

# Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore

---

**Babić, Simona**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:329039>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Simona Babić**

**Split, veljača 2020. godine**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Simona Babić**

**Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore**

**Diplomski rad**

**Split, veljača 2020. godine**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: **Simona Babić**  
BROJ INDEKSA: **661**  
KATEDRA: **Katedra za hidromehaniku i hidrauliku**  
PREDMET: **Hidraulika**

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema:  
Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore

Opis zadatka: Studentica će izraditi matematički model funkcioniranja složene vodne komore u sustavu akumulacija, dovodni tuneli, 3 vodne komore, te 5 tlačnih cjevovoda kojima voda dolazi do 5 turbina. Potrebno je postaviti sve dinamičke jednačbe, jednačbe kontinuiteta i jednačbe snage za svih 5 turbina, 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 ili skupnog uključivanja turbina.

Vodne komore moraju, za pojedine načine uključivanja i isključivanja turbina, 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 jednačbe treba riješiti numeričkom integracijom primjenom mješovitog postupka. Za rješenje problema treba izraditi programsko rješenje u FORTRAN-u. Sve rezultate treba prikazati grafički na dovoljnom broju primjera.

U Splitu, listopad 2019. godine

Voditelj Diplomskog rada:

Doc. dr. sc. Davor Bojanić, dipl.ing.građ.

# **Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore**

## *Sažetak:*

U ovom diplomskom radu prikazan je matematički hidraulički model nestacionarnog tečenja pod tlakom u složenom hidrotehničkom sustavu derivacijske hidroelektrane koji se sastoji od akumulacije, dva dovodna tunela, tri vodne komore, pet tlačnih cjevovoda s turbinama i odvodnog kanala, u svrhu dimenzioniranja 3 vodne komore. Model je izrađen u programskom jeziku FORTRAN95. Napravljeno je više varijanti potrebnih dimenzija vodnih komora koje zadovoljavaju pojedine načine uključivanja turbina u pogon. Rezultati proračuna svake varijante prikazani su na grafički.

## *Ključne riječi:*

matematički model, derivacijska hidroelektrana, dimenzioniranje vodnih komora

# **Hydraulic sizing of complex water chamber**

## *Abstract:*

In this graduate thesis, a mathematical hydraulic model of non-stationary pressurized flow in a complex hydrotechnical system of a derivative hydroelectric power plant consisting of an accumulation, two supply tunnels, three water chambers, five pressure pipelines with turbines and a drainage channel, for the purpose of sizing 3 water chambers, was performed. The model was created in the FORTRAN95 programming language. Several variants of necessary dimensions of the water chambers have been made that satisfy certain ways of incorporating the turbines into operation. The calculation results of each variant are shown graphically.

## *Keywords:*

mathematical model, derivative hydroelectric power plant, sizing of water chambers

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1. TEORIJSKE OSNOVE MATEMATIČKOG MODELA</b> .....	2
1.1. HIDRODINAMIČKI UVJETI I JEDNADŽBE ZA VODNE KOMORE .....	2
1.2. STABILNOST SUSTAVA VODNE KOMORE.....	4
<b>2. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA</b> .....	8
2.1. OPIS MODELA .....	8
2.2. FORMULACIJA MATEMATIČKOG MODELA .....	9
2.2.1. EKSPlicitNO – IMPLICITNA METODA .....	12
2.3. NEWTON-RAPHSON METODA RJEŠAVANJA SUSTAVA NELINEARNIH JEDNADŽBI.....	14
2.4. SLAGANJE SUSTAVA JEDNADŽBI PREMA NEWTON-RAPHSONOVOJ METODI.	16
<b>3. PROGRAMSKO RJEŠENJE</b> .....	22
3.1. ULAZNI PODACI .....	22
3.1.1. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE DOVODNIH TUNELA I CIJEVI .....	22
3.1.2. PRORAČUN DONJE VODE.....	22
3.1.3. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE VODNIH KOMORA.....	24
3.1.4. SNAGA TURBINA.....	31
3.1.5. FORMIRANJE ULAZNOG FILE-A ZA DINAMIČKU ANALIZU .....	34
<b>4. REZULTATI PRORAČUNA</b> .....	37
4.1. VARIJANTA 1.....	37
4.1.1. Varijanta 1.1 - $h_a = 330$ (m n.m.).....	37
4.1.2. Varijanta 1.2 – $h_a = 345$ (m n.m.).....	43
4.2. VARIJANTA 2.....	48
4.2.1. VARIJANTA 2.1 – $h_a = 330$ (m n.m.) .....	48
4.2.2. VARIJANTA 2.2 – $h_a = 345$ (m n. m.) .....	54
4.3. VARIJANTA 3.....	60
4.3.1. VARIJANTA 3.1 – $h_a = 330$ (m n. m.) .....	60
4.3.2. VARIJANTA 3.2 – $h_a = 345$ (m n. m.) .....	66
4.4. VARIJANTA 4.....	71
4.4.1. VARIJANTA 4.1 – $h_a = 330$ (m n. m.) .....	71
4.4.2. VARIJANATA 4.2 – $h_a = 345$ (m n. m.).....	77
4.5. VARIJNATA 5.....	83
4.5.1. VARIJANTA 5.1 – $h_a = 330$ (m n. m.) .....	83

4.5.2.	VARIJANTA 5.2 – $h_a = 345$ (m n. m.) .....	89
4.6.	VARIJANTA 6.....	94
4.6.1.	VARIJANTA 6.1 – $h_a = 330$ (m n. m.) .....	94
4.6.2.	VARIJANTA 6.2 – $h_a = 345$ (m n. m.) .....	100
4.7.	VARIJANTA 7.....	106
4.7.1.	VARIJANTA 7.1 – $h_a = 330$ (m n. m.) .....	106
4.7.2.	VARIJANTA 7.2 – $h_a = 345$ (m n. m.) .....	112
<b>5.</b>	<b>RASPRAVA</b> .....	<b>118</b>
<b>6.</b>	<b>PROGRAMSKO RJEŠENJE U FORTRANU 95</b> .....	<b>120</b>
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>132</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATURA</b> .....	<b>133</b>
<b>9.</b>	<b>PRILOZI</b> .....	<b>134</b>

## 1. UVOD

Hipotetska hidroelektrana Knin je visokotlačno derivacijsko postrojenje koje čini: akumulacija, dovodni tuneli, 3 vodne komore, 5 tlačnih cjevovoda kojima voda dolazi do 5 turbina, te odvodni kanal kojim voda iz hidroelektrane otječe prema rijeci.

U navedenom postrojenju akumulacija ima zadatak da svojom branom uspori vodu kako bi se postigao maksimalni energetska potencijal akumulirane vode, a svojom zapreminom da izravna promjenjiv dotok u trajanju nekog unaprijed određenog vremenskog perioda. Višak vode, u odnosu na propuštanje kroz turbine hidroelektrane, se akumulira, dok u periodu manjeg dotoka, pražnjenjem akumulacije se nadoknađuje potrebna količina na turbinama. Dva dovodna tunela imaju zadatak da dovedu vodu iz akumulacije do vodnih komora 1 i 2 uz što manji gubitak raspoložive energijske visine. Voda iz dovodnih tunela 1 i 2 i vodnih komora 1 i 2, provodi se sa dva cjevovoda do vodne komore broj 3, 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. Ispuštanjem vode sa izlaznim smanjenjem brzina povećava se bruto proizvedena energija na turbinama, jer aspirator sisajući djeluje na vodu pri prolazu kroz turbinu.

Vodostaj akumulacije varira od minimalne razine 330,0 (m n.m.) do maksimalne razine u vrijednosti od 345,0 (m n.m.).

Desni dovodni tunel je dug 8000 (m) i promjer mu je 7,0 (m), dok je lijevi dovodni tunel dug 8100 (m) i promjer mu je 7,6 (m). Na kraju tunela smješten je sustav vodnih komora 1 i 2. Nizvodno od sustava navedenih komora na udaljenosti od 200 (m) smješteno je zajedničko okno vodne komore preko kojeg su cjevovodi međusobno spojeni. Pri dnu okna smještena je vodna komora 3 s donjim proširenjem. Nadalje je smještena zasunska komora do koje vodi pristupni tunel. Iz jednog tunela izlaze dva, a iz drugoga tri tlačna cjevovoda koja ulaze u zasunsku komoru. Strojarnica i prostor za transformatore su smješteni u jedinstvenoj podzemnoj prostoriji-strojarnici. Do strojarnice u kojoj je ugrađeno 5 proizvodnih jedinica dolazi se pomoću pristupnog tunela. Svih 5 turbina ima instalirani protok u iznosu od po 50 (m<sup>3</sup>/s). Na difuzore turbina nastavlja se odvodni tunel koji prelazi u odvodni kanal.



# 1. TEORIJSKE OSNOVE MATEMATIČKOG MODELA

## 1.1. HIDRODINAMIČKI UVJETI I JEDNADŽBE ZA VODNE KOMORE

U navedenom sustavu mogu se posebno izdvojiti dio dovodnog sustava i vodna komora, te posebno tlačni cjevovodi i turbine. Naime, brzine promjene 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 pojedinom 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 brže 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:

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

gdje je:

$z_1, p_1, v_1$ - geodetska kota, tlak i srednja brzina u uzvodnom profilu cijevi određenim stacionažom, mjereno po osi cijevi

$z_2, p_2, v_2$ - isto kao gore, ali u nizvodnom profilu,

$\Delta H_e$  - zbroj svih lokalnih i linijskih gubitaka energijske visine između dvaju profila,

$\frac{1}{g} \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial v}{\partial t} dl$  - integralna veličina energijske visine između dvaju presjeka potrebne za ubrzanje tekućine (vode),

$\rho$  - gustoća tekućine (vode)

$g$  - ubrzanje sile teže

Za rješenje problema potrebno je uvesti još jednadžbu kontinuiteta.

Integralni član ubrzanja 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  $l$ , 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 sustava 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

$\beta v^2$  – ukupni gubici, pozitivni ako  $v$  ima smjer prema komori

Određuje se iz relacije ukupnih gubitaka:

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

dakle, na uobičajen način, kao za stacionarno strujanje.

b) Jednadžba kontinuiteta

Zasniva se na održanju volumenskog protoka: razlika dotoka u otjecanju iz vodne komore izaziva podizanje vodostaja u vodnoj komori.

Prema tome :

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

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 vodostaja (vode) u komori.

## 1.2. 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 tehničke eksploatacije energetskih mreža zahtijevaju konstantnost frekvencije izmjenične struje reda veličine  $\pm 0.2\%$  od normalne veličine. Frekvencija električne struje, proizvedena određenim generatorom, ovisi o kutnoj brzini obrtaja rotora generatora. Ta zavisnost određena je izrazom:

$$f = \frac{pn}{60} \quad (6)$$

gdje je:

$f$  - frekvencija struje u periodima /s

$n$  - broj okretaja u minuti

$p$  - broj parova polova generatora

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

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_V - M_O \quad (7)$$

gdje je :

$I$  - polarni moment tromosti obrtnih dijelova agregata,

$\omega$  - 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  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , tako da je potrebno ispuniti uvjet:

$$M_V = M_O \quad (8)$$

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

Kako je moment vanjskih sila na turbini određen sa :

$$M_V = \frac{\rho g Q H \eta}{\omega} \quad (9)$$

gdje je iskorištena snaga toka vode:

$$N = \rho g Q H \eta \quad (10)$$

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

Snaga na turbini, odnosno agregatu, određena je veličinom protoka  $Q$  i energijskim padom  $H$ , kao i koeficijentom iskorištenja  $\eta$  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 privodnog kola, kako bi se protok  $Q$  i pad  $H$  prilagodili, tako da snaga agregata ostane konstantna. Iz izraza za snagu nije teško zaključiti da se sa smanjenjem pada  $H$  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 najniže kote vodostaja u akumulaciji, najviše kote 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 :

$$Q - Q_T = A_k \frac{dh}{dt} \quad (11)$$

b) Dinamička jednadžba :

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

c) Jednadžba konstantne snage turbine,  $N=\text{const.}$  :

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

Nakon diferenciranja po vremenu:

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

Uvjet konstantnosti snage bit će:

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

gdje se smatra da je  $\eta = \text{const}$ . Dijeleći gornji izraz sa  $A_D$ , dobije se:

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

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

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

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

$$\frac{L}{g} \frac{A_k}{A_D} \frac{d^2z}{dt^2} + \frac{L}{g} \left[ \frac{u_0 H_0}{(H_{st} + z)^2} \right] \frac{dz}{dt} + z + \beta v^2 = 0 \quad (18)$$

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:

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

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

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

Granična vrijednost Thominovog kriterija:

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

Veličina  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{L}{g} \cdot \frac{A_D}{A_K} \cdot \frac{v_0^2}{\Delta h_0^2} = \frac{z_*^2}{\Delta h_0^2} \quad (22)$$

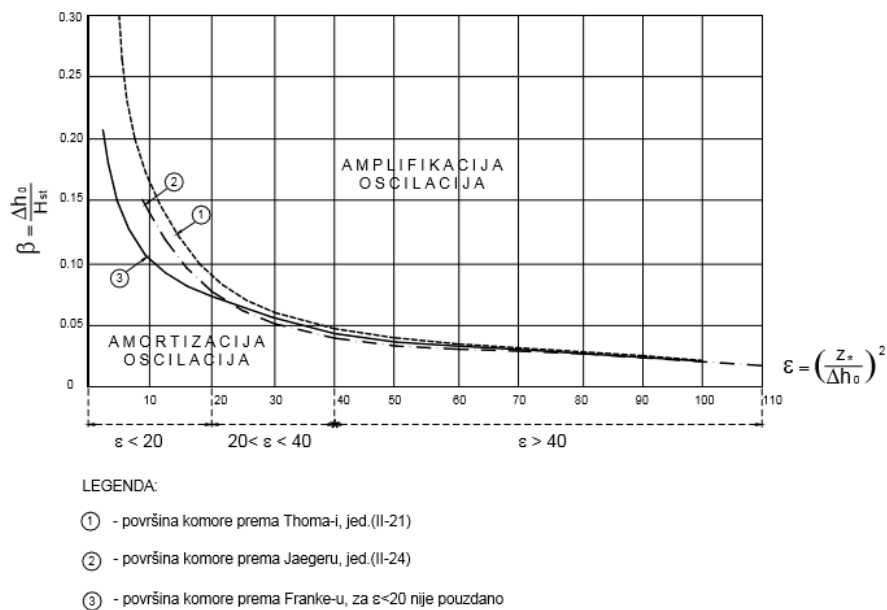
zove se parametar VOGT-a. Ako je sustav dovodni tunel - vodna komora - tlačni cjevovod takvih dimenzija da ima  $20 < \varepsilon < 40$ , tada se prema Jaeger-u može uzeti :

$$A_J = n^* A_{Th} \quad (23)$$

gdje je Jaeger-ov faktor povećanja površine vodne komore:

$$n^* = 1 + 0.482 \frac{z_*}{(H_{st} - \Delta h_0)} \quad (24)$$

Za niže parametre  $\varepsilon$  nije razrađena teorija te se stabilnost određuje numeričkom integracijom ili hidrauličkim modelom. Na slici br. 1 prikazan je dijagram za određivanje stabilnosti cilindrične vodne komore.



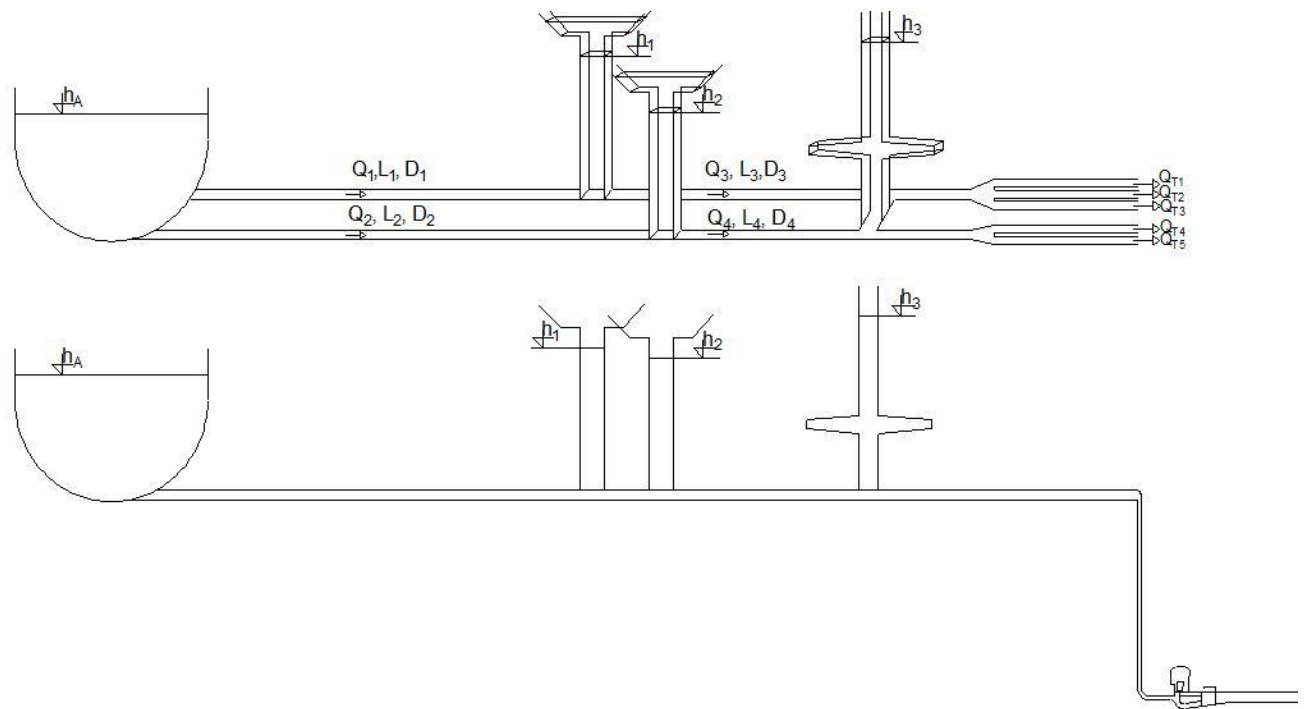
Slika 1 Dijagram za određivanje stabilnosti cilindrične vodne komore

## 2. MATEMATIČKI MODEL SUSTAVA

### 2.1. OPIS MODELA

Cilj izrade matematičkog modela je dimenzioniranje vodne komore za zadane veličine, te za varijante brzog pojedinačnog ili skupnog uključivanja turbina. Vodne komore moraju, za pojedine načine uključivanja i isključivanja turbina, 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.

Skica sustava prikazana je u nastavku:



Slika 2 Skica sustava hidroelektrane

## 2.2. FORMULACIJA MATEMATIČKOG MODELA

Ponašanje sustava opisano je sljedećim jednažbama:

a) Jednažba kontinuiteta za prvu vodnu komoru:

$$A_1 \cdot \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_3 \quad (25)$$

b) Jednažba kontinuiteta za drugu vodnu komoru:

$$A_2 \cdot \frac{dh_2}{dt} = Q_2 - Q_4 \quad (26)$$

c) Jednažba kontinuiteta za treću vodnu komoru:

$$A_3 \cdot \frac{dh_3}{dt} = Q_3 + Q_4 - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{T3} - Q_{T4} - Q_{T5} \quad (27)$$

d) Dinamička jednažba za prvi dovodni tunel:

$$h_A = h_1 \pm \beta_1 Q_1^2 + \frac{L_1}{gA_1} \cdot \frac{dQ_1}{dt} \quad (28)$$

e) Dinamička jednažba za drugi dovodni tunel:

$$h_A = h_2 \pm \beta_2 Q_2^2 + \frac{L_2}{gA_2} \cdot \frac{dQ_2}{dt} \quad (29)$$

f) Dinamička jednažba za cijev tri:

$$h_A = h_3 \pm \beta_3 Q_3^2 + \frac{L_3}{gA_3} \cdot \frac{dQ_3}{dt} \quad (30)$$

g) Dinamička jednažba za cijev četiri:

$$h_A = h_4 \pm \beta_4 Q_4^2 + \frac{L_4}{gA_4} \cdot \frac{dQ_4}{dt} \quad (32)$$

h) Jednažba za snagu prve turbine:

$$N_1^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T1}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (33)$$

i) Jednažba za snagu druge turbine:

$$N_2^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (34)$$

j) Jednažba za snagu treće turbine:

$$N_3^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (35)$$



k) Jednadžba za snagu četvrte turbine:

$$N_4^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T4}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (36)$$

l) Jednadžba za snagu pete turbine:

$$N_5^{K+1} = \rho \cdot g \cdot Q_{T5}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (37)$$

Sustav jednadžbi kontinuiteta i dinamičkih jednadžbi se integrira 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 kad je  $t = t^{k+1}$  se proračunava novo stanje sustava.

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

Integralni oblik sustava jednadžbi:

a) Jednadžba kontinuiteta za prvu vodnu komoru:

$$\int_k^{k+1} dh_1 = \int_k^{k+1} \left( \frac{Q_1 - Q_3}{A_1} \right) dt \quad (38)$$

b) Jednadžba kontinuiteta za drugu vodnu komoru:

$$\int_k^{k+1} dh_2 = \int_k^{k+1} \left( \frac{Q_2 - Q_4}{A_2} \right) dt \quad (39)$$

c) Jednadžba kontinuiteta za treću vodnu komoru:

$$\int_k^{k+1} dh_3 = \int_k^{k+1} \left( \frac{Q_3 + Q_4 - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{T3} - Q_{T4} - Q_{T4} - Q_{T5}}{A_3} \right) dt \quad (40)$$

d) Dinamička jednadžba za prvi dovodni tunel:

$$\int_k^{k+1} dQ_1 = \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_A - h_1) \pm \beta_1 |Q_1| Q_1}{\frac{L_1}{gA_1}} \right) dt \quad (41)$$

e) Dinamička jednadžba za drugi dovodni tunel:

$$\int_k^{k+1} dQ_2 = \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_A - h_2) \pm \beta_2 |Q_2| Q_2}{\frac{L_2}{gA_2}} \right) dt \quad (42)$$

f) Dinamička jednađba za cijev tri:

$$\int_k^{k+1} dQ_3 = \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_1 - h_3) \pm \beta_3 |Q_3| Q_3}{\frac{L_3}{gA_3}} \right) dt \quad (43)$$

g) Dinamička jednađba za cijev četiri:

$$\int_k^{k+1} dQ_4 = \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_2 - h_3) \pm \beta_4 |Q_4| Q_4}{\frac{L_4}{gA_4}} \right) dt \quad (43)$$

Nakon integracije lijeve strane jednađbi dobije se:

a) Jednađba kontinuiteta za prvu vodnu komoru:

$$h_1^{K+1} = h_1^K + \int_k^{k+1} \left( \frac{Q_1 - Q_3}{A_1} \right) dt \quad (44)$$

b) Jednađba kontinuiteta za drugu vodnu komoru:

$$h_2^{K+1} = h_2^K + \int_k^{k+1} \left( \frac{Q_2 - Q_4}{A_2} \right) dt \quad (45)$$

c) Jednađba kontinuiteta za treću vodnu komoru:

$$h_3^{K+1} = h_3^K + \int_k^{k+1} \left( \frac{Q_3 + Q_4 - Q_{T1} - Q_{T2} - Q_{T3} - Q_{T4} - Q_{T5}}{A_3} \right) dt \quad (46)$$

d) Dinamička jednađba za prvi dovodni tunel:

$$Q_1^{K+1} = Q_1^K + \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_A - h_1) \pm \beta_1 |Q_1| Q_1}{\frac{L_1}{gA_1}} \right) dt \quad (47)$$

e) Dinamička jednađba za drugi dovodni tunel:

$$Q_2^{K+1} = Q_2^K + \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_A - h_2) \pm \beta_2 |Q_2| Q_2}{\frac{L_2}{gA_2}} \right) dt \quad (48)$$

f) Dinamička jednađba za cijev tri:

$$Q_3^{K+1} = Q_3^K + \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_1 - h_3) \pm \beta_3 |Q_3| Q_3}{\frac{L_3}{gA_3}} \right) dt \quad (49)$$

g) Dinamička jednađba za cijev četiri:

$$Q_4^{K+1} = Q_4^K + \int_k^{k+1} \left( \frac{(h_2 - h_3) \pm \beta_4 |Q_4| Q_4}{\frac{L_4}{gA_4}} \right) dt \quad (50)$$

Desna strana jednadžbi 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-eksplicitan postupak tj. mješoviti postupak s parametrom integracije  $\Theta=0,5$ .

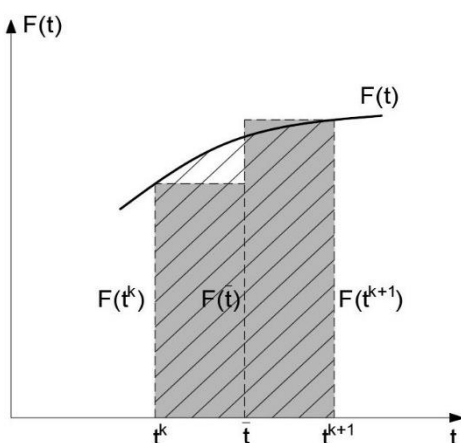
### 2.2.1. EKSPLICITNO – IMPLICITNA METODA

Korištenje mješovitog postupka objasniti će se na primjeru jednadžbe:

$$\frac{dy}{dt} = F(t) \quad (51)$$

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

$$y^{k+1} = y^k + \int_k^{k+1} F(t)dt \quad (52)$$



Slika 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:

$$y^{k+1} - y^k = F(\tilde{t}) \cdot (t^{k+1} - t^k) \quad (53)$$

gdje srednji vremenski trenutak uzima vrijednost  $t^k \leq \tilde{t} \leq t^{k+1}$ .

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

$$y^{k+1} - y^k = (1 - \theta) \cdot F(t^k) \cdot (t^{k+1} - t^k) + \theta \cdot F(t^{k+1}) \cdot (t^{k+1} - t^k) \quad (54)$$

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  $\theta$  ima funkciju raspodjele eksplicitne i implicitne vrijednosti.  $\theta$  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) Jednadžba kontinuiteta za prvu vodnu komoru:

$$h_1^{K+1} = h_1^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_1^K - Q_3^K}{A_1^K} + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_1^{K+1} - Q_3^{K+1}}{A_1^{K+1}} \quad (55)$$

b) Jednadžba kontinuiteta za drugu vodnu komoru:

$$h_2^{K+1} = h_2^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_2^K - Q_4^K}{A_2^K} + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_2^{K+1} - Q_4^{K+1}}{A_2^{K+1}} \quad (55)$$

c) Jednadžba kontinuiteta za treću vodnu komoru:

$$h_3^{K+1} = h_3^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_3^K + Q_4^K - Q_{T1}^K - Q_{T2}^K - Q_{T3}^K - Q_{T4}^K - Q_{T5}^K}{A_3^K} + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_3^{K+1} + Q_4^{K+1} - Q_{T1}^{K+1} - Q_{T2}^{K+1} - Q_{T3}^{K+1} - Q_{T4}^{K+1} - Q_{T5}^{K+1}}{A_3^{K+1}} \quad (56)$$

d) Dinamička jednadžba za prvi dovodni tunel:

$$Q_1^{K+1} = Q_1^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_1}{L_1} \cdot (h_A - h_1^K - \beta_1^K \cdot |Q_1^K| \cdot Q_1^K) + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_1}{L_1} \cdot (h_A - h_1^{K+1} - \beta_1^{K+1} \cdot |Q_1^{K+1}| \cdot Q_1^{K+1}) \quad (57)$$

e) Dinamička jednadžba za drugi dovodni tunel:

$$Q_2^{K+1} = Q_2^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_2}{L_2} \cdot (h_A - h_2^K - \beta_2^K \cdot |Q_2^K| \cdot Q_2^K) + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_2}{L_2} \cdot (h_A - h_2^{K+1} - \beta_2^{K+1} \cdot |Q_2^{K+1}| \cdot Q_2^{K+1}) \quad (58)$$

f) Dinamička jednadžba za cijev tri:

$$Q_3^{K+1} = Q_3^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_3}{L_3} \cdot (h_1^K - h_3^K - \beta_3^K \cdot |Q_3^K| \cdot Q_3^K) + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_3}{L_3} \cdot (h_1^{K+1} - h_3^{K+1} - \beta_3^{K+1} \cdot |Q_3^{K+1}| \cdot Q_3^{K+1}) \quad (59)$$

g) Dinamička jednačina za cijev četiri:

$$Q_4^{K+1} = Q_4^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_4}{L_4} \cdot (h_2^K - h_3^K - \beta_4^K \cdot |Q_4^K| \cdot Q_4^K) + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_4}{L_4} \cdot (h_2^{K+1} - h_3^{K+1} - \beta_4^{K+1} \cdot |Q_4^{K+1}| \cdot Q_4^{K+1}) \quad (60)$$

Jednačbe koje opisuju sustav čine nelinearni sustav od dvanaest jednačbi s dvanaest nepoznanica:

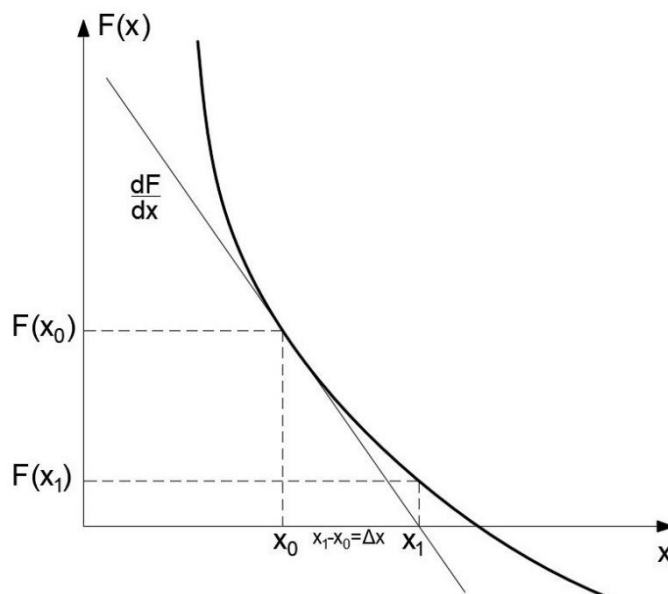
$$h_1^{K+1}, h_2^{K+1}, h_3^{K+1}, Q_1^{K+1}, Q_2^{K+1}, Q_3^{K+1}, Q_4^{K+1}, Q_{T1}^{K+1}, Q_{T2}^{K+1}, Q_{T3}^{K+1}, Q_{T4}^{K+1}, Q_{T5}^{K+1}.$$

Sustav je rješiv primjenom Newtonove metode.

### 2.3. NEWTON-RAPHSON METODA RJEŠAVANJA SUSTAVA NELINEARNIH JEDNAČBI

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

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 naći će se druga pretpostavka  $x_1$  koja je bliža rješenju  $r$ , i tako iterativno dok razlika pretpostavljene i izračunate veličine postane približno jednaka:  $x_n - r \approx 0$ .



Slika 4 Graf funkcije  $F(x)$

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.

$$\frac{dF}{dx} = \frac{-F(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (61)$$

$$x_1 = x_0 - \frac{F(x_0)}{\frac{dF(x)}{dx}} \quad (62)$$

Općenito može se zapisati:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{\frac{dF(x)}{dx}} \quad (63)$$

$$\frac{dF}{dx} \cdot \Delta x = -F(x) \quad (64)$$

gdje je:

$$\Delta x = x_{n+1} - x_n \quad (65)$$

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

## 2.4. SLAGANJE SUSTAVA JEDNADŽBI PREMA NEWTON-RAPHSONOVOJ METODI

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

$$(h_1^{K+1}, h_2^{K+1}, h_3^{K+1}, Q_1^{K+1}, Q_2^{K+1}, Q_3^{K+1}, Q_4^{K+1}, Q_{T1}^{K+1}, Q_{T2}^{K+1}, Q_{T3}^{K+1}, Q_{T4}^{K+1}, Q_{T5}^{K+1}).$$

a) Funkcija F(1)

$$F(1) = h_1^{K+1} - h_1^K - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_1^K - Q_3^K}{A_1^K} - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_1^{K+1} - Q_3^{K+1}}{A_1^{K+1}} = 0 \quad (66)$$

Derivacija funkcije F(1) po nepoznatim varijablama:

$$FF(1,1) = \frac{\partial F_1}{\partial h_1^{K+1}} = 1,0, \quad FF(1,4) = \frac{\partial F_1}{\partial Q_1^{K+1}} = -\frac{\theta \Delta t}{A_1^{K+1}}, \quad FF(1,6) = \frac{\partial F_1}{\partial Q_3^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t}{A_1^{K+1}} \quad (67)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

b) Funkcija F(2)

$$F(2) = h_2^{K+1} - h_2^K - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_2^K - Q_4^K}{A_2^K} - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_2^{K+1} - Q_4^{K+1}}{A_2^{K+1}} = 0 \quad (68)$$

Derivacija funkcije F(2) po nepoznatim varijablama:

$$FF(2,2) = \frac{\partial F_2}{\partial h_2^{K+1}} = 1,0, \quad FF(2,5) = -\frac{\partial F_2}{\partial Q_2^{K+1}} = -\frac{\theta \Delta t}{A_2^{K+1}}, \quad F(2,7) = \frac{\partial F_2}{\partial Q_4^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t}{A_2^{K+1}} \quad (69)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

c) Funkcija F(3)

$$F(3) = h_3^{K+1} - h_3^K - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_3^K + Q_4^K - Q_{T1}^K - Q_{T2}^K - Q_{T3}^K - Q_{T4}^K - Q_{T5}^K}{A_3^K} - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_3^{K+1} + Q_4^{K+1} - Q_{T1}^{K+1} - Q_{T2}^{K+1} - Q_{T3}^{K+1} - Q_{T4}^{K+1} - Q_{T5}^{K+1}}{A_3^{K+1}} = 0 \quad (70)$$

Derivacija funkcije F(3) po nepoznatim varijablama:

$$FF(3,3) = \frac{\partial F_3}{\partial h_3^{K+1}} = 1,0, \quad FF(3,6) = \frac{\partial F_3}{\partial Q_3^{K+1}} = -\frac{\theta \Delta t}{A_3^{K+1}} \quad (71)$$

$$FF(3,7) = \frac{\partial F_3}{\partial Q_4^{K+1}} = -\frac{\theta \Delta t}{A_3^{K+1}}, \quad FF(3,8) = \frac{\partial F_3}{\partial Q_{T1}^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t}{A_3^{K+1}} \quad (72)$$

$$FF(3,9) = \frac{\partial F_2}{\partial Q_{T2}^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t}{A_3^{K+1}}, \quad FF(3,10) = \frac{\partial F_2}{\partial Q_{T3}^{K+1}} = -\frac{\theta \Delta t}{A_3^{K+1}} \quad (73)$$

$$FF(3,11) = \frac{\partial F_2}{\partial Q_{T4}^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t}{A_3^{K+1}}, \quad FF(3,12) = \frac{\partial F_2}{\partial Q_{T5}^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t}{A_3^{K+1}} \quad (74)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

d) Funkcija F(4)

$$F(4) = Q_1^{K+1} - Q_1^K - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_1}{L} \cdot (h_A - h_1^K - \beta_1^K \cdot |Q_1^K| \cdot Q_1^K) - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_1}{L} \cdot (h_A - h_1^{K+1} - \beta_1^{K+1} \cdot |Q_1^{K+1}| \cdot Q_1^{K+1}) = 0 \quad (75)$$

Derivacija funkcije F(4) po nepoznatim varijablama:

$$FF(4,1) = \frac{\partial F_4}{\partial h_1^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t g A_1}{L_1}; \quad FF(4,4) = \frac{\partial F_4}{\partial Q_1^{K+1}} = 1 + 2 \cdot \frac{\theta \Delta t g A_1 \beta_1^{K+1}}{L_1} \cdot Q_1^{K+1} \quad (76)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

e) Funkcija F(5)

$$F(5) = Q_2^{K+1} - Q_2^K - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_2}{L} \cdot (h_A - h_2^K - \beta_2^K \cdot |Q_2^K| \cdot Q_2^K) - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_2}{L} \cdot (h_A - h_2^{K+1} - \beta_2^{K+1} \cdot |Q_2^{K+1}| \cdot Q_2^{K+1}) = 0 \quad (77)$$

Derivacija funkcije F(5) po nepoznatim varijablama:

$$FF(5,2) = \frac{\partial F_5}{\partial h_2^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t g A_2}{L_2}; \quad FF(5,5) = \frac{\partial F_5}{\partial Q_2^{K+1}} = 1 + 2 \cdot \frac{\theta \Delta t g A_2 \beta_2^{K+1}}{L_2} \cdot Q_2^{K+1} \quad (78)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

f) Funkcija F(6)

$$F(6) = Q_3^{K+1} - Q_3^K - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_3}{L} \cdot (h_1^K - h_3^K - \beta_3^K \cdot |Q_3^K| \cdot Q_3^K) - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_3}{L} \cdot (h_1^{K+1} - h_3^{K+1} - \beta_3^{K+1} \cdot |Q_3^{K+1}| \cdot Q_3^{K+1}) = 0 \quad (79)$$

Derivacija funkcije F(6) po nepoznatim varijablama:

$$FF(6,1) = \frac{\partial F_6}{\partial h_1^{K+1}} = -\frac{\theta \Delta t \cdot g \cdot A_3}{L_3}, \quad FF(6,3) = \frac{\partial F_6}{\partial h_3^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t \cdot g \cdot A_3}{L_3} \quad (80)$$

$$FF(6,6) = \frac{\partial F_6}{\partial Q_3^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t \cdot g \cdot A_3}{L_3} \cdot 2 \cdot \beta_3^{K+1} \cdot Q_3^{K+1} + 1.0 \quad (81)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.



g) Funkcija F(7)

$$F(7) = Q_4^{K+1} - Q_4^K + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_4}{L} \cdot (h_2^K - h_3^K - \beta_4^K \cdot |Q_4^K| \cdot Q_4^K) - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{gA_4}{L} \cdot (h_2^{K+1} - h_3^{K+1} - \beta_4^{K+1} \cdot |Q_4^{K+1}| \cdot Q_4^{K+1}) = 0 \quad (82)$$

Derivacija funkcije F(7) po nepoznatim varijablama:

$$FF(7,2) = \frac{\partial F_7}{\partial h_2^{K+1}} = -\frac{\theta \Delta t g A_4}{L_4}, \quad FF(7,3) = \frac{\partial F_7}{\partial h_3^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t g A_4}{L_4} \quad (83)$$

$$FF(7,7) = \frac{\partial F_7}{\partial Q_4^{K+1}} = \frac{\theta \Delta t g A_4}{L_4} \cdot 2 \cdot \beta_4^{K+1} \cdot Q_4^{K+1} + 1.0 \quad (84)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

h) Funkcija F(8)

$$F(8) = N_1^{K+1} - \rho \cdot g \cdot Q_{T1}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta = 0 \quad (85)$$

Derivacija funkcije F(8) po nepoznatim varijablama:

$$FF(8,3) = \frac{\partial F_8}{\partial h_3^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot Q_{T1}^{K+1} \cdot \eta; \quad FF(8,8) = \frac{\partial F_8}{\partial Q_{T1}^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (86)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

i) Funkcija F(9)

$$F(9) = N_2^{K+1} - \rho \cdot g \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta = 0 \quad (87)$$

Derivacija funkcije F(9) po nepoznatim varijablama:

$$FF(9,3) = \frac{\partial F_9}{\partial h_3^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot Q_{T2}^{K+1} \cdot \eta; \quad FF(9,9) = \frac{\partial F_9}{\partial Q_{T2}^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (88)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

j) Funkcija F(10)

$$F(10) = N_3^{K+1} - \rho \cdot g \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta = 0 \quad (89)$$

Derivacija funkcije F(10) po nepoznatim varijablama:

$$FF(10,3) = \frac{\partial F_{10}}{\partial h_3^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot Q_{T3}^{K+1} \cdot \eta; \quad FF(10,10) = \frac{\partial F_{10}}{\partial Q_{T3}^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (90)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

k) Funkcija F(11)

$$F(11) = N_4^{K+1} - \rho \cdot g \cdot Q_{T4}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta = 0 \quad (91)$$

Derivacija funkcije F(11) po nepoznatim varijablama:

$$FF(11,3) = \frac{\partial F_{12}}{\partial h_3^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot Q_{T4}^{K+1} \cdot \eta; \quad FF(11,11) = \frac{\partial F_{10}}{\partial Q_{T4}^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (92)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

l) Funkcija F(12)

$$F(12) = N_5^{K+1} - \rho \cdot g \cdot Q_{T5}^{K+1} \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta = 0 \quad (92)$$

Derivacija funkcije F(12) po nepoznatim varijablama:

$$FF(12,3) = \frac{\partial F_{13}}{\partial h_3^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot Q_{T5}^{K+1} \cdot \eta; \quad FF(12,12) = \frac{\partial F_{10}}{\partial Q_{T5}^{K+1}} = -\rho \cdot g \cdot (h_3^{k+1} - h_D^{k+1}) \cdot \eta \quad (93)$$

Derivacije po ostalim nepoznatim varijablama su jednake 0.

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

$$[J] \cdot [\Delta] = [-F] \quad (94)$$

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial F_1}{\partial h_1^{k+1}} = 1 & 0 & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial Q_3^{k+1}} = \frac{\theta \Delta r}{A_1^{k+1}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\partial F_2}{\partial h_2^{k+1}} = 1 & \dots & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial Q_4^{k+1}} = \frac{\theta \Delta r}{A_2^{k+1}} & \dots & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial F_6}{\partial h_1^{k+1}} = \frac{\theta \Delta r g A_3}{L_3^{k+1}} & 0 & \dots & \frac{\partial F_6}{\partial Q_3^{k+1}} = -\frac{\theta \Delta r g A_3}{L_3^{k+1}} \cdot 2 \cdot \beta_3^{k+1} \cdot Q_3^{k+1} + 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
 0 & \frac{\partial F_7}{\partial h_2^{k+1}} = -\frac{\theta \Delta r g A_3}{L_3^{k+1}} & \dots & 0 & \frac{\partial F_7}{\partial Q_4^{k+1}} = -\frac{\theta \Delta r g A_4}{L_4^{k+1}} \cdot 2 \cdot \beta_4^{k+1} \cdot Q_4^{k+1} + 1 & \dots & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial F_{11}}{\partial Q_{74}^{k+1}} = -\rho \cdot g \cdot (h_5^{k+1} - h_D^{k+1}) & 0 \\
 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial F_{12}}{\partial Q_{75}^{k+1}} = -\rho \cdot g \cdot (h_5^{k+1} - h_D^{k+1})
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta h_1^{k+1} \\ \Delta h_2^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta h_6^{k+1} \\ \Delta h_7^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta h_{11}^{k+1} \\ \Delta h_{12}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ -F_2 \\ \vdots \\ -F_6 \\ -F_7 \\ \vdots \\ -F_{11} \\ -F_{12} \end{bmatrix}$$

Slika 5 Matrični oblik sustava

Rješenje sustava je vektor prirasta  $[\Delta]$ :

$$[\Delta] = [J]^{-1} \cdot [-F] \quad (95)$$

Popravljenе 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:

$$h_1^{K+1, \text{novо}} = h_1^{K+1, \text{starо}} + \Delta h_1$$

$$h_2^{K+1, \text{novо}} = h_2^{K+1, \text{starо}} + \Delta h_2$$

$$h_3^{K+1, \text{novо}} = h_3^{K+1, \text{starо}} + \Delta h_3$$

$$Q_1^{K+1, \text{novо}} = Q_1^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_1$$

$$Q_2^{K+1, \text{novо}} = Q_2^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_2$$

$$Q_3^{K+1, \text{novо}} = Q_3^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_3$$

$$Q_4^{K+1, \text{novо}} = Q_4^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_4$$

$$Q_{T1}^{K+1, \text{novо}} = Q_{T1}^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_{T1}$$

$$Q_{T2}^{K+1, \text{novо}} = Q_{T2}^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_{T2}$$

$$Q_{T3}^{K+1, \text{novо}} = Q_{T3}^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_{T3}$$

$$Q_{T4}^{K+1, \text{novо}} = Q_{T4}^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_{T4}$$

$$Q_{T5}^{K+1, \text{novо}} = Q_{T5}^{K+1, \text{starо}} + \Delta Q_{T5}$$

Navedeni sustav јednadžbi rješavan је pomoću programskog rješenja u Fortranu 95.

### 3. PROGRAMSKO RJEŠENJE

#### 3.1. ULAZNI PODACI

##### 3.1.1. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE DOVODNIH TUNELA I CIJEVI

Desni dovodni tunel je dug 8000 (m), promjer mu je 7,0 (m), apsolutna hidraulička hrapavost  $\varepsilon = 0,0015$  (m) i koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu  $\xi_{ulaza} = 2,0$ .

Lijevi dovodni tunel dug 8100 (m), promjer mu je 7,6 (m), apsolutna hidraulička hrapavost  $\varepsilon = 0,0015$  (m) i koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu  $\xi_{ulaza} = 2,0$ .

Na kraju tunela smješten je sustav vodnih komora 1 i 2. Nizvodno od sustava navedenih komora na udaljenosti od 200 (m) smješteno je zajedničko okno vodne komore preko kojeg su cjevovodi međusobno spojeni. Cijev 3 je promjera 7,0 (m), dok je cijev 4 promjera 7,6 (m), a apsolutna hidraulička hrapavost obje cijevi iznosi  $\varepsilon = 0,0015$  (m), a koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu je zanemaren.

##### 3.1.2. PRORAČUN DONJE VODE

Krivulja protoka donje vode u odvodnom tunelu i odvodnom kanalu određena je primjenom Manning-Strickler-ove formule, i to iterativnim postupkom za veći broj odabranih protoka. Za svaki odabrani protok izračunata je normalna dubina  $y_n$ .

$$v = K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_0} \quad (96)$$

gdje je:

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

R - hidraulički radijus (R=A/O)

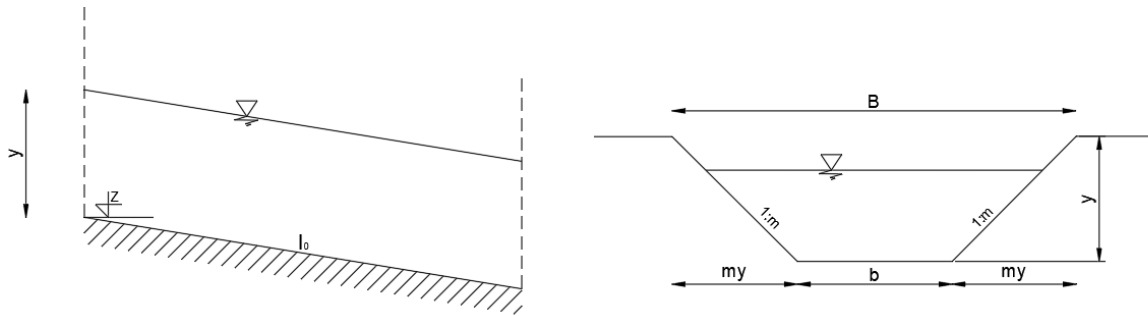
$I_0$  - nagib dna korita ( $I_0 = 0,005$ )

Nadalje:

$$Q = v \cdot A \quad (97)$$

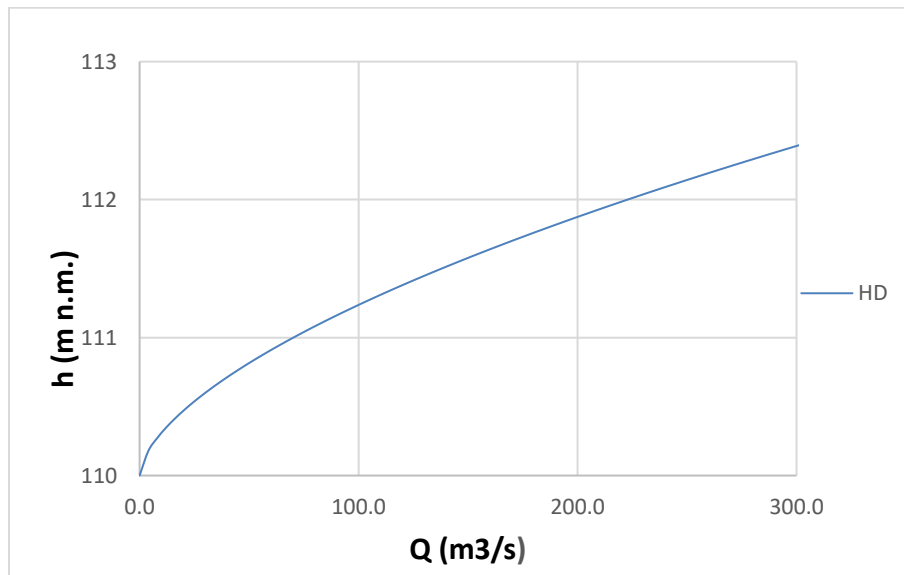
Iz čega slijedi da je:

$$Q = K \cdot \frac{A^{5/3}}{Q^{2/3}} \cdot \sqrt{I_0} \quad (98)$$



Slika 6 Uzdužni i poprečni presjek korita

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



Slika 7 Krivulja protoka donje vode

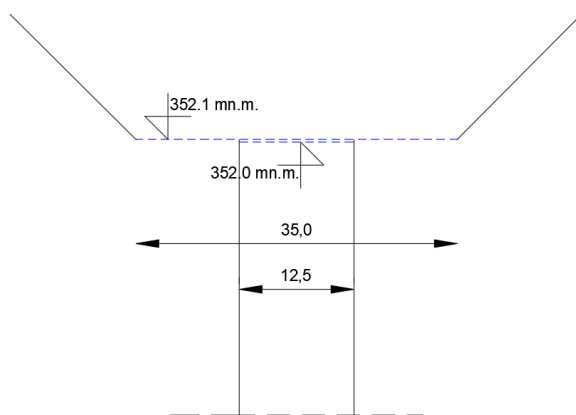
### 3.1.3. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE VODNIH KOMORA

U sustavu hidroelektrane su definirane tri vodne komore.

Na kraju dovodnih tunela nalaze se vodne komore 1 i 2 koje imaju gornje proširenje, a nizvodno od njih vodna komora 3 s donjim proširenjem.

U nastavku je definirana geometrija gore navedenih vodnih komora.

a) Vodne komora 1 i 2 jednakih su geometrijskih karakteristika.



