Hidrauličko dimenzioniranje vodne komore sa i bez zračnog prigušenja

Rodin, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:950081

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split







SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Rodin

Split, 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Marko Rodin

Hidrauličko dimenzioniranje vodne komore sa i bez zračnog prigušenja

Diplomski rad

Split, rujan 2020

Hidrauličko dimenzioniranje vodne komore sa i bez zračnog prigušenja

Sažetak:

U radu je prikazan matematički model funkcioniranja vodne komore u sustavu akumulacija, dovodni tuneli, vodna komora, te 3 tlačna cjevovoda kojima voda dolazi do 3 turbine. Napravljene su 4 varijante vodnih komora radi usporedbe različitih veličina otvora zračnog prigušenja kao i slučaj bez prigušenja. Proračun je napravljen u programskom jeziku FORTRAN95 i rezultati su prikazani u Microsoft Excelu.

Ključne riječi:

akumulacija, vodna komora, prigušenje, gornje proširenje, donje proširenje, fortran, hidroelektrana, turbine

Hydraulic sizing of the water chamber with and without air damping

Abstract:

The paper presents a mathematical model of the functioning of the surge chamber in the reservoir system, supply tunnels, surge chamber, and 3 pressure pipelines through which water reaches 3 turbines. Four variants of surge chambers were made to compare different sizes of air damping as well as the case without damping. The calculation was made in the FORTRAN95 programming language and the results are displayed in Microsoft Excel.

Keywords:

reservoir, surge chamber, damping, pressure tunnel, penstock, turbine, upper gallery, lower gallery

„Zahvaljujem se svojim roditeljima, obitelji i mentoru na podršci tijekom studiranja.“

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: **Marko Rodin**

BROJ INDEKSA: **775**

KATEDRA: **Katedra za hidromehaniku i hidrauliku**

PREDMET: **Hidraulika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Hidraulički proračun sustava akumulacija-dovodni tunel-vodna komora, u varijanti vodne komore s prigušenjem na vrhu i u varijanti bez tog prigušenja

Opis zadatka: Student će izraditi matematički model funkcioniranja vodne komore u sustavu akumulacija, dovodni tunel, vodna komora, te tri tlačna cjevovoda kojima voda dolazi do tri turbine. Vodnu komoru treba dimenzionirati za dvije varijante.
Prva varijanta je vodna komora s gornjim i donjim proširenjem i otvorenim vrhom komore (raščlanjena vodna komora), a druga varijanta je vodna komora s potrebnim proširenjima i zračnim prigušenjem na vrhu. Potrebno je postaviti sve dinamičke jednadžbe, jednadžbe kontinuiteta i jednadžbe snage za sve tri turbine, vodeći računa i o razinama donje vode u odvodnom kanalu. Osnovni zadatak je dimenzionirati vodne komore na razini idejnog projekta, za zadane veličine, te za varijante brzog, pojedinačnog i skupnog uključivanja jedne, dvije ili tri turbine. Vodna komora mora, za pojedine načine uključivanja i isključivanja turbine, biti dovoljne površine kako bi se oscilacije uvijek umirile, te kako bi minimalna postignuta razina vode u komori bila takva da zrak ne uđe u donji dio cilindrične vodne komore, uz odgovarajuću sigurnost. Postavljene diferencijalne jednadžbe treba riješiti numeričkom integracijom primjenom mješovitog postupka. Treba izraditi programsko rješenje u FORTRAN-u. Sve rezultate treba prikazati grafički na dovoljnom broju primjera, te usporediti vodne komore iz dvije varijante.

U Splitu, svibanj 2020.

Mentor Diplomskog rada:

Dr. sc. Davor Bojanić

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Doc. dr. sc. Ivo Andrić

Sadržaj

1. UVOD 2
2. TEORIJSKE OSNOVE MATEMATIČKOG MODELA 3
2.1. HIDRODINAMIČKI UVJETI I JEDNADŽBA VODNE KOMORE 3
2.2. STABILNOST SUSTAVA VODNE KOMORE 5
3. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA 10
3.1. OPIS MODELA 10
3.2. FORMULACIJA MATEMATIČKOG MODELA 11
3.2.1. EKSPLICITNO – IMPLICITNA METODA 13
3.3. NEWTON – RAPHSON METODA RJEŠAVANJA SUSTAVA NELINEARNIH JEDNADŽBI 15
3.4. SLAGANJE SUSTAVA JEDNADŽBI PREMA NEWTON–RAPHSONOVOJ METODI 17
4. PROGRAMSKO RJEŠENJE 21
4.1. ULAZNI PODACI 21
4.1.1. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE DOVODNOG TUNELA 21
4.1.2 PRORAČUN DONJE VODE 21
4.1.3. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE VODNIH KOMORA 24
4.1.4. SNAGA TURBINA 30
4.1.5. FORMIRANJE ULAZNOG FILE-A ZA DINAMIČKU ANALIZU 31
5. REZULTATI PRORAČUNA 34
5.1. VARIJANTA 1 - PROMJER OTVORA NA VRHU KOMORE IZNOSI 0.5 (m) 34
5.1.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON 34
5.1.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA 36
5.1.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON 37
5.2. VARIJANTA 2 - PROMJER OTVORA NA VRHU KOMORE IZNOSI 0.61 (m) 38
5.2.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON 38
5.2.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA 40
5.2.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON 41
5.3. VARIJANTA 3 - PROMJER OTVORA NA VRHU KOMORE IZNOSI 0.79 (m) 42
5.3.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON 42
5.3.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA 44
5.3.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON 45
5.4. VARIJANTA 4 - VODNA KOMORA SA GORNJIM I DONJIM PROŠIRENJEM 46
5.4.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON 46
5.4.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA 47
5.4.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON 48
5.5. ZAJEDNIČKI PRIKAZ REZULTATA 49
6. PROGRAMSKI KOD 51
7. ZAKLJUČAK 60
8. GRAFIČKI PRILOZI 63
9. LITERATURA 64

1. UVOD

Hipotetska hidroelektrana Čapljina je visokotlačno derivacijsko postrojenje koje čini akumulacija, dovodni tunel, vodna komora s prigušenjem, 3 tlačna cjevovoda kojima voda dolazi do 3 turbine, te odvodni kanal kojim voda otječe iz hidroelektrane prema rijeci.

U navedenom postrojenju akumulacija ima zadatak da svojom branom uspori vodu kako bi se postigao maksimalni energentski potencijal akumulirane vode, a svojom zapreminom da izravna promjenjivo otjecanje u trajanju nekog unaprijed određenog vremenskog perioda. Višak vode se, u odnosu na propuštanje kroz turbine hidroelektrane, akumulira, dok se, u periodu manjeg dotoka, pražnjenjem akumulacije nadoknađuje potrebna količina na turbinama. Dovodni tunel ima zadatak da dovede vodu iz akumulacije do vodne komore uz što manji gubitak raspoložive energetske visine. Voda iz dovodnog tunela provodi se do vodne komore, a zatim tlačnim cjevovodima do strojarnice, predajući energiju turbinama. Voda iz turbina, već s malim izlaznim brzinama, ulazi u tzv. aspirator koji difuznim oblikom još više smanjuje izlazne brzine. Ispuštanje vode sa malim izlaznim brzinama povećava bruto proizvedenu energiju na turbinama jer aspirator ima sisajuće djelovanje na vodu koja izlazi iz turbina.

Vodostaj u akumulaciji se nalazi na 220 (m n.m.).

Dovodni tunel dug je 8000 (m) i promjer mu je 9.0 (m). Na kraju dovodnog tunela smještena je vodna komora sa zračnim prigušenjem na vrhu komore, te s donjim proširenjem. Nizvodno od vodne komore nastavljaju se tri tlačna cjevovoda koja vode do zasunske komore. Strojarnica i prostor za transformatore su smješteni u jedinstvenom podzemnoj prostoriji-strojarnici. Do strojarnice i zasunske komore dolazi se pomoću pristupnog tunela. Sve tri turbine imaju instaliran protok od po 60 (m^3/s). Na difuzore turbina nastavlja se odvodni tunel koji prelazi u odvodni kanal. Odvodni kanal je širine 20 (m), uzdužnog nagiba od 3‰ te nagiba pokosa od 45°.

2. TEORIJSKE OSNOVE MATEMATIČKOG MODELA

2.1. HIDRODINAMIČKI UVJETI I JEDNADŽBA VODNE KOMORE

U navedenom sustavu mogu se posebno izdvojiti dio dovodnog sustava i vodna komora, te posebno tlačni cjevovodi i turbine. Naime, brzine promjena protoka u dovodnom sustavu su, u odnosu na promjene protoka u tlačnom dijelu, znatno manje, tako da se može smatrati da je u dovodnom tunelu voda nestlačiva. Radi nestlačivosti vode u dovodnom tunelu protok se uzduž tunela može smatrati konstantnim u svakom trenutku, tako da se tokom vremena u svim profilima jednako mijenja. Za razliku od dovodnog tunela, u tlačnom cjevovodu promjene brzina u profilu turbine su brze i kraće od potrebnog vremena proširenja poremećaja do vodne komore, tako da se trebaju uzimati u obzir efekti stišljivosti vode i cjevovoda (pojava vodnog udara). Hidrodinamika cijevnih sustava svodi se na primjenu Bernoullijeve jednadžbe u nestacionarnom režimu:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{{v_1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{{v_2}^2}{2g} + \Delta H_e + \frac{1}{g}\int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial v}{\partial t} dl \qquad (1)$$

gdje je:

z_1, p_1, v_1- geodetska kota, tlak i srednja brzina u uzvodnom profilu cijevi na određenoj stacionaži, mjereno po osi cijevi,

z_2, p_2, v_2- geodetska kota, tlak i srednja brzina u nizvodnom profilu cijevi na određenoj stacionaži, mjereno po osi cijevi,

ΔH_e- zbroj svih lokalnih i linijskih gubitaka energijske visine između dva profila,

$\frac{1}{g}\int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial v}{\partial t} dl$- integralna veličina razlike energijske visine između dvaju presjeka potrebna za ubrzavanje tekućine,

ρ- gustoća vode,

g- ubrzanje sile teže.

Za rješenje problema potrebno je uvesti još jednadžbu kontinuiteta.

Integralni član Bernoullijeve jednadžbe sadrži pod integralom promjenu brzine po vremenu, integrirajući je uzduž toka. Ako se uzduž cijevi, kao što je dovodni tunel, može smatrati da

nema zakašnjenja u promjeni brzine, tada promjena $\frac{\partial v}{\partial t}$ nije ovisna o stacionaži pa se može pisati:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{{v_1}^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{{v_2}^2}{2g} + \Delta H_e + \frac{L}{g}\frac{dv}{dt} \quad (2)$$

gdje je:

L- dužina po osi cijevi između profila.

Upotrebom na primjeru vodne komore dobiva se:

a) Dinamička jednadžba

$$h_A = h \pm \beta v^2 + \frac{L}{g}\frac{dv}{dt} \quad (3)$$

gdje je:

h_A -vodostaj u akumulaciji,

h -vodostaj u vodnoj komori,

$\frac{L}{g}\frac{dv}{dt}$ -član ubrzanja mase u dovodnom tunelu, pozitivan u slučaju ubrzanja,

βv^2 -ukupni gubici, pozitivni ako je brzina usmjerena prema vodnoj komori.

Ukupni gubici se određuju iz relacije:

$$\Delta H_e = \beta v^2 = \xi_u \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} + \xi_{iz}\frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

dakle, na uobičajen način, kao za stacionarno strujanje.

b) Jednadžba kontinuiteta

Zasniva se na održanju volumenskog protoka. Razlika dotoka u vodnu komoru i otjecanja iz vodne komore izaziva podizanje vodostaja u vodnoj komori.

Prema tome vrijedi:

$$Q - Q_T = A_k \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

gdje je :

$Q = A_D \cdot v$- protok u dovodnom tunelu u bilo kojem trenutku,

A_D- površina poprečnog presjeka dovodnog tunela,

$A_k \frac{dh}{dt} = Q_k$ - protok kojim se puni vodna komora,

A_k - površina poprečnog presjeka komore, općenito promjenjiva po visini,

$\frac{dh}{dt}$ - brzina gibanja površine vode u vodnoj komori.

2.2. STABILNOST SUSTAVA VODNE KOMORE

Hidroelektrana koja je uključena u hidroenergetski sustav treba proizvoditi struju određene frekvencije. Elektroenergetski sustav ne trpi promjene frekvencije, tako da je sustav turbina i generatora posebno reguliran da zadovolji navedeni uvjet. Suvremena pravila tehnike eksploatacije energetskih mreža zahtijevaju konstantnost frekvencije izmjenične struje reda veličine ±0.2% od normalne veličine. Frekvencija električne struje, proizvedena određenim generatorom, ovisi o kutnoj brzini okretaja rotora generatora. Ta zavisnost određena je izrazom:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \tag{6}$$

gdje je:

f - frekvencija struje u periodima (1/s),

n - broj okretaja u minuti,

p - broj parova polova generatora.

Gibanje rotora agregata (turbina + generator) određena je osnovnom dinamičkom jednadžbom stroja.

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_V - M_O \tag{7}$$

gdje je:

I - polarni moment tromosti obrtnih dijelova agregata,

ω - kutna brzina agregata,

M_V - moment vanjskih sila koje pokreću stroj,

M_O - moment sila otpora, nastalih opterećenjem generatora i drugih, disipativnih sila.

Uvjet konstantnosti frekvencije zahtijeva konstantnu kutnu brzinu, to jest da vrijedi $\frac{dw}{dt}$ = 0, tako da je potrebno ispuniti uvjet:

$$M_V = M_O \tag{8}$$

što znači da moment vanjskih pokretačkih sila mora biti jednak momentu sila otpora.

Moment vanjskih sila na turbini određen je sa:

$$M_V = \frac{\rho g Q H \eta}{\omega} \tag{9}$$

gdje je iskorištena snaga toka vode:

$$N = \rho g Q H \eta \tag{10}$$

Slijedi da hidroelektrana u pogonu treba raditi u režimu konstantne snage.

Snaga na turbini, odnosno agregatu, određena je veličinom protoka Q i visinskom razlikom vodostaja u akumulaciji i nizvodnom kanalu (energijski pad H), kao i koeficijentom iskorištenja η turbine i agregata. Hidraulički sustav dovoda je takav da se sva tri parametra mijenjaju kod bilo koje promjene protoka ili piezometarske visine, ispred i iza turbine. Da bi agregat proizveo struju konstantne frekvencije, informacija o promjeni broja okretaja rotora agregata prenosi se na poseban uređaj, regulator snage, koji odmah daje impulse za promjenu položaja lopatica turbine, kako bi se protok Q i pad H prilagodili, tako da snaga agregata ostane konstantna. Iz izraza za snagu zaključujemo da se sa smanjenjem pada H, djelovanjem regulatora snage, povećava protok i obrnuto. Upuštanje agregata u pogon na određenu snagu prazni vodnu komoru, u kojoj vodostaj opada, čime se smanjuje pad H na turbinama. Da bi turbina održala režim konstantne snage, regulator povećava protok Q, te time dodatno djeluje na povećano pražnjenje vodne komore. Sličan, ali obrnuti trend postoji i u fazi dizanja vodostaja u vodnoj komori. Regulator smanjuje protok i povećava oscilaciju, dakle regulator turbina ima tendenciju povećanja oscilacija. Ako je vodna komora

nepovoljno dimenzionirana, otpori strujanja su slabiji od utjecaja regulatora, te se pojavljuju progresivne oscilacije.

Vodna komora treba biti tako dimenzionirana da se oscilacije u svakom slučaju amortiziraju. Ispitivanje stabilnosti vodne komore provodi se kod najnižeg vodostaja u akumulaciji, najvišeg vodostaja donje vode, za varijantu glatkog tunela i varijantu parcijalnog otvaranja sa 50% snage N na 100% N. Problem stabilnosti vodne komore svodi se na rješavanje diferencijalnih jednadžbi.

a) Jednadžba kontinuiteta:

$$Q - Q_T = A_k \frac{dh}{dt} \tag{11}$$

b) Dinamička jednadžba:

$$h_A = h \pm \beta v^2 + \frac{L}{g}\frac{dv}{dt} \tag{12}$$

c) Jednadžba konstantne snage turbine, N=const.

$$N = \rho g Q_{T0} H_0 \eta_0 = \rho g Q_T H \eta \tag{13}$$

Nakon diferenciranja po vremenu imamo:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{du}{dt} + \frac{A_k}{A_D}\frac{d^2z}{dt^2} \tag{14}$$

Uvjet konstantnosti snage bit će:

$$Q_{T0} H_0 = Q_T (H_{ST} + z) \tag{15}$$

gdje se smatra da je η = const. Dijeleći gornji izraz sa A_D , dobije se:

$$\frac{Q_{T0} H_0}{A_D} = \frac{Q_T}{A_D}(H_{ST} + z) \tag{16}$$

Nakon diferenciranja po vremenu, uvodeći $u = \frac{Q_T}{A_D}$:

$$\frac{du}{dt} = \frac{-u_0 H_0}{(H_{st} + z)^2}\frac{dz}{dt} \tag{17}$$

Uvodeći (14) i (17) u dinamičku jednadžbu dobije se:

$$\frac{L}{g}\frac{A_k}{A_D}\frac{d^2z}{dt^2}+\frac{L}{g}\left[\frac{u_0H_0}{(H_{st}+z)^2}\right]\frac{dz}{dt}+z+\beta v^2=0 \tag{18}$$

Ova diferencijalna jednadžba (18) ne može se u općem slučaju egzaktno integrirati pa se rješava približno. U slučaju malih amplituda 'z' oscilacija vodostaja u vodnoj komori, mogu se produkti malih vrijednosti viših redova izostaviti u odnosu na ostale članove, tako da se jednadžba linearizira:

$$\frac{d^2z}{dt^2}+2a\frac{dz}{dt}+bz=0 \tag{19}$$

Njemački hidrauličar D.Thoma prvi je, na ovakav način, izveo kriterij za stabilnost vodne komore. Da bi cilindrična vodna komora bila stabilna mora imati minimalnu površinu:

$$A_k \geq A_{TH}=\frac{v_0^2}{2g}\cdot\frac{LA_D}{\Delta h_0(H_{st}-\Delta h_0)} \tag{20}$$

Granična vrijednost Thominog kriterija:

$$\frac{L}{g}\cdot\frac{A_D}{A_K}\cdot\frac{v_0^2}{{\Delta h_0}^2}>40 \tag{21}$$

Veličina ε:

$$\varepsilon=\frac{L}{g}\cdot\frac{A_D}{A_K}\cdot\frac{v_0^2}{{\Delta h_0}^2}=\frac{z^2}{{\Delta h_0}^2} \tag{22}$$

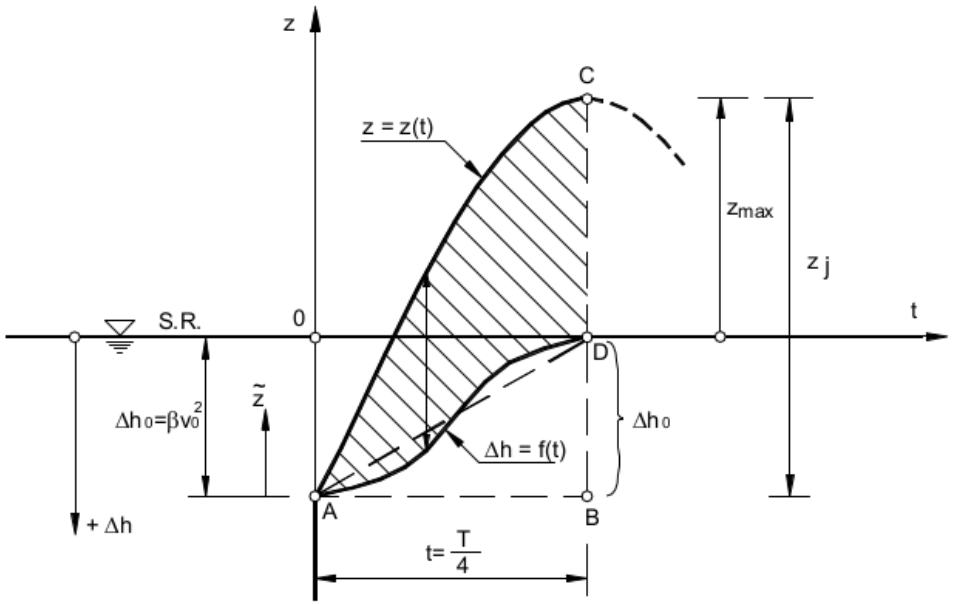
zove se parametar VOGTA-a. Ako je sustav dovodni tunel – vodna komora – tlačni cjevovod takvih dimenzija da ima 20 <ε< 40, tada se prema Jaeger-u može uzeti:

$$A_J=n^jA_{Th} \tag{23}$$

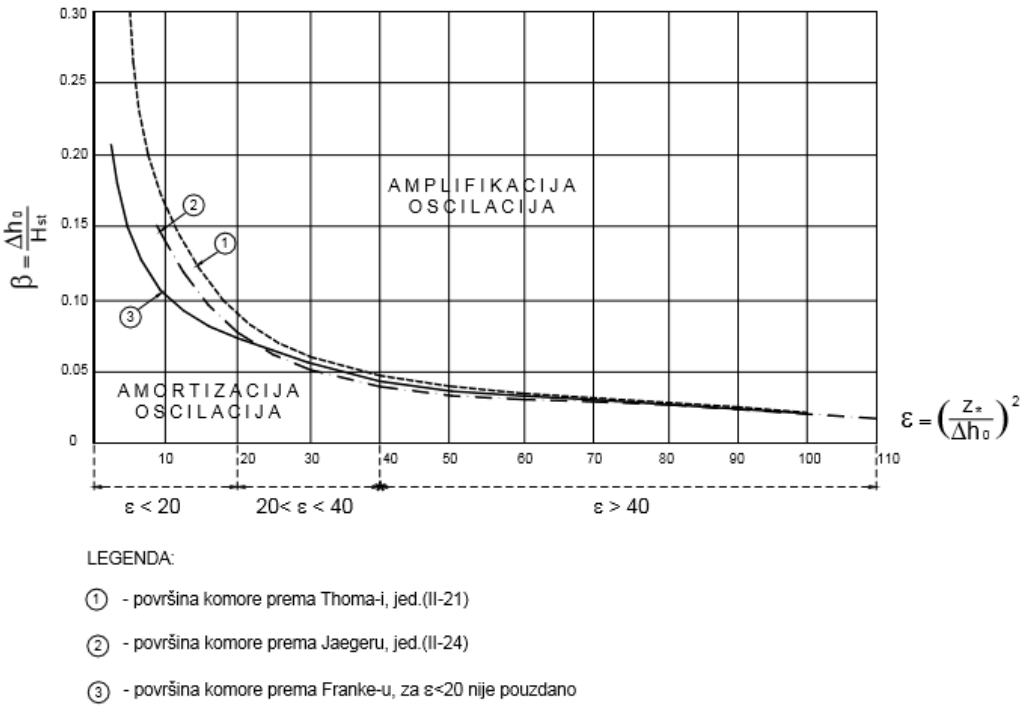
gdje je Jaeger-ov faktor povećanja površine vodne komore:

