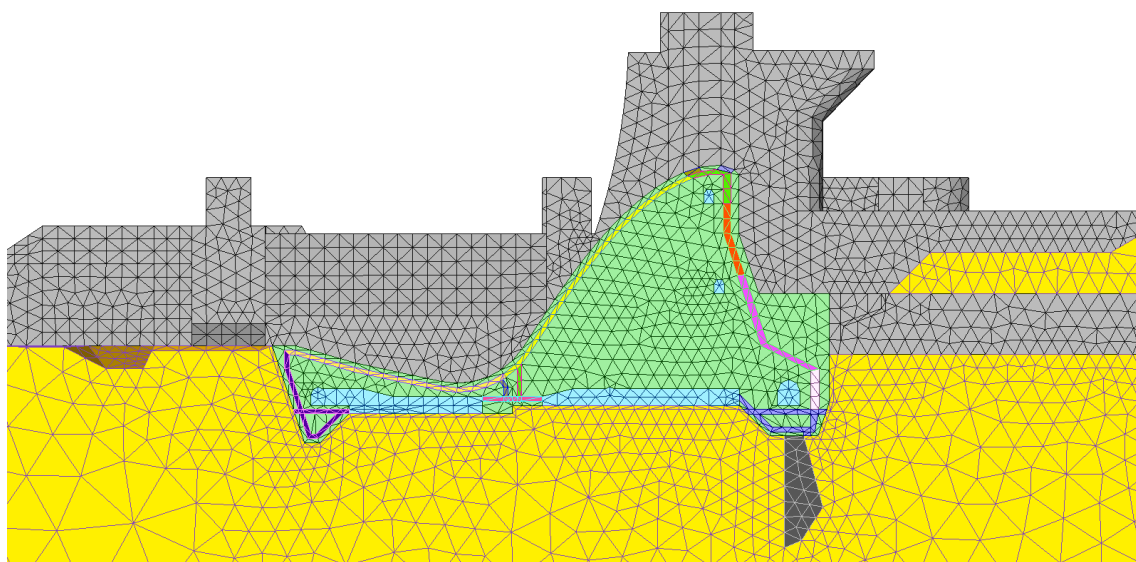
Ови 2Д елементи су коришћени само у филтрационој анализи, јер служе да омогуће или спрече проток воде у нумеричким прорачунима и искључени су из прорачуна чврстоће.

На постојећим спојницама између слапишта и низводних бетонских елемената продор воде је омогућен.

На сликама 3.12 и 3.13 приказани су задати 2Д проводни коначни елементи (зелено) и 2Д коначни елементи фугенбанда (сегменти различитих боја).



Слика 3.12 Задати 2Д елементи на ламели 4 (поглед са Српске обале)



Слика 3.13 Задати 2Д елементи на ламели 6 (поглед са Румунске обале)

Канал између два фугенбанда који је испуњен битуменом није укључен у постојећи модел МКЕ.

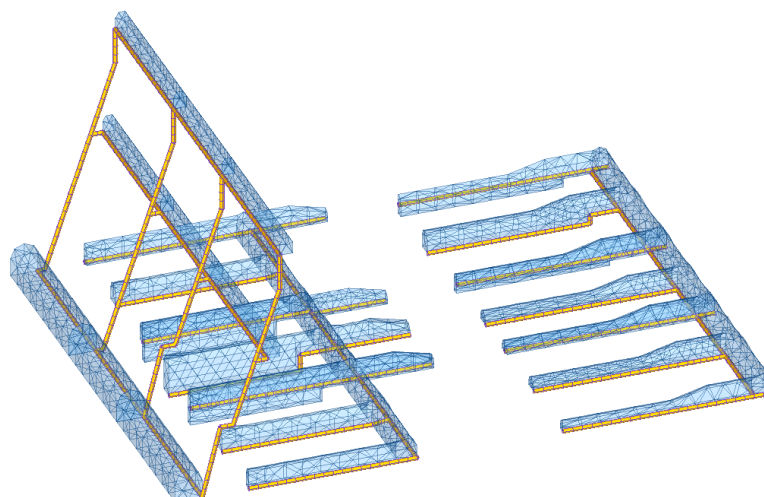
3.4.3 Шахте и галерије у телу бране и слапишта

Иза система за заптивање на узводном делу је контролни шахт димензија 1.0 x 1.4 m, који пролази од инјекционе галерије до галерије на коти 50 mнм. Осим ове врсте шахти на свим дилатационим спојницама на делу преливне бране, у срединама 3 ламеле (2, 7 и 10) постоје и вертикалне шахте (за смештање оскултационе опреме). Поред шахти постоје и хоризонталне галерије, првенствено у темељима бране, али и на два виша нивоа (38 и 50 mнм). Утицаје ових „шупљина“ у телу бране и слапишта треба узети у обзир приликом моделирања, као елементе који прикупљају процеђену воду кроз бетон и спроводе је до најнижих галерија, а затим дренажним каналима и до црпне станице (лоциране у монтажном блоку електране).

У моделу коначних елемената су моделиране дренажне галерије и шахте. Оне су реално представљене шупљинама унутар модела ламела.

За потребе филтрационог прорачуна простор галерија и шахти је испуњен тетраедарским коначним елементима (слика 3.14, плави провидни елементи), са коефицијентом филтрације 1 m/s. Ови елементи „ваздуха“ су неопходни за преношење утицаја дренажних галерија и шахти на комплетну запремину бетонске бране.

Унутар галерија и шахти су постављени линијски 1Д елементи дефинисани на основу правца тока воде и постављени су у пресеку равни пода и зида одговарајућих галерија, целом дужином галерије. Приказани су на слици 3.14 жутом бојом и због јаснијег приказа на слици су увећани. Улога ових елемената је у прикупљању и извлачењу процедурне воде па се користе само за прорачун филтрације. У прорачуну чврстоће су искључени из мреже коначних елемената.



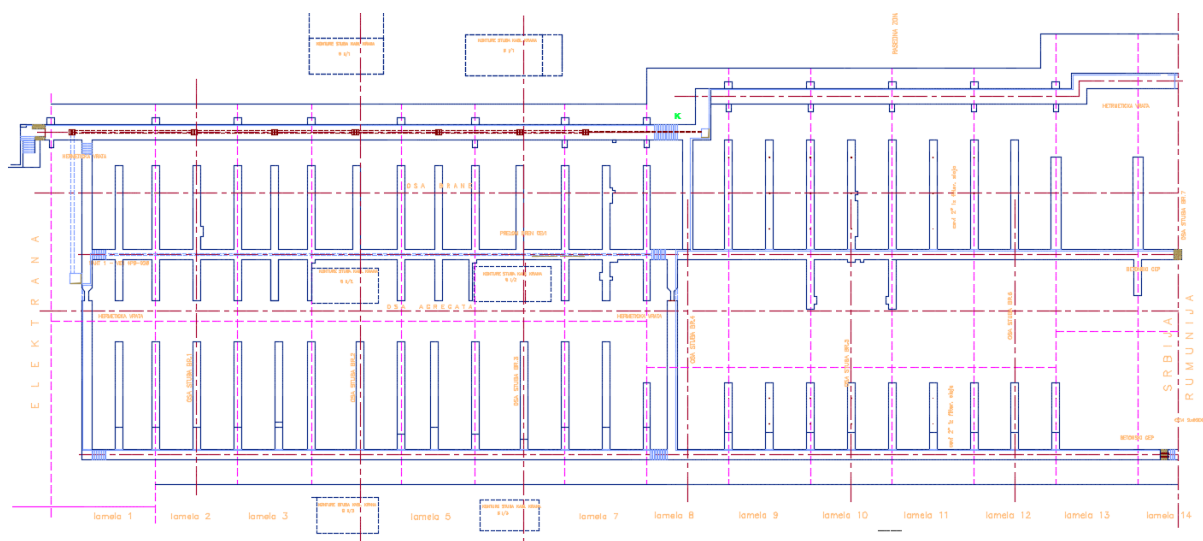
Слика 3.14 Коначни елементи испуна галерија ламела 4, 5 и 6

Поред дренажних галерија 1Д елементи за филтрацију су постављени и у вертикалним шахтама у којима се налазе вертикална клатна. Они су задати дуж једне ивице шахте, по целој дужини шахте.

3.4.4 Дренажни систем

Да би се обезбедила стабилност бране и узгони смањили до пројектованих вредности, одабран је систем дренажа којег чине попречне и подужне галерије на контакту бетон-стена, као и велики број дренажних цеви, убушених из наведених галерија.

Дренажни систем (слика 3.15) се састоји од по три хоризонталне галерије у свакој ламели, у правцу тока реке, које се на низводном крају и бране и слапишта уливају у сабирне галерије.

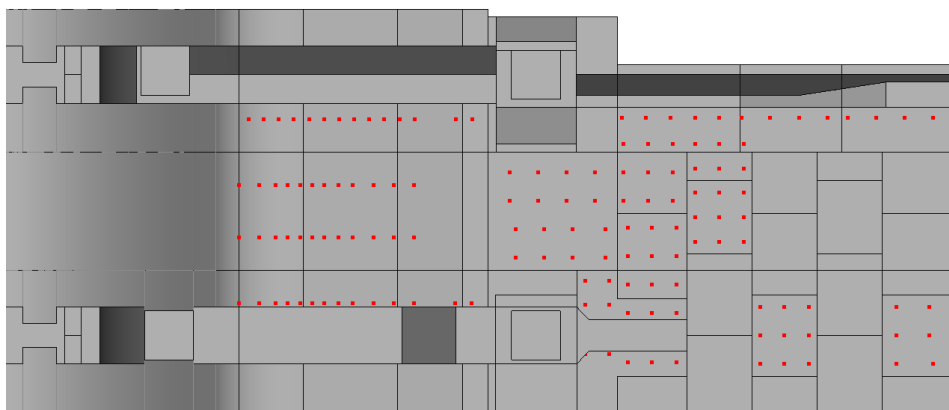


Слика 3.15 Ситуациони приказ галерија у темељима преливне бране

Дренажни систем се разликује од галерије до галерије у разним детаљима, али улога сваке галерије је иста: да издренира воду са контакта са стеном и спроведе је системом канала и цеви до одређених базена, а затим и до црпне станице, одакле се пумпама избацује у доњу воду. Вода која се спроводи из дела преливне бране до црпне станице обухвата поред ове издрениране воде, и процедурну воду кроз тело бране (бетон), као и воду која се слива низ шахте (косе и вертикалне).

3.4.5 Анкери

Слапиште бране је анкеровано са 158 челчних анкера пречника 40 mm дужине 11 до 19 m у стену (слика 3.16). Функција ових анкера је да спрече одизање слапишта услед сила узгона.



Слика 3.16 Распоред анкера на ламелама 4 (доле), 5(средина) и 6 (горе), поглед одозго

Начин укључења: Анкери су креирани коришћењем 1Д коначних елемената штапа. Штапови су са бетонском браном и стенском масом повезани применом повезаних померања. Овим је постигнуто повезивање анкера са браном и стенском масом без уситњавања и измене постојеће мреже коначних елемената.

3.5. Оптерећења и гранични услови

Гравитациона бетонска брана је масивна бетонска структура дизајнирана да задржава велике запремине воде. Таква грађевина трпи комплексна оптерећења која су последица великог броја фактора коју утичу на брану.

3.5.1 Сопствена тежина

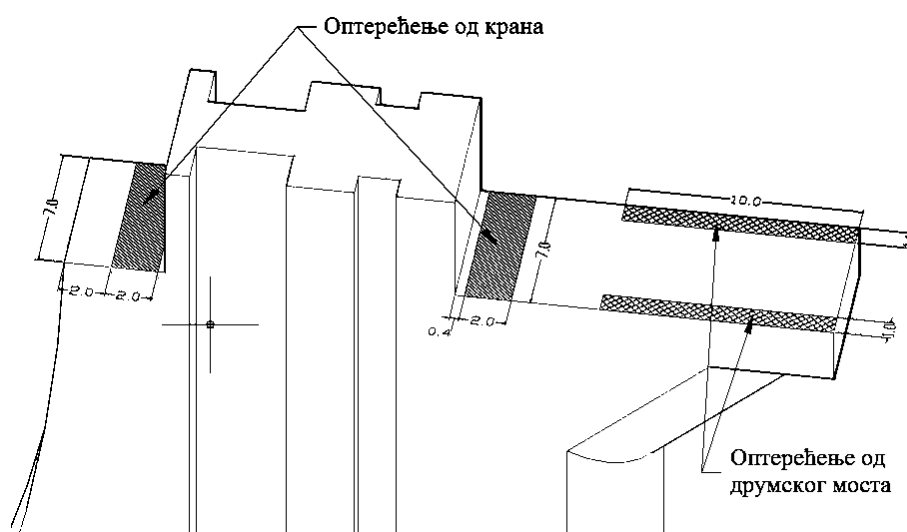
Бетонске гравитационе бране су масивне конструкције, па је приликом прорачуна чврстоће важно узети у обзир утицај њихове тежине. Поред деформација и напона које се изазивају унутар саме бране, сопствена тежина изазива деформацију тла, тј. слегање терена на коме је сама брана изграђена.

На утицај тежине бране, пре свега утиче запремина и густина али и геометрија, зато што од ње зависи расподела оптерећења. Због тога модели ламела у погледу геометрије и димензија одговарају изведеном стању бране као и усвојени материјални параметри различитих тела унутар модела.

Сопствена тежина бране, укључујући и део конструкције, са околном стенском масом се узима као иницијално оптерећење у прорачуну чврстоће. На основу прорачуна чврстоће, добија се почетно напонско стање модела не узимајући у обзир оптерећења која потичу од осталих фактора.

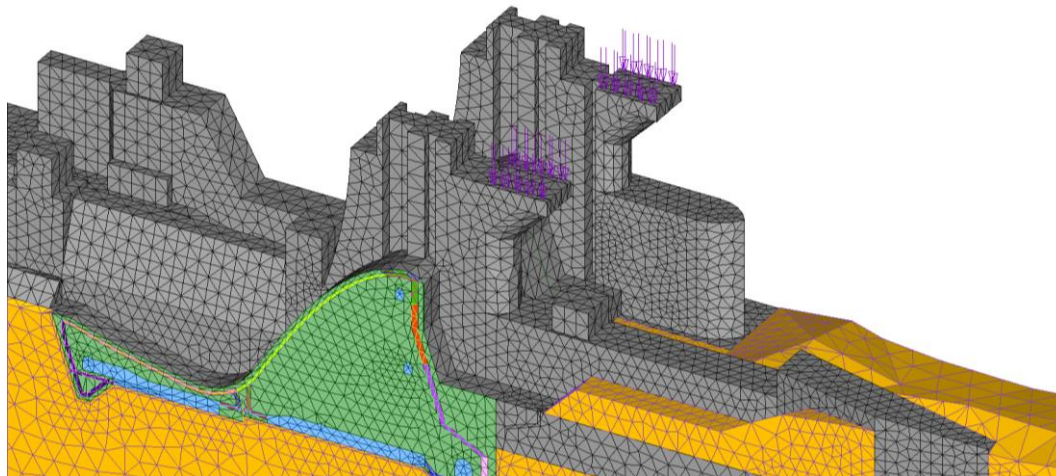
3.5.2 Оптерећење од моста

Са горње стране бране постоји и део конструкције (мост) који је ослоњен на непреливне делове ламела. Тежина челичног моста је узета у обзир задавањем притиска који одговара тежини моста, на површинама ламела на које је мост ослоњен. Зоне ослањања конструкције моста приказане су на слици 3.17.



Слика 3.17 Зоне ослањања конструкције моста и крана

Тежина друмског моста са припадајућом конструкцијом на једном пољу, односно стубу, износи 300t па се на ламеле са стубом на круни стуба задаје притисак који одговара датом оптерећењу од друмског моста.



Слика 3.18 Приказ задатог оптерећења моста

Израчунавање напона и померања услед сопствене тежине врши се у првом кораку, након чега се померања ресетују. Добијене вредности напона представљају почетно напонско стање за следеће кораке у којима се разматра утицај осталих оптерећења на брану.

3.5.3 Додатно оптерећење

У додатна оптерећења спада могуће оптерећење крана (сопствена тежина крана 200t + терет до 160 t) и додатно оптерећење на самом мосту. Како се одређује степен сигурности конструкције, на брану се задају највеће вредности оптерећења. Из тога разлога на означене површине задато је укупно оптерећење од 360t.

