

Oscilacije vodnih masa u sustavu pod tlakom kod cilindrične i raščlanjene vodne komore

Brenko, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:767692>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)

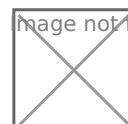


image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Mateo Brenko

**Oscilacije vodnih masa u sustavu pod tlakom kod cilindrične i
raščlanjene vodne komore**

Diplomski rad

Rijeka, srpanj 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Diplomski sveučilišni studij

Hidromehanika

Mateo Brenko

JMBAG: 0114025360

**Oscilacije vodnih masa u sustavu pod tlakom kod cilindrične i
raščlanjene vodne komore**

Diplomski rad

Rijeka, srpanj 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Hidrotehnika

Tema diplomskog rada

**OSCILACIJE VODNIH MASA U SUSTAVU POD TLAKOM KOD CILINDRIČNE I RAŠČLANJENE
VODNE KOMORE
OSCILLATIONS OF WATER MASSES IN A PRESSURE SYSTEM IN A CYLINDRICAL AND GENERIC
WATER CHAMBER**

Kandidat: **MATEO BRENKO**

Kolegij: **VODOOPSKRBA I KONDICIONIRANJE VODA**

Diplomski rad broj: **UI-2020-38**

Zadatak:

U diplomskom radu je potrebno sprovesti hidrauličku analizu oscilacija vodnih masa u cijevnom sustavu pod tlakom za dvije karakteristične vodne komore, cilindričnu i raščlanjenu vodnu komoru. U svrhu hidrauličke analize potrebno je predhodno izraditi 3D oblik raščlanjene vodne komore na 3D printeru u sklopu hidrotehničkog laboratorija na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Usporedbu i analizu oscilacija vodnih masa na danim vodnim komorama treba sprovesti na fizikalnom modelu HM156 i na njegovom baznom modulu HM150. U svrhu dobivanja adekvatne hidrauličke analize na danim tipovima vodnih komora treba sprovesti nekoliko serija eksperimentalnih pokusa u kojima će se varirati razina vode u spremniku, razina vode u samim vodnim komorama, kao i varijabilnost protoka u dolaznoj cijevi. U diplomskom radu je potrebno opisati i definirati vladajuće jednadžbe za opis oscilacija vodnih masa u cijevnim sustavima pod tlakom za navedene tipove vodnih komora, te dati potrebne grafičke prikaze za opis istih. Također, potrebno je prikazati najznačajnije tipove vodnih komora koje se koriste u praksi i opisati njihove primjene i karakteristike u hidroenergetskim sustavima.

Tema rada je uručena: 25. veljače 2020.

Komentor:

izv. prof. dr. sc. Vanja Travaš,
dipl. ing. građ.

Mentor:

doc. dr. sc. Elvis Žic,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Diplomski rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentorom i komentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Mateo Brenko

U Rijeci, 2. srpnja 2020.

IZJAVA

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta
Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić
Šifra projekta RC.2.2.06-0001
Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)
 Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, srpanj 2020.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Elvisu Žicu i komentoru profesoru dr. sc. Vanji Travašu na dostupnosti, ukazanom povjerenju i potpori pri izradi ovog diplomskog rada.

Posebne zahvale laborantu Duji Kalajžiću na pomoći i savjetima kod izrade modela i 3D printanja raščlanjene vodne komore.

Također zahvaljujem se svim djelatnicima Građevinskog fakulteta u Rijeci na razumijevanju i savjetima tijekom cjelokupnog trajanja studija posebice tetama u referadi.

Veliko hvala mojoj obitelji na potpori tokom studiranja, pogotovo roditeljima, hvala Vam.

Zahvaljujem se svim kolegama, a posebice prijateljima koje su moje studiranje učinili ljepšim i ispunili ga predivnim sjećanjima.

SAŽETAK

Vodne komore su vrlo bitan element u sustavima hidroelektrana. Komore imaju dvostruku ulogu, osiguravaju dovoljnu isporuku vode prilikom pokretanja turbine te apsorbiraju energiju koja nastaje prilikom ispada turbine iz pogona odnosno sprječavaju nastanak šteta nakon hidrauličnog udara. U komorama kao posljedica hidrauličkog udara nastaju oscilacije vodnih masa. Same oscilacije vodnih masa mogu biti opasne za strojarnicu i ljude koji u njoj rade te ih je neophodno točno pretpostaviti.

Za određivanje oscilacija vodnih masa u vodnim komorama možemo pristupiti na više načina. Jedan način je provedba fizikalnog modela, odnosno izradi se model vodne komore koji se postavlja na uređaj te se izvođenjem pokusa dobivaju karakteristike oscilacija. Oscilacije možemo izračunati i računalnim modelom. Kod računalnog modela sve potrebne podatke ubacimo u program te računalnim putem dolazimo do rezultata. Današnja tehnologija omogućuje precizne računalne modele, što omogućuje da iste i koristimo. Računalni modeli u odnosu na fizikalne modele su puno brži i jeftiniji za provođenje.

U diplomskom radu se provodi analiza hidrauličkog udara i oscilacija vodnih masa u cilindričnoj i raščlanjenoj vodnoj komori te usporedba istih. Za potrebe analiziranja hidrauličkog udara izvedeno je 10 pokusa sa različitim ulaznim podacima. Analiziranjem tih pokusa došlo se do zaključka kako brzina hidrauličkog udara ne ovisi o razini vode u akumulaciji i o razini vode u vodnoj komori već o protoku. Za potrebe analize oscilacija vodnih masa izvedeno je 5 pokusa za cilindričnu, te 5 pokusa za raščlanjenu vodnu komoru. Komore su ispitivane zasebno te je izvršena njihova usporedba.

Zaključak je kako se danas raščlanjene vodne komore sve više upotrebljavaju jer su u svim pogledima bolje od cilindričnih vodnih komora. Njihova razgranata konstrukcija omogućuje im da iste oscilacije ublaže u kraćem vremenskom periodu te u manjem volumnom prostoru.

Ključne riječi: hidraulički udar, oscilacije vodnih masa, cilindrična vodna komora, raščlanjena vodna komora, fizikalno modeliranje, računalno modeliranje

ABSTRACT

Surge chambers are a very important element in hydropower plant systems. Chambers have a double function, they provide a sufficient water delivery during the turbine startup process and they also absorb the energy that is made during the turbine outage in a way to prevent damage occurring after a water hammer. Water mass oscillations are created in the surge chambers after a water hammer. Some water mass oscillations can be dangerous for the engine room and the people working in it and so it is imperative to make correct assumptions about them.

There are several ways to determine water mass oscillations in the surge chambers. One way is to implement a physical model; a model of the surge chamber is made and it is then mounted on a device to conduct experiments to determine the characteristics of the oscillations. The oscillations can also be calculated using a computer model. To use a computer model the required data is entered in the program and the desired results are calculated. Current technology enables making precise computer calculations, which enables us to use them. Computer models are much faster and cheaper to implement compared to the physical models.

This graduation paper will explore the analyses of a hydraulic shock and oscillations of water masses in cylindrical and generic surge chambers and their comparison. For the purposes of the water hammer analyses 10 experiments were made with different input data. By analysing these experiments the conclusion was made that the water hammer velocity isn't dependent on the water level in the accumulation nor in the surge chamber, but it depends on the flow. For the purposes of the water mass oscillation analyses 5 experiments were made for the cylindrical and 5 for the generic surge chamber. The chambers were tested separately so they can be compared.