(24)

$$n^j = 1 + 0.482\frac{z^j}{(H_{st} - \Delta h_0)}$$



*Skica 1: Maksimalna amplituda z**

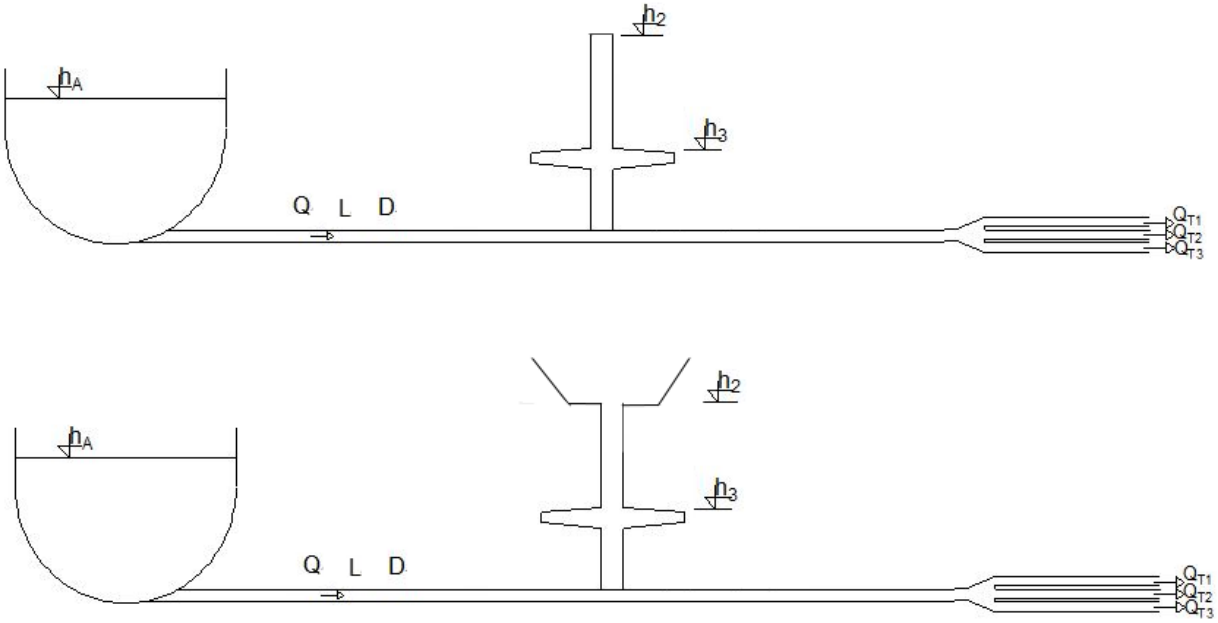


Dijagram 1: Određivanje stabilnosti cilindrične vodne komore

3. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA

3.1. OPIS MODELA

Cilj izrade matematičkog modela je dimenzioniranje vodne komore za zadane veličine, za varijante brzog pojedinačnog ili skupnog uključivanja i isključivanja turbina. Vodna komora mora, za pojedinačne načine uključivanja i isključivanja turbina, biti dovoljne površine kako bi se oscilacije uvijek umirile, te kako bi minimalna postignuta razina vode u vodnoj komori bila takva da zrak ne uđe u donji dio cilindrične vodne komore, tj. da vodostaj u vodnoj komori ne padne ispod kote dna donjeg proširenja, uz dovoljnu sigurnost.



Skica 2: Sustav akumulacija-dovodni tunel-vodna komora-turbine

3.2. FORMULACIJA MATEMATIČKOG MODELA

Ponašanje sustava opisano je sljedećim jednadžbama:

a) Dinamička jednadžba za dovodni tunel

$$h_A = h_{ke} \pm \beta \;\; Q_D^2 + \frac{L}{gA_D} \cdot \frac{dQ_D}{dt} \tag{25}$$

b) Jednadžba snage prve turbine

$$N_1^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T1}^{K+1} \cdot \left(h_{ke}^{k+1} - h_D^{k+1}\right) \cdot \eta \tag{26}$$

c) Jednadžba snage druge turbine

$$N_2^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot \left(h_{ke}^{k+1} - h_D^{k+1}\right) \cdot \eta \tag{27}$$

d) Jednadžba snage treće turbine

$$N_3^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot \left(h_{ke}^{k+1} - h_D^{k+1}\right) \cdot \eta$$

e) Jednadžba kontinuiteta za vodnu komoru

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = Q_D - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{T3} \tag{28}$$

f) Jednadžba protoka zraka iz vodne komore

$$Q_z^{K+1} = \sqrt{\frac{2.0 \cdot (p^{K+1} - p_0)}{\rho_z}} \cdot 0.61 \cdot \frac{D_{otv}^2 \cdot \pi}{4.0} \tag{29}$$

g) Jednadžba stanja plina

$$(V_0 - V_i^{K+1})^n \cdot p_0 = (V^{K+1})^n \cdot p^{(K+1)} \tag{30}$$

gdje je:

V_0 - volumen zraka iznad razine vode u vodnoj komori na početku,

V_i^{K+1} - volumen zraka koji je istekao iz zračnog prostora vodne komore kroz otvor na vrhu do trenutka k+1,

V^{K+1} - volumen zraka iznad razine vode u vodnoj komori u trenutku k+1,

$p^{(K+1)}$ - tlak zraka iznad površine vode u vodnoj komori u trenutku k+1.

Jednadžba kontinuiteta i dinamička jednadžba se integriraju u nekom konačnom vremenskom intervalu $[t^k, t^{k+1}]$. Cjelovito stanje sustava je poznato na početku intervala ($t = t^k$), a na kraju intervala ($t = t^{k+1}$) se proračunava novo stanje sustava.

Oznake k i $k+1$, gdje je $k = 1,2,3,\dots,n$ označavaju stanje sustava u pojedinom trenutku, odnosno u pojedinom vremenskom koraku.

Integralni oblik sustava jednadžbi:

a) Dinamička jednadžba za dovodni tunel

$$\int_k^{k+1} dQ_D = \int_k^{k+1} \frac{(h_A - h_k) \pm \beta \cdot |Q_D| \cdot Q_D}{L/g \cdot A} dt \tag{31}$$

b) Jednadžba kontinuiteta za vodnu komoru

$$\int_k^{k+1} dh_k = \int_k^{k+1} \left(\frac{Q_D - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{T3}}{A_k}\right) dt \tag{32}$$

Nakon integracije lijeve strane jednadžbi dobije se:

a) Jednadžba kontinuiteta za vodnu komoru

$$h_k^{K+1} = h_k^K + \int_k^{k+1} \left(\frac{Q_D - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{T3}}{A_k}\right) dt \tag{33}$$

b) Jednadžba kontinuiteta za dovodni tunel

$$Q_D^{K+1} = Q_D^K + \int_k^{k+1} \frac{(h_A - h_k) \pm \beta \cdot |Q_D| \cdot Q_D}{L/g \cdot A} dt \tag{34}$$

Desna strana jednadžbi (34) i (35) se ne može direktno integrirati zbog složenih pod-integralnih funkcija. Za kraće vremenske intervale mogu se primijeniti neke od metoda numeričke integracije i dovoljno dobro izračunati integrale. U ovoj formulaciji je korišten implicitno-eksplicitni postupak tj. mješoviti postupak s parametrom integracije Θ=0,5. Jednadžbe snage turbina, protoka zraka i stanja plina nemaju integralne oblike jer se u njima ne pojavljuje diferencijal.

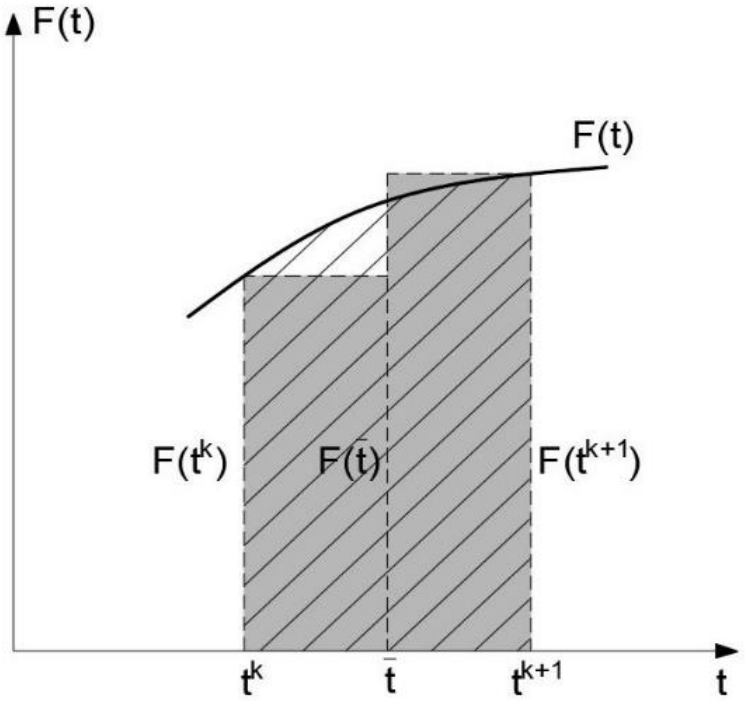
3.2.1. EKSPLICITNO – IMPLICITNA METODA

Korištenje mješovitog postupka objasnit će se na primjeru jednadžbe:

$$\frac{dy}{dt} = F(t) \tag{35}$$

Ako se separiraju varijable i integrira funkciju u vremenskom intervalu $[t^k, t^{k+1}]$ dobit će se sljedeća jednadžba:

$$y^{k+1} = y^k + \int_k^{k+1} F(t)dt \tag{36}$$



Skica 3: Numerička aproksimacija integrala funkcije F(t)

Integral funkcije $F(t)$ predstavlja površinu ispod krivulje u intervalu $[t^k, t^{k+1}]$, te se aproksimira pravokutnim površinama.

Po teoremu o srednjoj vrijednosti integrala može se napisati da je:

$$y^{k+1} - y^k = F(\tau) \cdot (t^{k+1} - t^k) \tag{37}$$

Gdje srednji vremenski korak uzima vrijednost $t^k \leq \tau \leq t^{k+1}$.

Funkcijska vrijednost $F(t)$ je nepoznata, ali se može aproksimirati s površinama dvaju pravokutnika, pa je konačna aproksimacija integrala:

$$y^{k+1} - y^k = (1-\theta) \cdot F(t^k) \cdot (t^{k+1} - t^k) + \theta \cdot F(t^{k+1}) \cdot (t^{k+1} - t^k) \tag{38}$$

Vrijednost člana jednadžbe $F(t^k) \cdot (t^{k+1} - t^k)$ je eksplicitni dio aproksimacije, jer se aproksimira na temelju poznatog stanja na početku vremenskog intervala, a vrijednost $F(t^{k+1}) \cdot (t^{k+1} - t^k)$ je implicitni dio jer se aproksimira na temelju nepoznatog stanja na kraju vremenskog intervala.

Parametar parcijalne integracije θ ima ulogu raspodjele eksplicitne i implicitne vrijednosti. θ uzima vrijednost $0 \leq \theta \leq 1$, i eksperimentalno se pokazalo da se najbolji rezultati dobiju s vrijednosti $\theta = 0{,}55$.

Nakon primjene mješovite metode na sustav jednadžbi dobije se konačan oblik jednadžbi za konačan vremenski period.

a) Dinamička jednadžba za dovodni tunel

$$Q^{K+1} = Q^K + (1-\theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_D}{L} \cdot \left(h_A - h_{ke}^K - \beta^K \cdot \left|Q^K\right| \cdot Q^K\right) + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_D}{L} \cdot \left(h_A - h_{ke}^{K+1} - \beta^{K+1} \cdot \left|Q^{K+1}\right| \cdot Q^{K+1}\right) \tag{39}$$

b) Jednadžba kontinuiteta za vodnu komoru

$$h_k^{K+1} = h_k^K + (1-\theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q^K - Q_{T1}^K - Q_{T2}^K - Q_{T3}^K}{A^K} + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q^{K+1} - Q_{T1}^{K+1} - Q_{T2}^{K+1} - Q_{T3}^{K+1}}{A^{K+1}}$$

c) Jednadžba snage prve turbine

$$N_1^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T1}^{K+1} \cdot \left(h_{ke}^{k+1} - h_D^{k+1}\right) \cdot \eta \tag{40}$$

d) Jednadžba snage druge turbine

$$N_2^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot \left(h_{ke}^{k+1} - h_D^{k+1}\right) \cdot \eta \tag{41}$$

e) Jednadžba snage treće turbine

$$N_3^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot \left(h_{ke}^{k+1} - h_D^{k+1}\right) \cdot \eta \tag{42}$$

c) Jednadžba protoka zraka

$$Q_z^{K+1} = \sqrt{\frac{2.0 \cdot (p^{K+1} - p_0)}{\rho_z}} \cdot 0.61 \cdot \frac{D_{otv}^2 \cdot \pi}{4.0} \tag{43}$$

d) Jednadžba stanja plina

$$(V_0 - V_i^{K+1})^n \cdot p_0 = (V^{K+1})^n \cdot p^{(K+1)} \tag{44}$$

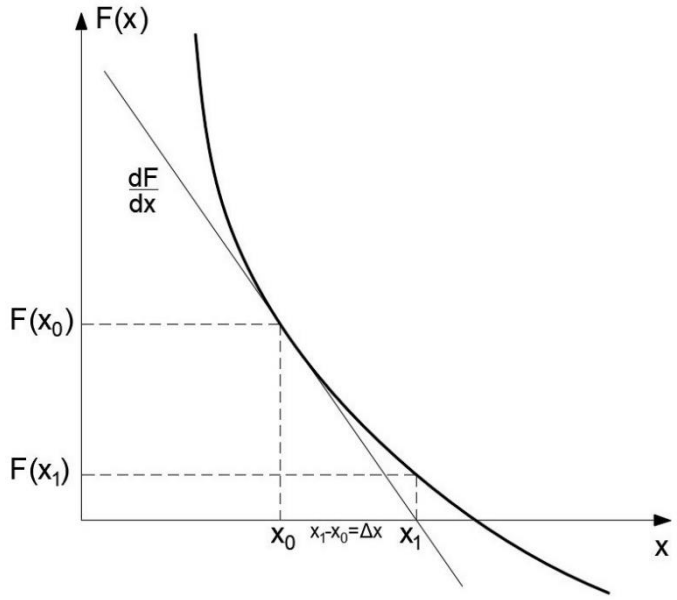
Jednadžbe koje opisuju sustav čine nelinearni sustav od sedam jednadžbi sa sedam nepoznanica:

$$Q^{K+1}, Q_{T1}^{K+1}, Q_{T2}^{K+1}, Q_{T3}^{K+1}, h_1^{K+1}, Q_z^{K+1}, p^{K+1}.$$

3.3. NEWTON – RAPHSON METODA RJEŠAVANJA SUSTAVA NELINEARNIH JEDNADŽBI

Newton-ova metoda se često koristi za numeričko rješavanje nelinearnih jednadžbi, a temelji se na korištenju linearne aproksimacije za rješavanje jednadžbi.

Neka je $F(x)$ neka opća funkcija i neka je 'r' rješenje za $F(x) = 0$. Prvi korak u nalaženju rješenja 'r' je pretpostavka rješenja x_0. Iz prve pretpostavke računamo rješenje x_1 koje je bliža rješenju 'r' te ono postaje početna vrijednost za sljedeći korak iteracije i tako iterativno računamo rješenja dok razlika pretpostavljene i izračunate veličine postane približno jednaka $x_n - r \approx 0$, odnosno do zadovoljavajuće točnosti.



Graf 1: Funkcija F(x)

Za pretpostavljenu vrijednost x_0 provuče se tangenta na graf $F(x)$. Na mjestu gdje tangenta siječe os x dobivena je pretpostavka x_1 za sljedeću iteraciju. Postupak se nastavlja dok se ne nađe točka u kojoj graf funkcije F(x) siječe os x, te samim time rješenje $F(x) = 0$.

Nagib tangente je zapravo derivacija funkcije u točki za koju je tangenta provučena.

$$\frac{dF}{dx} = \frac{-F(x_0)}{x_1 - x_0} \tag{45}$$

$$x_1 = x_0 - \frac{F(x_0)}{\frac{dF(x)}{dx}} \tag{46}$$

Općenito se može zapisati:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{\frac{dF(x)}{dx}} \tag{47}$$

$$\frac{dF}{dx} \cdot \Delta x = -F(x) \tag{48}$$

gdje je:

$$\Delta x = x_{n+1} - x_n \tag{49}$$

Postupak se ponavlja iterativno dok se ne dobije $\Delta x \approx 0$.

3.4. SLAGANJE SUSTAVA JEDNADŽBI PREMA NEWTON–RAPHSONOVOJ METODI

Prethodno navedeni sustav od sedam nelinearnih jednadžbi sa sedam nepoznanica potrebno je preformulirati da bi se mogla primijeniti Newtonova metoda. Prvi korak je prebacivanje svih članova na jednu stranu jednadžbe i izjednačavanje s nulom, te nalaženje derivacija funkcije po svih sedam nepoznatih varijabli.

a) Funkcija F1

$$F_1 = Q^K + (1-\theta)\cdot\Delta t\cdot\frac{gA_D}{L}\cdot\left(h_A - h_{ke}^K - \beta^K\cdot\left|Q^K\right|\cdot Q^K\right) + \theta\cdot\Delta t\cdot\frac{gA_D}{L}$$
$$\cdot\left(h_A - h_{ke}^{K+1} - \beta^{K+1}\cdot\left|Q^{K+1}\right|\cdot Q^{K+1}\right) - Q^{K+1} = 0$$

Derivacija funkcije F1 po nepoznatim varijablama:

$$FF(1,1) = \frac{\partial F_1}{\partial Q^{K+1}} = 2.0\cdot Q^{K+1}\cdot\Theta\cdot\Delta t\cdot\frac{g\cdot A_D}{L}\cdot\beta^{K+1} - 1$$

$$FF(1,5) = \frac{\partial F_1}{\partial h_k^{K+1}} = \Theta\cdot\Delta t\cdot\frac{g\cdot A_D}{L}$$

Derivacije funkcije F1 po ostalim varijablama su jednake 0.

b) Funkcija F2

$$F_2 = \rho\cdot g\cdot(h_{ke}^{K+1} - h_D)\cdot Q_{T1}^{K+1}\cdot\eta - N_{T1}^{K+1} = 0$$

Derivacije funkcije F2 po varijablama su:

$$FF(2,2) = \frac{\partial F_2}{\partial Q_{T1}^{K+1}} = \rho\cdot g\cdot(h_{ke}^{K+1} - h_D)\cdot\eta$$

$$FF(2,5) = \frac{\partial F_2}{\partial h_k^{K+1}} = \rho\cdot g\cdot Q_{T1}^{K+1}\cdot\eta$$

$$FF(2,7) = \frac{\partial F_2}{\partial p^{K+1}} = \rho\cdot g\cdot Q_{T1}^{K+1}\cdot\eta\cdot\frac{\partial h_{ke}^{K+1}}{\partial p^{K+1}}$$

Derivacije po ostalim varijablama su jednake 0.

c) Funkcija F3

$$F_3 = \rho \cdot g \cdot (h_{ke}^{K+1} - h_D) \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot \eta - N_{T2}^{K+1} = 0$$

Derivacije funkcije F3 po varijablama su:

$$FF(3,3) = \frac{\partial F_3}{\partial Q_{T2}^{K+1}} = \rho \cdot g \cdot (h_{ke}^{K+1} - h_D) \cdot \eta$$

$$FF(3,5) = \frac{\partial F_3}{\partial h_k^{K+1}} = \rho \cdot g \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot \eta$$

$$FF(3,7) = \frac{\partial F_3}{\partial p^{K+1}} = \rho \cdot g \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot \eta \cdot \frac{\partial h_{ke}^{K+1}}{\partial p^{K+1}}$$

Derivacije po ostalim varijablama su jednake 0.

d) Funkcija F4

$$F_4 = \rho \cdot g \cdot (h_{ke}^{K+1} - h_D) \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot \eta - N_{T3}^{K+1} = 0$$

Derivacije funkcije F4 po varijablama su:

$$FF(4,4) = \frac{\partial F_4}{\partial Q_{T3}^{K+1}} = \rho \cdot g \cdot (h_{ke}^{K+1} - h_D) \cdot \eta$$

$$FF(4,5) = \frac{\partial F_4}{\partial h_k^{K+1}} = \rho \cdot g \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot \eta$$

$$FF(4,7) = \frac{\partial F_4}{\partial p^{K+1}} = \rho \cdot g \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot \eta \cdot \frac{\partial h_{ke}^{K+1}}{\partial p^{K+1}}$$

Derivacije po ostalim varijablama su jednake 0.

e) Funkcija F5

$$F_5 = h_k^K + (1-\theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q^K - Q_{T1}^K - Q_{T2}^K - Q_{T3}^K}{A^K} + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q^{K+1} - Q_{T1}^{K+1} - Q_{T2}^{K+1} - Q_{T3}^{K+1}}{A^{K+1}} - h_K^{K+1} = 0$$

Derivacije funkcije F5 po varijablama su:

$$FF(5,1) = \frac{\partial F_5}{\partial Q^{K+1}} = \frac{\theta \cdot \Delta t}{A^{K+1}}$$

$$FF(5,2) = \frac{\partial F_5}{\partial Q_{T1}^{K+1}} = \frac{-\theta \cdot \Delta t}{A^{K+1}}$$

$$FF(5,3) = \frac{\partial F_5}{\partial Q_{T2}^{K+1}} = \frac{-\theta \cdot \Delta t}{A^{K+1}}$$

$$FF(5,4) = \frac{\partial F_5}{\partial Q_{T3}^{K+1}} = \frac{-\theta \cdot \Delta t}{A^{K+1}}$$

$$FF(5,5) = \frac{\partial F_5}{\partial h_k^{K+1}} = -1$$

Derivacije po ostalim varijablama su jednake 0.

f) Funkcija F6

$$F_6 = \sqrt{\frac{2.0 \cdot (p^{K+1} - p_0)}{\rho_z}} \cdot 0.61 \cdot \frac{D_0^2 \cdot \pi}{4.0} - Q_z^{K+1} = 0$$

Derivacije funkcije F6 po varijablama su:

$$FF(6,6) = \frac{\partial F_6}{\partial Q_z^{K+1}} = -1.00$$

$$FF(6,7) = \frac{\partial F_6}{\partial p^{K+1}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2.0 \cdot (p^{K+1} - p_0)}{\rho_z}}} \cdot 0.61 \cdot \frac{D_0^2 \cdot \pi}{4.0 \cdot \rho_z}$$

Derivacije po ostalim varijablama su jednake 0.

g) Funkcija F7

$$F_7 = [V_0 - V_i^K - Q_z^K \cdot (1-\theta) \cdot \Delta t - Q_z^{K+1} \cdot \theta \cdot \Delta t]^n \cdot p_0 - (V^{K+1})^n \cdot p^{K+1} = 0$$

Derivacije funkcije F7 po varijablama su:

$$FF(7,6) = \frac{\partial F_7}{\partial Q_z^{K+1}} = n \cdot [V_0 - V_i^K - Q_z^K \cdot (1-\theta) \cdot \Delta t - Q_z^{K+1} \cdot \theta \cdot \Delta t]^{(n-1)} \cdot p_0 \cdot (-\theta \cdot \Delta t)$$

$$FF(7,7) = \frac{\partial F_7}{\partial p^{K+1}} = -(V^{K+1})^n$$

Derivacije po ostalim varijablama su jednake 0.

