

АНАЛИЗА ХИДРОДИНАМИЧКИХ УТИЦАЈА НА ПРЕЛИВНУ ЛАМЕЛУ 7 ХЕ „БЕРДАП 1“

Душан СТЕВАНОВИЋ

Институт за водопривреду „Јарослав Черни“

Бојан МИЛОВАНОВИЋ, Владан КУЗМАНОВИЋ

Универзитет у Београду, Грађевински факултет

РЕЗИМЕ

У оквиру рада приказана је хидродинамичка анализа на примеру ламеле гравитационе бетонске бране „Бердап 1“. На почетку рада је, поред детаљног аналитичког прорачуна, спроведено истраживање које је за циљ имало доношење трапезног оптерећења у софтверу које би на најефикаснији начин апроксимирало оптерећење израчунато по Зангаровом поступку.

Предмет рада је компаративна анализа два различита прорачуна, са различитим нивоом детаљности моделирања. Анализирањем резултата прорачуна изнети су закључци, узимајући у обзир да одређена одступања представљају основ за будуће истраживања у области сеизмичких хидродинамичких утицаја.

Кључне речи: хидродинамички утицаји, сеизмичка анализа, Зангарово оптерећење, замењујуће трапезно оптерећење, напони у телу бране, померања бране

1. УВОД

Бране, објекти којима се обезбеђује акумулирање воде за различите намене, спадају међу најстарије хидротехничке грађевине. Појава брана протеже се уназад до првих векова цивилизације. [1] Изградњом

ових објеката мења се слика околног подручја, али потенцијални колапс ових грађевина имао би огромне негативне утицаје у виду угрожавања људских живота и великих материјалних губитака, па се зато класификују у конструкције високог ризика. Једно од најопаснијих утицаја, у експлоатационом веку бране, представља земљотрес.

Приликом појаве земљотреса, померање тла, поред померања конструкције бране, изазива и померања водене масе у акумулацији. Приликом прорачуна, уз инерцијалне сеизмичке силе узроковане осциловањем преградне конструкције, потребно је узети у обзир и додатне инерцијалне, динамичке силе услед осциловања воде у акумулационом басену. [1] Без обзира што имају исте побуде настале померањем тла, различите карактеристике материјала од којих су бране изграђене и воде као флуида доводе до њиховог различитог осциловања, што резултира појавом додатног, хидродинамичког притисака на контактој површини. Ово оптерећење изазвано разликом сеизмичких вибрација бране и воде у акумулацији, изазива додатна померања саме бране, која утичу на величину и распоред оптерећења. Ова интеракција флуида и конструкције изазива фреквенцијско зависне хидродинамичке притиске. [2]

У оквиру овог рада, у два различита софтвера, са различитим начином и нивоом детаљности моделирања, извршена је сеизмичка анализа ламеле гравитационе бетонске бране „Бердап 1“. У оквиру сеизмичке анализе, посебна пажња је посвећена хидродинамичком оптерећењу. Прва сеизмичка анализа спроведена је у софтверу *Tower*, док је друга анализа спроведена у оквиру *Корисничког алата за анализу сигурности преливног дела преградне конструкције развијеног у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“* у склопу Система за

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 12.8.2024.

Ispravljen: 25.8.2024.

Prihvaćen: 29.8.2024.

Kontakt: dusan.stevanovic@jcerni.rs

управљање безбедношћу бране ХЕ „Ђердап 1“. Након спроведених анализа, спроведена је компаративна анализа резултата прорачуна: померање у правцу тока Дунава, вертикално померање, максимални и минимални главни напон. На основу компаративне анализе, изнети су закључци и смернице о потенцијалним даљим истраживањима.

2. АНАЛИЗА У СОФТВЕРСКОМ ПАКЕТУ TOWER

Анализа која је изложена у оквиру овог поглавља започета је прорачуном динамичких карактеристика ламеле бране, односно усвојен је динамички и статички модел ламеле, израчунате су матрице маса и матрице флексибилности, да би потом биле одређене својствени вектори усвојеног система. На основу израчунатих динамичких карактеристика и сеизмичке зоне у којој се брана налази извршен је прорачун сеизмичких сила које делују на брану, да би се на самом крају одредили утицаји у телу преливне ламеле услед дејства свих оптерећења које се јављају приликом дејства земљотреса.

Због сложености прорачуна стварног динамичког система са континуално распоређеном масом, врши се дискретизација преливне ламеле преграде конструкције на одређени број концентрисаних маса.

У овом раду, за динамички модел преливне ламеле усвојена је конзола са четири концентрисане масе позициониране у тежишту одговарајућих делова. При прорачуну инерцијалних сила битан утицај има првих три до пет облика осциловања, па је ламела по висини подељена на четири дела (четири масе), тако да оне буду приближно једнаке. За сваки од ових делова се потом рачуна тежина као:

$$G_i = F_i \cdot \gamma_b$$

где су: F_i – површина одговарајућег дела ламеле, γ_b – запреминска тежина бетона $\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3$

Након тога се добија маса сваког дела као:

$$m_i = \frac{G_i}{g}$$

где је: g – убрзање земљине теже $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Резултати су приказани у Табели 1.

Табела 1. Површине и масе елемената ламеле

Маса	$F_i \text{ [m}^2\text{]}$	$G_i \text{ [kN]}$	$m \text{ [t]}$
1	201,51	4836,12	492,98
2	201,51	4836,12	492,98
3	201,51	4836,12	492,98
4	201,51	4836,12	492,98

Ако се ови резултати прикажу у матричном облику, добија се **матрица концентрисаних маса**:

$$M = \begin{bmatrix} 492,98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 492,98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 492,98 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 492,98 \end{bmatrix}$$

Чланови матрице флексибилности одређују се према изразу:

$$\delta_{ij} = \int_s \frac{M_i \cdot M_j}{EI} ds + k \cdot \int_s \frac{T_i \cdot T_j}{GF} ds$$

где су:

δ_{ij} – померање на месту i услед деловања јединичне силе на месту j ,

M_{ij}, T_{ij} – момент савијања и трансверзална сила услед деловања јединичне силе на месту m_{ij} ,

E – Јангов модул еластичности бетона $E = 31\,870\,616 \text{ kN/m}^2$,

I – моменат инерције пресека,

k – коефицијент расподеле смичуће силе по пресеку; за правоугаони пресек: $k = 1,25$,

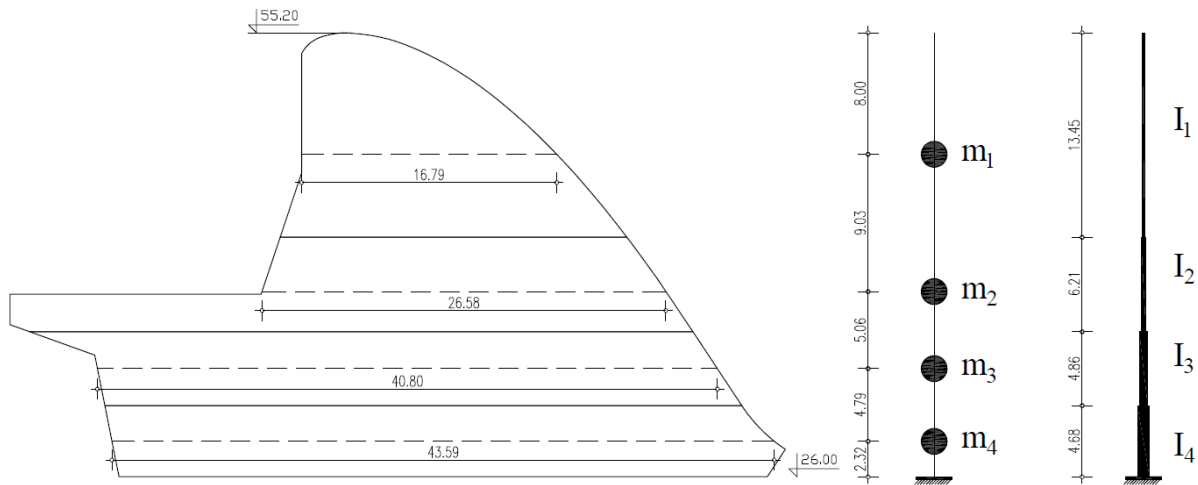
G – модул смицања;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 14\,227\,953,57 \text{ kN/m}^2$$

ν – Пуасонов коефицијент,

F – површина пресека.

За статички модел преливне ламеле усвојена је конзола укљештена на коти дна слапишта, променљивог попречног пресека по висини. Приликом прорачуна усвајено је да је крутост дуж сваког појединачног дела константна и да је једнака крутости пресека у тежишту тог дела преливне ламеле, као на слици 1.



Слика 1. Статички модел преливне ламеле

Геометријске карактеристике пресека у тежиштима концентрисаних маса, дате су у табели 2.

Табела 2. Геометријске карактеристике пресека у тежиштима концентрисаних маса

Пресек	$B [m]$	$L [m]$	$F [m^2]$	$I [m^3]$
1	1,00	16,79	16,79	394,43
2	1,00	26,58	26,58	1564,89
3	1,00	40,80	40,80	5659,78
4	1,00	43,59	43,59	6902,07

Дијаграми момената и трансверзалних сила услед деловања јединичне силе на местима концентрисаних маса приказани су на слици 1а.