To conclude, generic surge chambers are currently being used in an increasing frequency because they are superior to the cylindrical ones in every way. Their branched construction enables them to mitigate the same oscillations in a shorter time period and in a smaller volume space.

Key words: water hammer , water mass oscillations, cylindrical surge chamber, generic water chamber, physical modeling, computer modeling

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. VODNA KOMORA	2
2.1. TIPOVI VODNIH KOMORA.....	3
2.2. JEDNADŽBA OSCILACIJA RAZINE U CILINDRIČNOJ VODNOJ KOMORI	7
2.3. JEDNADŽBA OSCILACIJA RAZINE U RAŠČLANJENOJ VODNOJ KOMORI	8
2.4. STABILNOST SUSTAVA VODNE KOMORE	10
3. OSCILACIJE TEKUĆINE U SUSTAVU DOVODNI TUNEL – VODNA KOMORA	13
3.1. RJEŠAVANJE JEDNADŽBE OSCILACIJE NE UZIMAJUĆI U OBZIR GUBITKE	15
3.2. OPĆE RJEŠENJE PRI NAGLOM ZATVARANJU.....	15
3.3. MAKSIMALNI PORAST I PAD RAZINE VODE U VODNOJ KOMORI PRI NAGLOM ZATVARANJU.....	15
4. HIDRAULIČKI VODNI UDAR	17
4.1. KARAKTERISTIKE I PROBLEMATIKA VODNOG UDARA	17
4.2. JEDNADŽBA VODNOG UDARA.....	17
4.3. BRZINA ŠIRENJA VODNOG UDARA	19
4.4. FAZE PROPAGACIJE VODNOG UDARA	20
4.5. LINEARNI I REALNI ZAKON PROMJENE BRZINA.....	22
4.5.1. <i>Linearni zakon promjene brzina</i>	22
4.5.2. <i>Realni zakon promjene brzina</i>	23
4.6. NAGLO ZATVARANJE ZATVARAČA.....	24
4.7. POSEBNI SLUČAJEVI MANEVIRANJA SA ZATVARAČEM.....	25
5. FIZIKALNI MODEL HM 156.....	28
5.1. OPIS UREĐAJA I PROGRAM ZA NJEGOVO KORIŠTENJE	28
5.2. MJERE I UVIJETI ZA POKRETANJE UREĐAJA.....	31
5.3. PRORAČUN OSNOVNIH FIZIKALNIH VELIČINA	31
5.3.1. <i>Određivanje brzine zvuka</i>	32
5.3.2. <i>Određivanje periode vala vodnog udara</i>	32
5.3.3. <i>Proračun brzine zvuka</i>	32
5.3.4. <i>Proračun prirodne frekvencije i oscilacija vodnih masa u vodnoj komori</i>	33
5.4. PRIMJENA FIZIKALNOG MODELA	34
5.4.1. <i>Analiza vodnog vala</i>	35
5.4.2. <i>Analiza oscilacija vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori</i>	36
5.5. RAŠČLANJENA VODNA KOMORA.....	38
6. ANALIZA PROVEDENIH ISPITIVANJA NA FIZIKALNOM MODELU HM156.....	42
6.1. ANALIZA VODNOG UDARA	42
6.2. ANALIZA OSCILACIJA VODE U CILINDRIČNOJ I RAŠČLANJENOJ VODNOJ KOMORI.....	45
6.3. USPOREDBA FIZIKALNOG I RAČUNALNOG MODELA ZA OSCILACIJE VODNIH MASA	52
7. ZAKLJUČAK.....	62
8. LITERATURA.....	64

POPIS SLIKA I TABLICA

Popis slika

- Slika 1. Oscilacije vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori, [1], [4]
- Slika 2. Cilindrična vodna komora [1], [4]
- Slika 3. Vodna komora sa gornjim proširenjem [1], [4]
- Slika 4. Raščlanjena vodna komora [1], [4]
- Slika 5. Vodna komora sa prigušivačem [1], [4]
- Slika 6. Diferencijalna vodna komora [1], [4]
- Slika 7. Vodna komora na Venturi prolazu [1], [4]
- Slika 8. Vodna komora sa zračnim prigušivačem [1], [4]
- Slika 9. Dvojna vodna komora [1], [4]
- Slika 10. Prikaz karakterističnih veličina Bernoullijeve jednadžbe za sustav akumulacija-cilindrična vodna komora[1], [4]
- Slika 11. Prikaz poprečnog presjeka raščlanjene vodne komore [4]
- Slika 12. Utjecaj regulatora na povećanje oscilacija razine vode u cilindričnoj vodnoj komori [1], [4]
- Slika 13. Shematski prikaz sistema tlačni tunel – cilindrična vodna komora [1]
- Slika 14. Pojava i širenje vodnog udara u cijevnom sustavu pod tlakom [2], [4]
- Slika 15. Strujna cijev sa prikazom članova u Bernoullijevoj jednadžbi [2], [4]
- Slika 16. Širenje vodnog udara u cijevnom sustavu pod tlakom [2], [4]
- Slika 17. Faze propagacije vodnog udara [2], [4]
- Slika 18. Promjena tlaka pri linearnoj promjeni brzine [2], [4]
- Slika 19. Jednostavni tlačni vod okrugla presjeka [2], [4]
- Slika 20. Grafička konstrukcija zaustavljanja gibanja kapljevine (vode) pri naglom zatvaranju zatvarača [2], [4]

- Slika 21. Shematski prikaz baznog modula HM150 i fizikalnog modela HM156 [3]
- Slika 22. Shematski prikaz baznog modula HM150 i fizikalnog modela HM156 [3]
- Slika 23. Dijelovi upravljačke jedinice sa popratnim elementima [3]
- Slika 24. Shematski prikaz oscilacija vodnih masa na fizikalnom modelu HM156 pri instalaciji cilindrične vodne komore. [3]
- Slika 25. Analiza vodnog udara na fizikalnom modelu HM156 [3]
- Slika 26. Oscilacije vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori [3]
- Slika 27. Raščlanjena vodna komora modelirana u Autodesk fusion 360 programu [4]
- Slika 28. 3D printanje raščlanjene vodne komore na 3D printeru (Građevinski fakultet Rijeka, hidrotehnički laboratorij) [4]
- Slika 29. Detalj spoja vodne komore maticama i vijcima (hidrotehnički praktikum) [4]
- Slika 30. Prikaz odnosa brzine zvuka i razine vode u spremniku [4]
- Slika 31. Prikaz odnosa brzine zvuka i razine vode u cilindričnoj vodnoj komori [4]
- Slika 32. Prikaz odnosa brzine zvuka i razine vode u rezervoaru / vodnoj komori [4]
- Slika 33. Prikaz odnosa brzine zvuka i protoka [4]
- Slika 34. Prikaz odnosa brzine zvuka i promjene vremena između dviju izmjerenih vrijednosti tlakova na sensorima tlaka PI1 i PI2 [4]
- Slika 35. Prikaz raščlanjene (lijevo) i cilindrične vodne komore (desno) [4]
- Slika 36. Prikaz početnih razina vode u raščlanjenoj vodnoj komori i protoka za pojedini eksperimentalni pokus [4]
- Slika 37. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 1 [4]
- Slika 38. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 2 [4]
- Slika 39. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 3 [4]

Slika 40. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 4 [4]

Slika 41. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 5 [4]

Slika 42. Računarski algoritam za izračun oscilacija vodnih masa u Mathcadu 15 [9]

Slika 43. Usporedba a) fizikalnog i b) računalnog modela za eksperimentalni pokus 1 [4]

Slika 44. Usporedba a) fizikalnog i b) računalnog modela za eksperimentalni pokus 2 [4]

Popis tablica

Tablica 1. Rezultati ispitivanja na fizikalnom modelu vodnog udara [4]

1. UVOD

Tema diplomskog rada bila je istraživanje oscilacija vodnih masa u sustavu pod tlakom. Takve oscilacije u sustavu događaju se zbog pojave nestacionarnog gibanja.