Sustav jednadžbi po Newton-ovoj metodi može se zapisati u matričnom obliku:

$$[J] \cdot [\Delta] = [-F] \tag{50}$$

$$\begin{matrix} FF(1,1) & FF(1,2) & FF(1,3) & FF(1,4) & FF(1,5) & FF(1,6) & FF(1,7) \\ FF(2,1) & FF(2,2) & FF(2,3) & FF(2,4) & FF(2,5) & FF(2,6) & FF(2,7) \\ FF(3,1) & FF(3,2) & FF(3,3) & FF(3,4) & FF(3,5) & FF(3,6) & FF(3,7) \\ FF(4,1) & FF(4,2) & FF(4,3) & FF(4,4) & FF(4,5) & FF(4,6) & FF(4,7) \\ FF(5,1) & FF(5,2) & FF(5,3) & FF(5,4) & FF(5,5) & FF(5,6) & FF(5,7) \\ FF(6,1) & FF(6,2) & FF(6,3) & FF(6,4) & FF(6,5) & FF(6,6) & FF(6,7) \\ FF(7,1) & FF(7,2) & FF(7,3) & FF(7,4) & FF(7,5) & FF(7,6) & FF(7,7) \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \Delta Q^{K+1} \\ \Delta Q_{T1}^{K+1} \\ \Delta Q_{T2}^{K+1} \\ \Delta Q_{T3}^{K+1} \\ \Delta h^{K+1} \\ \Delta Q_z^{K+1} \\ \Delta p^{K+1} \end{matrix} = \begin{matrix} -F1 \\ -F2 \\ -F3 \\ -F4 \\ -F5 \\ -F6 \\ -F7 \end{matrix}$$

Rješenje sustava je vektor prirasta [Δ]:

$$[\Delta] = [J]^{-1} \cdot [-F] \tag{51}$$

Popravljene vrijednosti traženog rješenja na kraju vremenskog intervala dobiju se tako što se prethodno izračunate veličine (ili pretpostavljene u prvom koraku) povećaju za izračunate pojedine priraste:

$$Q^{K+1,novo} = Q^{K+1,staro} + \Delta Q$$

$$Q_{T1}^{K+1,novo} = Q_{T1}^{K+1,staro} + \Delta Q_{T1}$$

$$Q_{T2}^{K+1,novo} = Q_{T2}^{K+1,staro} + \Delta Q_{T2}$$

$$Q_{T3}^{K+1,novo} = Q_{T3}^{K+1,staro} + \Delta Q_{T3}$$

$$h_1^{K+1,novo} = h_1^{K+1,staro} + \Delta h_1$$

$$Q_z^{K+1,novo} = Q_z^{K+1,staro} + \Delta Q_z$$

$$p^{K+1,novo} = p^{K+1,staro} + \Delta p$$

Navedeni sustav jednadžbi rješavan je pomoću programskog rješenja u Fortranu 95.

4. PROGRAMSKO RJEŠENJE

4.1. ULAZNI PODACI

4.1.1. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE DOVODNOG TUNELA

Dovodni tunel je dug 8000 (m), promjera 9.0 (m). Apsolutna hidraulička hrapavost iznosi ε=0.0015 (m), a koeficijent lokalnog gubitka na ulazu $\xi_{ulaza} = 1.0$.

Na kraju tunela smještena je vodna komora, a nizvodno od vodne komore dovodni tunel se odjeljuje na 3 tlačna cjevovoda koji vode prema strojarnici na turbine.

4.1.2 PRORAČUN DONJE VODE

Krivulja protoka donje vode u odvodnom kanalu određena je primjenom Manning-Strickler-ove formule, i to iterativnim postupkom za raspon protoka od 0.0 (m^3/s) do 200.0 (m^3/s). Za svaki protok izračunata je normalna dubina y_d.

$$v = K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_0} \tag{52}$$

gdje je:

K - Stricklerov koeficijent hrapavosti (K=50,0)

R - hidraulički radijus (R=A/O)

I_0 - nagib dna korita $I_0 = 0{,}003$

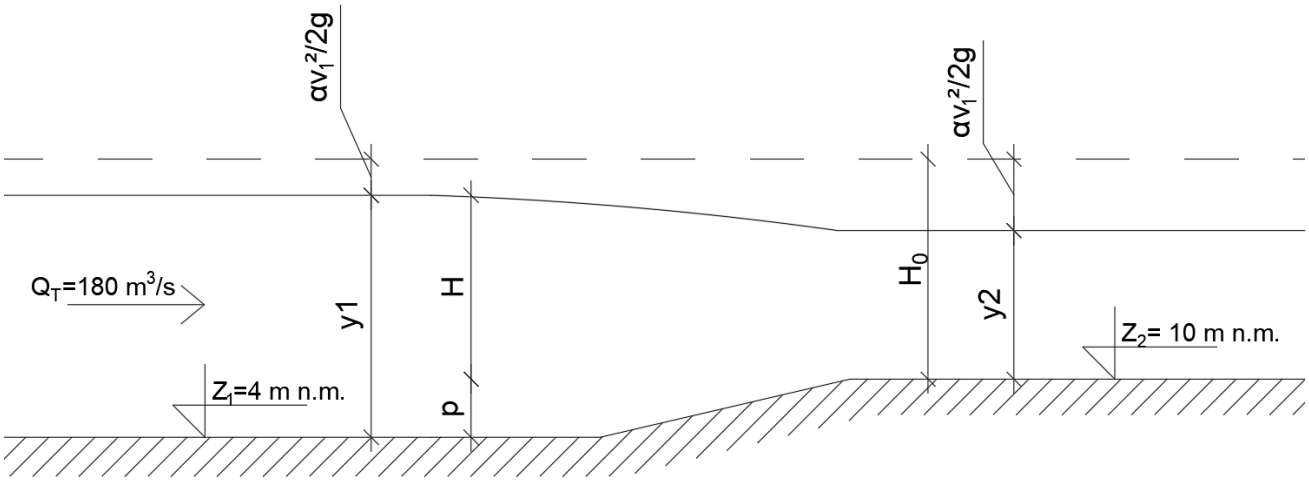
Nadalje:

$$Q = v \cdot \mathrm{A} \tag{53}$$

Iz čega slijedi da je:

$$Q = K \cdot \frac{A^{5/3}}{O^{2/3}} \cdot \sqrt{I_0} \tag{54}$$

Postavljanjem Bernoullijeve jednadžbe nizvodno, te na mjestu bučnice dobije se da je dubina vode u bučnici:



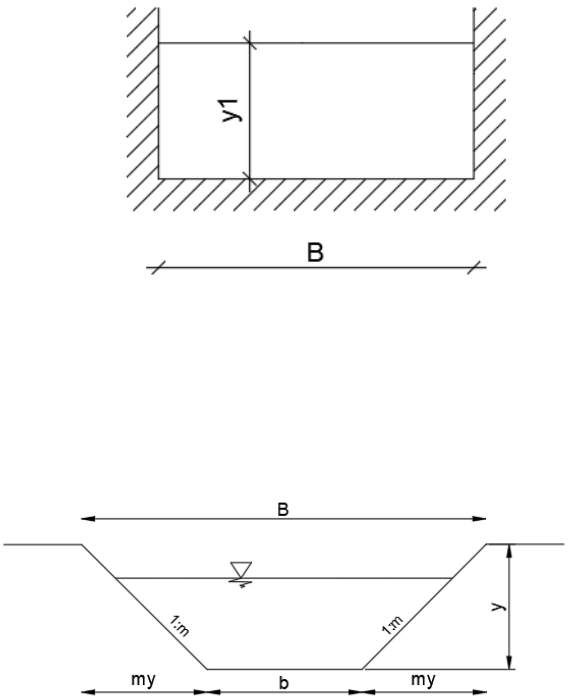
Skica 4: Uzdužni presjek korita na spoju bučnice i odvodnog kanala

$$H_0 = y_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \tag{55}$$

$$p + H = y_1 = H_0 - y_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \tag{56}$$

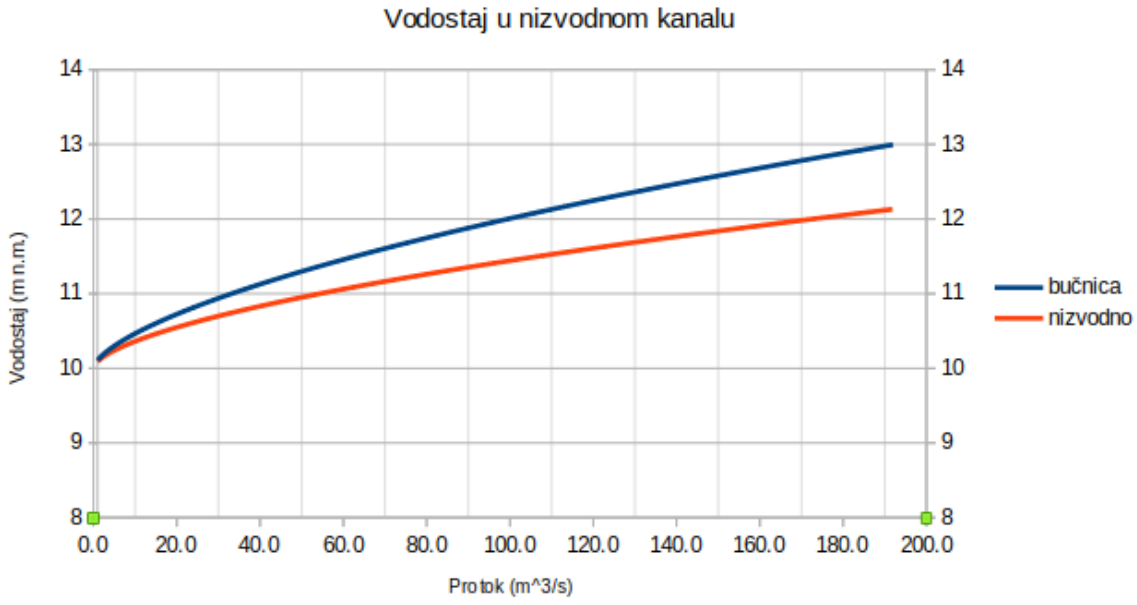
$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \ y_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \tag{57}$$

$$y_1 = \ y_2 + (z_2 - z_1) + \frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2) \tag{58}$$



Skica 5: Poprečni poprečni presjek korita kanala bučnice i nizvodno od bučnice

Širina dna korita iznosi B = 20 (m), a nagib pokosa je 1:1. Širina bučnice iznosi B=20 (m).



Graf 2 : Vodostaji u nizvodnom kanalu i u bučnici

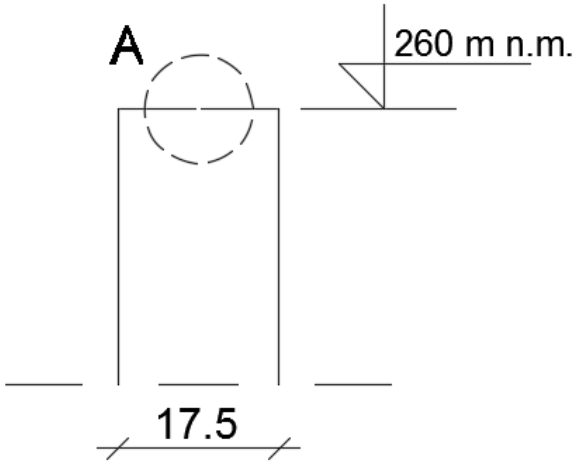
4.1.3. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE VODNIH KOMORA

U sustavu hidroelektrane definirane su četiri varijante vodne komore od kojih su tri varijante vodne komore sa donjim proširenjem i prigušenjem na vrhu komore, te jedna varijanta sa gornjim i donjim proširenjem bez prigušenja, koje će se uspoređivati.

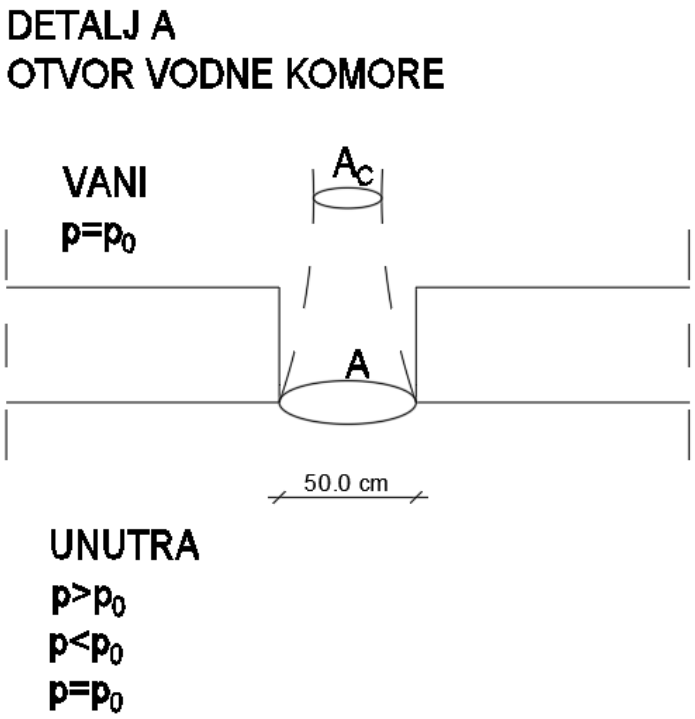
U nastavku su definirane geometrijske karakteristike navedenih vodnih komora.

a) Vodna komora sa prigušenjem

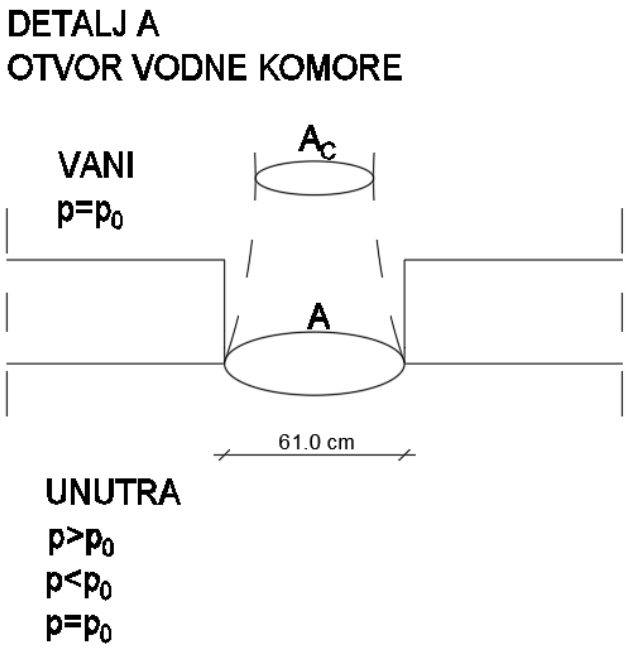
Vodne komore u varijantama 1, 2 i 3 jednakih su geometrijskih karakteristika osim površine otvora prigušenja.



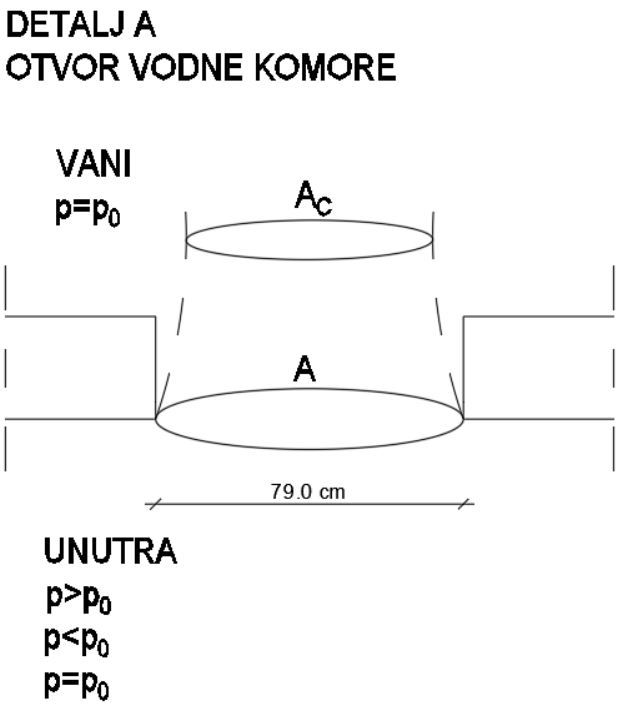
Skica 6: Detalj vrha vodne komore sa prigušenjem



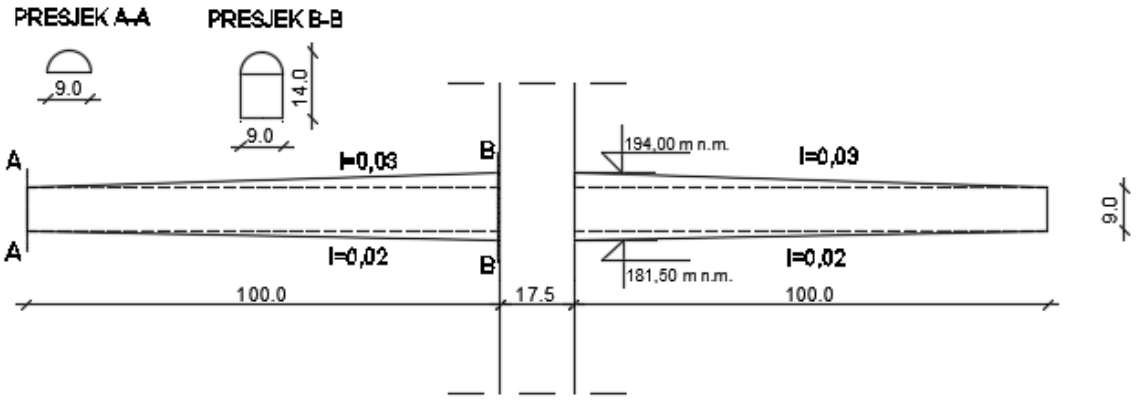
Skica 5: Detalj A vodne komore, Dotv=0.5 (m)



Skica 6: Detalj A vodne komore, Dotv=0.61 (m)



Skica 7: Detalj A vodne komore, Dotv=0.79 (m)

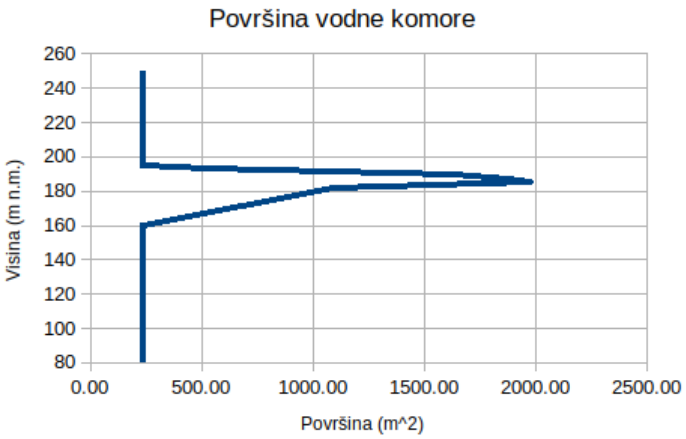


Skica 8: Donje proširenje

Površina vodne komore u funkciji visine

Vodna komora sa prigušenjem

Br. točke	h (m n.m.)	A (m^2)
0	0	240.53
1	160	240.53
2	181.5	1096.68
3	184.75	1982.17
4	187	1883.67
5	189.25	1640.96
6	193	527.66
7	194.5	240.53
8	250	240.53
9	260	0



Vodne komore u varijantama 1, 2 i 3 imaju donje proširenje i gornje prigušenje, a njihovo dimenzioniranje sadrži 4 uvjeta:

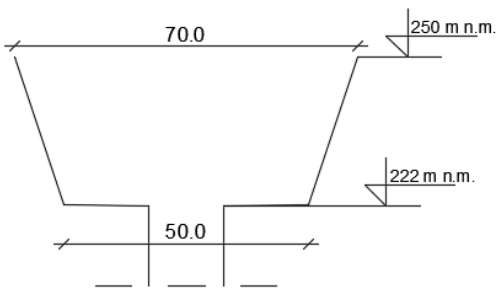
1. Kriterij stabilnosti

2. Minimalna razina vode u vodnoj komori kod ulaska sustava u turbinski pogon pri minimalnom vodostaju akumulacije treba biti veća od minimalno dopuštene, to jest 1.0 metar iznad ruba donjeg proširenja vodne komore.

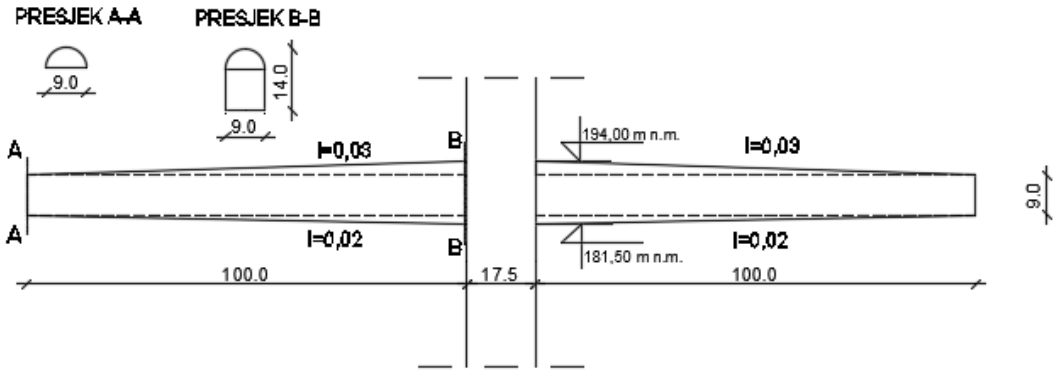
3. Maksimalna razina vode u vodnoj komori pri ispadanju sustava iz turbinskog pogona treba biti manja od maksimalno dozvoljene, to jest ne smije premašiti gornji rub vodne komore.