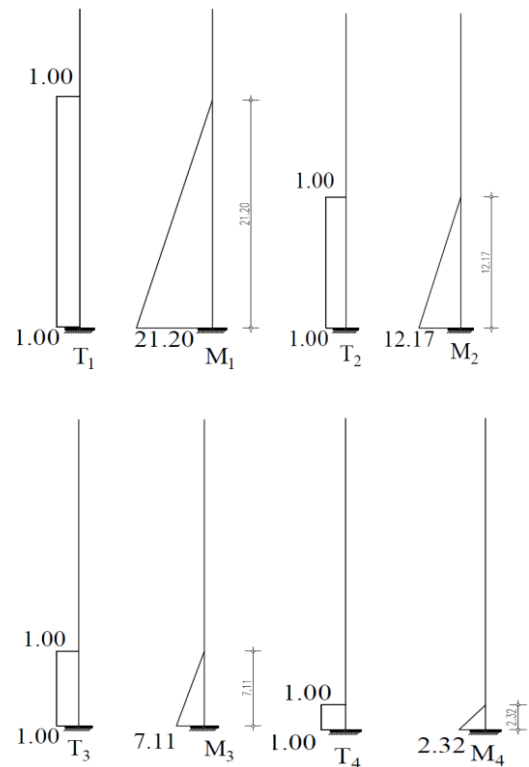
Матрица флексибилности и динамичка матрица за овако дефинисан систем имају следеће вредности:

$$D = 10^{-8} \cdot \begin{bmatrix} 9,575 & 3,529 & 1,687 & 0,493 \\ 3,529 & 3,155 & 1,581 & 0,481 \\ 1,687 & 1,581 & 1,521 & 0,475 \\ 0,493 & 0,481 & 0,475 & 0,469 \end{bmatrix}$$

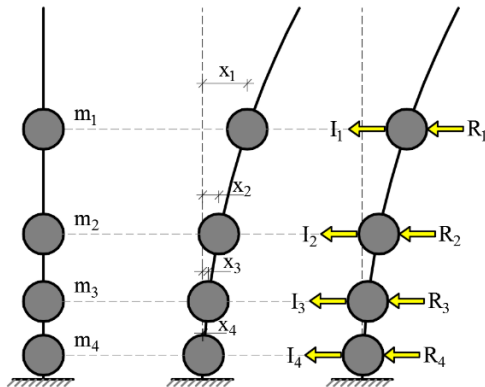
$$D_M = D \cdot M = 10^{-4} \cdot \begin{bmatrix} 0,472 & 0,174 & 0,083 & 0,024 \\ 0,174 & 0,155 & 0,078 & 0,024 \\ 0,083 & 0,078 & 0,075 & 0,023 \\ 0,024 & 0,024 & 0,023 & 0,023 \end{bmatrix}$$

Ако се посматра усвојени динамички модел бране, који осцилује слободним непригушеним

осцилацијама, кретање маса одређено је параметрима $x_i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$. На сваку масу m_i делују одговарајуће релативне R_i и инерцијалне силе $I_i = m_i \cdot \ddot{x}_i$.



Слика 1а. Дијаграми момената и трансверзалних сила услед деловања јединичне силе на местима концентрисаних маса



Слика 2. Дејство инерцијалних и реституционих сила на размаграном моделу

Са слике се може видети да је:

$$R_i + m_i \cdot \ddot{x}_i = 0 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

одакле следи да је:

$$R_k = -m_k \cdot \ddot{x}_k \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

Такође важи да је:

$$x_i = \sum_{k=1}^4 R_k \cdot \delta_{ik} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

где је δ_{ij} утицајни коефицијент, односно колико је померање на месту i када јединична сила делује на месту k .

Када се једначина (1) убаци у претходну једначину добија се:

$$x_i = - \sum_{k=1}^4 m_k \cdot \ddot{x}_k \cdot \delta_{ik} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Ако се ова једначина уреди, добија се **диференцијална једначина кретања** система са више степени слободе:

$$x_i + \sum_{k=1}^4 m_k \cdot \delta_{ik} \cdot \ddot{x}_k = 0 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

која се може приказати и у матричном облику:

$$\mathbf{x} + \mathbf{DM}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$$

где су: \mathbf{D} – матрица флексибилности, \mathbf{M} – матрица маса, \mathbf{x} – вектор померања, $\ddot{\mathbf{x}}$ – вектор убрзања.

Ако се претпостави да су све фреквенције и фазни углови осциловања маса једнаки (*претпоставка*

синхроних и синфазних осцилација хармонијског типа), решење диференцијалних једначина претпоставља се у облику:

$$x_i = A_i \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad i = 1, 2, 3, 4$$

па је други извод по времену:

$$\ddot{x}_i = -\omega^2 \cdot A_i \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Кад се ове једначине врате у диференцијалну једначину кретања, усвајајући да је $\sin(\omega t - \alpha) = 1$, добија се:

$$A_i - \omega^2 \sum_{k=1}^4 m_k \delta_{ik} A_k = 0 \quad i = 1, 2, 3, 4$$

односно у матричном облику:

$$\mathbf{A} - \omega^2 \mathbf{DMA} = \mathbf{0}$$

Ако се ова једначина уреди добија се матрична формулација проблема својствених вредности:

$$\left(\mathbf{D}_M - \frac{1}{\omega^2} \mathbf{E} \right) \mathbf{A} = \mathbf{0}$$

где су:

$\mathbf{A} = \{A_1 \ A_2 \ \dots \ A_n\}^T$ – вектор облика осциловања

\mathbf{M} – матрица маса система, \mathbf{D} – матрица флексибилности система, \mathbf{E} – јединична матрица и $\mathbf{D}_M = \mathbf{D} \cdot \mathbf{M}$ – динамичка матрица система.

Својствен проблем динамичке матрице је хомоген систем алгебарских једначина. Услов за нетривијално решење система је:

$$\det \left(\mathbf{D}_M - \frac{1}{\omega^2} \mathbf{E} \right) = 0$$

Ова једначина представља карактеристичну једначину система и из ове једначине се одређују својствене вредности. У динамици конструкција она се зове **фреквентна једначина система** и из ње се одређују кружне фреквенције система.

За израчунату динамичку матрицу, решења фреквентне једначине система гласе:

$$\omega_1 = 131,899 \text{ 1/s} \quad \omega_2 = 304,009 \text{ 1/s}$$

$$\omega_3 = 583,212 \text{ 1/s} \quad \omega_4 = 863,868 \text{ 1/s}$$

За одређене кружне фреквенције система, добијају се својствени вектори:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,464306 \\ 0,242335 \\ 0,07433 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} -0,69082 \\ 1 \\ 0,838919 \\ 0,313104 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0,149268 \\ -0,95559 \\ 1 \\ 0,70162 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} -0,00832 \\ 0,149209 \\ -0,55792 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Надаље, разматраће се само хоризонтално деловање земљотреса на брану.

Величина пројектне сеизмичке силе на месту k за тон осциловања i је дата изразом:

$$S_{ik} = K_s \cdot \beta_i \cdot \eta_{ik} \cdot \psi \cdot G_k$$

где су:

K_s – коефицијент сеизмичког интензитета (за VIII сеизмичку зону: $K_s = 0,05$),

β_i – коефицијент динамичности,

η_{ik} – коефицијент који зависи од облика сопствених осцилација,

ψ – коефицијент редукције; за делимично укопан објекат: $\psi = 0,75$ и

G_k – концентрисана тежина дела бране у тачки k .

Концентрисане тежине делова бране, израчунате су при прорачуну маса делова и износе:

$$G_1 = G_2 = G_3 = G_4 = 4836,12 \text{ kN/m'}$$

Коефицијент који зависи од облика сопствених осцилација конструкције рачуна се по следећој формули:

$$\eta_{ik} = u_{ik} \cdot \frac{\sum_{k=1}^4 G_k \cdot u_{ik}}{\sum_{k=1}^4 G_k \cdot u_{ik}^2} = u_{ik} \cdot r_i \quad i = 1, 2, 3, 4$$

где је u_{ik} члан вектора облика осциловања на месту k за облик осциловања i .