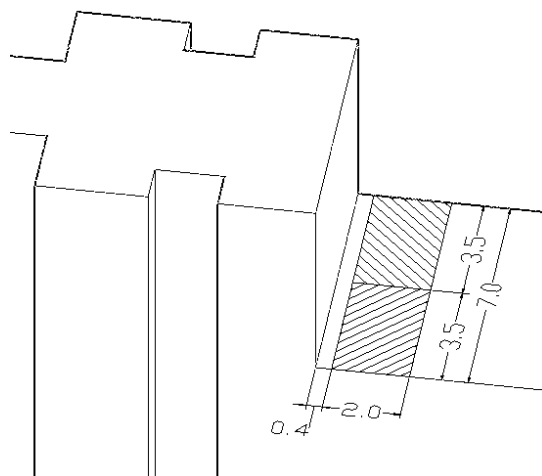
Са слике 3.17 види се да је кран ослоњен на две површине истог стуба (на узводном и низводним делу). Поменута додатна оптерећења су покретна, што се представља задавањем различитих интензитета оптерећења на дефинисаним површинама за задавање оптерећења. Сходно томе постоје три положаја која кран може заузети:

- положај 1: кран ближи Румунији,
- положај 2: кран у оси стуба и
- положај 3: кран ближи Србији

Положај 1 и 3 имају исту вредност оптерећења, само је у једном случају оптерећење на једној страни стуба ближе Румунији, а у другом случају ближе Србији. При овим положајима оптерећење делује као равномерно расподељено на површини 3,5x2 m².

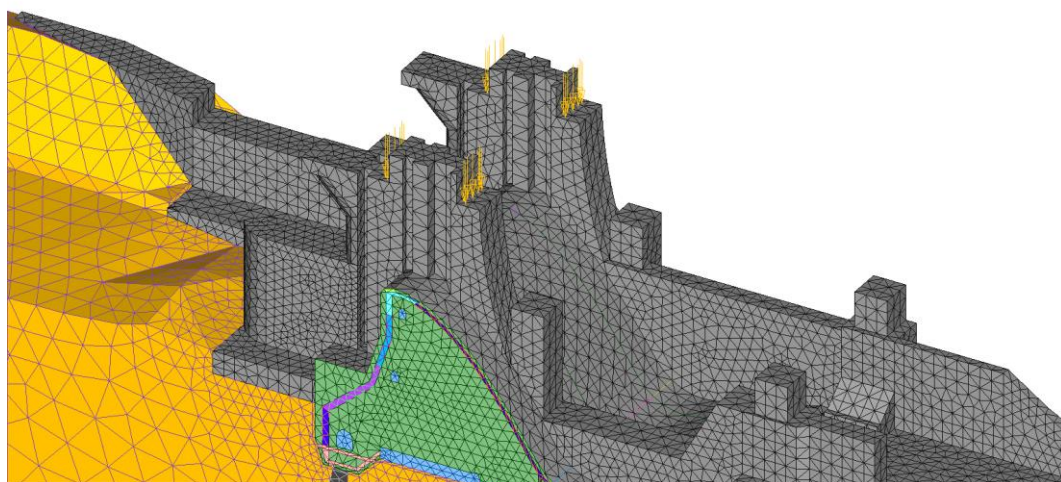
Положај 2 подразумева да се оптерећење од крана расподели равномерно на целој ширини стуба од 7,0x2 m², то је ситуација када оптерећење од крана делује у оси стуба.

Да би се обезбедили услови за задавање претходно дефинисаних положаја крана, површине ослањања крана на узводном и низводном делу стуба су подељени на два дела као што је приказана на слици 3.19.



Слика 3.19 Зоне ослањања конструкције крана (низводне кранске стазе)

На моделу је представљен кран у положају 2, што је постигнуто задавањем равномерног оптерећења на четири дефинисане површине ослањања (слика 3.20).



Слика 3.20 Приказ задатог оптерећења крана

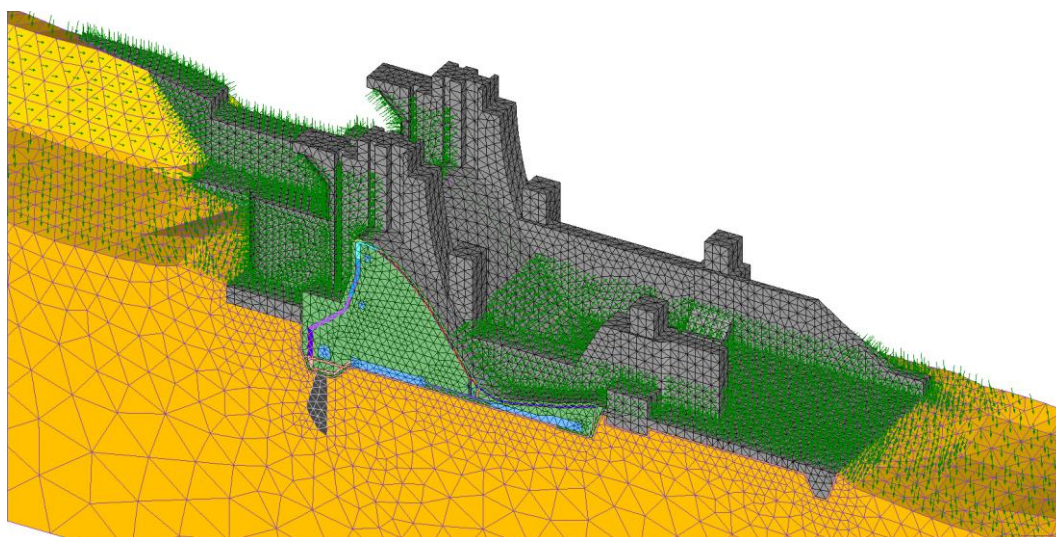
3.5.4 Хидростатички притисак

Деловање хидростатичког притиска, од утицаја горње и доње воде, задато је на све оквашене површине бране. Притисци су задати у тежиштима оквашених површина коначних елемента.

На основу измерених нивоа воде током досадашње експлоатације ХЕ Ђердап 1 и на основу пројектних случајева оптерећења, за прорачун су коришћене следеће вредности:

- Ниво воде у акумулацији:
 - $KGV_{max}=69,6\text{mnm}$
- Ниво доње воде:
 - $KDV_{min}=39,1\text{mnm}$

На слици 3.21 приказани су вектори задатог хидростатичког притиска на оквашеним површинама који представљају утицај воде у акумулацији и доње воде.



Слика 3.21 Приказ задатог хидростатичког притиска на МКЕ

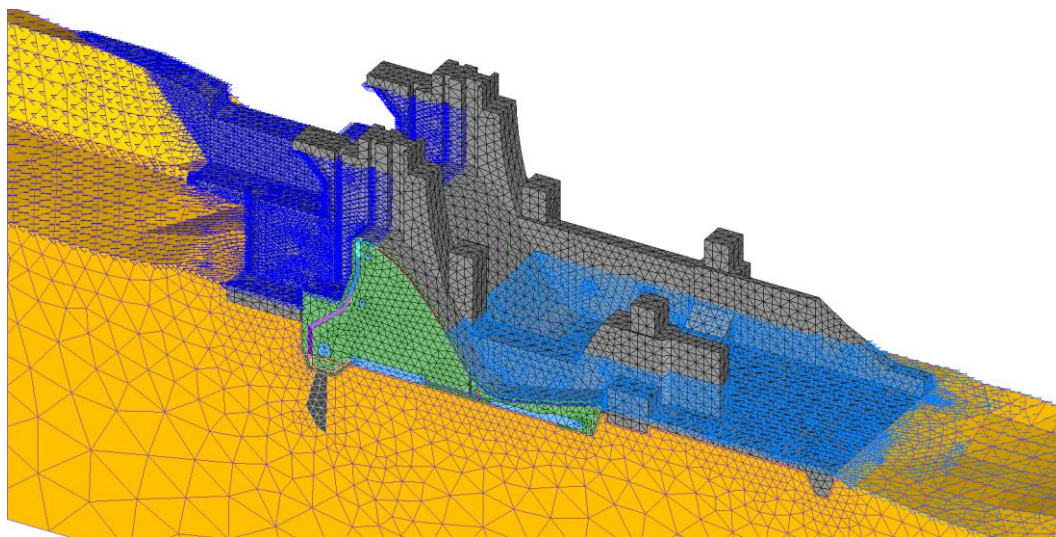
Поред директног притиска воде на оквашене делове бране, у обзир је узет и утицај воде која посредно, преко спуштених радних затварача, делује на стубове ламела. Расподела је површинска (троугаона) по површинама ослањања устава.

3.5.5 Филтрационе силе

Филтрационе силе настају као последица протицања воде кроз околну стенску масу и темељ бране. Ово протицање ствара узгонске силе које теже да издигну тело бране. Филтрациона слика у моделу се дефинише коефицијентима филтрације. Филтрационе силе постоје и унутар тела бране, али због малог протицања воде кроз бетон интензитети ових сила су веома мали.

Вредности филтрационих сила се одређују у прорачуну филтрације и користе се као оптерећења у прорачуну чврстоће бране.

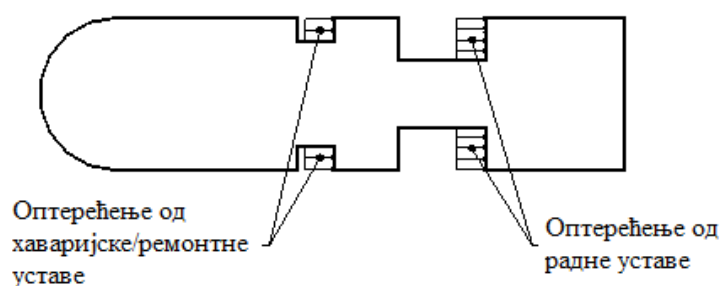
На слици 3.22 приказани су задати потенцијали. На узводном делу контуре модела који одговара површини терена или објекта испод коте горње воде у језеру (до радног затварача на преливу) задат је потенцијал који је једнак коти горње воде (плава боја), на низводном делу контуре модела који одговара површини терена или објекта испод коте доње воде, задат је потенцијал који је једнак коти доње воде (светло плава боја).



Слика 3.22 Задати потенцијали оквашених површина

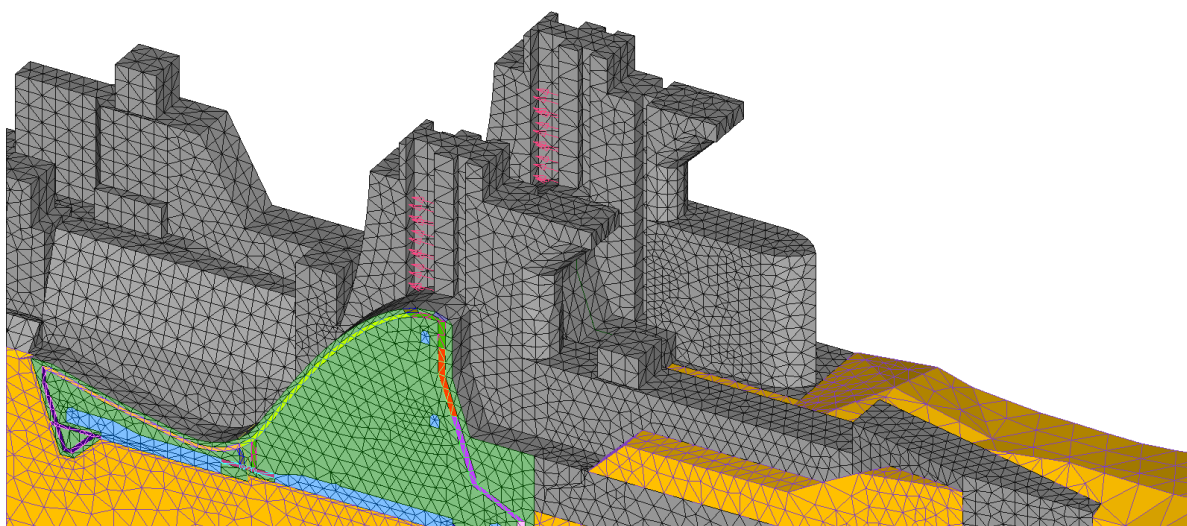
3.5.6 Оптерећење од притиска воде на уставе

Ниво воде у акумулацији се одржава уставима на преливним пољима (радним двоструко кукастим затварачима, који су монтирани у највећим нишама за уставе у стубовима). Уставе се не моделирају, али се оптерећење од воде узима у обзир тако што се целокупан хоризонтални притисак воде на уставу расподели подједнако на оба стуба на које се устава ослања (слика 3.23). Расподела је површинска (троугаона), по површинама ослањања устава.



Слика 3.23 Шематски приказ оптерећења од уставе

Ово оптерећење је задато преко притиска на елементима који се налазе на унутрашњој површини вођице. У моделу је посматран случај бране у нормалној експлоатације, па је спуштена радна устава, сходно чему су задати притисци на моделу (слика 3.24).



Слика 3.24 Приказ задатог оптерећења од уставе

3.5.7 Температурни утицај

Брана „Ђердап 1“ је масивна бетонска структура која је изложена сезонским променама температуре. Како температура има велики утицај на понашање целокупне конструкције неопходно је да утицај температуре буде узет у обзир приликом разматрање стабилности бране.

На моделу температура је задата по контури бетона ламеле, посебно за површине које су у контакту са ваздухом, водом и подлогом (слика 3.25). Расподела температуре по запремини тела бране одређује се на основу стационарне термичке анализе, према задатим температурама на површини ламеле. Добијена расподела се користи приликом структурне анализе како би се узео у обзир и утицај температуре на напонско-деформацијско стање бране.

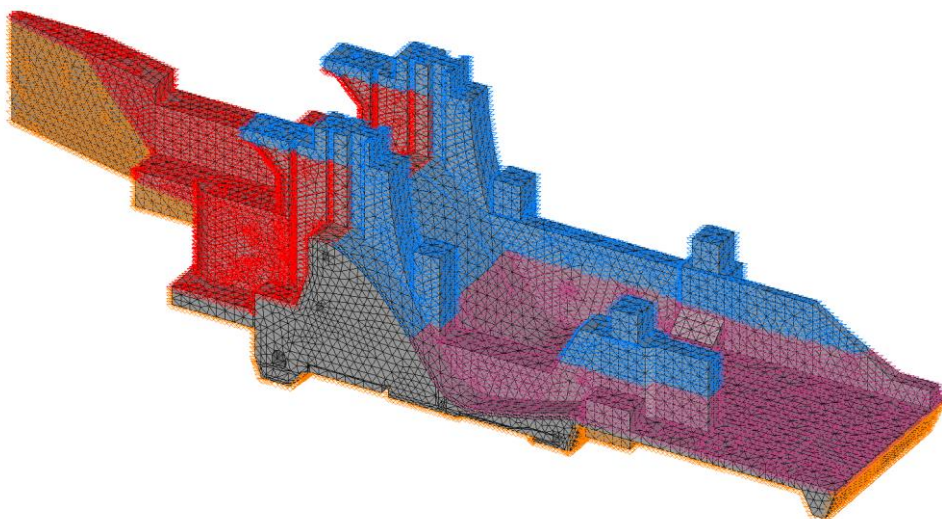
Деловима контуре који су изложени ваздуху задају се константне температуре у свим чворовима. За усвојени летњи режим температура ваздуха износи 28 °C.

Деловима контуре бетона који су под водом задаје се температура воде која се мења по дубини језера. Дата расподела температуре се формира за летњи режим на основу историјских мерења на датој локацији.

Распоред температура за летњи режим је следећи:

- на дну акумулације: 17 °C
- на коти 30 мнм: 19 °C
- на коти 40 мнм: 21 °C
- на коти 47 мнм: 22 °C
- на коти 54 мнм: 24 °C
- на коти 61 мнм: 25 °C
- на површини акумулације: 28 °C

За усвојен летњи режим температура стенске масе износи 17 °C.



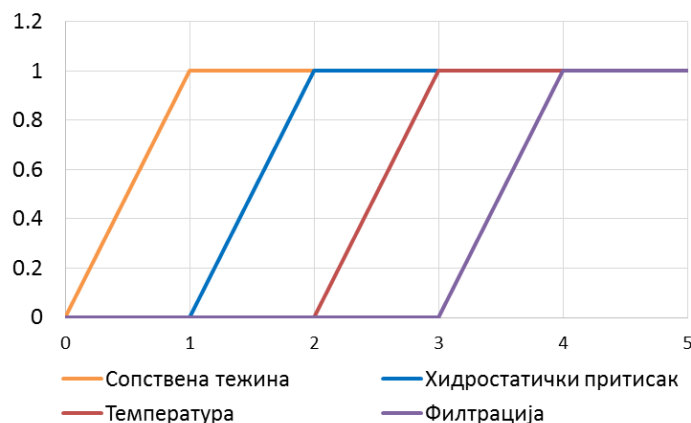
Слика 3.25 Приказ задатих температура на моделу

3.5.8 Фазе оптерећивања модела

Анализа бране се спроводи у четири корака, који су задати преко одговарајућих функција (слика 3.26) које постепено уводе оптерећење у модел осим у последњем кораку када се додаје утицај филтрационих сила.

У првом кораку се задаје оптерећење од сопствене тежине које делује у преостала три корака. Померања која настају услед сопствене тежине се ресетују у прорачуну након првог корака, тако да померања која се добију након другог корака су настала само услед оптерећења која делују у другом кораку, док се напони настали у првом кораку преносе у остале.