Nestacionarno gibanje tekućine je gibanje u kojemu u zadanoj točki prostora, ispunjenog tekućinom, brzine ne ovise samo o koordinatama x , y i z točke prostora već i o vremenu t . Jednostavnije rečeno, brzine su funkcije četiriju neovisnih promjenljivih x , y , z i t parametara.

Zbog takvog gibanja tekućine nastaju problemi kao vodni udar te oscilacija vodenih masa u vodnim komorama.

Kao primjer nestacionarnog gibanja pod tlakom možemo uzeti gibanja koja se pojavljuju u dovodnom tunelu kod hidroelektrana prilikom mijenjanja rada režima turbina, odnosno kada se one puštaju u pogon ili zaustavljaju. U ovome radu promatraju se izračuni fizikalnih veličina u sustavima pod tlakom tako da se u obzir uzimaju elastična svojstva tekućine i stjenki cijevi.

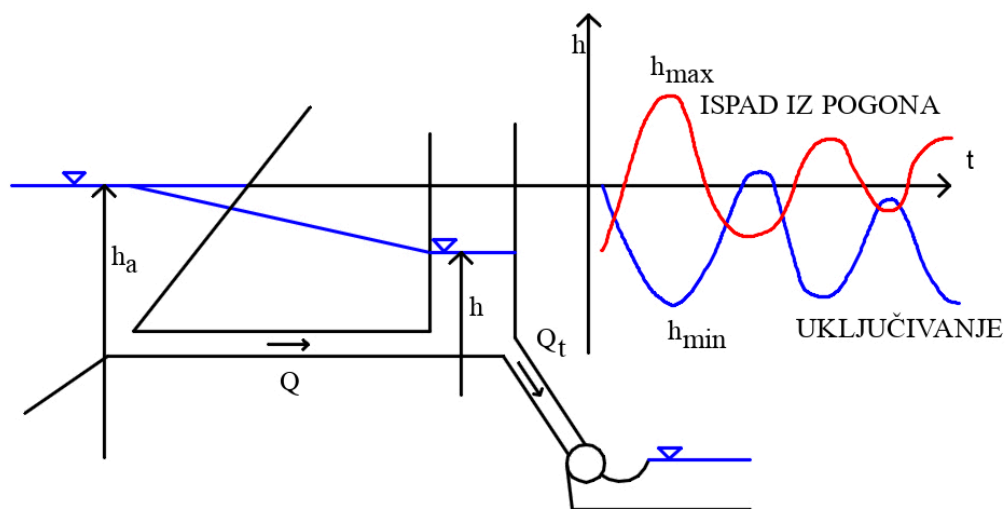
Zbog takvoga naglog zaustavljanja turbine (turbinskog postrojenja), nastaju značajna povećanja i smanjenja tlaka što dovodi do pojave hidrauličkog udara, no upravo on se može spriječiti ugradnjom i planiranjem vodnih komora neposredno prije turbine. Zadatak vodnih komora je da svojim oblikom ublaže oscilacije vodnih masa koje nastaju prilikom zaustavljanja turbina, te da osiguraju dovoljnu količinu vode prilikom pokretanja turbine.

Radom će se obraditi značajke vodnih komora, postojanje različitih tipova komora, jednadžbe oscilacija vodnih masa koje se u njima pojavljuju, te same stabilnosti vodne komore. Nakon toga se razrađuju oscilacije vodnih masa u tekućini koje nastaju u sustavu dovodni tunel - vodna komora. Na samom kraju je opisan fizikalni model HM156 na kojemu su se vršila laboratorijska ispitivanja oscilacija vodnih masa u cilindričnoj i raščlanjenoj vodnoj komori koja se izradila za potrebe ovog diplomskog rada u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci, te je ujedno sprovedena hidraulička analiza provedena na danim tipovima vodnih komora. Također je izvršena i usporedba fizikalnog modela HM156 sa računalnim modelom istog eksperimentalnog pokusa koji je izrađen u računalnom programu Mathcad 15.

2. VODNA KOMORA

Vodne komore su građevine koji se grade neposredno prije turbinskog postrojenja gdje voda ulazi u pogon za proizvodnju električne energije. Njihova svrha je da se umanju neželjeno djelovanje tromosti vode kao i izbjegavanje efekta koji nastaju zbog njene stišljivosti. Osnovna zadaća vodne komore je osiguravanje dovoljne količine vode prilikom pokretanja turbine kako bi se osigurao dotok vode prije nego što on doteče u dovoljnoj količini iz dovodnog tunela, te prihvaćanje dijela vode iz dovodnog kanala prilikom zaustavljanja turbine. Na taj se način izbjegava nagla promjena brzine vode te sprječava pojava vodnog udara.

Vodne komore spadaju u podzemne građevine, te samim time spadaju u razred hidrotehničkih objekata čija je izgradnja složenija, a samim time i skuplja. Da bi se smanjilo troškove postoji nekoliko osnovnih tipova vodnih komora koji su osmišljeni da zadovoljavaju kriterij stabilnosti uz najmanja ulaganja ovisno o potrebi. Na slici 1. prikazane su oscilacije vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori [6].



Slika 1. Oscilacije vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori, [1], [4]

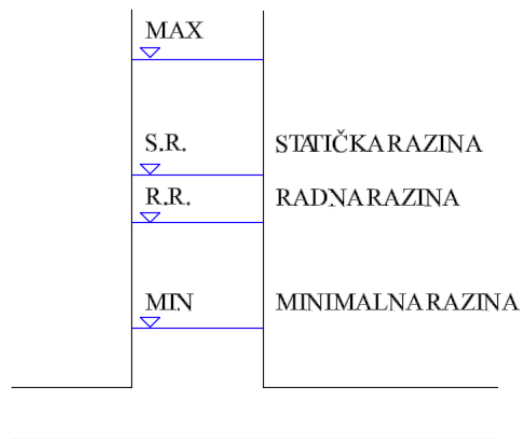
Na slici. 1. vide se oscilacije vodnih masa prilikom otvaranja i zatvaranja ventila. Kod otvaranja ventila prema turbini kreće voda, kako bi se odmah postigao traženi protok u vremenu dok voda putuje iz akumulacije, koristi se voda iz vodne komore koja u tom trenutku prvo smanjuje svoj nivo. Zbog toga se vidi kako je oscilacija kod uključivanja označena plavom bojom. Prilikom zatvaranja ventila višak vode odlazi u vodnu komoru te razina vode u komori se povećava, ta oscilacija prikazana je crvenom bojom. Također je bitno poznavati maksimum i minimum jer su to kritične razine kod projektiranja vodne komore. Vodna komora mora biti viša od

maksimalne razine vode u njoj kako ne bi došlo do prelijevanja vode, te niža od minimalne razine vode da ne dođe do usisavanja zraka u cjevovod.