Добијене су следеће вредности коефицијената:

I тон	II тон
$\eta_{11} = 1,391567$	$\eta_{12} = -0,44292$
$\eta_{21} = 0,646113$	$\eta_{22} = 0,641144$
$\eta_{31} = 0,337226$	$\eta_{32} = 0,537868$
$\eta_{41} = 0,103435$	$\eta_{42} = 0,200745$
III тон	IV тон
$\eta_{13} = 0,055047$	$\eta_{14} = -0,00363$
$\eta_{23} = -0,35241$	$\eta_{24} = 0,065226$
$\eta_{33} = 0,368781$	$\eta_{34} = -0,24389$
$\eta_{43} = 0,258744$	$\eta_{44} = 0,437144$

Коефицијент динамичности зависи од категорије гла у коме је брана темељена, периода осциловања бране T_i и коефицијента пригушења λ . За облик осциловања i коефицијент динамичности се рачуна према једној од следећих формула:

$$0 < T_i < T_0: \quad \beta_i = 1 + \left[a(\lambda \cdot T_s)^{\frac{2}{3}} - 1 \right] \frac{T_i}{T_0}$$

$$T_0 < T_i < T_s: \quad \beta_i = a(\lambda \cdot T_s)^{\frac{2}{3}}$$

$$T_i > T_s: \quad \beta_i = a(\lambda \cdot T_i)^{\frac{2}{3}}$$

Параметри гла I категорије:

$$a = 0.20 \quad T_0 = 0.10 \quad T_s = 0.35$$

Период осциловања за i - ти облик осциловања се рачуна као:

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}$$

и за израчунате вредности кружних фреквенција система добија се:

$$T_1 = 0,047636 \text{ s} \quad T_2 = 0,020668 \text{ s}$$

$$T_3 = 0,010773 \text{ s} \quad T_4 = 0,007273 \text{ s}$$

За вредност коефицијента пригушења $\lambda = 0.15$ добијају се следеће вредности коефицијента динамичности:

$$\beta_1 = 1,203146 \quad \beta_2 = 1,088138$$

$$\beta_3 = 1,045943 \quad \beta_4 = 1,031017$$

Вредности пројектних сеизмичких сила износе:

I тон	II тон
$S_{11} = 303,63 \text{ kN/m'}$	$S_{12} = -87,40 \text{ kN/m'}$
$S_{21} = 140,98 \text{ kN/m'}$	$S_{22} = 126,52 \text{ kN/m'}$
$S_{31} = 73,58 \text{ kN/m'}$	$S_{32} = 106,14 \text{ kN/m'}$
$S_{41} = 22,57 \text{ kN/m'}$	$S_{42} = 39,61 \text{ kN/m'}$

III тон	IV тон
$S_{13} = 10,44 \text{ kN/m'}$	$S_{14} = -0,68 \text{ kN/m'}$
$S_{23} = -66,85 \text{ kN/m'}$	$S_{24} = 12,20 \text{ kN/m'}$
$S_{33} = 69,95 \text{ kN/m'}$	$S_{34} = -45,60 \text{ kN/m'}$
$S_{43} = 49,08 \text{ kN/m'}$	$S_{44} = 81,74 \text{ kN/m'}$

Према члану 24 Правилника о техничким нормативима за пројектовање и прорачун инжењерских објеката у сеизмичким подручјима, екстремне статичке величине које се узимају у обзир при прорачуну напона у конструкционим елементима, одређују се као резултат заједничког

deјства сеизмичких сила свих облика осциловања који су у прорачуну третирани, и добијају се према изразу:

$$\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Phi_i^2}$$

где су: Φ – статичка величина која се посматра, Φ_i – статичка величина за i -ти тон (облик) осциловања

Одакле следи да су вредности сеизмичких сила (на месту k) за прорачун напона:

$$S_1 = 316,14 \text{ kN/m'}$$

$$S_2 = 201,25 \text{ kN/m'}$$

$$S_3 = 153,80 \text{ kN/m'}$$

$$S_4 = 105,68 \text{ kN/m'}$$

У програму *Tower* постоји могућност да се сеизмичке силе нанесу као концентрисане (као што су и израчунате *методом спектралне анализе*), међутим доношење оптерећења на овај начин доводи до великих концентрација напона на местима уношења ових сила. Из тог разлога сеизмичке силе су нанете на модел преко трапезног оптерећења на следећи начин: у првој итерацији претпоставен је статички одређен носач који је сачињен од две просте греде са препустима и једном простом гредом између њих. Ослонци ових греда налазе се на местима усвојених концентрисаних маса, што је приказано на слици 4.

Идеја је да се расподељено оптерећење тако постави да реакције ових простих греда приближно одговарају вредностима добијених сеизмичких сила. Међутим, како брана није „поломљена“, већ је реч о

континуалном носачу, онда се на основу прве итерације врши осредњавање трапезног оптерећења на местима ослонаца, где ће се у више итерација одредити оптерећење чије су реакције довољно близу тачних вредности сеизмичких сила. Такво оптерећење ће се унети у програм као поворка трапезних оптерећења.

Осцилације дна акумулације (реке) изазивају и осцилације воде у акумулацији (речи), које су различите од осцилација објекта.

Ови утицаји се приказују као параболнично оптерећење са ординатом оптерећења на дубини z према изразу који је дао Зангар:

$$p_z(z) = C \cdot \alpha \cdot \gamma_v \cdot h$$

где су:

C – бездимензионални коефицијент који зависи од дубине пресека за који се рачуна ордината притиска,

α – хоризонтално убрзање темеља,

γ_v – специфична тежина воде,

h – дубина акумулације (од површине воде до коте терена).

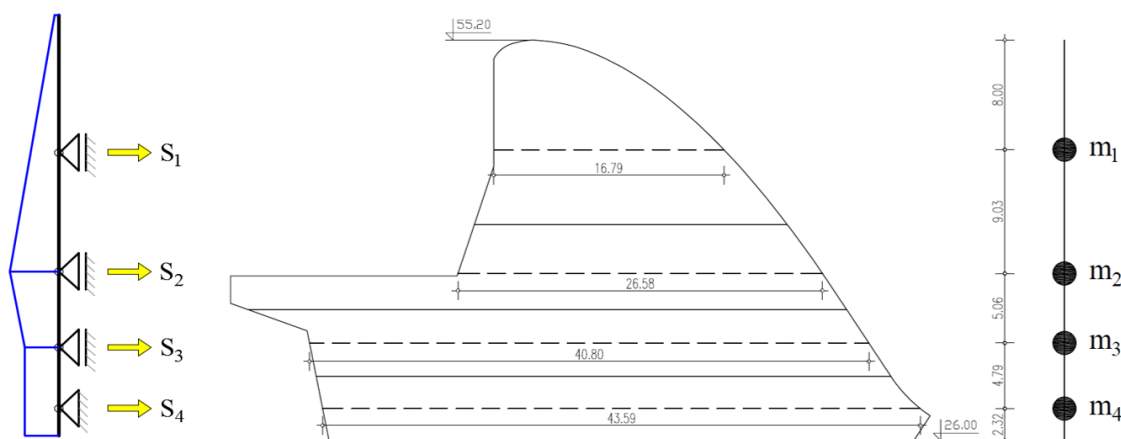
Бездимензионални коефицијент се рачуна према следећем изразу:

$$C(z) = \frac{C_m}{2} \cdot \left[\frac{z}{h} \cdot \left(2 - \frac{z}{h} \right) + \sqrt{\frac{z}{h} \cdot \left(2 - \frac{z}{h} \right)} \right]$$

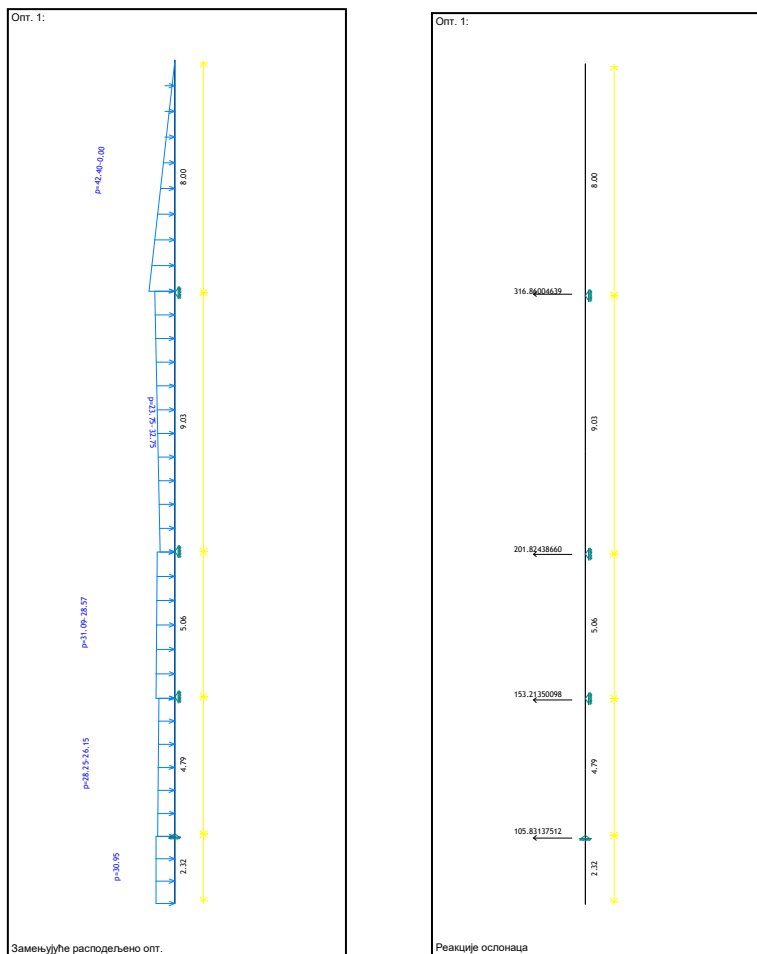
где су:

C_m – коефицијент који зависи од угла нагиба контуре објекта,

z – дубина воде на којој се тражи величина ординате притиска.



Слика 3. Шематски приказ замењујућег сеизмичког оптерећења



Слика 4. Замењујуће расподељено сеизмичко оптерећење

Хоризонтално убрзање темеља се рачуна као:

$$\alpha = d \cdot K_s$$

где је: d – дуктилност ($d = 3$).