Хидростатички притисак се задаје постепено у другом кораку и траје и у трећем и четвртном. Дејство температуре се укључује у трећем кораку, а филтрационе силе се задају на почетку четвртог корака.



Слика 3.26 – Расподела фаза оптерећења

3.5.9 Границе модела

Границе модела су 200 m узводно од осе бране, 200 m низводно од осе бране. Најнижа кота модела је на -40 тнм, доња коте тела бране је на 19 тнм док је горња кота, уједно и највиша тачка на моделу, на 75,6 тнм. Висина стенског дела на моделу износи 49m од дна до тела бране односно 78m до слободне површине модела која представља корито реке.

Димензије модела су изабране како би се минимизирао односно елиминисао утицај ограничења по границама модела на резултате прорачуна.

3.5.10 Гранични услови

У анализи напонско-деформационих процеса, гранични услови су дати по померањима на границама модела.

Задати гранични услови су:

- Услов симетрије вертикалних страница
- Фиксирање хоризонталне површине дна модела

На вертикалним површинама ламеле, које представљају границе између домена ламела које нису моделиране задати су услови симетрије. Чворовима који припадају овим површинама, спречено је померање у управном правцу док је дозвољено померање у равни.

Најнижа површина модела, у приказаној оријентацији, представља дно модела и чворовима који припадају тој површини спречена су померања у сва три правца. Чворови у стенској маси на границама између ламела које су моделиране су спојени. На овај начине се стенске масе три ламеле повезују како би се обезбедило преношење оптерећења и деформација.

3.6. Усвајање материјалних модела и параметара материјала

За моделирање понашања бетона коришћен је Хук-Браунов материјални модел. Коришћени параметри при прорачуну за овај материјални модела приказани су у табели 3.1.

У анализираном моделу нису узети у обзир механички дисконтинуитети стенске масе (раседи) ни зоне стене са различитим материјалним карактеристикама. Моделирана стенска маса посматрана као хомогена и њено понашање је моделирано Мор-Кулоновим материјалним моделом чији параметри су приказани су у табели 3.1. Овај материјални модел коришћен је и за моделирање инјекционе завесе испод бране.

Табела 3.1 Вредности параметра модела за напонско-деформацијску анализу

Мор-Кулонов материјални модел						
Средина	Модул ел. [kPa]	Поасовнов коэффициент	Спец. тежина [kN/m ³]	Кохезија [kPa]	Угао унутр. трења [°]	Угао дилатације [°]
Стенска маса	3.5e6	0.3	26.0	200.0	5.71	5.71
Инјекц. завеса	3.5e6	0.3	26.0	200.0	5.71	5.71
Хук-Браунов материјални модел						
Средина	Модул ел. [kPa]	Поасовнов коэффициент	Спец. тежина [kN/m ³]	Хук- Браунова к. σ_{ci} [kPa]	Хук- Браунова к. m_i	Хук- Браунова к. s
Брана	32e6	0.142	24.0	4.5e3	3.082	5.37e-2

Анкери су направљени од челика, коришћена вредност модула еластичности је 2,1e5 МПа и Поасовнов коэффициент 0,3.

Коришћени коефицијенти филтрације материјала при филтрационој анализи приказани су у табели 3.2.

Табела 3.2 Карактеристике материјала у филтрационим прорачунима

Средина	Коефицијент филтрације k [m/s]
Стенска маса	1e-8
Инјекциона завеса	1e-9
Брана	1e-14
Фугенбанди	1e-15
Дилатациони зазори	1
Дренажни канали	1

Приказани параметри материјалних модела и коефицијената филтрације коришћени за пропрачуна добијени су од Института за водопривреду Јарослав Черни.

4. Приказ и дискусија резултата

4.1. Резултати филтрационих прорачуна

На основу извршене филтрационе анализе добијена су поља потенцијала, притиска воде, дубине воде, брзине струјања и филтрационих сила.

На следећим сликама је дат приказ резултата филтрационих прорачуна при нормалном раду система за дренажу при најнепогоднијој комбинацији коте горње и доње воде. За коту горње воде узета је највећа дозвољена вредност нивоа воде у акумулацији, а кота доње воде је једнака минималној радној вредности.

Филтрационе анализе су урађене за случај:

- Стационарно струјање при КГВ = 69,6 тнм и КДВ = 39,1 тнм

На сликама су приказане:

- дубине воде,
- поља потенцијала,
- узгонски притисци и
- брзине филтрације.

Резултати прорачуна приказани су у вертикалиним пресецима. За случај ламела са стубом приказани су следећи пресеци:

- Пресек 1 - кроз осу стуба (ламеле) - ознака „број ламеле - оса ламеле“
- Пресек 2 - 2 m од контуре стуба ка Србији - ознака „број ламеле-S“
- Пресек 3 - 2 m десно од контуре стуба ка Румунији - ознака „број ламеле-R“

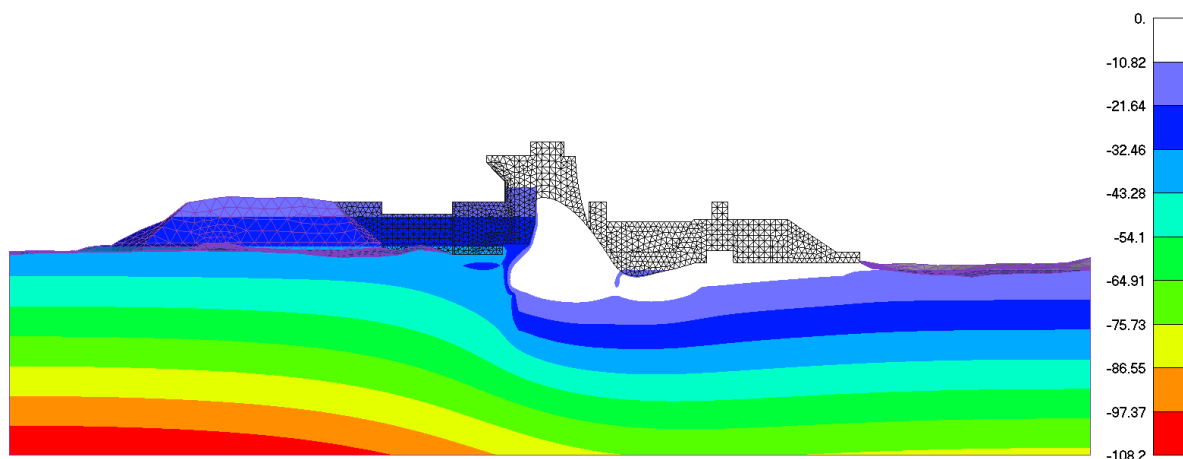
У случају ламела без стуба приказан је само пресек кроз осу ламела

- ознака „број ламеле - оса ламеле“

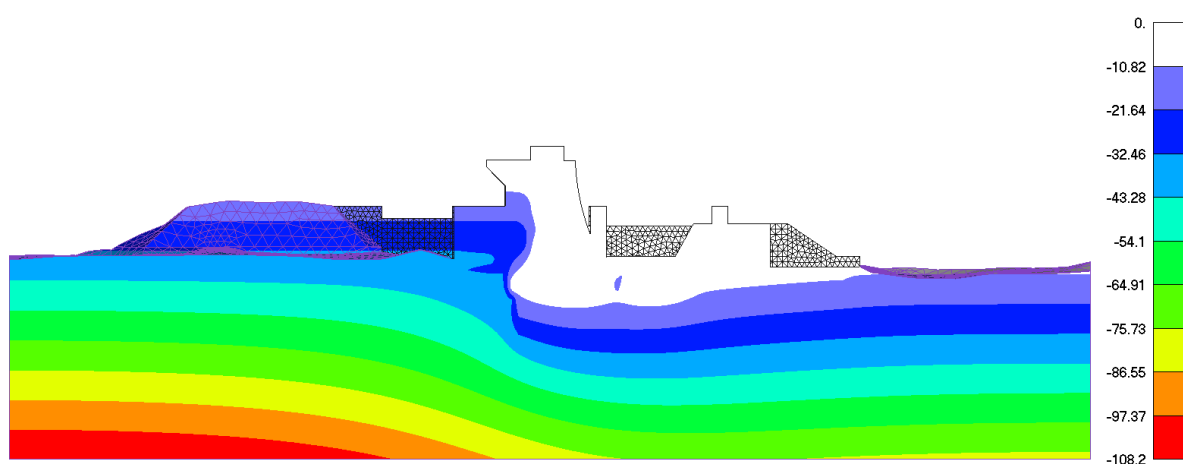
На сликама 4.1-4.7 приказано је поље расподеле дубине воде у метрима при максималној коти горње воде 69,6 и минималној коти доње воде 39,1 тнм при радним условима бране за летњи режим.

На основу слика 4.8-4.14 може се видети утицај инјекционе завесе на поље потенцијала испод бране.

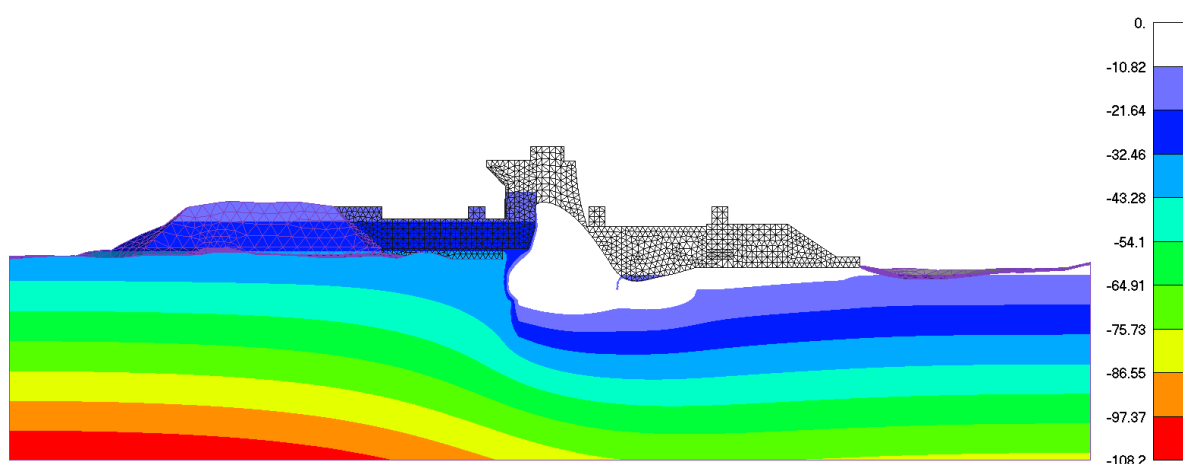
На сликама 4.15-4.21 приказана је расподела узгонског притиска на моделу за дефинисане пресеке.



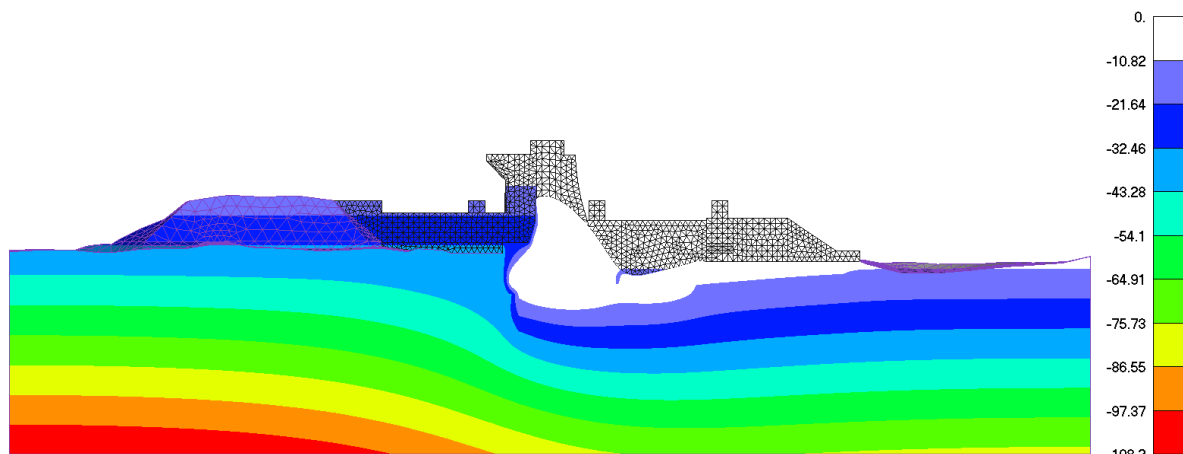
Слика 4.1 Дубина воде [m] при КГВ_{тах}/КДВ_{min} = 69,6/39,1 тнм пресек L4 – S



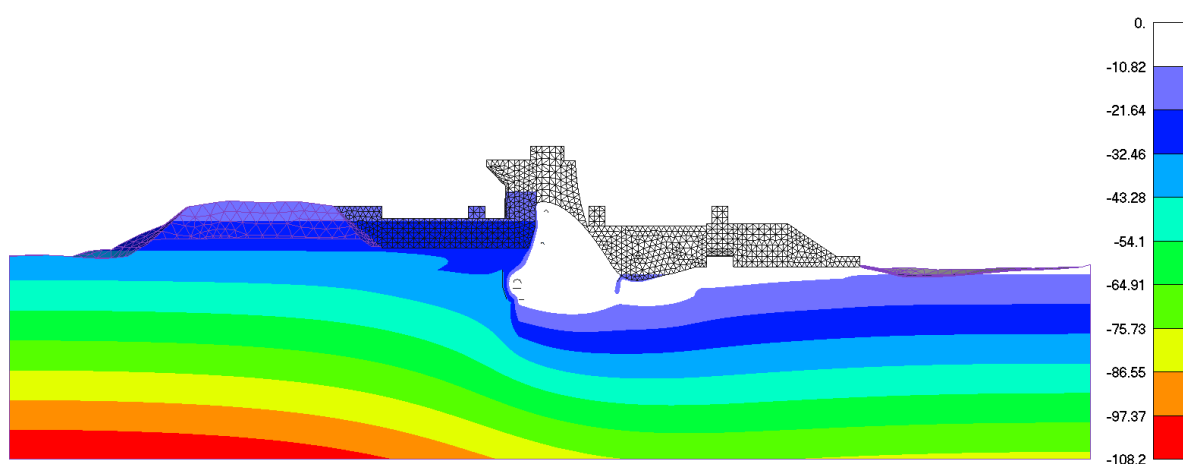
Слика 4.2 Дубина воде [m] при КГВ_{тах}/КДВ_{min} = 69,6/39,1 тнм пресек L4 – O



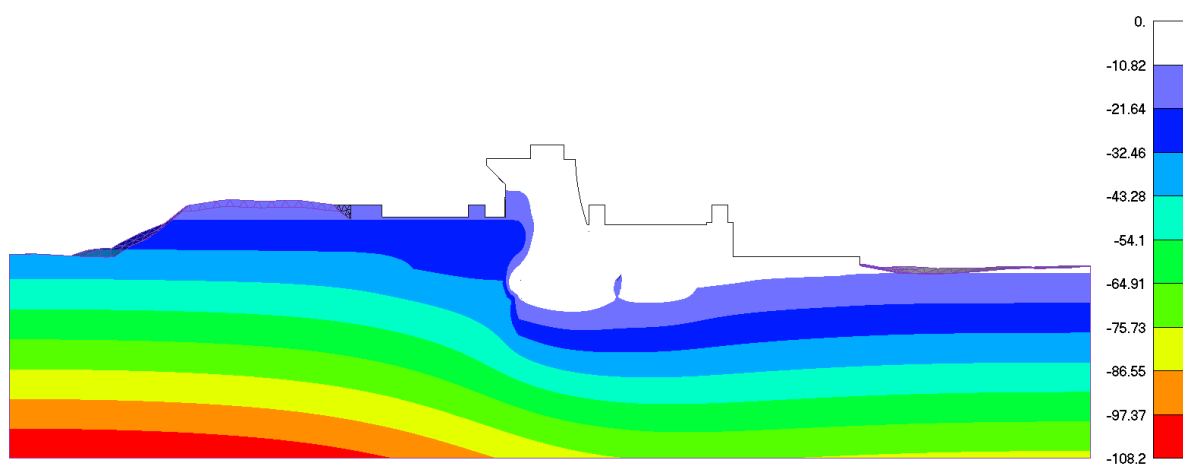
Слика 4.3 Дубина воде [m] при КГВ_{тах}/КДВ_{min} = 69,6/39,1 тнм пресек L4 – R