Br.točke	h (m n.m.)	A(m <sup>2</sup> )
1	0,000	120,26
2	352,0	120,64
3	352,1	1250,0
4	353,0	1500,0
5	354,0	1750,0
6	355,0	2000,0
7	356,0	2250,0
8	357,0	2500,0
9	358,0	2750,0
10	400,0	4000,0

Slika 8 Površine i kote karakterističnih presjeka VK 1 i 2

b) Vodna komora 3 ima donje proširenje, a njeno 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 dozvoljene, to jest za otprilike 1.0 metar iznad donjeg ruba donjeg proširenja vodne komore

3. Maksimalna razina vode u vodnoj komori pri ispadnju sustava iz turbinskog pogona treba biti manja od maksimalno dozvoljene, to jest za ne smije premašiti gornji rub gornjih proširenja vodnih komora 1 i 2.

Kriterij za stabilnost vodne komore po D.Thomi :

$$A_k \geq A_{TH} = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{LA_D}{\Delta h_0(H_{st} - \Delta h_0)} \quad (99)$$

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

$\Delta h_0$  - gubici

$H_{st}$  - stacionarna razina vode

Granična vrijednost Thominovog kriterija:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{A_D}{A_K} \cdot \frac{v_0^2}{\Delta h_0^2} > 40 \quad (100)$$

Veličina  $\varepsilon$  zove se parametar VOGT-a.

$$\varepsilon = \frac{L}{g} \cdot \frac{A_D}{A_K} \cdot \frac{v_0^2}{\Delta h_0^2} = \frac{z_*^2}{\Delta h_0^2} \quad (101)$$

$$A_{TH} = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{LA_D}{\Delta h_0(H_{st} - \Delta h_0)} \quad (102)$$

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

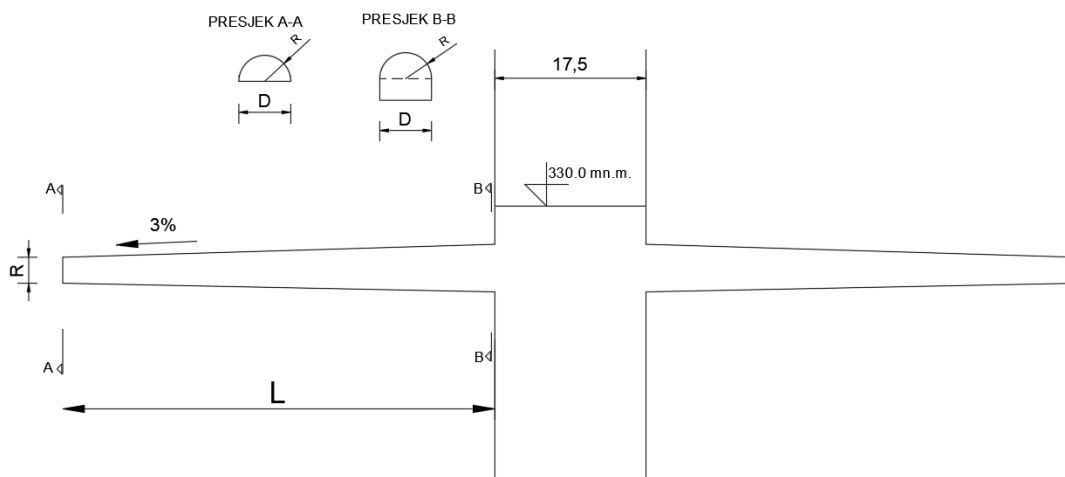
$$A_{TH} = \frac{2,982^2}{19,62} \cdot \frac{8250,0 \cdot 83,85}{6,59 \cdot (211,26 - 6,59)} = 232,16 \text{ m}^2 \quad (103)$$



$$\varepsilon = \frac{8250,0}{9,81} \cdot \frac{83,85}{232,16} \cdot \frac{2,982^2}{6,59^2} = 62,05 > 40 \quad (104)$$

Nakon proračuna parametra Vogt-a zaključuje se da je zadovoljen kriterij raspona veličine  $\varepsilon$  za primjenu proračuna površine vodne komore po Thominom kriteriju. Izračunati promjer vodne komore iznosi 17,19 (m), a usvojena je vrijednost od  $D_{k3}=17,50$  (m).

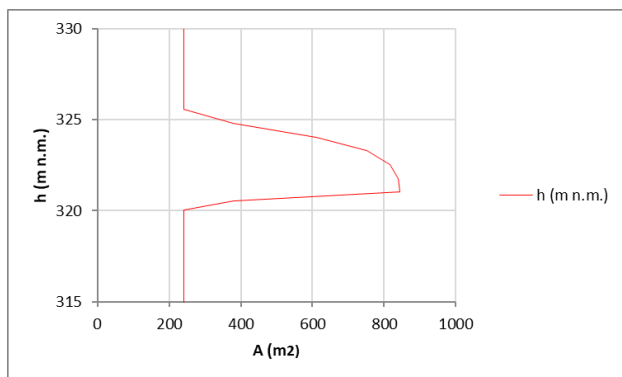
Potrebno je definirati donje proširenje vodne komore 3.



Slika 9 Shematski prikaz treće vodne komore

Napravljeno je više varijanti proširenja kako bi se odabralo optimalno proširenje za željeni režim rada turbina.

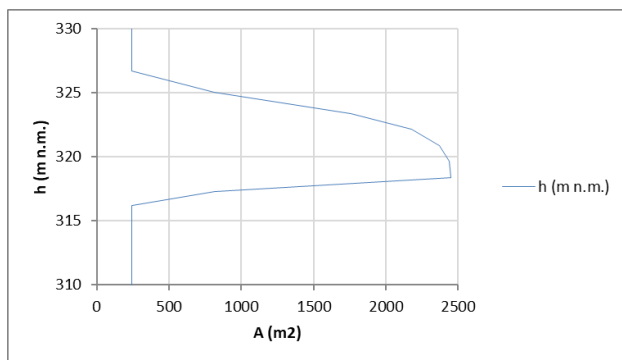
Prva varijanta ima donje proširenje dužine  $L = 50,0$  (m) i promjera  $D = 6,0$  (m).



Slika 10 A-h dijagram donjeg proširenja teče vodne komore

Br.točke	h (m n.m.)	A(m2)
1	0	240,528
2	320,040	240,528
3	320,540	379,234
4	321,040	843,240
5	321,79	839,140
6	322,540	816,390
7	323,290	752,240
8	324,040	611,000
9	324,790	752,000
10	325,580	240,528
11	400,000	240,528

Druga varijanta ima donje proširenje dužine  $L = 110,0$  (m) i promjera  $D = 10,0$  (m)

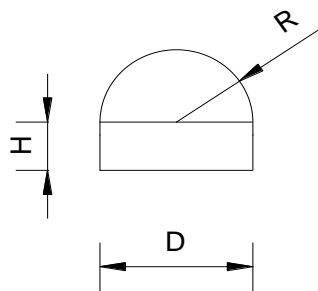


Slika 11 A-h dijagram donjeg proširenja treće vodne komore

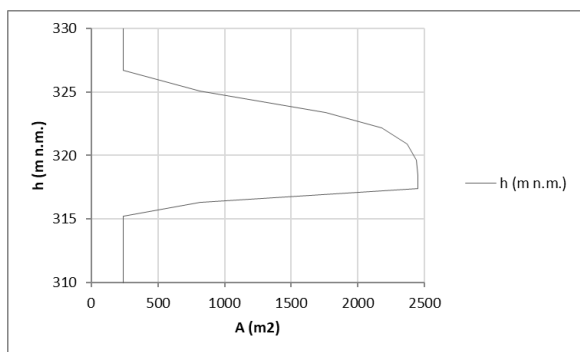
Br.točke	h (m n.m.)	A(m2)
1	0,000	240,528
2	316,204	240,528
3	317,304	815,926
4	318,404	2450,584
5	319,654	2439,360
6	320,904	2369,646
7	322,154	2179,435
8	323,404	1757,475
9	325,054	815,926
10	326,704	240,528
11	400,000	240,528

Treća varijanta ima donje proširenje dužine  $L = 110,0$  (m) i promjera  $D = 10,0$  (m).

Poprečni presjek se sastoji od pravokutnog dijela širine  $2R$ , visine  $H$  i polukruga promjera  $R$ . Vrijednost  $H$  u trećoj varijanti iznosi 1 (m).



Slika 12 Poprečni presjek donjeg proširenja treće vodne komore

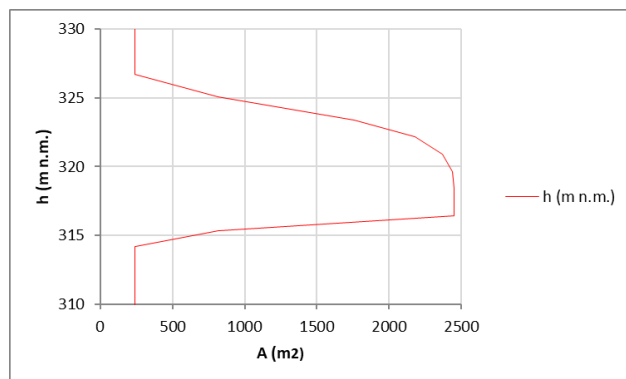


Slika 13 A-h dijagram donjeg proširenja treće vodne komore

Br. točke	h (m n.m.)	A(m <sup>2</sup> )
1	0,000	240,528
2	315,204	240,528
3	316,304	815,926
4	317,404	2450,584
5	318,404	2450,584
6	319,654	2439,360
7	320,904	2369,646
8	322,154	2179,435
9	323,404	1757,475
10	325,054	815,926
11	326,704	240,528
12	400,000	240,528

Četvrta varijanta ima donje proširenje dužine  $L = 110,0$  (m) i promjera  $D = 10,0$  (m).

Poprečni presjek se sastoji od pravokutnog dijela širine  $2R$ , visine  $H$  i polukruga promjera  $R$ . Vrijednost  $H$  u četvrtoj varijanti iznosi 2 (m).

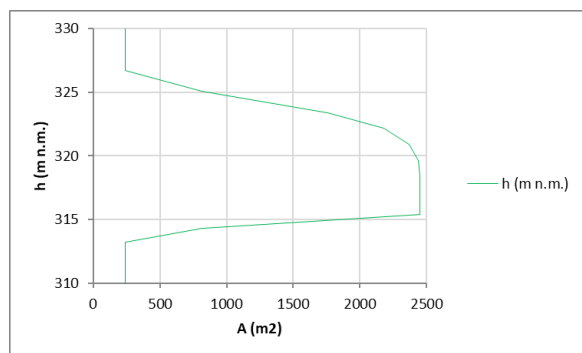


Slika 14 Slika 15 A-h dijagram donjeg proširenja treće vodne komore

Br.točke	h (m n.m.)	A(m2)
1	0,000	240,528
2	314,204	240,528
3	315,304	815,926
4	316,404	2450,584
5	317,404	2450,584
6	318,404	2450,584
7	319,654	2439,360
8	320,904	2369,646
9	322,154	2179,435
10	323,404	1757,475
11	325,054	815,926
12	326,704	240,528
13	400,000	240,528

Peta varijanta ima donje proširenje dužine  $L = 110,0$  (m) i promjera  $D = 10,0$  (m).

Poprečni presjek se sastoji od pravokutnog dijela širine  $2R$ , visine  $H$  i polukruga promjera  $R$ . Vrijednost  $H$  u petoj varijanti iznosi 3 (m).

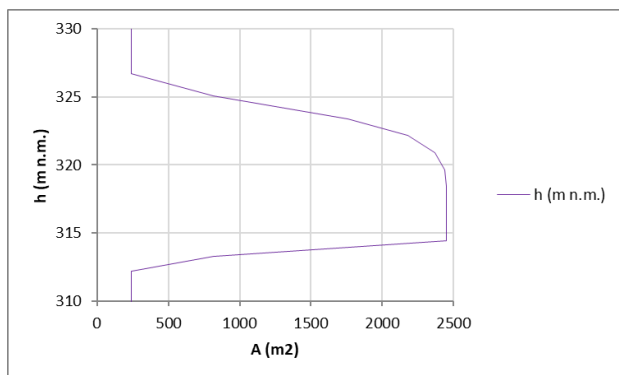


Slika 16 Slika 17 A-h dijagram donjeg proširenja treće vodne komore

Br.točke	h (m n.m.)	A(m2)
1	0,000	240,528
2	313,204	240,528
3	314,304	815,926
4	315,404	2450,584
5	316,904	2450,584
6	318,404	2450,584
7	319,654	2439,360
8	320,904	2369,646
9	322,154	2179,435
10	323,404	1757,475
11	325,054	815,926
12	326,704	240,528
13	400,000	240,528

Šesta varijanta ima donje proširenje dužine  $L = 110,0$  (m) i promjera  $D = 10,0$  (m).

Poprečni presjek se sastoji od pravokutnog dijela širine  $2R$ , visine  $H$  i polukruga promjera  $R$ .  
 Vrijednost  $H$  u šestoj varijanti iznosi 4 (m).

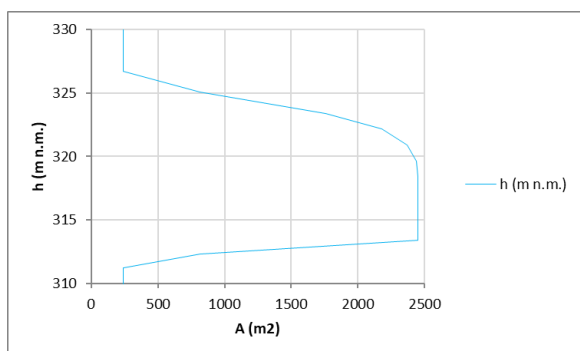


Slika 18 Slika 19 A-h dijagram donjeg proširenja treće vodne komore

Br.točke	h (m n.m.)	A(m2)
1	0,000	240,528
2	312,204	240,528
3	313,304	815,926
4	314,404	2450,584
5	316,404	2450,584
6	318,404	2450,584
7	319,654	2439,360
8	320,904	2369,646
9	322,154	2179,435
10	323,404	1757,475
11	325,054	815,926
12	326,704	240,528
13	400,000	240,528

Sedma varijanta ima donje proširenje dužine  $L = 110,0$  (m) i promjera  $D = 10,0$  (m).

Poprečni presjek se sastoji od pravokutnog dijela širine  $2R$ , visine  $H$  i polukruga promjera  $R$ .  
 Vrijednost  $H$  u sedmoj varijanti iznosi 7 (m).



Slika 20 Slika 21 A-h dijagram donjeg proširenja treće vodne komore

Br.točke	h (m n.m.)	A(m2)
1	0,000	240,528
2	309,204	240,528
3	310,304	815,926
4	311,404	2450,584
5	313,154	2450,584
6	314,904	2450,584
7	316,654	2450,584
8	318,404	2450,584
9	319,654	2439,360
10	320,904	2369,646
11	322,154	2179,435
12	323,404	1757,475
13	325,054	815,926
14	326,704	240,528
15	400,000	240,528

### 3.1.4. SNAGA TURBINA

Za zadani instalirani protok turbine od  $Q_T = 50,0 \text{ m}^3/\text{s}$  iskorištena snagu toka vode računa se sljedećim izrazom:

$$N = \rho g Q_T H \eta \quad (104)$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća vode ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  - ubrzanje sile teže ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$Q_T$  - protok turbine

$H$  - energijski pad =  $H_3 - H_{\text{DONJE VODE}}$

$\eta$  - koeficijent iskorištenja snage vodnog toka na turbinama i generatoru

Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m n.m.)	N (W)
50	212,02	88396406,62

$H_3$  je vodostaj u vodnoj komori 3 pri stacionarnom radu svih 5 turbina i pri minimalnoj razini vode u akumulaciji.

$H_{\text{DONJE VODE}}$  je vodostaj u odvodnom kanalu pri protoku od  $250 \text{ (m}^3/\text{s)}$ , tj. pri stacionarnom radu svih 5 turbina.

U nastavku se daje proračun stanja u sustavu za stacionarni rad svih 5 turbina.

$$h_A = h_3 + \xi_{u1} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \lambda_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \lambda_3 \cdot \frac{L_3}{3} \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad (105)$$

$$h_A = h_3 + \beta_1 \cdot Q_1^2 \quad (106)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2g(D_1^2 \frac{\pi}{4})^2} (\xi_{u1} + \lambda_1 \frac{L_1 + L_3}{D_1}) \quad (107)$$

$$h_A = h_3 + \beta_2 \cdot Q_2^2 \quad (108)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2g(D_2^2 \frac{\pi}{4})^2} (\xi_{u2} + \lambda_2 \frac{L_2 + L_4}{D_2}) \quad (109)$$

$$Q_1 + Q_2 = 250 \text{ m}^2/\text{s} \quad (110)$$

Nepoznanice su :  $h_3, Q_1, Q_2$

$$F_1 = h_A - h_3 - \beta_1 \cdot Q_1^2 = 0 \quad (111)$$

$$F_2 = h_A - h_3 - \beta_2 \cdot Q_2^2 = 0 \quad (112)$$

$$F_3 = Q_1 - Q_2 - 250 = 0 \quad (113)$$

Derivacija funkcije  $F_1$  po nepoznatim varijablama:

$$\frac{\partial F_1}{\partial h_3} = -1,0; \quad \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} = -2\beta_1 Q_1; \quad \frac{\partial F_1}{\partial Q_2} = 0,0 \quad (114)$$

Derivacija funkcije  $F_2$  po nepoznatim varijablama:

$$\frac{\partial F_2}{\partial h_3} = -1,0; \quad \frac{\partial F_2}{\partial Q_1} = 0,0; \quad \frac{\partial F_2}{\partial Q_2} = -2\beta_2 Q_2 \quad (115)$$

Derivacija funkcije  $F_3$  po nepoznatim varijablama:

$$\frac{\partial F_3}{\partial h_3} = 0,0; \quad \frac{\partial F_3}{\partial Q_1} = -1,0; \quad \frac{\partial F_3}{\partial Q_2} = 1,0 \quad (116)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial h_3} \cdot \Delta h_3 + \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} \cdot \Delta Q_1 + \frac{\partial F_1}{\partial Q_2} \cdot \Delta Q_2 = -F_1 \quad (117)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial h_3} \cdot \Delta h_3 + \frac{\partial F_2}{\partial Q_1} \cdot \Delta Q_1 + \frac{\partial F_2}{\partial Q_2} \cdot \Delta Q_2 = -F_2 \quad (118)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial h_3} \cdot \Delta h_3 + \frac{\partial F_3}{\partial Q_1} \cdot \Delta Q_1 + \frac{\partial F_3}{\partial Q_2} \cdot \Delta Q_2 = -F_3 \quad (119)$$

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial h_3} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial h_3} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial F_3}{\partial h_3} & \frac{\partial F_3}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_3}{\partial Q_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

$$D = a_{11} \cdot (a_{22} \cdot a_{33} - a_{23} \cdot a_{32}) - a_{21} \cdot (a_{12} \cdot a_{33} - a_{13} \cdot a_{32}) + a_{31} \cdot (a_{12} \cdot a_{23} - a_{13} \cdot a_{22}) \quad (120)$$

$$D_{\Delta h_3} = \begin{vmatrix} -F_1 & \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_2} \\ -F_2 & \frac{\partial F_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_2} \\ -F_3 & \frac{\partial F_3}{\partial Q_1} & \frac{\partial F_3}{\partial Q_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

$$D_{\Delta h_3} = a_{11} \cdot (a_{22} \cdot a_{33} - a_{23} \cdot a_{32}) - a_{21} \cdot (a_{12} \cdot a_{33} - a_{13} \cdot a_{32}) + a_{31} \cdot (a_{12} \cdot a_{23} - a_{13} \cdot a_{22}) \quad (121)$$

$$\Delta h_3 = \frac{D_{\Delta h_3}}{D} \quad (122)$$

$$D_{\Delta Q_1} = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial h_3} & -F_1 & \frac{\partial F_1}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial h_3} & -F_2 & \frac{\partial F_2}{\partial Q_2} \\ \frac{\partial F_3}{\partial h_3} & -F_3 & \frac{\partial F_3}{\partial Q_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

$$D_{\Delta Q_1} = a_{11} \cdot (a_{22} \cdot a_{33} - a_{23} \cdot a_{32}) - a_{21} \cdot (a_{12} \cdot a_{33} - a_{13} \cdot a_{32}) + a_{31} \cdot (a_{12} \cdot a_{23} - a_{13} \cdot a_{22}) \quad (123)$$

$$\Delta Q_1 = \frac{D_{\Delta Q_1}}{D} \quad (124)$$

$$D_{\Delta Q_2} = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial h_3} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} & -F_1 \\ \frac{\partial F_2}{\partial h_3} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_1} & -F_2 \\ \frac{\partial F_3}{\partial h_3} & \frac{\partial F_3}{\partial Q_1} & -F_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

$$D_{\Delta Q_2} = a_{11} \cdot (a_{22} \cdot a_{33} - a_{23} \cdot a_{32}) - a_{21} \cdot (a_{12} \cdot a_{33} - a_{13} \cdot a_{32}) + a_{31} \cdot (a_{12} \cdot a_{23} - a_{13} \cdot a_{22}) \quad (125)$$

$$\Delta Q_2 = \frac{D_{\Delta Q_2}}{D} \quad (126)$$

Izračunata vrijednost vodostaja  $h_3$  iznosi 322,020 (m) dok su vrijednosti protoka slijedeće :

$Q_1=112,351 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_2=137,649 \text{ m}^3/\text{s}$ .



### 3.1.5. FORMIRANJE ULAZNOG FILE-A ZA DINAMIČKU ANALIZU

Ulazni parametri potrebni za proračun:

$\Theta$	DT	NDT	NPIS
0,5	1	8000	5

gdje je :

$\Theta$  – 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 ZA VARIJANTU 1
2. GEOMETRIJSKI PODACI DOVODNIH TUNELA  
L1,D1,EPSI1,KSIU1  
L2,D2,EPSI2,KSIU2  
L3,D3,EPSI3,KSIU3  
L4,D4,EPSI4,KSIU4
3. PODACI ZA KRIVULJU DONJE VODE  
NDV  
HDV(1),QDV(1)  
HDV(2),QDV(2)
4. PODACI ZA PRVU VODNU KOMORU  
NK1  
HK1(1),AK1(1)  
HK1(2),AK1(2)  
...
5. PODACI ZA DRUGU VODNU KOMORU  
NK2  
HK2(1),AK2(1)  
HK2(2),AK2(2)

6. PODACI ZA TRECJU VODNU KOMORU

NK3

HK3(1),AK3(1)

HK3(2),AK3(2)

7. PODACI ZA SNAGU PRVE TURBINE

NNT1

TT1(1),NT1(1)

...

11. PODACI ZA SNAGU PETE TURBINE

NNT5

TT5(1),NT5(1)

12. POČETNO STANJE

H11, H21, H31, Q11, Q21, Q31, Q41, QT11, QT21, QT31, QT41, QT51

13. ZAVRSNI PODACI

THETA,DT,NDT,NPIS

gdje je:

NDV - broj redaka s parovima podataka HDV(1),QDV(1)

HDV(1) - razina vodostaja donje vode

QDV(1) - protok - donja voda

NK1 - broj redaka s parovima podataka HK1(1),AK1(1)

HK1(1) - razina vodostaja u prvoj vodnoj komori

AK1(1) - površina poprečnog presjeka prve vodne komore

NK2 - broj redaka s parovima podataka HK2(1),AK2(1)

HK2(1) - razina vodostaja u drugoj vodnoj komori

AK2(1) - površina poprečnog presjeka druge vodne komore

NK3 - broj redaka s parovima podataka HK3(1),AK3(1)

HK3(1) - razina vodostaja u trećoj vodnoj komori

AK3(1) - površina poprečnog presjeka treće vodne komore

NNT1 - broj redaka s parovima podataka TT1(1),NT1(1)

TT1(1) - vremena koja definiraju snagu prve turbine

NT1(1) - snaga prve turbine

NNT2 - broj redaka s parovima podataka TT2(1),NT2(1)

TT2(1) - vremena koja definiraju snagu druge turbine

NT2(1) - snaga druge turbine

NNT3 - broj redaka s parovima podataka TT3(1),NT3(1)

TT3(1) - vremena koja definiraju snagu treće turbine

NT3(1) - snaga treće turbine

NNT4 - broj redaka s parovima podataka TT4(1),NT4(1)

TT4(1) - vremena koja definiraju snagu četvrte turbine

NT4(1) - snaga četvrte turbine

NNT5 - broj redaka s parovima podataka TT5(1),NT5(1)

TT5(1) - vremena koja definiraju snagu pete turbine

NT5(1) - snaga pete turbine

H11 - razina u prvoj vodnoj komori na početku intervala

H21 - razina u drugoj vodnoj komori na početku intervala

H31 - razina u trećoj vodnoj komori na početku intervala  
Q11 - protok u prvom dovodnom tunelu na početku intervala  
Q21 - protok u drugom dovodnom tunelu na početku intervala  
Q31 - protok u trećem dovodnom tunelu na početku intervala  
Q41 - protok u četvrtom dovodnom tunelu na početku intervala  
QT11 - protok prve turbine na početku intervala  
QT21 - protok druge turbine na početku intervala  
QT31 - protok treće turbine na početku intervala  
QT41 - protok četvrte turbine na početku intervala  
QT51 - protok pete turbine na početku intervala

Nakon definiranja ulaznog file-a, pristupa se proračunu u programu „DIPLOMSKI“, napisanom u programskom jeziku FORTRAN 95. Rezultati proračuna su obrađeni u Excelu-u i prikazani u nastavku.

## 4. REZULTATI PRORAČUNA

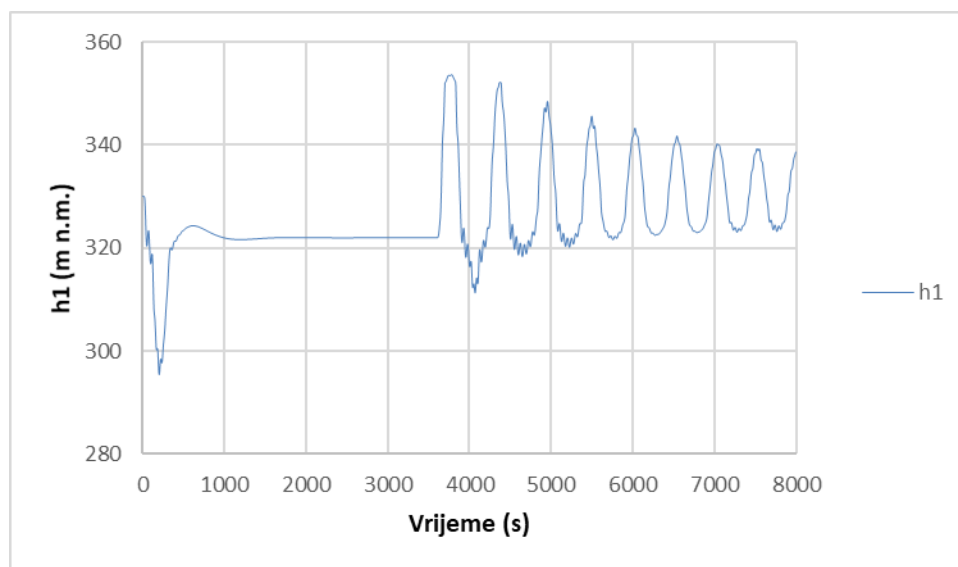
### 4.1. VARIJANTA 1

Vodna komora ima duljinu proširenja  $L=50,0$  (m),  $D = 6,0$  (m) i nema produbljenja donjeg proširenja vodne komore 3.

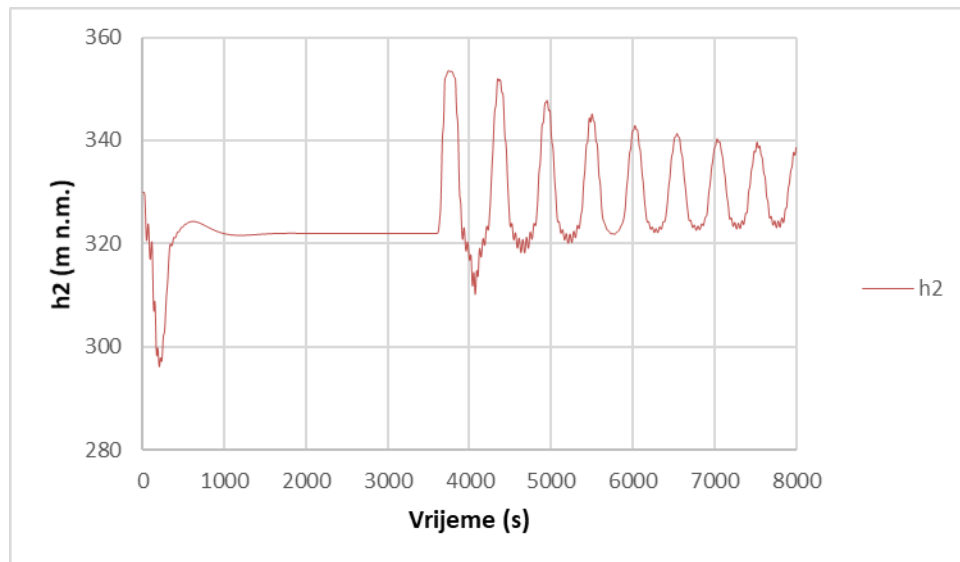
Sve turbine se uključuju istovremeno u desetoj sekundi (od 10. do 30. sekunde), a isključuju nakon šezdeset minuta.

#### 4.1.1. Varijanta 1.1 - $h_a = 330$ (m n.m.)

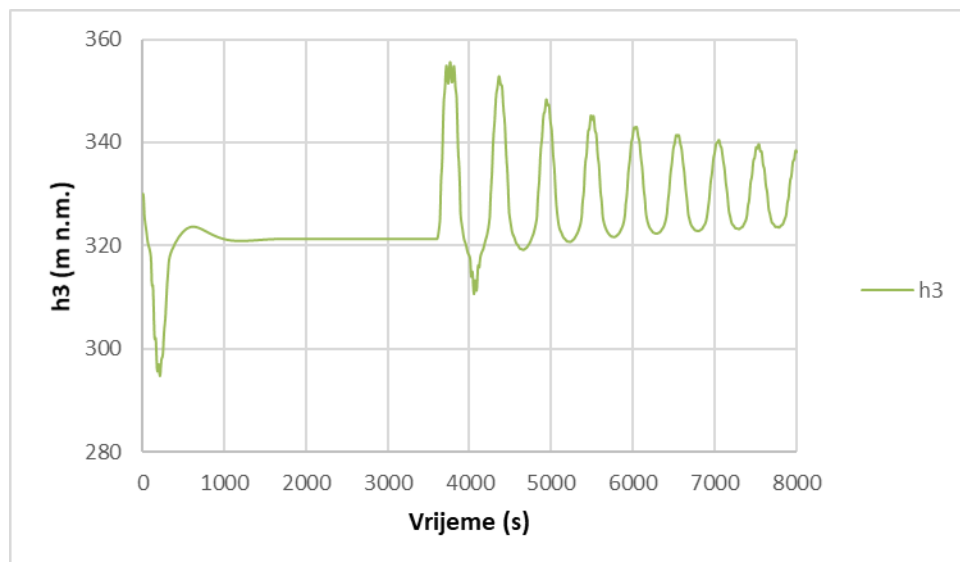
Vodostaj u akumulaciji je minimalan i vrijednost mu je  $h_a = 330$  (m n.m.).



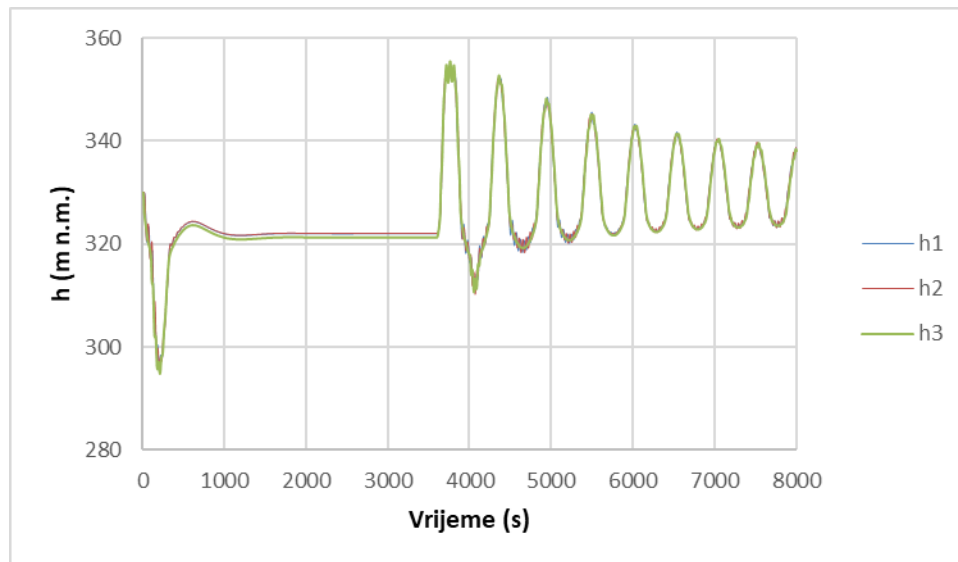
Slika 22 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1



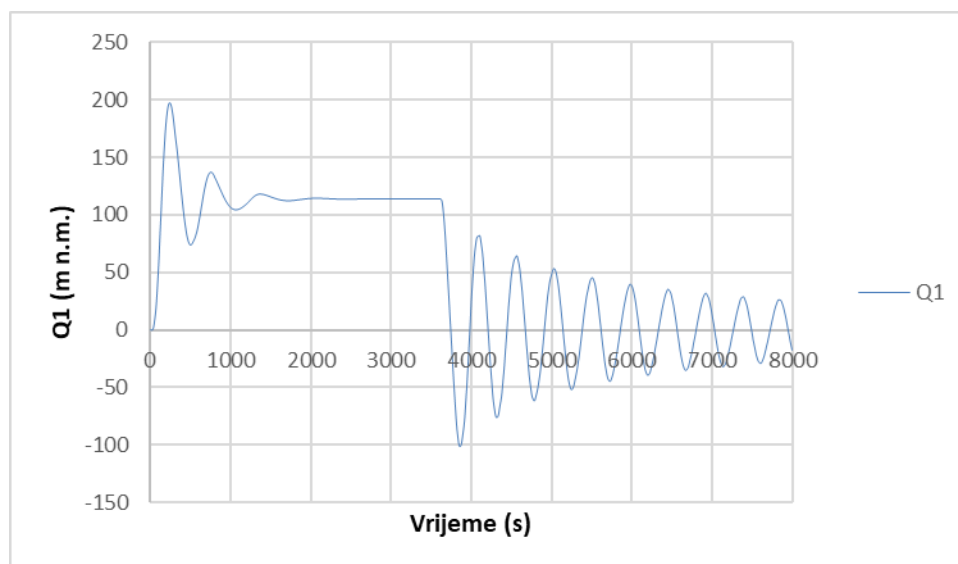
Slika 23 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1



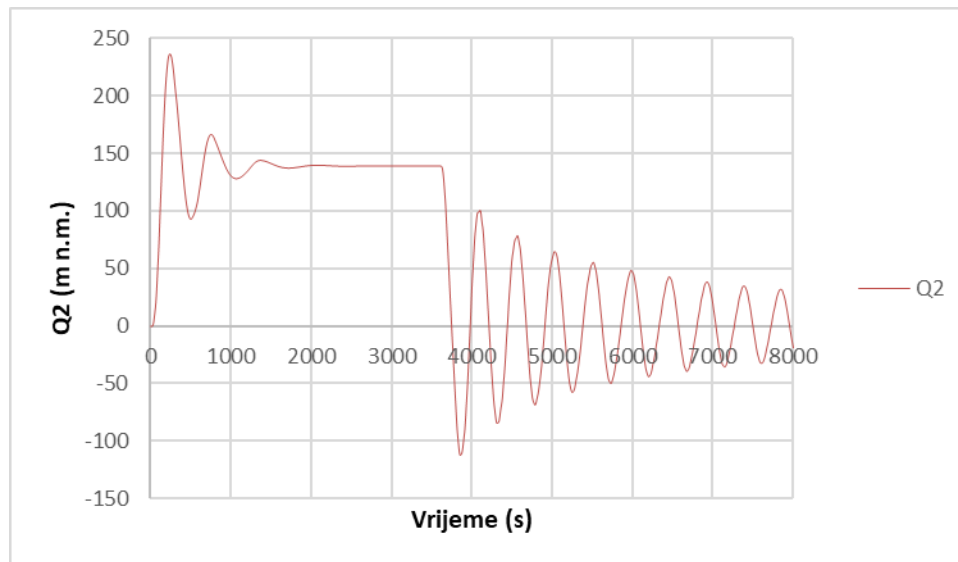
Slika 24 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1



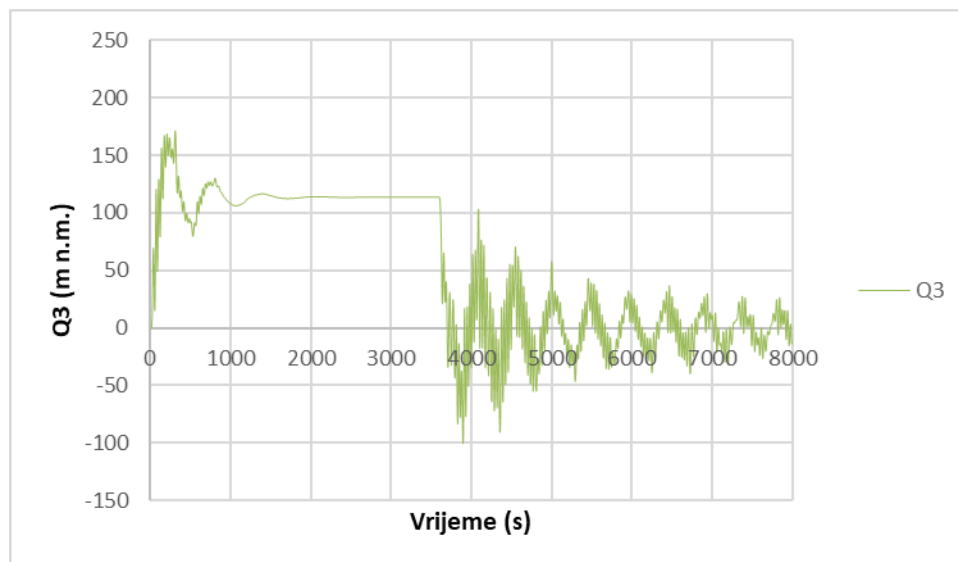
Slika 25 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1



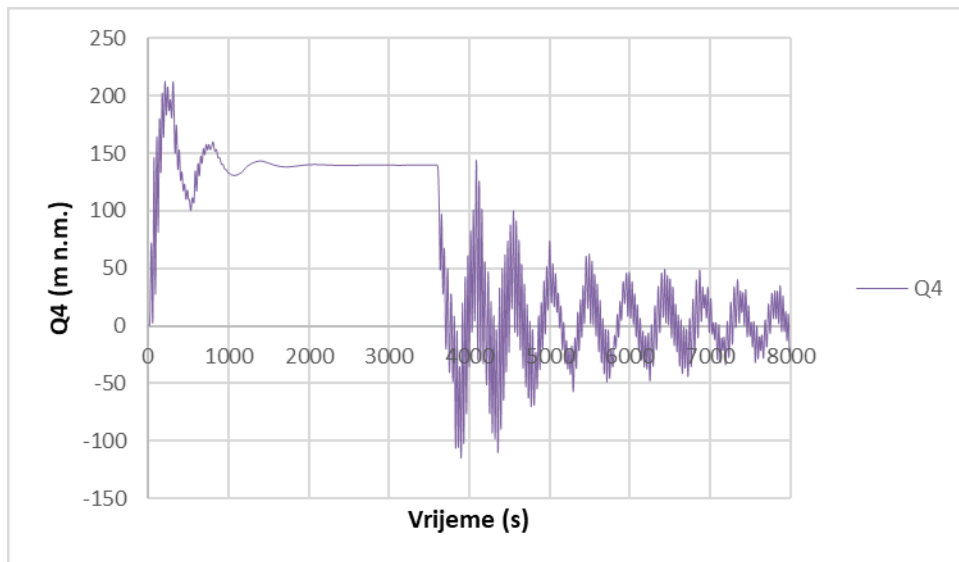
Slika 26 Protok  $Q_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1



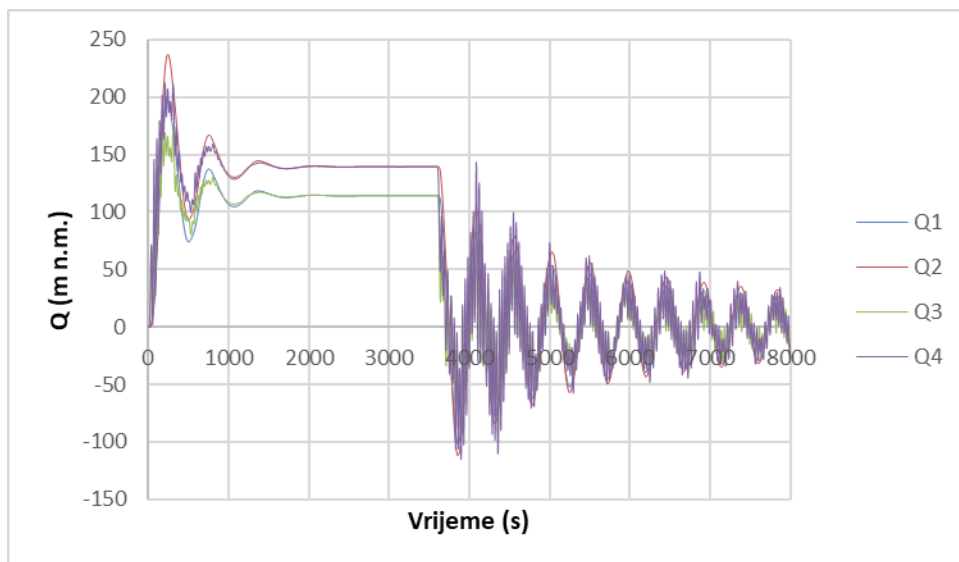
Slika 27 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1



Slika 28 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1

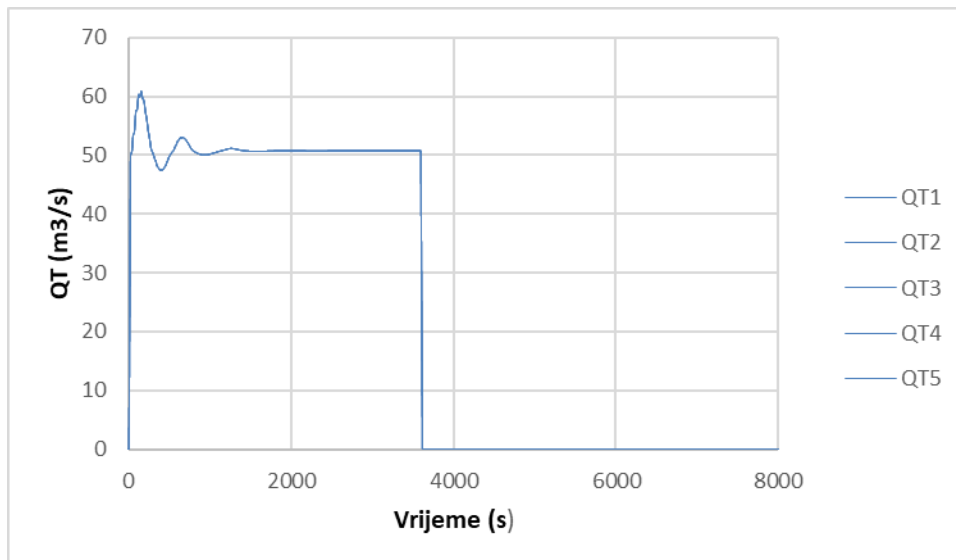


Slika 29 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1



Slika 30 Protoci u tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1





Slika 31 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.1

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 1.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
295,34	296,1	294,79	-100,29	-110,53	-115,54	-119,57

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 322,04$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 294,79$  (m n.m.) za 27,25 (m) manja od minimalne dozvoljene.

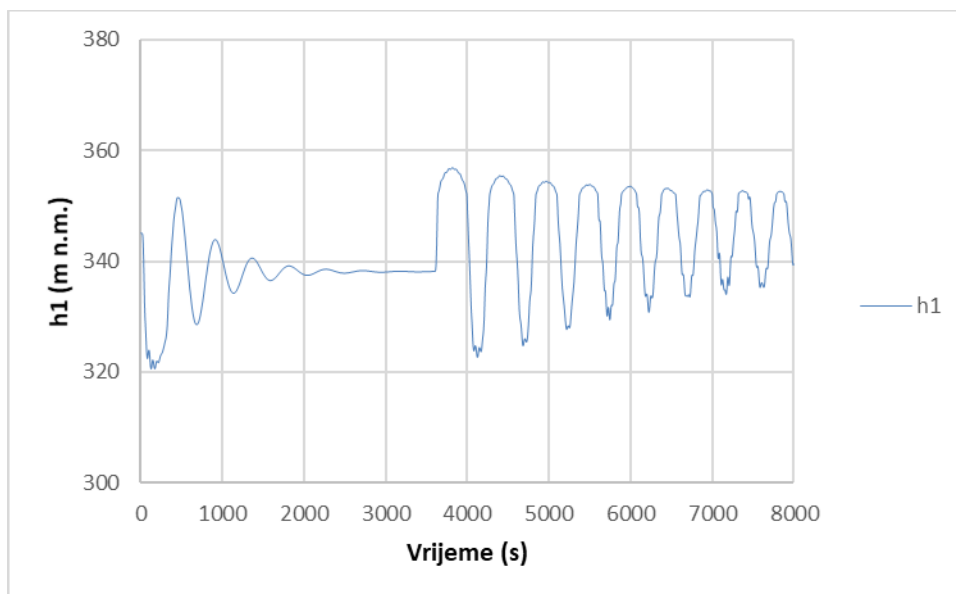
Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 1.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
353,66	353,63	355,56	179,022	214,561	170,844	206,207

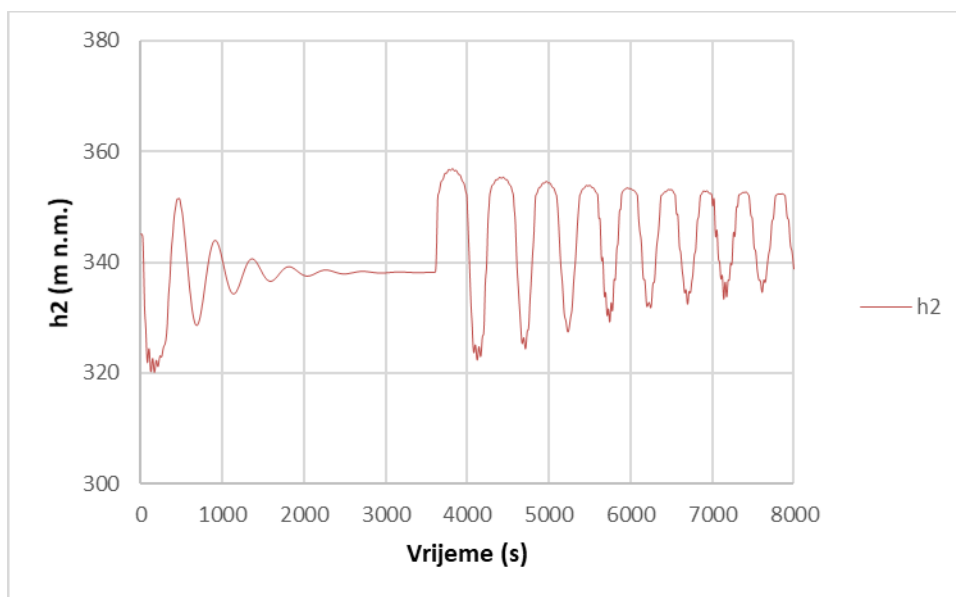
minimalno dozvoljene ( $h = 322,04$  (m n.m.)),

4.1.2. Varijanta 1.2 –  $h_a = 345$  (m n.m.)

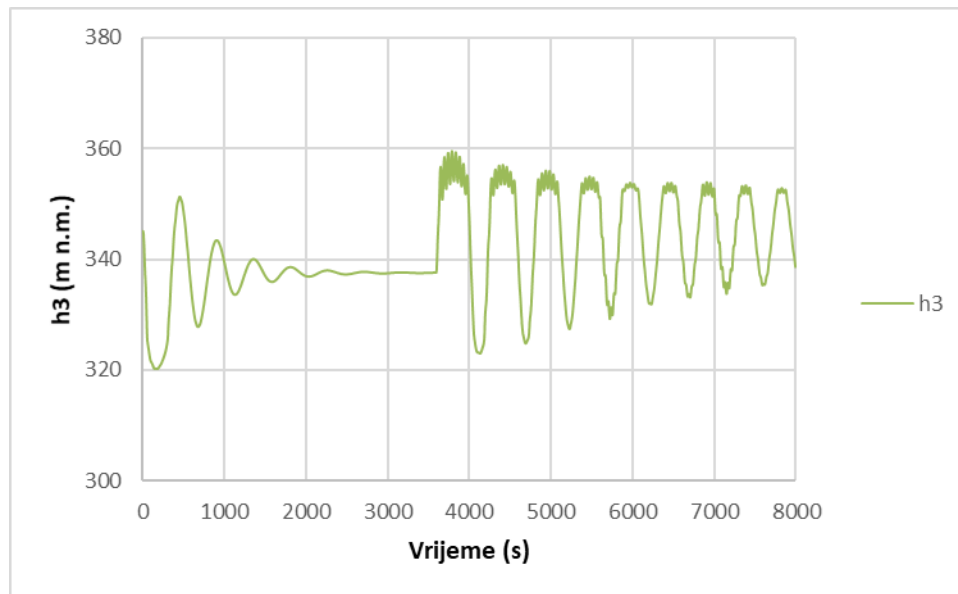
Vodostaj u akumulaciji je maksimalan i vrijednost mu je  $h_a = 345$  (m n.m.).