Ово сеизмичко хидродинамичко оптерећење се као параболично не може унети у програм Tower:

За унос овог оптерећење се такође користити замењујуће, које се састоји поново од поворке трапезних оптерећења, чији су резултантни утицаји, концентрисана сила P_z и моменат M_z , у дну акумулације једнаки као и за параболично оптерећење. У циљу одређивања овог замењујућег оптерећења коришћена је Excel табела (табела 3). У табелу се најпре уносе геометријске величине ламеле (наранџаста поља) и рачунају остали неопходни параметри (зелена поља).

Утицаји на објекат од Зангаровог параболичног оптерећењ, концентрисана сила P_z и моменат M_z , у дну акумулације се добијају интегралњем оптерећења дуж сегмента објекта на које оно делује (табела 4) [4].

$$P_3(X) = p_3(X) \cdot \frac{h}{6} \cdot \frac{3 \cdot \arccos(1-X) - 2 \cdot (1-X) \cdot (2+X \cdot (2-X)) - 3 \cdot (1-X) \cdot \sqrt{X \cdot (2-X)} + 4}{X \cdot (2-X) + \sqrt{X \cdot (2-X)}}$$

$$M_3(X) = p_3(X) \cdot \frac{h^2}{12} \cdot \frac{3 \cdot X^2 \cdot (2-X)^2 + 4 \cdot X \cdot (2-X) \cdot \sqrt{X \cdot (2-X)}}{X \cdot (2-X) + \sqrt{X \cdot (2-X)}}$$

Оптерећење на уставу се преноси на зидове и не изазива утицаје у посматраној ламели, тако да су сеизмички хидродинамички утицаји на ламелу разлика укупних и оних са уставе (табела 5).

Табела 3. Геометријске карактеристике ламеле

Геометрија преливне ламеле:			
Кота нормалног успора:	$Z_{HY} =$	69.50	m н.м.
Кота круне прелива:	$Z_{KP} =$	55.20	m н.м.
Кота врха узводне косине:	$Z_{ВУК} =$	46.00	m н.м.
Кота дна узводне косине:	$Z_{ДУК} =$	38.00	m н.м.
Дужина узводне косине:	$n(v,x) =$	2.60	m
Дужина узводне столице:	$d_{УС} =$	0.00	m
Увлачење уставе на преливу:	$d_{УП} =$	0.00	m
Кота дна акумулације:	$Z_{ДА} =$	36.00	m н.м.
Сеизмичка зона:	С.З.:	8	
Коефицијент дуктилности:	$d =$	3	
Дубина преливне контуре:	$h_1 =$	14.30	m
Дубина врха косине:	$h_2 =$	23.50	m
Дубина дна косине:	$h_3 =$	31.50	m
Висина вертикала на преливу:	$h_B =$	25.50	m
Удео вертикала на преливу:	$m_B =$	76.12	%
Угао нагиба косине:	$f =$	0.00	°
Максимални коефицијент С:	$C_m =$	0.735	
Дубина акумулације:	$h_A =$	33.50	m
Коефицијент сезмичности:	$K_c =$	0.05	
Сеизмичко убрзање тла:	$\alpha = d \cdot K_c =$	0.15	

Табела 4. Сеизмички хидродинамички утицаји

0: Дно уставе:		3: Дно акумулације	
$z_{уставе} =$	14.30 m	$z_3 =$	33.50 m
$C_m =$	0.735	$C_m =$	0.735
$C(z) =$	0.548	$C(z) =$	0.735
$p_{уставе} =$	27.53 kN/m ²	$p_3(z_{max}) =$	36.93 kN/m ²
$P_{уставе} =$	333.34 kN/m'	$P_{из акумул.} =$	898.27 kN/m'
$M_{уставе} =$	11155.8 kNm/m'	$M_{из акумул.} =$	12089.26 kNm/m'
Утицаји на 14,3 m (устава)		Утицаји на 19,2 m (дно)	

Табела 5. Утицај на преливну ламелу без уставе

Утицај на преливну ламелу без уставе:			
$P_z =$	$P_{z_{из акумул.}} - P_y =$	649.76	kN/m'
$M_z =$	$M_{z_{из акумул.}} - M_y =$	5951.48	kNm/m'

Замењујуће трапезно оптерећење се може задати на више начина, при чему се треба водити рачуна о одговарајућем броју услова и величина које се јављају при томе. Постоји могућност задржавања ординате 0 на koti воде и Зангаровог притиска на дну, а одређивање две ординате замењујућих трапеза, на котама врха и дна узводне косине. Овиме се добија

релативно груба, али за рачун најбрже и најлакше заменско оптерећење. За прецизније одређивање напонског стања у објекту пожељна је подела на више трапеза. У том случају се креће од ординати Зангаровог притиска на изабраним котама замењујућих трапезних сегмената оптерећења, које се најпре амплификују фактором а, који служи да се увећају полазне ординате како би се изједначила сила стварног и замењујућег оптерећења (трапези су у почетку уписани у параболу и самим тиме је без увећања њихова површина мања од површине параболе). Следећа се ради дисторзија b, која служи да горњу ординату трапеза увећа а доњу смањи за исту вредност притиска, како би се подигло тежиште трапеза, до тежишта одговарајуће параболе. Уколико се користе само услови једнакости Зангаровог и замењујућег оптерећења у дну акумулације, потребно је одредити а и b који важе за све сегменте, док се у случају равнотеже на свакој од изабраних кота параметри а и b посебно одређују за сваки од трапеза, Грешка која настаје коришћењем заменског трапезног оптерећења зависи од прецизности усвајања вредности срачунатих ордината погодних за унос у програм Tower. У овом раду грешка је сведена на око 0,01%.

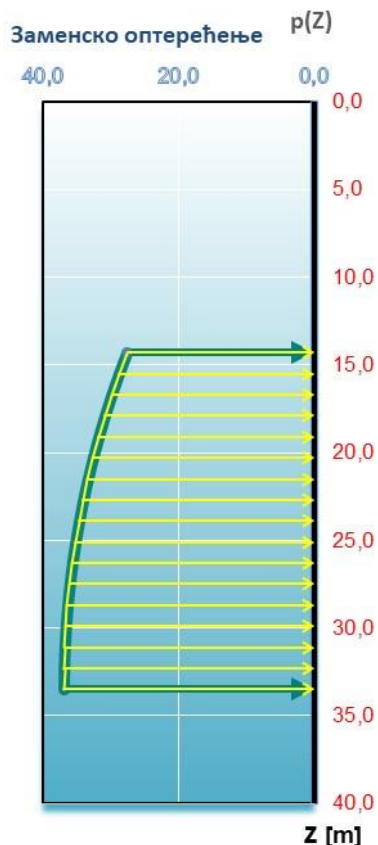
Табела 6. Вредности ордината замењујућег оптерећења (p_T и p_D) на задатим висинским котама (Z_T и Z_D)

→ Сегменти замењујућег оптерећења за слагање P и M у свим пресецима				
i	Z_T	Z_D	$p_T(Z)$	$p_D(Z)$
1	14.30	14.90	27.536	28.135
2	14.90	16.10	28.140	29.273
3	16.10	17.30	29.272	30.320
4	17.30	18.50	30.319	31.284
5	18.50	19.70	31.283	32.167
6	19.70	20.90	32.167	32.972
7	20.90	22.10	32.972	33.700
8	22.10	23.30	33.699	34.351
9	23.30	24.50	34.351	34.928
10	24.50	25.70	34.928	35.431
11	25.70	26.90	35.431	35.861
12	26.90	28.10	35.861	36.218
13	28.10	29.30	36.218	36.504
14	29.30	30.50	36.504	36.717
15	30.50	31.70	36.717	36.860
16	31.70	33.50	36.867	36.947

Ординате замењујућег оптерећења, индекс Г за ординату са горње, а индекс Д са доње стране (за

случај изједначавања по свим задатим kotaма и изабраних 15 kota) су приказане у табели 6.

На слици 5. је приказано Зангарово и добијено замењујуће трапезно оптерећење.



Слика 5. Замењујуће сеизмичко хидродинамичко оптерећење

3. ПРОРАЧУН У ПРОГРАМСКОМ ПАКЕТУ TOWER

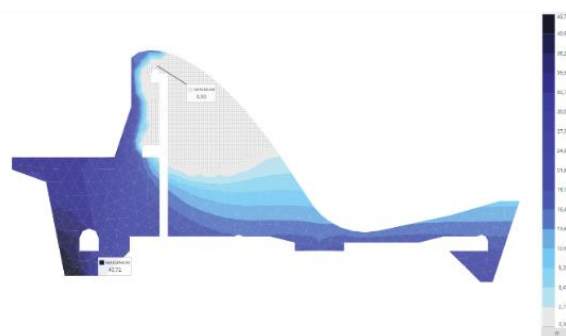
У Tower–у су формирана два модела: један у коме се симулира отказ дренажног система услед дејства земљотреса, док у другом моделу дренажни систем регуларно функционише. Мрежом коначних елемената обухваћена је и стенска маса представљена као еластични полупростор испод бране. Овај еластични полупростор је облика правоугаоника и ослоњен је линијски по свом обиму. Са узводне стране вертикални линијски ослонац је моделиран тако да је дозвољено једино вертикално померање,

док су на линијском ослоњу на најнижој коти и вертикалном линијском ослоњу са низводне стране спречена сва померања.