4. Tlak zraka u vodnoj komori ne smije premašiti iznos od 40 (m v.s.)

b) Vodna komora sa gornjim proširenjem



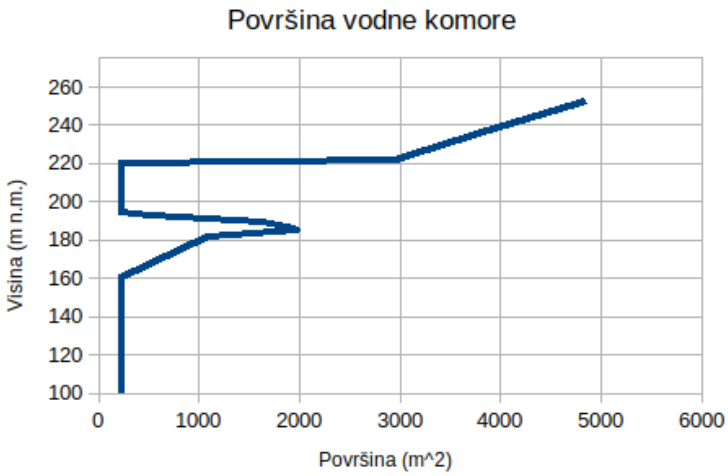
Skica 8: Detalj gornjeg proširenja



Skica 9: Donje proširenje

Površina vodne komore u funkciji visine
Vodna komora sa gornjim proširenjem

Br. točke	h (m n.m.)	A (m^2)
0	0	240.53
1	160	240.53
2	181.5	1096.68
3	184.75	1982.17
4	187	1883.67
5	189.25	1640.96
6	193	527.66
7	194.5	240.53
8	220	240.53
9	222	2963.49
10	237	3874.75
11	252	4848.45



Graf 3: Površina vodne komore promijenjiva po visini

Vodna komora u varijanti 4 ima donje i gornje proširenje, a dimenzioniranje sadrži 3 uvjeta:

1. Kriterij stabilnosti

2. Minimalna razina vode u vodnoj komori kod ulasku sustava u turbinski pogon pri minimalnom vodostaju akumulacije treba biti veća od minimalno dopuštene, to jest 1.0 metar iznad ruba donjeg proširenja vodne komore.

3. Maksimalna razina vode u vodnoj komori pri ispadanju sustava iz turbinskog pogona treba biti manja od maksimalno dozvoljene, to jest ne smije premašiti gornji rub vodne komore.

Kriterij za stabilnost vodne komore po D.Thomi:

$$A_k \geq A_{TH} = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{LA_D}{\Delta h_0 (H_{st} - \Delta h_0)} \tag{59}$$

Gdje je:

A_k -površina poprečnog presjeka komore, općenito promjenjiva po visini

v_0 -brzina u dovodnom tunelu

L -duljina dovodnog tunela

A_D -površina poprečnog presjeka dovodnog tunela

Δh_0 -gubici energije pri stacionarnom tečenju u dovodnom tunelu

H_{st} -stacionarna razina vode u vodnoj komori.

Granična vrijednost Thominog kriterija:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{A_D}{A_K} \cdot \frac{v_0^2}{{\Delta h_0}^2} > 40 \tag{60}$$

Veličina ε zove se parametar VOGT-a.

$$\varepsilon = \frac{L}{g} \cdot \frac{A_D}{A_K} \cdot \frac{v_0^2}{{\Delta h_0}^2} = \frac{z^2}{{\Delta h_0}^2} \tag{61}$$

$$A_{TH} = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{LA_D}{\Delta h_0 (H_{st} - \Delta h_0)} \tag{62}$$

Nakon uvrštavanja vrijednosti izračunata je površina A_{TH} i parametar VOGT-a:

$$A_{TH} = \frac{2{,}982^2}{19{,}62} \cdot \frac{8000{,}0 \cdot 63{,}585}{5{,}61 \cdot (220{,}00 - 5{,}61 - 12.88)} = 188{,}59 m^2 \tag{63}$$

$$\varepsilon = \frac{8000{,}0}{9{,}81} \cdot \frac{63{,}58}{188{,}59} \cdot \frac{2{,}83^2}{5{,}618^2} = 69{,}79 > 40 \tag{64}$$

Nakon proračuna parametra VOGT-a zaključuje se da je zadovoljen kriterij raspona veličine parametra za primjenu proračuna površine vodne komore po Thominom kriteriju, međutim

radi uvjeta 4 (minimalni tlak zraka u vodnoj komori) površina vodne komore je povećana i iznosi 240.53 ($m^{2)}$, to jest promjer vodne komore iznosi 17.50 (m).

Radi uspoređivanja rezultata, vodna komora sa gornjim proširenjem je uzeta jednaka.

4.1.4. SNAGA TURBINA

Za zadani instalirani protok turbine $Q_T = 60.0\,(m^3/s)$ iskorištena snaga toka računa se sljedećim izrazom:

$$N = \rho g Q_T H \eta \tag{65}$$

Gdje je:

ρ - gustoća vode (1000 kg/m^3)

g - ubrzanje sile teže (9,81 m/s^2)

Q_T - protok turbine

H - energijski pad = $h_{ke} - H_{DONJEVODE}$

η - koeficijent iskorištenja snage vodnog toka na turbinama i generatoru, usvojeno 0.85

H_{ke} - ekvivalentna razina vode u vodnoj komori (H_{ke} = 214.39 (m))

Ekvivalentna razina vode je stvarna razina vode povećana ili smanjena zbog pritiskajućeg ili sisajućeg djelovanja tlaka zraka u vodnoj komori.

$$H_{ke} = h_k + \frac{(p - p_0)}{\rho g} \tag{66}$$

$$H = H_{ke} - H_{DONJE\,VODE} \tag{67}$$

$H_{DONJE\ VODE}$ -razina vode u bučnici ($H_{DONJE\ VODE}$ = 12.88 (m n.m.)) za protok u odvodnom kanalu $Q = 180.0\,(m^3/s)$

Q (m^3/s)	H (m n.m.)	N (W)
60	201.50	100812465.0

4.1.5. FORMIRANJE ULAZNOG FILE-A ZA DINAMIČKU ANALIZU

Ulazni parametri potrebni za proračun:

Θ	DT	NDT	NPIS
0,5	1	8000	2

gdje je :

Θ – parametar integracije

DT – vremenski korak

NDT – broj računskih vremenskih koraka

NPIS - razmak vremenskih koraka koji se zapisuju u izlaznu datoteku.

Na osnovi svih prethodno definiranih podataka kreira se ulazni file za svaku varijantu na sljedeći način:

1. ULAZNI PODACI

D, L, EPSI, NI, KSIU, HA, THETA, DT, NDT, Q1, QT11, QT21, QT31, QZ1, P0, AOTV

2. PODACI ZA POVRŠINU VODNE KOMORE

NKOM

HH(I), AA(I)

3. PODACI ZA SNAGU TURBINA

NNT1

TT1(I), N1(I)

NNT2

TT2(I), N2(I)

NNT3

TT3(I), N3(I)

4. PODACI ZA VODOSTAJ DONJE VODE

BROJ TOČAKA

QQD(I), HD(I)

5. PODACI ZA VOLUMEN VODNE KOMORE

BT

HV(I), VV(I)

gdje je:

D -promjer dovodnog tunel

L -duljina dovodnog tunela

EPSI -apsolutna hidraulička hrapavost

NI -kinematička viskoznost vode

HA -vodostaj u akumulaciji

Q1 -protok u dovodnom tunelu

QT11 -protok prve turbine

QT21 -protok druge turbine

QT31 -protok treće turbine

QZ1 -protok zraka

P0 -tlak zraka

AOTV -površina otvora prigušenja

NKOM -broj redova s parovima podataka HH(I), AA(I)

HH(I) -razina vodostaja u vodnoj komori

AA(I) -površina poprečnog presjeka

NNT -broj redova s parovima podataka TT, N

TT1(I) -vremena koja definiraju snagu prve turbine

N1(I) -snaga prve turbine

TT2(I) -vremena koja definiraju snagu druge turbine

N2(I) -snaga druge turbine

TT3(I) -vremena koja definiraju snagu treće turbine

N3(I) -snaga treće turbine

QQD(I) -protok donje vode

HD(I) -razina vodostaja donje vode

H1 -razina vode u vodnoj komori na početku intervala

H2-razina vode u vodnoj komori na kraju intervala

Q1 -protok u dovodnom tunelu na početku intervala

Q2 -protok u dovodnom tunelu na kraju intervala

QT11 -protok prve turbine na početku intervala

QT12 -protok prve turbine na kraju intervala

QT21 -protok druge turbine na početku intervala

QT22 -protok druge turbine na kraju intervala

QT31 -protok treće turbine na početku intervala

QT32 -protok treće turbine na kraju intervala

QZ1 -protok zraka iz vodne komore na početku intervala

QZ2 -protok zraka iz vodne komore na kraju intervala

P1 -tlak zraka u vodnoj komori na početku intervala

P2 -tlak zraka u vodnoj komori na kraju intervala

Nakon definiranja ulaznih datoteka, pristupa se proračunu u programu „DIPL2.1”, napisanom u programskom jeziku FORTRAN 95. Rezultati proračuna su obrađeni u programskom paketu Microsoft Excel.

5. REZULTATI PRORAČUNA

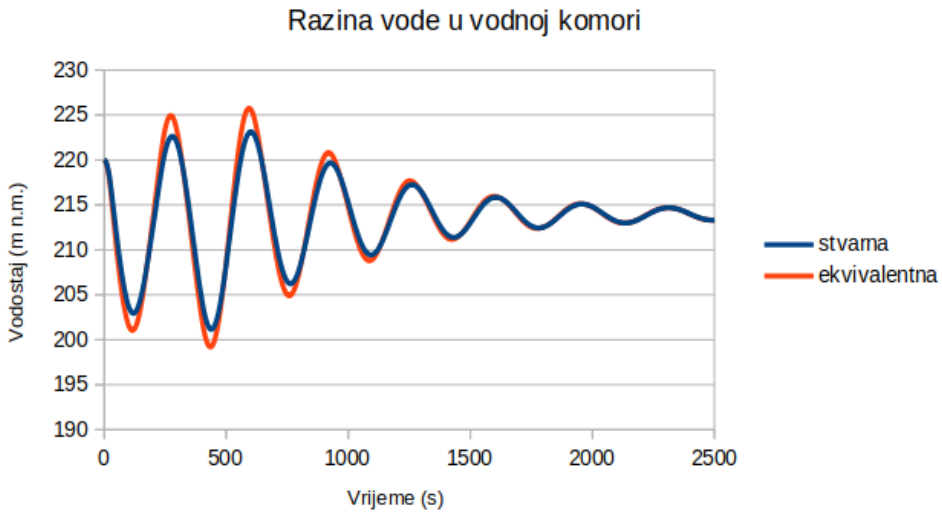
5.1. VARIJANTA 1 - PROMJER OTVORA NA VRHU KOMORE IZNOSI 0.5 (m)

Vodna komora ima donje proširenje L=100.0 (m), D=9.0 (m) i prigušenje.

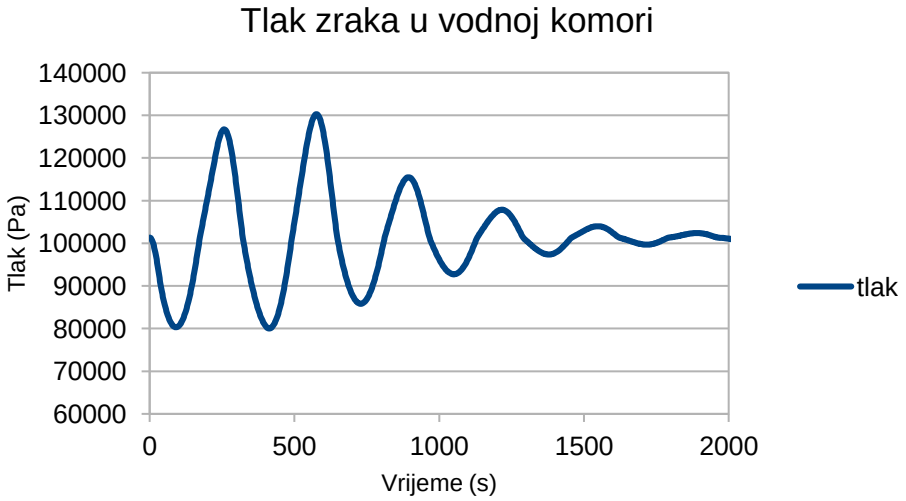
Vodostaj u akumulaciji je na 220 (m n.m.)

5.1.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON

Turbine ulaze u pogon postupno, t_1=0 (s), t_2=30 (s), t_3=230 (s) te postižu maksimalnu snagu kroz 30 (s).



Graf 4: Razina vode u vodnoj komori za uključivanje turbina, Dotv=0.5 (m)



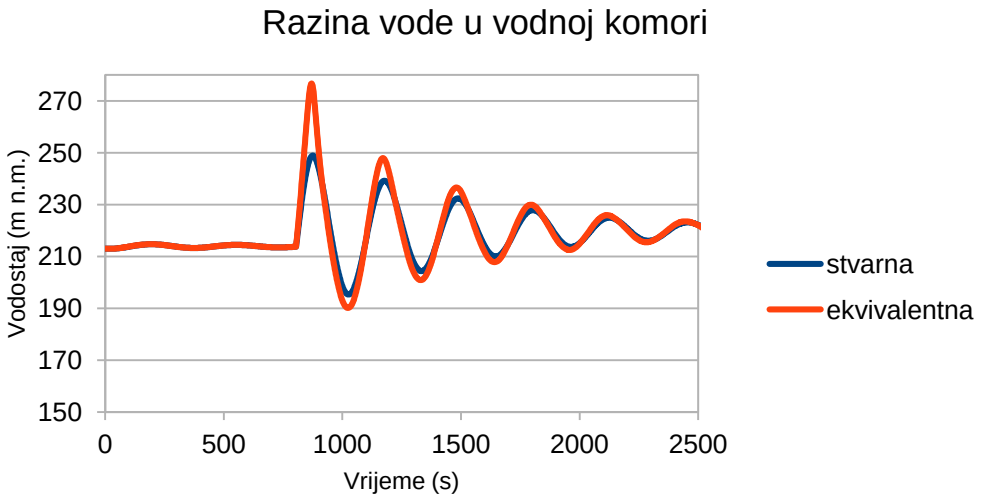
Graf 5: Tlak zraka u vodnoj komori za uključivanje turbina, Dotv=0.5 (m)

Tablica 1: Karakteristične vrijednosti rezultata za uključivanje turbina, Dotv=0.5 (m)

STVARNA RAZINA VODE	
h_max	223.1486
h_min	201.1454
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	225.77
hekv_min	199.19
TLAK ZRAKA	
p_max	130281.36
p_min	80032.15

5.1.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA

Turbine ispadaju iz pogona istovremeno u t=804 (s).



Graf 6: Razina vode u vodnoj komori za ispad turbina, Dotv=0.5 (m)



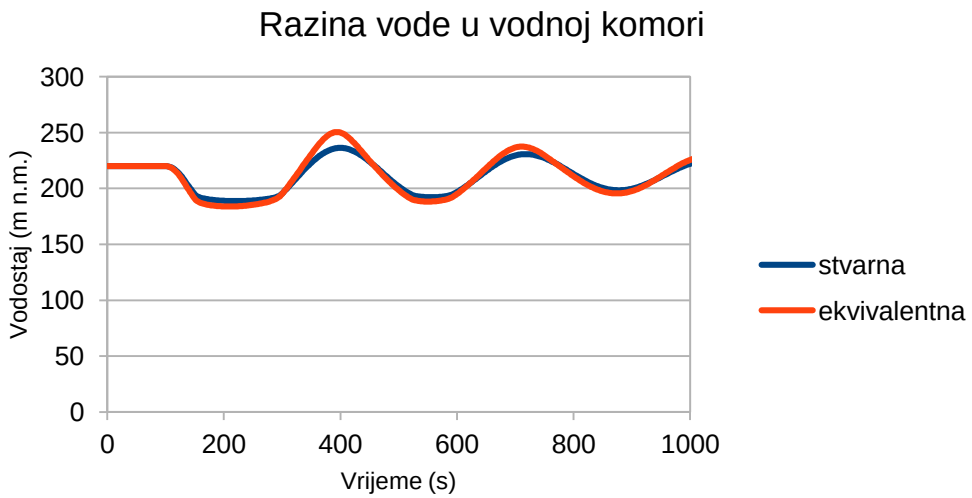
Graf 7: Tlak zraka u vodnoj komori za ispad turbina, Dotv=0.5 (m)

Tablica 2: Karakteristične vrijednosti rezultata za ispad turbina, Dotv=0.5 (m)

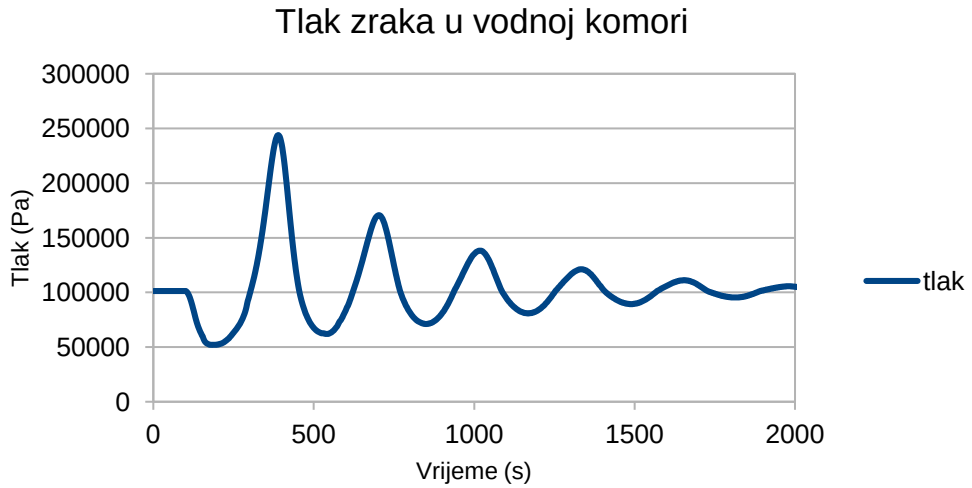
STVARNA RAZINA VODE	
h_max	248.9092
h_min	195.3112
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	276.71
hekv_min	190.14
TLAK ZRAKA	
p_max	377044.99
p_min	47205.41

5.1.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON

Turbine istovremeno ulaze u pogon u t=130 (s).



Graf 8: Razina vode u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.5 (m)



Graf 9: Tlak zraka u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.5 (m)

Tablica 3: Karakteristične vrijednosti rezultata za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.5 (m)

STVARNA RAZINA VODE	
h_max	236.3444
h_min	188.7232
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	250.52
hekv_min	183.86
TLAK ZRAKA	
p_max	243895.1
p_min	51998.42

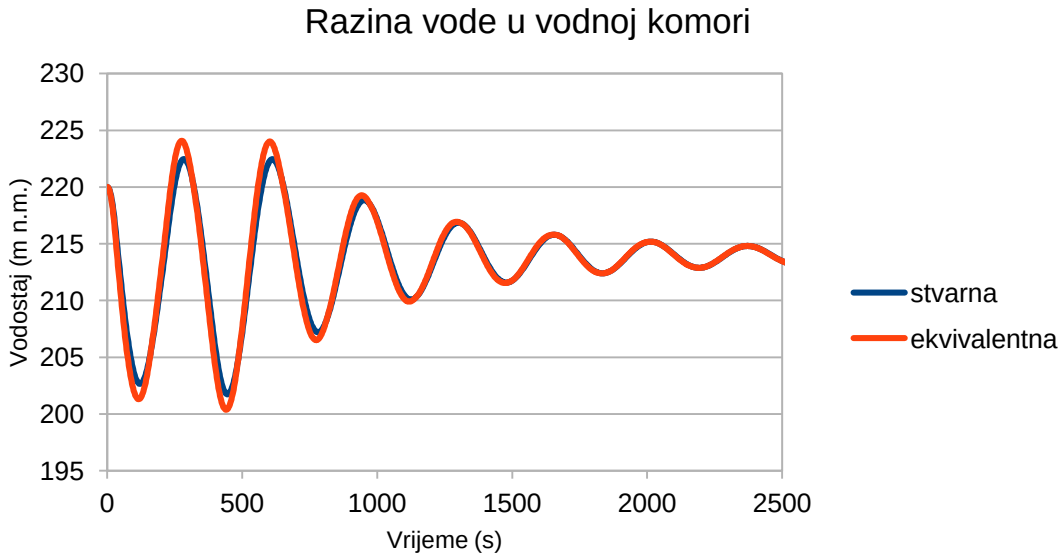
5.2. VARIJANTA 2 - PROMJER OTVORA NA VRHU KOMORE IZNOSI 0.61 (m)

Vodna komora ima donje proširenje L=100.0 (m), D=9.0 (m) i prigušenje na vrhu komore.

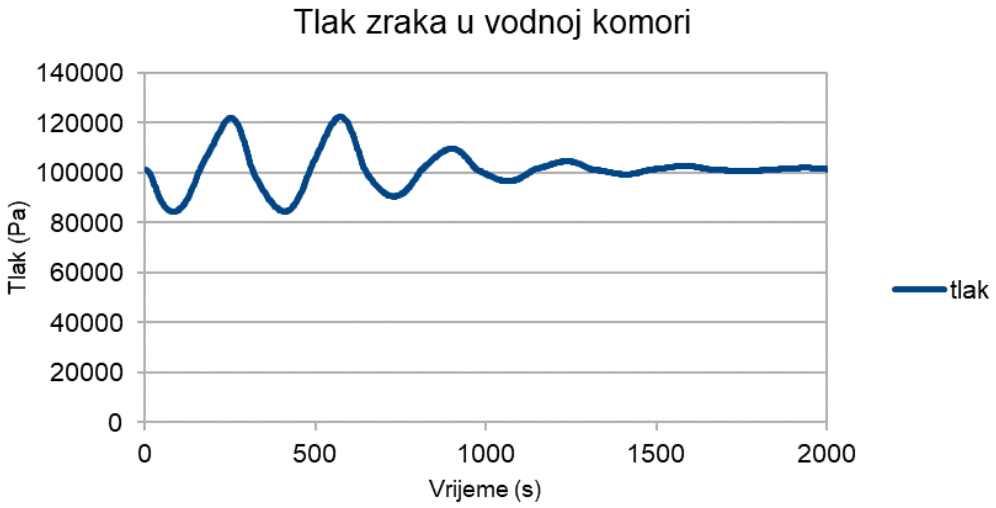
Vodostaj u akumulaciji je 220 (m n.m).