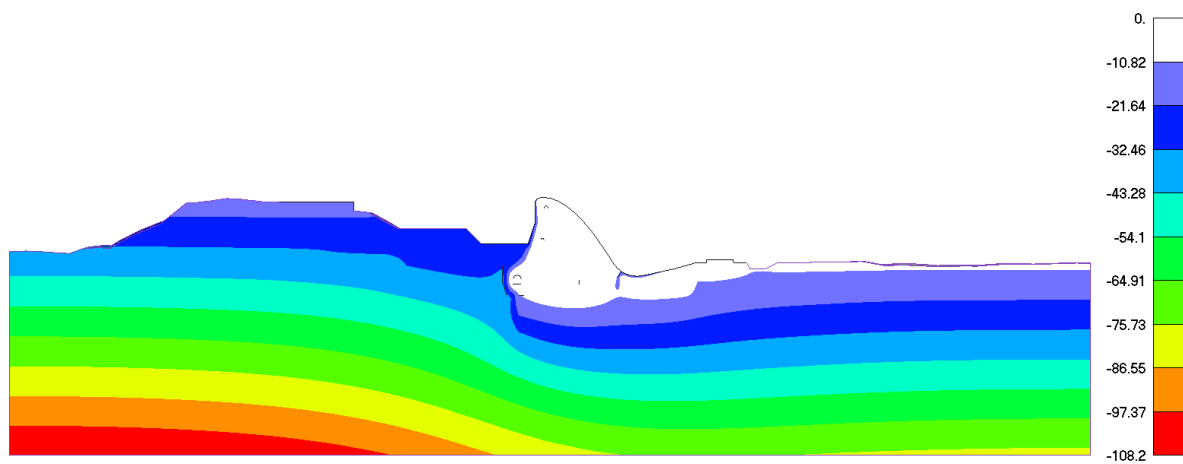
Слика 4.4 Дубина воде [m] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



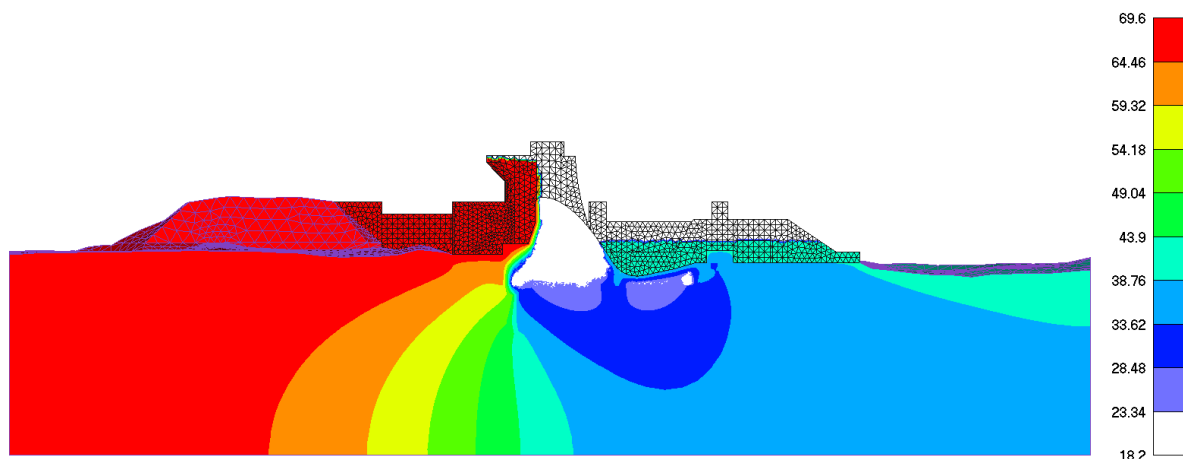
Слика 4.5 Дубина воде [m] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – S



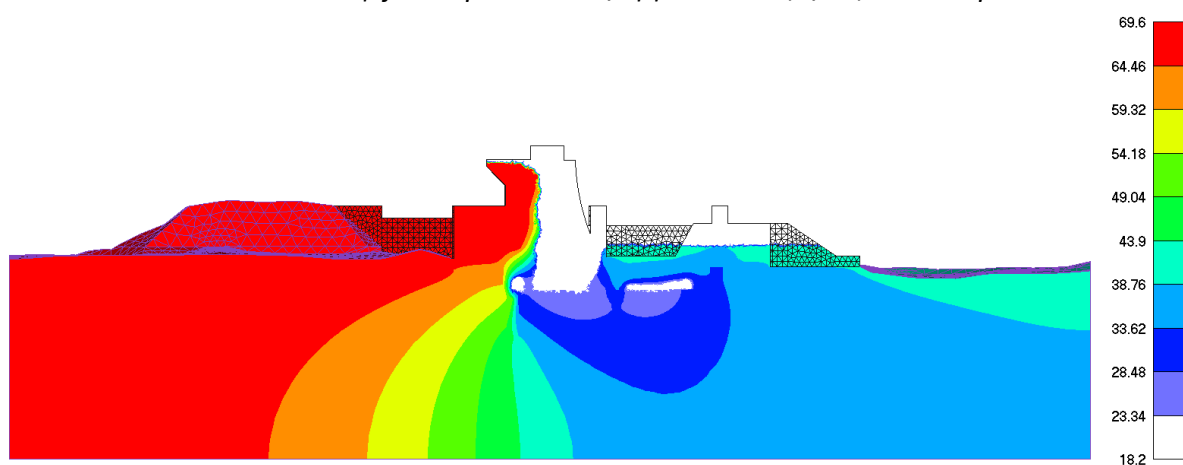
Слика 4.6 Дубина воде [m] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



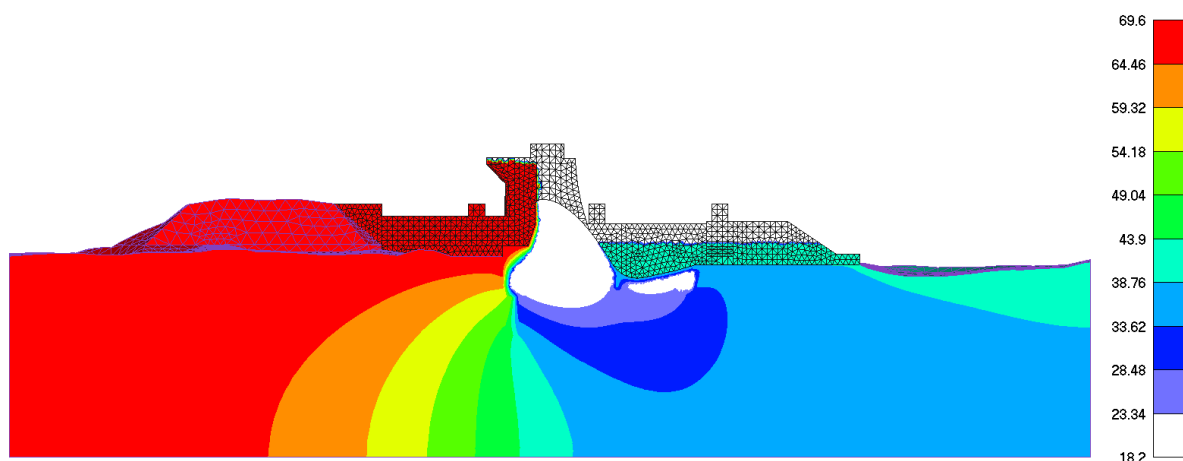
Слика 4.7 Дубина воде [m] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – R



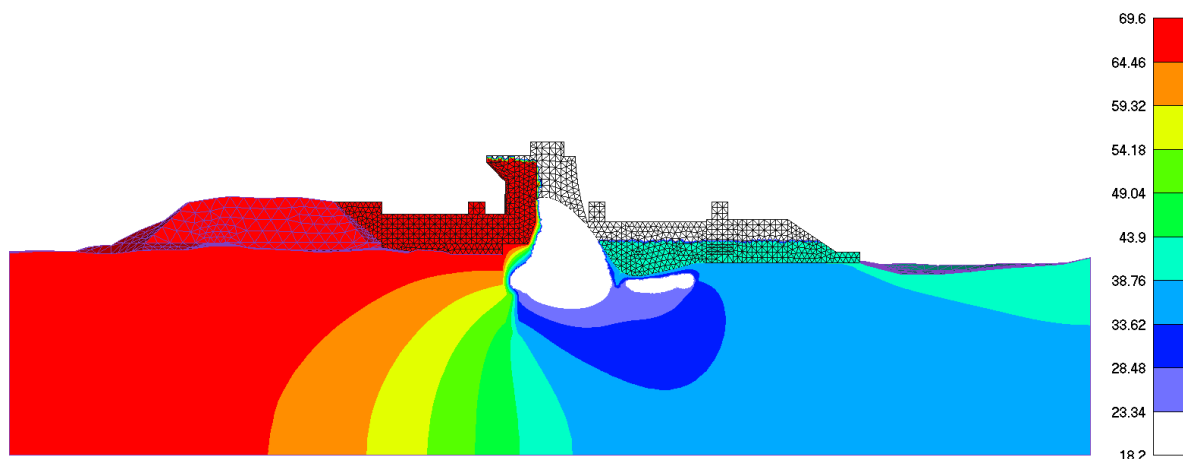
Слика 4.8 Поље потенцијала при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – S



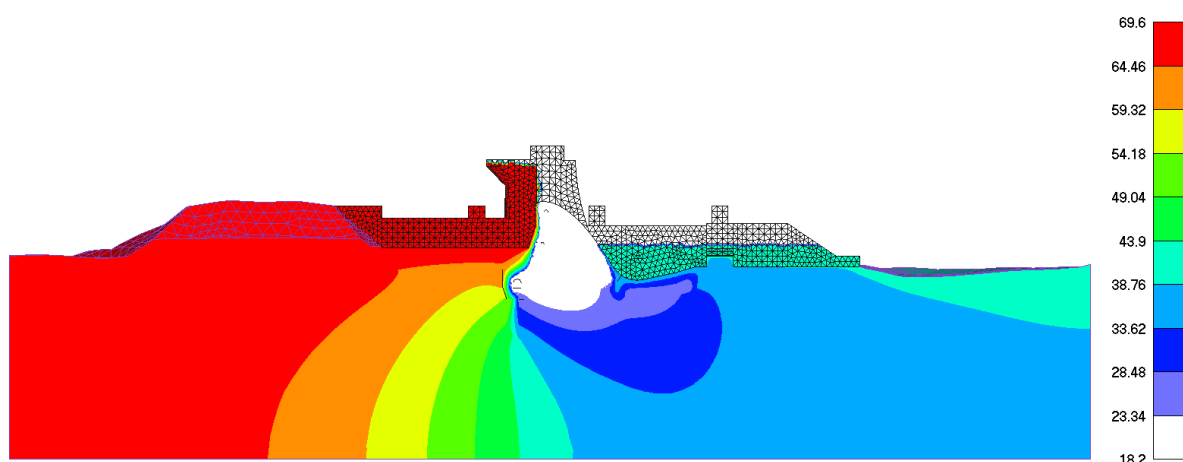
Слика 4.9 Поље потенцијала при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



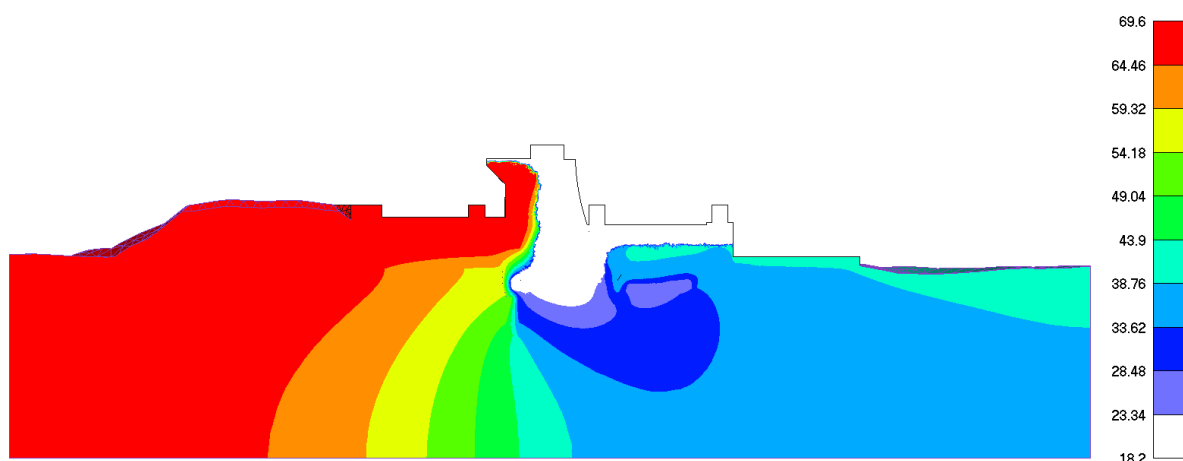
Слика 4.10 Поље потенцијала при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – R



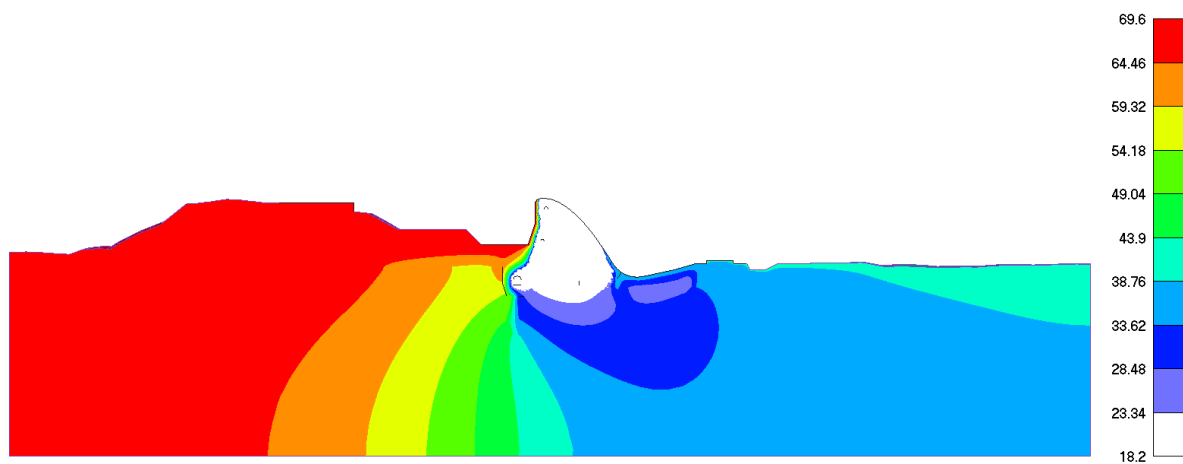
Слика 4.11 Поље потенцијала при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



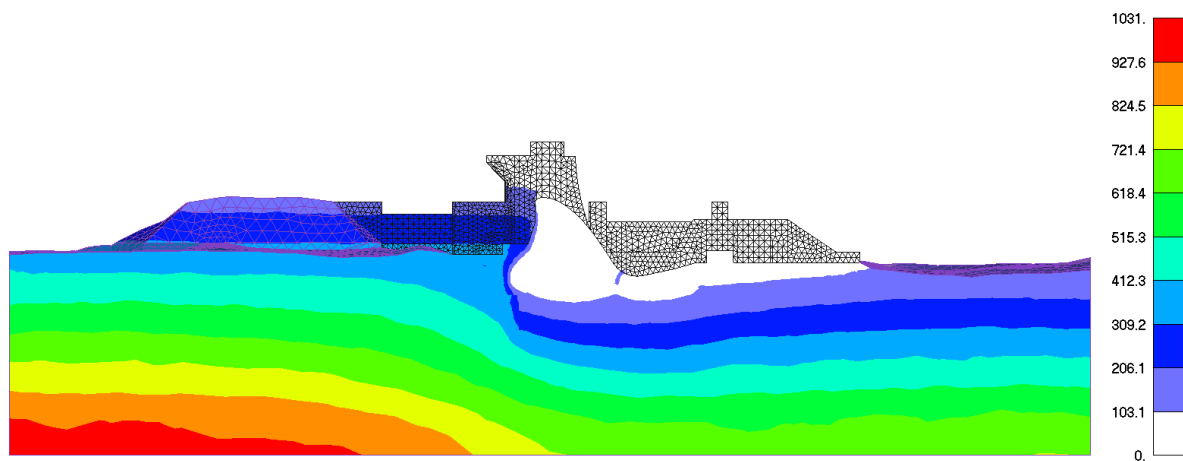
Слика 4.12 Поље потенцијала при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм у случају пресек L6 – S



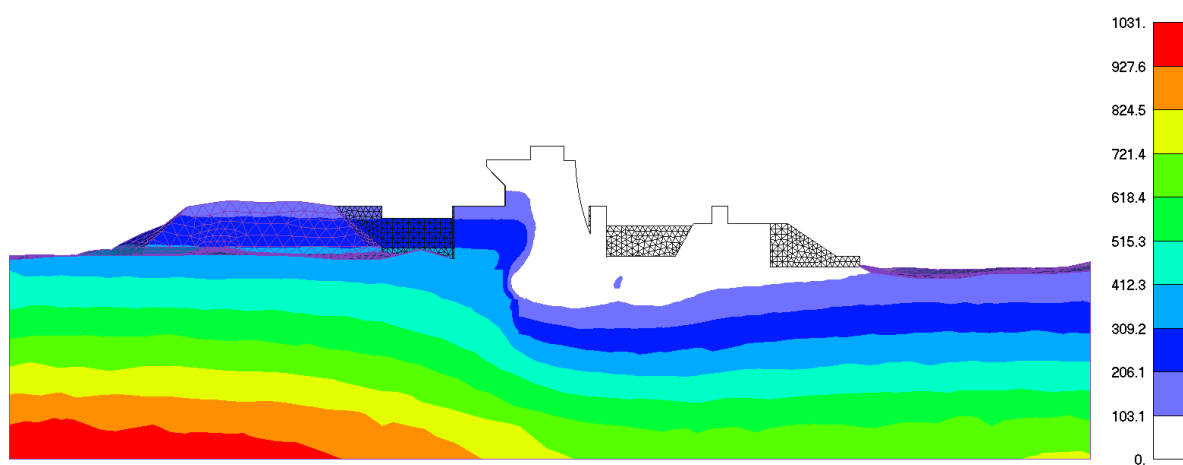
Слика 4.13 Поље потенцијала при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