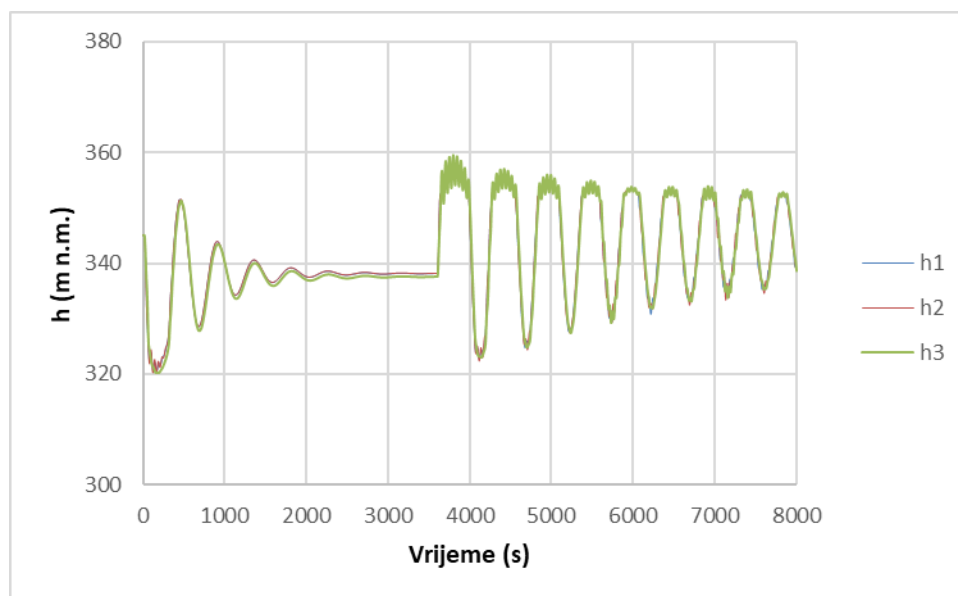
Slika 32 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



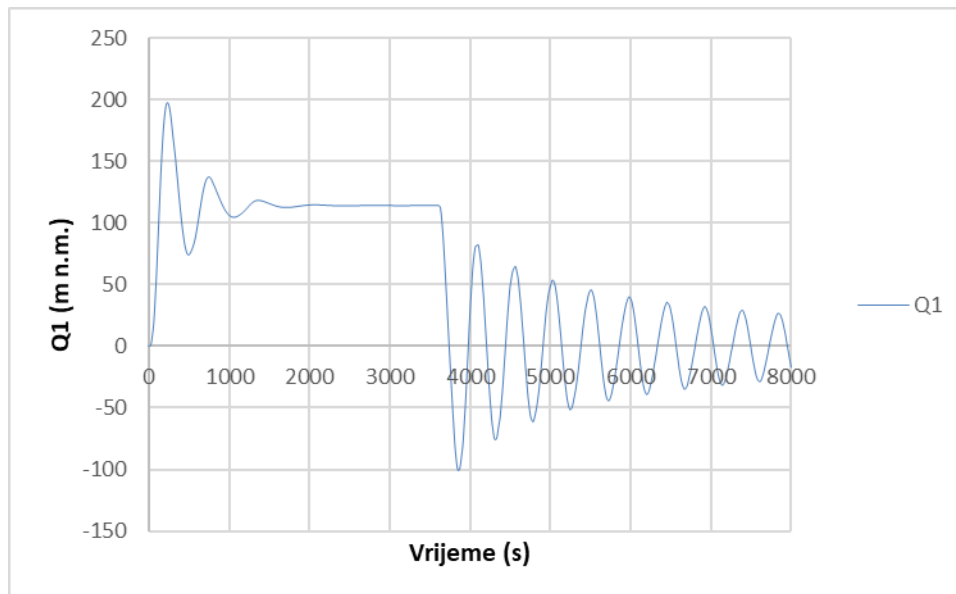
Slika 33 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



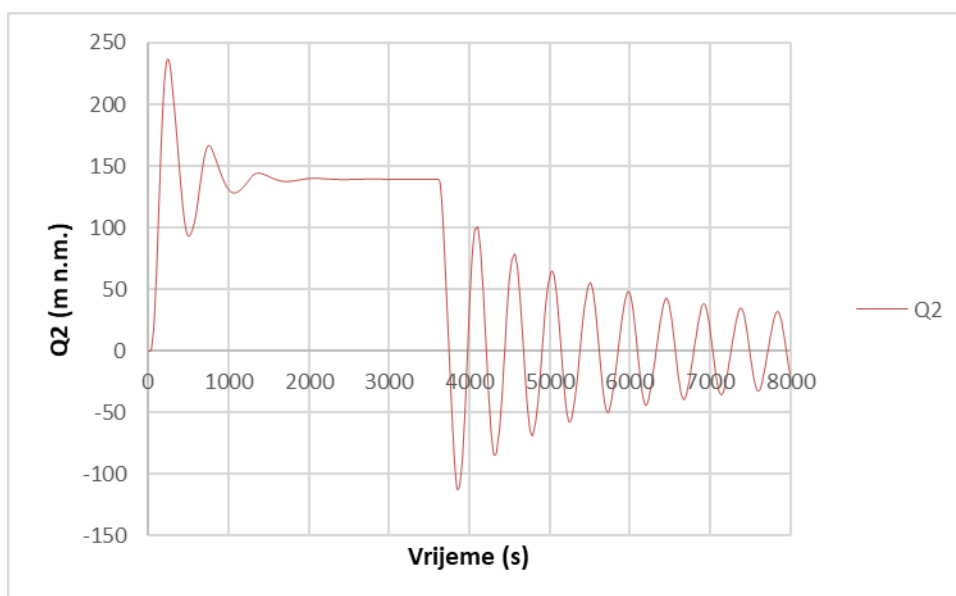
Slika 34 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



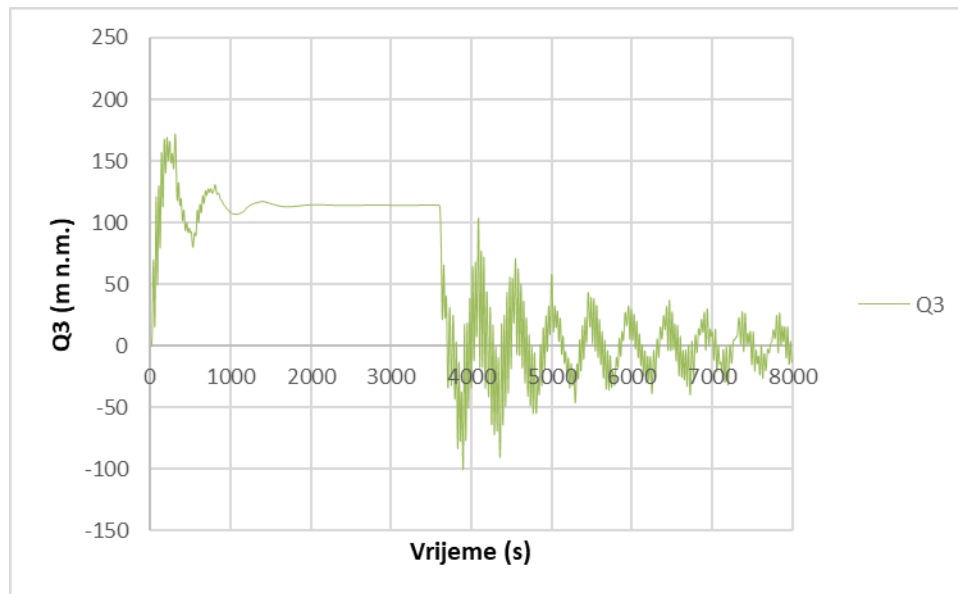
Slika 35 Vodostaji u komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



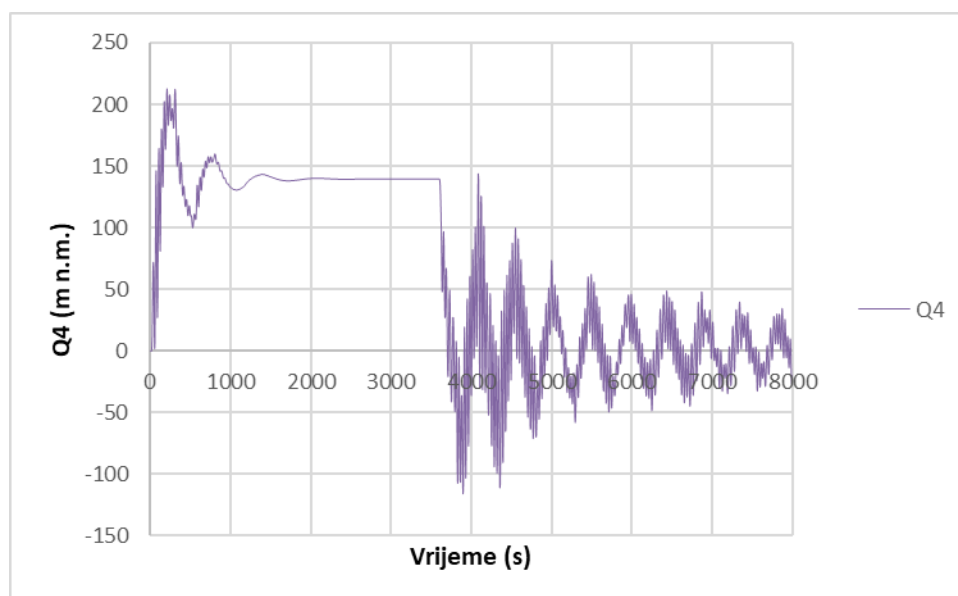
Slika 36 Protok Q1 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



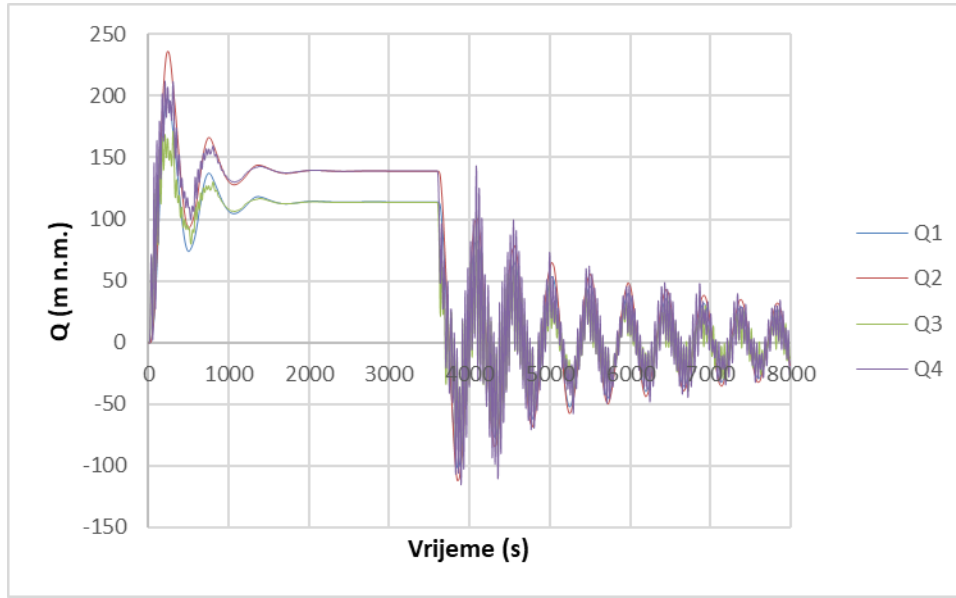
Slika 37 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



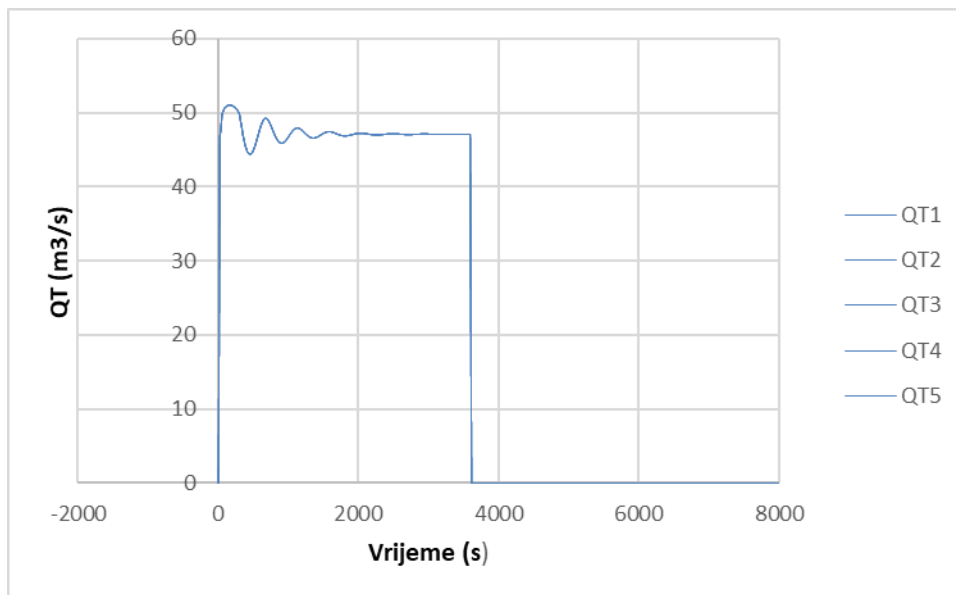
Slika 38 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



Slika 39 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



Slika 40 Protoci u tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2



Slika 41 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 1.2

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 1.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
320,48	320,04	320,13	-90,86	-100,91	-55,55	-64,33

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 322,04$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 320,13$  (m n.m.) za 1,91 (m) manja od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 1.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
356,85	356,83	359,48	168,76	203,637	160,08	197,33

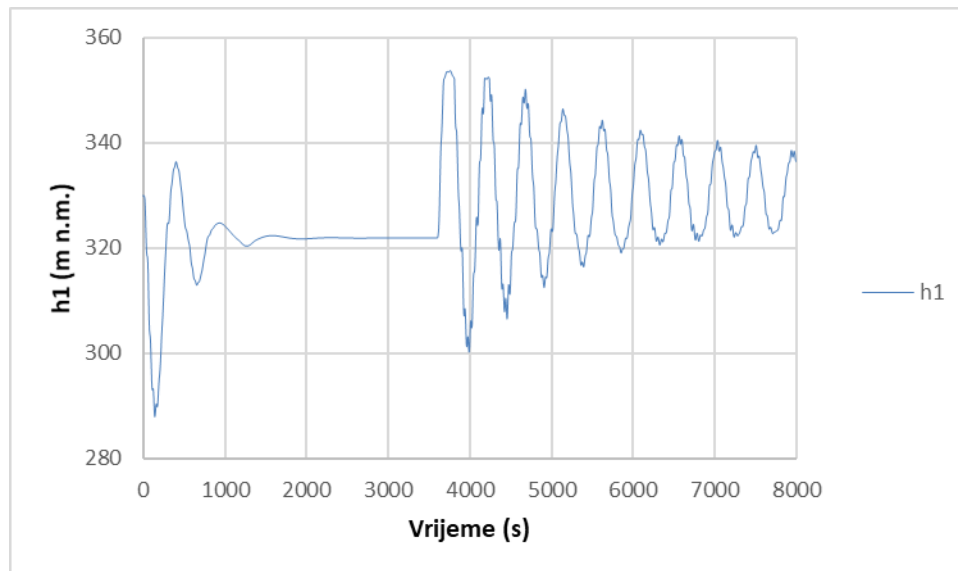
## 4.2. VARIJANTA 2

Vodna komora ima duljinu proširenja  $L = 110,0$  (m),  $D = 10,0$  (m) i nema produbljenja donjeg proširenja vodne komore.

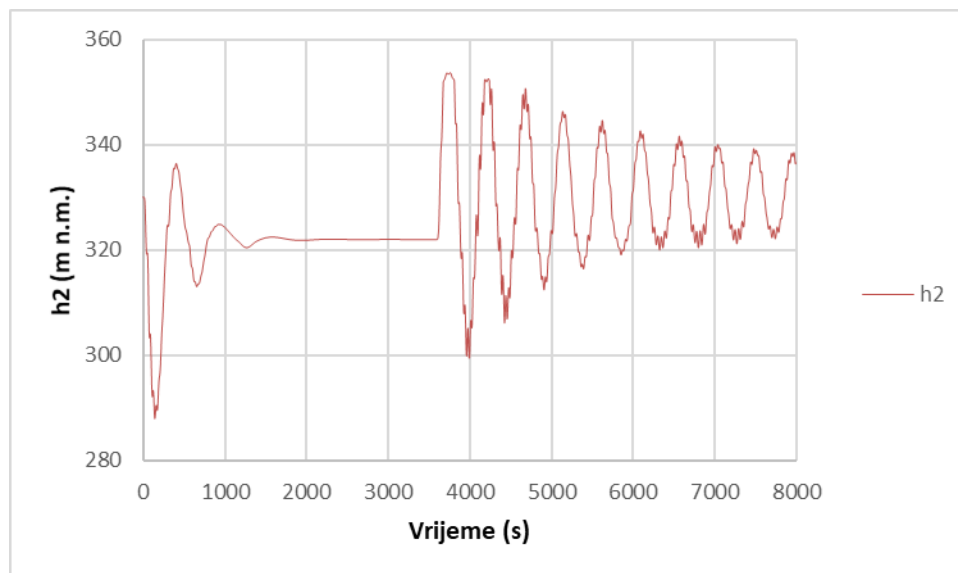
Dvije turbine se uključuju u desetoj sekundi (od 10. do 30. sekunde), dvije se uključuju nakon deset minuta, jedna nakon dvadeset minuta, a isključuju se sve zajedno nakon sat vremena.

### 4.2.1. VARIJANTA 2.1 – $h_a = 330$ (m n.m.)

Vodostaj u akumulaciji je minimalan i vrijednost mu je  $h_a = 330$  (m n.m.).

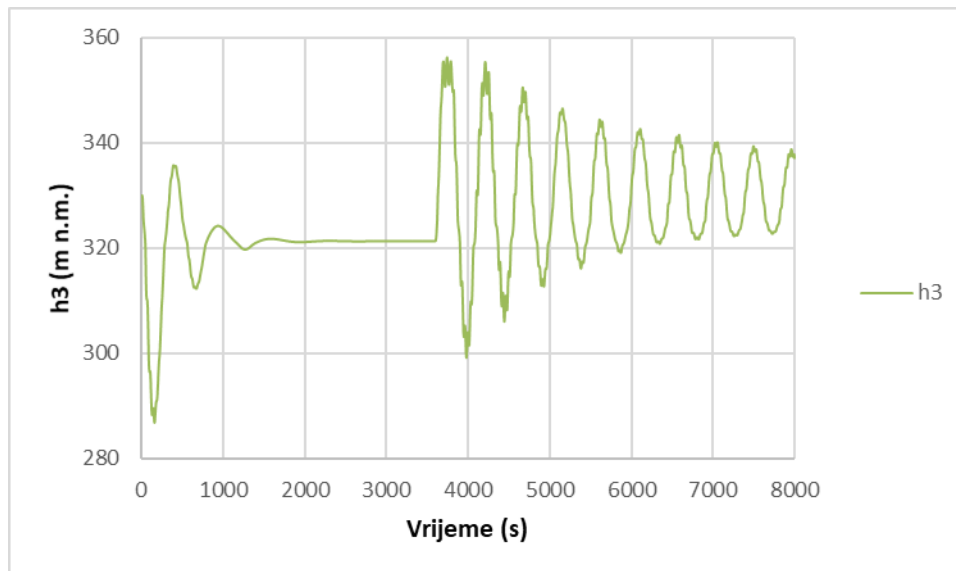


Slika 42 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1

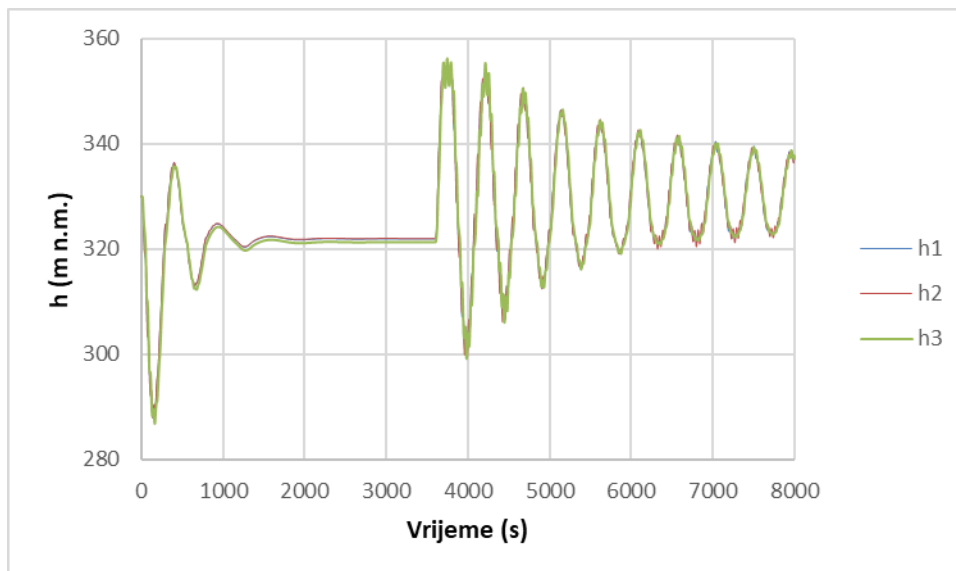


Slika 43 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1

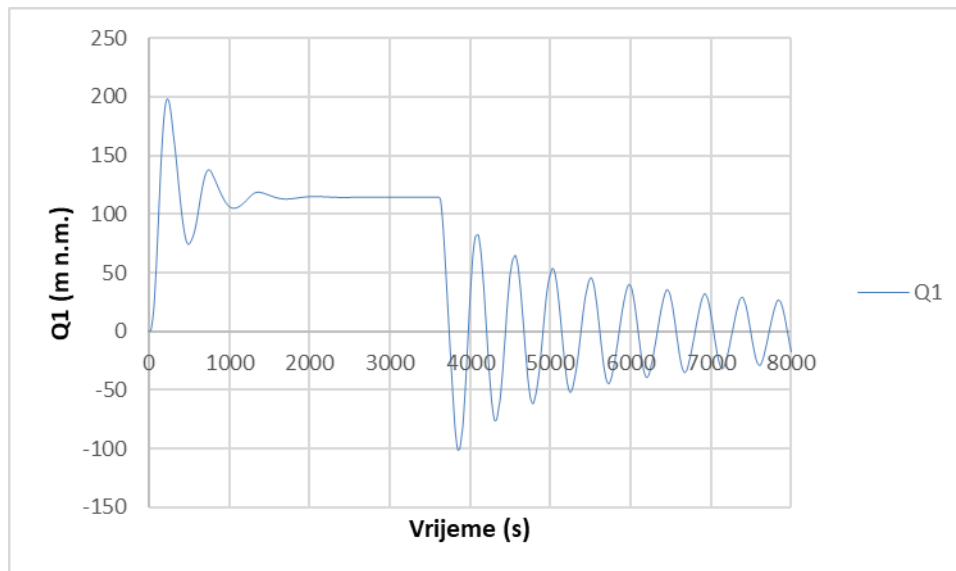




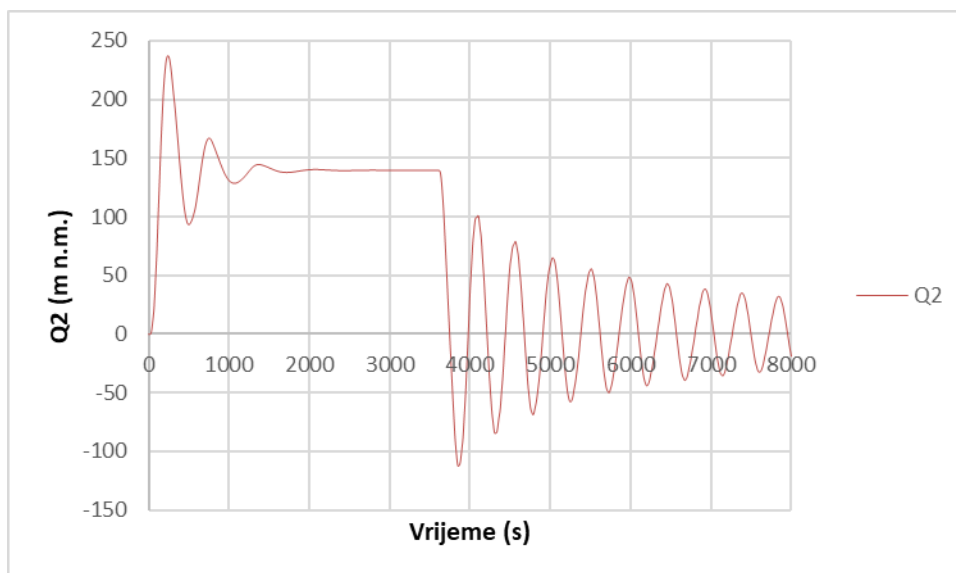
Slika 44 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1



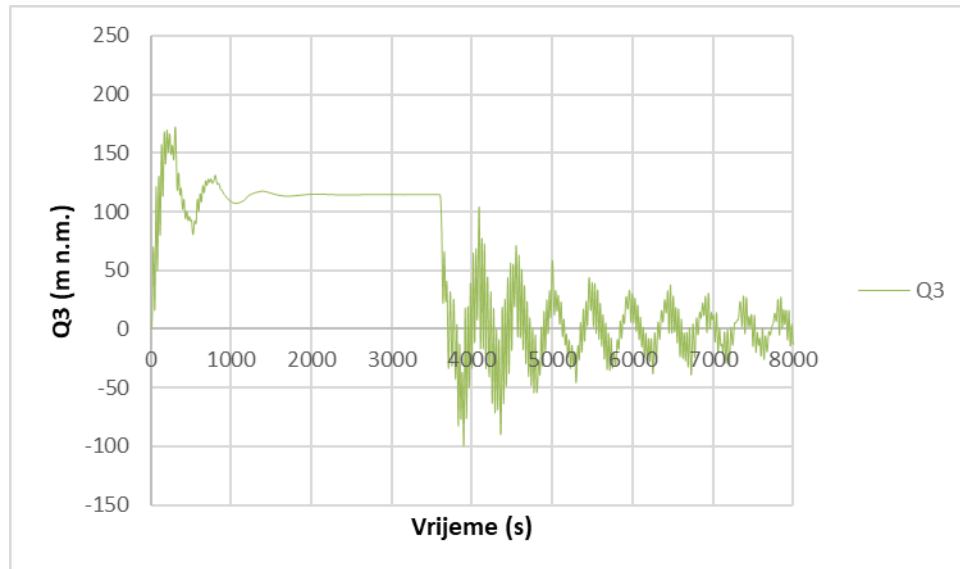
Slika 45 Vodostaji u komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1



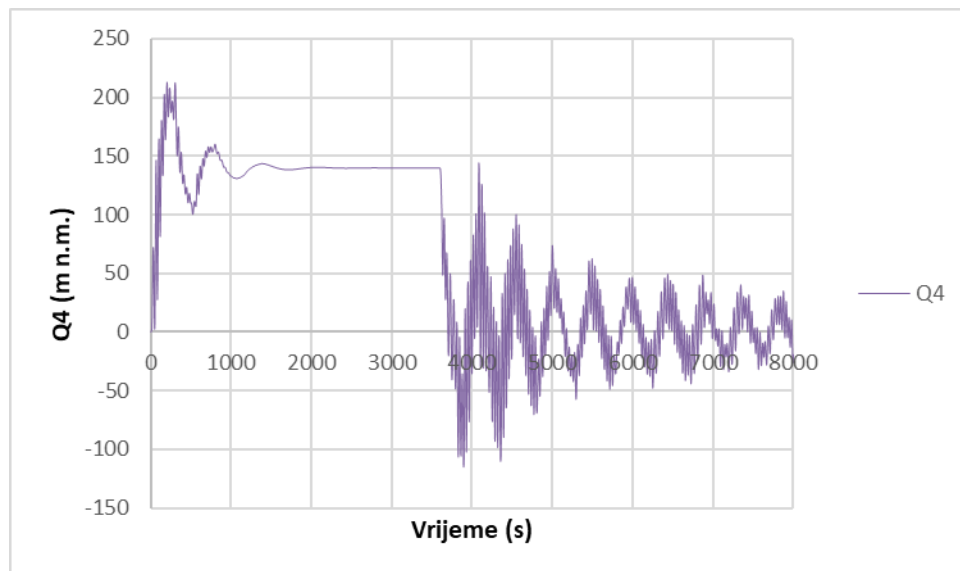
Slika 46 Protok Q1 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1



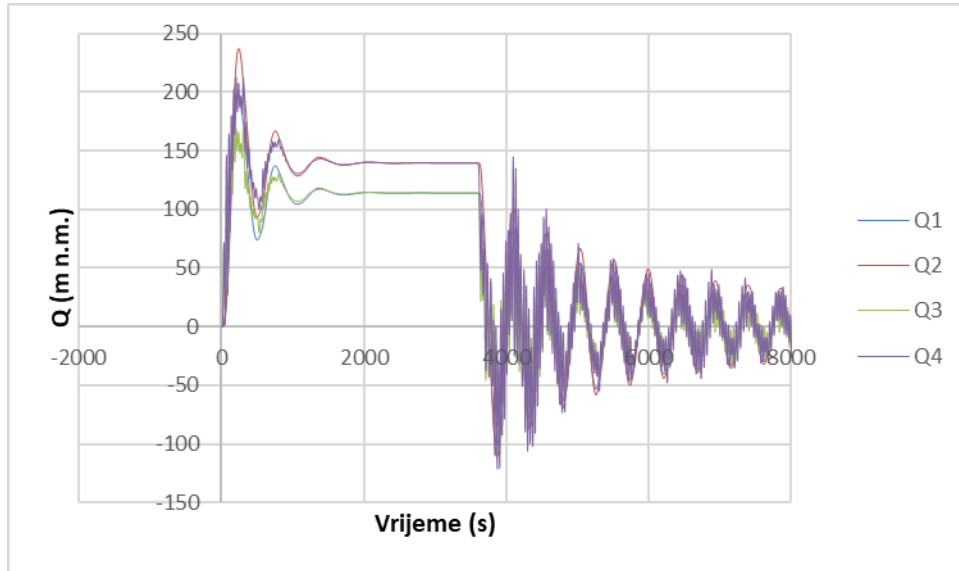
Slika 47 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1



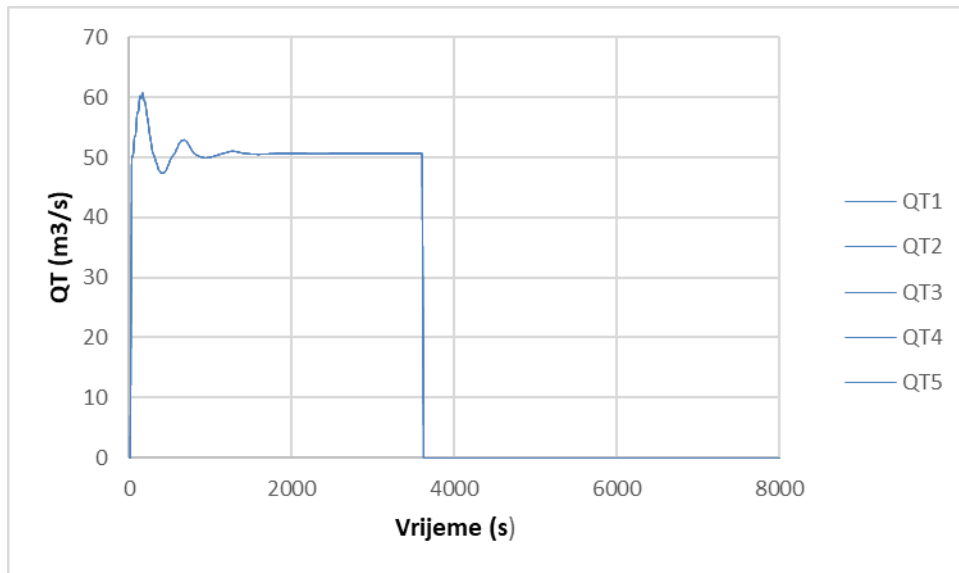
Slika 48 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1



Slika 49 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1



Slika 50 Protoci u dovodnim tunnelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1



Slika 51 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.1

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 2.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
287,95	287,94	286,73	-100,69	-111,22	-102,74	-121,06

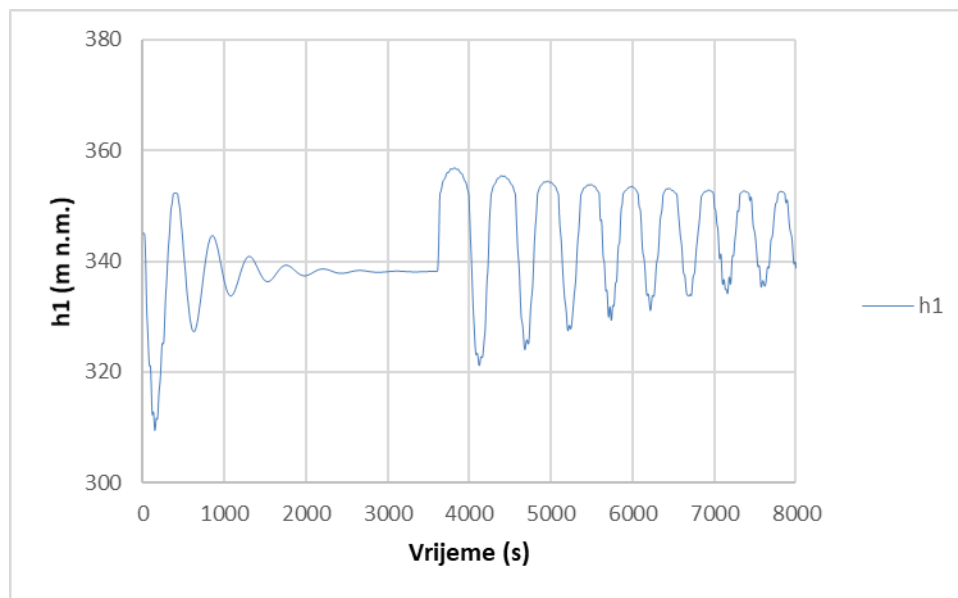
Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 319,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 286,73$  (m n.m.) za 32,67 (m) manja od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 2.1:

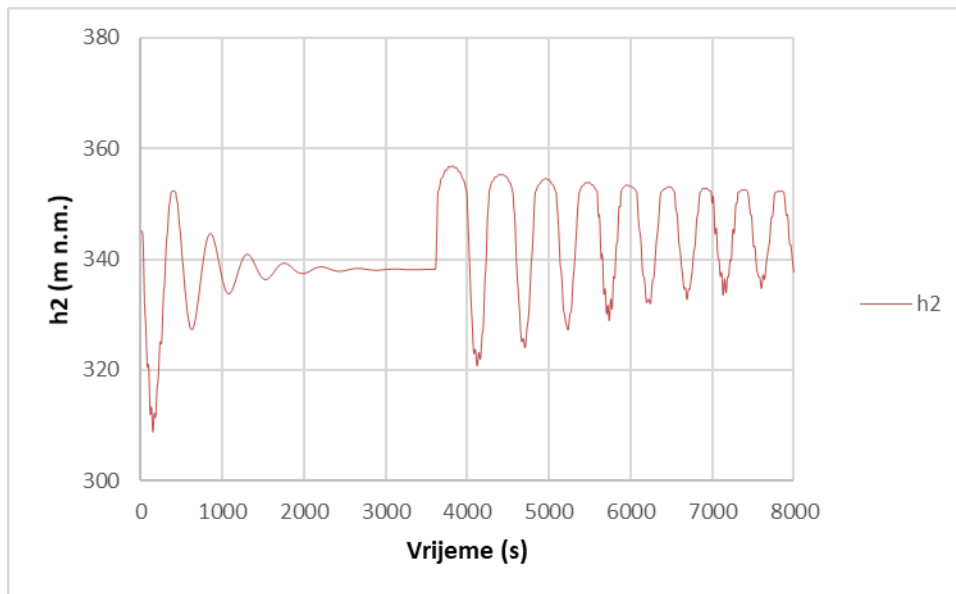
h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
350,00	350,61	350,10	137,28	166,71	169,20	212,50

#### 4.2.2. VARIJANTA 2.2 – $h_a = 345$ (m n. m.)

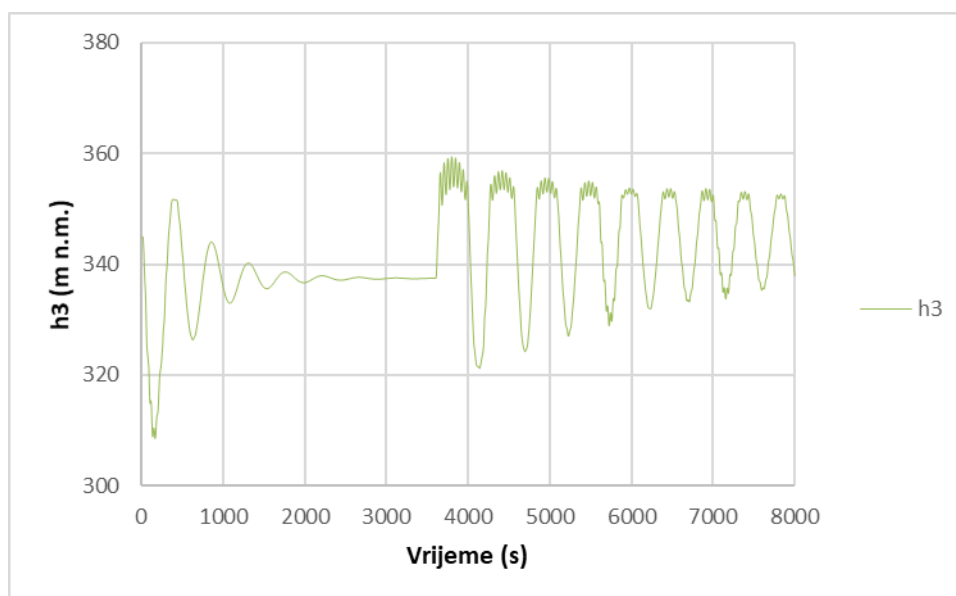
Vodostaj u akumulaciji je maksimalan i vrijednost mu je  $h_a = 345$  (m n.m.).



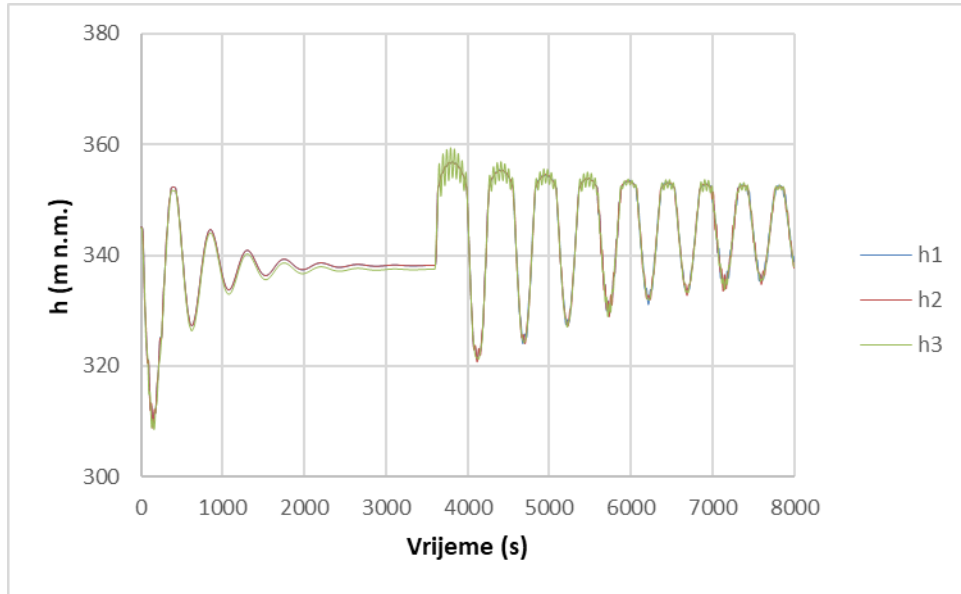
Slika 52 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2



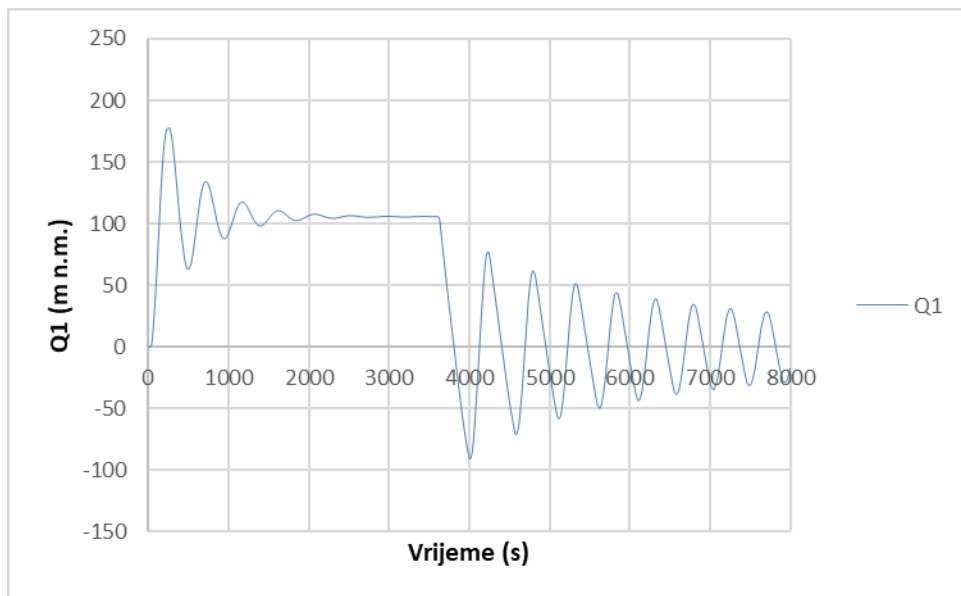
Slika 53 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2



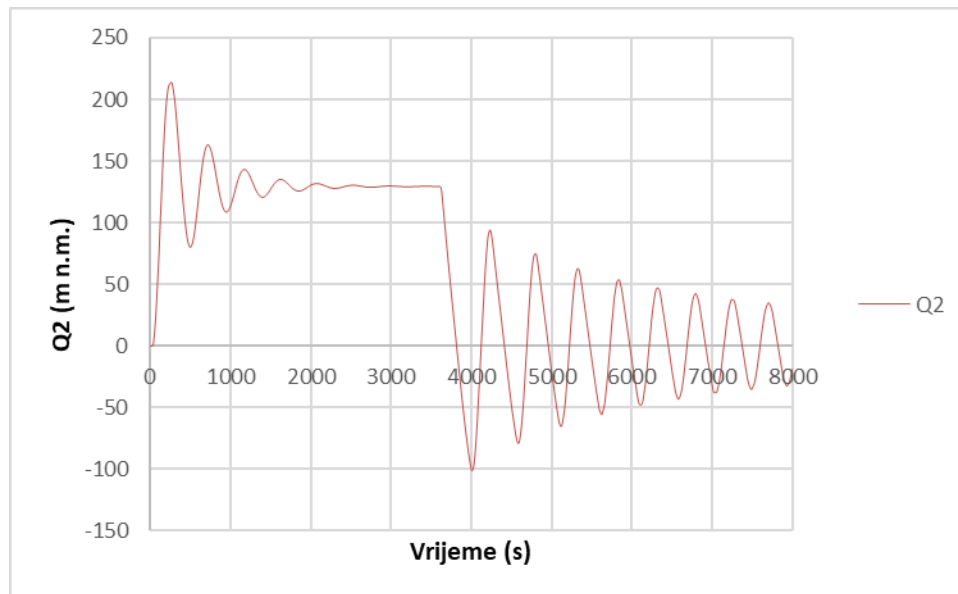
Slika 54 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2



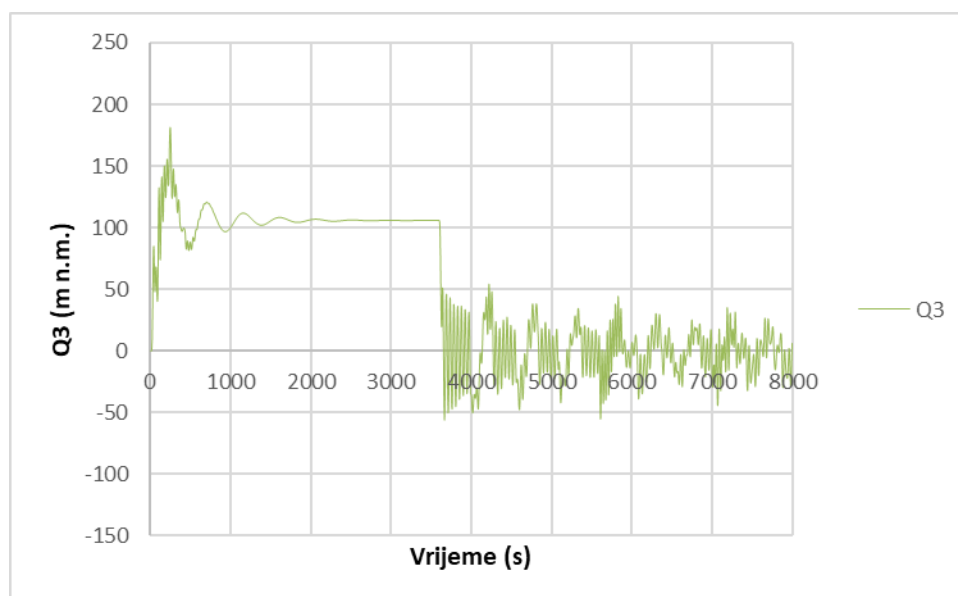
Slika 55 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2



Slika 56 Protok  $Q1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2

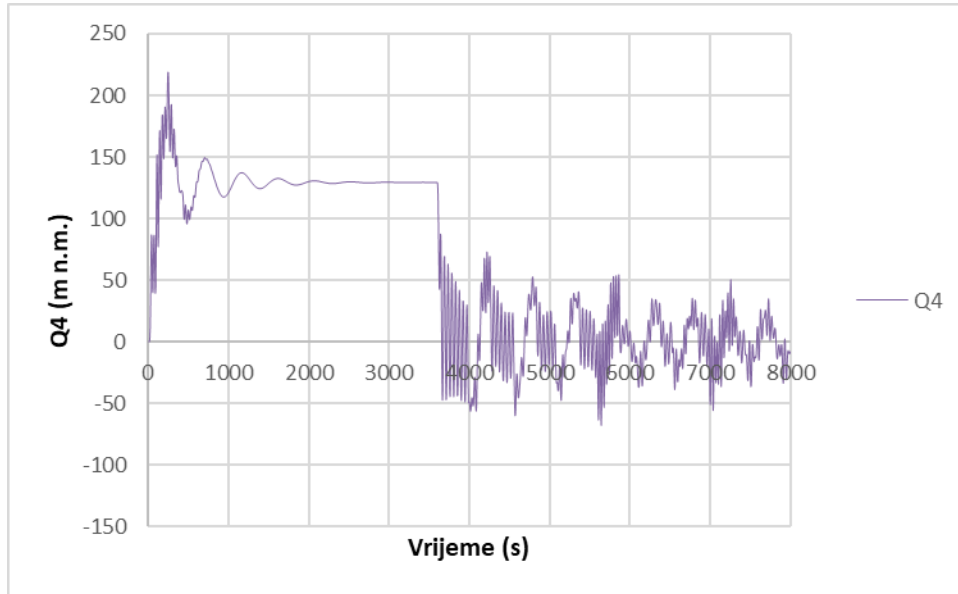


Slika 57 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2

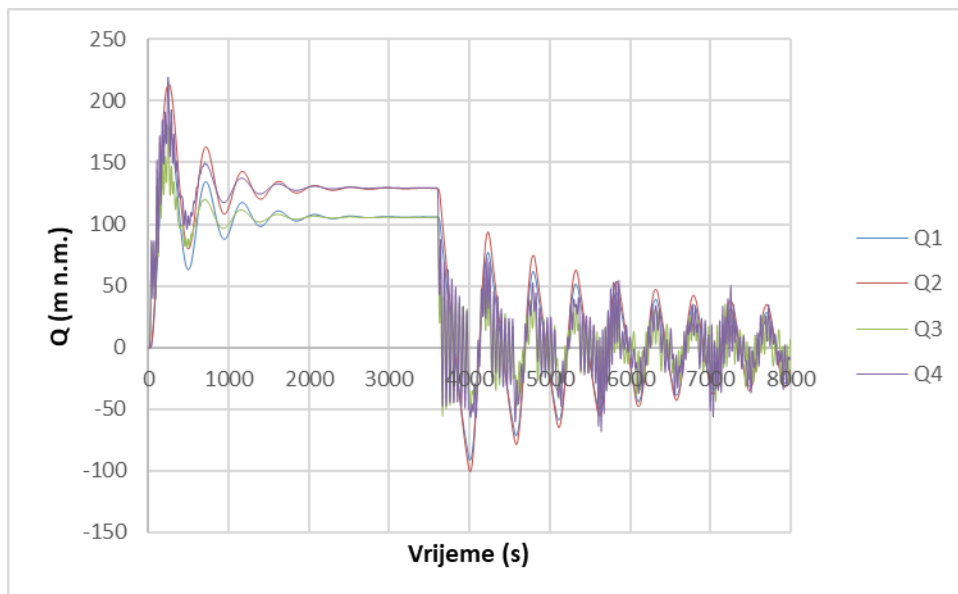


Slika 58 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2

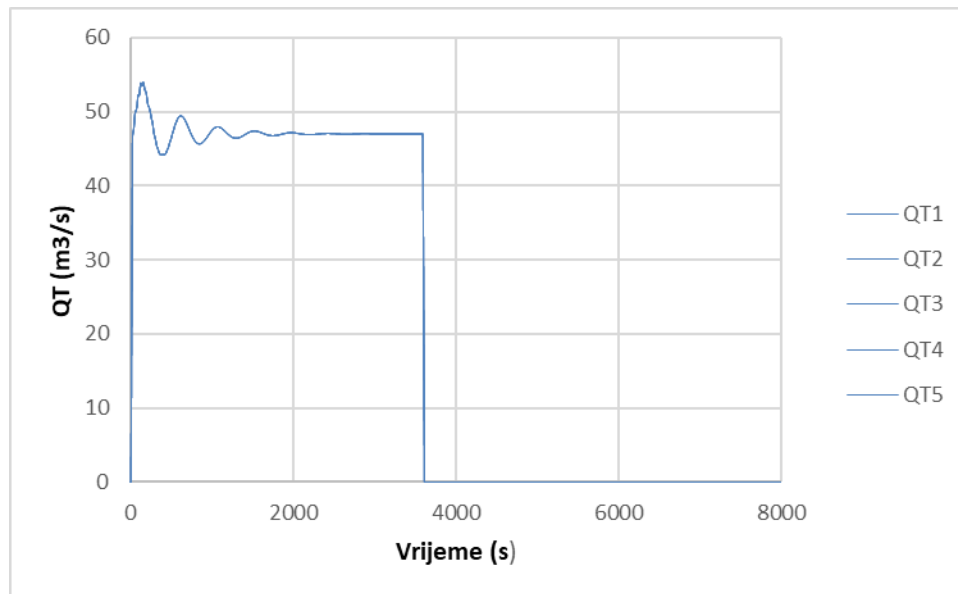




Slika 59 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2



Slika 60 Protoci u dovodnim tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2



Slika 61 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 2.2

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 2.2:

$h_1$	$h_2$	$h_3$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
309,40	308,80	308,56	-90,84	-100,91	-56,15	-67,96

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 319,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 308,56$  (m n.m.) za 10,84 (m) manja od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 2.2:

$h_1$	$h_2$	$h_3$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
356,85	356,83	359,49	177,77	213,75	181,30	218,97

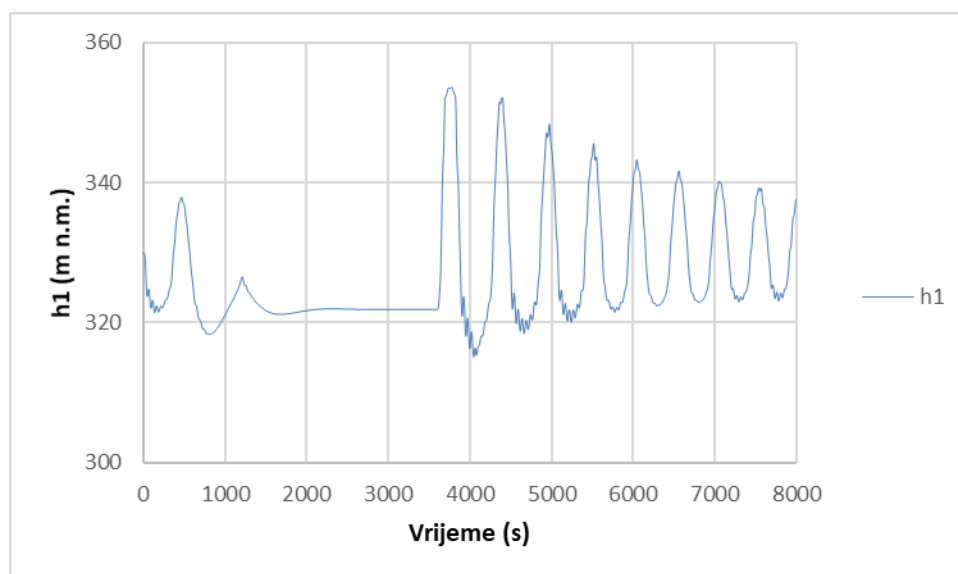
### 4.3. VARIJANTA 3

Vodna komora ima duljinu proširenja  $L=110,0$  (m),  $D = 10,0$  (m) i produbljenja koje iznosi 1 (m).