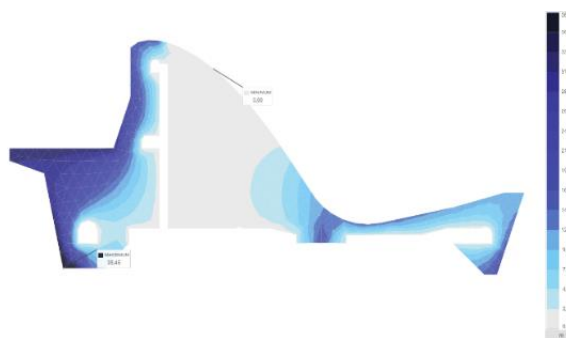
На ова два модела нането је оптерећење које делује у четвртој комбинацији оптерећења:

- сопствена тежина тела бране
- хидростатички притисак горње воде,
- узгон,
- инерцијална сеизмичка сила,
- хсеизмички хидродинамички притисак горње воде.

Приликом прорачуна усвојен је за статички систем конзоле, са претпоставком да важи равно стање деформација – проблем је дакле равански.



Слика 6. Висина нивоа воде у ламели 7 услед отказа дренажног система

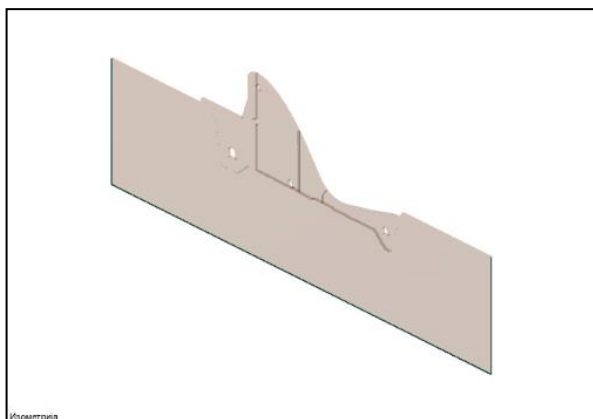


Слика 7. Висина нивоа воде у ламели 7 при редовном дренажном систему

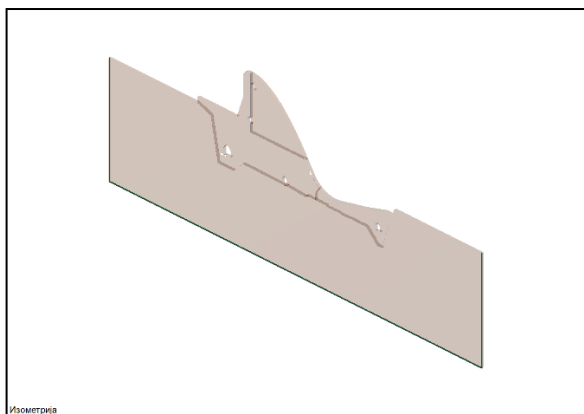
Оба модела у Tower–у су формирана тако да се постигне што већа сличност са моделирањем у корисничком алату, који је детаљније образложен у наредном поглављу. На основу нивоа воде који је израчунат у корисничком алату слика 6, а како би се задала сила узгона, усвојена је специфична

геометрија преградне конструкције приказана на слици 7. Део преградне конструкције који је сув (изнад филтрационе линије), на основу графика у корисничком алату је моделиран плочом са запреминском тежином $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$, што одговара запреминској тежини хидротехничког бетона. Делови ламеле који су мокри (испод филтрационе линије), моделирани су плочом запреминске тежине $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$, што одговара запреминској тежини у водом потопљеном стању. На тај начин је у програм унето дејство узгона на конструкцију. Сопствена тежина се аутоматски генерише у програму Tower.

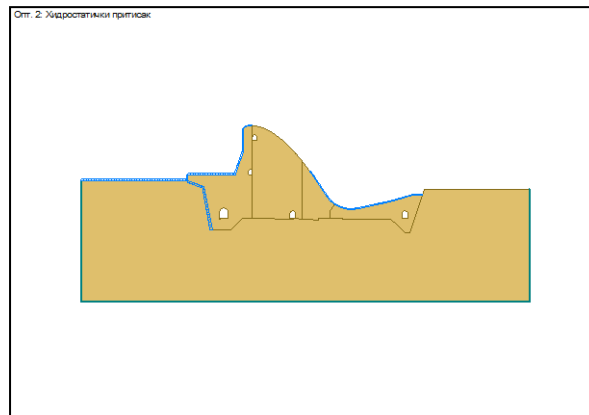
На слици 10а, 10б, 11 и 12 су приказана оптерећења која се наносе на конструкцију.



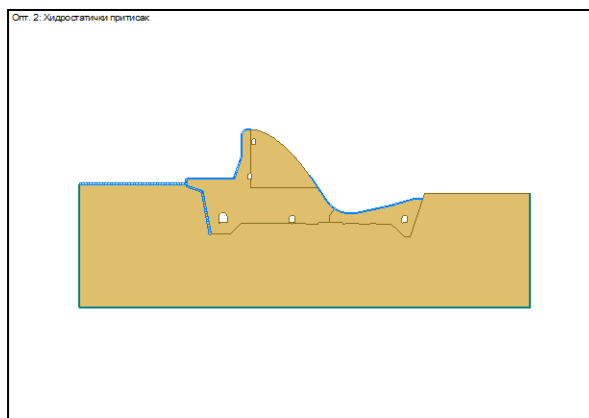
Слика 8. Усвојен модел конструкције при отказу дренажног система



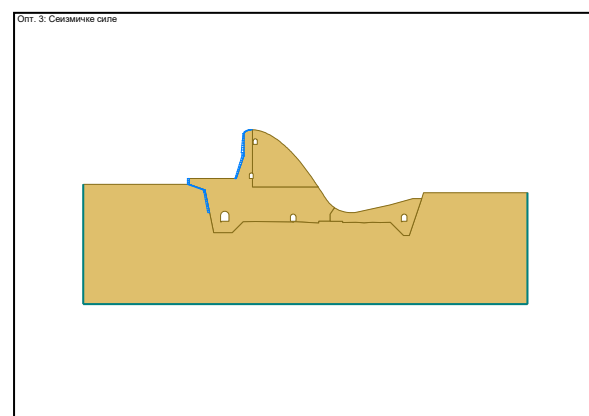
Слика 9. Усвојен модел конструкције при редовном дренажном систему



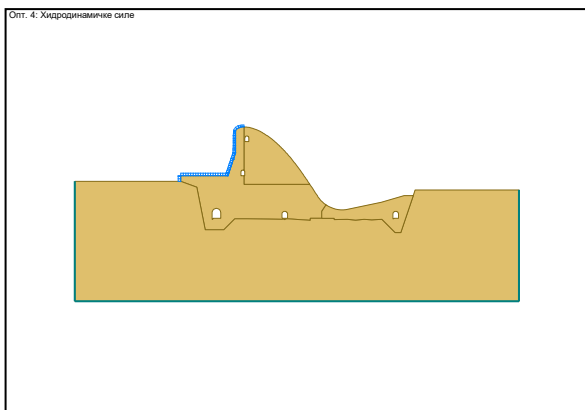
Слика 10а. Хидростатичко оптерећење при отказу дренажног система



Слика 10б. Хидростатичко оптерећење при редовном раду дренажног система



Слика 11. Сеизмичко инерцијално оптерећење

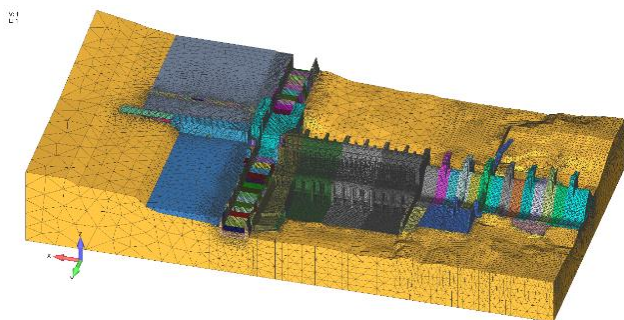


Слика 12. Сеизмичко хидродинамичко оптерећење

4. АНАЛИЗА У КОРИСНИЧКОМ АЛАТУ ЗА СИГУРНОСТ У ОКВИРУ СУБ „ЂЕРДАП 1“

У оквиру овог поглавља приказан је сеизмички прорачун ламеле која је део 3D модела гравитационе бетонске бране ХЕ „Ђердап 1“.

Модел је израђен за потребе анализе бране у експлоатационом периоду, који спроводи Институт за водопривреду „Јарослав Черни“.