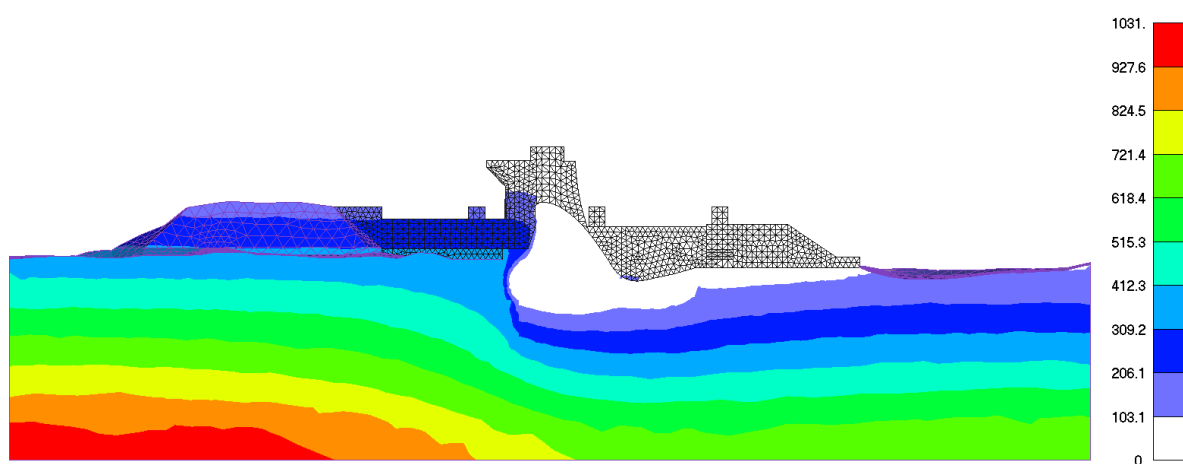
Слика 4.14 Поље потенцијала при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – R



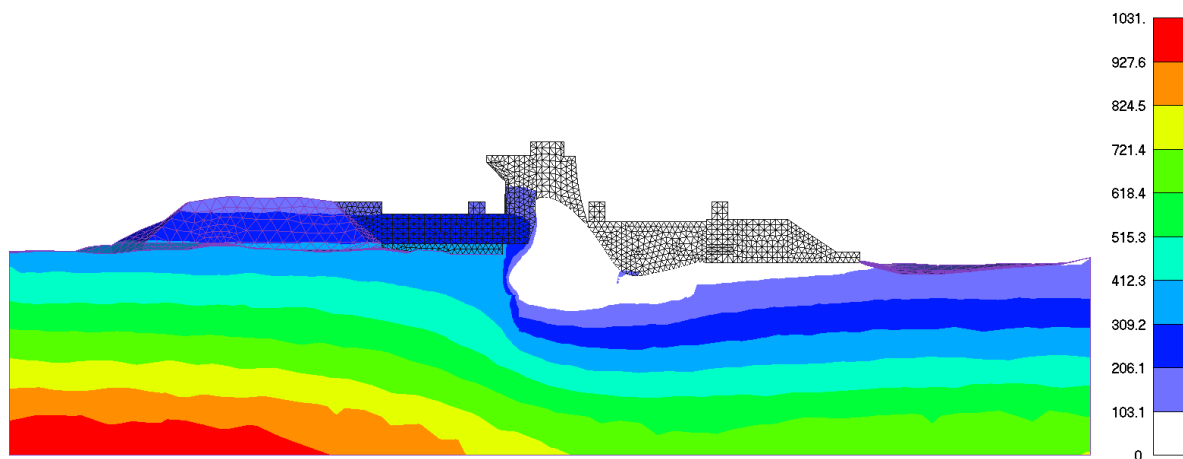
Слика 4.15 Узгонски притисак [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – S



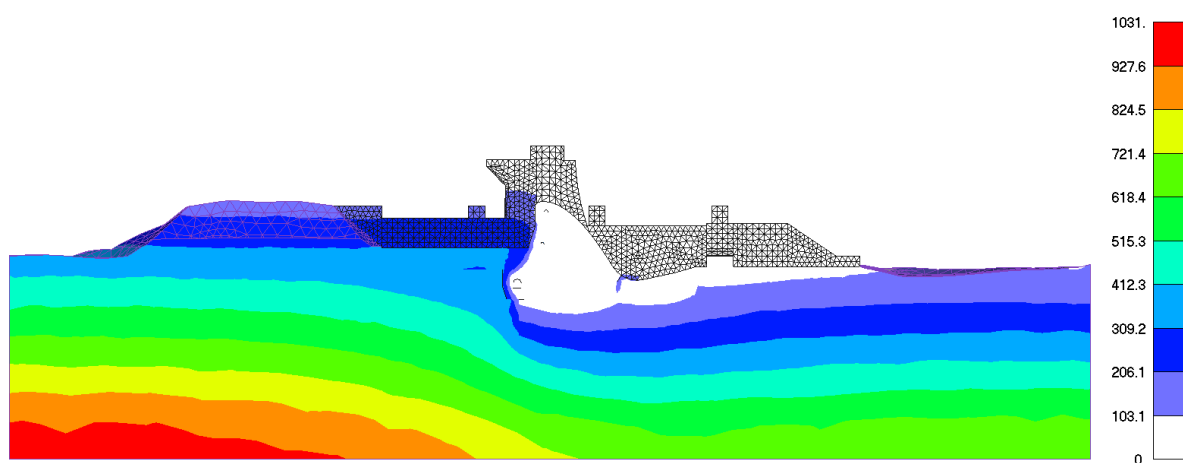
Слика 4.16 Узгонски притисак [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



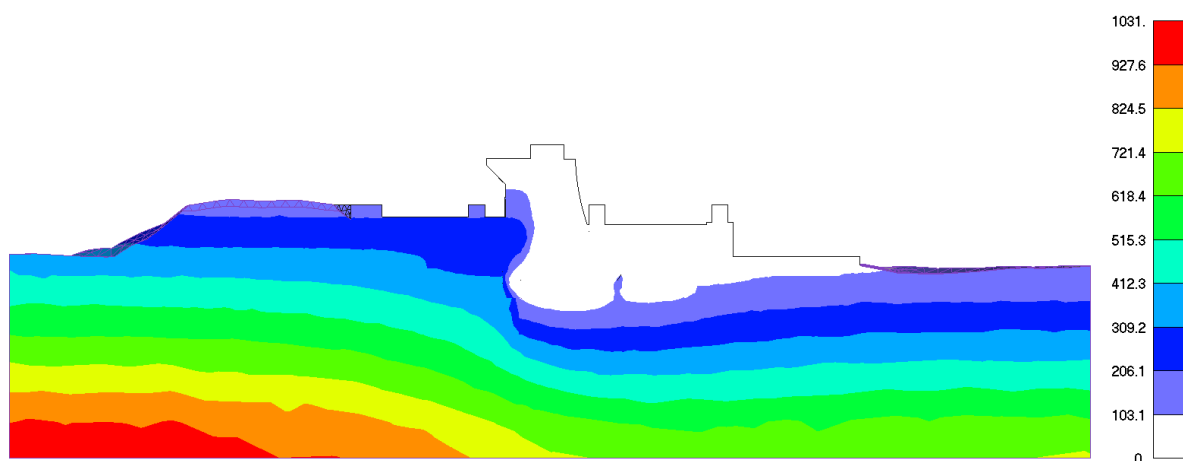
Слика 4.17 Узгонски притисак [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – R



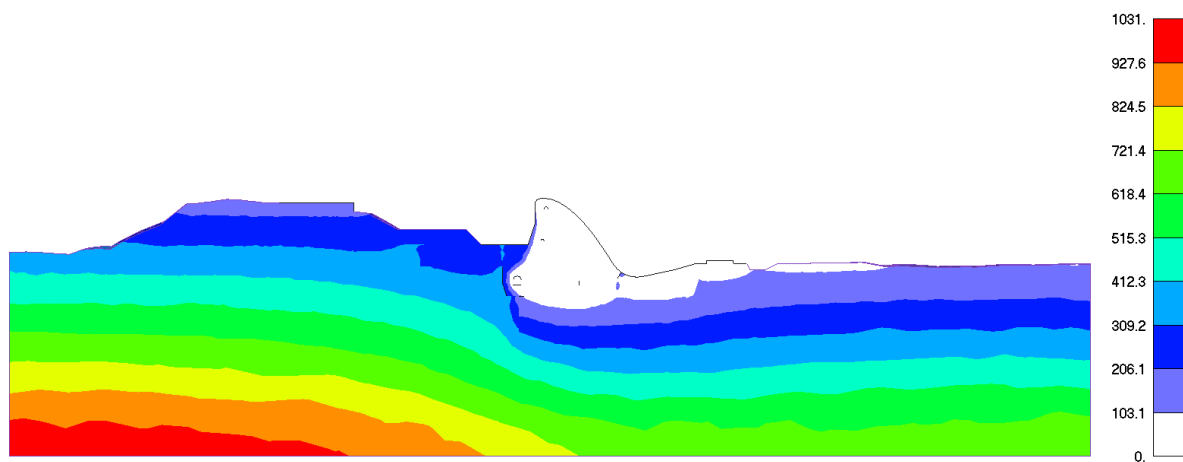
Слика 4.18 Узгонски притисак [kPa] при КГВ_{тах}/КДВ_{тн} = 69,6/39,1 тнм пресек L5 – O



Слика 4.19 Узгонски притисак [kPa] при КГВ_{тах}/КДВ_{тн} = 69,6/39,1 тнм пресек L6 – S



Слика 4.20 Узгонски притисак [kPa] при КГВ_{тах}/КДВ_{тн} = 69,6/39,1 тнм пресек L6 – O



Слика 4.21 Узгонски притисак [kPa] при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – R

4.2. Резултати напонско деформационих прорачуна

За разматрани прорачунски случај, као резултат добија се просторно поље померања и напона. На следећим сликама је дат приказ резултата напонско-деформацијских прорачуна при КГВ = 69.6 тнм и КДВ = 39.1 тнм, у летњем режиму за случај када је спречен проток воде кроз дилатационе спојнице (фугенбанди су у функцији) и при продору воде кроз спојнице између тела бране и слапишта, за три моделиране ламеле.

При напонско-деформационој анализи користе се филтрационе силе добијене прорачуном филтрације.

Резултати прорачуна приказани су у вертикалиним пресецима. За случај ламела са стубом приказани су следећи пресеци:

- Пресек 1 - кроз осу стуба (ламеле) - ознака „број ламеле - оса ламеле“
- Пресек 2 - 2 m од контуре стуба ка Србији - ознака „број ламеле-S“
- Пресек 3 - 2 m десно од контуре стуба ка Румунији - ознака „број ламеле-R“

У случају ламела без стуба приказан је само пресек кроз осу ламела

- ознака „број ламеле - оса ламеле“

Као резултати прорачуна у дефинисаним пресецима приказана су поља следећих величина:

- радијалних померања на сликама 4.24 – 4.26,
- тангенцијалних померања на сликама 4.27 – 4.29,
- вертикалних померања на сликама 4.30 – 4.32,
- укупних померања на сликама 4.33 – 4.35,
- радијалних напона на сликама 4.36 – 4.42и
- вертикалних напона на сликама 4.43 – 4.49

Вредности померања ламела дати су само у пресецима по оси бране јер се одговарајуће вредности незнатно разликују за дефинисане пресеке 2 m од граница ламела са стубом. У табели 4.1 приказане су максималне вредности компонената померања као и укупног померања.

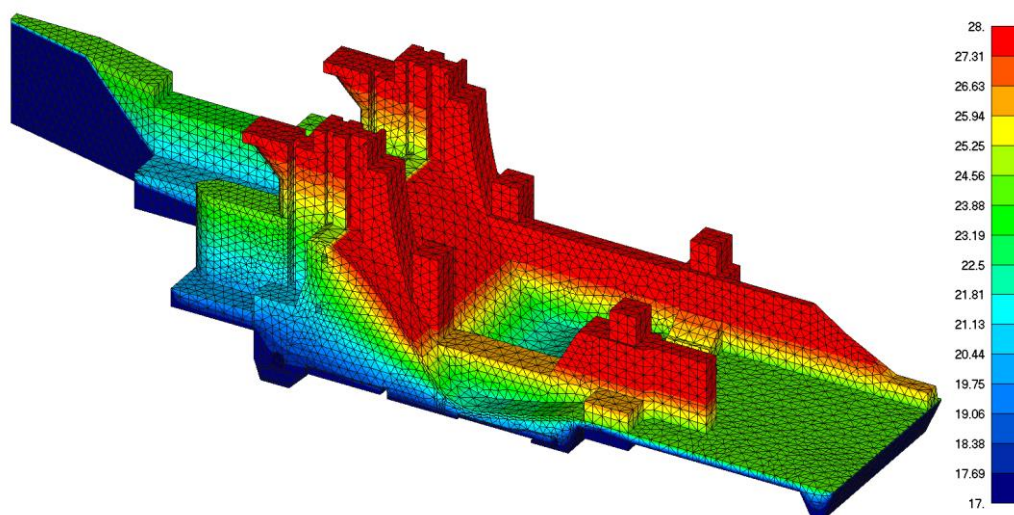
Табела 4.1 Табеларни приказ максимални вредности померања

Врста померања	Померање [mm]
радијална померања	15,4
тангенцијална померања	7,5
вертикална померања	16,7
укупна померања	19,6

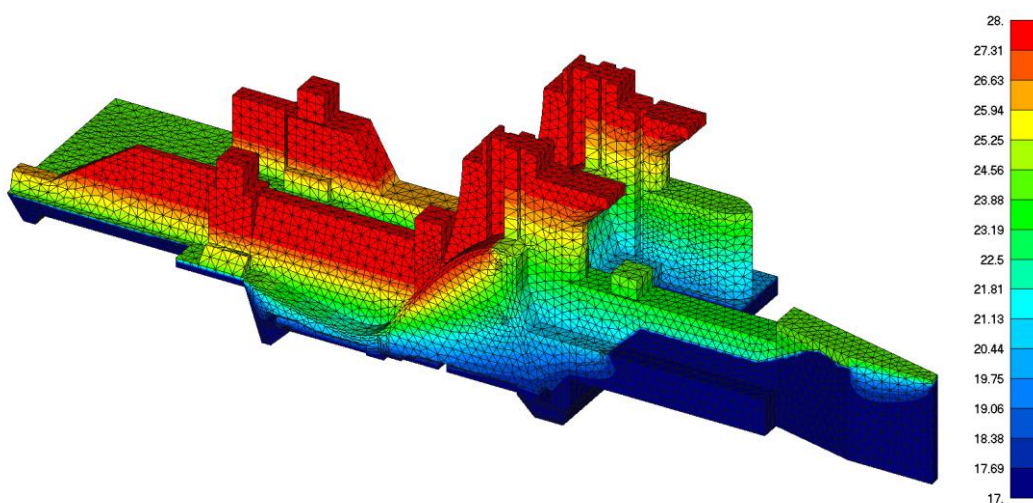
Из приказаних резултата може се видети да се највећа померања на ламели јављају на круни бране и разделом зиду у слапишту бране.

Температурна расподела по запремини бетонског дела модела добијена на основу стационарне термичке анализе приказана је на сликама 4.22 и 4.23. Са слика се могу јасно видети контурни услови задати на површинама у контакту са стеном и површине ламела које нису оквашене.