5.2.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON

Turbine ulaze u pogon postupno: t_1=0 (s), t_2=30 (s), t_3=230 (s) te postižu maksimalnu snagu kroz 30 (s), nakon uključenja.



Graf 10 : Razina vode u vodnoj komori za uključivanje turbina, Dotv=0.61 (m)



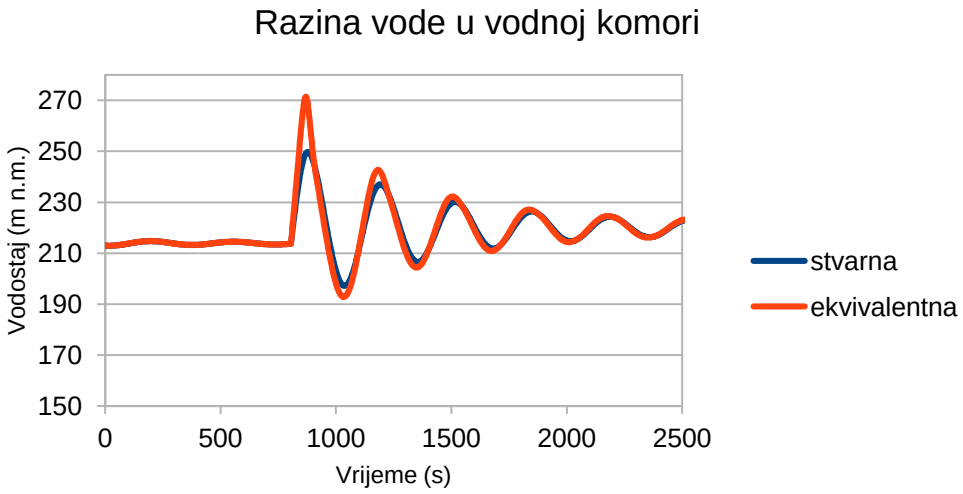
Graf 11: Tlak zraka u vodnoj komori za uključivanje turbina, Dotv=0.61 (m)

Tablica 4: Karakteristične vrijednosti rezultata za uključivanje turbina, Dotv= 0.61 (m)

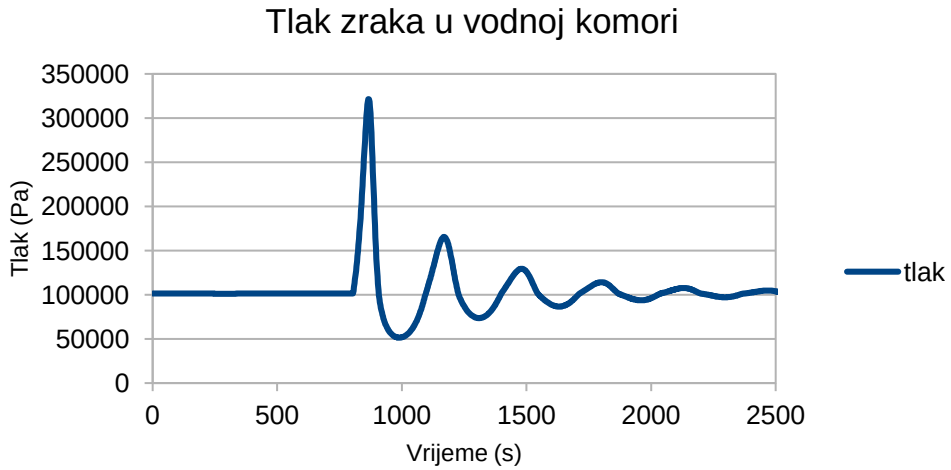
STVARNA RAZINA VODE	
h_max	222.4675
h_min	201.7395
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	224.07
hekv_min	200.38
TLAK ZRAKA	
p_max	122441.57
p_min	84363.34

5.2.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA

Turbine ispadaju iz pogona istovremeno u t=804 (s).



Graf 12: Razina vode u vodnoj komori za ispad turbina, Dotv=0.61 (m)



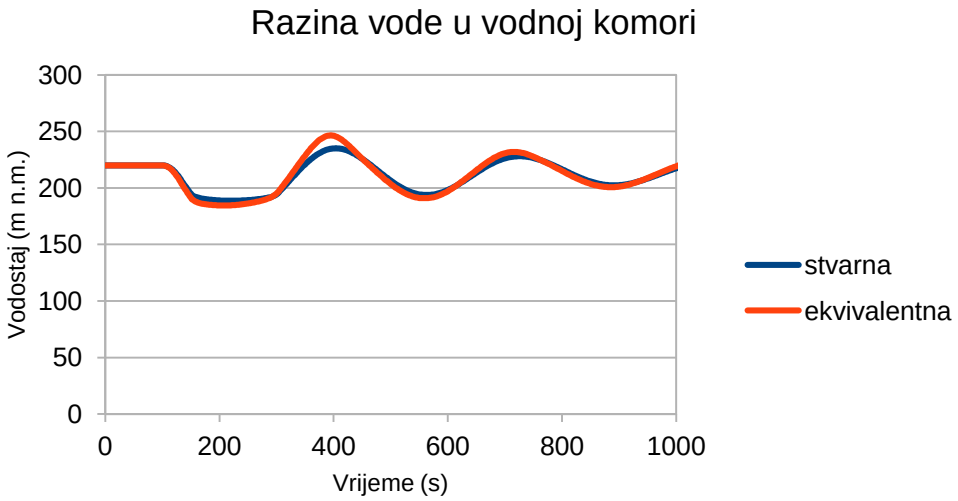
Graf 13: Tlak zraka u vodnoj komori za ispad turbina, Dotv=0.61 (m)

Tablica 5: Karakteristične vrijednosti rezultata za ispad turbina, Dotv=0.61 (m)

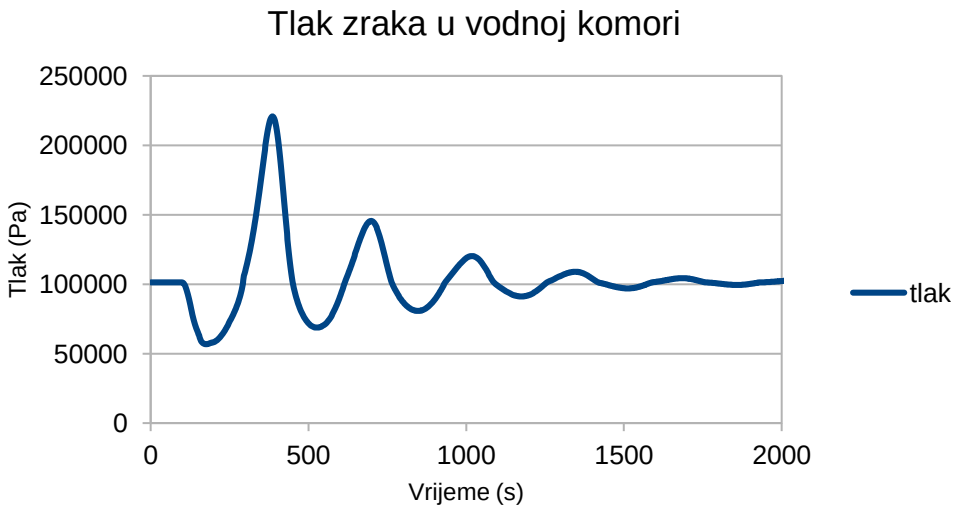
STVARNA RAZINA VODE	
h_max	249.7872
h_min	197.1689
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	271.41
hekv_min	192.85
TLAK ZRAKA	
p_max	321433.67
p_min	51454.61

5.2.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON

Turbine istovremeno ulaze u pogon u t=130 (s).



Graf 14: Razina vode u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.61 (m)



Graf 15: Tlak zraka u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.61 (m)

Tablica 6: Karakteristične vrijednosti rezultata za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.61 (m)

STVARNA RAZINA VODE	
h_max	235.0585
h_min	188.6836
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	246.41
hekv_min	184.5
TLAK ZRAKA	
p_max	220836.73
p_min	56796.73

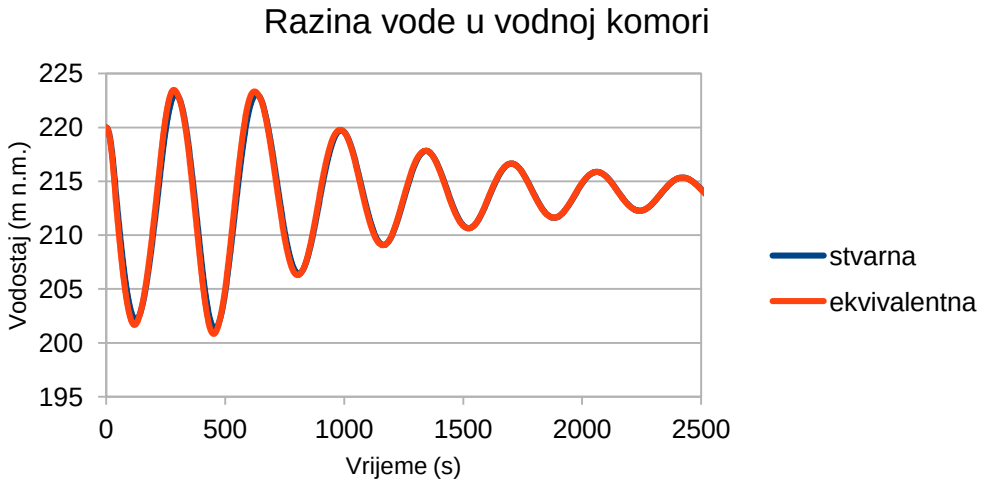
5.3. VARIJANTA 3 - PROMJER OTVORA NA VRHU KOMORE IZNOSI 0.79 (m)

Vodna komora ima donje proširenje L=100.0 (m), D=9.0 (m) i prigušenje.

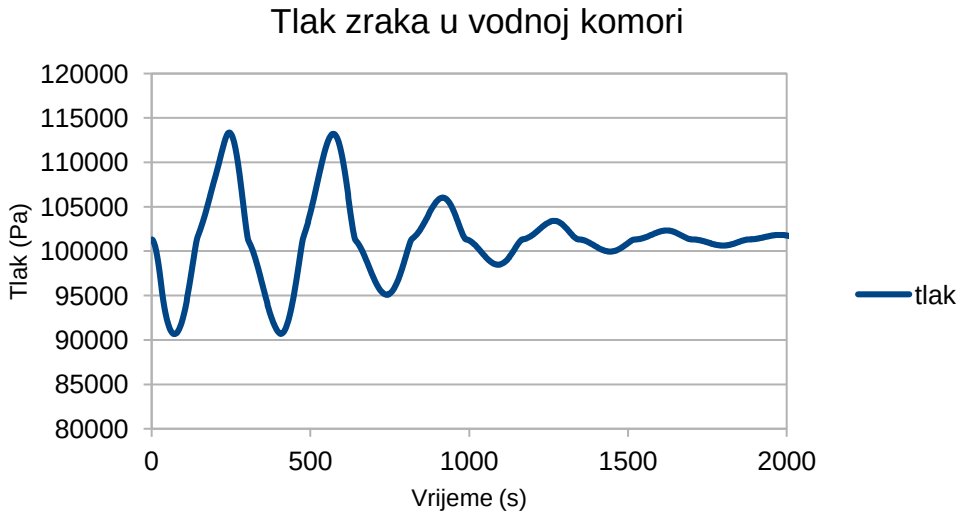
Vodostaj u akumulaciji je na 220 (m n.m.).

5.3.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON

Turbine ulaze u pogon postupno, t_1=0 (s), t_2=30 (s), t_3=230 (s) te postižu maksimalnu snagu kroz 30 (s).



Graf 16: Razina vode u vodnoj komori za uključivanje turbina, Dotv=0.79 (m)



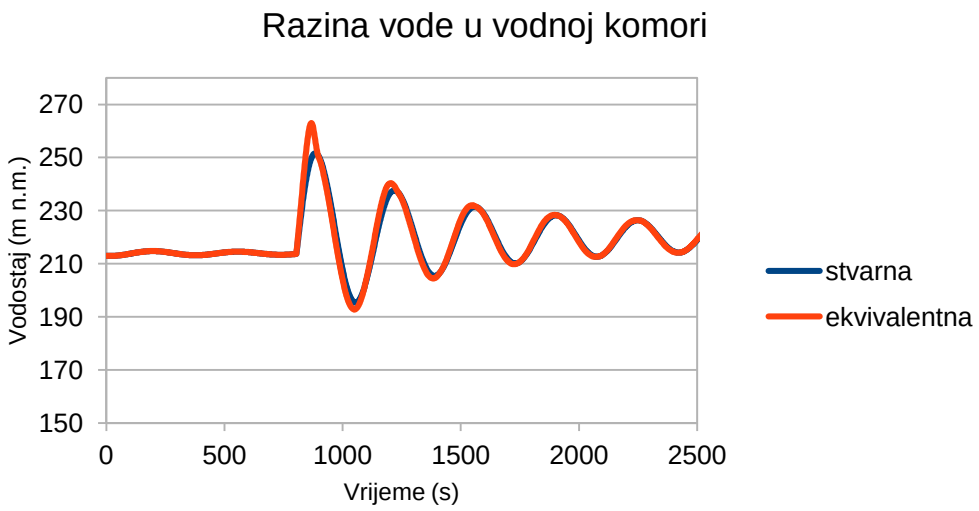
Graf 17: Tlak zraka u vodnoj komori za uključivanje turbina, Dotv=0.79 (m)

Tablica 7:Karakteristične vrijednosti rezultatai za uključivanje turbina, Dotv=0.79 (m)

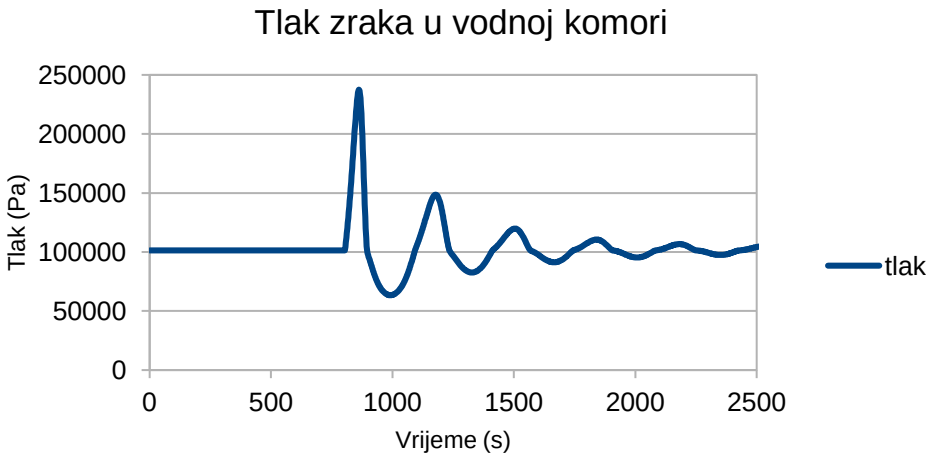
STVARNA RAZINA VODE	
h_max	223.0741
h_min	201.3434
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	223.48
hekv_min	200.84
TLAK ZRAKA	
p_max	113353.41
p_min	90655.42

5.3.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA

Turbine ispadaju iz pogona istovremeno u t=804 (s).



Graf 18: Razina vode u vodnoj komori za ispad turbina, Dotv=0.79 (m)



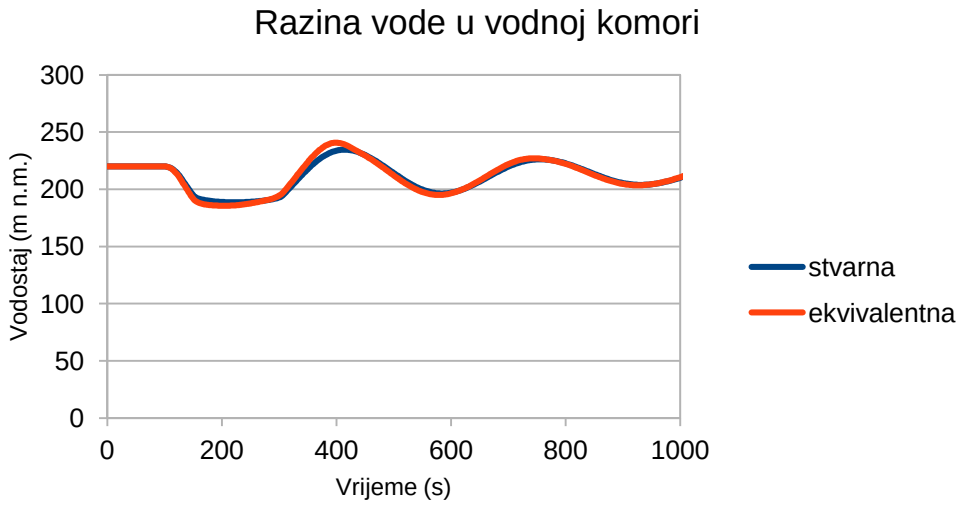
Graf 19: Tlak zraka u vodnoj komori za ispad turbina, Dotv=0.79 (m)

Tablica 8: Karakteristične vrijednosti rezultata za ispad turbina, Dotv=0.79 (m)

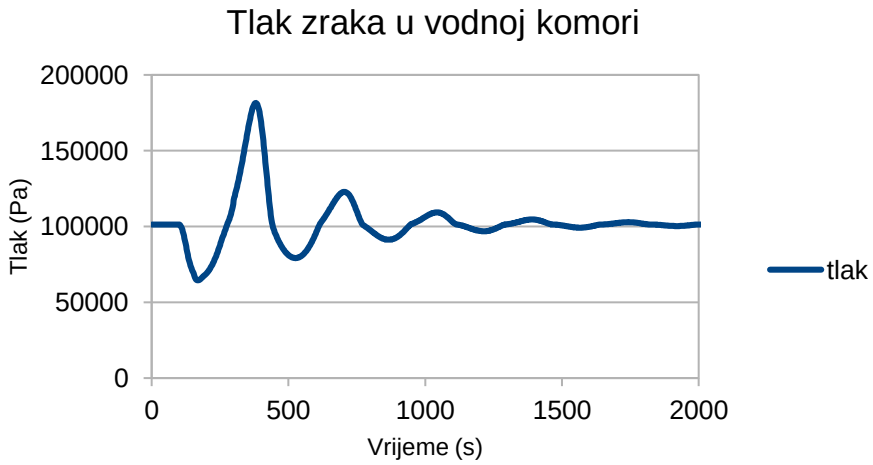
STVARNA RAZINA VODE	
h_max	251.6201
h_min	195.3324
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	263
hekv_min	192.78
TLAK ZRAKA	
p_max	237507.5
p_min	63417.17

5.3.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON

Turbine istovremeno ulaze u pogon u t=130 (s).



Graf 20: Razina vode u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.79 (m)



Graf 21: Tlak zraka u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.79 (m)

Tablica 9: Karakteristične vrijednosti rezultata za istovremeno uključivanje turbina, Dotv=0.79 (m)

STVARNA RAZINA VODE	
h_max	234.6685
h_min	188.6098
EKVIVALENTNA RAZINA	
hekv_max	240.71
hekv_min	185.59
TLAK ZRAKA	
p_max	181535.19
p_min	64522.97

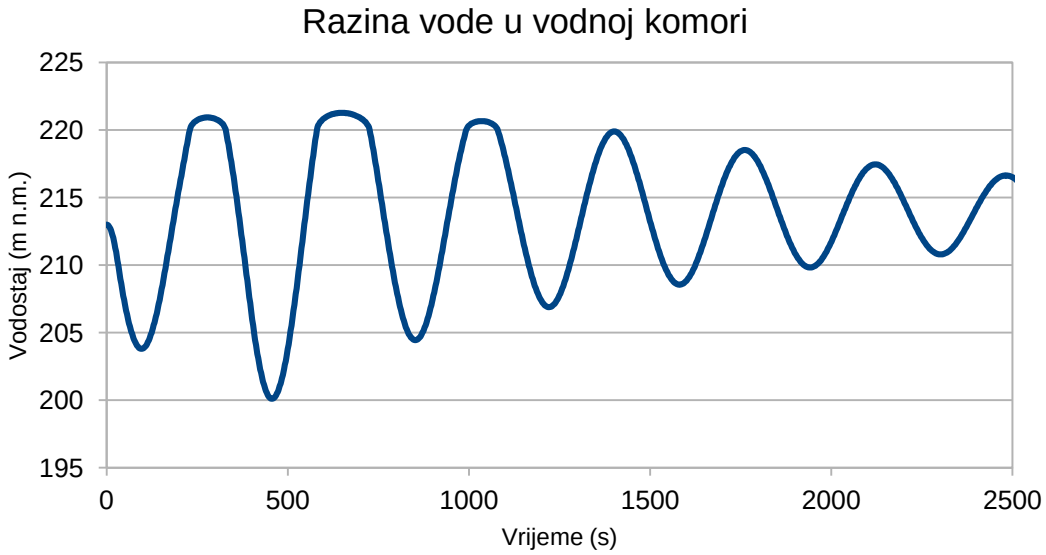
5.4. VARIJANTA 4 - VODNA KOMORA SA GORNJIM I DONJIM PROŠIRENJEM

Vodna komora ima gornje i donje proširenje L=100.0 (m), D=9.0 (m).

Vodostaj u akumulaciji je 220 (m n.m.).

5.4.1. UKLJUČIVANJE TURBINA U POGON

Turbine ulaze u pogon postupno, t_1=0 (s), t_2=30 (s), t_3=230 (s) te postižu maksimalnu snagu kroz 30 (s) nakon uključenja.