2.1. Tipovi vodnih komora

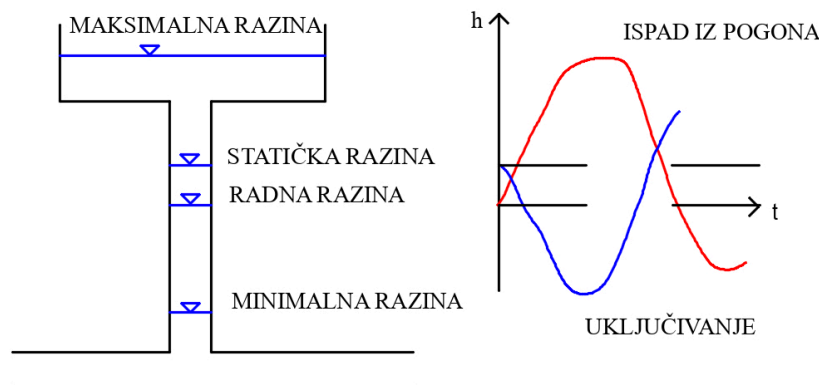
Osnovni tipovi vodnih komora koje se pojavljuju u praksi su:

Cilindrična vodna komora – najjednostavnija vodna komora koja ima najbolje razrađenu teoriju. Ovaj tip vodne komore se koristi kod razrade idejnih projekata, ali u praksi se rijetko koristi zbog svojih velikih dimenzija koje ishoduju velike količine materijala pri iskopu. Ovaj tip vodne komore svojim jednostavnim oblikom formira sporo prigušenje oscilacija vodnih masa (Slika 2.).



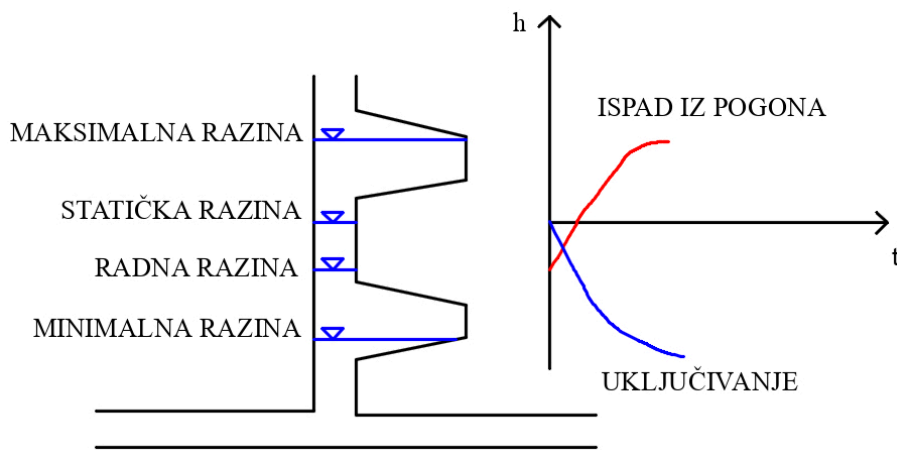
Slika 2. Cilindrična vodna komora [1], [4]

Vodna komora sa gornjim proširenjem - izvođenjem gornjeg proširenja ostvaruje se cilj smanjena maksimalne visoke razine vode u vodnoj komori čime je dovodni tunel izložen manjim opterećenjima nego kod cilindrične vodne komore (Slika 3.).



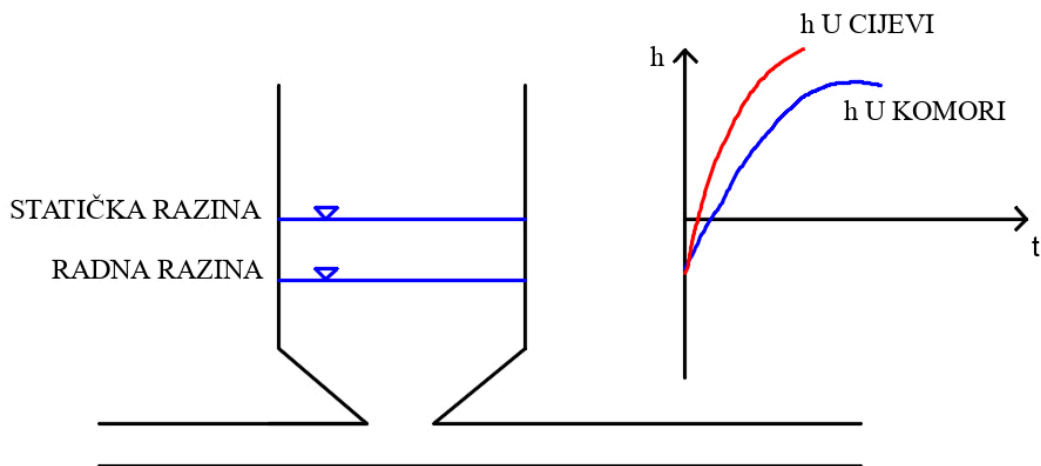
Slika 3. Vodna komora sa gornjim proširenjem [1], [4]

Raščlanjena vodna komora – tip komore koji se danas najčešće koristi. Raščlanjena geometrija ove komore omogućuje smanjenje maksimalne i minimalne razine vodostaja vode čime se štedi volumen vodne komore te samim time i smanjenje iskopa materijala. Još jedna prednost ovog tipa vodne komore je sprečavanje uvlačenja zraka u cjevovod (Slika 4.).



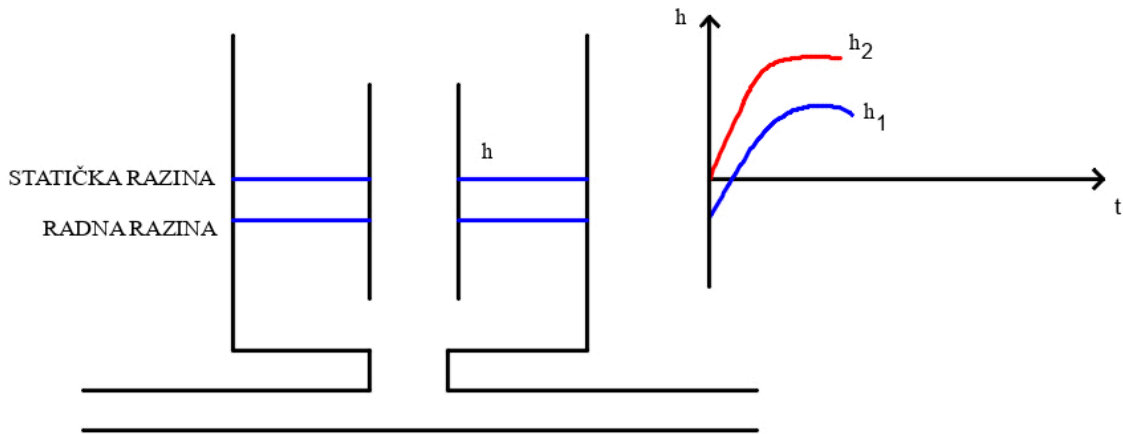
Slika 4. Raščlanjena vodna komora [1], [4]

Vodna komora sa prigušivačem - na prigušivaču se javlja disipacija energije te to omogućuje smanjenje maksimalnog dizanja razine vode u vodnoj komori. Prilikom pražnjenja komore prigušivač predstavlja nedostatak jer smanjuje tlakove u cjevovodu te ga je zbog toga potrebno asimetrično oblikovati kako bi u smjeru pražnjenja pružao što manji otpor (Slika 5.).