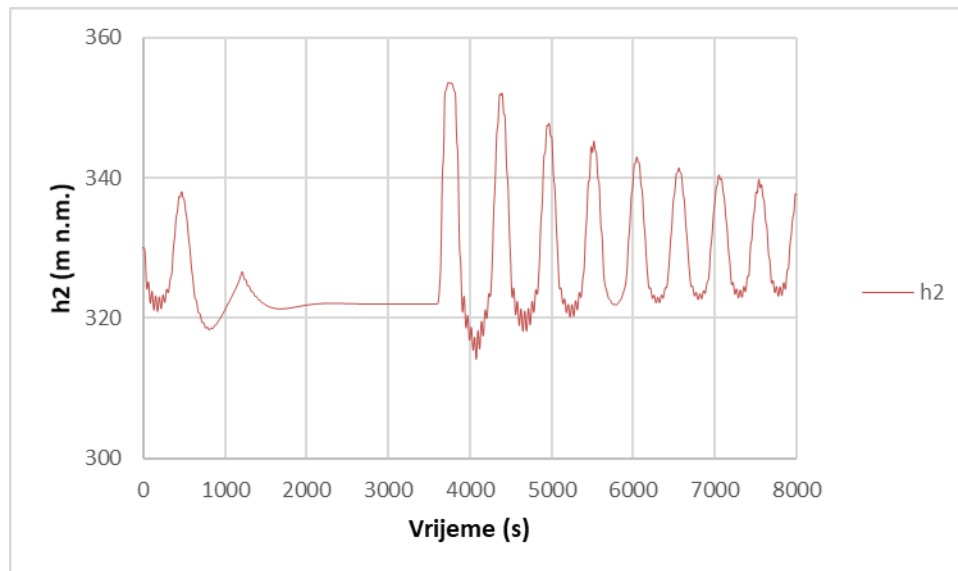
Tri turbine se uključuju u desetoj sekundi (od 10. do 30. sekunde), dvije nakon 20 minuta, a isključuju se sve zajedno nakon sat vremena.

#### 4.3.1. VARIJANTA 3.1 – $h_a = 330$ (m n. m.)

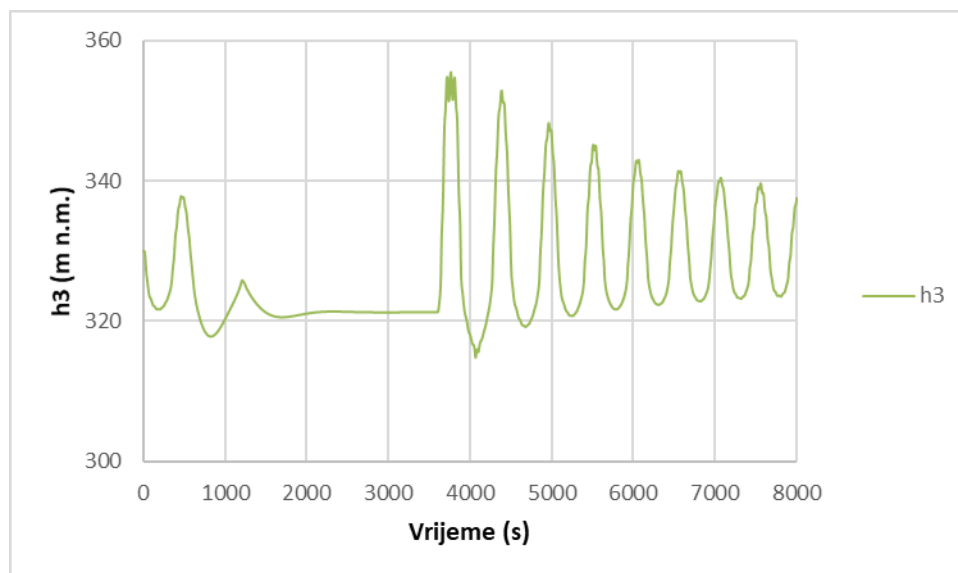
Vodostaj u akumulaciji je minimalan i vrijednost mu je  $h_a = 330$  (m n.m.).



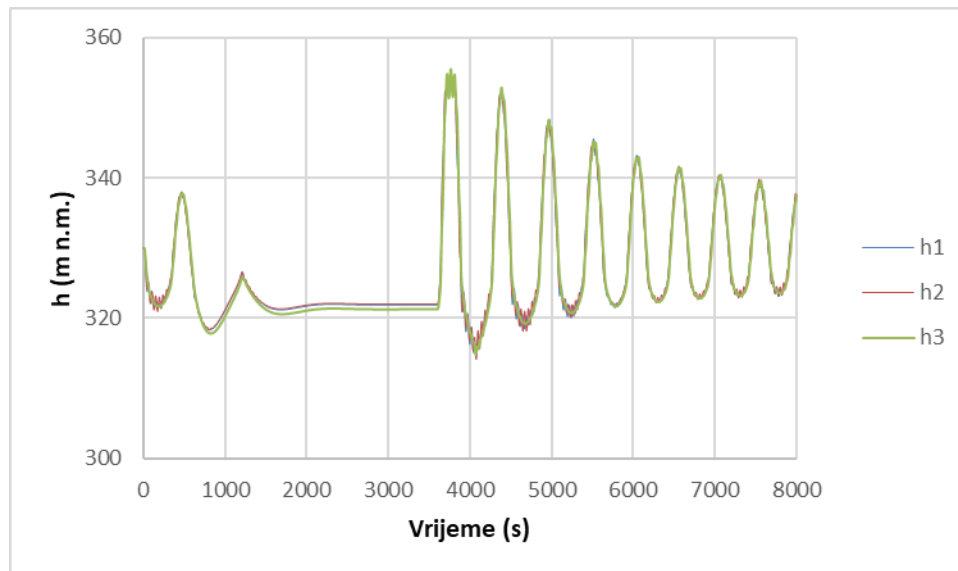
Slika 62 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



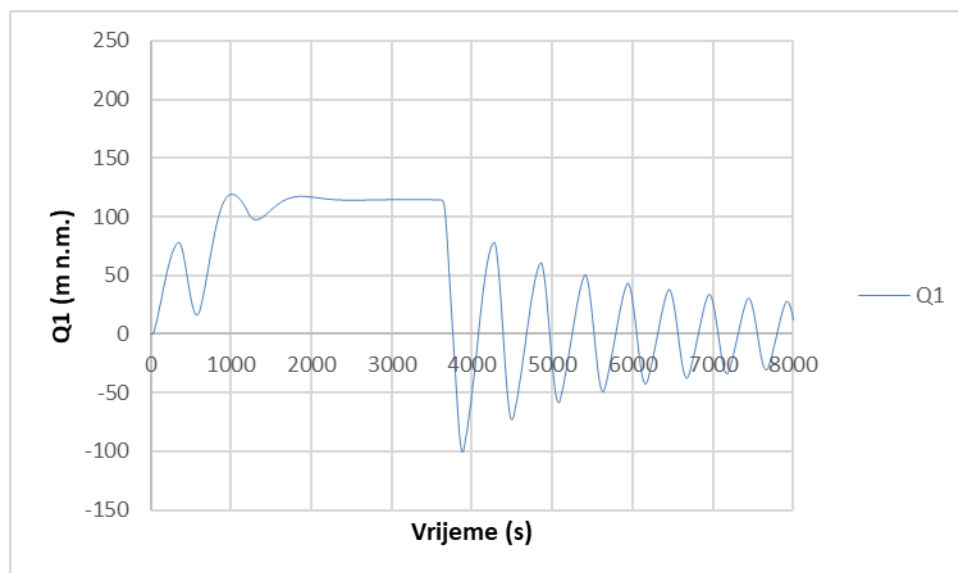
Slika 63 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



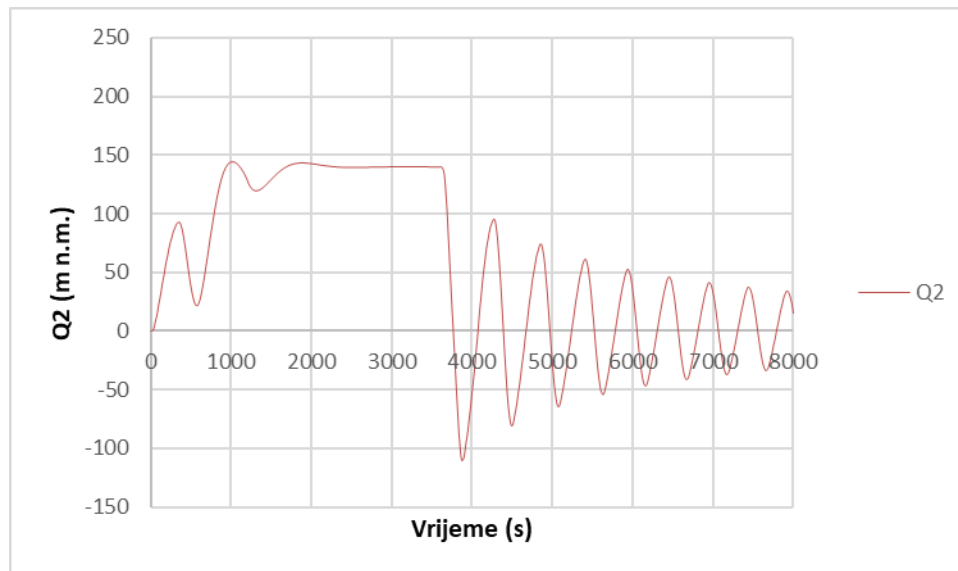
Slika 64 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



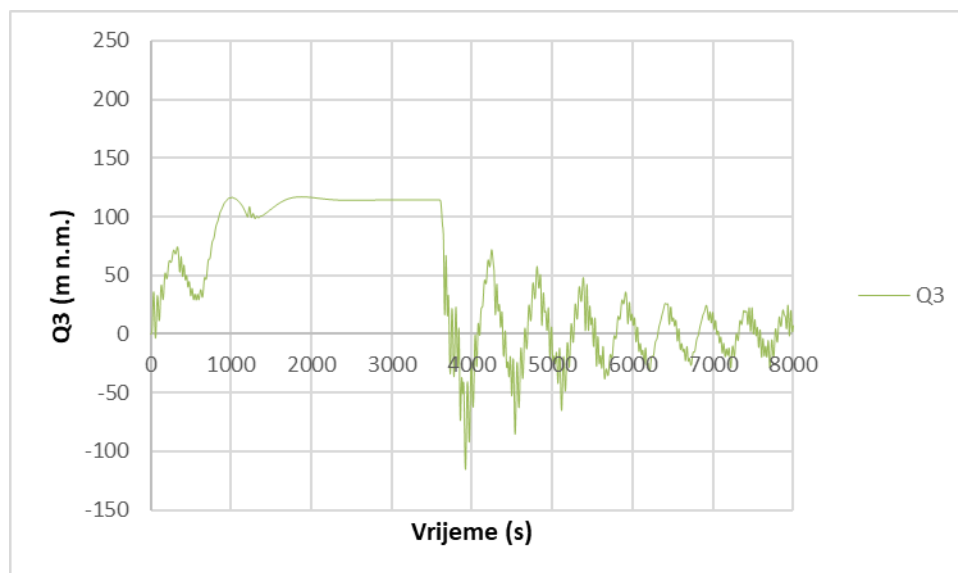
Slika 65 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



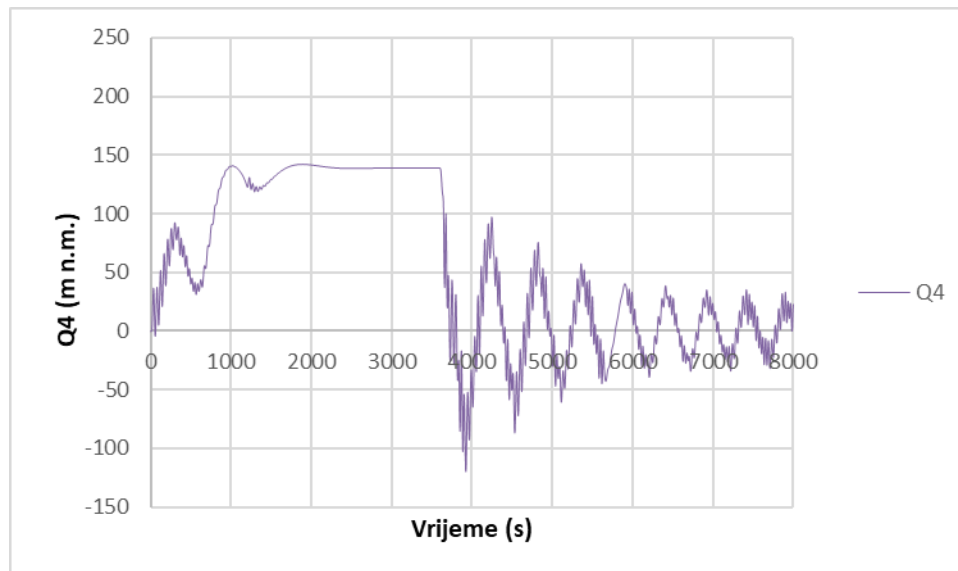
Slika 66 Protok  $Q1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



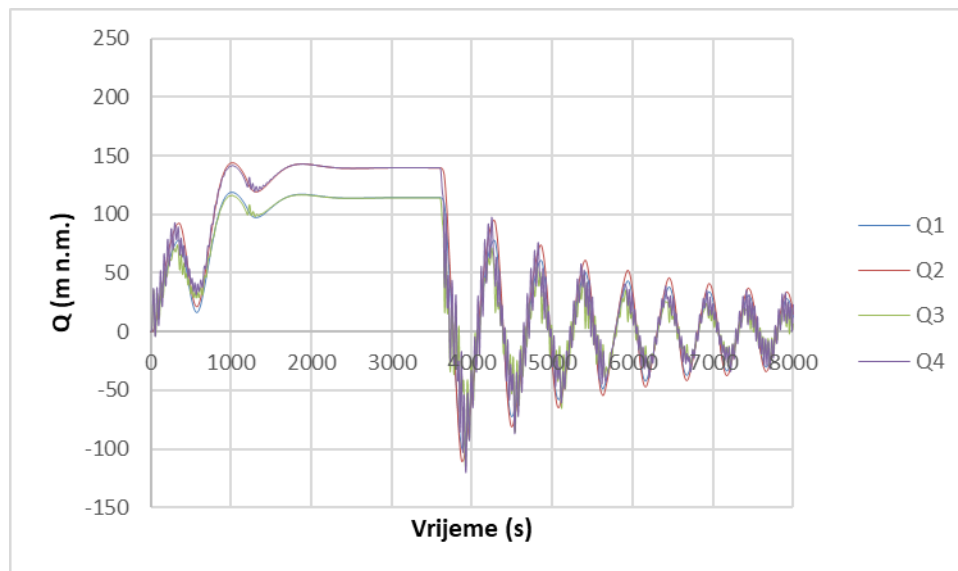
Slika 67 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



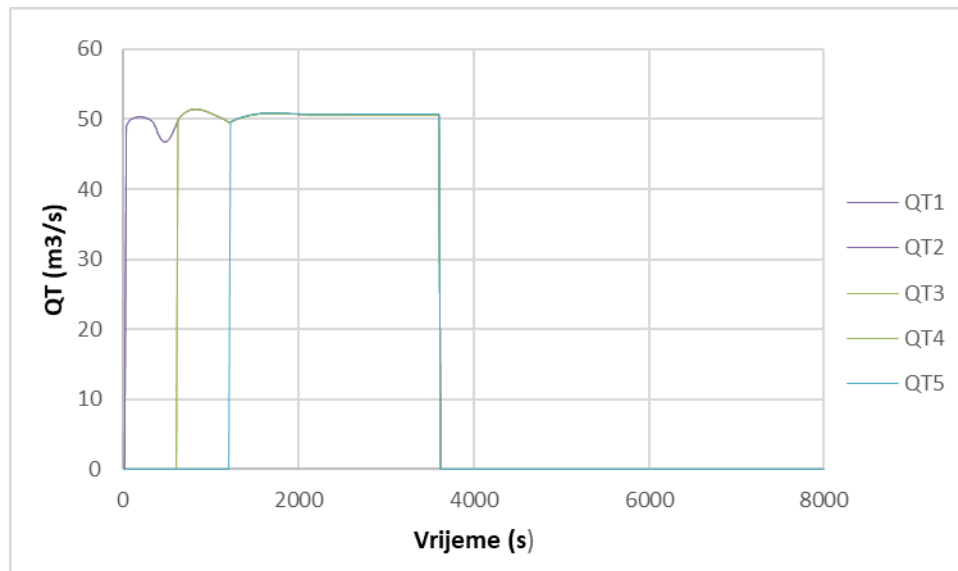
Slika 68 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



Slika 69 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



Slika 70 Protoci u dovodnim tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1



Slika 71 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.1

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 3.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
319,16	318,94	318,82	-100,29	-110,55	-115,55	-119,59

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 318,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 318,817$  (m n.m.) za  $0,417$  (m) veća od minimalne dozvoljene.

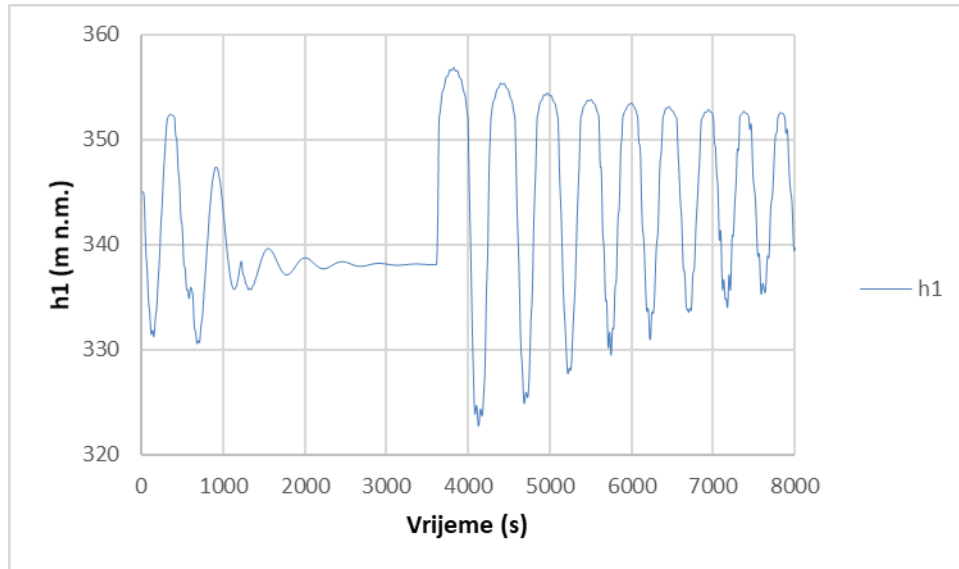
Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 3.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
353,66	353,63	355,56	118,69	143,80	116,68	142,53

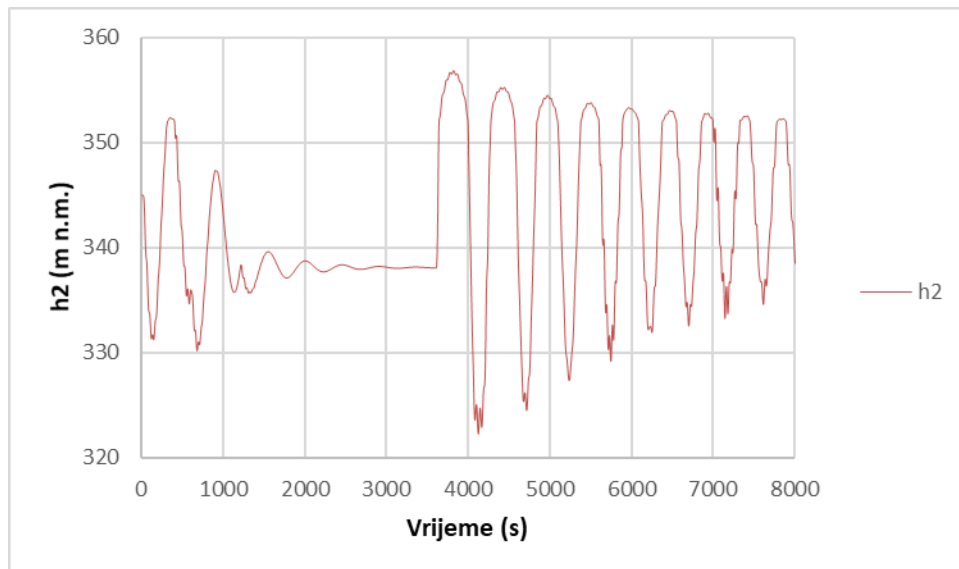


4.3.2. VARIJANTA 3.2 –  $h_a = 345$  (m n. m.)

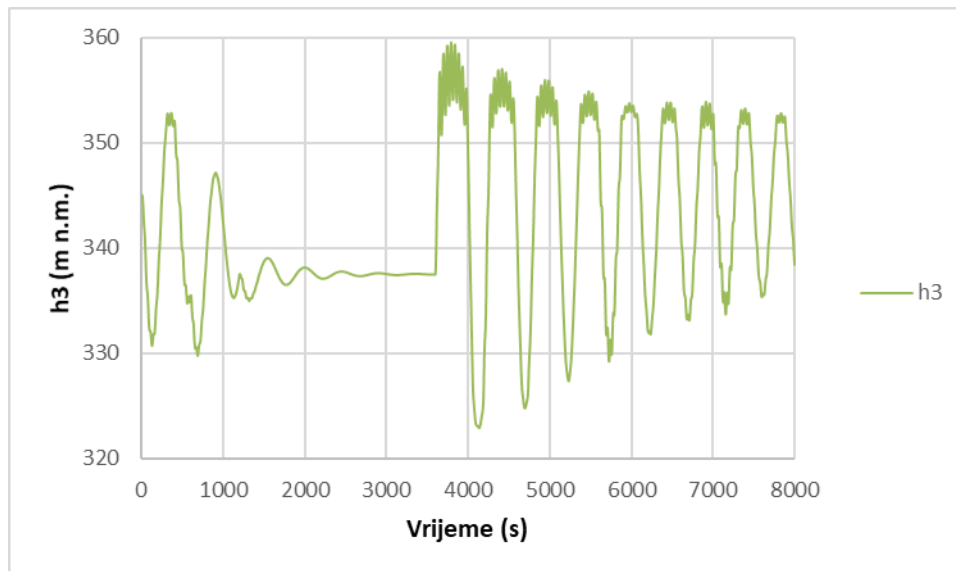
Vodostaj u akumulaciji je maksimalan i vrijednost mu je  $h_a = 345$  (m n.m.).



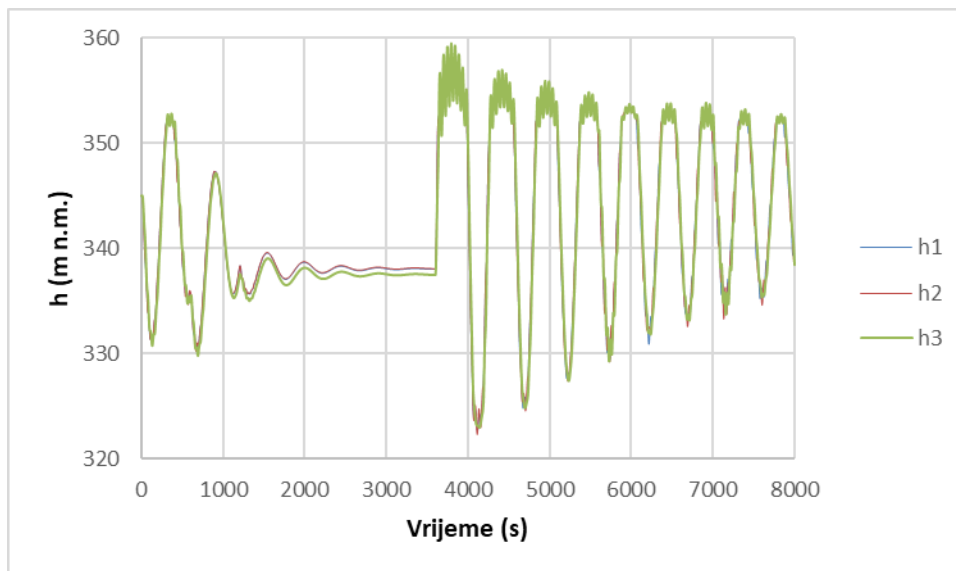
Slika 72 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



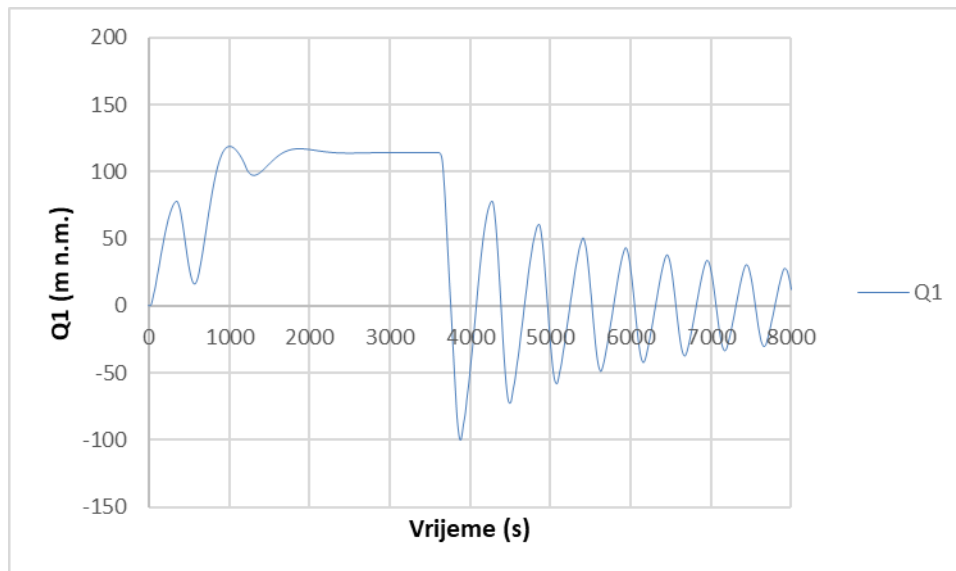
Slika 73 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



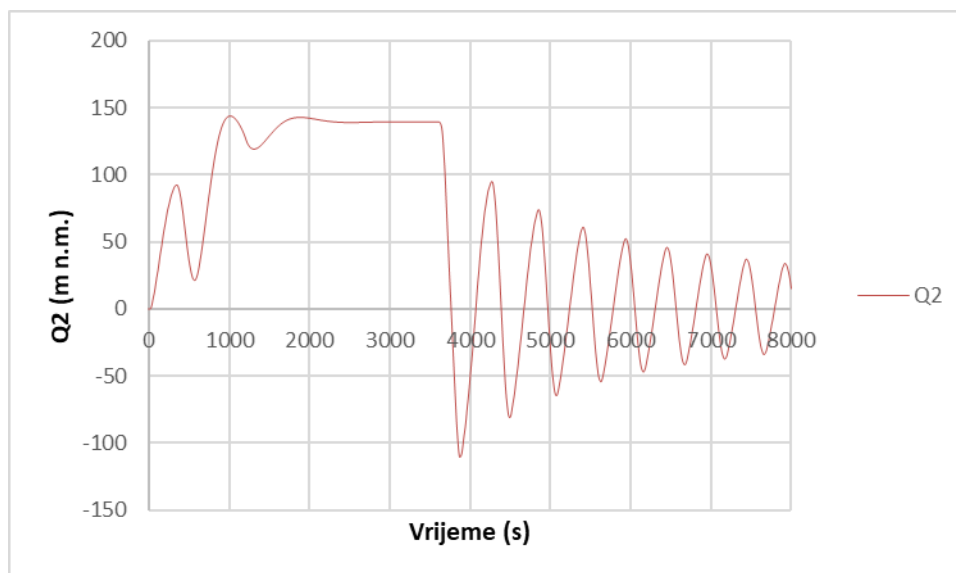
Slika 74 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



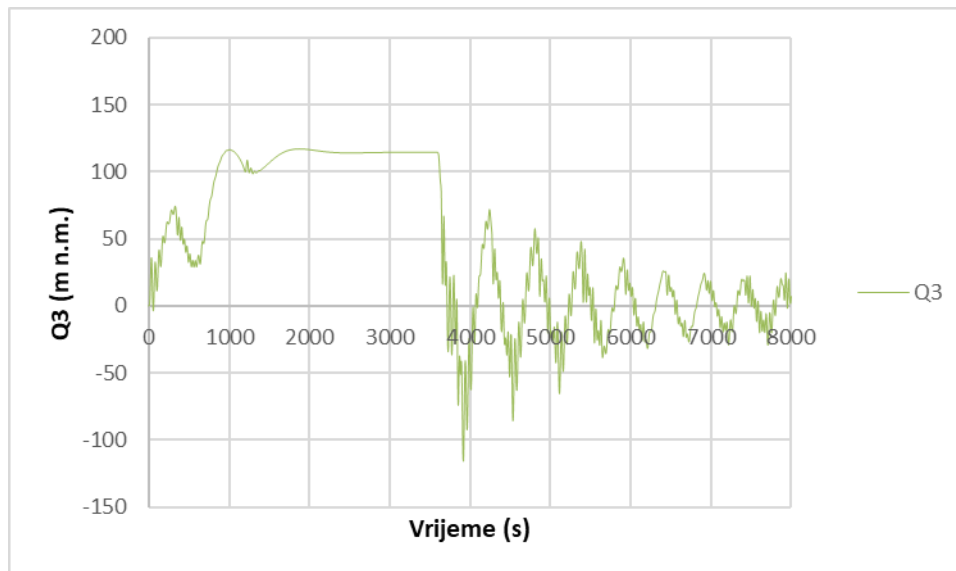
Slika 75 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



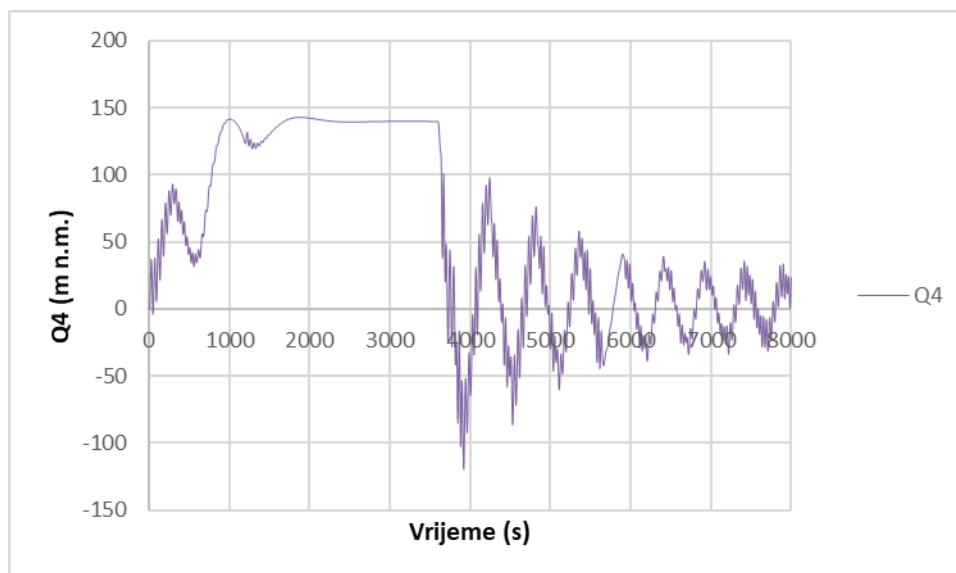
Slika 76 Protok Q1 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



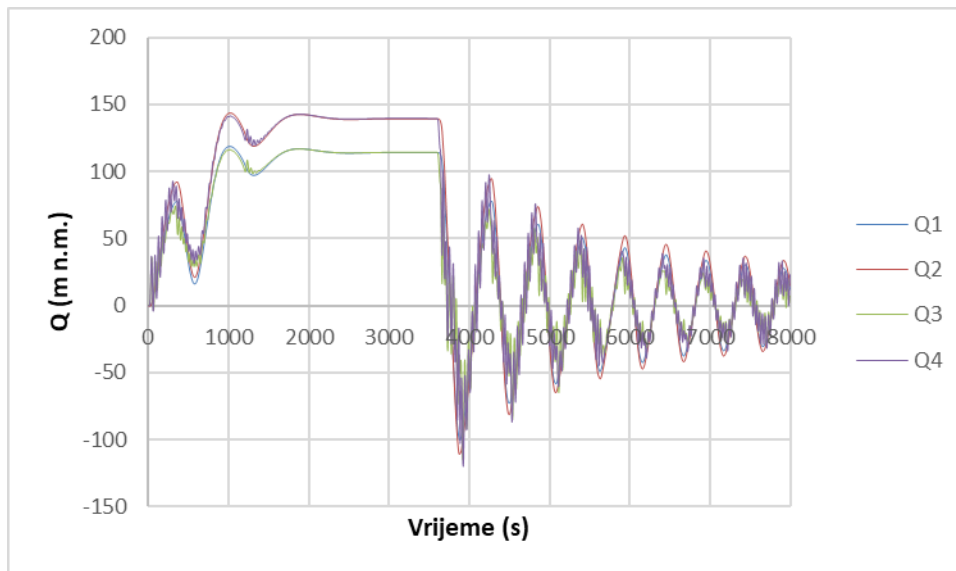
Slika 77 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



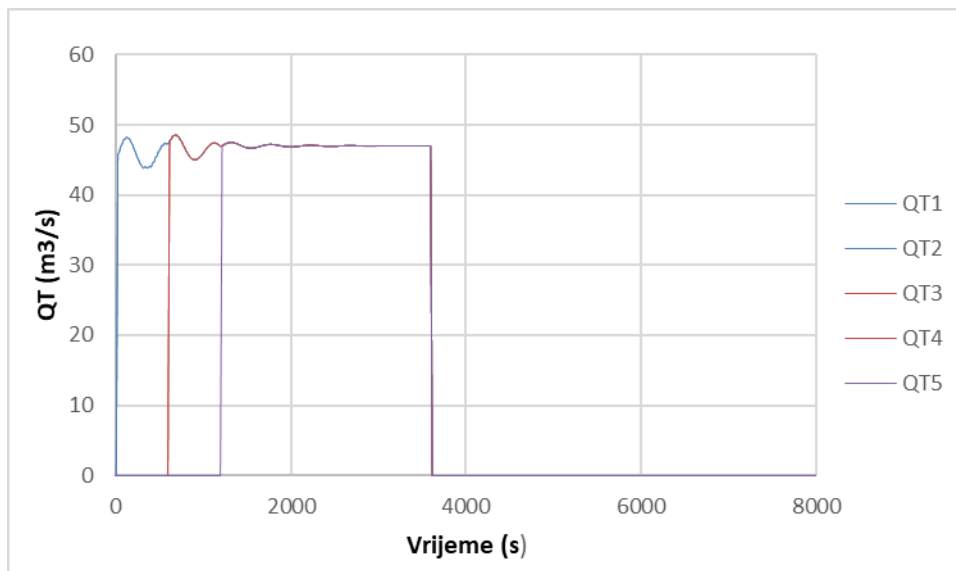
Slika 78 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



Slika 79 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



Slika 80 Protoci u dovodnim tunnelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2



Slika 81 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 3.2

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 3.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
322,67	322,24	322,91	-90,93	-101,04	-58,28	-63,71

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 318,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 322,91$  (m n.m.) za 4,51 (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 3.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
356,84	356,85	359,52	112,40	136,71	109,92	134,67

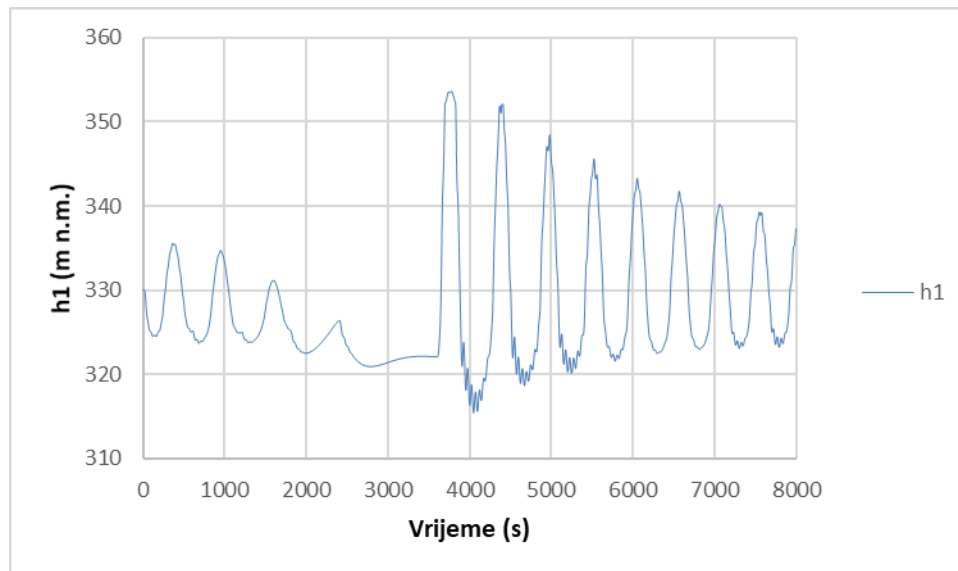
#### 4.4. VARIJANTA 4

Vodna komora ima duljinu proširenja  $L = 110,0$  (m) i  $D = 10,0$  (m). Produbljenje u trećoj vodnoj komori iznosi 2 (m).

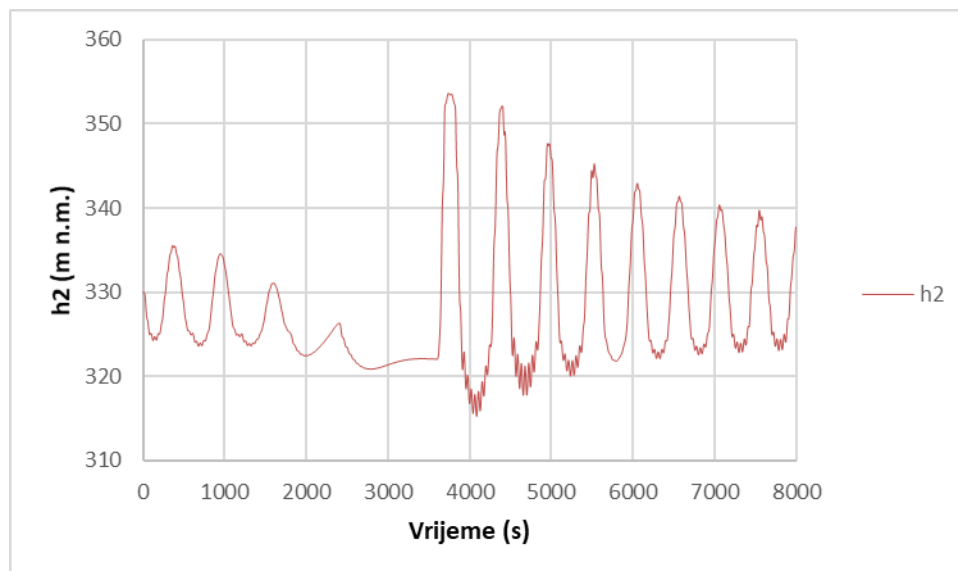
Prva turbina se uključuje u desetoj sekundi (od 10. do 30. sekunde), a ostale sa razmakom od deset minuta. Isključuju se sve zajedno nakon sat vremena.

##### 4.4.1. VARIJANTA 4.1 – $h_a = 330$ (m n. m.)

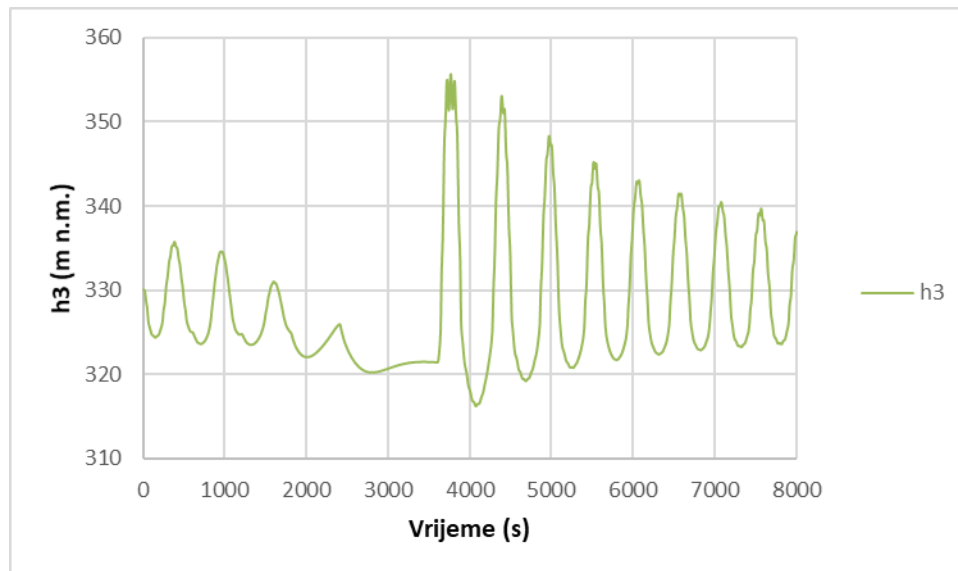
Vodostaj u akumulaciji je minimalan i vrijednost mu je  $h_a = 330$  (m n.m.).