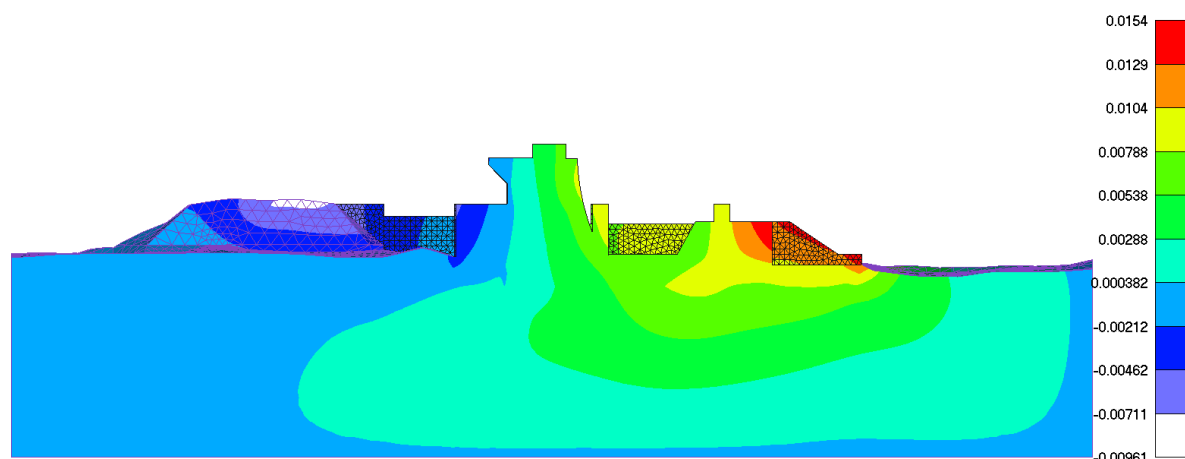
Температуре оквашених површина задате су преко једначина које су функција дубине воде, са слика можемо потврдити да температура ових површина опада са порастом дубине воде.



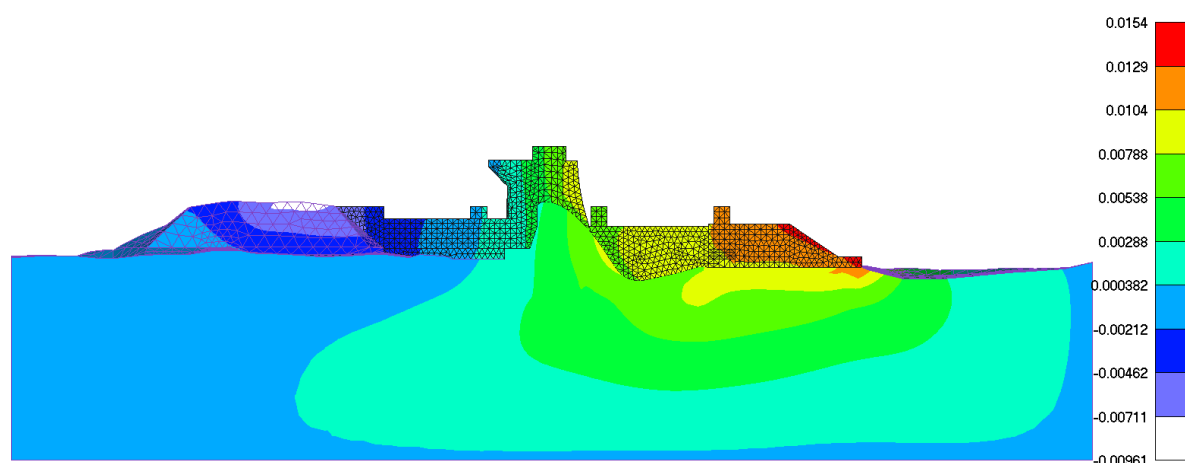
Слика 4.22 Расподела температуре на моделу, поглед са српске стране



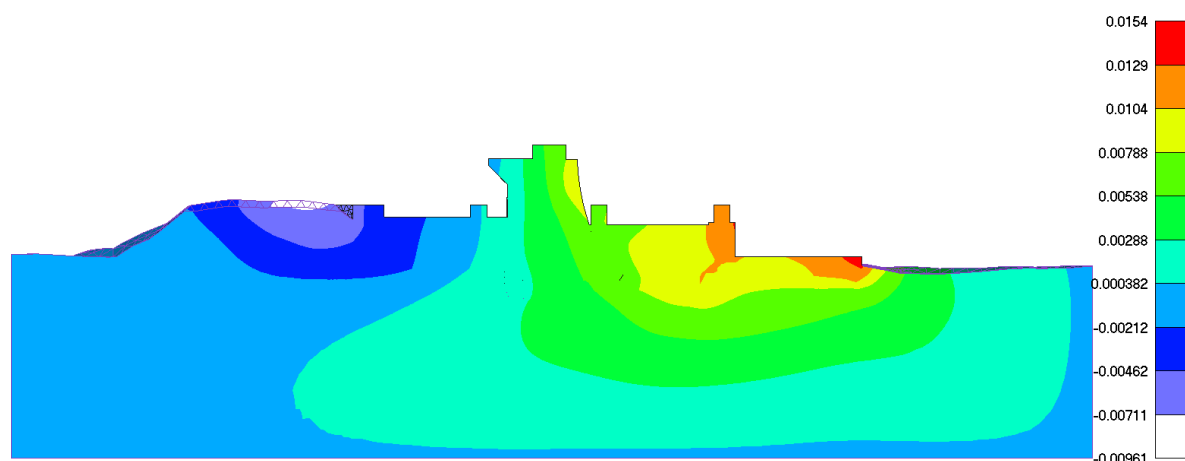
Слика 4.23 Расподела температуре на моделу, поглед са румунске стране



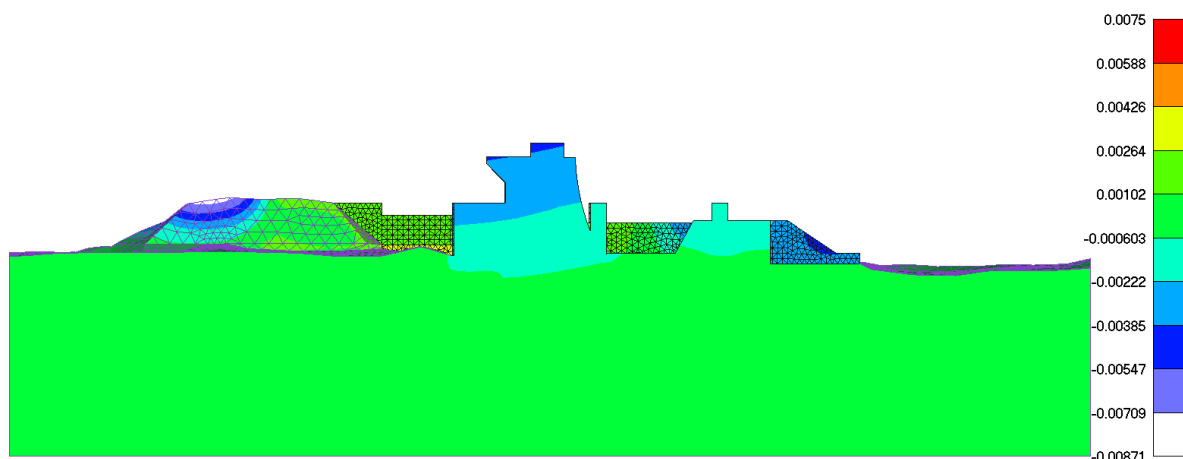
Слика 4.24 Поље радиалних померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



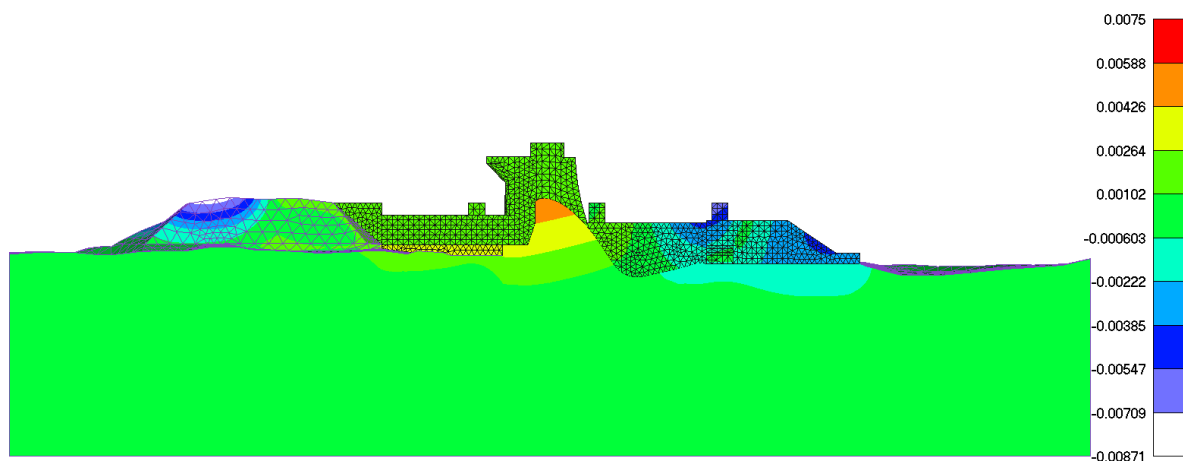
Слика 4.25 Поље радиалних померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



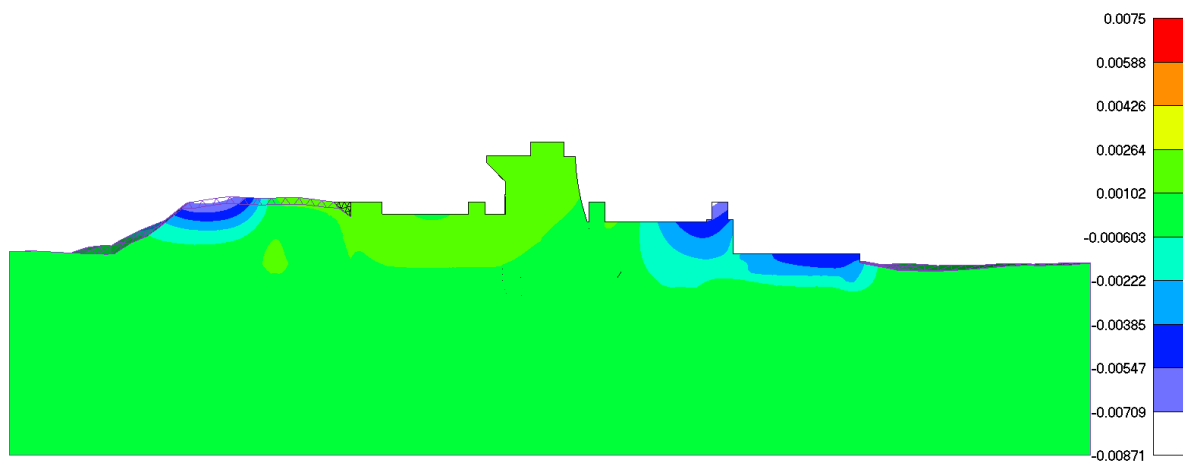
Слика 4.26 Поље радиалних померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



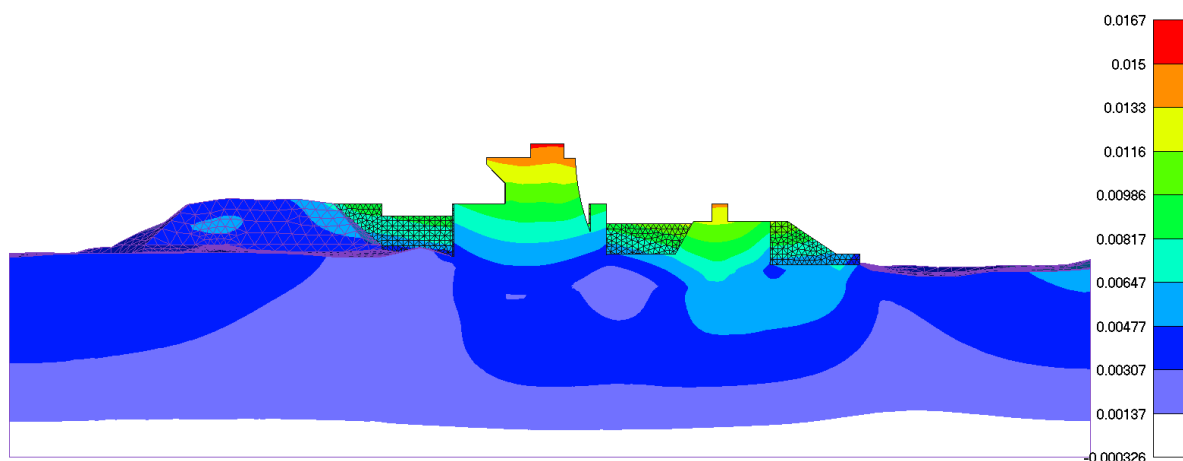
Слика 4.27 Поље тангенционалних померања [mm] при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



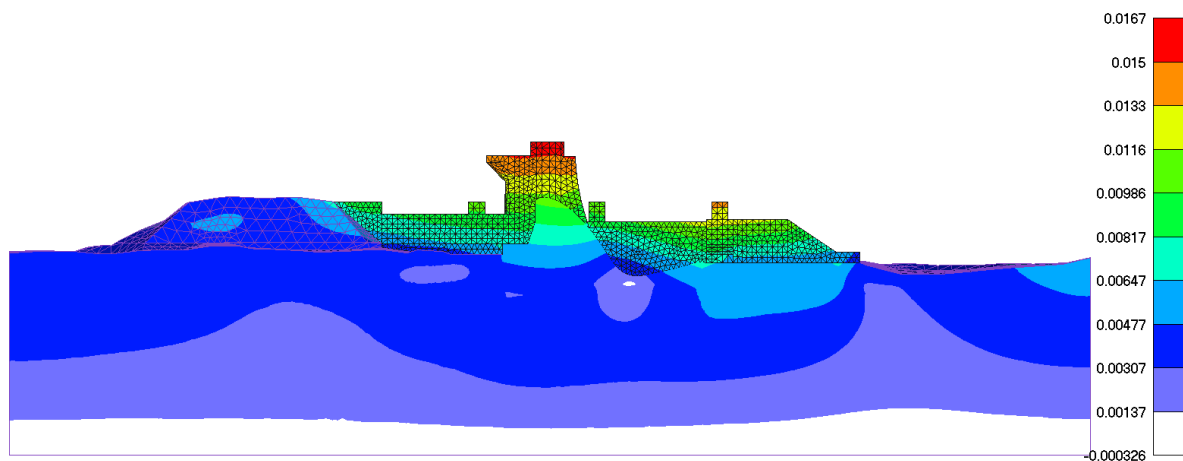
Слика 4.28 Поље тангенционалних померања [mm] при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



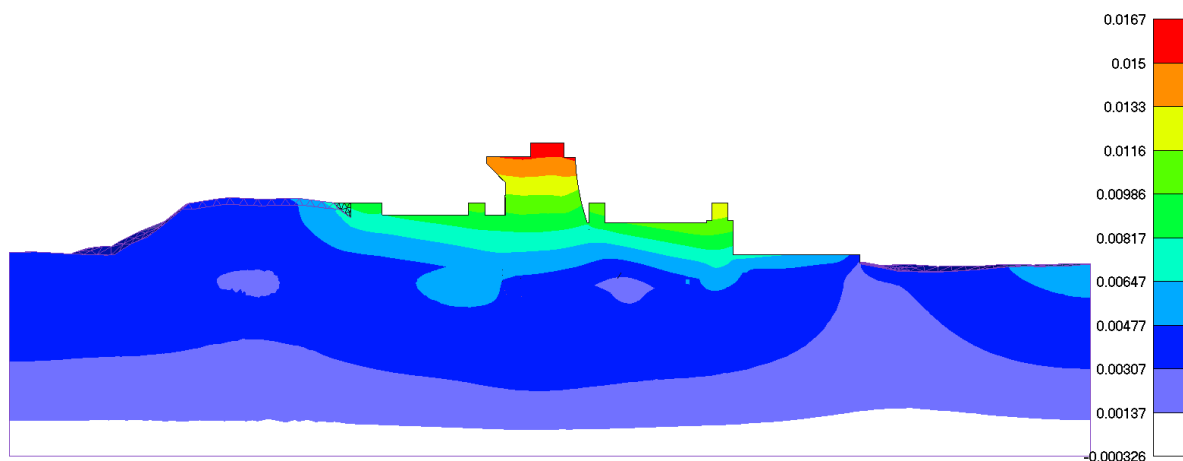
Слика 4.29 Поље тангенционалних померања [mm] при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



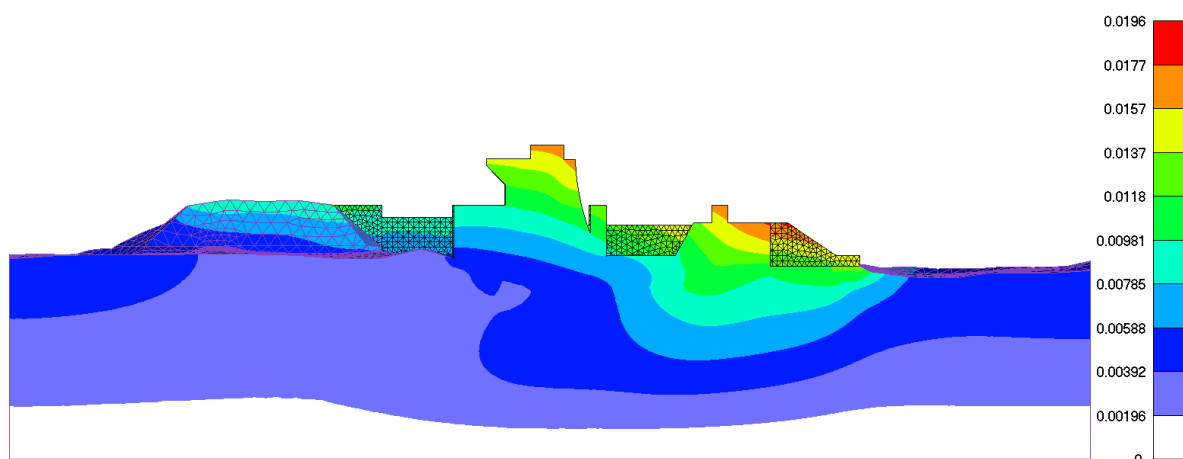
Слика 4.30 Поље вертикалних померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