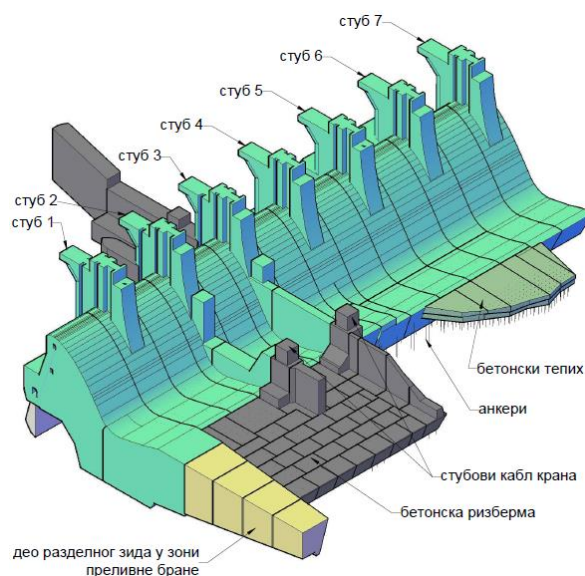


Слика 13. Интегрални МКЕ модел српског дела бране Ђердап 1 – поглед са низводне стране [2]

За брану Ђердап 1 постоје развијени нумерички модели. Развијени су МКЕ модели термичких, филтрационих и напонско-деформационих процеса за српски део објекта (преливну брану, електрану и бродску преводницу).

Због своје компактности бране Ђердап 1 и њених делова, моделирано је свих 14 ламела, 3 секције

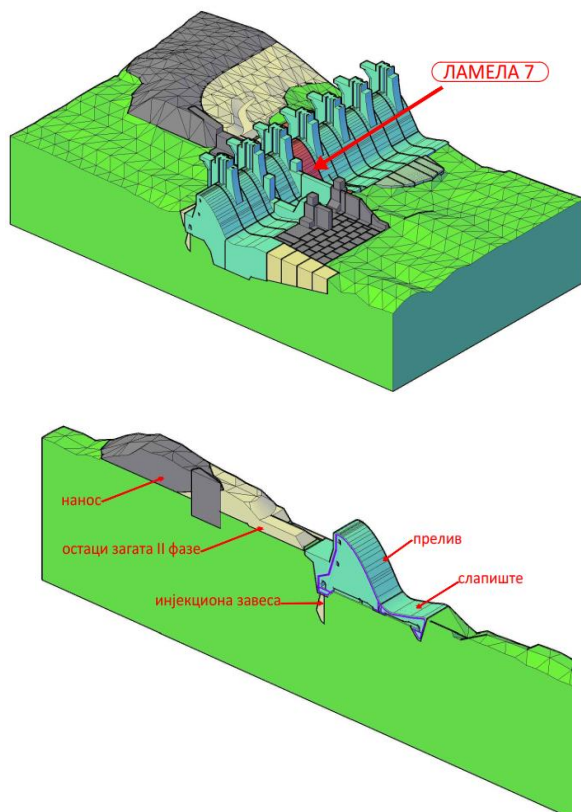
електране, монтажни блок, ламеле бродске преводнице у зони преградног профила (од ламеле 8 у узводној комори до ламеле 34 у низводној комори) и насута брана са припадајућом стенском масом. МКЕ модели су узели у обзир тродимензионалну структуру бране са свим специфичностима и конструктивним детаљима који се односи на дренажни и заптивни система, инјекциону завесу, рад прелива, рад затварача, рад преводнице и друго. Модел се састоји од 4,37 милиона чворова и 2,97 милиона елемената. [2]



Слика 14. Тродимензионални модел преливне бране Ђердап 1 – Поглед са низводне стране [4]

Свака ламела преливне бране је прилагођена геолошким, геотехничким, функционалним и градилишним условима, па су из тог разлога различите дужине и ширине ламела, као и коте фундарања. Подела на ламела је изведена тако да свака ламела представља стабилан статички елемент, свако преливно поље је подељено са две дилатационе спојнице док стубови представљају јединствене елементе. Ламела 7 која је предмет ове анализе је ширине 16 m и дужине 81,57 m. Узводни део ламеле је измењен и у нагибу 1:5. Ламела је фундирана на коти 23,00 m н.м., на узводном делу се налази зуб који је фундиран на коти 19,00 m н.м., а на низводној страни је фундиран на коти 18,00 m над морем. Кота круне прелива је на коти 55,20 m над морем. Преливни облик бране је формиран по Кригеровој кривој и низводно се наставља

слапиштем. Цилиндрично слапиште дужине 15 m, које се наставља правцем, нагибом од 8° и 16° на дужини од 14 m до своје низводне ивице. Ламела преливне бране је моделирана као 3D тело – солид, са отворима у зони галерија. [5]



Слика 15. Тродимензионални модел ламеле 7 преливне бране Ђердап 1 – [4]

Кориснички алат за анализу сигурности конструкције преливне бране ослања се на наменско коришћење свих МКЕ модела за симулацију термичких, филтрационих и напонско-деформацијских процеса, као и слоја за интеграцију података мерења и прорачуна. [5]

Улазни подаци у корисничком алату за анализу сигурности преливног дела преградне конструкције су подељени у више група:

1. Контурни услови
2. Параметри филтрације
3. Параметри чврстоће

У картици Контурни услови налази се списак свих параметара контурних услова који се могу уносити у

програм (измерених или произвољно задатих) и који као такви представљају осмотрене или хипотетичке прорачунске ситуације. То су ниво воде у акумулацији и кота доње воде, затим опционо сеизмичко убрзање, оптерећење од порталне дизалице и положај устава на преливним пољима при чему су доступне опције спуштене радне или спуштене ремонтне уставе. Додатно је расположив и хипотетички сценарио отказа дренажног система. На основу задатих параметара оптерећења врши се анализа стања објекта. [5]

У картици Параметри филтрације налази се списак свих параметара дренажног система, заптивки на спојницама, инјекционе завесе и глинеог језгра који се могу уносити кроз припадност изабраним врстама/групама делова система. То су у првом реду коефицијенти филтрације свих елемената дренажног система, заптивки на спојницама, инјекционе завесе и глинеог језгра. Могуће је дефинисати и степен функционалности појединих елемената (нпр. дренажних тепиха и бушотина) као и њихову пропусност (нпр. дилатациона спојница између тела бране и слапишта). [5]

У картици Параметри чврстоће (напонско - деформационих процеса) налази се списак свих параметара чврстоће који се могу прегледати или кориговати кроз припадност изабраним врстама/групама делова система. Параметри напонско - деформационих процеса се задају за стенску масу, бетон и инјекциону завесу. [5]

За анализу спроведену у оквиру овог рада анализирана су два сценарија приликом отказа дренажног система и услед регуларног рада дренажног система. За ниво воде у акумулацији усвојена је кота 69,50 m н.м., док је за коту доње воде усвојена 39,50 m над морем. За коеф. сеизмичности је усвојена вредност 0,15 у правцу тока Дунава, док је вертикална компонента занемарена у овој анализи. Параметри филтрације и параметри чврстоће усвојени су као подразумевани и нису модификовани пре почетка покретања прорачуна у корисничком алату.

На основу унетих сеизмичких параметара и на основу коте горње и доње воде и сопствене тежине, израчунате су инерцијалне силе од сопствене тежине и хидродинамички притисак воде у корисничком алату и расподељени су на узводном лицу ламеле. Утицаји од сеизмике се моделирају применом

еквивалентне статичке методе. При прорачуну хидродинамичких притисака воде у алату је коришћена Зангарова метода. [4]

a)

SPOLJAŠNJE OPTEREĆENJE	
Nivo vode u akumulaciji [mm]	69,5
Kota donje vode [mm]	39,5
Otkaz дренаžnog sistema	<input type="checkbox"/>
Seizmika <input checked="" type="checkbox"/>	
Koeficijent seizmičnosti u Y pravcu	0,15
Koeficijent seizmičnosti u Z pravcu	0

б)

SPOLJAŠNJE OPTEREĆENJE	
Nivo vode u akumulaciji [mm]	69,5
Kota donje vode [mm]	39,5
Otkaz дренаžnog sistema	<input checked="" type="checkbox"/>
Seizmika <input checked="" type="checkbox"/>	
Koeficijent seizmičnosti u Y pravcu	0,15
Koeficijent seizmičnosti u Z pravcu	0

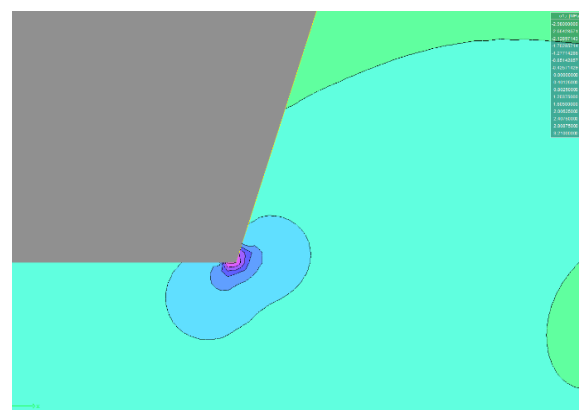
Слика 16. Врсте прорачуна (а) услед отказа дренажног система и (б) услед регуларног рада дренажног система у Корисничком алату (Улазни подаци)

5. КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

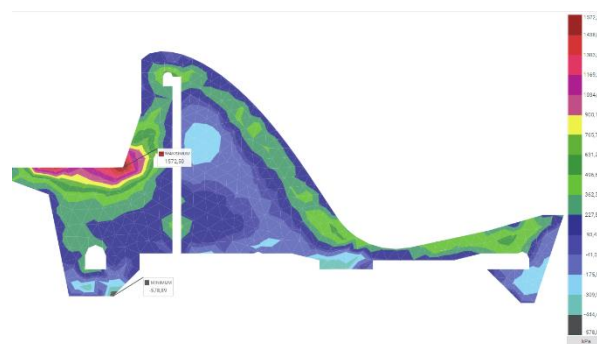
Упоредивање резултата спроведених прорачуна базирано је на поређењу главних напона, померања у правцу тока Дунава и вертикалног померања.