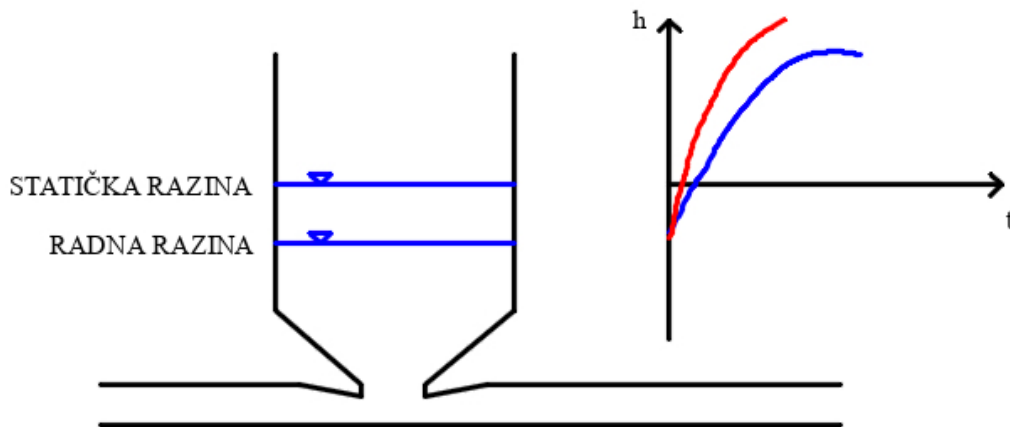
Slika 5. Vodna komora sa prigušivačem [1], [4]

Diferencijalna ili Johnsonova vodna komora - u užem oknu komore javljaju se oscilacije slične porastu tlaka kao kod tipa vodne komore sa prigušivačem (Slika 6.).



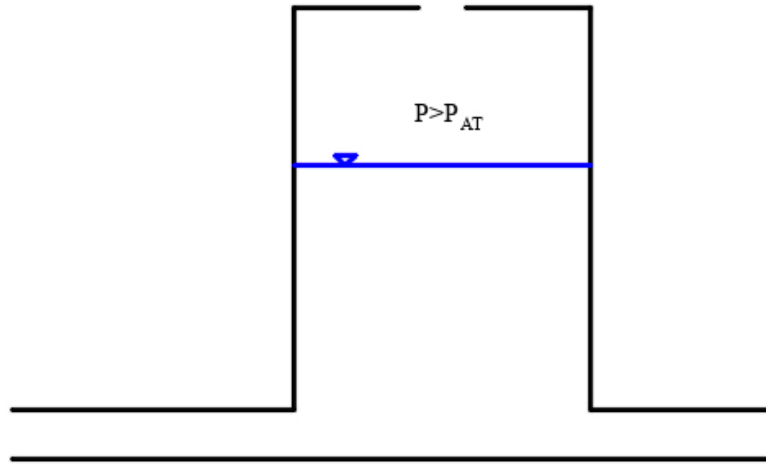
Slika 6. Diferencijalna vodna komora [1], [4]

Vodna komora na Venturi prolazu - prije korištenja ovog tipa preporuča se ispitivanje na hidrauličkom modelu. Komora se koristi na kratkim dovodnim tunelima sa malim padovima gdje se nastoji iskoristiti učinak povećanja brzine u suženju (Slika 7.).



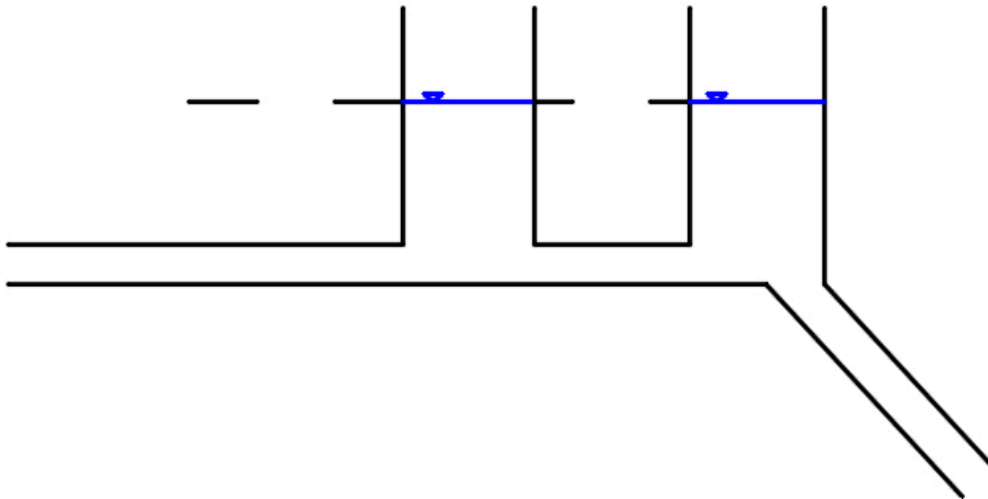
Slika 7. Vodna komora na Venturi prolazu [1], [4]

Vodna komora sa zračnim prigušivačem - djeluje kao vodna komora većeg poprečnog presjeka iz razloga što komprimirani (stlačeni) zrak pri podizanju vodostaja usporava podizanje vode (Slika 8.).



Slika 8. Vodna komora sa zračnim prigušivačem [1], [4]

Dvojna vodna komora - izvode se kako bi se osigurao veći poprečni presjek. Kod dužih tunela se može sagraditi i sustav vodnih komora, ali u tom slučaju potrebno je voditi računa o rezonanciji sustava (Slika 9.).



Slika 9. Dvojna vodna komora [1], [4]

2.2. Jednadžba oscilacija razina vode u cilindričnoj vodnoj komori

Primjenom Bernoullieve jednažbe u nestacionarnom obliku vrši se proračun oscilacija razine vode u vodnoj komori (Slika 10.):

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

u kojoj je:

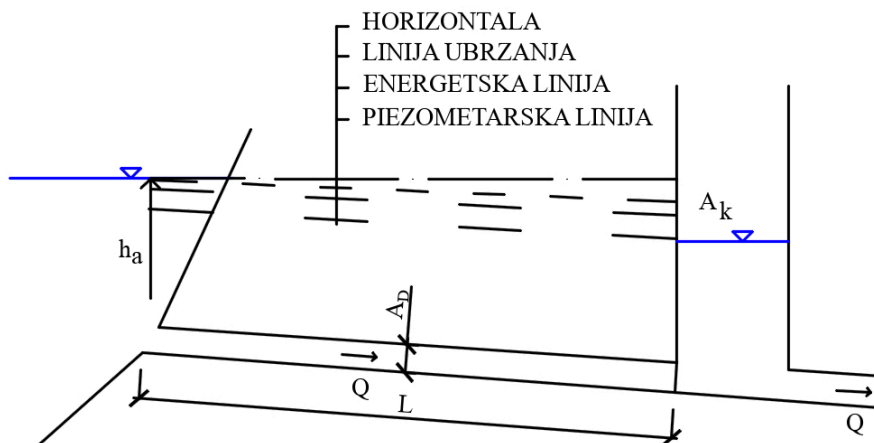
z, p, v – geodetska kota, tlak i srednja brzina mjereno po osi cijevi [m, Pa, m/s]

ΔH_e – zbroj svih linijskih i lokalnih gubitaka energetske visine između

dva profila, [m]

$\frac{1}{g} \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial v}{\partial t} dl$ - integralna veličina energetske visine između dva presjeka

potrebne za promjene brzine vode.