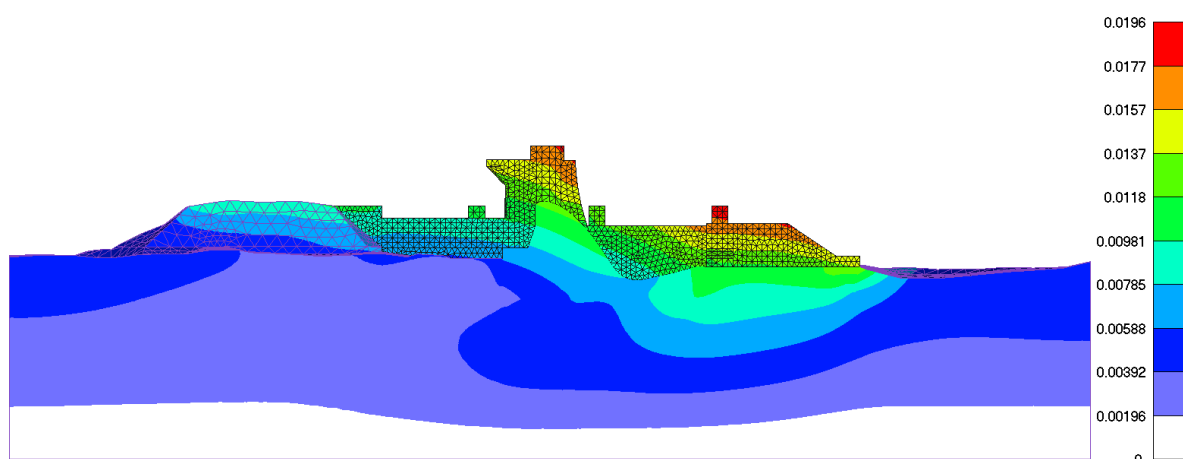
Слика 4.31 Поље вертикалних померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



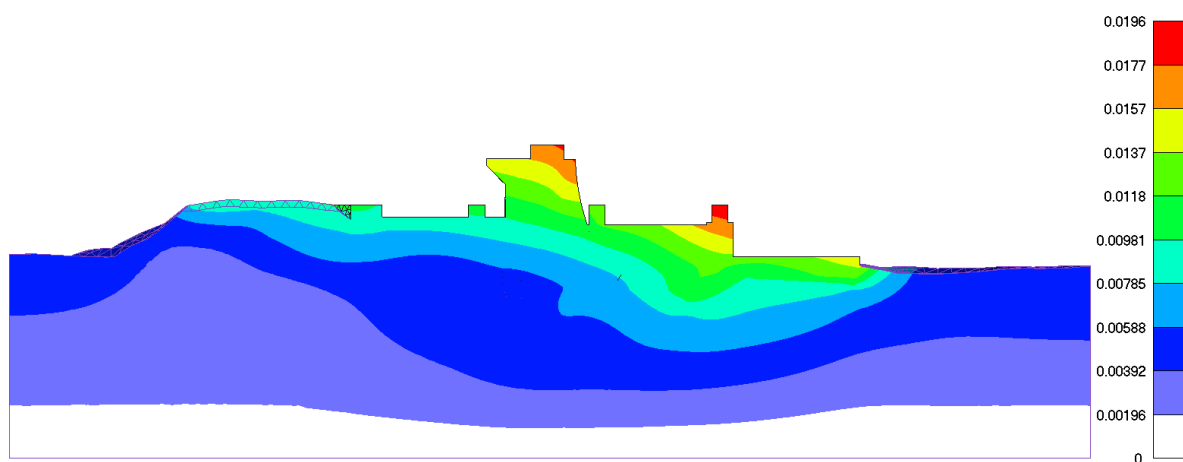
Слика 4.32 Поље вертикалних померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



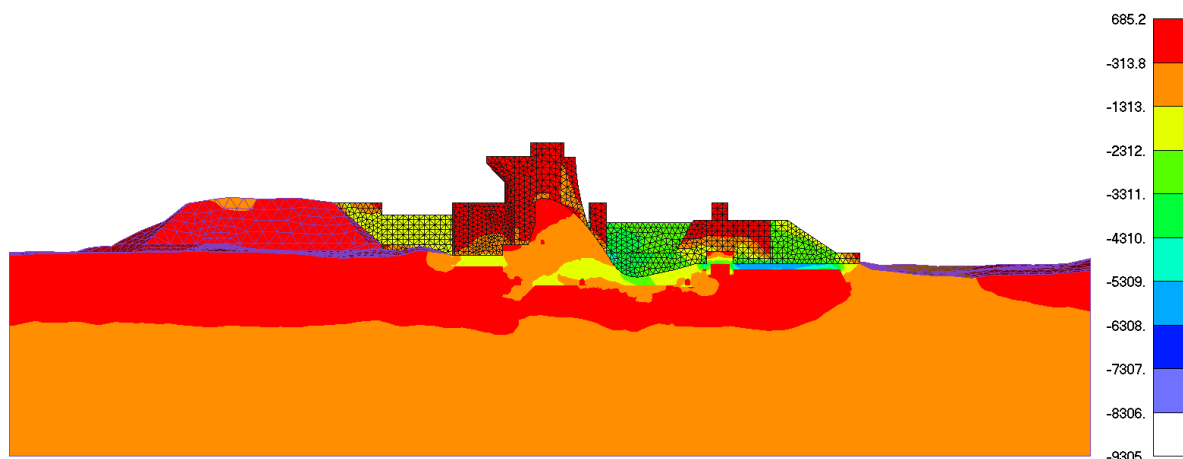
Слика 4.33 Укупна померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



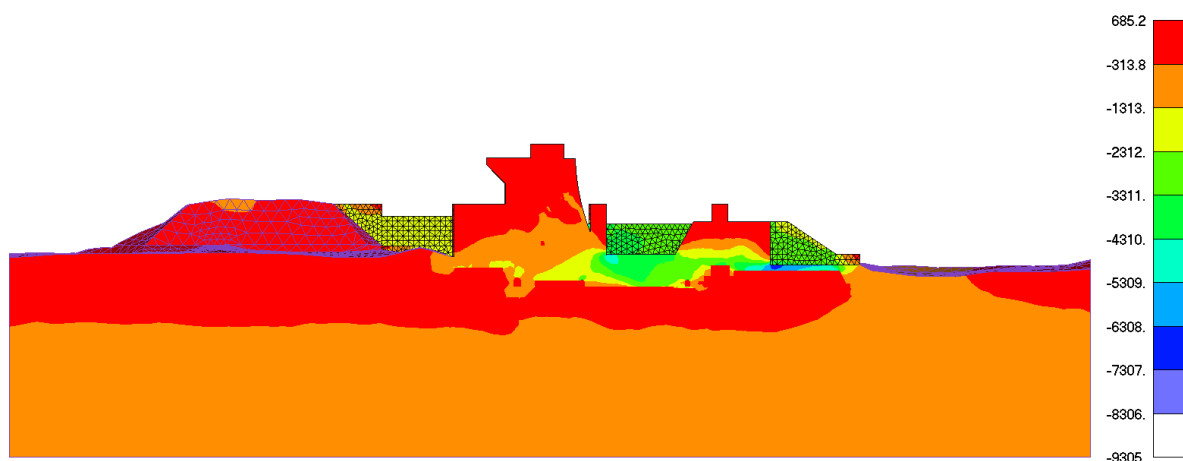
Слика 4.34 Укупна померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



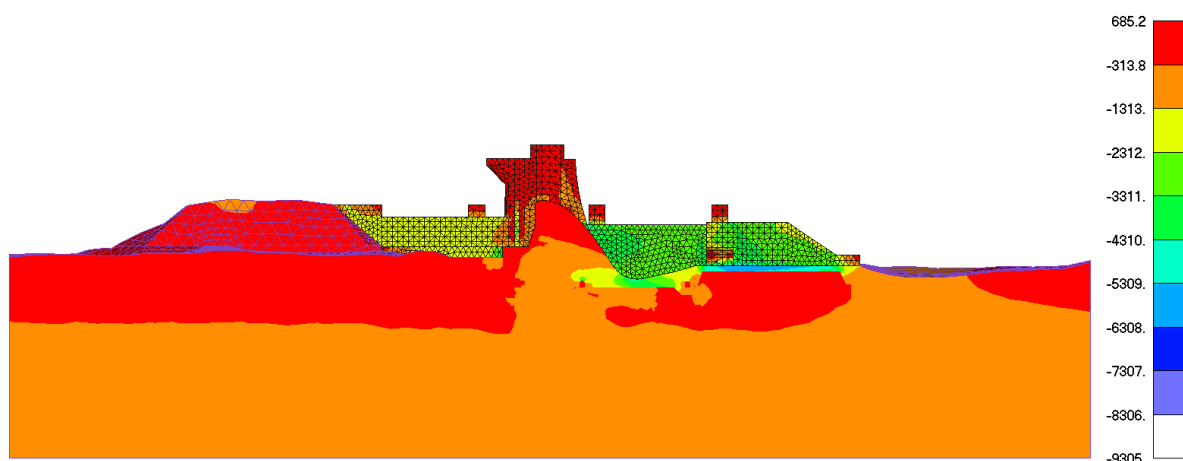
Слика 4.35 Укупна померања [mm] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



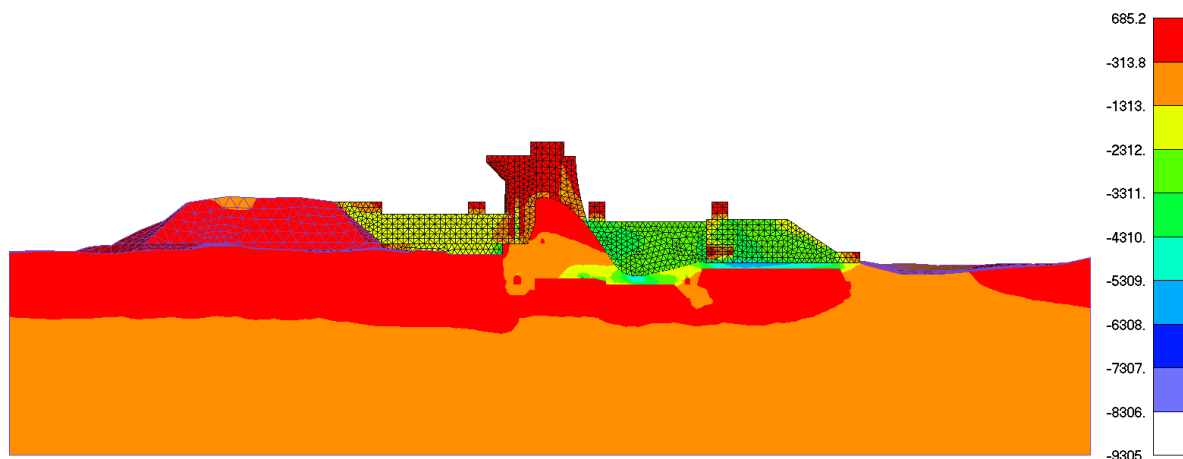
Слика 4.36 Поље радијалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – S



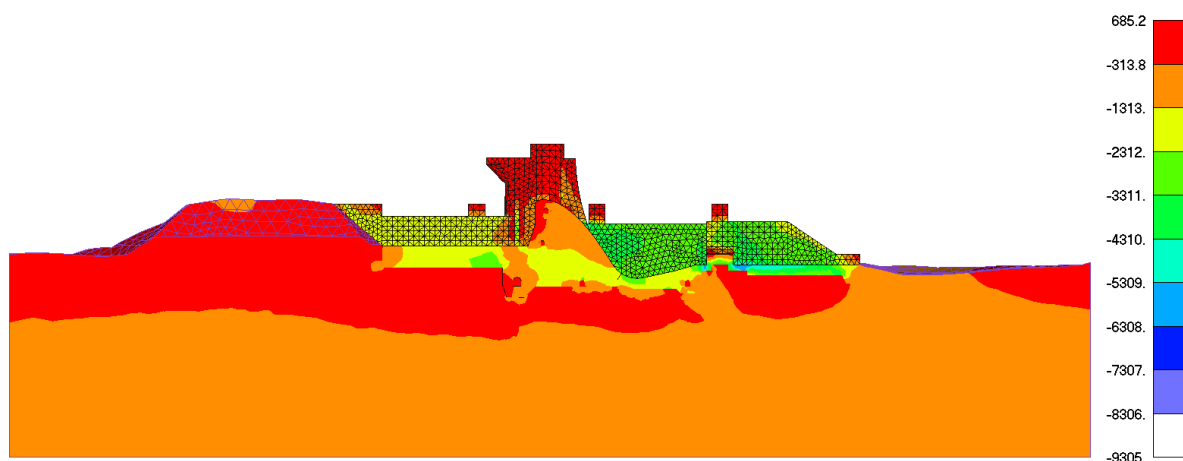
Слика 4.37 Поље радијалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



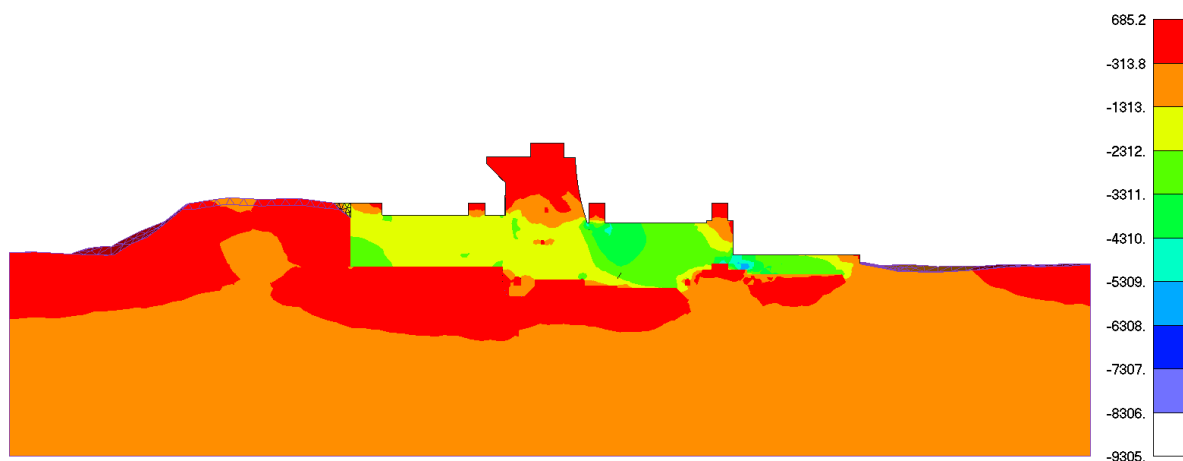
Слика 4.38 Поље радијалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – R



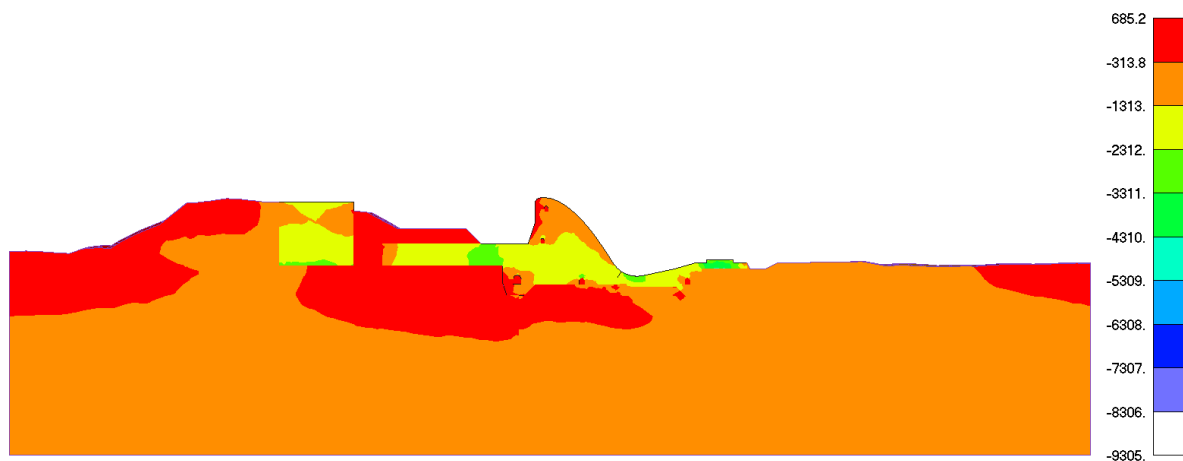
Слика 4.39 Поље радијалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