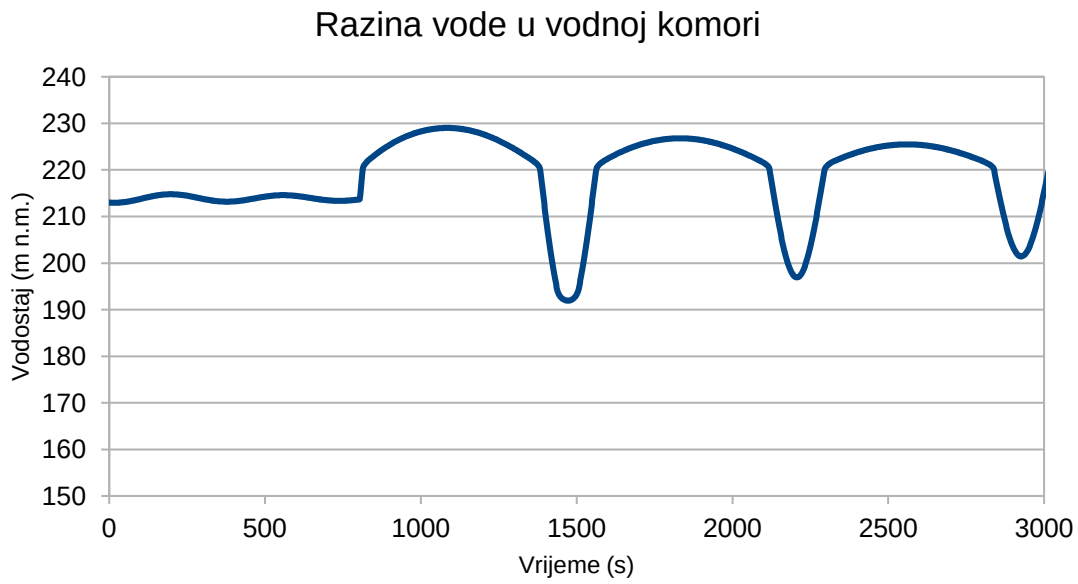
Graf 22: Razina vode u vodnoj komori za uključivanje turbina

Tablica 10: Maksimalna i minimalna razina vode

STVARNA RAZINA VODE	
h_max	221.2755
h_min	200.1064

5.4.2. ISTOVREMENI ISPAD TURBINA IZ POGONA

Turbine ispadaju iz pogona istovremeno u t=804 (s).



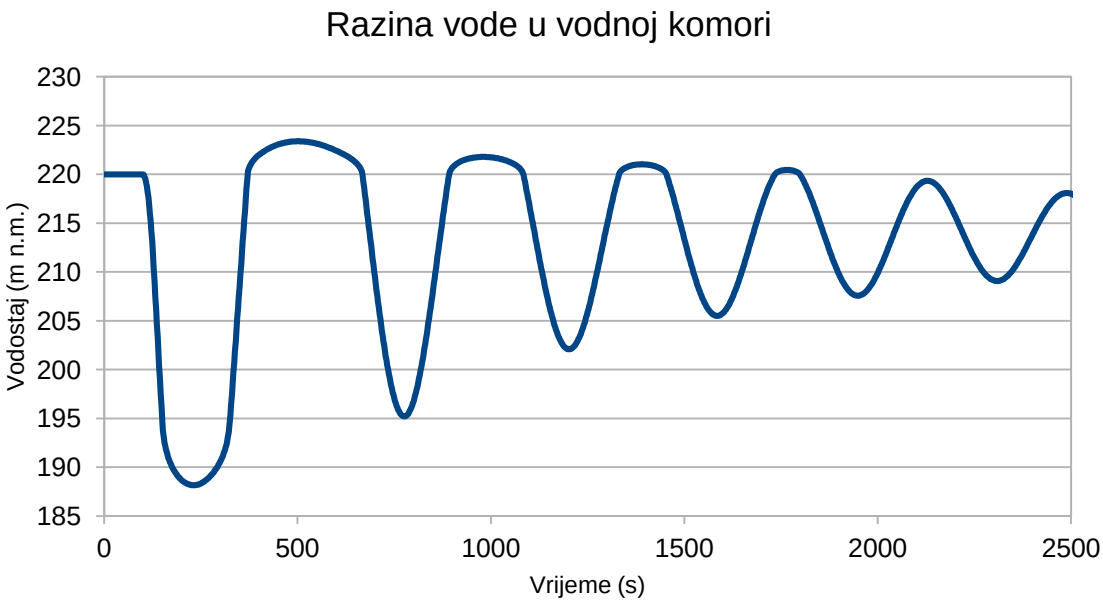
Graf 23: Razina vode u vodnoj komori za ispad turbina

Tablica 11: Karakteristične vrijednosti rezultata za ispad turbina

STVARNA RAZINA VODE	
h_max	229.0141
h_min	191.9334

5.4.3. ISTOVREMENI ULAZAK TURBINA U POGON

Turbine istovremeno ulaze u pogon u t=130 (s).

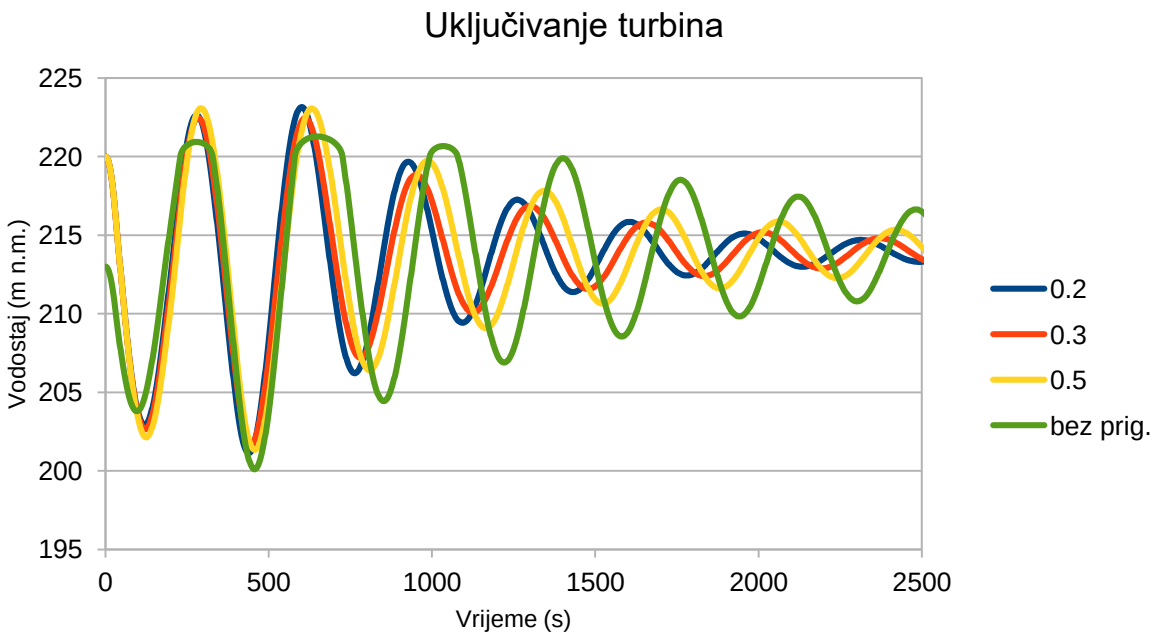


Graf 24: Razina vode u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina

Tablica 12: Karakteristične vrijednosti rezultata za istovremeno uključivanje turbina

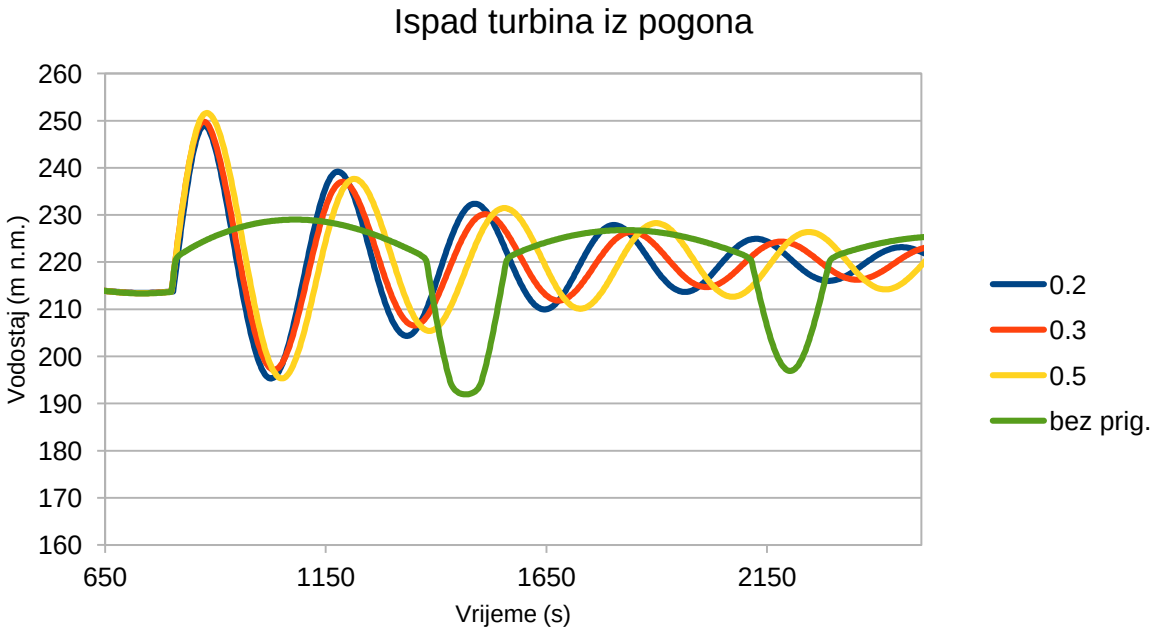
STVARNA RAZINA VODE	
h_max	223.3913
h_min	188.1457

5.5. ZAJEDNIČKI PRIKAZ REZULTATA



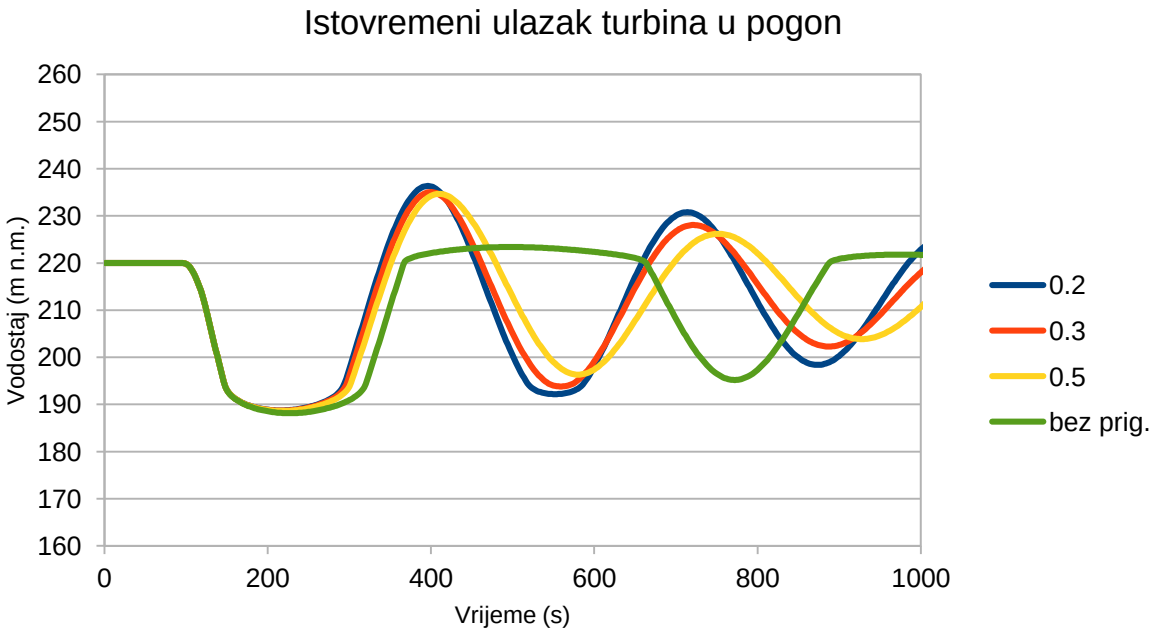
Graf 25: Razine vode u vodnoj komori za uključivanje turbina

Graf 25 prikazuje razinu vode u vodnoj komori za slučaj postupnog uključivanja turbina za sve varijante vodnih komora. Možemo vidjeti da vodna komora bez prigušenja na vrhu ima manju amplitude oscilacija od vodne komore sa prigušenjem na vrhu, imaju sličan period, ali dulje vrijeme smirivanja oscilacija.



Graf 26: Razine vode u vodnoj komori za ispad turbina

Graf 26 prikazuje razinu vode u vodnoj komori za slučaj ispada turbina za sve varijante vodnih komora. Pokazuje se da kod ovog slučaja maksimalno izdizanje razine vode u vodnoj komori je veće kod vodnih komora sa prigušenjem na vrhu jer se kod vodne komore bez prigušenja aktiviralo gornje proširenje u velikoj mjeri.



Graf 27:Razine vode u vodnoj komori za istovremeno uključivanje turbina

Slično kao i na grafu 26, na grafu 27 su prikazane razine vode u vodnim komorama samo ovaj put za istovremeni ulazak turbina u pogon. Maksimalno izdizanje razine vode u vodnoj komori je veće kod vodnih komora sa prigušenjem na vrhu jer se kod vodne komore bez prigušenja aktiviralo gornje proširenje u velikoj mjeri.