Slika 10. Prikaz karakterističnih veličina Bernoullijeve jednažbe za sustav akumulacija-cilindrična vodna komora [1], [4]

U jednažbi (1) se primjećuje da posljednji član pod integralom sadrži promjenu brzine po vremenu. Može se ustanoviti da u dovodnom tunelu nema zakašnjenja u promjeni brzine, te da član $\partial v / \partial t$ nije ovisan o stacionaži l , te s obzirom da je brzina strujanja u akumulaciji mala može se zanemariti. Zahvaljujući takvim pretpostavkama

Bernoullijevu jednažba za sustav s vodnom komorom možemo pisati u sljedećem obliku:

$$h_A = h \pm \beta v^2 + \frac{L}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

pri čemu je:

h_A – vodostaj ili razina vode u akumulaciji, [m]

h – vodostaj (razina vode) u vodnoj komori, [m]

$\frac{L}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$ - član ubrzanja mase vode u dovodnom tunelu, [m/s²]

βv^2 - ukupni gubici, [m]

L - duljina između dva profila po osi cijevi, [m].

Lokalne i linijske gubitke određujemo prema dobro poznatim formulama iz područja Hidrodinamike cijevnih sustava pod tlakom na sljedeći način:

$$\Delta H_e = \beta v^2 = \left(\xi_{UL} + \lambda \frac{L}{D} + \xi_{IZ} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

2.3. Jednažba oscilacija razina vode u raščlanjenoj vodnoj komori

Kako bi se minimizirao nepoželjan učinak oscilacija razine vode u vodnoj komori na rad turbina prilikom uključivanja hidroenergetskog postrojenja, te smanjila potrebna visina komore u vremenu oscilacija nastalih isključivanjem turbinskog postrojenja, u praksi se najčešće koriste raščlanjene vodne komore.

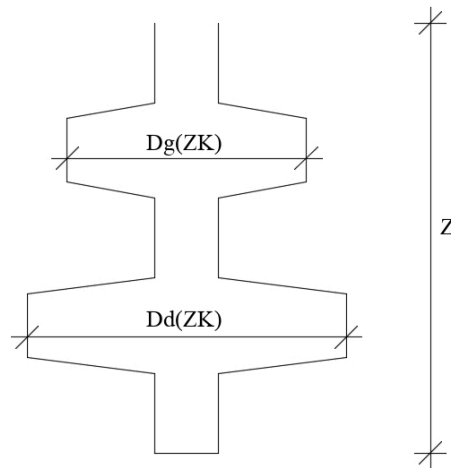
Za razliku od oscilacija razine vode u cilindričnoj vodnoj komori koja se rješava uz pomoć jednažbe (3), oscilacija razine u raščlanjenoj vodnoj komori rješava se definiranjem funkcije $A(z)$, odnosno promjene poprečnog presjeka komore A obzirom na razinu vode u komori z . Za potrebe rješavanja funkcije moramo definirati dinamičku jednažbu i jednažbu kontinuiteta te početne i rubne uvjete.

Poprečni presjek raščlanjene vodne komore mijenja se po visini z . Na slici 11. prikazana je raščlanjena vodna komora sa pripadajućim dimenzijama:

$D_d(Z_K)$ – donje proširenje raščlanjene vodne komore, [m]

$D_g(Z_K)$ – gornje proširenje raščlanjene vodne komore, [m]

Z – visina raščlanjene vodne komore, [m].



Slika 11. Prikaz poprečnog presjeka raščlanjene vodne komore [4]

Kod raščlanjene vodne komore jednadžba kontinuiteta poprima oblik:

$$A_k(Z_k) \frac{dz}{dt} = (Q_t - Q_s) \quad (4)$$

pri čemu je Q_t stvarni protok, Q_s protok u tlačnom cjevovodu te je poprečna površina vodne komore sada ovisna o razini vode u toj komori $A_k(Z_k)$. Rješavanjem jednadžbe (4) nije jednostavno kao kod jednadžbe (3) jer će podizanje ili opadanje razine d_z u vremenu d_t biti ovisno o trenutačnoj poziciji vode u vodnoj komori [9].

Numeričko modeliranje procesa oscilacija razine vode u raščlanjenoj vodnoj komori rješava se integracijom jednadžbe kontinuiteta (4). Rješenje je moguće sprovesti putem dvije metode, direktnom (egzaktnom) ili inkrementalnom (aproksimativnom) integracijom [9].

Bitno je definirati početne uvjete, odnosno definirati varijable $Z_k^{(n)}$ i $Q_t^{(n)}$ na početku prvog koraka Δ_t u trenutku $n=1$. [9]

Također definiramo rubne uvjete kojima prikazujemo dinamiku protočne površine $A_s^{(n)}$ na turbinama koja se zadaje pomoću funkcije stupnja zatvaranja zatvarača β definirane omjerom:

$$\beta = \frac{A_s}{A_s^{(n)}} \quad (5)$$

pri čemu je:

A_s – trenutna protočna površina, [m²]

$A_s^{(n)}$ – protočna površina otvorenog zatvarača, [m²].

Protok Q_s u profilu zatvarača može se izraziti preko Torricellijeve jednadžbe:

$$Q_s = c_p \beta A_s^{(n)} \sqrt{2g (\Delta h_s + Z_k)} \quad (6)$$

pri čemu je:

C_p – koeficijent protoka, [/]

Δh_s – visinska razlika između razine vode u akumulaciji i razine vode na zatvaraču, [m].

Nakon definiranja dinamičke jednadžbe i jednadžbe kontinuiteta, te početnih i rubnih uvjeta slijedi formiranje proračunskog algoritma za računarsku simulaciju oscilacija vodnih masa. U ovom radu algoritam je sproveden putem matematičkog računalnog programa MATHCAD 15 te su rezultati prikazani u poglavlju 6.3. [9].

2.4. Stabilnost sustava vodne komore

Kod puštanja u pogon hidroelektrana mora biti sinkronizirana na mrežu, odnosno mora proizvoditi struju određene frekvencije (50 Hz) uz ograničena odstupanja od $\pm 0,2$ % iz razloga što elektroenergetski sustav ne trpi promjene frekvencije. Iz tog se razloga u sustav turbine i generatora ugrađuje regulator protoka koji omogućuje konstantnu kutnu brzinu turbine.

Frekvencija struje proizvedena generatorom ovisi o kutnoj brzini okretanja rotora generatora te je definirana izrazom:

$$f = \frac{pn}{60} \quad (7)$$

pri čemu je:

f - frekvencija struje u periodama, [s]

n – broj okretaja u minuti, [okr./min.]

p – broj parova polova generatora, [/].

Osnovnom dinamičkom jednadžbom stroja određeno je gibanje okretnog kola (rotora):

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_v - M_0 \quad (8)$$

pri čemu je:

I – polarni moment tromosti obrtnih dijelova generatora, [kgm²]

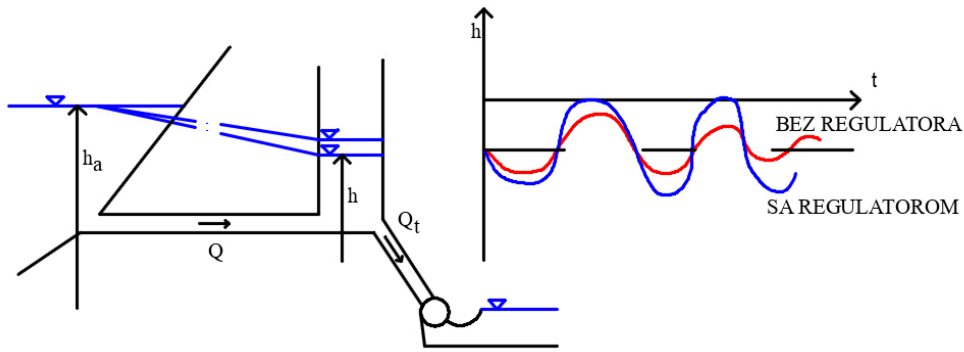
ω - kutna brzina generatora, [rad/s]

M_v – moment vanjskih sila koje pokreće stroj, [Nm]

M_0 – moment sila otpora, [Nm].