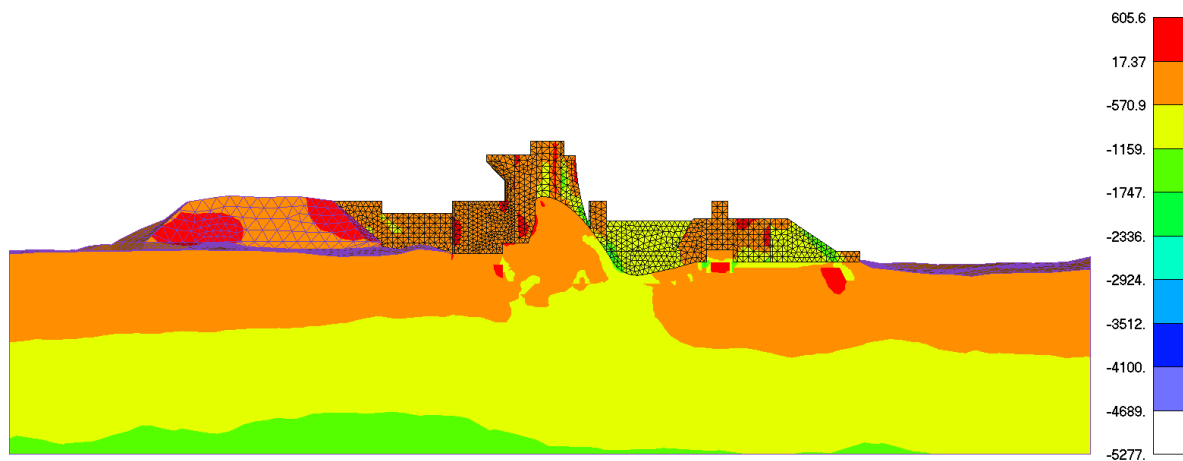
Слика 4.40 Поље радијалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – S



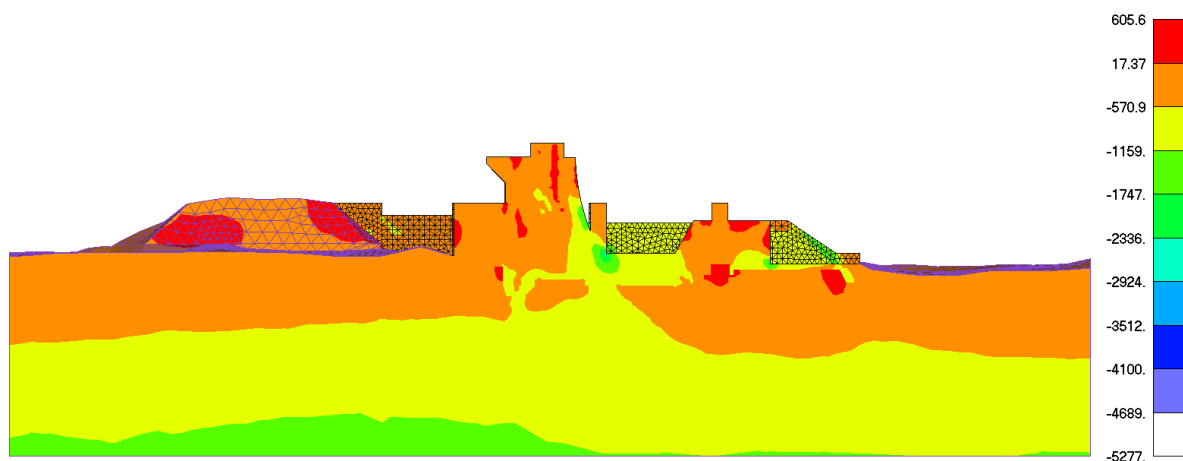
Слика 4.41 Поље радијалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



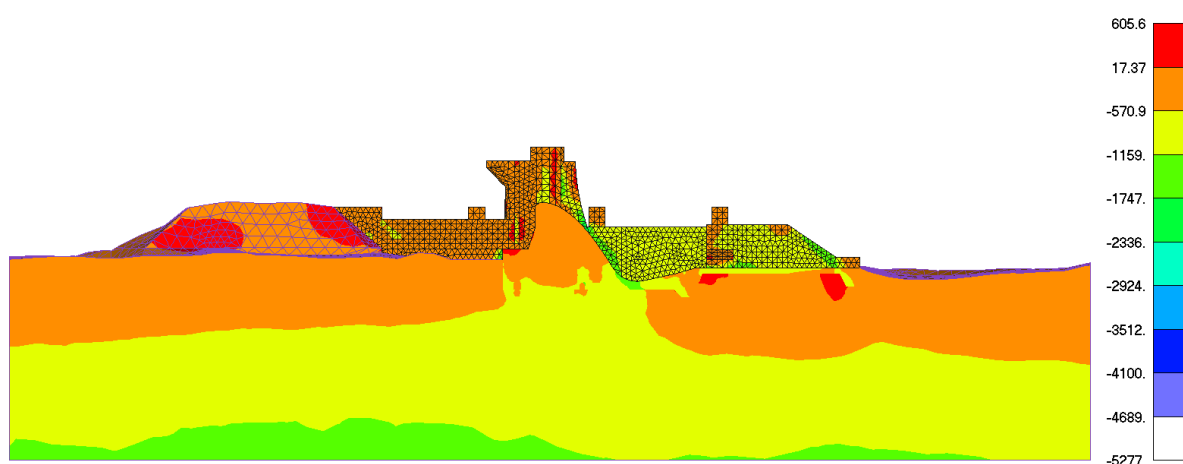
Слика 4.42 Поље радијалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм
пресек L6 – R



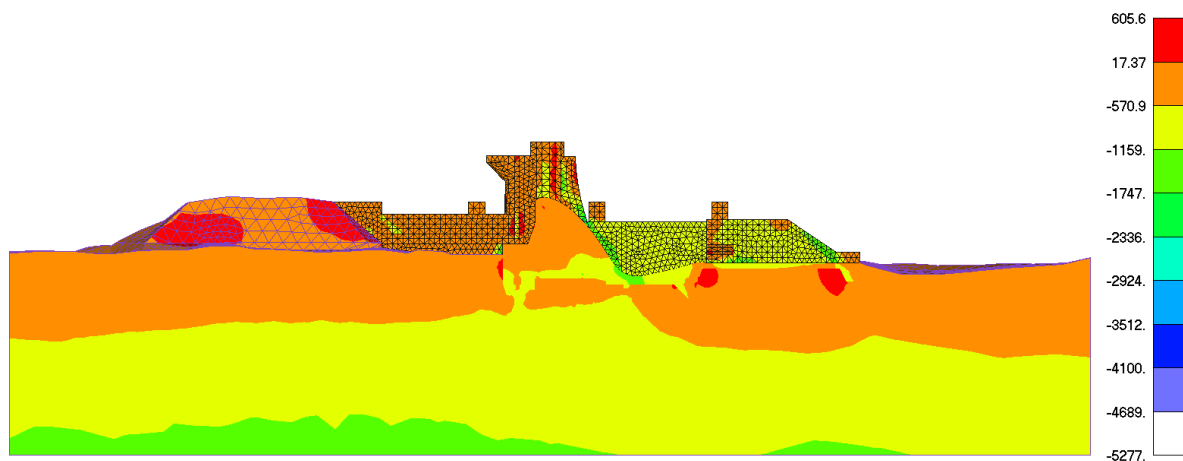
Слика 4.43 Поље вертикалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – S



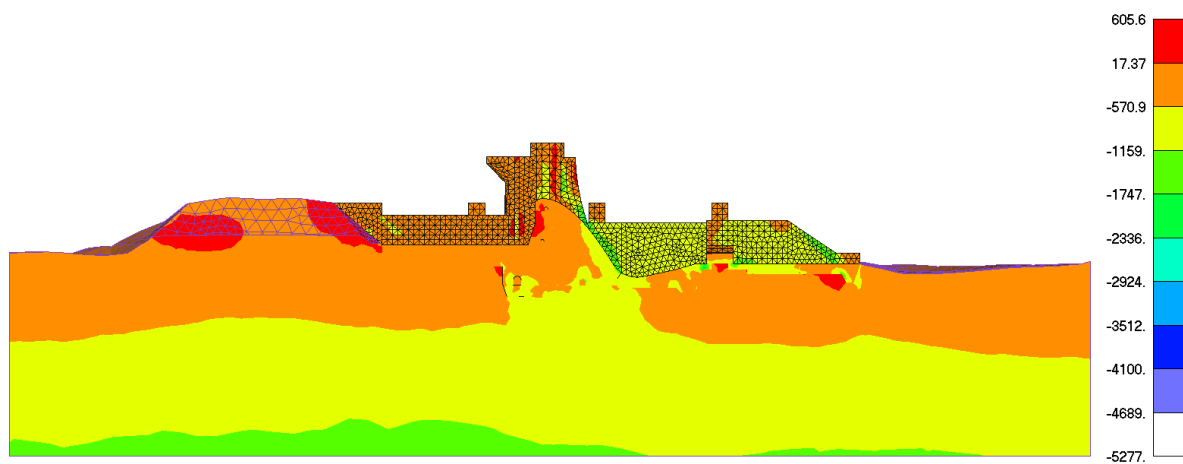
Слика 4.44 Поље вертикалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – O



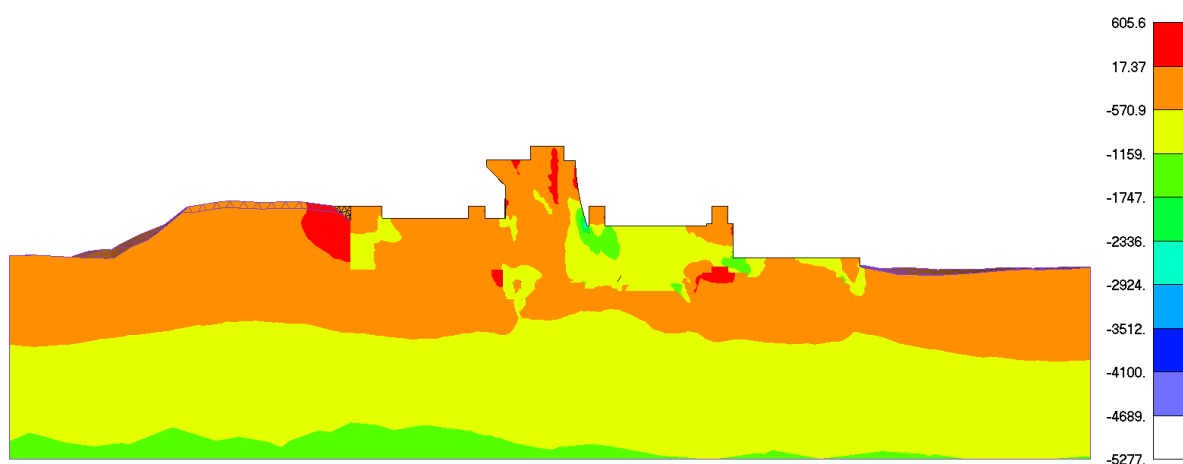
Слика 4.45 Поље вертикалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{\max}/KDV_{\min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L4 – R



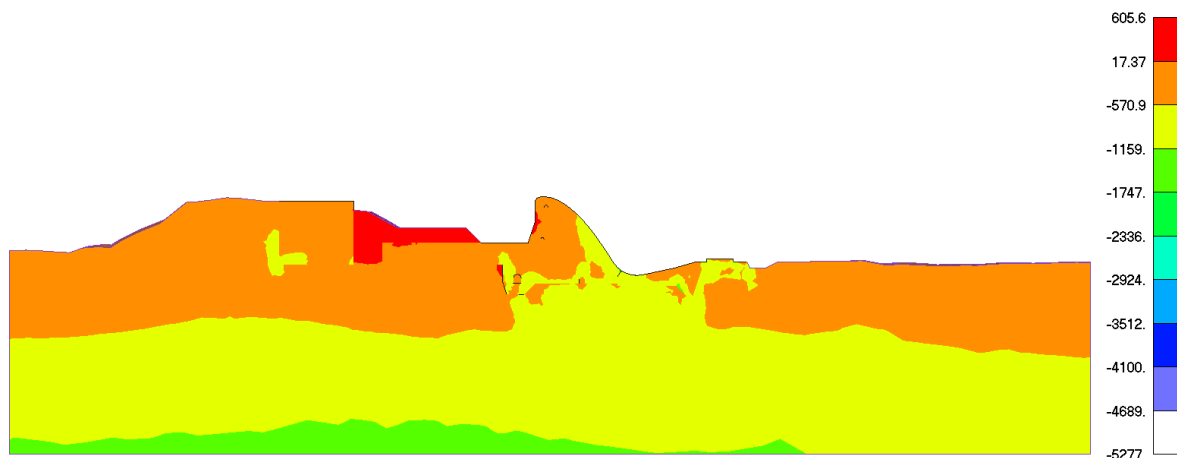
Слика 4.46 Поље вертикалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L5 – O



Слика 4.47 Поље вертикалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – S



Слика 4.48 Поље вертикалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ тнм пресек L6 – O



Слика 4.49 Поље вертикалне компоненте напона [kPa] при $KGV_{max}/KDV_{min} = 69,6/39,1$ ттм пресек L6 – R

4.3. Добијени степени сигурности

Након МКЕ анализе модела за све дефинисане прорачуна извршено је одређивање степена сигурности. Степен сигурности је одређиван методом редуковања смичуће чврстоће, како је то описано у претходном делу. За почетне вредности параметара материјала су коришћене вредности приказане у табели 3.2. Ови параметри су затим постепено редуковани све док није нарушена стабилност објекта, тј. све до немогућности постизања конвергенције.

Израчуната вредност степена сигурности за посматрани случај износи 2. При материјалним параметрима одређеним редуковање смичуће чврстоће, за већи степен сигурности прорачун није постигао конвергенцију.

5. Закључак

У раду је креирана оптимална мрежа коначних елемената, са елементима мањих димензија у зонама око бране и у самој брани, док су у зонама далеко од преградне конструкције креирани елементи већих димензија. Филтрациони прорачун је урађен за комбинацију хидростатичког оптерећења $KGB=69,6\text{ мнм}$ и $KDB=39,1\text{ мнм}$, за случај када фугенбанди између ламела не пропуштају воду и спојница између тела бране и слапишта је отворена, тј. омогућено је протицање воде. Приказана су поља дубине воде, потенцијала, узгонских притисака. Израчунате филтрационе силе коришћене су у напонско–деформационом прорачуну.

Напонско–деформациони прорачун је извршен за исту комбинацију оптерећења као и филтрациони прорачун. Развијени модел за напонско–деформациону анализу је заснован на еласто–пластичном моделу материјала за стене и бетон. За симулацију механичког понашања стенске масе коришћен је Мор–Кулонов материјални модел, док је за симулацију механичког понашања бетона коришћен генерализовани Хук–Браунов материјални модел. Приказана су резултати за поља радијалних померања, тангенцијалних померања, вертикалних померања, укупних померања, радијалних напона и вертикалних напона.

На основу приказаних резултата виде се вредности померања бране са максималном вредношћу укупно померање бране од 19.6 mm. Такође, приказана је расподела радијалних и вертикалних компоненти напона.

Литература

- [1] М. Кojiћ, N. Filipović, R. Slavoković, M. Živković, N. Grujović / N. Zdravkovic, PAK-P, Program for FE Analysis of FlowThrough Porous Media, Kragujevac, 1999.
- [2] K. J. Bathe, Finite Element Procedures, USA: Massachusetts Institute of Technoogy, 1996.
- [3] M. Kojic / K. J. Bathe, Inelastic Analysis of Solids and Structures, 1 edition yp., Springer, 2004.
- [4] Д. Ракић, Развој и примена материјалних модела порозних медија у статичкој и динамичкој анализи насутих брана, Докторска дисертација, Крагујевац, 2014.
- [5] ХЕПС ЂЕРДАП, Досије главног објекта ХЕ Ђердап, Кладово, 1982.
- [6] K.-J. Bathe, Finite Element Procedures, 2006.
- [7] W. Koiter, General theorems for elastic-plastic colids, North-Holland, 1960.
- [8] Siemens, FEMAP Commands Version 11.2.1, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2015.
- [9] Siemens, FEMAP User Guide Version 11.2, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2015.
- [10] М. Којић, Р. Славковић, М. Живковић / Н. Грујовић, Метод коначних елемената I Линеарна анализа, Крагујевац: Машински факултет у Крагујевцу, Сестре Јањић 6, Крагујевац, 2010.