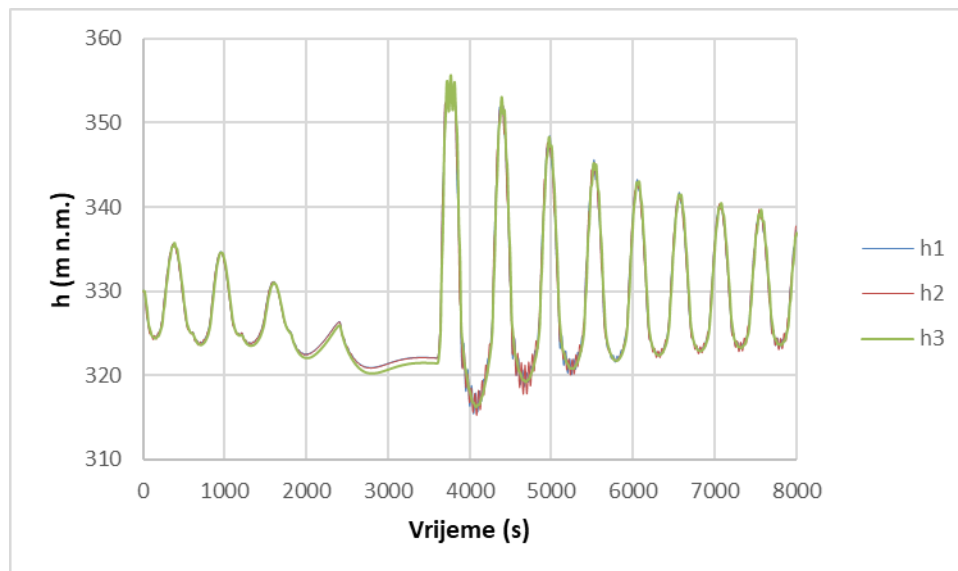
Slika 82 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1



Slika 83 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1

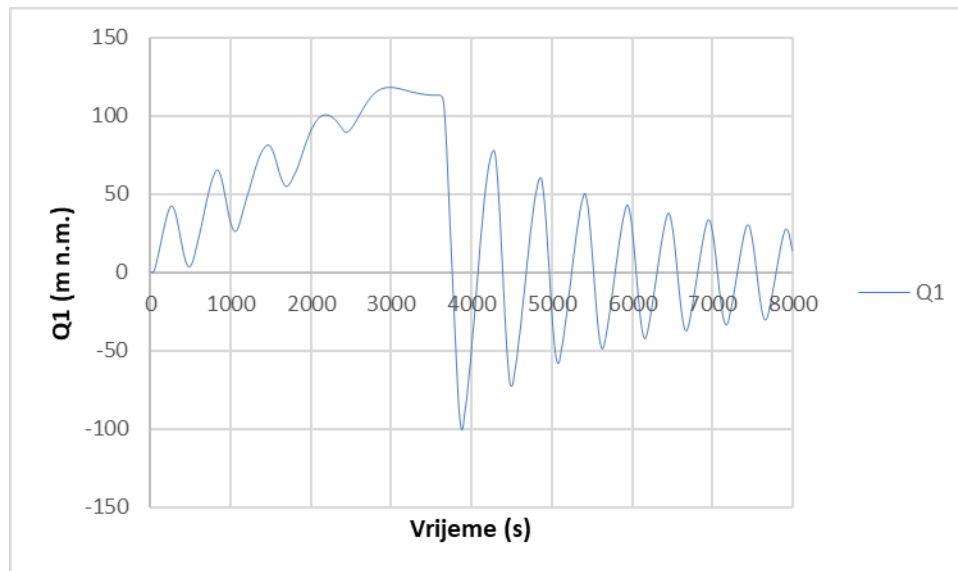


Slika 84 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1

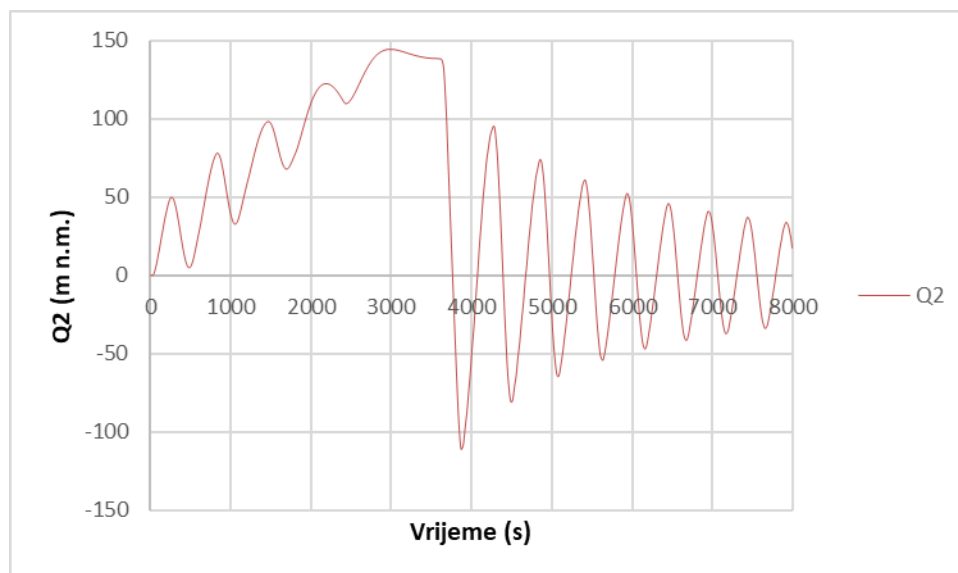


Slika 85 Vodostaji u komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1

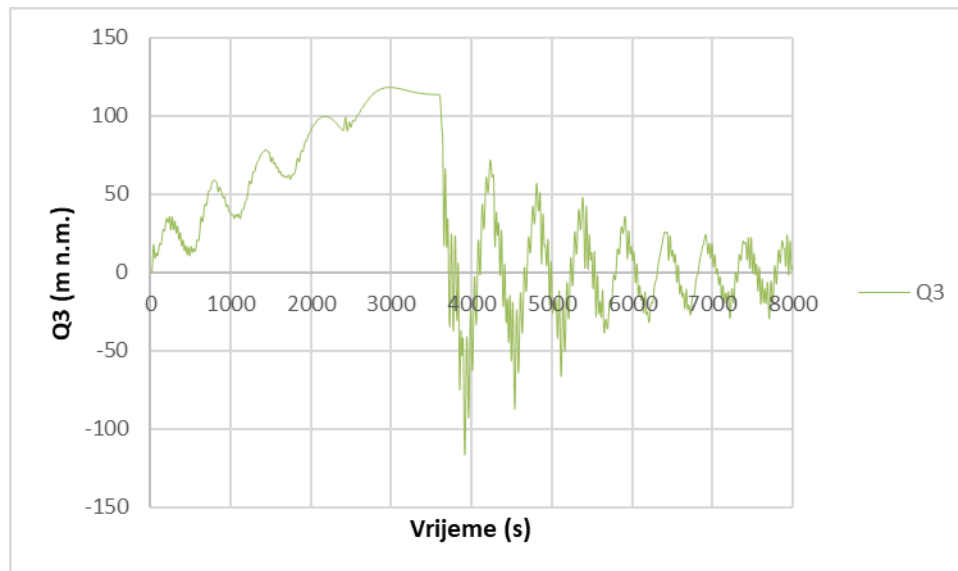




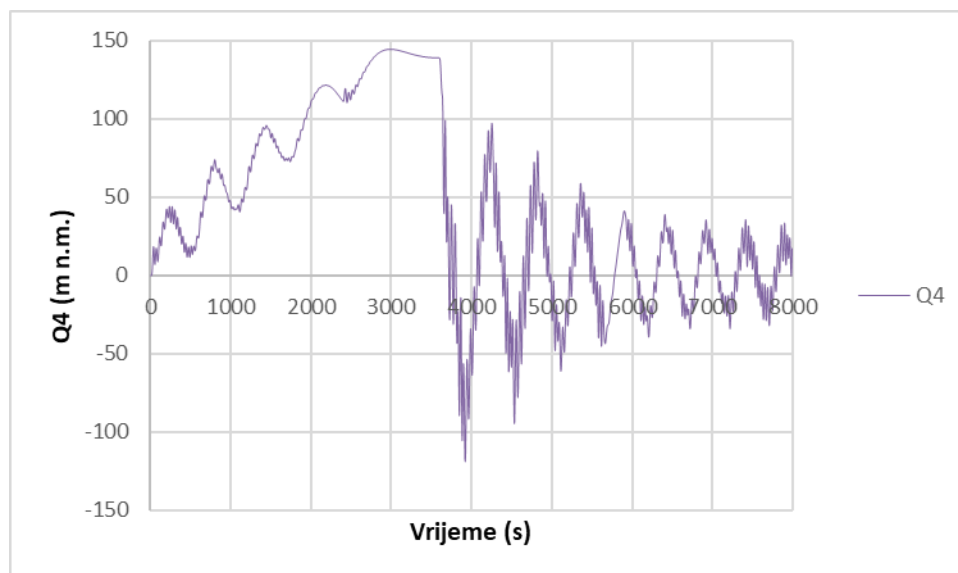
Slika 86 Protok Q1 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1



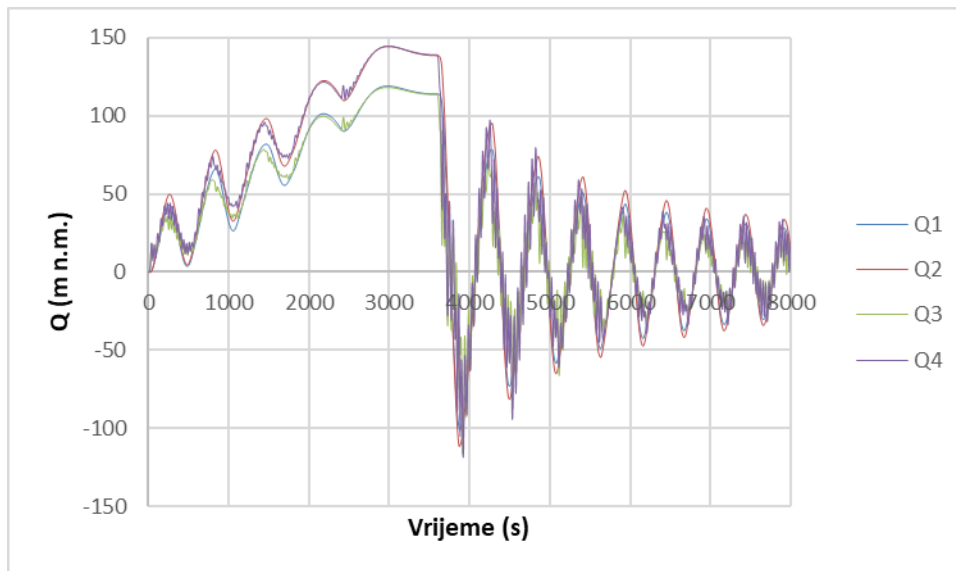
Slika 87 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1



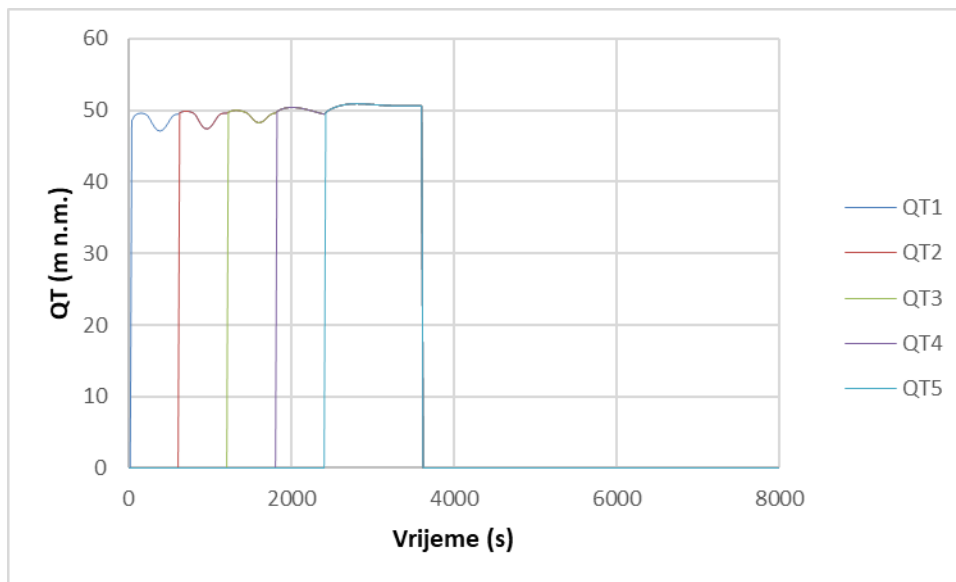
Slika 88 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1



Slika 89 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1



Slika 90 Protoci u dovodnim tunnelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1



Slika 91 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.1

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 4.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
318,34	318,29	318,17	-100,97	-111,48	-116,23	-118,66

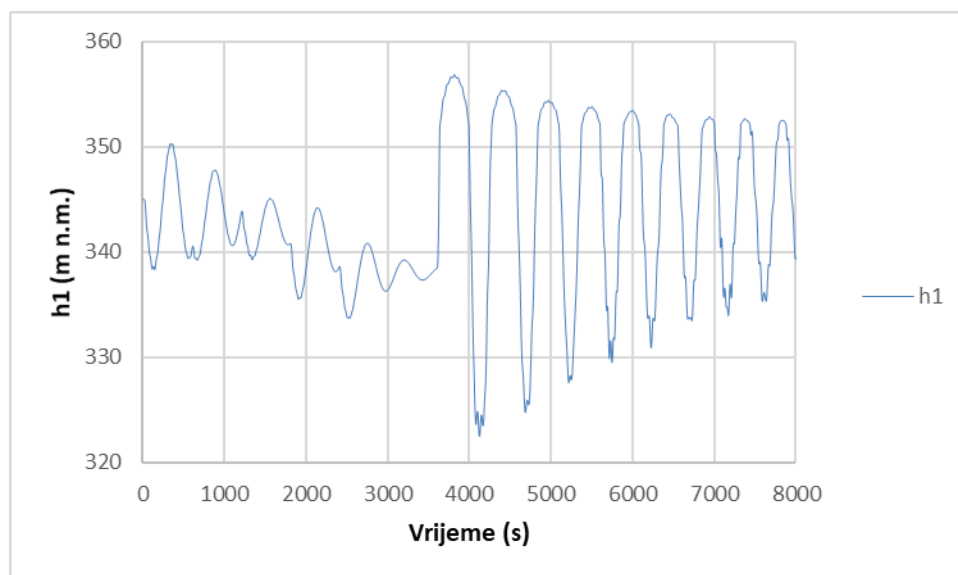
Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 317,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 318,17$  (m n.m.) za  $0,77$  (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 4.1:

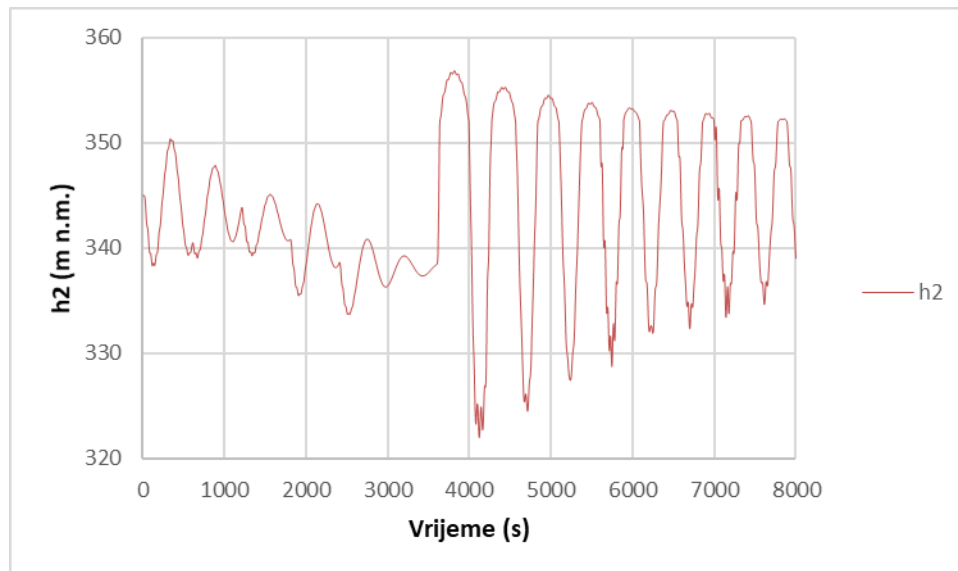
h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
353,68	353,68	355,68	118,54	144,67	118,15	144,27

#### 4.4.2. VARIJANATA 4.2 – $h_a = 345$ (m n. m.)

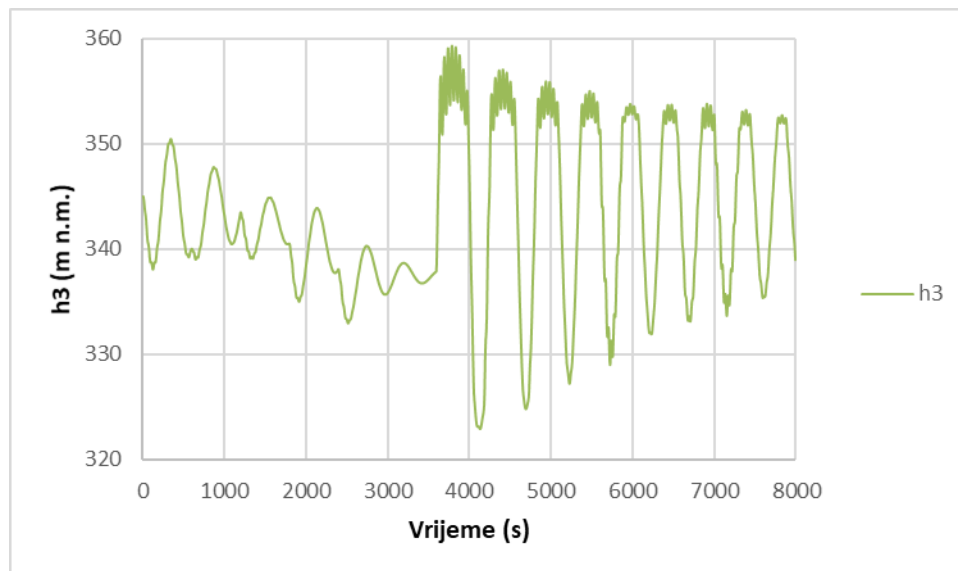
Vodostaj u akumulaciji je maksimalan i vrijednost mu je  $h_a = 345$  (m n.m.).



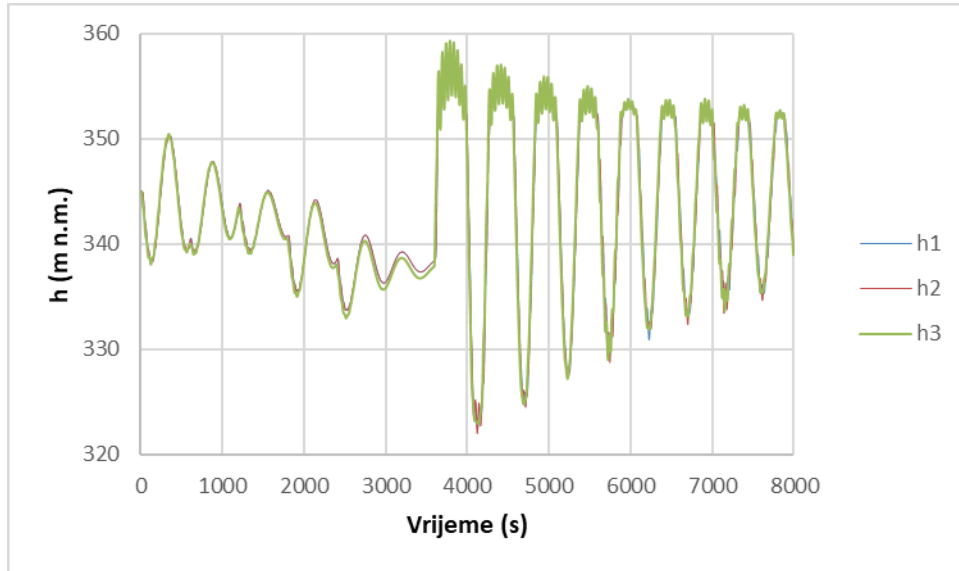
Slika 92 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2



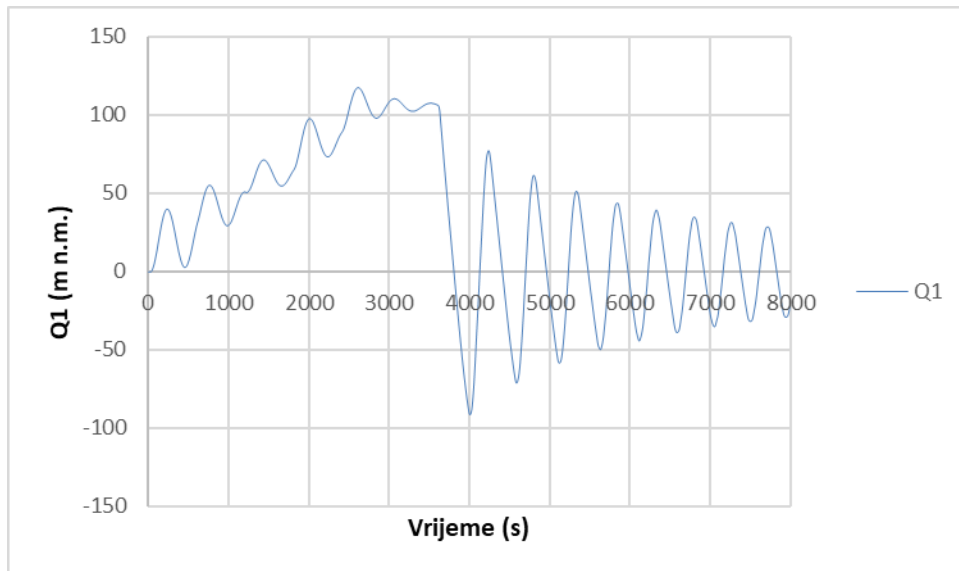
Slika 93 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2



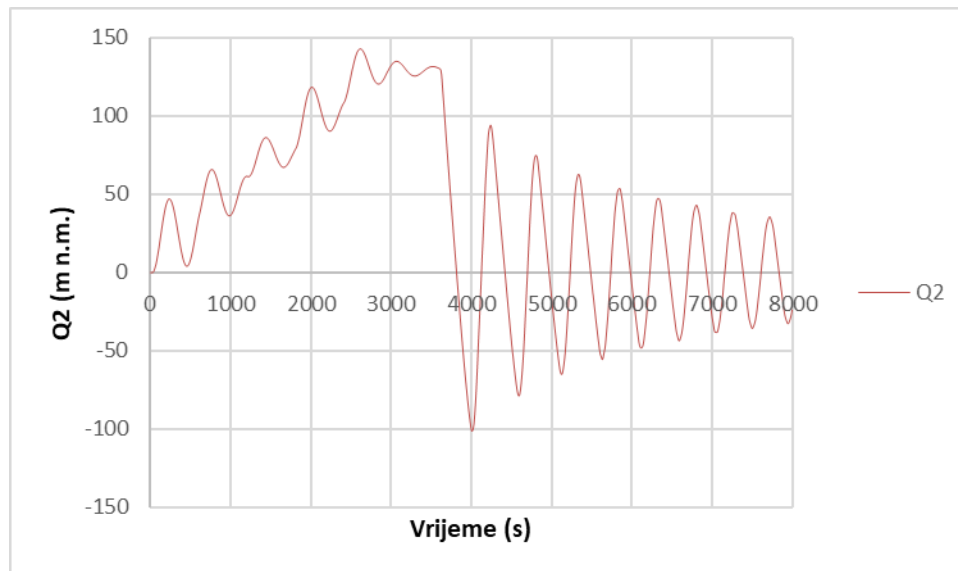
Slika 94 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2



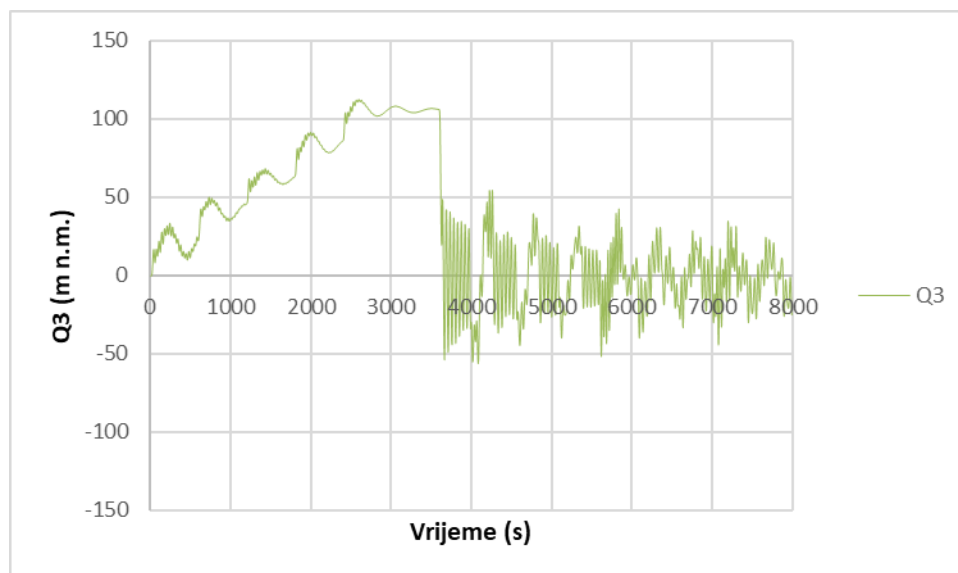
Slika 95 Vodostaji u komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2



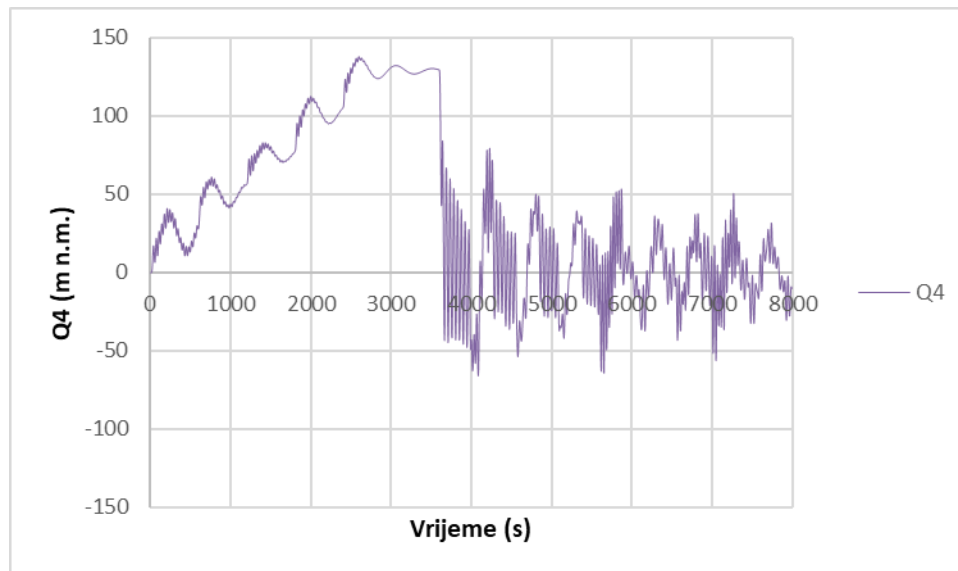
Slika 96 Protok  $Q1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2



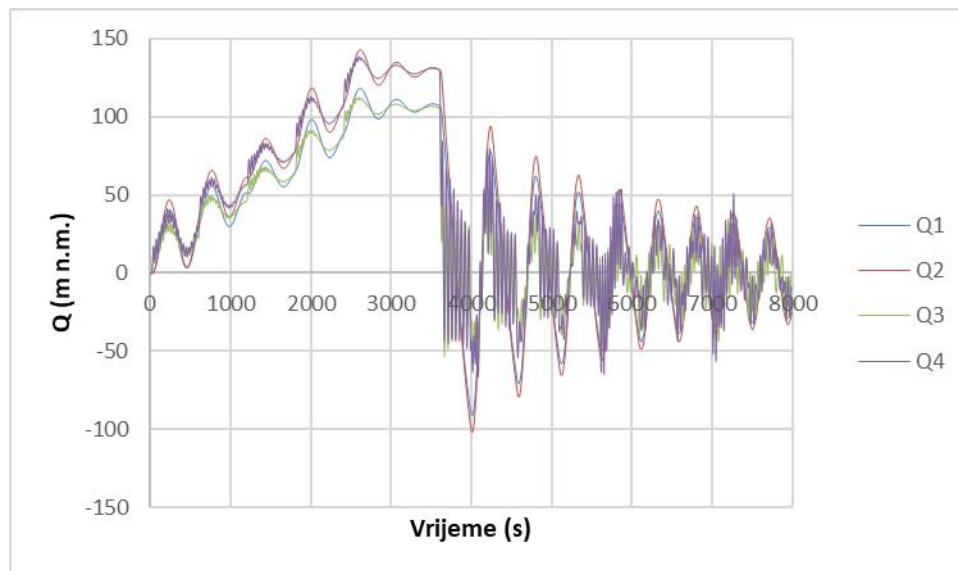
Slika 97 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2



Slika 98 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2

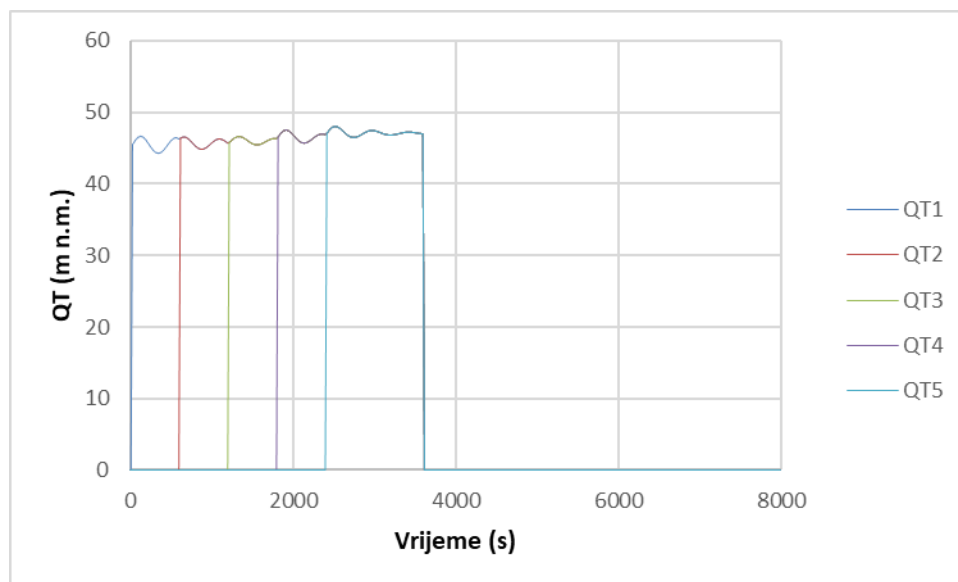


Slika 99 Protok  $Q_4$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2



Slika 100 Protoci u dovodnim tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2





Slika 101 protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 4.2

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 4.2:

$h_1$	$h_2$	$h_3$	Q1	Q2	Q3	Q4
322,43	321,98	322,86	-91,29	-101,36	-56,09	-66,03

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 317,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 322,86$  (m n.m.) za 5,46 (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 4.2:

$h_1$	$h_2$	$h_3$	Q1	Q2	Q3	Q4
356,87	356,86	359,35	117,78	143,018	112,66	138,29

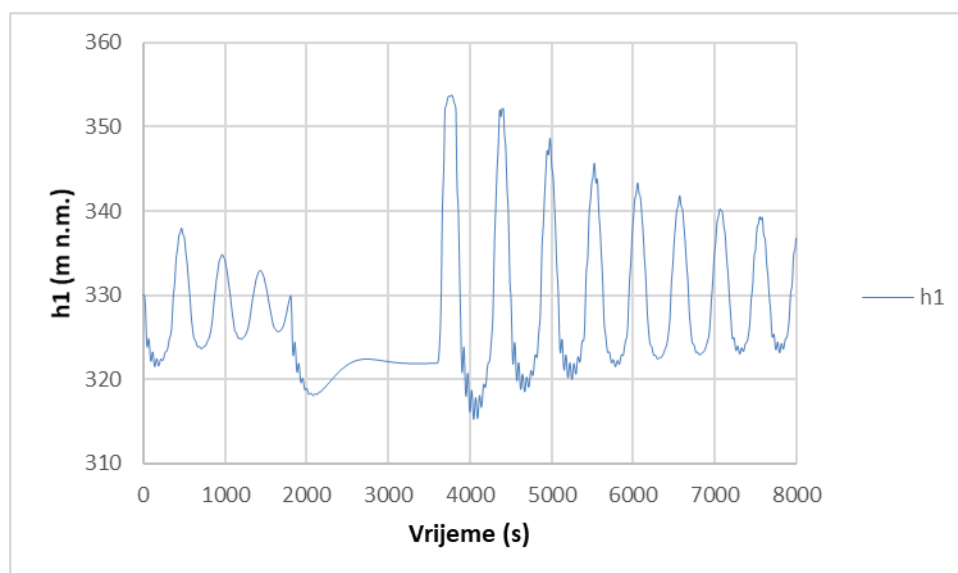
## 4.5. VARIJANTA 5

Vodna komora ima duljinu proširenja  $L=110,0$  (m) i  $D = 10,0$  (m). Produbljenje iznosi 3 (m).

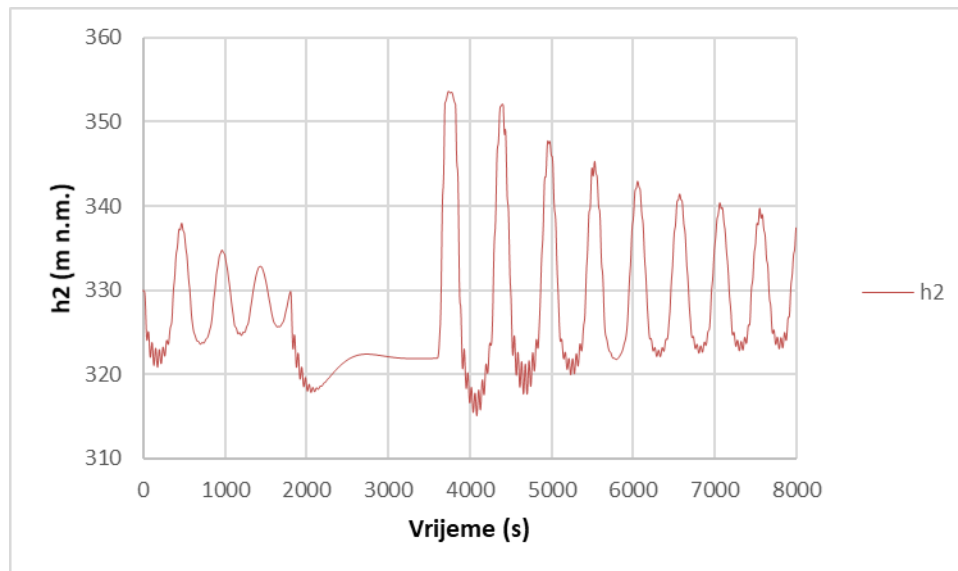
Dvije turbine se uključuju u desetoj sekundi (od 10. do 30. sekunde), dvije nakon 10 minuta, jedna nakon 20 minuta. Sve turbine se isključuju u 60. minuti.

### 4.5.1. VARIJANTA 5.1 – $h_a = 330$ (m n. m.)

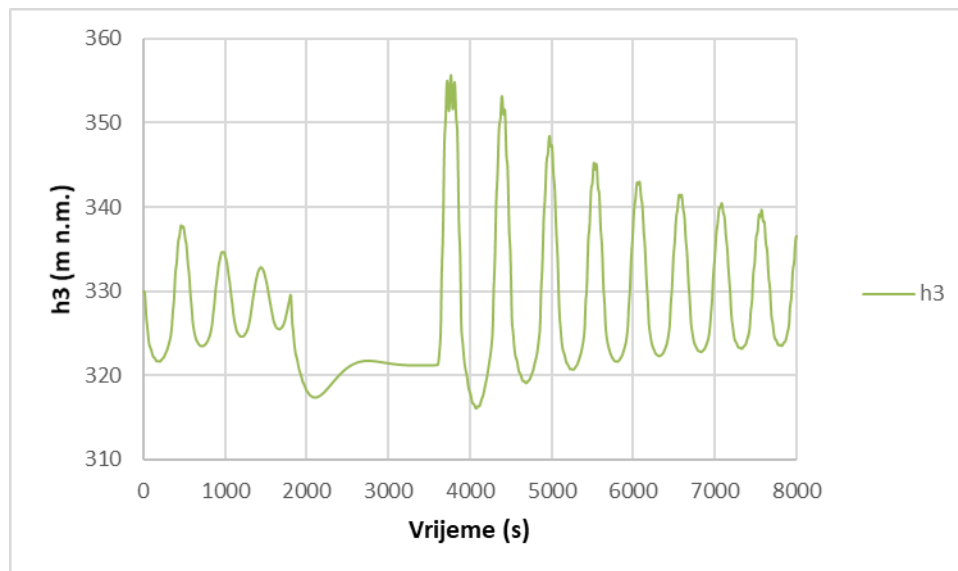
Vodostaj u akumulaciji je minimalan i vrijednost mu je  $h_a = 330$  (m n.m.).



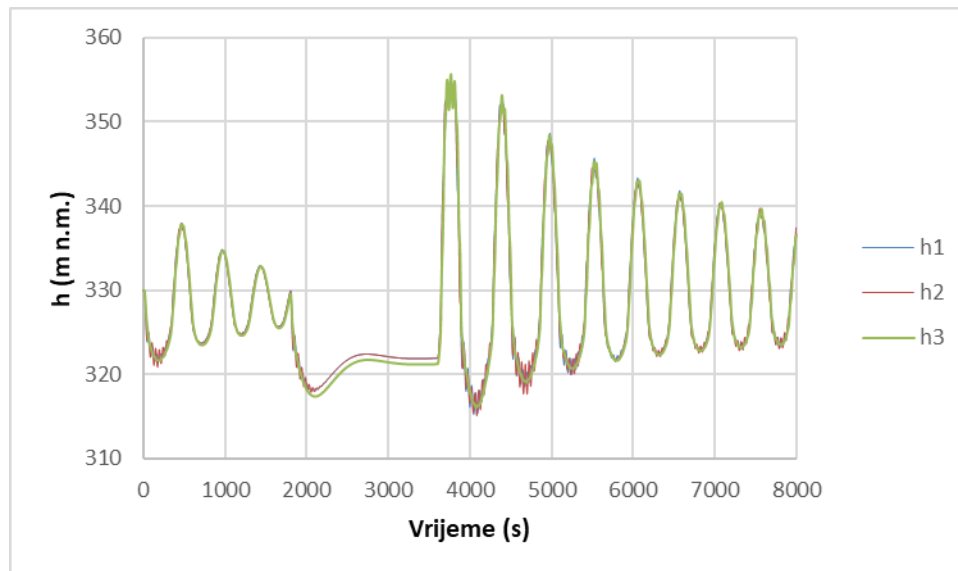
Slika 102 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



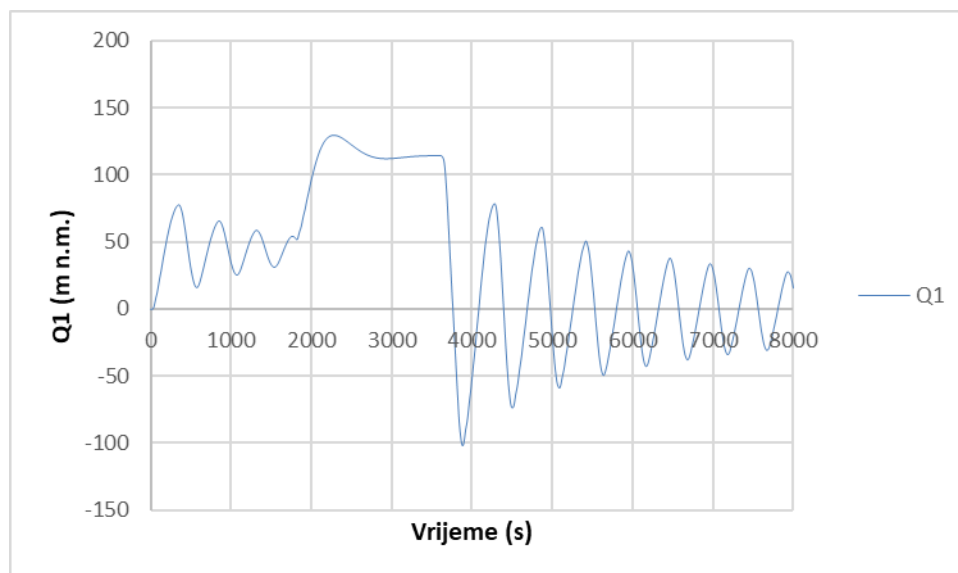
Slika 103 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



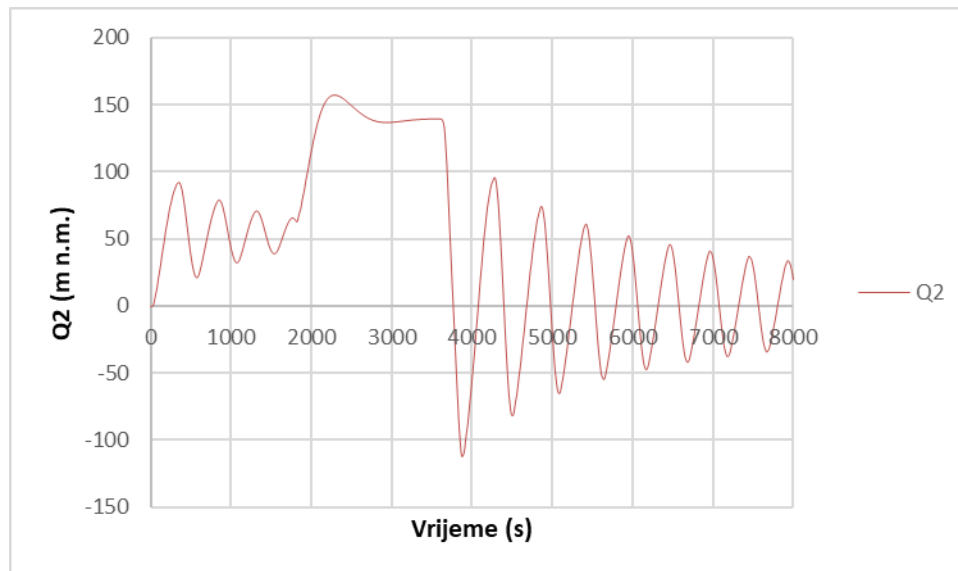
Slika 104 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



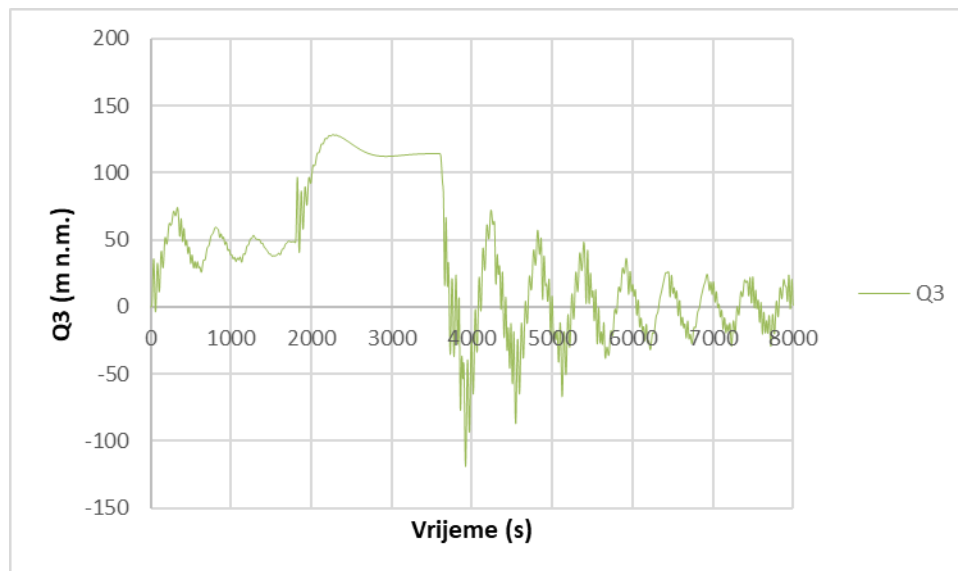
Slika 105 Vodostaji u vodnim kjomorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



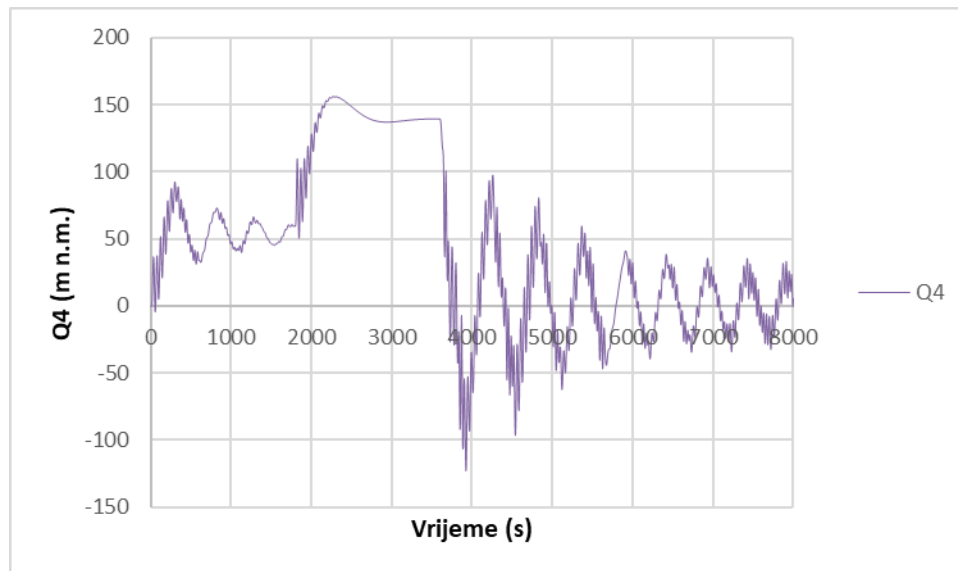
Slika 106 Protok  $Q1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



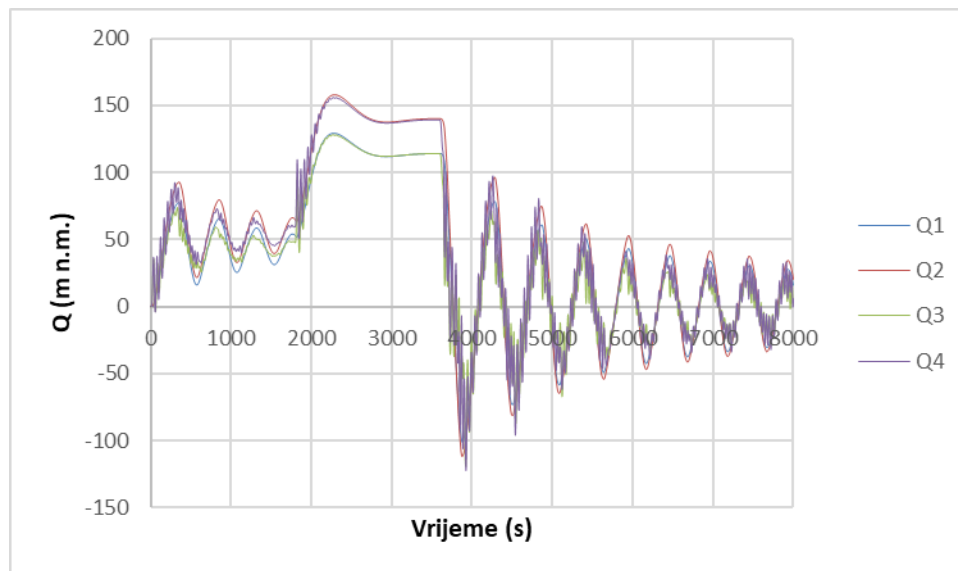
Slika 107 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



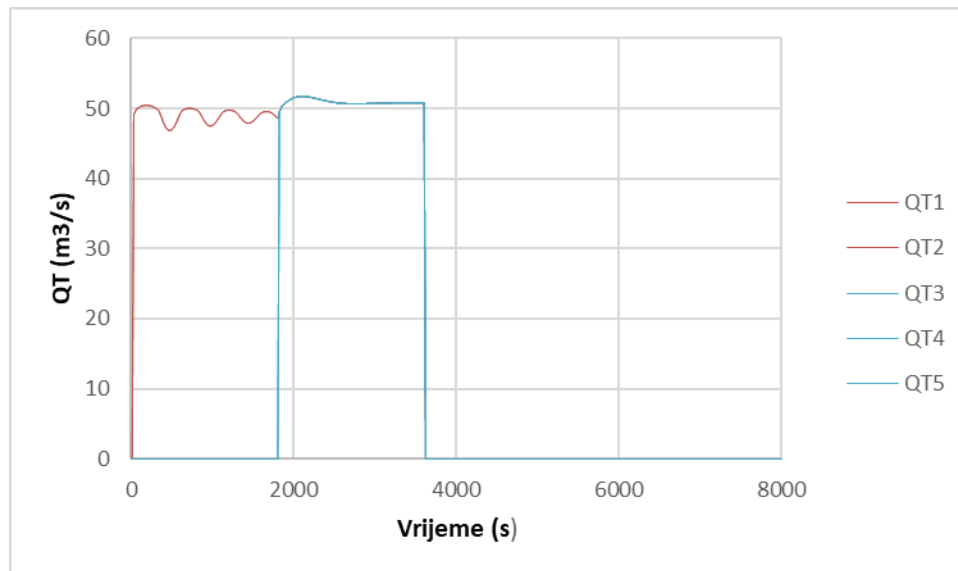
Slika 108 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



Slika 109 Protok  $Q_4$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



Slika 110 Protoci u dovodnim tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1



Slika 111 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.1

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $m^3/s$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 5.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
315,27	315,12	316,51	-101,67	-112,23	-119,14	-122,68

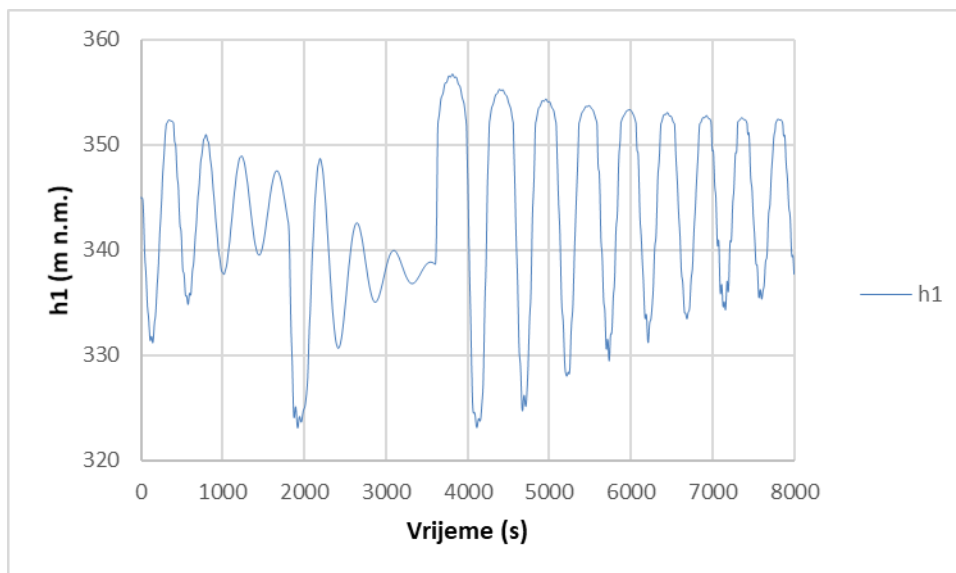
Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 316,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 316,51$  (m n.m.) za 0,11 (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $m^3/s$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 5.1:

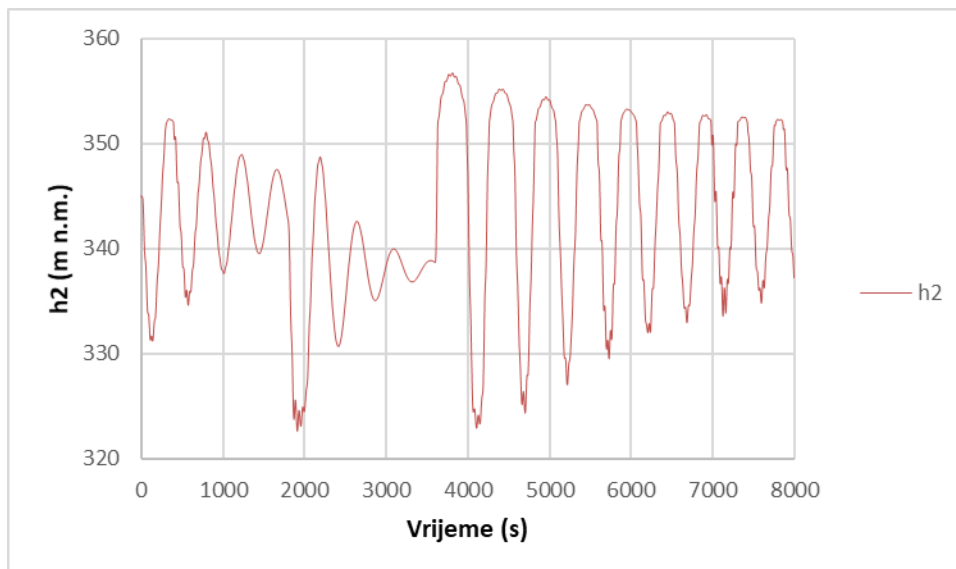
h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
353,75	353,72	355,70	129,57	157,61	128,56	156,52

4.5.2. VARIJANTA 5.2 –  $h_a = 345$  (m n. m.)

Vodostaj u akumulaciji je maksimalan i vrijednost mu je  $h_a=345$  (m n.m.).