Uz ispunjenje uvjeta $M_o=M_v$, ostvaruje se uvjet konstantnosti frekvencije koji zahtjeva konstantnu kutnu brzinu, odnosno moment pokretačkih sila mora biti jednak momentu sila otpora.

Vodna komora mora biti dimenzionirana tako da je uvijek omogućena amortizacija oscilacija, te se stabilnost uvijek ispituje na najnepovoljniji slučaj, a to su uvjeti rada kada je akumulacija na najnižoj koti razine vode, kota donje vode najviša te glatki dovodni tunel (Slika 12.).



Slika 12. Utjecaj regulatora na povećanje oscilacija razina vode u cilindričnoj vodnoj komori [1], [4]

Problem stabilnosti cjelokupnog sustava može se svesti na rješavanje sljedećih diferencijalnih jednažbi:

a) jednažba kontinuiteta:

$$Q - Q_r = A_K \frac{dh}{dt} \quad (9)$$

gdje je: Q_r – regulirani protok

b) Bernoullijeva jednažba:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + (h - h_A) \pm \beta v^2 = 0 \quad (10)$$

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

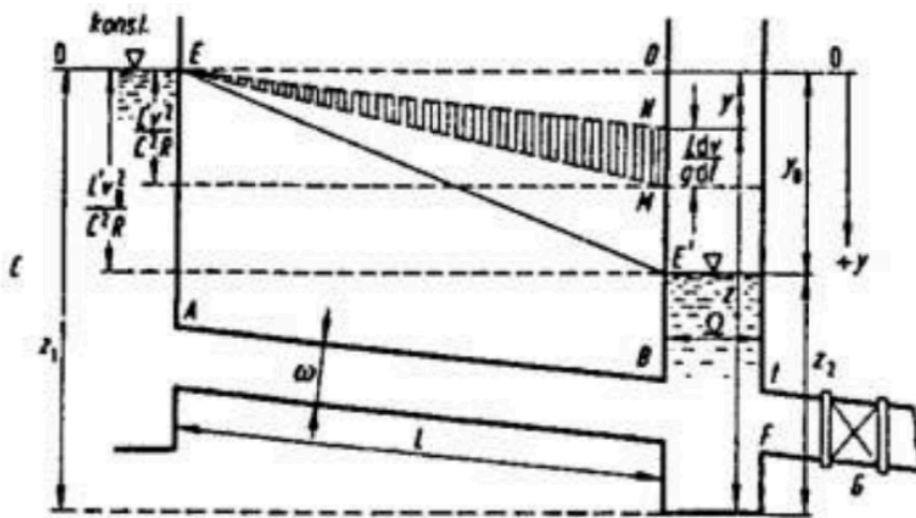
$$N = \eta_0 \rho g Q_{T0} H_0 = \eta \rho g Q_T H \quad (11)$$

U izrazu (11) koeficijent η predstavlja koeficijent iskoristivosti ili učinkovitosti turbine i koeficijent η_0 predstavlja koeficijent iskoristivosti ili učinkovitosti turbine u početnom trenutku, dok koeficijent g definira koeficijent ubrzanja sile teže. Protok Q_T je protok vode koji dolazi na lopatice turbine, a Q_{T0} protok vode na turbini u početnom trenutku dok A_K predstavlja tlocrtnu površinu vodne komore.

3. OSCILACIJE TEKUĆINE U SUSTAVU DOVODNI TUNEL – VODNA KOMORA

Samu pojavu hidrauličkog udara uvijek prate i oscilacije vodnih masa u toku koje su ovisne o dužini cjevovoda, odnosno što je cjevovod duži i oscilacije vodnih masa su veće. Same oscilacije vodnih masa mogu biti opasne za strojarnicu, te ljude koji u njoj rade. Kada bi se moglo zanemariti utjecaj sila trenja u cijevi istraživanja procesa nestacionarnog gibanja bila bi znatno jednostavnija.

U ovom diplomskom radu istraživanje će se ograničiti na shematski slučaj koji se sastoji od tlačnog tunela A-B duljine L , poprečnog presjeka A , te počinje kod vodospreme C i proteže se do ulaza u cilindričnu vodnu komoru BD. Vodna komora ima poprečni presjek Ω te je u njoj razina vode konstantna. Tlačni cjevovod FG izlazi iz vodne komore te služi za reguliranje protoka zatvaračem (Slika 13.).



Slika 13. Shematski prikaz sistema tlačni tunel – cilindrična vodna komora [2]

Promatra se sustav u kojemu su cjevovodi stalnog presjeka ($A = \text{konst.}$) te vrijedi da su brzine na vodnim licima jednake nuli. U tom slučaju dobivamo jednadžbu nestacionarnog gibanja u sljedećem obliku:

$$y = \frac{v^2 L'}{c^2 R} + \frac{L}{g} * \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

U tlačnom vodu FG istražujemo oscilacije razine vode koje se pojavljuju zbog određene promjene protoke. Kako je visina vodne komore u odnosu na duljinu tunela L relativno

mala, zanemaruje se inercijski tlak u cjevovodu, te hidraulički otpor u cilindričnoj vodnoj komori. Gubici koji nastaju posljedicom trenja izražavaju se preko srednje brzine v . Razlika visina slobodnih vodnih lica u tunelu i vodnoj komori u određenom vremenu može se zapisati kao: $y = z_1 - z_2$. No, ta razlika neće biti jednaka zbroju gubitaka između vodospreme i vodne komore već će biti zapisana preko jednadžbe nestacionarnog gibanja:

$$y = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \pm \frac{v^2 L'}{c^2 R} \quad (13)$$

Iz gornje jednadžbe se vidi da sadrži dvije promjenjive veličine: y i v^2 , no za rješenje problema potrebna je još jedna jednadžba. Nova jednadžba se dobiva pomoću površine horizontalnog poprečnog presjeka vodne komore. Pretpostavlja se da se jednadžba u općem slučaju mijenja u ovisnosti o y te da je promjena protoka ovisna o vremenu:

$$Q_r = Q_r(t) \quad (14)$$

pri čemu Q_r predstavlja regulirani protok.