Посматрајући вредности максималних главних напона у Tower – у (Слика 17) и у корисничком алату (Слика 18) и у моделима са отказом дренажног система може се уочити да је област у којој су регистроване највеће вредности максималног главног напона на споју узводне косине и столице. Напонска слика је у корисничком алату обухвата шири регион, што је и очекивано када се узме у обзир детаљност приликом моделирања и сложеност модела. Када се посматра напонска слика на критичном сегменту у

Tower – у, када се елиминушу вредности пикова који су последица концентрације напона на том сегменту, добијају се приближне вредности као у корисничком алату.

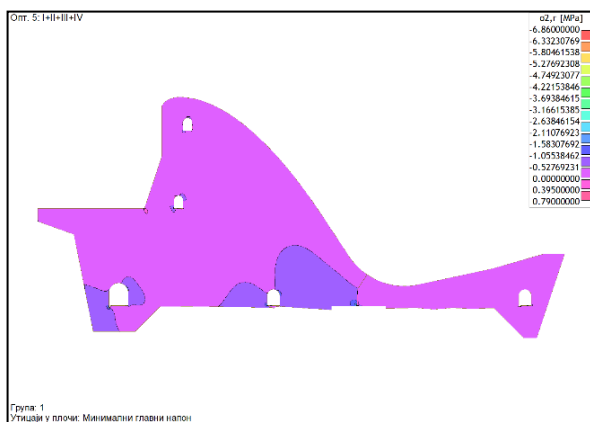


Слика 17. Максимални главни напон у Tower-у (Прорачунска ситуација приликом отказа дренажног система)

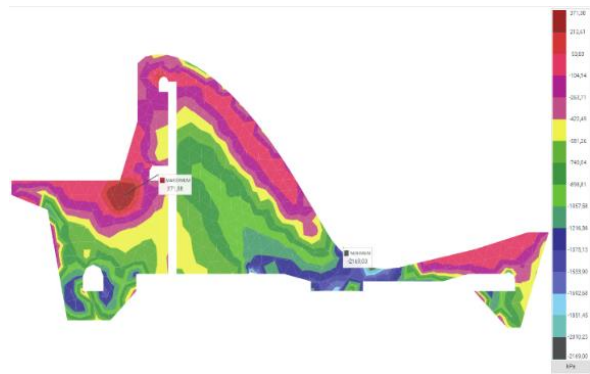


Слика 18. Максимални главни напон у корисничком алату (Прорачунска ситуација приликом отказа дренажног система)

Анализирајући минималне главне напоне у моделима са отказом дренажног система могу се приметити сличности у погледу промена напонске слике код отвора (галерија), нарочито у делу ламеле који је лоциран близу слапишта. Максималне вредности добијене прорачуном на споју узводне косине и столице у Tower – у сведене су на малу област, што је последица концентрације напона услед промене геометрије. Треба нагласити да је код оба типа прорачуна реч о малим вредностима, које у Tower – у нису могле бити приказане на начин који би омогућио да се увиди различитост напонске слике у телу ламеле, као што је то случај са корисничким алатом.

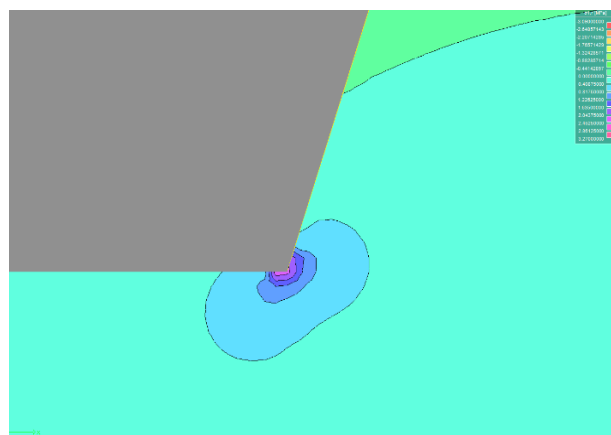


Слика 19. Минимални главни напон (отказ дренажног система), прорачун у Tower-у



Слика 20. Минимални главни напон (отказ дренажног система), прорачун у корисничком алату

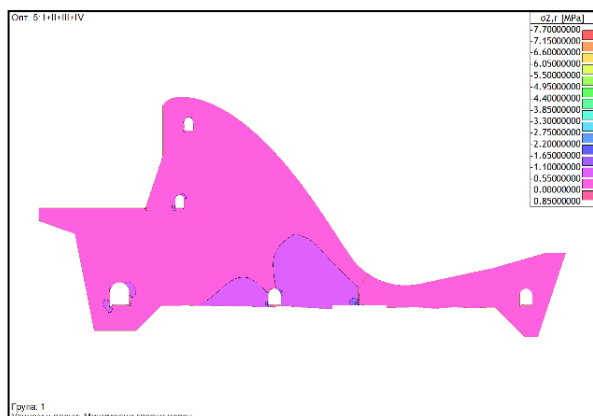
Приликом анализе максималних и минималних главних напона у моделима са регуларним радом дренажног система приликом земљотреса, могу се изнети идентични закључци као у случајевима са моделима са отказом дренажног система. (Слика 21, 22, 23 и 24).



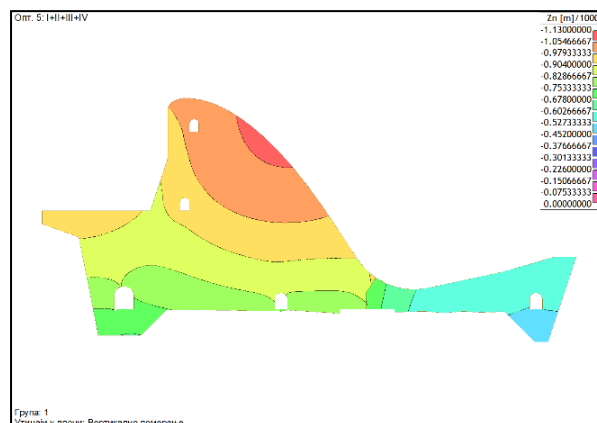
Слика 21. Максимални главни напон у Tower-у (Прорачунска ситуација приликом регуларног рада дренажног система)



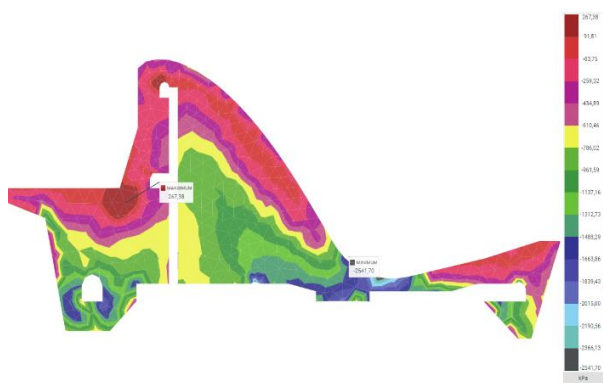
Слика 22. Максимални главни напон у корисничком алату (регуларни рад дренажног система)



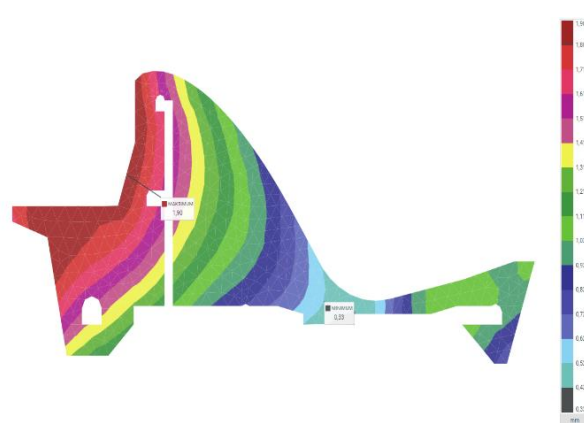
Слика 23. Минимални главни напон (регуларни рад дренажног система), прорачун у Tower-у



Слика 25. Вертикално померање (отказ дренажног система) прорачун у Tower-у



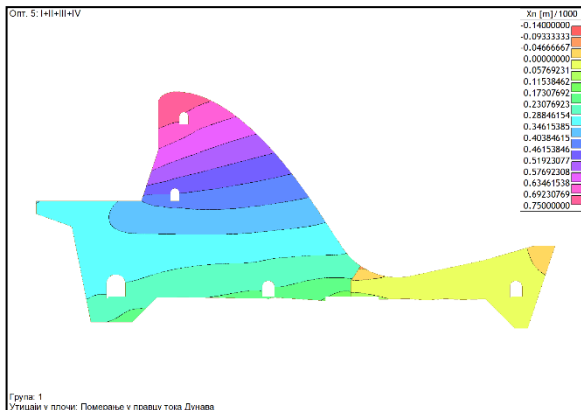
Слика 24. Минимални главни напон (регуларни рад дренажног система), прорачун у корисничком алату