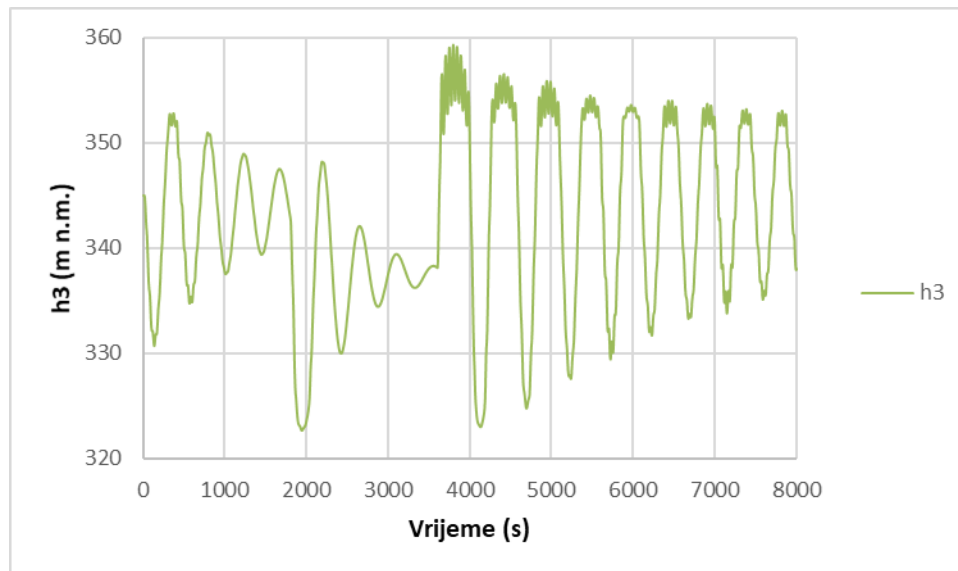


Slika 112 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2

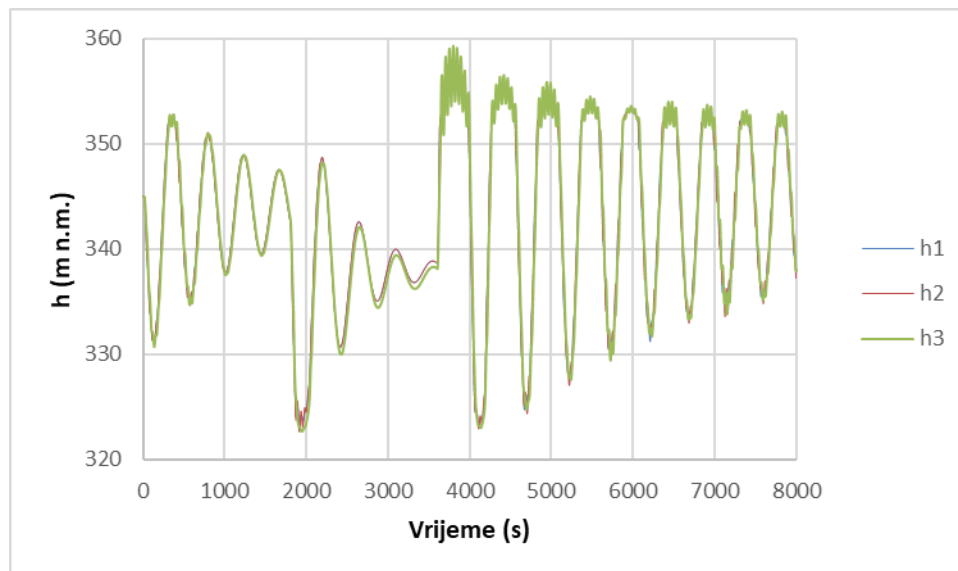


Slika 113 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2

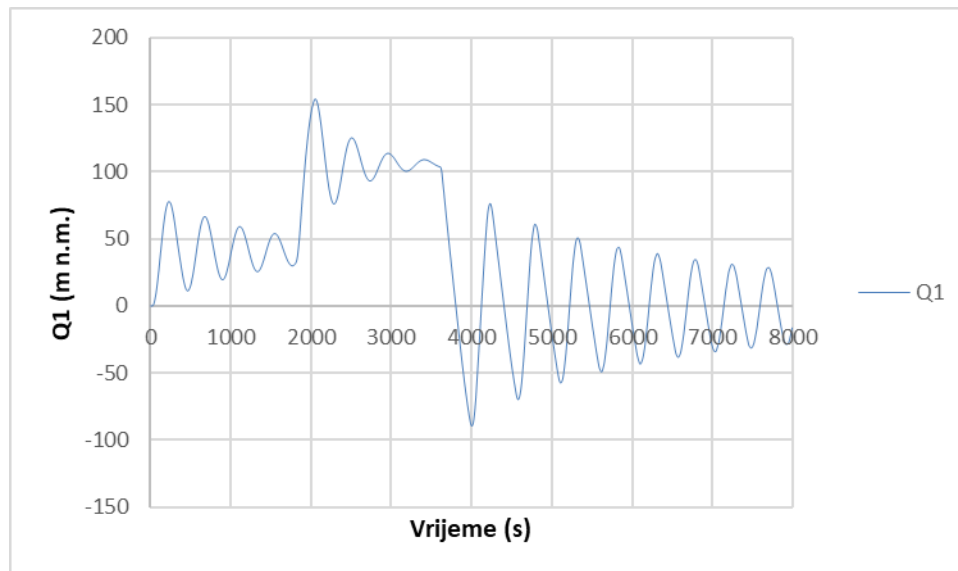




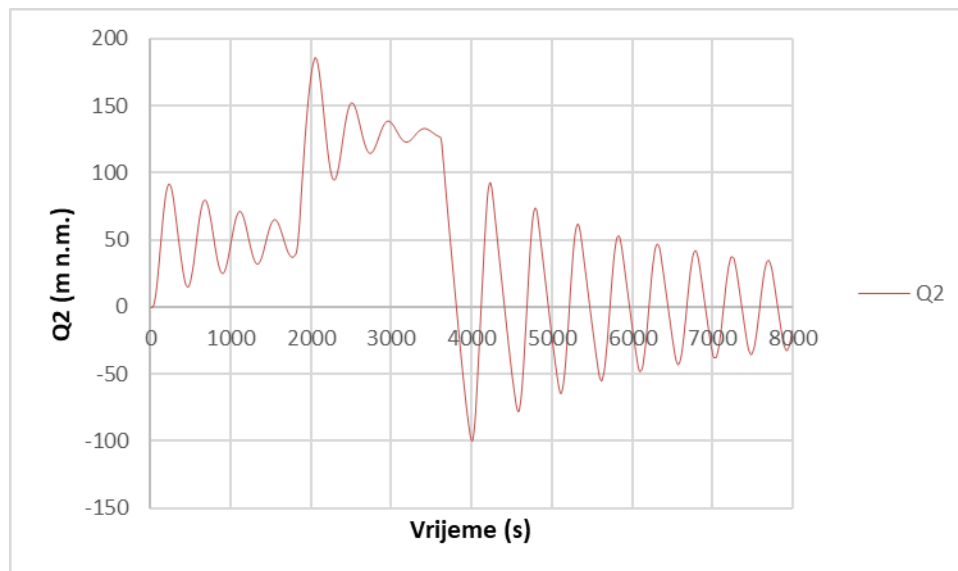
Slika 114 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2



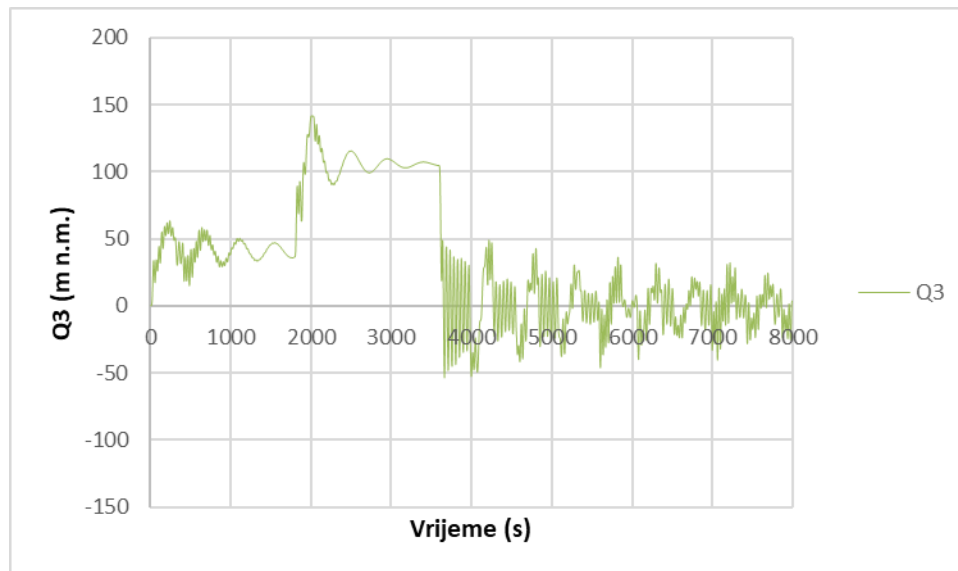
Slika 115 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2



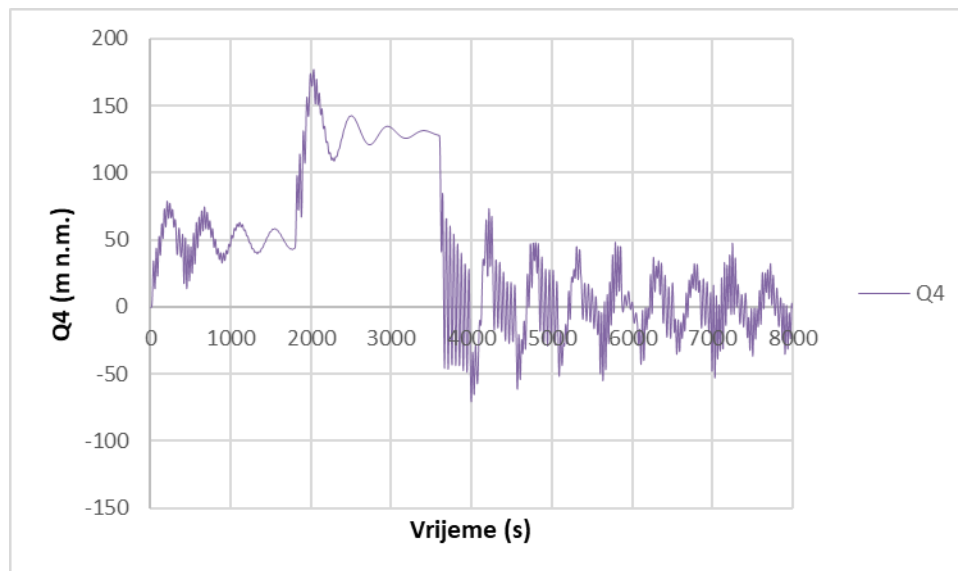
Slika 116 Protok Q1 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2



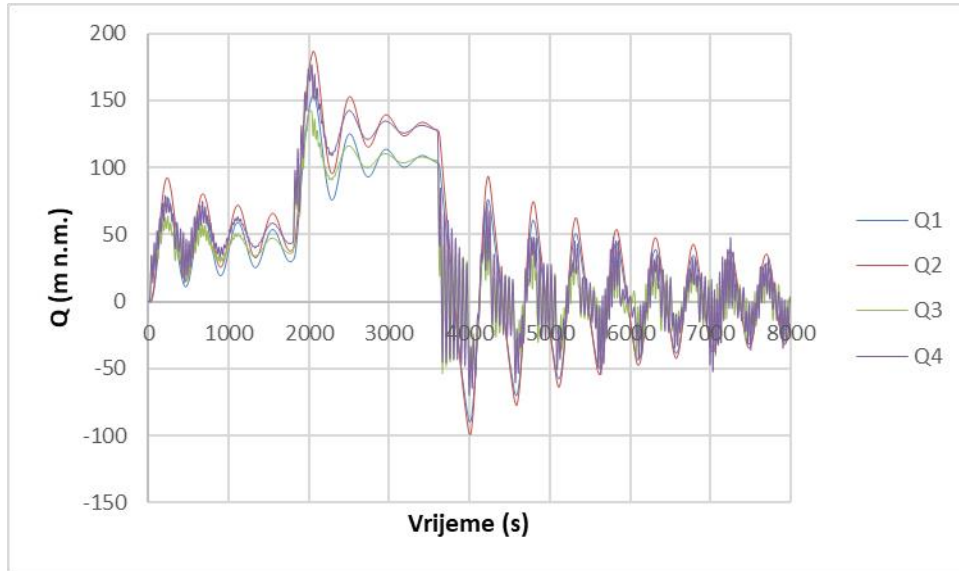
Slika 117 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2



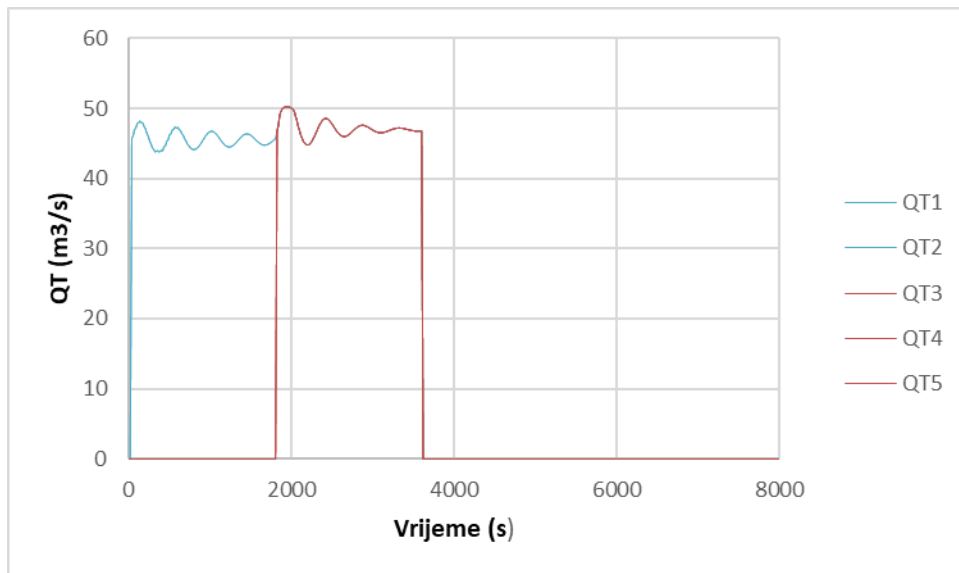
Slika 118 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2



Slika 119 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2



Slika 120 Protoci u dovodnim tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2



Slika 121 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 5.2

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 5.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
323,08	322,65	322,66	-89,77	-99,72	-54,00	-70,34

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 316,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 322,66$  (m n.m.) za 6,26 (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 5.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
356,77	356,75	359,32	154,53	186,26	142,19	177,06

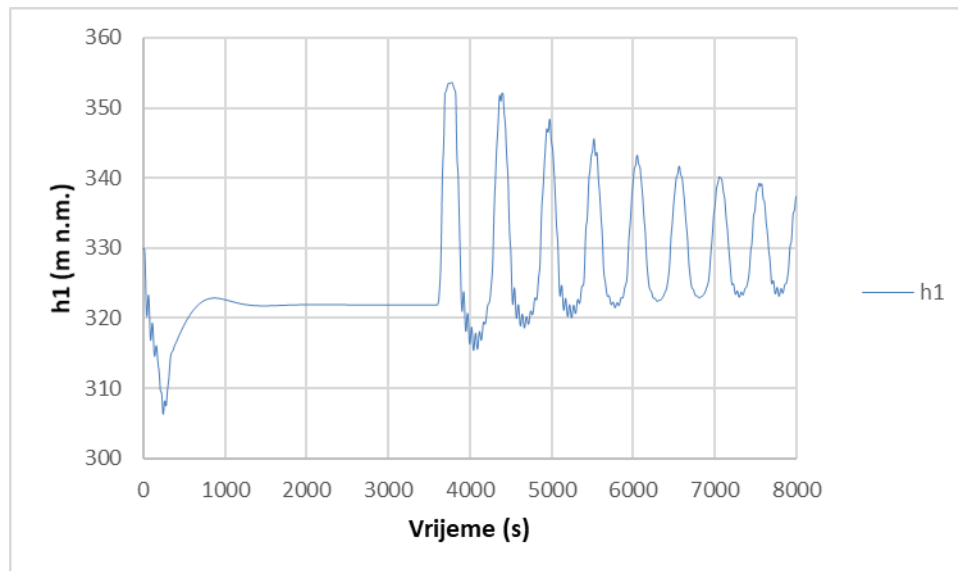
## 4.6. VARIJANTA 6

Vodna komora ima duljinu proširenja  $L = 110,0$  (m) i  $D = 10,0$  (m). Produbljenje iznosi 4 (m).

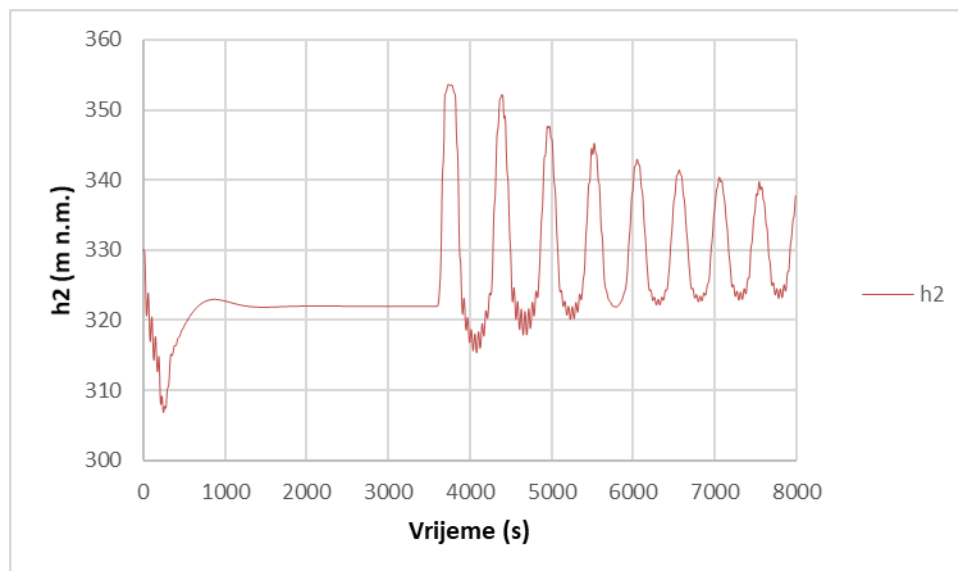
Sve turbine se uključuju u desetoj sekundi (od 10. do 30. sekunde) i isključuju se nakon sat vremena.

### 4.6.1. VARIJANTA 6.1 – $h_a = 330$ (m n. m.)

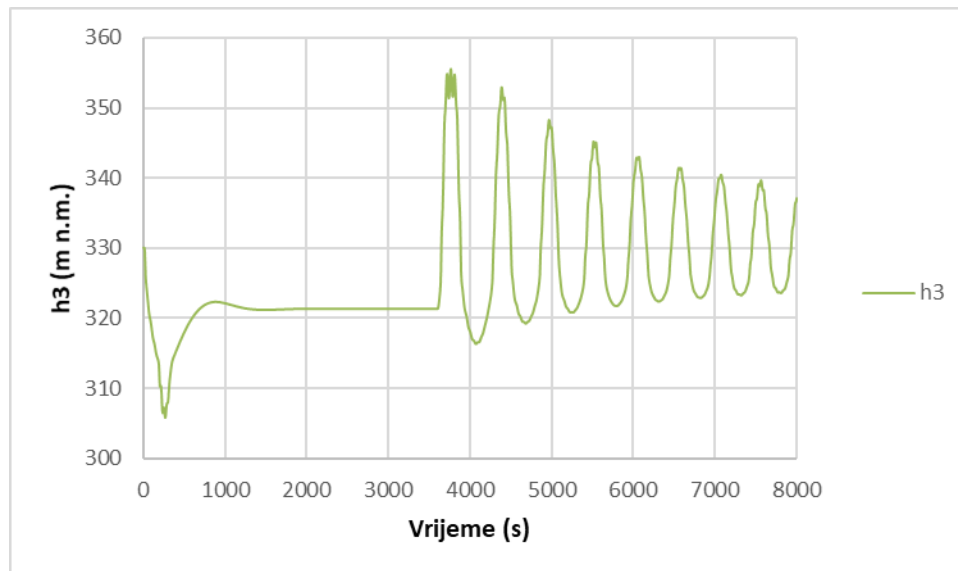
Vodostaj u akumulaciji je minimalan i vrijednost mu je  $h_a = 330$  (m n.m.).



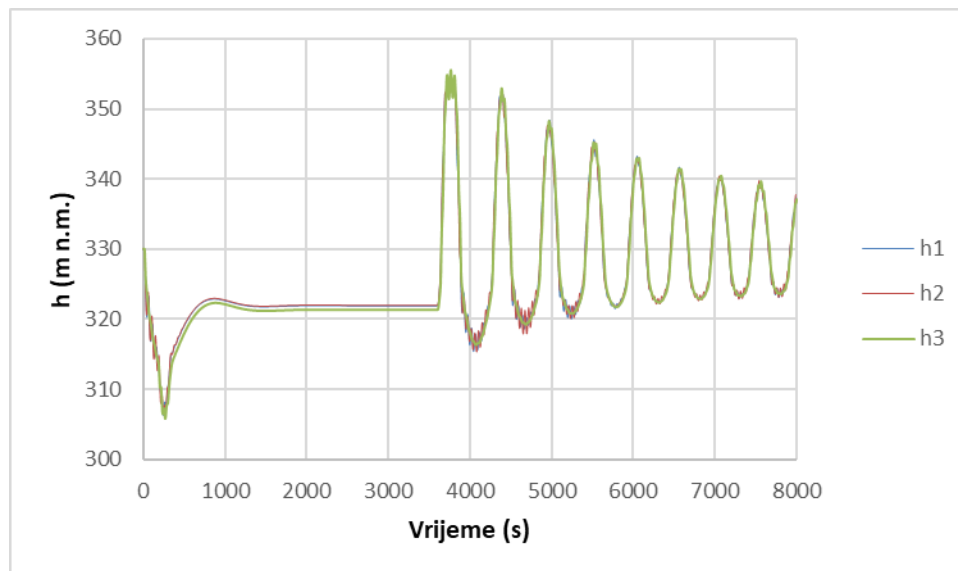
Slika 122 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1



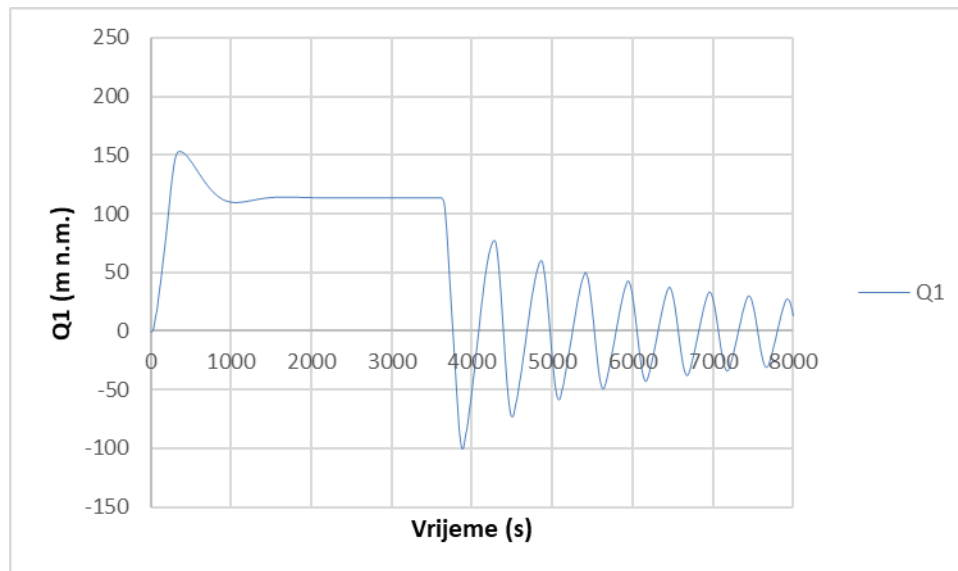
Slika 123 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1



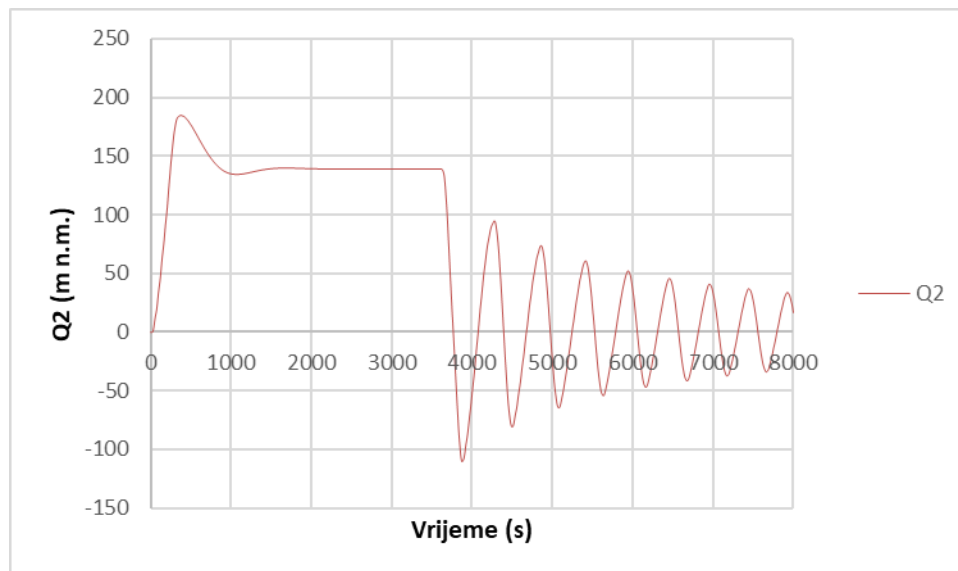
Slika 124 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1



Slika 125 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1

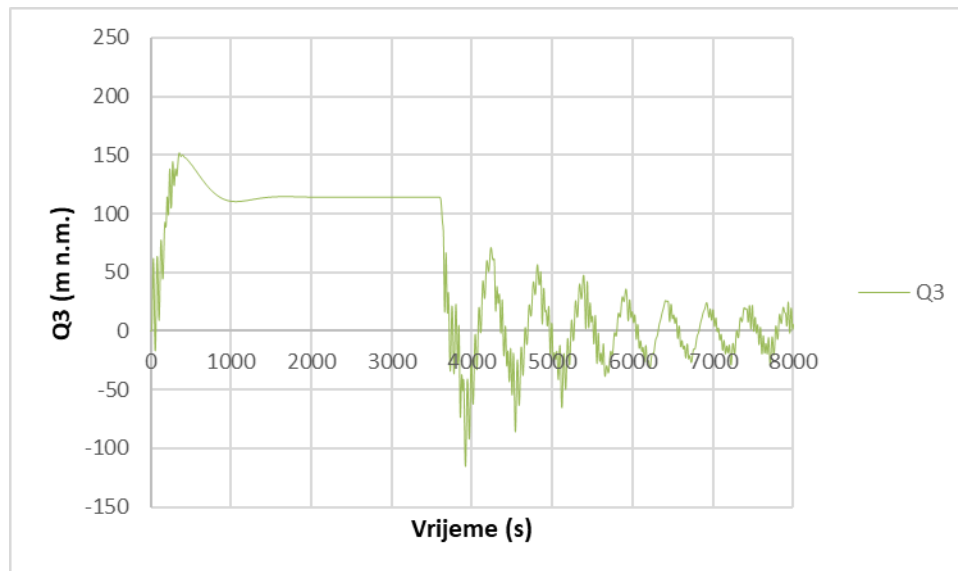


Slika 126 Protok Q1 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1

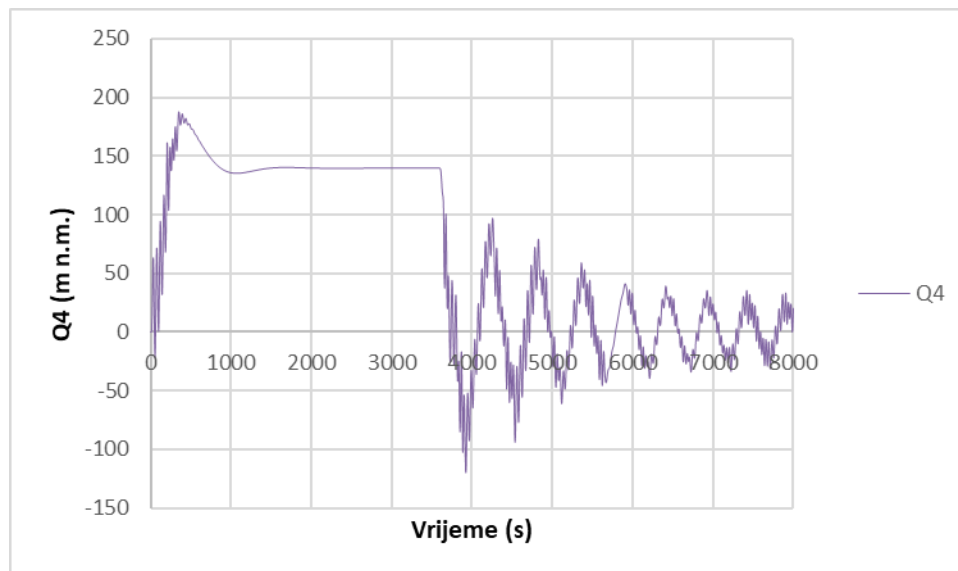


Slika 127 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1

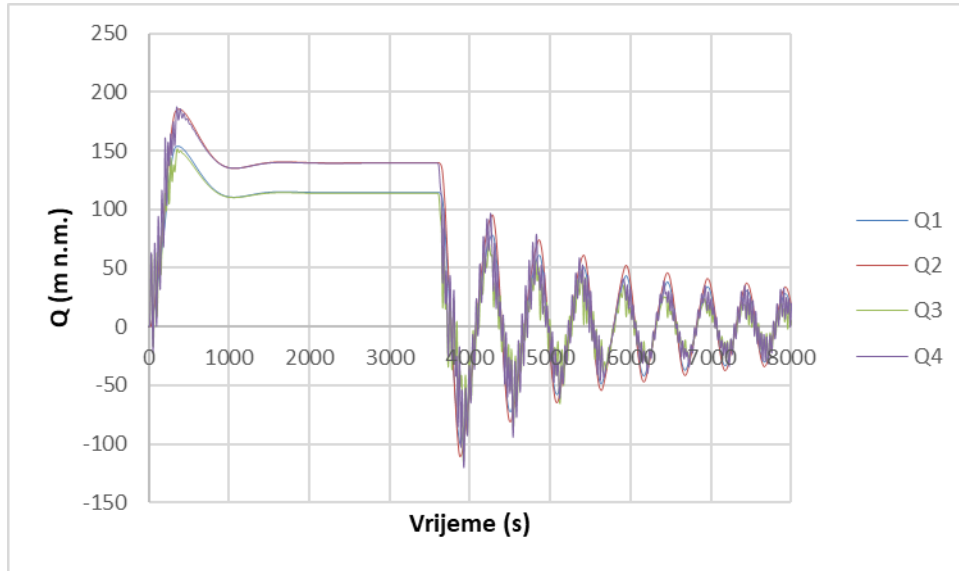




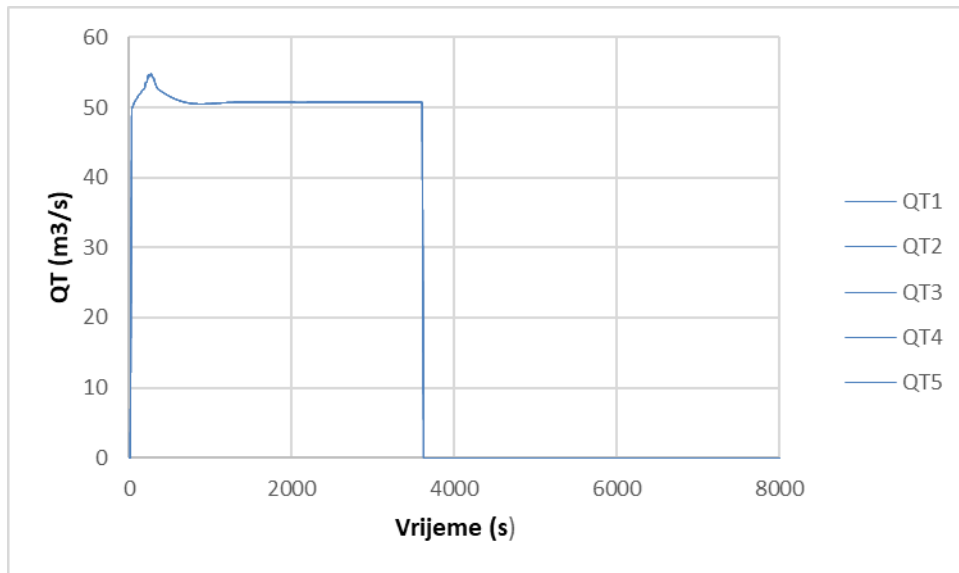
Slika 128 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1



Slika 129 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1



Slika 130 Protoci u dovodnim tunnelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1



Slika 131 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.1

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 6.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
306,35	306,85	305,73	-100,29	-110,53	-115,47	-119,63

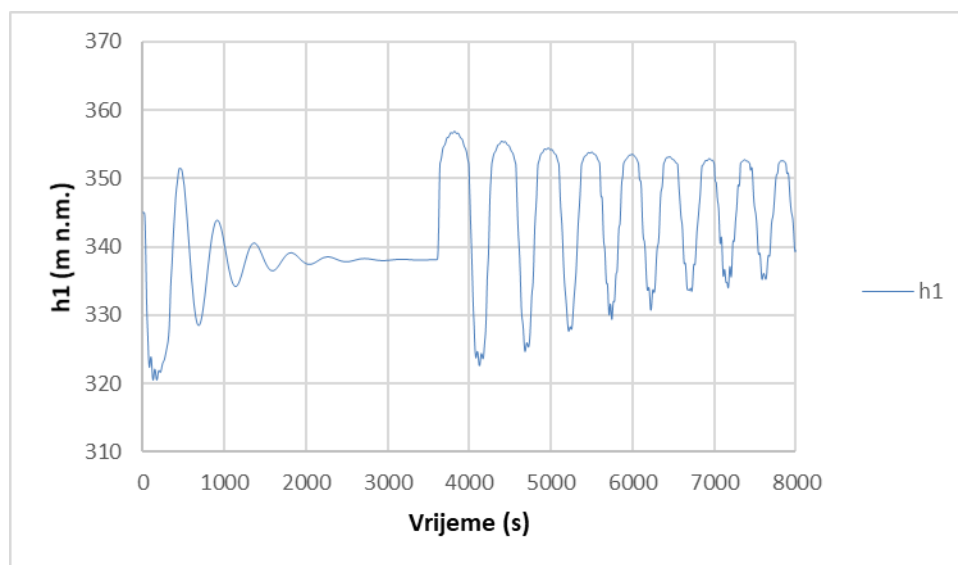
Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 315,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 305,73$  (m n.m.) za 9,67 (m) manja od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 6.1:

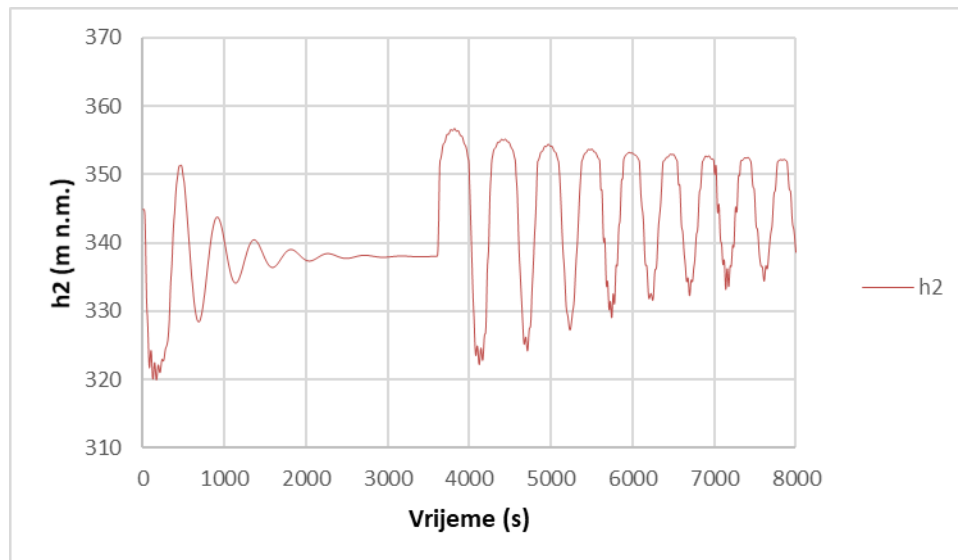
h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
353,67	353,64	355,57	153,53	185,18	151,83	187,46

#### 4.6.2. VARIJANTA 6.2 – $h_a = 345$ (m n. m.)

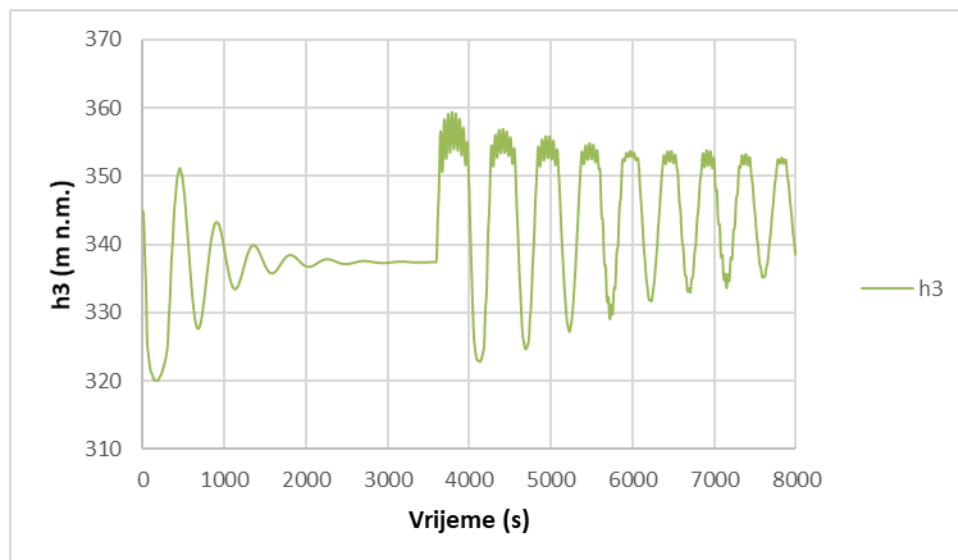
Vodostaj u akumulaciji je maksimalan i vrijednost mu je  $h_a = 345$  (m n.m.).



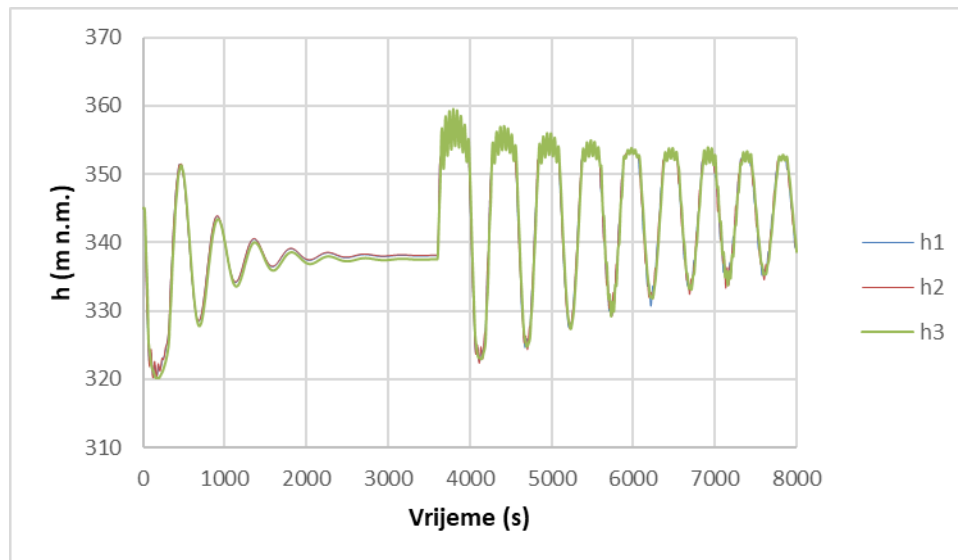
Slika 132 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



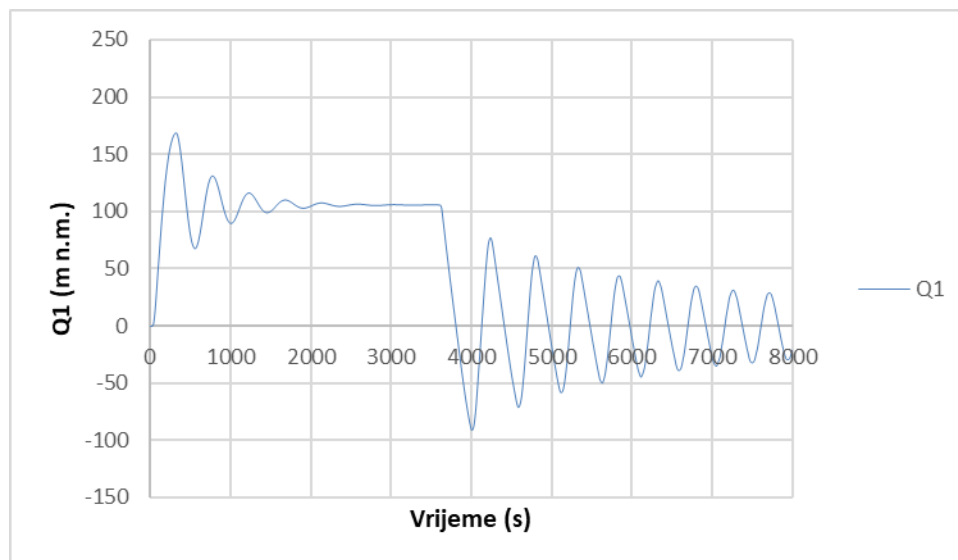
Slika 133 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



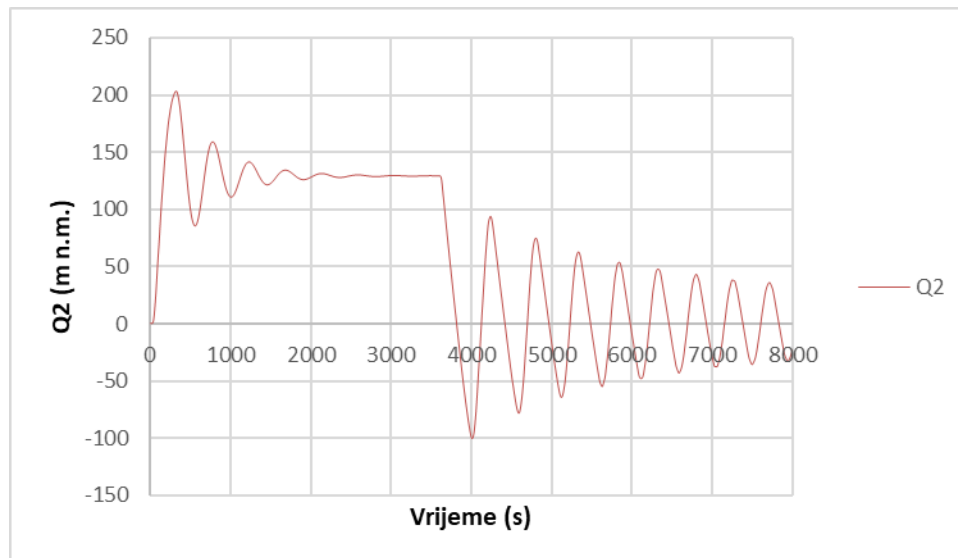
Slika 134 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



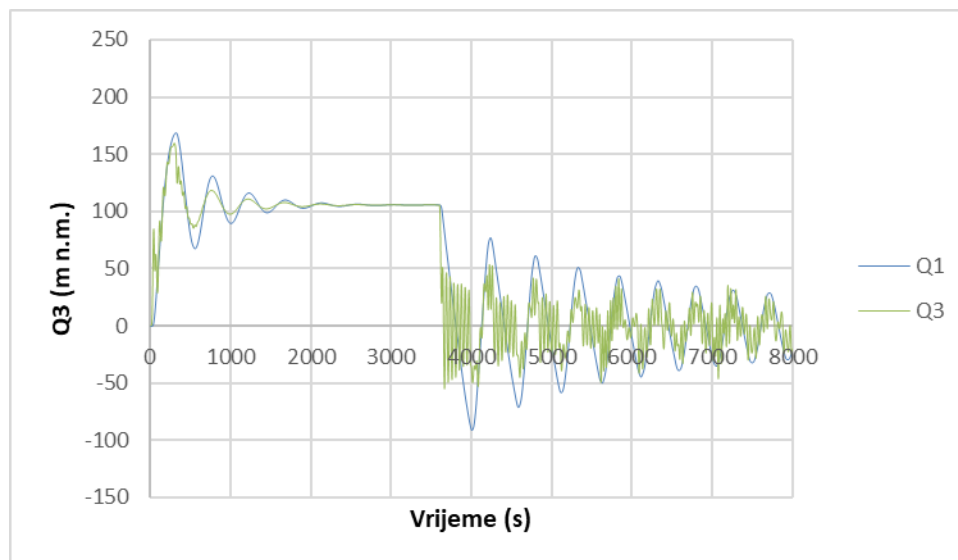
Slika 135 Vodostaji u vodnim kjomorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



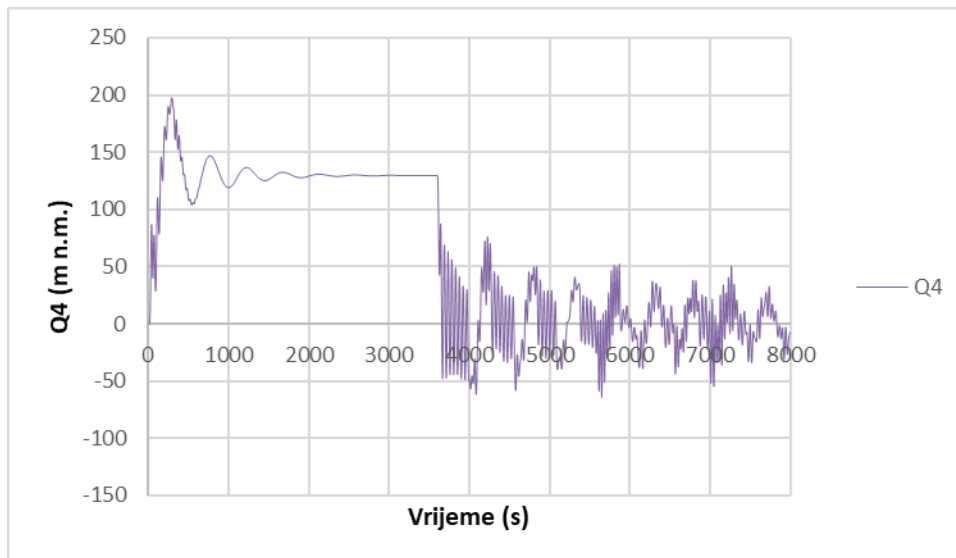
Slika 136 Protok  $Q1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



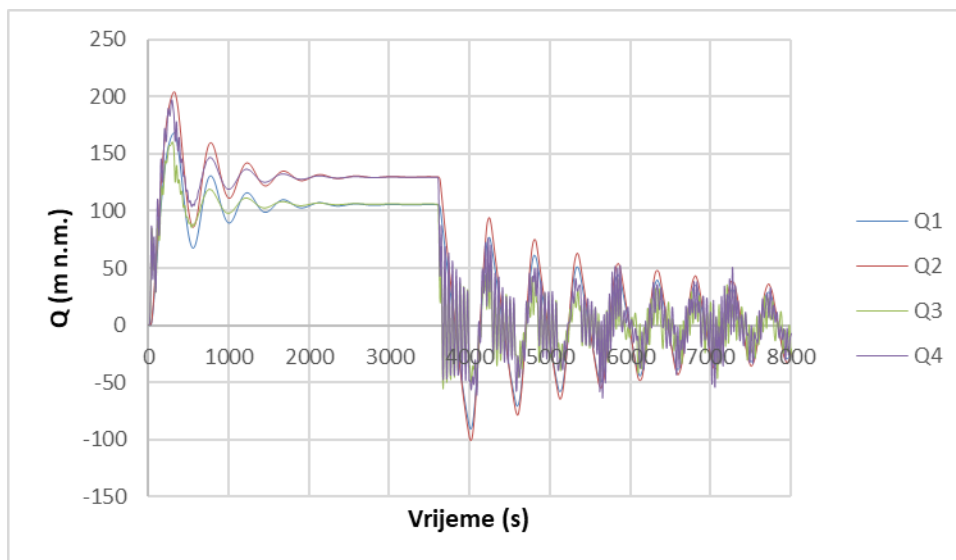
Slika 137 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



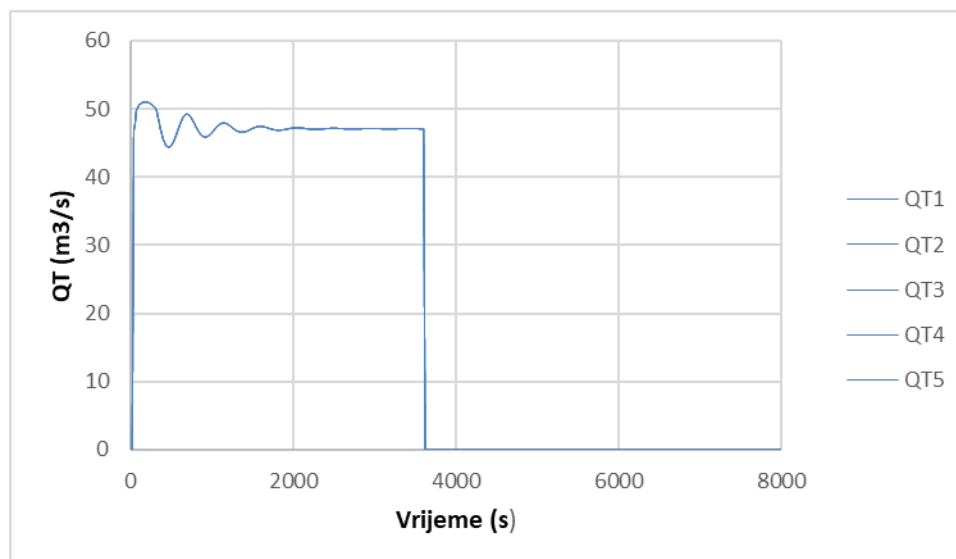
Slika 138 Protoci Q1 i Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



Slika 139 Protok  $Q_4$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



Slika 140 Protoci u dovodnim tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2



Slika 141 protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 6.2

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 6.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
320,48	320,04	320,13	-90,86	-100,91	-55,55	-64,33

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h=315,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h=320,13$  (m n.m.) za 4,73 (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri maksimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 6.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
356,85	356,83	359,48	168,76	203,64	160,08	197,33



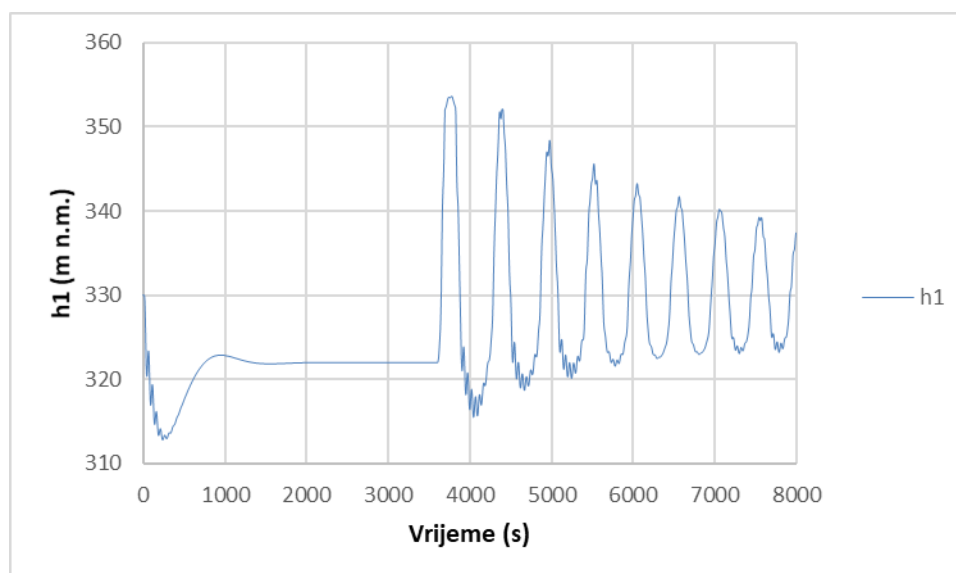
## 4.7. VARIJANTA 7

Vodna komora ima duljinu proširenja  $L=110,0$  (m) i  $D = 10,0$  (m). Produbljenje iznosi 7 (m).