6. PROGRAMSKI KOD

```
PROGRAM DIPLV2
REAL*8
L,KSIU,NI,T2,Q2,QT12,QT22,QT32,HK2,QZ2,P2,T1,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,QZ1,P1,VI1,VI2
,D,EPSI
REAL*8 THETA,DT,HA,V0,BH,P0,AOTV,HKE2
INTEGER::BT
REAL*8 HH(100),AA(100),TT1(100),TT2(100),TT3(100),HD(201),QQD(201),HV(30),VV(30)
REAL*8 N1(100),N2(100),N3(100)
CALL
OTVORI(D,L,EPSI,NI,KSIU,HA,THETA,DT,NDT,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,QZ1,P0,AOTV)
CALL KOMORA(HH, AA, VAR, NKOM)
CALL TURBINE(NNT1,NNT2,NNT3,TT1,N1,TT2,N2,TT3,N3)
CALL DONJA(QQD,HD)
CALL VOLUMEN(HV,VV,BT)
OPEN(UNIT=6, FILE='izlazna.dat', STATUS='REPLACE')
T1=0.0
P1=P0
NPIS=2
V0=BH(BT,HV,VV,HK1)
VI1=0.0
VI2=0.0


DO I=1,NDT
T2=T1+DT

!IZABRATI SUBROUTINE SIMUL ILI SIMUL2

!ZA VODNU KOMORU SA PRIGUŠENJEM
CALL SIMUL(D,L,EPSI,NI,KSIU,HA,THETA,DT,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,QZ1,P0,AOTV,&
HH,AA,NKOM,NNT1,NNT2,NNT3,TT1,N1,TT2,N2,TT3,N3,HD,QQD,HV,VV,BT,T2,V0,VI1,&
VI2,P1,Q2,QT12,QT22,QT32,HK2,QZ2,P2,HKE2)

!ZA VODNU KOMORU BEZ PRIGUŠENJA
CALL SIMUL2(D,L,EPSI,NI,KSIU,HA,THETA,DT,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,&
HH,AA,NKOM,NNT1,NNT2,NNT3,TT1,N1,TT2,N2,TT3,N3,HD,QQD,T2,&
Q2,QT12,QT22,QT32,HK2)

IF(I.EQ.1) THEN
WRITE(6,10)T2,Q2,QT12,QT22,QT32,HK2,QZ2,P2,HKE2
END IF
IX=I/NPIS
X=FLOAT(I)/FLOAT(NPIS)
RIX=FLOAT(IX)
IF(X.EQ.RIX) THEN
WRITE(6,10)T2,Q2,QT12,QT22,QT32,HK2,QZ2,P2,HKE2
10 FORMAT(F10.2,',',F12.4,',',F12.4,',',F12.4,',',F12.4,',',F12.4,',',F12.4,',',F10.2,',',F10.2,',',F10.2)
END IF
Q1=Q2
QT11=QT12
QT21=QT22
```

```
QT31=QT32
HK1=HK2
QZ1=QZ2
P1=P2
T1=T2
VI1=VI2
END DO

STOP
END PROGRAM DIPLV2

SUBROUTINE
OTVORI(D,L,EPSI,NI,KSIU,HA,THETA,DT,NDT,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,QZ1,P0,AOTV)
REAL*8 D,L,EPSI,NI,KSIU,HA,THETA,DT,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,QZ1,P0,AOTV
OPEN(UNIT=1, FILE='general.dat', STATUS='OLD')
READ(1,*) D, L, EPSI, NI, KSIU, HA
READ(1,*) THETA, DT, NDT
READ(1,*) Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,QZ1,P0,AOTV
CLOSE(1)
RETURN
END

SUBROUTINE KOMORA(HH,AA,VAR,NKOM)
REAL*8 HH(100), AA(100)
WRITE(*,*)'Za varijantu vodne komore sa prigušenjem upišite 1, a za varijantu vodne komore bez
prigušenja upišite 2:'
READ(*,*)VAR
IF(VAR.EQ.1) THEN
OPEN(UNIT=2, FILE='var1.dat', STATUS='OLD')
READ(2,*)NKOM
DO I=1,NKOM
READ(2,*)HH(I),AA(I)
END DO
CLOSE(2)
ELSE
OPEN(UNIT=3, FILE='var2.dat', STATUS='OLD')
READ(3,*)NKOM
DO I=1,NKOM
READ(3,*)HH(I),AA(I)
END DO
CLOSE(3)
END IF
RETURN
END

SUBROUTINE TURBINE(NNT1,NNT2,NNT3,TT1,N1,TT2,N2,TT3,N3)
REAL*8 TT1(100),TT2(100),TT3(100)
REAL*8 N1(100),N2(100),N3(100)
OPEN(UNIT=3, FILE='turb2.dat', STATUS='OLD')
READ(3,*)NNT1,NNT2,NNT3
DO I=1,NNT1
READ(3,*)TT1(I),N1(I)
END DO
```

```
DO I=1,NNT2
READ(3,*)TT2(I),N2(I)
END DO
DO I=1,NNT3
READ(3,*)TT3(I),N3(I)
END DO
RETURN
END

SUBROUTINE DONJA(QQD,HD)
REAL*8 HD(201), QQD(201)
OPEN(UNIT=4, FILE='donja.dat', STATUS='OLD')
NQHD=201
DO I=1,NQHD
READ(4,*)QQD(I),HD(I)
END DO
RETURN
END

SUBROUTINE VOLUMEN(HV,VV,BT)
REAL*8 HV(30), VV(30)
INTEGER:: BT
OPEN(UNIT=5, FILE='volumen.dat', STATUS='OLD')
READ(5,*) BT
DO I=1,BT
READ(5,*)HV(I),VV(I)
END DO
RETURN
END
FUNCTION BH(N,X,Y,XX)
    REAL*8 X(N),Y(N),XX,BH
    NI=1
    DO 1 I=1,N-1
    IF(X(I)-XX) 2,4,3
2    NI=I
1    CONTINUE
3    BH=Y(NI)+(Y(NI+1)-Y(NI))*(XX-X(NI))/(X(NI+1)-X(NI))
    RETURN
4    BH=Y(I)
    RETURN
    END
SUBROUTINE LAMBDA(D,RE,EPSI,ALAM)
REAL*8 D,RE,EPSI,ALAM,ALAM1,ARG,RNAZ
    IF(RE<2320)THEN
    ALAM=64.0/RE
    RETURN
    ENDIF
    TOC=0.000001
    ALAM1=0.02

100   CONTINUE

    ARG=EPSI/(D*3.71)+2.51/(RE*SQRT(ALAM1))
```

```
      RNAZ=2.0*LOG10(ARG)

      ALAM=1.0/RNAZ**2

      IF(ABS(ALAM1-ALAM).GT.TOC)THEN
      ALAM1=ALAM
      GOTO 100
      ENDIF
      RETURN
      END

SUBROUTINE REJNOLD(RE,V0,D,NI)
REAL*8 NI,RE,V0,D
RE=(V0*D)/NI
RETURN
END

SUBROUTINE SOLVER(A,B,N)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      REAL*8 A(N,N),B(N),X(N)
      N1=N-1
      DO 3 K=1,N
      I1=K+1
      DO 2 I=I1,N
      FAK=-A(I,K)/A(K,K)
      DO 1 J=K,N
1     A(I,J)=A(I,J)+FAK*A(K,J)
2     B(I)=B(I)+B(K)*FAK
3     CONTINUE
      X(N)=B(N)/A(N,N)
      DO 4 K=1,N1
      I=N-K
      S=0.
      DO 5 L=1,K
      J=I+L
5     S=S+A(I,J)*X(J)
4     X(I)=(B(I)-S)/A(I,I)
      DO 6 I=1,N
      B(I)=X(I)
6     CONTINUE
      RETURN
      END

SUBROUTINE
SIMUL(D,L,EPSI,NI,KSIU,HA,THETA,DT,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,QZ1,P0,AOTV,&
HH,AA,NKOM,NNT1,NNT2,NNT3,TT1,N1,TT2,N2,TT3,N3,HD,QQD,HV,VV,BT,T2,V0,VI1,&
VI2,P1,Q2,QT12,QT22,QT32,HK2,QZ2,P2,HKE2)
REAL*8 L,KSIU,NI,T2,Q2,QT12,QT22,QT32,HK2,QZ2,P2,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1
REAL*8 VI1,VI2,P1,QZ1,AOTV,P0,BH,AK1,AK2,V2
REAL*8
BRZ1,BRZ2,BETA1,BETA2,RE1,RE2,EPSI,EKSPN,D,ALAM1,ALAM2,HKE1,HKE2,QUK,HNIZ
2,AD
```

```
REAL*8
P22,VOL22,VOL21,DPDH,DQZDP,DHDP,DVDH,DQZDH,DVDP,HA,THETA,DT,XN12,XN22,X
N32,V0

INTEGER:: BT
REAL*8 HH(100),AA(100),TT1(100),TT2(100),TT3(100),HD(201),QQD(201),HV(30),VV(30)
REAL*8 N1(100),N2(100),N3(100),FF(7,7),F(7)
PI=3.141592
P0=101325.0
RO=1000.0
G=9.81
TOC=0.01
ETA=0.85
IBR=0
EKSPN=1.25
ROZ=1.2
AD=D*D*PI/4.0
Q2=Q1
HK2=HK1
QT12=QT11
QT22=QT21
QT32=QT31
QZ2=QZ1
P2=P1
100 CONTINUE
IBR=IBR+1
IF(IBR.EQ.100)THEN
WRITE(*,345)
345 FORMAT('U POTPROGRAMU SIMUL BROJ ITERACIJA VEĆI OD 100')
RETURN
END IF
BRZ1=Q1/AD
BRZ2=Q2/AD
CALL REJNOLD (RE1,BRZ1,D,NI)
CALL LAMBDA(D,RE1,EPSI,ALAM1)
CALL REJNOLD (RE2,BRZ2,D,NI)
CALL LAMBDA(D,RE2,EPSI,ALAM2)
BETA1=(KSIU+ALAM1*L/D+1.0)/(2.0*9.81*AD**2)
BETA2=(KSIU+ALAM2*L/D+1.0)/(2.0*9.81*AD**2)

HKE1=HK1+(P1-P0)/(RO*G)
HKE2=HK2+(P2-P0)/(RO*G)
XN12=BH(NNT1,TT1,N1,T2)
XN22=BH(NNT2,TT2,N2,T2)
XN32=BH(NNT3,TT3,N3,T2)
QT12=XN12/(RO*G*(HKE2-HNIZ2)*ETA)
QT22=XN22/(RO*G*(HKE2-HNIZ2)*ETA)
QT32=XN32/(RO*G*(HKE2-HNIZ2)*ETA)
QUK=QT12+QT22+QT32
HNIZ2=BH(201,QQD,HD,QUK)
AK1=BH(NKOM,HH,AA,HK1)
AK2=BH(NKOM,HH,AA,HK2)
```

```
VOL21=BH(BT,HV,VV,HK2)
VOL22=BH(BT,HV,VV,HK2+0.01)
P22=VOL21**EKSPN*P2/VOL22**EKSPN
DPDH=(P22-P2)/0.01
DHDP=1.0/DPDH
DVDH=(VOL22-VOL21)/0.01
DQZDP=0.61*AOTV/ROZ/SQRT(2.0*ABS(P2-P0)/ROZ)
DQZDH=DQZDP*DPDH
V2=BH(BT,HV,VV,HK2)
DVDP=DVDH*DHDP
QZ1=((P1-P0)/ABS(P1-P0))*SQRT((2.0*ABS(P1-P0))/ROZ)*0.61*AOTV
QZ2=((P2-P0)/ABS(P2-P0))*SQRT((2.0*ABS(P2-P0))/ROZ)*0.61*AOTV
VI2=VI1+(1.0-THETA)*DT*QZ1+THETA*DT*QZ2

!JEDNADŽBE
F(1)=Q1+(1.0-THETA)*DT*G*AD/L*(HA-HKE1-
BETA1*ABS(Q1)*Q1)+THETA*DT*G*AD/L*(HA-HKE2-BETA2*ABS(Q2)*Q2)-Q2
FF(1,1)=2.0*Q2*THETA*DT*G*AD/L*BETA2-1.0
FF(1,2)=0.0
FF(1,3)=0.0
FF(1,4)=0.0
FF(1,5)=-THETA*DT*G*AD/L
FF(1,6)=0.0
FF(1,7)=-THETA*DT*G*AD/L*(1/(RO*G))

DHKEDP=1.0/(RO*G)

F(2)=RO*G*(HKE2-HNIZ2)*QT12*ETA-XN12
FF(2,1)=0.0
FF(2,2)=RO*G*(HKE2-HNIZ2)*ETA
FF(2,3)=0.0
FF(2,4)=0.0
FF(2,5)=RO*G*QT12*ETA
FF(2,6)=0.0
FF(2,7)=RO*G*QT12*ETA*DHKEDP

F(3)=RO*G*(HKE2-HNIZ2)*QT22*ETA-XN22
FF(3,1)=0.0
FF(3,2)=0.0
FF(3,3)=RO*G*(HKE2-HNIZ2)*ETA
FF(3,4)=0.0
FF(3,5)=RO*G*QT22*ETA
FF(3,6)=0.0
FF(3,7)=RO*G*QT22*ETA*DHKEDP

F(4)=RO*G*(HKE2-HNIZ2)*QT32*ETA-XN32
FF(4,1)=0.0
FF(4,2)=0.0
FF(4,3)=0.0
FF(4,4)=RO*G*(HKE2-HNIZ2)*ETA
FF(4,5)=RO*G*QT32*ETA
FF(4,6)=0.0
FF(4,7)=RO*G*QT32*ETA*DHKEDP
```

```
F(5)=HK1+(1.0-THETA)*DT*((Q1-QT11-QT21-QT31)/AK1)+THETA*DT*((Q2-QT12-QT22-
QT32)/AK2)-HK2
FF(5,1)=THETA*DT/AK2
FF(5,2)=-THETA*DT/AK2
FF(5,3)=-THETA*DT/AK2
FF(5,4)=-THETA*DT/AK2
FF(5,5)=-1.0
FF(5,6)=0.0
FF(5,7)=0.0

F(6)=((P2-P0)/ABS(P2-P0))*SQRT((2.0*ABS(P2-P0))/ROZ)*0.61*AOTV-QZ2
FF(6,1)=0.0
FF(6,2)=0.0
FF(6,3)=0.0
FF(6,4)=0.0
FF(6,5)=0.0
FF(6,6)=-1.0
FF(6,7)=1/(2.0*SQRT(2.0*ABS(P2-P0)/ROZ))*2.0*0.61*AOTV/ROZ

F(7)=(V0-VI2)**EKSPN*P0-V2**EKSPN*P2
FF(7,1)=0.0
FF(7,2)=0.0
FF(7,3)=0.0
FF(7,4)=0.0
FF(7,5)=0.0
FF(7,6)=EKSPN*(V0-VI2)**(EKSPN-1.0)*P0*(-THETA)*DT
FF(7,7)=-V2**(EKSPN)

DO I=1,7
F(I)=-F(I)
END DO

FAKT=1.0
CALL SOLVER(FF,F,7)
Q2=Q2+FAKT*F(1)
QT12=QT12+FAKT*F(2)
QT22=QT22+FAKT*F(3)
QT32=QT32+FAKT*F(4)
HK2=HK2+FAKT*F(5)
QZ2=QZ2+FAKT*F(6)
P2=P2+FAKT*F(7)

DO I=1,7
IF(ABS(F(I)).GT.TOC) GO TO 100
END DO
RETURN
END

SUBROUTINE SIMUL2(D,L,EPSI,NI,KSIU,HA,THETA,DT,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1,&
HH,AA,NKOM,NNT1,NNT2,NNT3,TT1,N1,TT2,N2,TT3,N3,HD,QQD,T2,&
Q2,QT12,QT22,QT32,HK2)
REAL*8 L,KSIU,NI,T2,Q2,QT12,QT22,QT32,HK2,Q1,QT11,QT21,QT31,HK1
```

```
REAL*8 AK1,AK2,QUK,BH
REAL*8 BRZ1,BRZ2,BETA1,BETA2,RE1,RE2,EPSI,D,ALAM1,ALAM2,HNIZ2,AD
REAL*8 HA,THETA,DT,XN12,XN22,XN32
REAL*8 HH(100),AA(100),TT1(100),TT2(100),TT3(100),HD(201),QQD(201)
REAL*8 N1(100),N2(100),N3(100),FF(5,5),F(5)
PI=3.141592
RO=1000.0
G=9.81
TOC=0.01
ETA=0.85
IBR=0
AD=D*D*PI/4.0
Q2=Q1
HK2=HK1
QT12=QT11
QT22=QT21
QT32=QT31
1000 CONTINUE
IBR=IBR+1
IF(IBR.EQ.100)THEN
WRITE(*,345)
345 FORMAT('U POTPROGRAMU SIMUL BROJ ITERACIJA VEĆI OD 100')
RETURN
END IF
BRZ1=Q1/AD
BRZ2=Q2/AD
CALL REJNOLD (RE1,BRZ1,D,NI)
CALL LAMBDA(D,RE1,EPSI,ALAM1)
CALL REJNOLD (RE2,BRZ2,D,NI)
CALL LAMBDA(D,RE2,EPSI,ALAM2)
BETA1=(KSIU+ALAM1*L/D+1.0)/(2.0*9.81*AD**2)
BETA2=(KSIU+ALAM2*L/D+1.0)/(2.0*9.81*AD**2)

XN12=BH(NNT1,TT1,N1,T2)
XN22=BH(NNT2,TT2,N2,T2)
XN32=BH(NNT3,TT3,N3,T2)
QT12=XN12/(RO*G*(HK2-HNIZ2)*ETA)
QT22=XN22/(RO*G*(HK2-HNIZ2)*ETA)
QT32=XN32/(RO*G*(HK2-HNIZ2)*ETA)
QUK=QT12+QT22+QT32
HNIZ2=BH(201,QQD,HD,QUK)
AK1=BH(NKOM,HH,AA,HK1)
AK2=BH(NKOM,HH,AA,HK2)
!JEDNADŽBE

F(1)=Q1+(1.0-THETA)*DT*G*AD/L*(HA-HK1-
BETA1*ABS(Q1)*Q1)+THETA*DT*G*AD/L*(HA-HK2-BETA2*ABS(Q2)*Q2)-Q2
FF(1,1)=2.0*Q2*THETA*DT*G*AD/L*BETA2-1.0
FF(1,2)=0.0
FF(1,3)=0.0
FF(1,4)=0.0
FF(1,5)=-THETA*DT*G*AD/L
```

```
F(2)=RO*G*(HK2-HNIZ2)*QT12*ETA-XN12
FF(2,1)=0.0
FF(2,2)=RO*G*(HK2-HNIZ2)*ETA
FF(2,3)=0.0
FF(2,4)=0.0
FF(2,5)=RO*G*QT12*ETA

F(3)=RO*G*(HK2-HNIZ2)*QT22*ETA-XN22
FF(3,1)=0.0
FF(3,2)=0.0
FF(3,3)=RO*G*(HK2-HNIZ2)*ETA
FF(3,4)=0.0
FF(3,5)=RO*G*QT22*ETA

F(4)=RO*G*(HK2-HNIZ2)*QT32*ETA-XN32
FF(4,1)=0.0
FF(4,2)=0.0
FF(4,3)=0.0
FF(4,4)=RO*G*(HK2-HNIZ2)*ETA
FF(4,5)=RO*G*QT32*ETA

F(5)=HK1+(1.0-THETA)*DT*((Q1-QT11-QT21-QT31)/AK1)+THETA*DT*((Q2-QT12-QT22-
QT32)/AK2)-HK2
FF(5,1)=THETA*DT/AK2
FF(5,2)=-THETA*DT/AK2
FF(5,3)=-THETA*DT/AK2
FF(5,4)=-THETA*DT/AK2
FF(5,5)=-1.0

DO I=1,5
F(I)=-F(I)
END DO

FAKT=1.0
CALL SOLVER(FF,F,5)
Q2=Q2+FAKT*F(1)
QT12=QT12+FAKT*F(2)
QT22=QT22+FAKT*F(3)
QT32=QT32+FAKT*F(4)
HK2=HK2+FAKT*F(5)

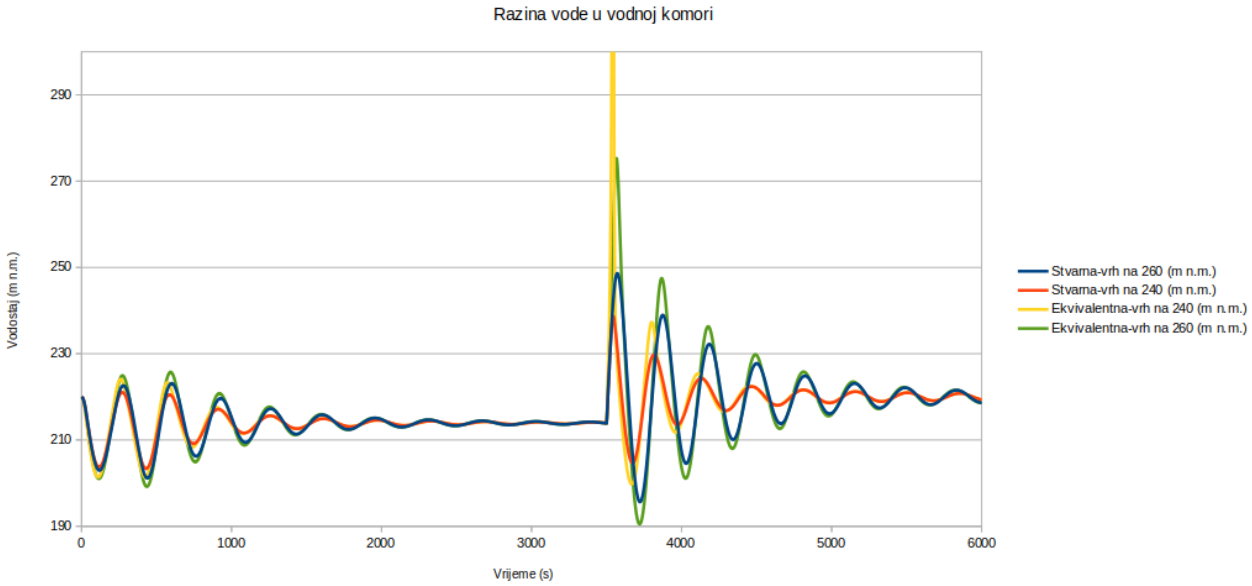
DO I=1,5
IF(ABS(F(I)).GT.TOC) GO TO 1000
END DO
RETURN
END
```

7. ZAKLJUČAK

U ovom zadatku cilj je bio modelirati vodnu komoru sa prigušenjem i usporediti je sa cilindričnom vodnom komorom sa gornjim i donjim proširenjem te vidjeti kako različiti promjeri otvora prigušenja utječu na oscilacije razine u vodnoj komori.

Napravljene su tri varijante vodnih komora sa zračnim prigušenjem i jedna varijanta bez prigušenja. Sve vodne komore imaju istu površinu poprečnog presjeka cilindričnog dijela.

Dimenzije vodnih komora dobivene su pomoću Thominog kriterija, ali je površina povećana radi zadovoljavanja uvjeta maksimalnog tlaka zraka u vodnoj komori tako da je Thomin kriterij služio kao orijentacijska veličina.

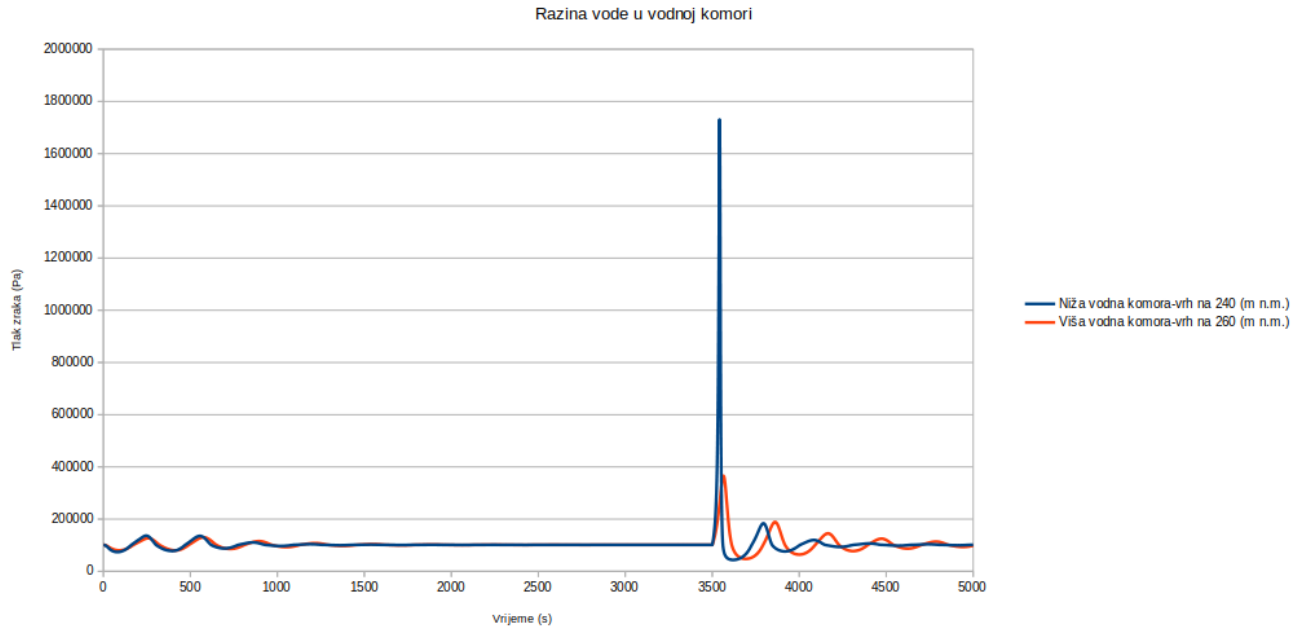


Graf 28 : Stvarna i ekvivalentna razina vode u vodnoj komori za varijantu A(plavo i zeleno) i B(narančasto i žuto)

Graf 28 prikazuje stvarnu i ekvivalentnu razinu vode u vodnoj komori za dvije varijante vodne komore sa zračnim prigušenjem. Varijante vodnih komora A i B imaju istu površinu poprečnog presjeka cilindričnog djela vodne komore i iznosi 240.53 (m^2). Vrh vodne komore varijante A nalazi se na 260 (m n.m.), a vrh vodne komore B nalazi se na 240 (m n.m.). Obje vodne komore na vrhu imaju prigušenje jednakog promjera 0.5 (m). Prvi dio grafa 28, od 0 (s) do 2000 (s), prikazuje osciliranje vodnih masa za slučaj uključivanja turbina, a drugi dio grafa od 3500 (s) prikazuje osciliranje vodnih masa za slučaj ispada turbina iz pogona. Na drugom dijelu grafa žutom linijom je prikazana ekvivalentna razina vode za vodnu komoru B čiji je vrh na 240 (m n.m.), i penje se do 404 (m n.m.) što rezultira velikim porastom tlaka zraka u vodnoj komori na 1730163.3 (Pa) (17.3 (bara)) u odnosu na

varijantu A gdje maksimalni apsolutni tlak u vodnoj komori iznosi 365800 (Pa) (3.66 (bara)) (prikazano na grafu 29).

Vodna komora iz varijante A je viša u odnosu na vodnu komoru iz varijante B za 20 (m). Takvim povećanjem osigurano je da ekvivalntna razina vode (zelena linija) u varijanti A uzme vrijednost 275 (m n.m.) što je za 129 (m) niže u odnosu na varijantu B. Plava (varijanta A) i narančasta (varijanta B) linija prikazuju stvarnu razinu vode.



Graf 29 :Tlak zraka u vodnoj komori za varijantu A (plavo) i B (narančasto)

Uvidom u rezultate analize vodnih komora sa prigušenjem očekivano je bilo da će manji otvor dati manju amplitudu oscilacija, te dulje vrijeme smirivanja oscilacija. Pokazalo se da već otvori većih površina od 0,5 (m^2) ne utječu značajno na rezultate veličine amplitude oscilacija jer se već kod takvog otvora dobije dobro poklapanje stvarne i ekvivalentne razine vode (koja je posljedica različitog apsolutnog tlaka zraka u vodnoj komori u odnosu na atmosferski tlak), što znači da se kod većih otvora gubi efekt zračnog prigušenja.

U usporedbi vodne komore sa i bez prigušenja nema značajnijih rezultata u vidu manje amplitude oscilacija, ali vrijeme potrebno da se oscilacije umire je znatno kraće kod vodne komore sa zračnim prigušenjem.

Vodna komora sa zračnim prigušenjem je dosta ekonomičnija za izvedbu jer je volumenski manja od vodne komore sa gornjim i donjim proširenjem (bez zračnog prigušenja). Ponekad izrada gornjeg proširenja nije fizički moguća, ili su zemljani i armiranobetonski radovi za izradu proširenja dosta veliki, odnosno ukupno veći od izrade vodne komore sa zračnim prigušenjem, pa izrada vodne komore sa zračnim prigušenjem može biti povoljnije rješenje. Negativan utjecaj vodne komore sa zračnim prigušenjem je povećani tlak iznad

površine vode u vodnoj komori koji svoj utjecaj prostire i na dovodni tunel. Zbog toga dovodni tunel treba dimenzionirati na veće tlačno unutrašnje opterećenje u odnosu na varijantu vodne komore bez zračnog prigušenja.

8. GRAFIČKI PRILOZI

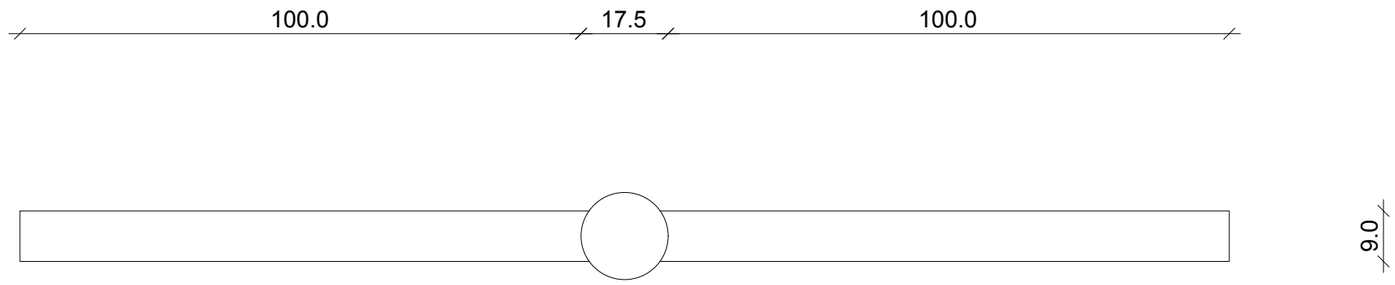
1. TLOCRT I UZDUŽNI PRESJEK VODNE KOMORE SA PRIGUŠENJEM
2. UZDUŽNI PRESJEK VODNE KOMORE SA PRIGUŠENJEM
3. POPREČNI PRESJECI VODNE KOMORE SA PRIGUŠENJEM 1-1, 2-2, 3-3, 4-4
4. POPREČNI PRESJECI VODNE KOMORE SA PRIGUŠENJEM 5-5, 6-6, 7-7, 8-8, 9-9
5. POPREČNI PRESJEK DONJEG I GORNJEG PROŠIRENJA VODNE KOMORE
6. UZDUŽNI PRESJEK VODNE KOMORE SA GORNJIM I DONJIM PROŠIRENJEM
7. POPREČNI PRESJECI VODNE KOMORE SA GORNJIM I DONJIM PROŠIRENJEM 1-1, 2-2, 3-3, 4-4
8. POPREČNI PRESJECI VODNE KOMORE SA GORNJIM I DONJIM PROŠIRENJEM 5-5, 6-6, 7-7, 8-8, 9-9
9. POPREČNI PRESJECI VODNE KOMORE SA GORNJIM I DONJIM PROŠIRENJEM 10-10, 11-11

9. LITERATURA

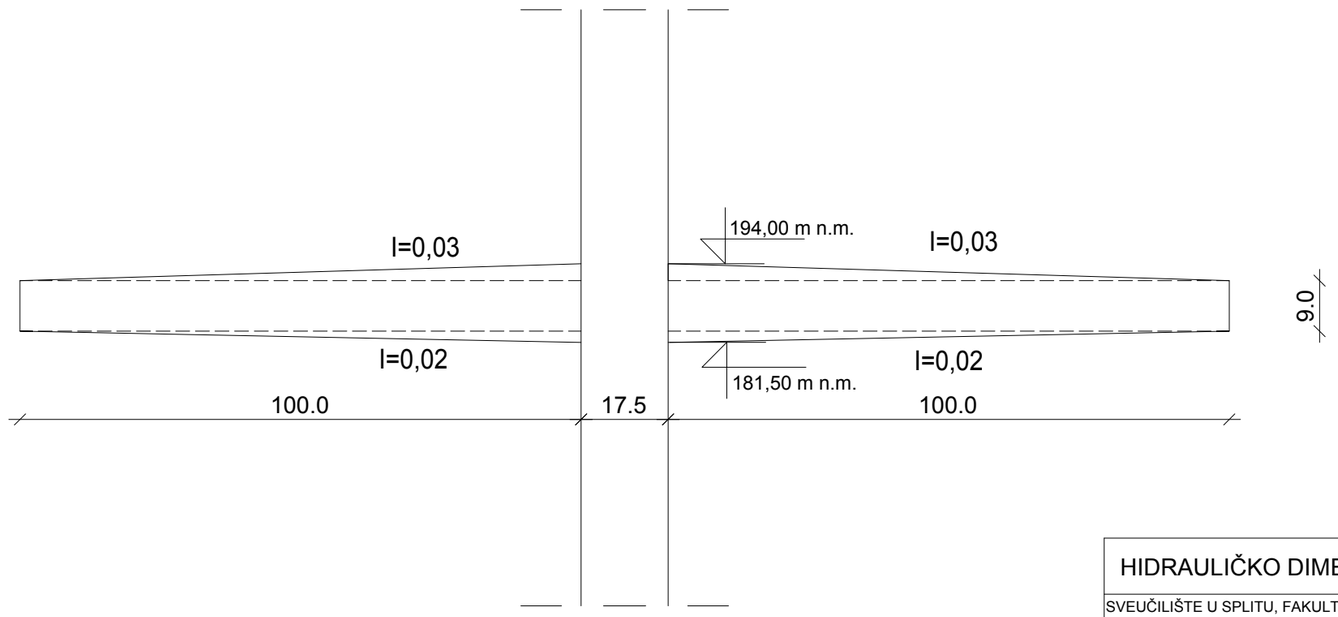
[1] Jović, V. (2006). Osnove hidromehanike. Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije.