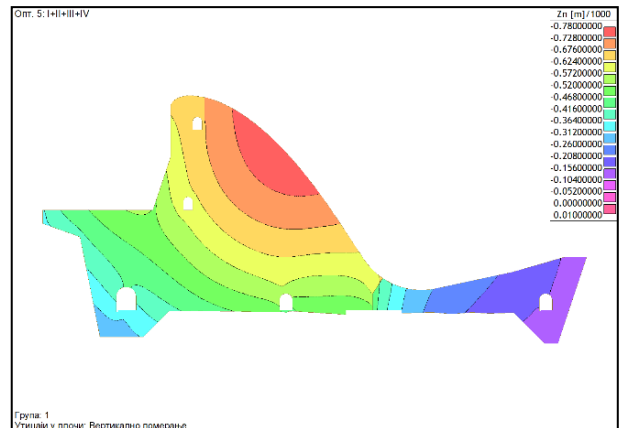
Слика 26. Вертикално померање (отказ дренажног система) прорачун у корисничком алату

Анализом вертикалних померања у моделима са отказом дренажног система (Слика 25) уочава се да су вредности на контакту ламеле и стене приближно једнаке. На узводној косини и на сегменту столице која је у корисничком алату означена као зона са максималним вредностима вертикалних померања, може се приметити да је и у Tower-у овај сегмент представља једну од зона са максималним израчунатим померањима. Вредности померања се разликују, али је реч о вредностима малог реда величине (у корисничком алату максимална вредности је 1,90 mm, док је на том сегменту у Tower – у забележено померање око 1 mm), па не би ове разлике требало узимати као меродавне приликом доношења закључака.

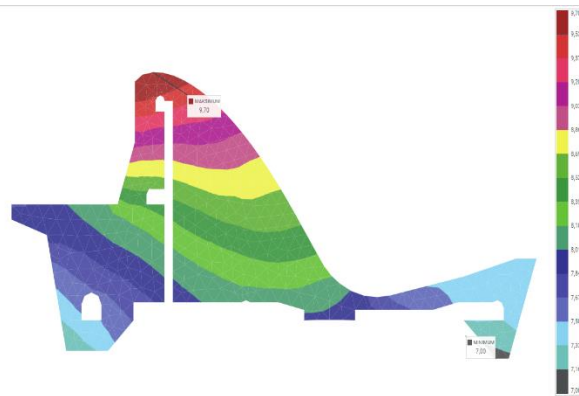
Највећа разлика између два спроведена прорачуна забележена је приликом анализе померања у правцу тока Дунава (Слика 27 и 28). Максимална вредност код модела са отказом дренажног система је забележена на koti прелива, очекивано, у оба случаја. Међутим, вредности израчунатих померања се битно разликују. На koti прелива, померање које је израчунато у корисничком алату износи 9,70 mm, док је у Tower-у добијена вредност од 0,75 mm. Како је ово померање једно од најважнијих параметара приликом сеизмичке анализе, а померања се битно разликују, неопходно је утврдити потенцијалне разлоге који условљавају оволику разлику у резултатима.



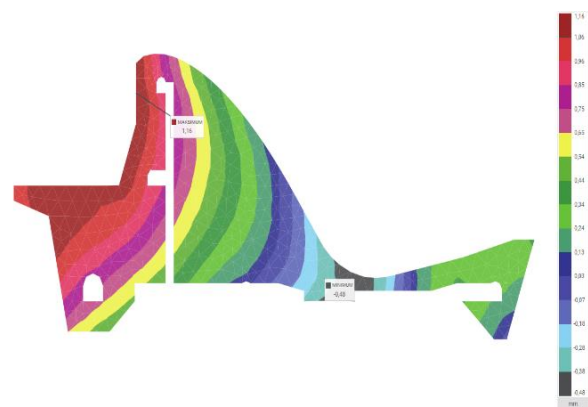
Слика 27. Померање у правцу тока Дунава (отказ дренажног система) прорачун у Tower-y



Слика 29. Вертикално померање (регуларни рад дренажног система), прорачун у Tower-y

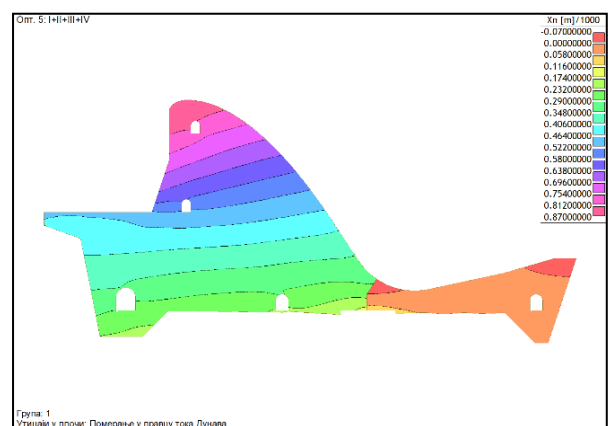


Слика 28. Померање у правцу тока Дунава (отказ дренажног система) прорачун у корисничком алату



Слика 30. Вертикално померање (регуларни рад дренажног система), прорачун у корисничком алату

Утицај температуре, који је обавезан сегмент приликом прорачуна у корисничком алату, није уврштен приликом моделирања у Tower-y. Промена температуре у конструкцији ламеле се у корисничком алату уводи усвајањем температурног поља, која је омогућена кориснику приликом задавања контурних услова. Ово што такође представља битну разлику у два приказана типа прорачина је моделирање стенске масе. Брана, акумулација и стена, се у Tower-y морају посматрати као хомогене и изотропне целине, што код стене није случај тако да се тиме прави веома груба апроксимација. Преградна конструкција бране „Ђердап 1“ фундирана углавном на кристалистим шкриљцима који су тектонски оштећени. [МКЕ модел] Такође, приликом израде 3D модела, у корисничком алату су моделирани и раседи, па је услед тога настале значајне разлике у односу на прорачун у Tower-y.



Слика 31. Померање у правцу тока (регуларни рад дренажног система), прорачун у Tower-y



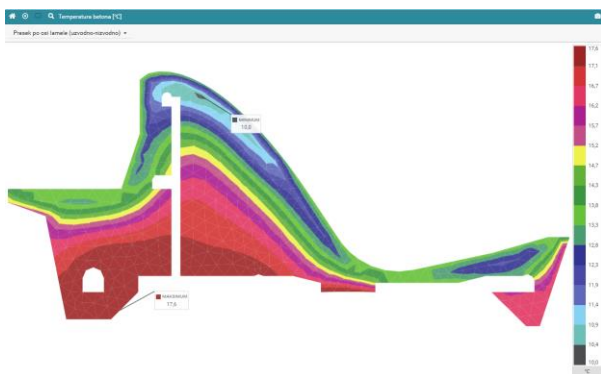
Слика 32. Померање у правцу тока (регуларни рад дренажног система), прорачун у корисничком алату

ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада треба истакнути два битна сегмента.

Први сегмент је уношење хидродинамичког оптерећења добијеног по методи Зангара на прецизан начин преко апроксимативног трапезног оптерећења.

Други сегмент су закључци из компаративне анализе напона и померања за два различита начина прорачуна, који указују на важност температурних утицаја приликом прорачуна (Слика 33) и на важност реалног моделирања стенске масе која представља јединствену целину са преградном конструкцијом.



Слика 33. Температура бетона ламеле 7 у Корисничком алату

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Савић Љ, *Увод у хидротехничке грађевине*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2009
- [2] Институт за водопривреду “Јарослав Черни” Београд, *Студија о правним, економским, техничким и безбедносним аспектима управљања високим бранама у Србији, Књига 4: Извештај о критеријумима и концепцији управљања безбедношћу брана*, Београд, 2024.
- [3] Muganda А., Миловановић Б., Кузмановић В. и Савић Љ. *Прорачун вертикалних сеизмичких хидродинамичких утицаја*, Зборник радова 5. међународне конференције Савремена достигнућа у грађевинарству, Суботица 2017
- [4] Институт за водопривреду “Јарослав Черни” Београд, *ХЕ „Ђердап 1“ Систем за управљање безбедношћу бране (верзија 2022), Књига 2: Извештај о интегралном МКЕ моделу српског дела бране ХЕ „Ђердап 1“, Свеска 1: Текстуални део*, Београд, 2023.
- [5] Институт за водопривреду “Јарослав Черни” Београд, *ХЕ „Ђердап 1“ Систем за управљање безбедношћу бране (верзија 2022), Књига 3: Извештај о корисничком подсистему за анализу стања и процеса*, Београд, 2023

ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC INFLUENCES ON THE SPILLWAY DAM BLOCK 7 OF
HYDROELECTRIC POWER STATION IRON GATE I

by

Dušan STEVANOVIĆ
Jaroslav Černi Water Institute

Bojan MILOVANOVIĆ, Vladan KUZMANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

The paper presents a hydrodynamic analysis using the example of the gravity concrete dam Iron Gate I. At the beginning of the study, alongside a detailed analytical calculation, research was conducted aimed at applying trapezoidal loading in software that would most effectively approximate the load calculated using the Zangar's method.

The focus of the work is a comparative analysis of two different calculations, with varying levels of modeling

detail. By analyzing the results of the calculations, conclusions are drawn, considering that certain deviations provide a basis for future research in the area of seismic hydrodynamic effects.

Key words: hydrodynamic effects, seismic analysis, Zangar's procedure, applying trapezoidal loading, stresses in the dam body, displacements of the dam