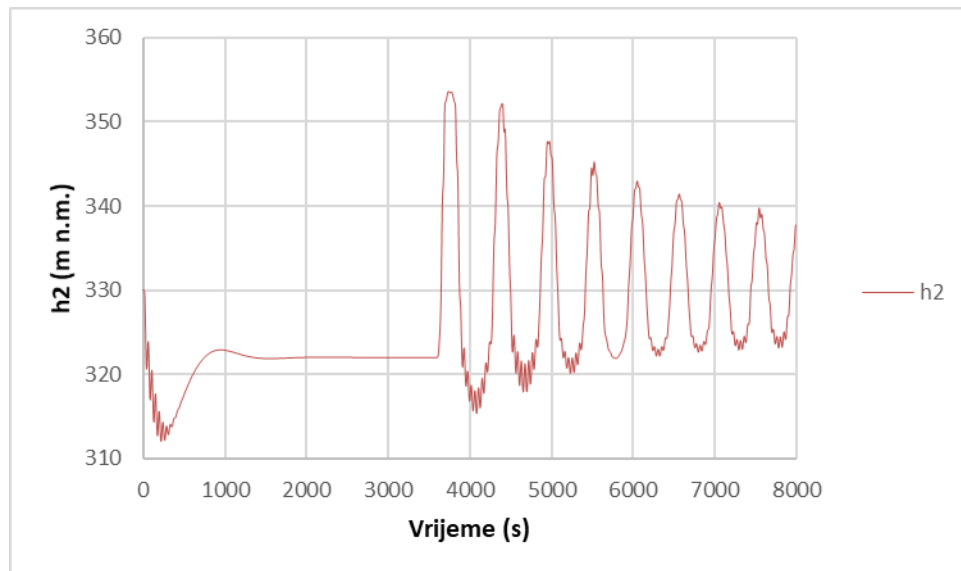
Sve turbine se uključuju u desetoj sekundi (od 10. do 30. sekunde) i isključuju se nakon sat vremena.

### 4.7.1. VARIJANTA 7.1 – $h_a = 330$ (m n. m.)

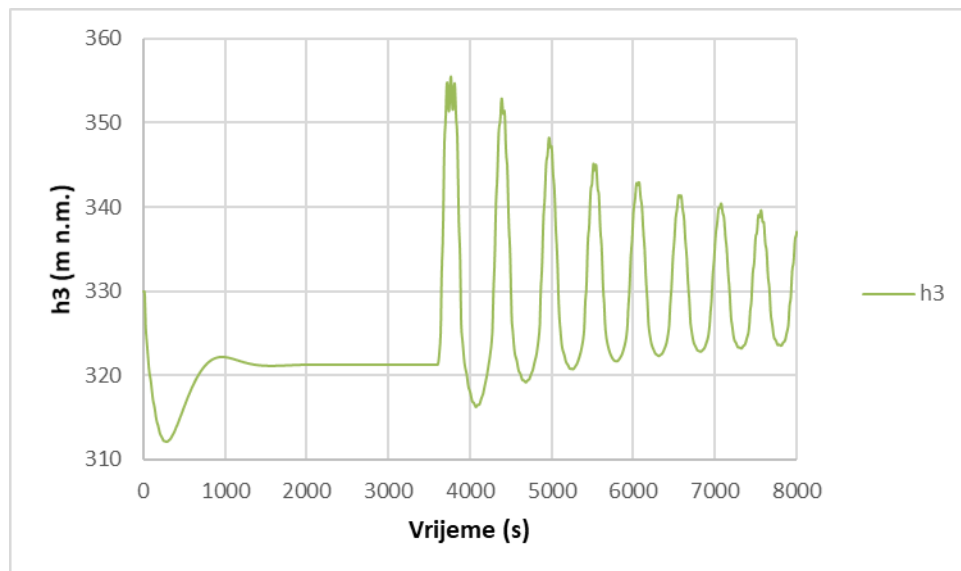
Vodostaj u akumulaciji je minimalan i vrijednost mu je  $h_a = 330$  (m n.m.).



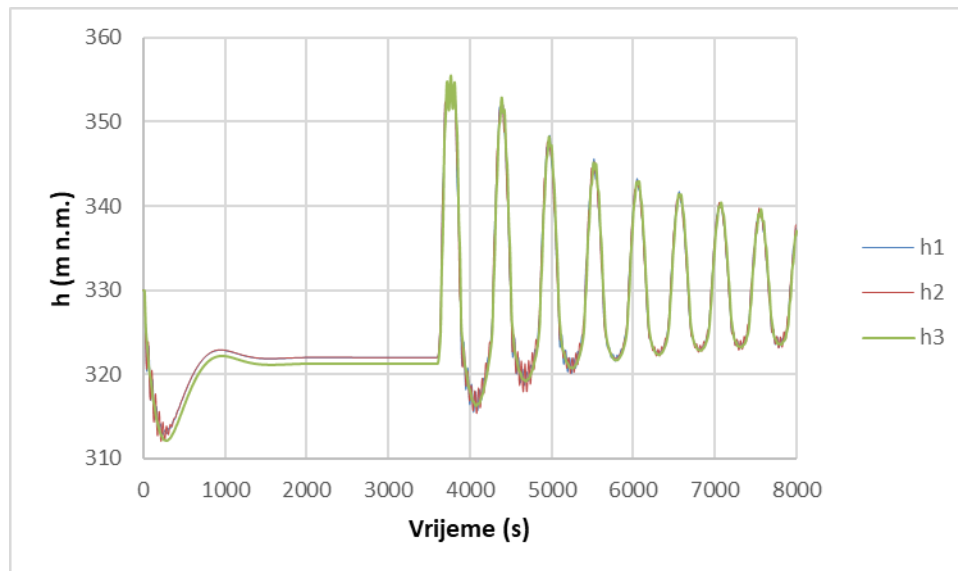
Slika 142 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



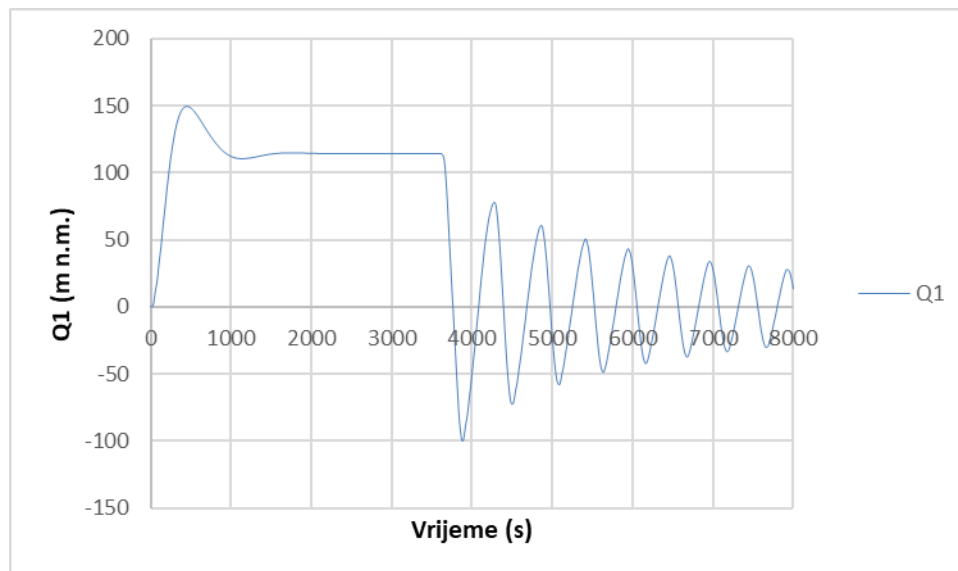
Slika 143 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



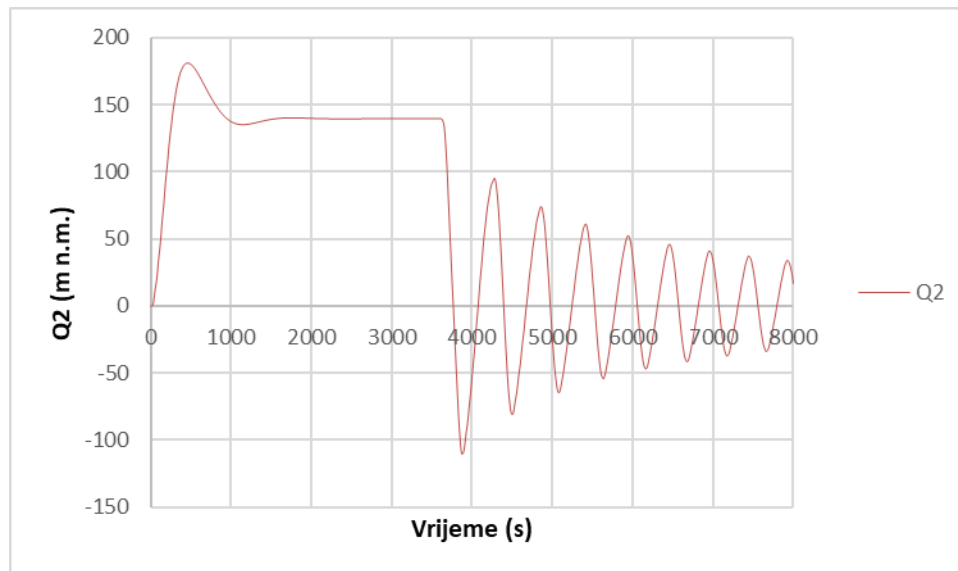
Slika 144 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



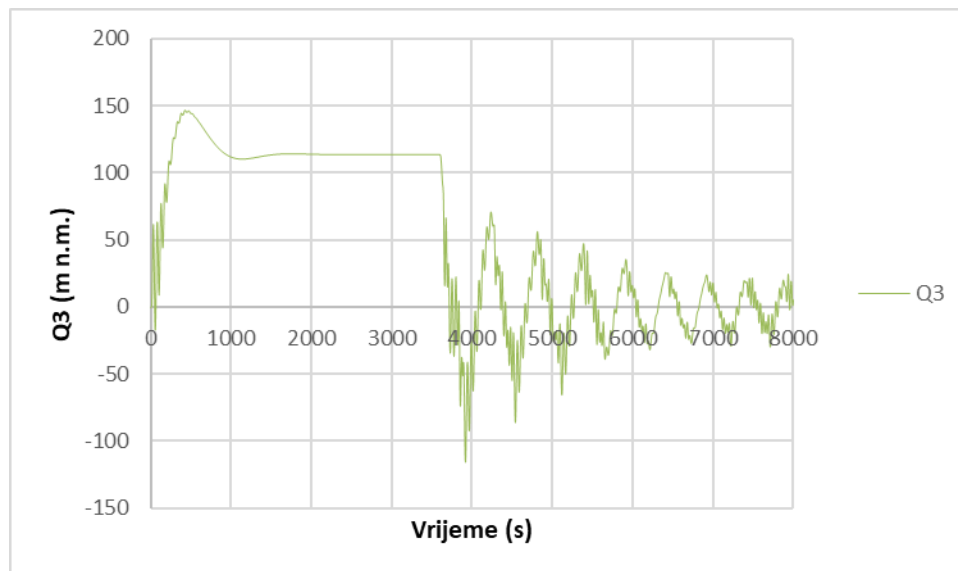
Slika 145 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



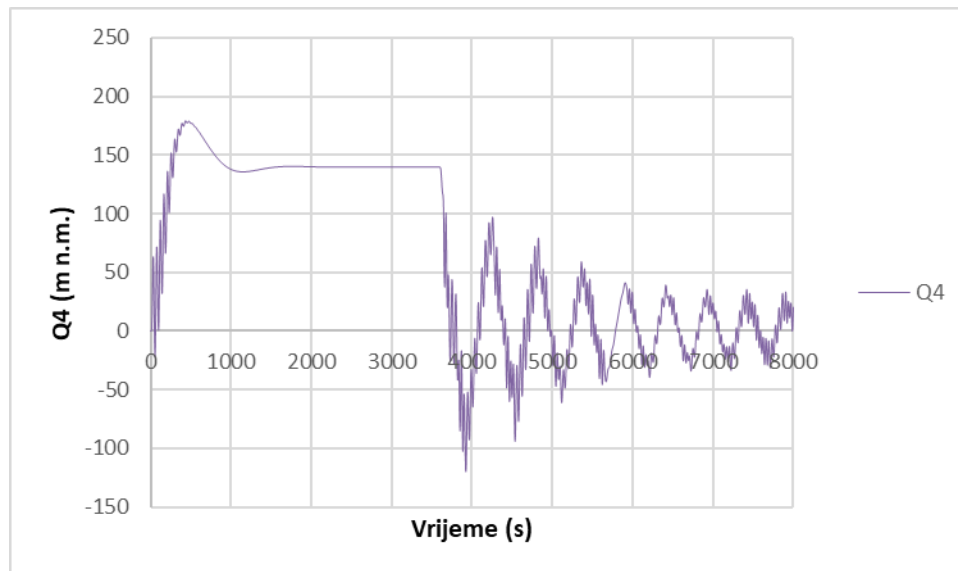
Slika 146 Protok  $Q_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



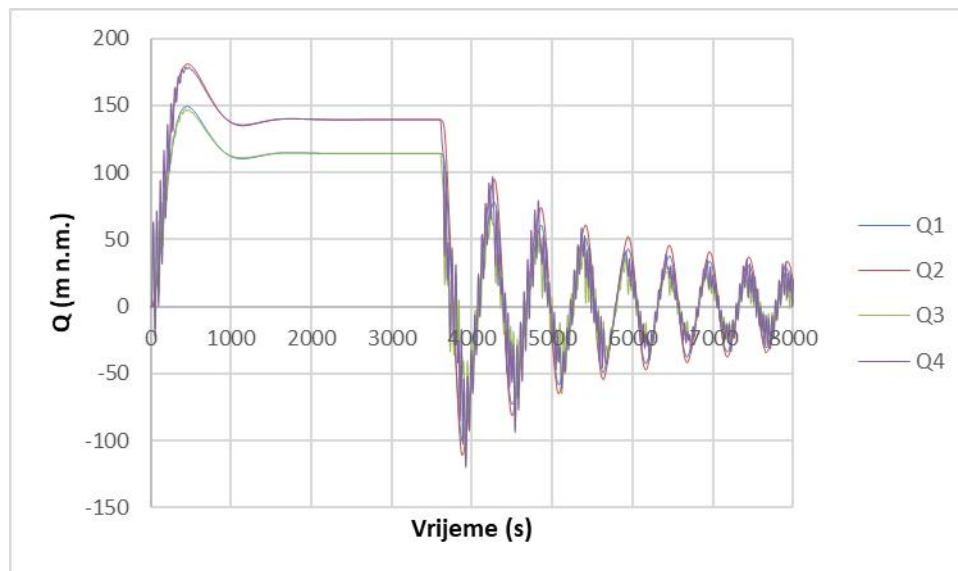
Slika 147 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



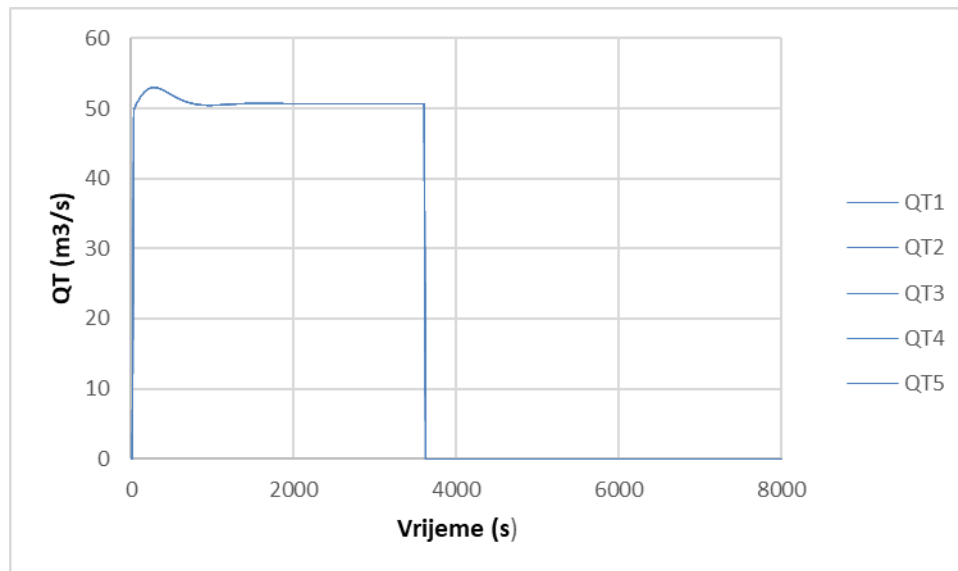
Slika 148 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



Slika 149 Protok  $Q_4$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



Slika 150 Protoci u dovodnim tunelima 1, 2, 3 i 4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1



Slika 151 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.1

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 7.1:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
312,77	312,02	312,48	-100,28	-110,52	-115,51	-119,58

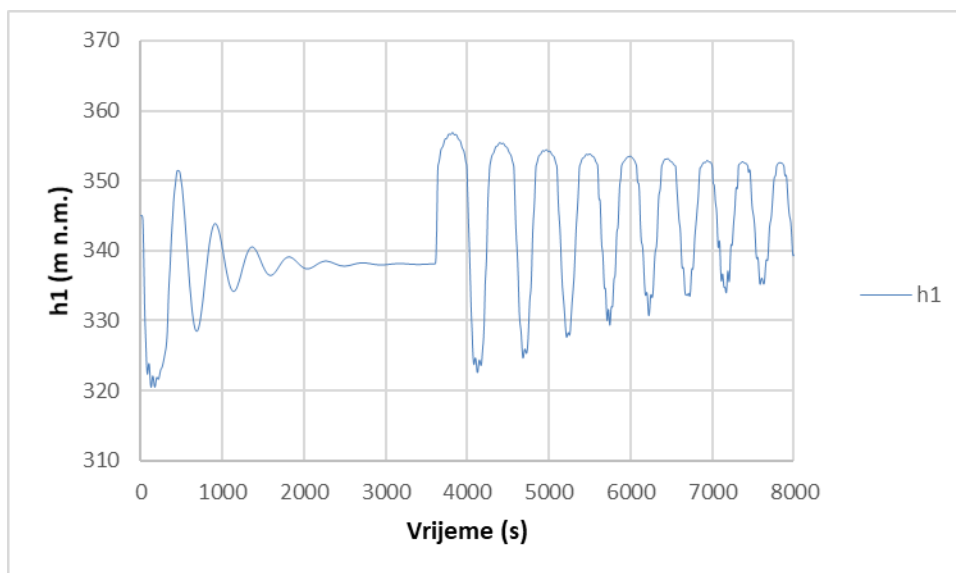
Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h = 312,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h = 312,48$  (m n.m.) za 0,08 (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 7.1:

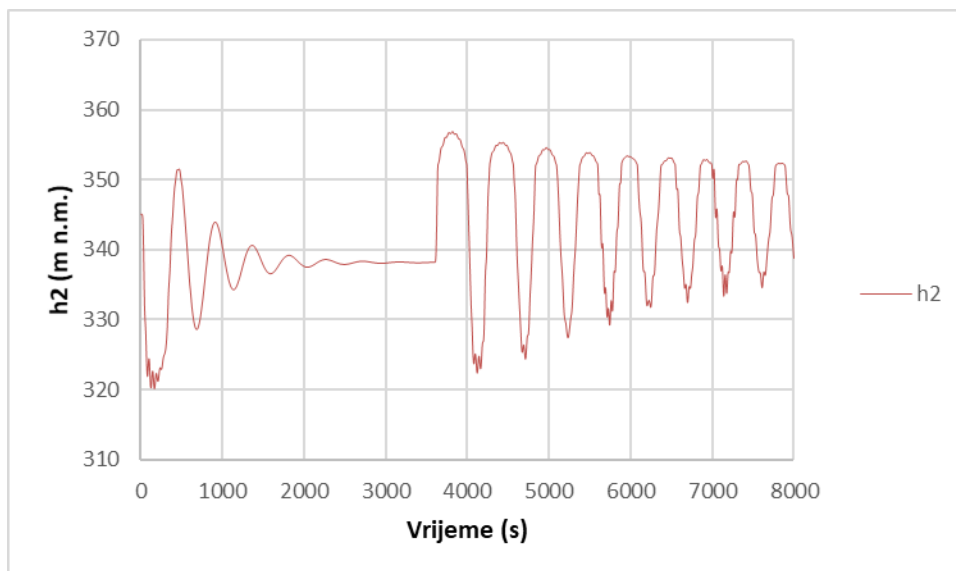
h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
353,66	353,63	355,56	149,31	180,97	147,13	178,83

4.7.2. VARIJANTA 7.2 –  $h_a = 345$  (m n. m.)

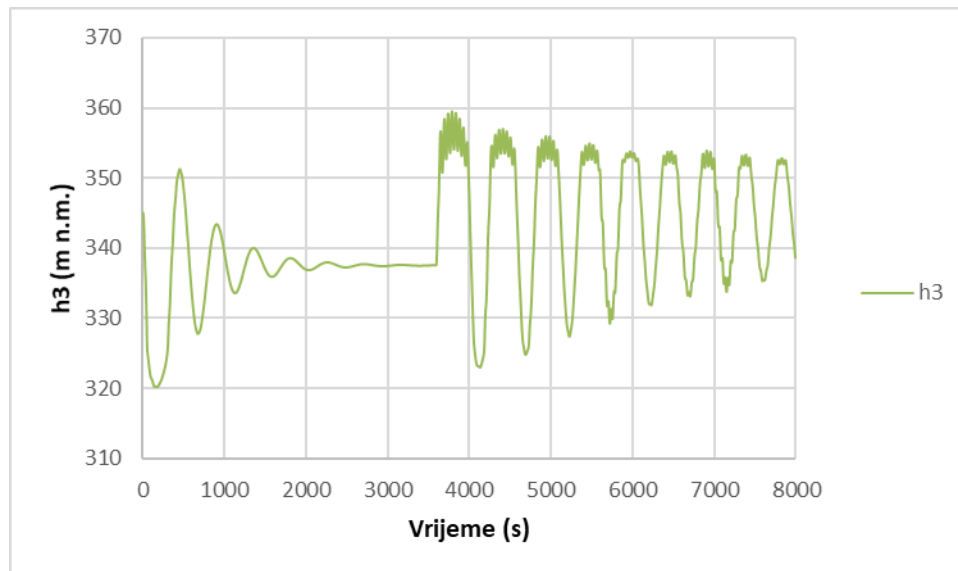
Vodostaj u akumulaciji je maksimalan i vrijednost mu je  $h_a = 345$  (m n.m.).



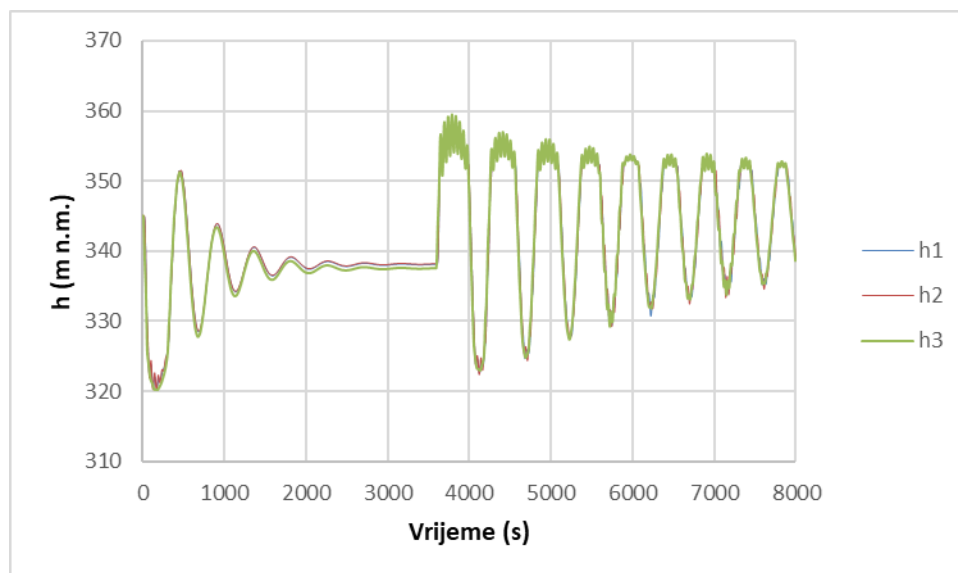
Slika 152 Vodostaj  $h_1$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2



Slika 153 Vodostaj  $h_2$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2

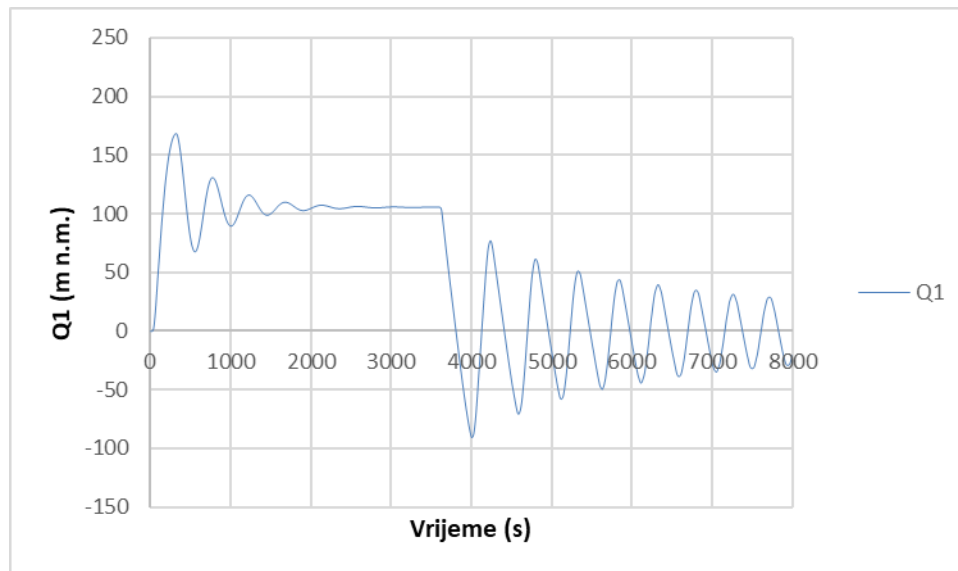


Slika 154 Vodostaj  $h_3$  u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2

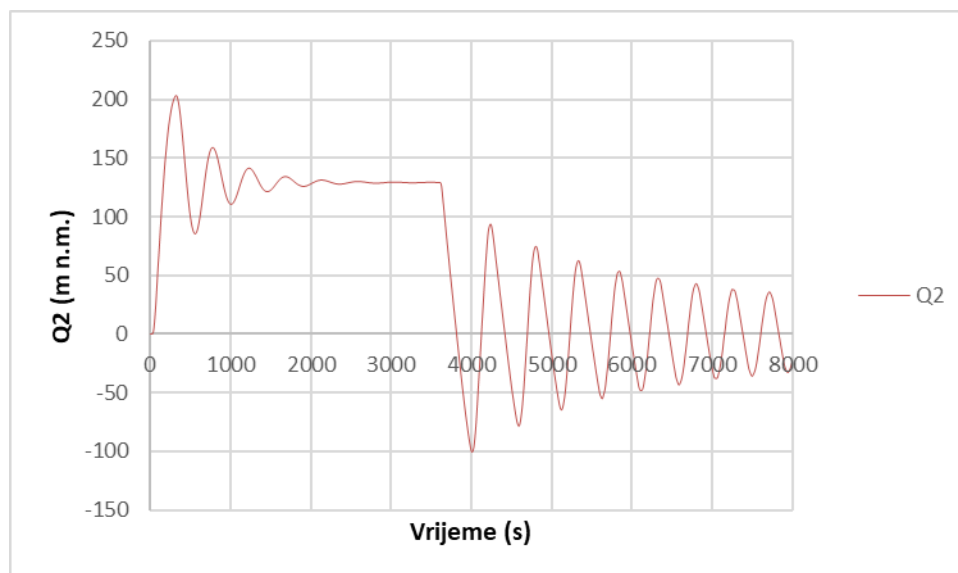


Slika 155 Vodostaji u vodnim komorama 1, 2 i 3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2

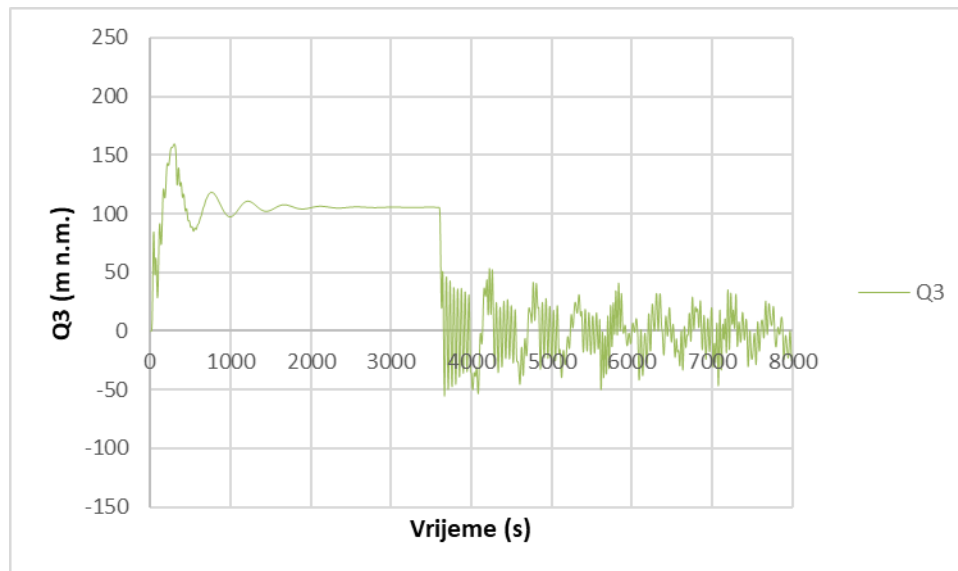




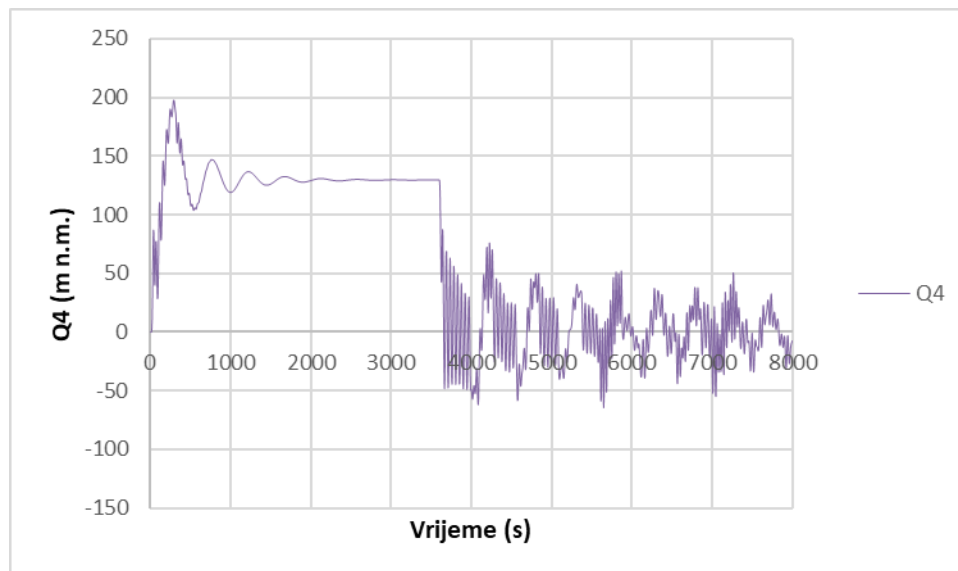
Slika 156 Protok Q1 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2



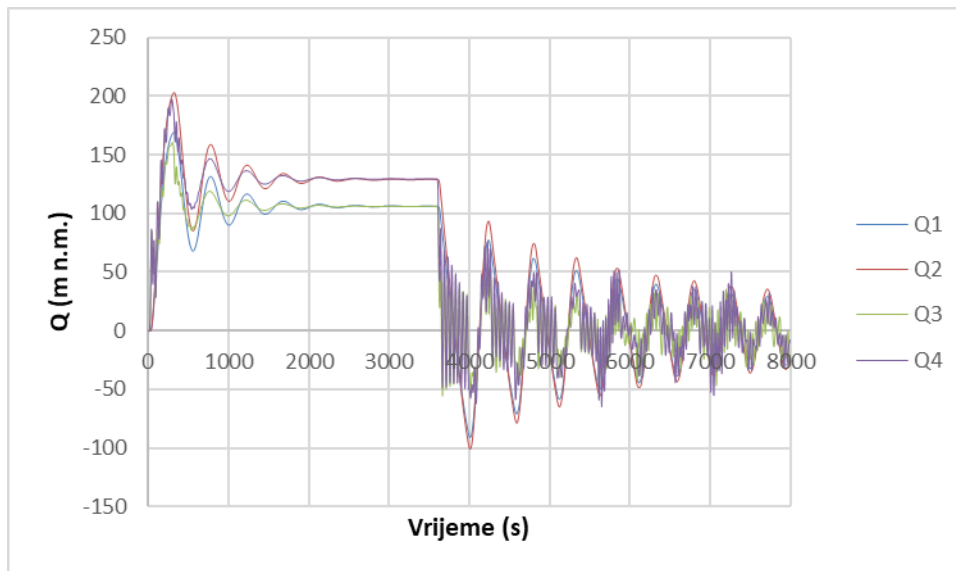
Slika 157 Protok Q2 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2



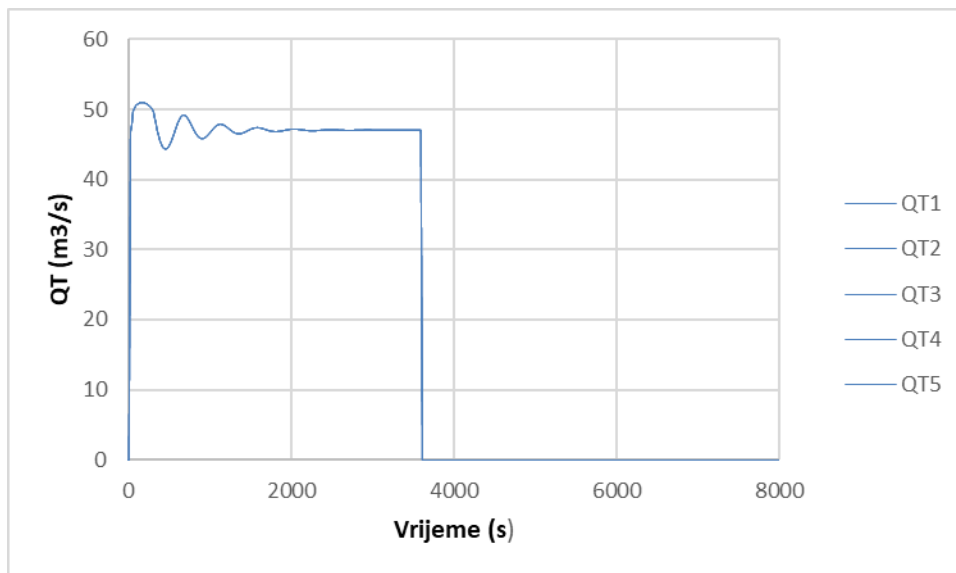
Slika 158 Protok Q3 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2



Slika 159 Protok Q4 u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2



Slika 160 Protoci u dovodnim tunnelima u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2



Slika 161 Protoci prema turbinama u ovisnosti o vremenu za Varijantu 7.2

Prikaz minimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 7.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
320,48	320,04	320,13	-90,86	-100,91	-55,55	-64,33

Najniža kota u komori 3 koja mora biti ostvarena kako bi sustav funkcionirao iznosi  $h= 312,40$  (m n.m.), dok je najniža postignuta u ovoj varijanti  $h=320,13$  (m n.m.) za 7,73 (m) veća od minimalne dozvoljene.

Prikaz maksimalnih vrijednosti vodostaja  $h$  (m n.m.) i protoka  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pri minimalnom vodostaju u akumulaciji za Varijantu 7.2:

h1	h2	h3	Q1	Q2	Q3	Q4
356,85	356,83	359,48	168,76	203,64	160,08	197,33

## 5. RASPRAVA

Varijanta 1 vodne komore s donjim proširenjem duljine  $L=50,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m) pri uključivanju svih turbina u isto vrijeme (od 10. do 30. sekunde) ne zadovoljava uvjet da je minimalna razina vode u vodnoj komori ( $h=294,793$  (m n.m.)), kod ulaska sustava u turbinski pogon pri minimalnom vodostaju akumulacije ( $h=330,0$  (m n.m.)), veća od minimalno dozvoljene ( $h=322,04$  (m n.m.)), to jest za približno 1.0 (m) iznad donjeg ruba donjeg proširenja vodne komore. Minimalna razina u komori nakon isključivanja turbina iz pogona iznosi  $h=311,292$  (m n.m.). Maksimalna razina vode u komori 1 pri isključivanju turbina iz pogona i maksimalnoj razini vode u akumulaciji iznosi  $h=356,852$  (m n.m.) dok u komori 2 pri istim uvjetima iznosi  $h=356,827$  (m n.m.).

Nakon povećanja duljine donjeg proširenja varijanta 2 predstavlja vodnu komoru s donjim proširenjem duljine  $L=110,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m) koja pri uključivanju svih turbina u isto vrijeme (od 10. do 30. sekunde) ne zadovoljava uvjet da je minimalna razina vode u vodnoj komori ( $h=286,731$  (m n.m.)), kod ulaska sustava u turbinski pogon pri minimalnom vodostaju akumulacije ( $h=330,0$  (m n.m.)), veća od minimalno dozvoljene ( $h=319,40$  (m n.m.)). Minimalna razina u komori nakon isključivanja turbina iz pogona iznosi  $h=299,097$  (m n.m.). Maksimalna razina vode u komori 1 pri isključivanju turbina iz pogona i maksimalnoj razini vode u akumulaciji iznosi  $h=356,846$  (m n.m.) dok u komori 2 pri istim uvjetima iznosi  $h=356,829$  (m n.m.).

Varijanta 3 je vodna komora s donjim proširenjem duljine  $L=110,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m). Poprečni presjek donjeg proširenja vodne komore se sastoji od od pravokutnog dijela visine  $H=1,0$  (m) i širine  $2R=10,0$  (m) te polukruga promjera  $R=5,0$  (m). Turbine se uključuju postupno tako da se u desetoj sekundi uključe dvije, sljedeće dvije nakon 10 minuta te jedna preostala nakon 20 minuta. Vodostaj pri uključivanja turbina u pogon ne pada ispod minimalno dozvoljenog ( $h=318,40$  (m n.m.)) i iznosi  $h=321,688$  (m n.m.). Minimalna razina u komori nakon isključivanja turbina iz pogona iznosi  $h=318,817$  (m n.m.). Maksimalna razina vode u komori 1 pri isključivanju turbina iz pogona i maksimalnoj razini vode u akumulaciji iznosi  $h=356,843$  (m n.m.) dok u komori 2 pri istim uvjetima iznosi  $h=356,854$  (m n.m.). Zaključak je da ova varijanta izbora vodne komore zadovoljava način uključivanja turbina u pogon iz Varijante 3.

Varijanta 4 je vodna komora s donjim proširenjem duljine  $L=110,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m). Poprečni presjek donjeg proširenja vodne komore sastoji se od pravokutnog dijela visine  $H=2,0$  (m) i širine  $2R=10,0$  (m) te polukruga promjera  $R=5,0$  (m). Nakon postupnog uključivanja turbina u pogon to jest uključivanja jedne po jedne turbine u pogon nakon svakih 10 minuta vodostaj ne pada ispod minimalno dozvoljenog ( $h=317,40$  (m n.m.)) i iznosi  $h=324,341$  (m n.m.). Minimalna razina u komori nakon isključivanja turbina iz pogona iznosi  $h=318,167$  (m n.m.). Maksimalna razina vode u komori 1 pri isključivanju turbina iz pogona i maksimalnoj

razini vode u akumulaciji iznosi  $h=356,870$  (m n.m.) dok u komori 2 pri istim uvjetima iznosi  $h=356,860$  (m n.m.). Zaključak je da ova varijanta izbora vodne komore zadovoljava način uključivanja turbina u pogon iz Varijante 4.

Varijanta 5 je vodna komora s donjim proširenjem duljine  $L=110,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m). Poprečni presjek donjeg proširenja vodne komore sastoji se od pravokutnog dijela visine  $H=3,0$  (m) i širine  $2R=10,0$  (m) te polukruga promjera  $R=5,0$  (m). Turbine se uključuju u pogon postupno na način da se u desetoj sekundi uključe dvije i nakon 30 minuta preostale tri. Pri uključivanju turbina u pogon minimalna razina vode ( $h=316,40$  (m n.m.)) je zadovoljena i iznosi  $h=321,680$  (m n.m.). Minimalna razina u komori nakon isključivanja turbina iz pogona iznosi  $h=316,508$  (m n.m.). Maksimalna razina vode u komori 1 pri isključivanju turbina iz pogona i maksimalnoj razini vode u akumulaciji iznosi  $h=356,852$  (m n.m.) dok u komori 2 pri istim uvjetima iznosi  $h=356,827$  (m n.m.). Zaključak je da ova varijanta izbora vodne komore zadovoljava način uključivanja turbina u pogon iz Varijante 5.

Niti jedna od prethodno navedenih varijanti vodne komore ne zadovoljava potrebne uvjete pri uključivanju svih turbina u pogon u isto vrijeme. Daljnjim povećanjem vrijednosti  $H$  u poprečnom presjeku donjeg proširenja vodne komore vodostaj teži minimalno potrebnom kako bi sustav funkcionirao.

Varijanta 6 je vodna komora s donjim proširenjem duljine  $L=110,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m). Poprečni presjek donjeg proširenja vodne komore sastoji se od pravokutnog dijela visine  $H=4,0$  (m) i širine  $2R=10,0$  (m) i polukruga promjera  $R=5,0$  (m). Turbine se uključuju u pogon u isto vrijeme u desetoj sekundi i potrebna minimalna kota vodostaja ( $h=315,40$  (m n.m.)) nije zadovoljena, a njena vrijednost je  $h=305,727$  (m n.m.). Minimalna razina u komori nakon isključivanja turbina iz pogona iznosi  $h=316,267$  (m n.m.). Maksimalna razina vode u komori 1 pri isključivanju turbina iz pogona i maksimalnoj razini vode u akumulaciji iznosi  $h=356,852$  (m n.m.) dok u komori 2 pri istim uvjetima iznosi  $h=356,827$  (m n.m.). Zaključak je da ova varijanta izbora vodne komore ne zadovoljava način uključivanja turbina u pogon iz Varijante 6.

Varijante u kojima je  $H=5,0$  (m) i  $H=6,0$  (m) također ne zadovoljavaju minimalne kote pri uključivanju i ispadanju turbina iz pogona.

Varijanta 7 je vodna komora s donjim proširenjem duljine  $L=110,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m). Poprečni presjek donjeg proširenja vodne komore se sastoji od pravokutnog dijela visine  $H=7,0$  (m) i širine  $2R=10,0$  (m) te polukruga promjera  $R=5,0$  (m). Turbine se uključuju u pogon u isto vrijeme u desetoj sekundi i isključuju se nakon 60 minuta. U ovoj varijanti je zadovoljena minimalna kota vode ( $h=312,40$  (m n.m.)) te njena vrijednost iznosi  $h=312,484$  (m n.m.). Minimalna razina u komori nakon isključivanja turbina iz pogona iznosi  $h=316,264$  (m n.m.). Maksimalna razina vode u komori 1 pri isključivanju turbina iz pogona i maksimalnoj razini vode u akumulaciji iznosi  $h=356,852$  (m n.m.) dok u komori 2 pri istim uvjetima iznosi  $h=356,827$  (m n.m.). Zaključak je da ova varijanta izbora vodne komore zadovoljava način uključivanja turbina u pogon iz Varijante 7.

## 6. PROGRAMSKO RJEŠENJE U FORTRANU 95

```
PROGRAM DIPLOMSKI
COMMON /S1/ L1,D1,EPSI1,KSIU1,L2,D2,EPSI2,KSIU2
COMMON /S2/ L3,D3,EPSI3,KSIU3,L4,D4,EPSI4,KSIU4
COMMON /S3/ NDV,HDV(100),QDV(100)
COMMON /S4/ NK1,HK1(100),AK1(100),NK2,HK2(100),AK2(100)
COMMON /S5/ NK3,HK3(100),AK3(100)
COMMON /SNAGA1/ NNT1,TT1(100),XNT1(100),NNT2,TT2(100),XNT2(100)
COMMON /SNAGA2/ NNT3,TT3(100),XNT3(100),NNT4,TT4(100),XNT4(100)
COMMON /SNAGA3/ NNT5,TT5(100),XNT5(100)
COMMON /S6/ DT,NDT,THETA

REAL L1,L2,L3,L4,KSIU1,KSIU2,KSIU3,KSIU4

IUL=5
IZL=6
CALL OPEN(IUL,IZL)
CALL CITA(IUL,HA,H11,H21,H31,Q11,Q21,Q31,Q41,QT11,QT21,QT31,QT41,QT51,NPIS)
IBR=0
WRITE(IZL,300) T1,H11,H21,H31,Q11,Q21,Q31,Q41,QT11,QT21,QT31,QT41,QT51,IBR
WRITE(IZL,300*) T1,H11,H21,H31,Q11,Q21,Q31,Q41,QT11,QT21,QT31,QT41,QT51,IBR
300 FORMAT(F7.0,3F8.3,4F10.3,5F10.3,I5)

T1=0.0
DO 100 I=1,NDT
WRITE(*,30) I
30 FORMAT(I6)
T2=T1+DT
CALL SIMUL(T2,HA,H11,H21,H31,Q11,Q21,Q31,Q41,QT11,QT21,QT31,QT41,QT51,&
H12,H22,H32,Q12,Q22,Q32,Q42,QT12,QT22,QT32,QT42,QT52,IBR)
WRITE(*,30) I

! ZAPISIVANJE SVAKOG NPIS STANJA
IR=I/NPIS
XR=FLOAT(I)/FLOAT(NPIS)
RIR=FLOAT(IR)
IF(XR.EQ.RIR) WRITE(IZL,300) T2,H12,H22,H32,Q12,Q22,Q32,Q42,QT12,QT22,QT32,QT42,QT52,IBR
IF(I.EQ.NDT) WRITE(IZL,300) T2,H12,H22,H32,Q12,Q22,Q32,Q42,QT12,QT22,QT32,QT42,QT52,IBR

T1=T2
H11=H12
H21=H22
H31=H32
Q11=Q12
Q21=Q22
Q31=Q32
Q41=Q42
```

QT11=QT12  
QT21=QT22  
QT31=QT32  
QT41=QT42  
QT51=QT52

100 CONTINUE

STOP  
END

SUBROUTINE OPEN(IUL,IZL)

CHARACTER\*20 IME

WRITE(\*,1)

1 FORMAT(' UPISI IME ULAZNE DATOTEKE')

READ(\*,2) IME

2 FORMAT(A)

OPEN(UNIT=IUL,FILE=IME,STATUS='OLD')

WRITE(\*,5) IME

5 FORMAT(' OTVORENA ULAZNA DATOTEKA ',A)

WRITE(\*,3)

3 FORMAT(' UPISI IME IZLAZNE DATOTEKE')

READ(\*,2) IME

OPEN(UNIT=IZL,FILE=IME,STATUS='REPLACE')

WRITE(\*,6) IME

6 FORMAT(' OTVORENA IZLAZNA DATOTEKA ',A)

RETURN

END

SUBROUTINE SIMUL(T2,HA,H11,H21,H31,Q11,Q21,Q31,Q41,QT11,QT21,QT31,QT41,QT51,&  
H12,H22,H32,Q12,Q22,Q32,Q42,QT12,QT22,QT32,QT42,QT52,IBR)

COMMON /S1/ L1,D1,EPSI1,KSIU1,L2,D2,EPSI2,KSIU2

COMMON /S2/ L3,D3,EPSI3,KSIU3,L4,D4,EPSI4,KSIU4

COMMON /S3/ NDV,HDV(100),QDV(100)

COMMON /S4/ NK1,HK1(100),AK1(100),NK2,HK2(100),AK2(100)

COMMON /S5/ NK3,HK3(100),AK3(100)

COMMON /SNAGA1/ NNT1,TT1(100),XNT1(100),NNT2,TT2(100),XNT2(100)

COMMON /SNAGA2/ NNT3,TT3(100),XNT3(100),NNT4,TT4(100),XNT4(100)

COMMON /SNAGA3/ NNT5,TT5(100),XNT5(100)

COMMON /S6/ DT,NDT,THETA

DIMENSION FF(12,12),F(12)

REAL L1,L2,L3,L4,KSIU1,KSIU2,KSIU3,KSIU4

REAL NI

TOC=0.0001

ALFA=1.1

PI=3.141592



NI=0.00000131  
RO=1000.0  
ETA=0.85  
B1=9.5  
B2=B1  
Z1=352.0  
Z2=Z1

AD1=D1\*\*2.\*PI/4.  
AD2=D2\*\*2.\*PI/4.  
AD3=D3\*\*2.\*PI/4.  
AD4=D4\*\*2.\*PI/4.