[2] Jović, V. Hidraulika, materijali za predavanja. Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije.

TLOCRT VODNE KOMORE

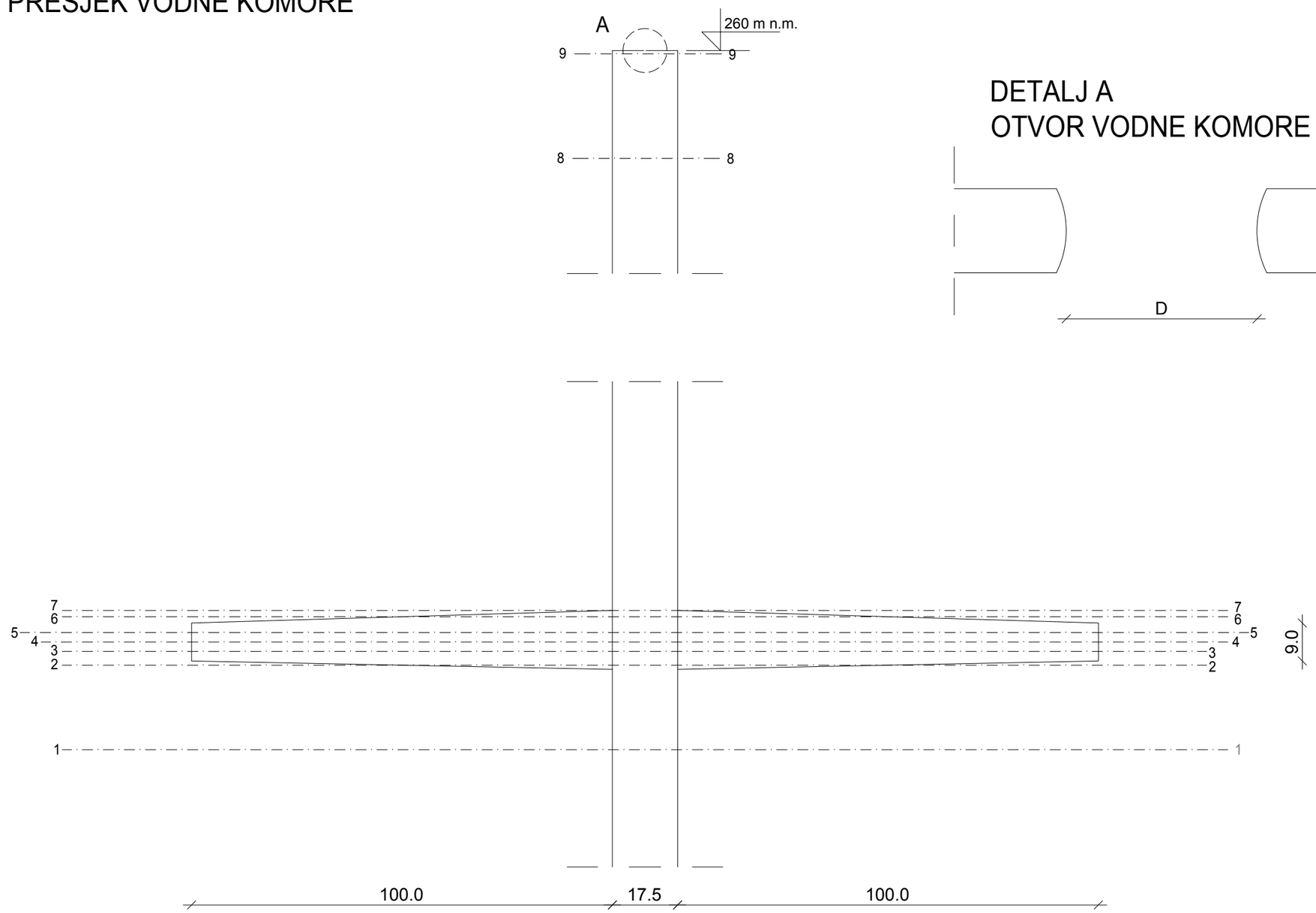


UZDUŽNI PRESJEK DONJEG PROŠIRENJA VODNE KOMORE



HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA PRIGUŠENJEM	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	1.

UZDUŽNI PRESJEK VODNE KOMORE



PRIGUŠENJE VODNE KOMORE

DETALJ A
OTVOR VODNE KOMORE

HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA PRIGUŠENJEM	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	2.

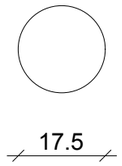
POPREČNI PRESJEK 1-1

D=17,5m

A=240,53 m^2

h=160,0 m n.m.

V=37541,72 m^3

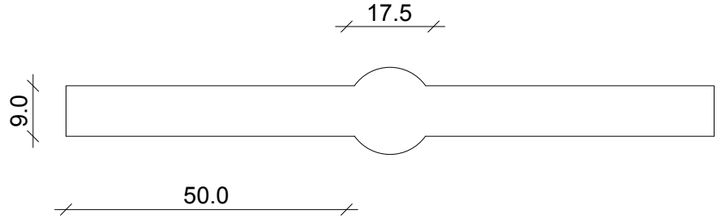


POPREČNI PRESJEK 2-2

A=1096,68m^2

h=181,5 m n.m.

V=33673,58 m^3

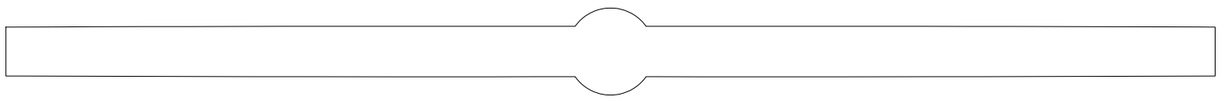


POPREČNI PRESJEK 3-3

A=1982,17 m^2

h=184,75 m n.m.

V=28670,46 m^3

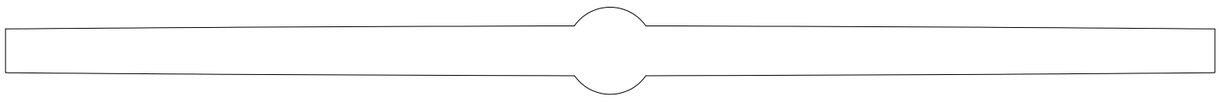


POPREČNI PRESJEK 4-4

A=1883,67 m^2

h=187,0 m n.m.

V=24321,38 m^3



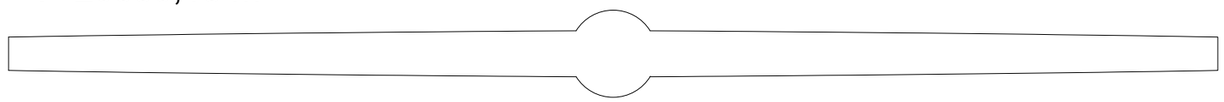
HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA PRIGUŠENJEM	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	3.

POPREČNI PRESJEK 5-5

A=1640,96 m^2

h=189,25 m n.m.

V=20356,18 m^3

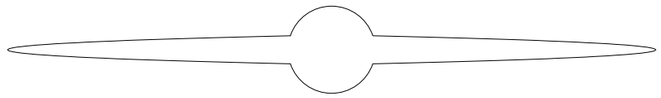


POPREČNI PRESJEK 6-6

A=527,66 m^2

h=193,0 m n.m.

V=16290,01 m^3



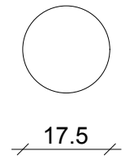
POPREČNI PRESJEK 7-7

D=17,5m

A=240,53 m^2

h=194,5 m n.m.

V=15752,75 m^3



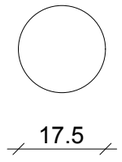
POPREČNI PRESJEK 8-8

D=17,5m

A=240,53 m^2

h=230,0 m n.m.

V=7215,90 m^3



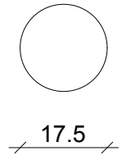
POPREČNI PRESJEK 9-9

D=17,5m

A=240,53 m^2

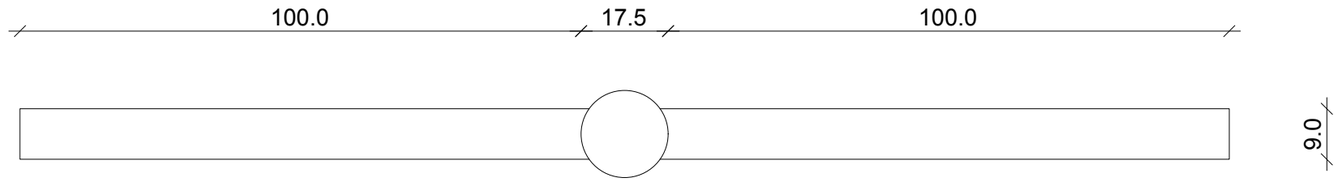
h=260,0 m n.m.

V=0,00 m^3

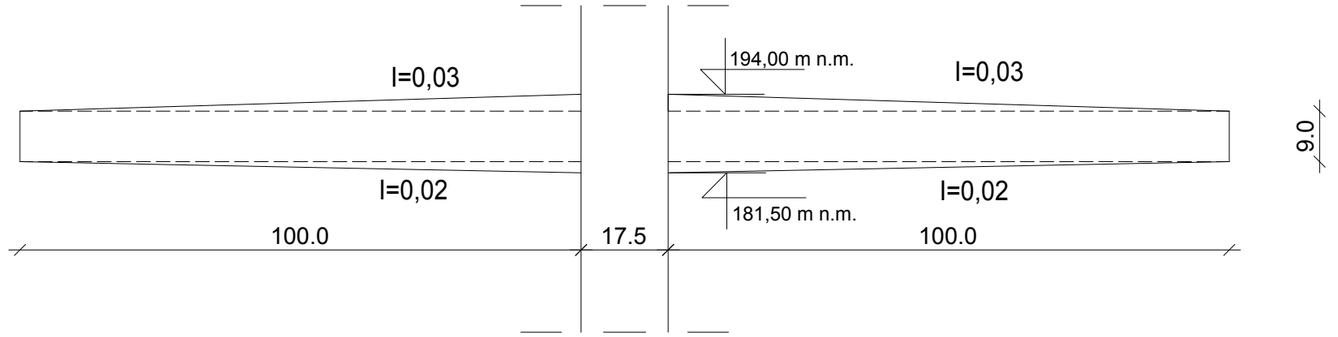


HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA PRIGUŠENJEM	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	4.

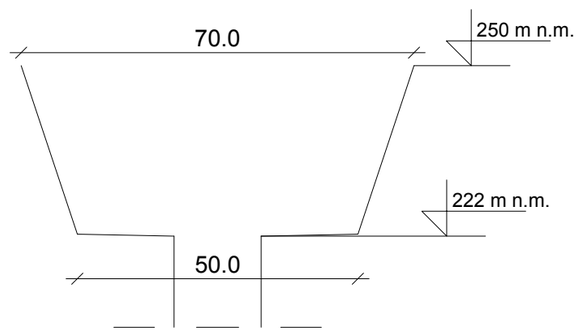
TLOCRT VODNE KOMORE



UZDUŽNI PRESJEK DONJEG PROŠIRENJA VODNE KOMORE

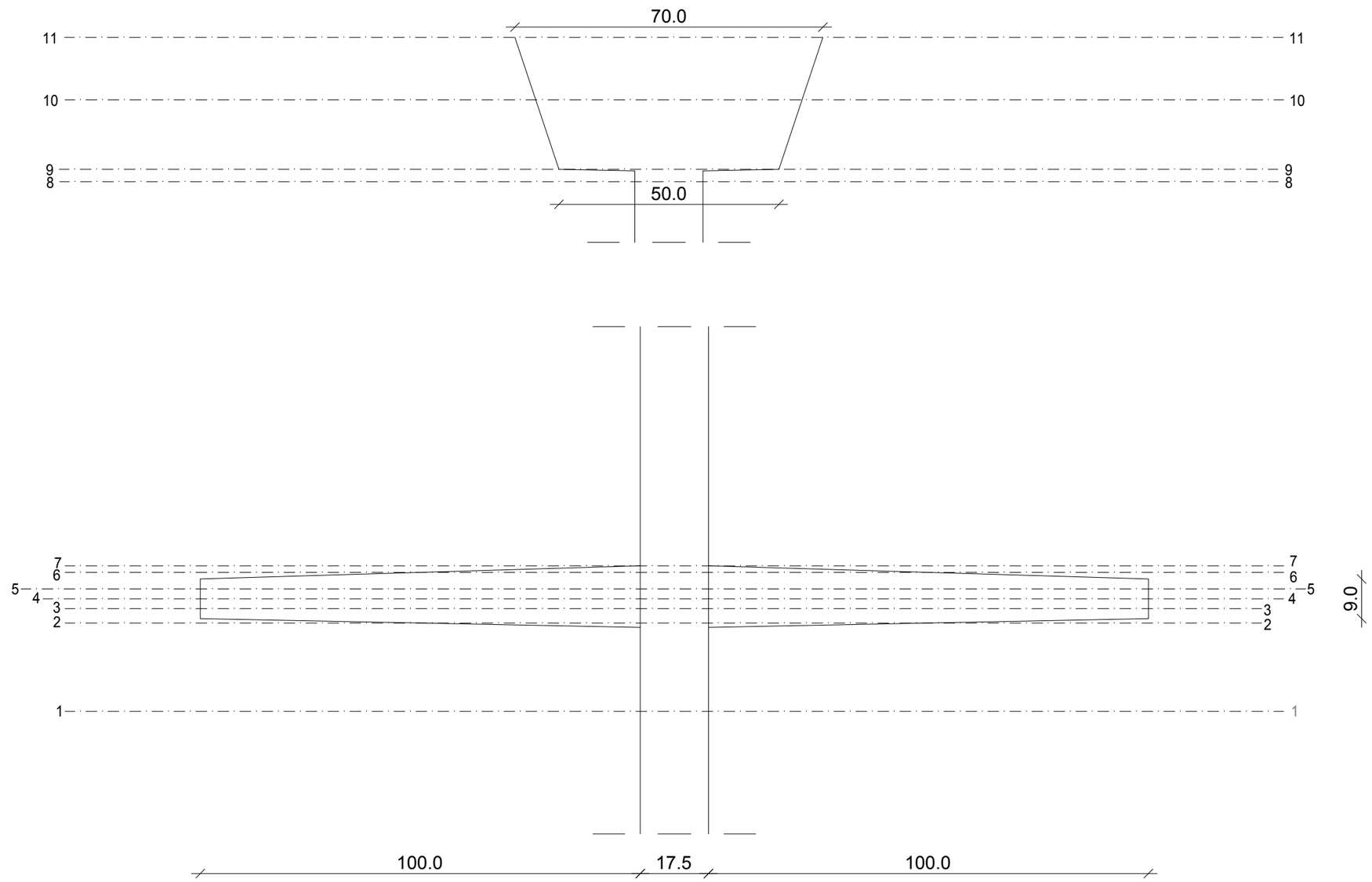


UZDUŽNI PRESJEK GORNJEG PROŠIRENJA VODNE KOMORE



HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA OBA PROŠIRENJA	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	5.

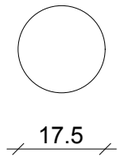
UZDUŽNI PRESJEK VODNE KOMORE



HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA OBA PROŠIRENJA	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	6.

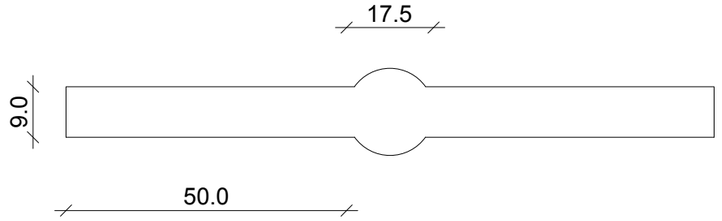
POPREČNI PRESJEK 1-1

D=17,5m
A=240,53 m^2
h=160,0 m n.m.



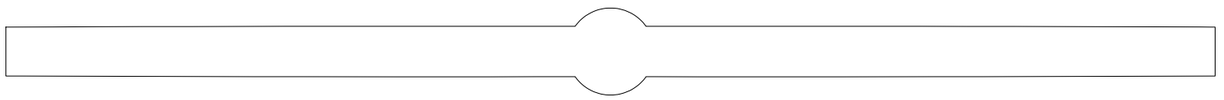
POPREČNI PRESJEK 2-2

A=1096,68m^2
h=181,5 m n.m.



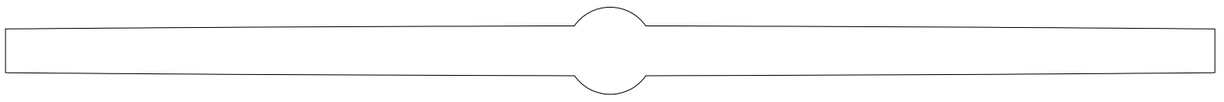
POPREČNI PRESJEK 3-3

A=1982,17 m^2
h=184,75 m n.m.



POPREČNI PRESJEK 4-4

A=1883,67 m^2
h=187,0 m n.m.

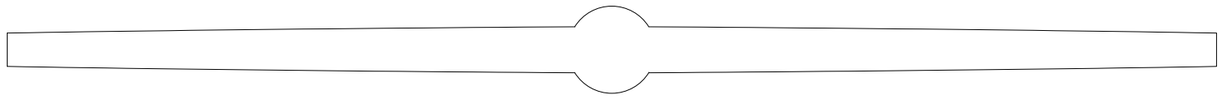


HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA OBA PROŠIRENJA	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	7.

POPREČNI PRESJEK 5-5

A=1640,96 m^2

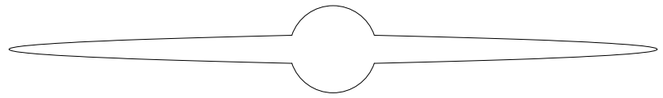
h=189,25 m n.m.



POPREČNI PRESJEK 6-6

A=527,66 m^2

h=193,0 m n.m.

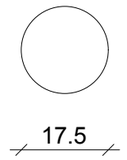


POPREČNI PRESJEK 7-7

D=17,5m

A=240.53 m^2

h=194,5 m n.m.

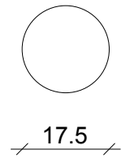


POPREČNI PRESJEK 8-8

D=17,5m

A=240,53 m^2

h=220,0 m n.m.

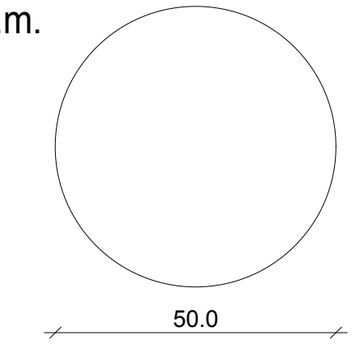


POPREČNI PRESJEK 9-9

D=50,0 m

A=1963,49 m^2

h=222,0 m n.m.



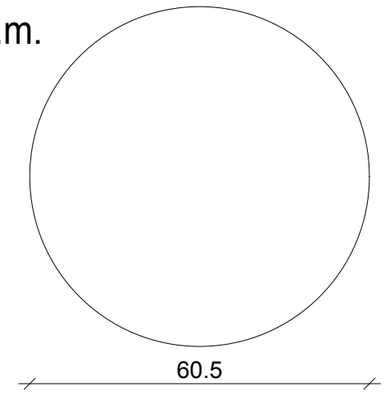
HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA OBA PROŠIRENJA	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	8.

POPREČNI PRESJEK 10-10

D=60,50 m

A=2874,75 m^2

h=237,0 m n.m.

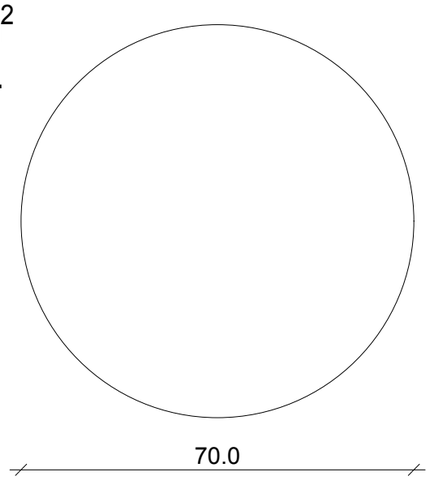


POPREČNI PRESJEK 11-11

D=70,0 m

A=3848,45 m^2

h=250 m n.m.



HIDRAULIČKO DIMENZIONIRANJE VODNE KOMORE		
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
SADRŽAJ:	VODNA KOMORA SA OBA PROŠIRENJA	DIPLOMSKI RAD
IZRADIO:	MARKO RODIN	
AKAD.GOD.	2019./2020.	9.