H12=H11  
H22=H21  
H32=H31  
Q12=Q11  
Q22=Q21  
Q32=Q31  
Q42=Q41  
QT12=QT11  
QT22=QT21  
QT32=QT31  
QT42=QT41  
QT52=QT51

A11=BH(NK1, HK1, AK1, H11)  
A21=BH(NK2, HK2, AK2, H21)  
A31=BH(NK3, HK3, AK3, H31)  
IBR=0

100 CONTINUE

IBR=IBR+1

QD2=QT12+QT22+QT32+QT42+QT52  
IF(QD2.LT.0.0) QD2=0.0  
IF(QD2.GT.500.0) QD2=500.0  
HD2=BH(NDV, QDV, HDV, QD2)

A12=BH(NK1, HK1, AK1, H12)  
A22=BH(NK2, HK2, AK2, H22)  
A32=BH(NK3, HK3, AK3, H32)

F(1)=H12-H11-(1.-THETA)\*DT\*(Q11-Q31)/A11-THETA\*DT\*(Q12-Q32)/A12  
FF(1,1)=1.0  
FF(1,2)=0.0  
FF(1,3)=0.0  
FF(1,4)=-THETA\*DT/A12  
FF(1,5)=0.0  
FF(1,6)=THETA\*DT/A12

FF(1,7)=0.0  
FF(1,8)=0.0  
FF(1,9)=0.0  
FF(1,10)=0.0  
FF(1,11)=0.0  
FF(1,12)=0.0

F(2)=H22-H21-(1.-THETA)\*DT\*(Q21-Q41)/A21-THETA\*DT\*(Q22-Q42)/A22

FF(2,1)=0.0  
FF(2,2)=1.0  
FF(2,3)=0.0  
FF(2,4)=0.0  
FF(2,5)=-THETA\*DT/A22  
FF(2,6)=0.0  
FF(2,7)=THETA\*DT/A22  
FF(2,8)=0.0  
FF(2,9)=0.0  
FF(2,10)=0.0  
FF(2,11)=0.0  
FF(2,12)=0.0

F(3)=H32-H31-(1.-THETA)\*DT\*(Q31+Q41-QT11-QT21-QT31-QT41-QT51)/A31-THETA\*DT\*(Q32+Q42-QT12-QT22-QT32-QT42-QT52)/A32

FF(3,1)=0.0  
FF(3,2)=0.0  
FF(3,3)=1.0  
FF(3,4)=0.0  
FF(3,5)=0.0  
FF(3,6)=-THETA\*DT/A32  
FF(3,7)=-THETA\*DT/A32  
FF(3,8)=THETA\*DT/A32  
FF(3,9)=THETA\*DT/A32  
FF(3,10)=THETA\*DT/A32  
FF(3,11)=THETA\*DT/A32  
FF(3,12)=THETA\*DT/A32

V11=Q11/AD1

RE11=V11\*D1/NI

CALL LAMBDA(D1,RE11,EPSI1,ALAM11)

V12=Q12/AD1

RE12=V12\*D1/NI

CALL LAMBDA(D1,RE12,EPSI1,ALAM12)

BETA11=1.0/(19.62\*(D1\*\*2.\*PI/4.）\*\*2.)\*(KSIU1+ALAM11\*L1/D1)

BETA12=1.0/(19.62\*(D1\*\*2.\*PI/4.）\*\*2.)\*(KSIU1+ALAM12\*L1/D1)

F(4)=Q12-Q11-(1.-THETA)\*DT\*(9.81\*AD1/L1)\*(HA-H11-BETA11\*ABS(Q11)\*Q11)-  
THETA\*DT\*(9.81\*AD1/L1)\*(HA-H12-BETA12\*ABS(Q12)\*Q12)

FF(4,1)=(THETA\*DT\*9.81\*AD1)/L1

FF(4,2)=0.0  
FF(4,3)=0.0  
FF(4,4)=1.0+2.0\*((THETA\*DT\*9.81\*AD1\*BETA12)/L1)\*Q12  
FF(4,5)=0.0  
FF(4,6)=0.0  
FF(4,7)=0.0  
FF(4,8)=0.0  
FF(4,9)=0.0  
FF(4,10)=0.0  
FF(4,11)=0.0  
FF(4,12)=0.0

V21=Q21/AD2  
RE21=V21\*D2/NI  
CALL LAMBDA(D2,RE21,EPSI2,ALAM21)  
V22=Q22/AD2  
RE22=V22\*D2/NI  
CALL LAMBDA(D2,RE22,EPSI2,ALAM22)  
BETA21=1.0/(19.62\*(D2\*\*2.\*PI/4.)\*2.)\*(KSIU2+ALAM21\*L2/D2)  
BETA22=1.0/(19.62\*(D2\*\*2.\*PI/4.)\*2.)\*(KSIU2+ALAM22\*L2/D2)

F(5)=Q22-Q21-(1.-THETA)\*DT\*(9.81\*AD2/L2)\*(HA-H21-BETA21\*ABS(Q21)\*Q21)-  
THETA\*DT\*(9.81\*AD2/L2)\*(HA-H22-BETA22\*ABS(Q22)\*Q22)

FF(5,1)=0.0  
FF(5,2)=(THETA\*DT\*9.81\*AD2)/L2  
FF(5,3)=0.0  
FF(5,4)=0.0  
FF(5,5)=1.0+2.0\*((THETA\*DT\*9.81\*AD2\*BETA22)/L2)\*Q22  
FF(5,6)=0.0  
FF(5,7)=0.0  
FF(5,8)=0.0  
FF(5,9)=0.0  
FF(5,10)=0.0  
FF(5,11)=0.0  
FF(5,12)=0.0

V31=Q31/AD3  
RE31=V31\*D3/NI  
CALL LAMBDA(D3,RE31,EPSI3,ALAM31)  
V32=Q32/AD3  
RE32=V32\*D3/NI  
CALL LAMBDA(D3,RE32,EPSI3,ALAM32)  
BETA31=1.0/(19.62\*(D3\*\*2.\*PI/4.)\*2.)\*(ALAM31\*L3/D3+ALFA)  
BETA32=1.0/(19.62\*(D3\*\*2.\*PI/4.)\*2.)\*(ALAM32\*L3/D3+ALFA)

F(6)=Q32-Q31-(1.-THETA)\*DT\*(9.81\*AD3/L3)\*(H11-H31-BETA31\*ABS(Q31)\*Q31)-  
THETA\*DT\*(9.81\*AD3/L3)\*(H12-H32-BETA32\*ABS(Q32)\*Q32)

FF(6,1)=-THETA\*DT\*9.81\*AD3/L3

FF(6,2)=0.0  
FF(6,3)=THETA\*DT\*9.81\*AD3/L3  
FF(6,4)=0.0  
FF(6,5)=0.0  
FF(6,6)=1.0+2.0\*THETA\*DT\*9.81\*AD3\*BETA32/L3\*Q32  
FF(6,7)=0.0  
FF(6,8)=0.0  
FF(6,9)=0.0  
FF(6,10)=0.0  
FF(6,11)=0.0  
FF(6,12)=0.0

V41=Q41/AD4  
RE41=V41\*D4/NI  
CALL LAMBDA(D4,RE41,EPSI4,ALAM41)  
V42=Q42/AD4  
RE42=V42\*D4/NI  
CALL LAMBDA(D4,RE42,EPSI4,ALAM42)  
BETA41=1.0/(19.62\*(D4\*\*2.\*PI/4.)\*2.)\*(ALAM41\*L4/D4+ALFA)  
BETA42=1.0/(19.62\*(D4\*\*2.\*PI/4.)\*2.)\*(ALAM42\*L4/D4+ALFA)

F(7)=Q42-Q41-(1.-THETA)\*DT\*(9.81\*AD4/L4)\*(H21-H31-BETA41\*ABS(Q41)\*Q41)-  
THETA\*DT\*(9.81\*AD4/L4)\*(H22-H32-BETA42\*ABS(Q42)\*Q42)

FF(7,1)=0.0  
FF(7,2)=-THETA\*DT\*9.81\*AD4/L4  
FF(7,3)=THETA\*DT\*9.81\*AD4/L4  
FF(7,4)=0.0  
FF(7,4)=0.0  
FF(7,6)=0.0  
FF(7,7)=1.0+2.0\*THETA\*DT\*9.81\*AD4\*BETA42/L4\*Q42  
FF(7,8)=0.0  
FF(7,9)=0.0  
FF(7,10)=0.0  
FF(7,11)=0.0  
FF(8,12)=0.0

XNT12=BH(NNT1,TT1,XNT1,T2)  
XNT22=BH(NNT2,TT2,XNT2,T2)  
XNT32=BH(NNT3,TT3,XNT3,T2)  
XNT42=BH(NNT4,TT4,XNT4,T2)  
XNT52=BH(NNT5,TT5,XNT5,T2)

F(8)=XNT12-RO\*9.81\*QT12\*(H32-HD2)\*ETA  
FF(8,1)=0.0  
FF(8,2)=0.0  
FF(8,3)=-RO\*9.81\*QT12\*ETA  
FF(8,4)=0.0  
FF(8,5)=0.0

FF(8,6)=0.0  
FF(8,7)=0.0  
FF(8,8)=-RO\*9.81\*(H32-HD2)\*ETA  
FF(8,9)=0.0  
FF(8,10)=0.0  
FF(8,11)=0.0  
FF(8,12)=0.0

F(9)=XNT22-RO\*9.81\*QT22\*(H32-HD2)\*ETA  
FF(9,1)=0.0  
FF(9,2)=0.0  
FF(9,3)=-RO\*9.81\*QT22\*ETA  
FF(9,4)=0.0  
FF(9,5)=0.0  
FF(9,6)=0.0  
FF(9,7)=0.0  
FF(9,8)=0.0  
FF(9,9)=-RO\*9.81\*(H32-HD2)\*ETA  
FF(9,10)=0.0  
FF(9,11)=0.0  
FF(9,12)=0.0

F(10)=XNT32-RO\*9.81\*QT32\*(H32-HD2)\*ETA  
FF(10,1)=0.0  
FF(10,2)=0.0  
FF(10,3)=-RO\*9.81\*QT32\*ETA  
FF(10,4)=0.0  
FF(10,5)=0.0  
FF(10,6)=0.0  
FF(10,7)=0.0  
FF(10,8)=0.0  
FF(10,9)=0.0  
FF(10,10)=-RO\*9.81\*(H32-HD2)\*ETA  
FF(10,11)=0.0  
FF(10,12)=0.0

F(11)=XNT42-RO\*9.81\*QT42\*(H32-HD2)\*ETA  
FF(11,1)=0.0  
FF(11,2)=0.0  
FF(11,3)=-RO\*9.81\*QT42\*ETA  
FF(11,4)=0.0  
FF(11,5)=0.0  
FF(11,6)=0.0  
FF(11,7)=0.0  
FF(11,8)=0.0  
FF(11,9)=0.0  
FF(11,10)=0.0  
FF(11,11)=-RO\*9.81\*(H32-HD2)\*ETA

FF(11,12)=0.0

F(12)=XNT52-RO\*9.81\*QT52\*(H32-HD2)\*ETA

FF(12,1)=0.0

FF(12,2)=0.0

FF(12,3)=-RO\*9.81\*QT52\*ETA

FF(12,4)=0.0

FF(12,5)=0.0

FF(12,6)=0.0

FF(12,7)=0.0

FF(12,8)=0.0

FF(12,9)=0.0

FF(12,10)=0.0

FF(12,11)=0.0

FF(12,12)=-RO\*9.81\*(H32-HD2)\*ETA

DO K=1,12

F(K)=-F(K)

END DO

IF(IBR.GT.50) THEN

RETURN

ENDIF

CALL SOLVER(FF,F,12)

FAK=1.0

H12=H12+FAK\*F(1)

H22=H22+FAK\*F(2)

H32=H32+FAK\*F(3)

Q12=Q12+FAK\*F(4)

Q22=Q22+FAK\*F(5)

Q32=Q32+FAK\*F(6)

Q42=Q42+FAK\*F(7)

QT12=QT12+FAK\*F(8)

QT22=QT22+FAK\*F(9)

QT32=QT32+FAK\*F(10)

QT42=QT42+FAK\*F(11)

QT52=QT52+FAK\*F(12)

IF(QT12.LT.0.0) QT12=0.0

IF(QT22.LT.0.0) QT22=0.0

IF(QT32.LT.0.0) QT32=0.0

IF(QT42.LT.0.0) QT42=0.0

IF(QT52.LT.0.0) QT52=0.0

! PROVJERA TOCNOSTI

DO K=1,12

IF(ABS(F(K)).GT.TOC) THEN

```
GO TO 100  
ENDIF  
END DO
```

```
RETURN  
END
```

```
SUBROUTINE LAMBDA(D,RE,EPSI,ALAM)  
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
```

```
FUNCTION BH(N,X,Y,XX)  
DIMENSION X(N),Y(N)  
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 SOLVER(A,B,N)  
DIMENSION A(N,N),B(N),X(30)  
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 CITA(IUL,HA,H11,H21,H31,Q11,Q21,Q31,Q41,QT11,QT21,QT31,QT41,QT51,NPIS)
COMMON /S1/ L1,D1,EPSI1,KSIU1,L2,D2,EPSI2,KSIU2
COMMON /S2/ L3,D3,EPSI3,KSIU3,L4,D4,EPSI4,KSIU4
COMMON /S3/ NDV,HDV(100),QDV(100)
COMMON /S4/ NK1,HK1(100),AK1(100),NK2,HK2(100),AK2(100)
COMMON /S5/ NK3,HK3(100),AK3(100)
COMMON /SNAGA1/ NNT1,TT1(100),XNT1(100),NNT2,TT2(100),XNT2(100)
COMMON /SNAGA2/ NNT3,TT3(100),XNT3(100),NNT4,TT4(100),XNT4(100)
COMMON /SNAGA3/ NNT5,TT5(100),XNT5(100)
COMMON /S6/ DT,NDT,THETA

REAL L1,L2,L3,L4,KSIU1,KSIU2,KSIU3,KSIU4

READ(IUL,1)
1  FORMAT(2X,/,2X)

READ(IUL,*) L1,D1,EPSI1,KSIU1
READ(IUL,*) L2,D2,EPSI2,KSIU2
READ(IUL,*) L3,D3,EPSI3,KSIU3
READ(IUL,*) L4,D4,EPSI4,KSIU4

!  CITANJE PODATAKA ZA DONJU VODU
READ(IUL,2)
2  FORMAT(2X)

READ(IUL,*) NDV
DO I=1,NDV
READ(IUL,*) QDV(I),HDV(I)
END DO
```



```
! CITANJE PODATAKA ZA PRVU KOMORU
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NK1
  DO I=1,NK1
  READ(IUL,*) HK1(I),AK1(I)
  END DO

! CITANJE PODATAKA ZA DRUGU KOMORU
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NK2
  DO I=1,NK2
  READ(IUL,*) HK2(I),AK2(I)
  END DO

! CITANJE PODATAKA ZA TRECJU KOMORU
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NK3
  DO I=1,NK3
  READ(IUL,*) HK3(I),AK3(I)
  END DO

! CITANJE PODATAKA ZA SNAGU PRVE TURBINE
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NNT1
  DO I=1,NNT1
  READ(IUL,*) TT1(I),XNT1(I)
  END DO

! CITANJE PODATAKA ZA SNAGU DRUGE TURBINE
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NNT2
  DO I=1,NNT2
  READ(IUL,*) TT2(I),XNT2(I)
  END DO

! CITANJE PODATAKA ZA SNAGU TRECE TURBINE
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NNT3
  DO I=1,NNT3
  READ(IUL,*) TT3(I),XNT3(I)
  END DO
```

```
! CITANJE PODATAKA ZA SNAGU CETVRTE TURBINE
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NNT4
  DO I=1,NNT4
  READ(IUL,*) TT4(I),XNT4(I)
  END DO

! CITANJE PODATAKA ZA SNAGU PETE TURBINE
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) NNT5
  DO I=1,NNT5
  READ(IUL,*) TT5(I),XNT5(I)
  END DO

! CITANJE PODATAKA ZA POCETNO STANJE
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) HA,H11,H21,H31,Q11,Q21,Q31,Q41,QT11,QT21,QT31,QT41,QT51

! CITANJE ZAVRSNIH PODATAKA
  READ(IUL,2)

  READ(IUL,*) THETA,DT,NDT,NPIS

  RETURN
  END
```

## 7. ZAKLJUČAK

Izradom ovog diplomskog rada provedena je analiza funkcioniranja složene vodne komore u sustavu akumulacija, dovodni tuneli, 3 vodne komore, te 5 tlačnih cjevovoda kojima voda dolazi do 5 turbina. Analiza je napravljena pomoću matematičkog hidrauličkog modela nestacionarnog tečenja u zadanom hidrotehničkom sustavu. Formulacija modela je izvedena na temelju jednadžbi nestacionarnog strujanja, te je ispisana u programskom jeziku Fortran95.

Definirano je 7 varijanti dimenzioniranja kako bi se, za pojedine načine uključivanja i isključivanja turbina, odredile dovoljne površine horizontalnih presjeka vodnih komora, da 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.

Varijante 3, 4 i 5 su vodne komore s donjim proširenjem duljine  $L=110,0$  (m) i promjerom cilindričnog dijela  $D=17,5$  (m). Poprečni presjek donjeg proširenja vodne komore sastoji se od pravokutnog dijela visine  $H$  i širine  $2R$  m te polukruga promjera  $R$ . Za vrijednosti  $H=1,0$  (m),  $H=2,0$  (m) i  $H=3,0$  (m) pri postupnom uključivanju turbina u pogon sustav ispravno funkcionira. Kako bi sustav funkcionirao pri uključivanju u pogon svih turbina u isto vrijeme, potrebna vrijednost visine  $H$  iznosi  $7,0$  (m).

## 8. LITERATURA

- [1] V. Jović, Osnove hidromehanike, 2006.
- [2] V. Jović, Hidraulika - interna skripta, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu.
- [3] V. Jović, Analysis and modeling of non-steady flow in pipe and channel networks, John Wiley and Sons,Ltd, 2013.
- [4] The Newton-Raphson Method, <http://www.math.ubc.ca/~ansteemath104/newtonmethod.pdf>.
- [5] A. Harapin, Kratke osnove rada s programskim jezikom FORTRAN, Split: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2009.

## **9. PRILOZI**

Prilog 1 – Treća vodna komora – Varijanta 1

Prilog 2 – Treća vodna komora – Varijanta 2

Prilog 3 – Treća vodna komora – Varijanta 3

Prilog 4 – Treća vodna komora – Varijanta 4

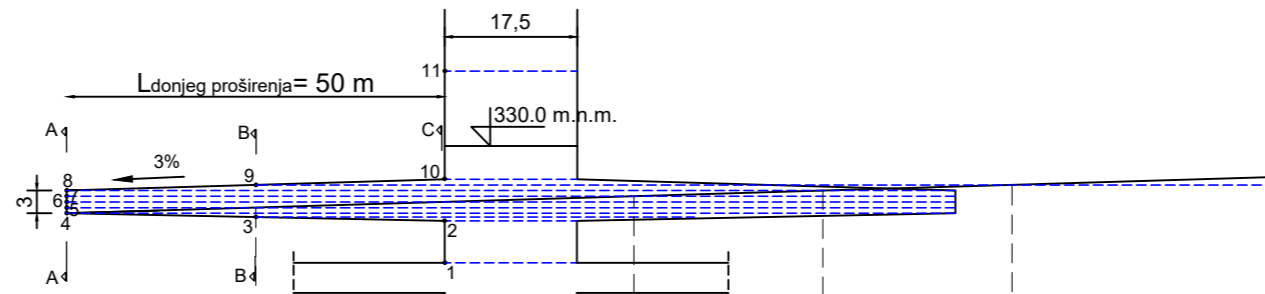
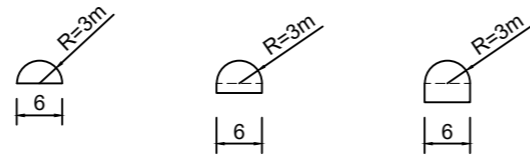
Prilog 5 – Treća vodna komora – Varijanta 5

Prilog 6 – Treća vodna komora – Varijanta 6

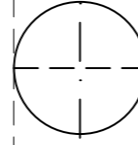
Prilog 7 – Treća vodna komora – Varijanta 7

# 3. VODNA KOMORA - 1. VARIJANTA

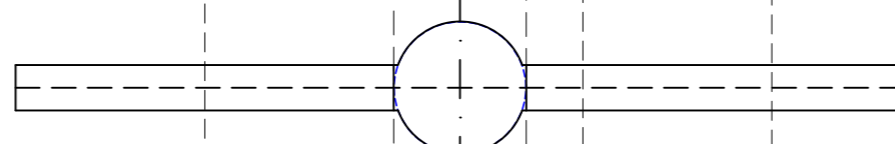
PRESJEK A-A    PRESJEK B-B    PRESJEK C-C



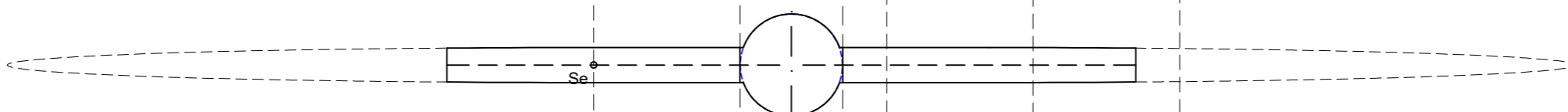
HORIZONTALNI PRESJEK 1, 2, 10, 11



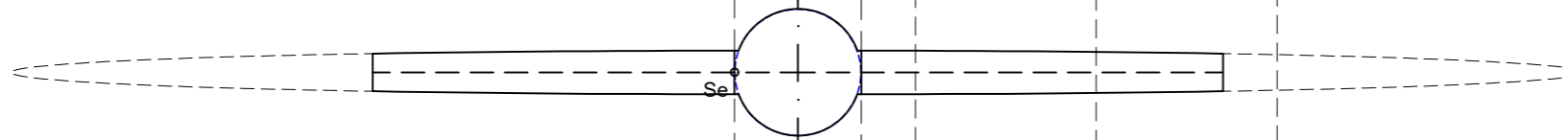
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 4



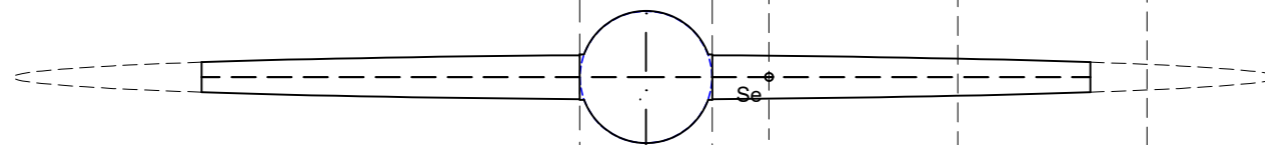
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 5



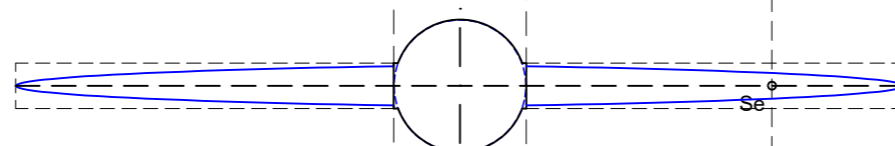
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 6



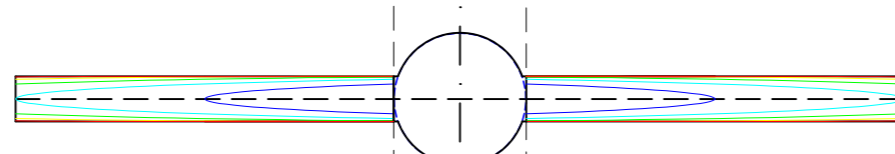
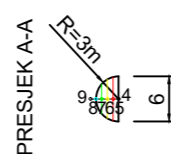
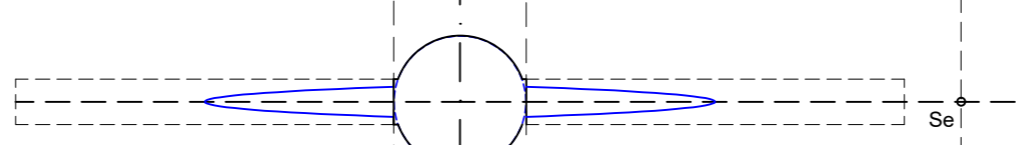
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 7




HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 8



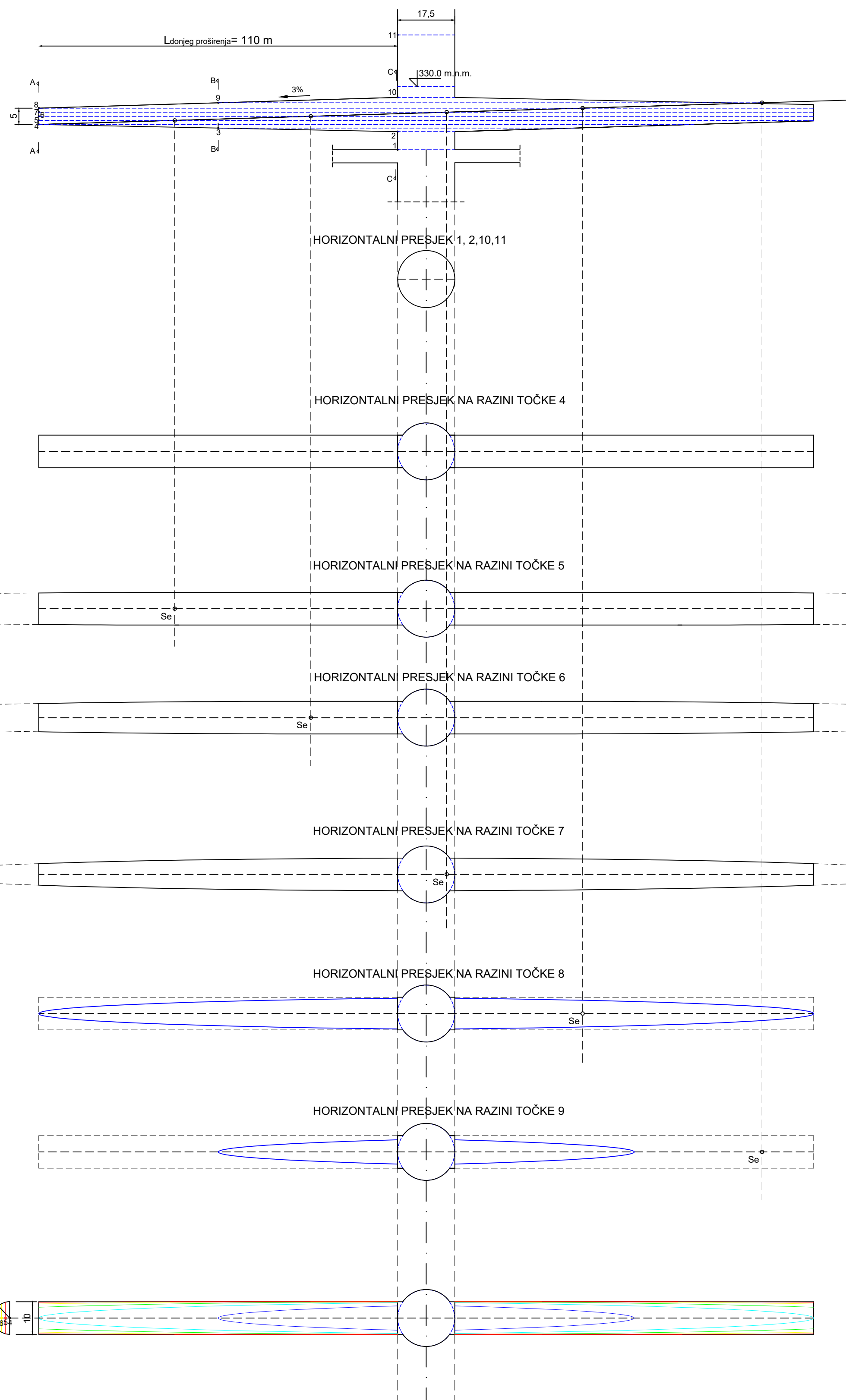
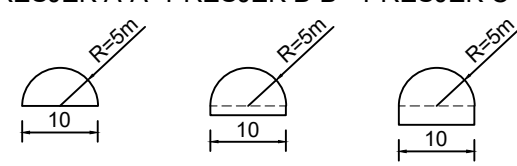
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 9




 <p>SVEUČILIŠTE U SPLITU          GRAĐEVINSKO - ARHITEKTONSKI FAKULTET          21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15</p>	<b>DIPLOMSKI RAD</b>	
	TEMA Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore	
	STUDENT Simona Babić, 661	
	SADRŽAJ Vodna komora 3, varijanta 1	MJERILO 1:1000
	DATUM veljača, 2020.	BROJ PRILOGA 1

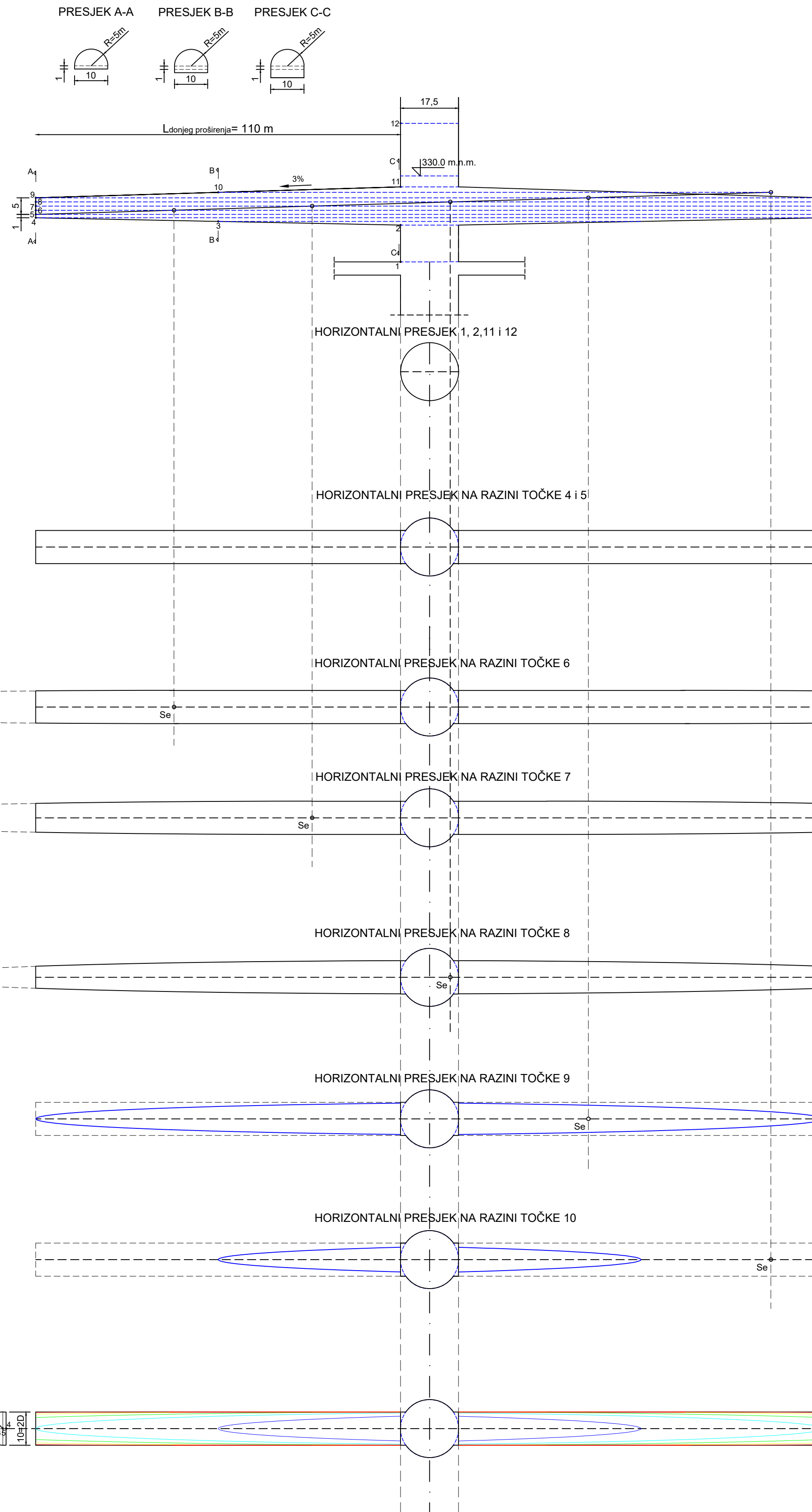
# 3. VODNA KOMORA - 2. VARIJANTA


PRESJEK A-A PRESJEK B-B PRESJEK C-C



 <p>SVEUČILIŠTE U SPLITU          GRAĐEVINSKO - ARHITEKTONSKI FAKULTET          21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15</p>	DIPLOMSKI RAD	
	TEMA	Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore
	STUDENT	Simona Babić, 661
	SADRŽAJ	Vodna komora 3, varijanta 2
	DATUM	veljača, 2020.
	MJERILO	1:1000
	BROJ PRILOGA	2

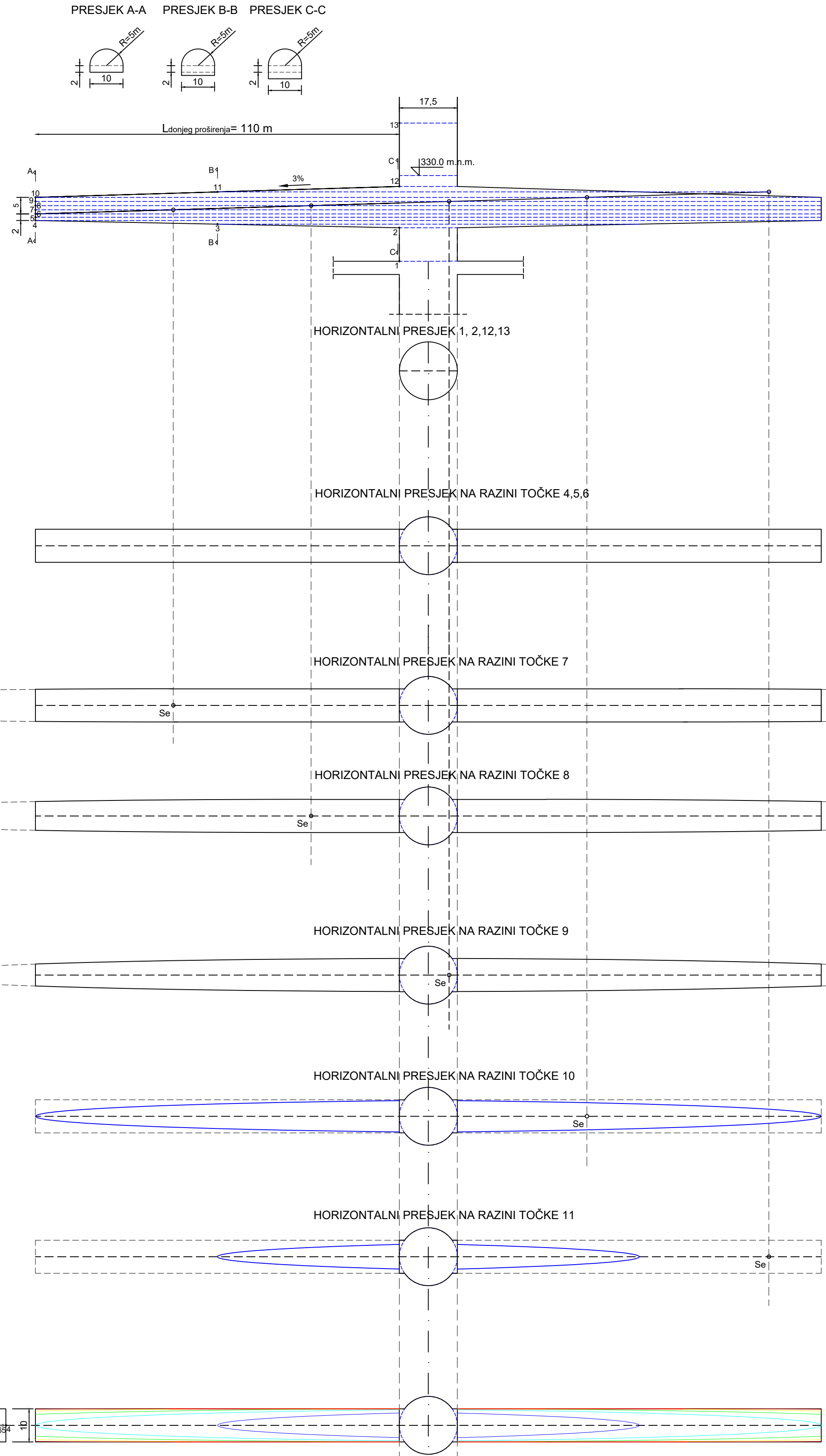
# 3.VODNA KOMORA - 3.VARIJANTA, PROŠIRENJE 1m



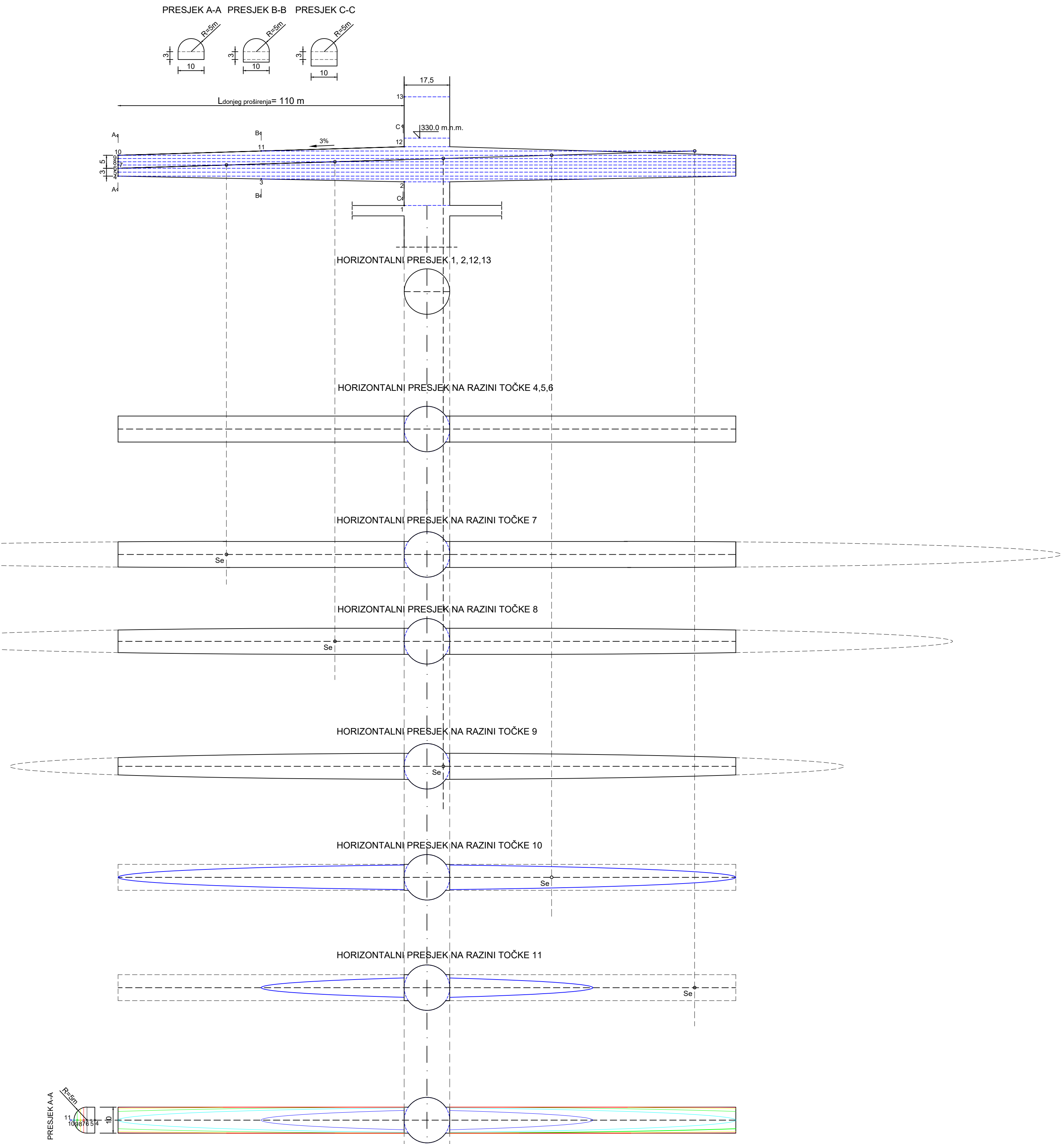
 <p>SVEUČILIŠTE U SPLITU          GRAĐEVINSKO - ARHITEKTONSKI FAKULTET          21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15</p>	DIPLOMSKI RAD	
	TEMA Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore	
	STUDENT Simona Babić, 661	
	MJERILO 1:1000	BROJ PRILOGA 3
SADRŽAJ Vodna komora 3, varijanta 3		DATUM veljača, 2020.



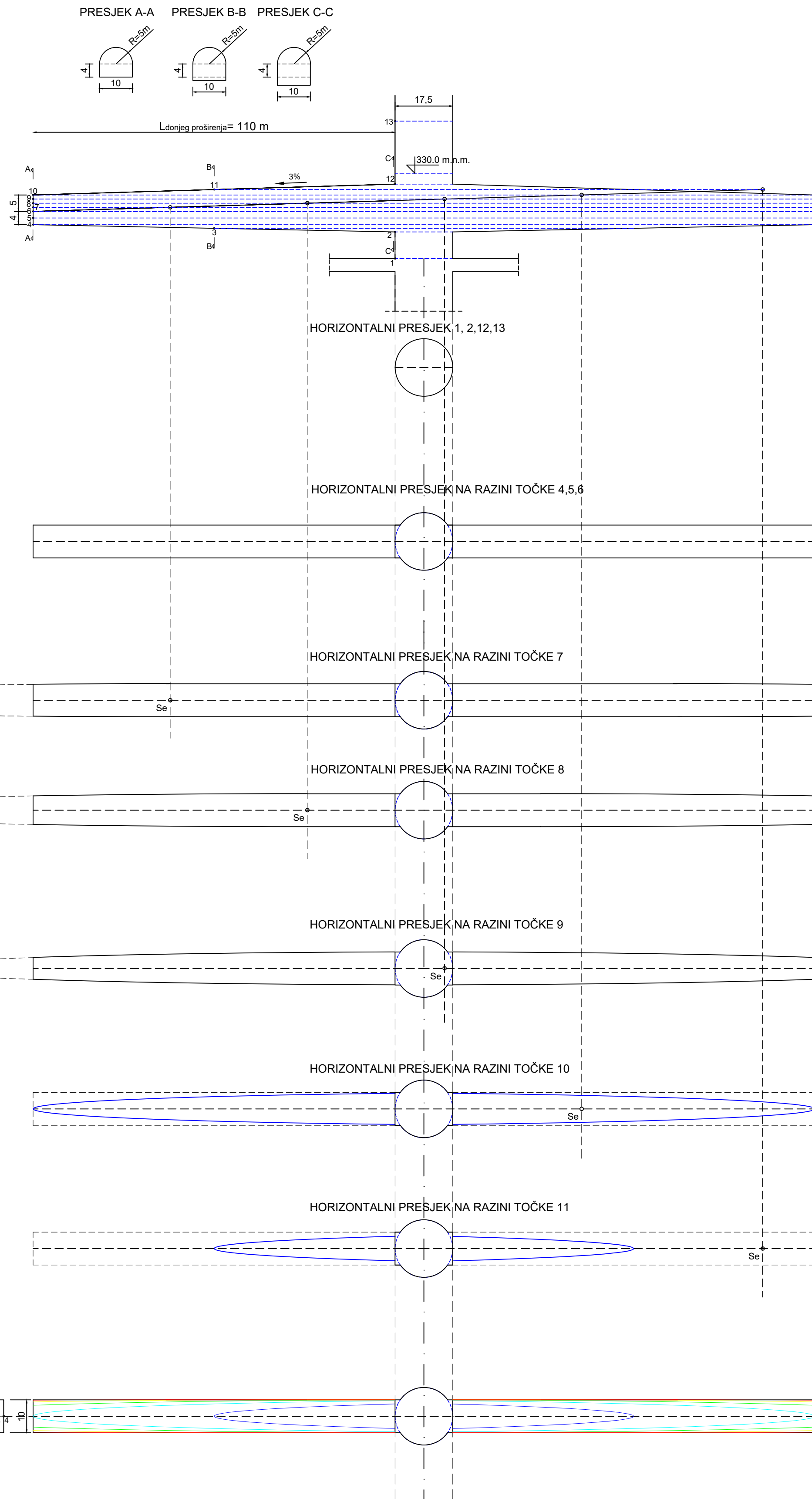
# 3.VODNA KOMORA - 4.VARIJANTA, PROŠIRENJE 2m




# 3.VODNA KOMORA - 5.VARIJANTA, PROŠIRENJE 3m

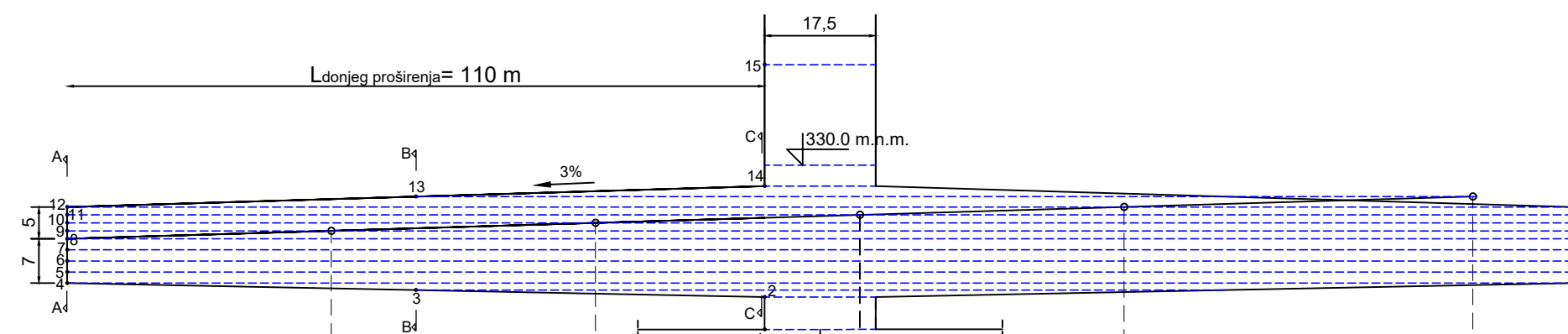
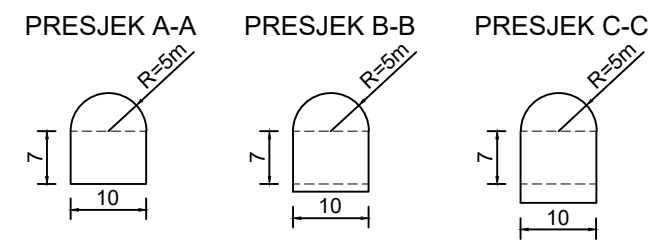


# 3.VODNA KOMORA - 6.VARIJANTA, PROŠIRENJE 4m

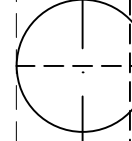


 SVEUČILIŠTE U SPLITU GRAĐEVINSKO - ARHITEKTONSKI FAKULTET 21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15	DIPLOMSKI RAD	
	TEMA	Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore
	STUDENT	Simona Babić, 661
	SADRŽAJ	Vodna komora 3, varijanta 6
DATUM	veljača, 2020.	MJERILO 1:1000
		BROJ PRILOGA 6

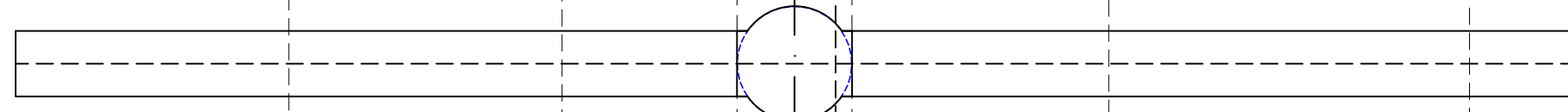
# 3.VODNA KOMORA - 7.VARIJANTA, PROŠIRENJE 7m



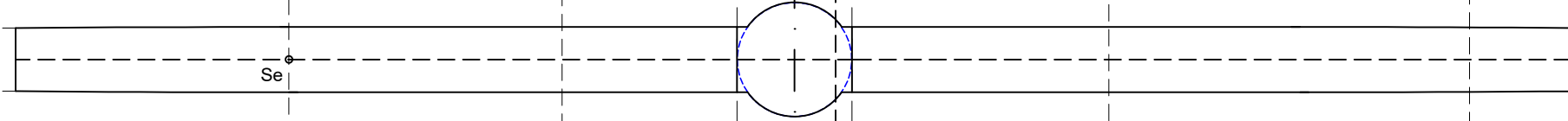
HORIZONTALNI PRESJEK 1, 2, 14, 15



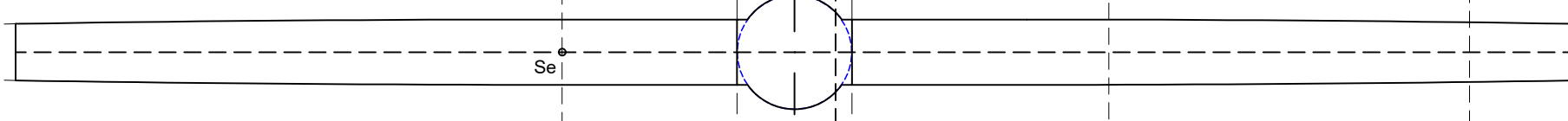
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 4, 5, 6, 7 i 8



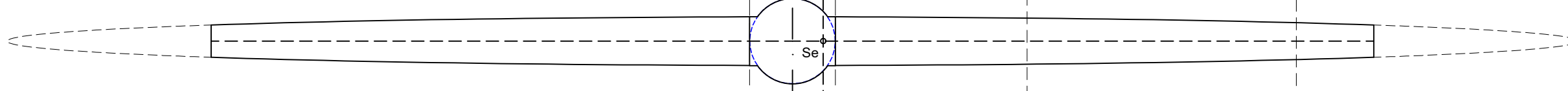
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 9



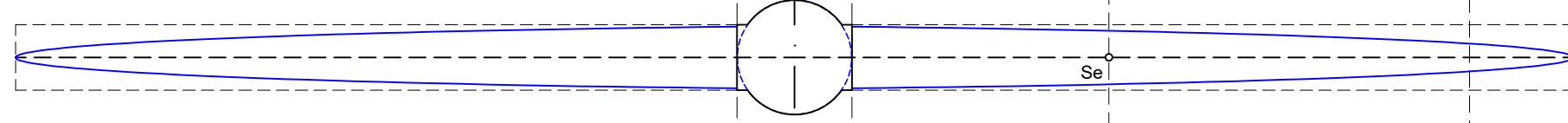
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 10



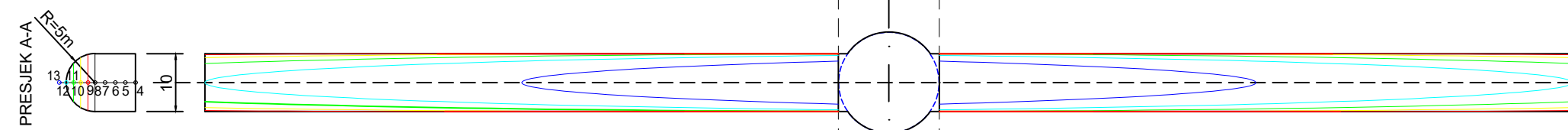
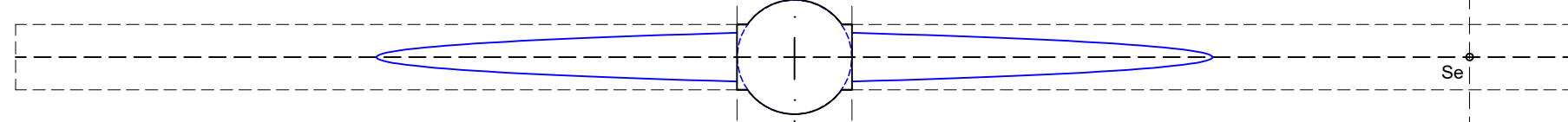
HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 11




HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 12



HORIZONTALNI PRESJEK NA RAZINI TOČKE 13



 SVEUČILIŠTE U SPLITU GRAĐEVINSKO - ARHITEKTONSKI FAKULTET 21000 SPLIT, MATICE HRVATSKE 15	DIPLOMSKI RAD	
	TEMA	Hidrauličko dimenzioniranje složene vodne komore
	STUDENT	Simona Babić, 661
	SADRŽAJ	Vodna komora 3, varijanta 7
	DATUM	veljača, 2020.
	MJERILO	1:1000
	BROJ PRILOGA	7