Skupom diferencijalnih jednadžbi dobiva se jednadžba drugog reda koja se u općem slučaju rješava približnim grafičkim metodama umjesto kvadriranjem. Za dobivanje analitičkog rješenja mora se pretpostaviti promjene protoka Q_r do kojih dolazi prilikom potpunog zatvaranja dotoka vode. Nakon brzog zatvaranja dotoka vode (protok $Q_r=0$), odmah se može pretpostaviti da se radi o cilindričnoj vodnoj komori okruglog presjeka, te jednadžba (13) poprima sljedeći oblik:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \pm M \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + N^2 y = 0 \quad (15)$$

pri čemu je:

$$N^2 = \frac{g \varpi}{Q L'} \quad (16)$$

$$M = \frac{L'}{L} * \frac{Q}{\varpi} * \frac{g}{c^2 R} \quad (17)$$

3.1. Rješavanje jednadžbe oscilacije vodnih masa ne uzimajući u obzir gubitke

Može se pretpostaviti da se nestacionarno gibanje tekućine odvija bez gubitka tlaka ($M = 0$) te se određuju nepoznanice (npr. razina vode u vodnoj komori) preko dvije jednadžbe u kojima se koriste početni uvjeti pri kojima se za $t = 0$ i $y = y_e$ dobiva sljedeća jednadžba [1]:

$$y = \sqrt{y_0^2 + \frac{v_0^2 * \varpi * L}{g * Q}} * \sin(Nt + \alpha) \quad (18)$$

Uz pomoć gornje jednadžbe dobiva se maksimalna promjena razine vode u vodnoj komori u odnosu na razinu vode u vodospremi, odnosno dobiva se amplituda oscilacija vodnih masa u vodnoj komori [1,2]:

$$v = -\sqrt{\frac{y_0^2 * Q * g}{\varpi * L} + v_0^2} * \cos(Nt + \alpha) \quad (19)$$

3.2. Opće rješenje pri naglom zatvaranju zatvarača

Opće rješenje pri naglom zatvaranju zasuna (zatvarača) dobiva se izvođenjem jednadžbe nestacionarnog gibanja uz nekoliko pojednostavljenja. Dobiveno rješenje može se dalje razmatrati u primjenama na složenije slučajeve [1]:

$$z = C * e^{-1*s} + \frac{K}{p^2} * (1 - Py) \quad (20)$$

pri čemu nove oznake u izrazu (20) definiraju:

C - brzina rasprostiranja vodnog vala, [m/s]

K - modul volumne elastičnosti tekućine, [Pa]

P - tlak na zatvaraču, [Pa, bar].

3.3 Maksimalni porast i pad razine vode u vodnoj komori pri naglom zatvaranju

Prilikom naglog zatvaranja zasuna, tekućina će se još neko vrijeme gibati u dovodnom tunelu i puniti vodnu komoru zbog vlastite inercije. Dok traje punjenje vodne komore

brzina vode u tunelu će opadati. Maksimalna razina vode u vodnoj komori biti će poznata kada brzina vode u tunelu postane jednaka nuli. No takvo stanje potrajat će samo trenutak, iz razloga što je visina vode u vodnoj komori postala veća od hidrostatičke visine. Dolazi do kretanja vode unatrag, odnosno iz vodne komore prema vodospremi/akumulaciji. To kretanje će trajati dok brzina vode u tunelu opet na postane jednaka 0. Ukoliko je poznat maksimalni porast visine vode u vodnoj komori, može se odrediti i maksimalni pad.

Za određivanje maksimalnog porasta razine vode u vodnoj komori koristi se sljedeći izraz [1, 6]:

$$y_M = v_0 * \sqrt{\frac{\omega * L}{\Omega * g}} \quad (21)$$

pri čemu je:

Ω - poprečni presjek vodne komore, [m²]

ω - poprečni presjek dovodnog tunela, [m²].

Iz toga se može dobiti odnos y_S/y_M te se preko grafa određuje tražena veličina.

Uz pomoć gornjeg izraza također se dobiva i maksimalni pad razine vode u vodnoj komori koji je određen sljedećim odnosom:

$$y_O \leq 0,7 * y_M \quad (22)$$

pri čemu je:

y_o - maksimalni pad razine vode u vodnoj komori, [m]

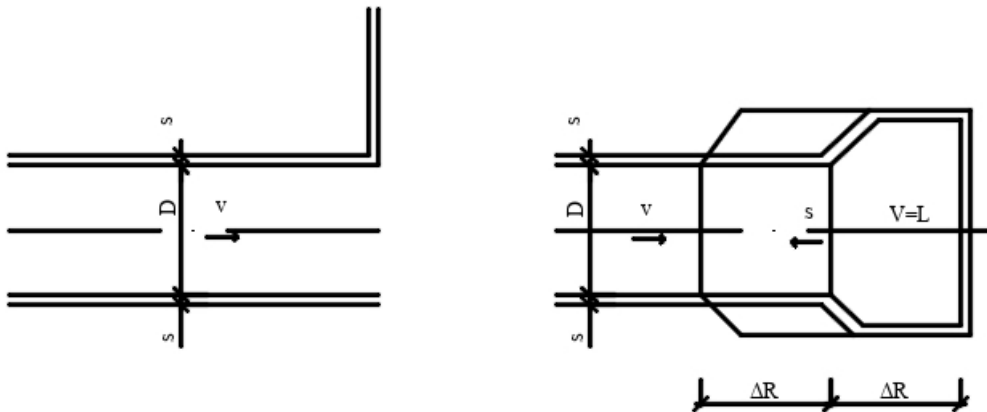
y_M - maksimalni rast razine vode u vodnoj komori, [m].

4. HIDRAULIČKI VODNI UDAR

4.1. Karakteristike i problematika vodnog udara

Hidraulički vodni udar predstavlja naglu promjenu tlaka u cijevi koji nastaje naglom promjenom brzine tekućine. Najčešća istraživanja se vrše na nagli prirast tlaka prilikom smanjenja brzine npr. kada na kraju nizvodnog cjevovoda zatvorimo zasun (Slika 14.). Nastajanjem vodnog udara u cijevi se pojavljuje zvuk koji podsjeća na zvuk udara čekićem o cijev, te iz toga i proizlazi engleski naziv „*Water hammer*“. U današnje vrijeme termin vodni udar počeo se koristiti za svaku promjenu brzine ili tlaka koji djeluje kao poremećaj u cjevovodu.

Problematika vodnog udara je to što se gibanje vrši u obliku nestacionarnog gibanja. Kod nestacionarnog gibanja, za razliku od stacionarnog brzina u zadanoj točki prostora ispunjenog tekućinom ne ovisi samo o koordinatama $x, y, i z$ već se pojavljuje i ovisnost o vremenu t . Možemo izdvojiti i postojanje nestacionarnog gibanja pod tlakom i bez tlaka, jednodimenzionalno i dvodimenzionalno, odnosno linearno i ravninsko, te prostorno [1,2].



Slika 14. Pojava i širenje vodnog udara u cijevnom sustavu pod tlakom [2], [4]

4.2. Jednadžba vodnog udara

Kod nestacionarnog gibanja vode za vodni udar koristi se Bernoullijeva jednadžba:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \Delta H \int_{l_1}^{l_2} + \frac{1}{g} \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial v}{\partial t} dl \quad (23)$$

Pretpostavkom da je promjena gustoće uzduž cjevovoda zanemariva, Bernoullijeva jednadžba u gornjem obliku nije pogodna za izračun strujanja fluida čije se gustoće mijenjanju (npr. slučaj strujanja plina). Promjena gustoće vode koje se dešavaju prilikom vodnog udara su malene te ne utječu bitno na točnost proračuna. Jednadžba kontinuiteta se piše u sljedećem obliku:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{l_1}^{l_2} \rho A dl - (\rho Av)_2 + (\rho Av)_1 = 0 \quad (24)$$

pri čemu je:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{l_1}^{l_2} \rho A dl - \text{promjena mase u jedinici vremena u volumenu cijevi, [kg/t]}$$

$$(\rho Av)_2 - \text{isticanje mase (vode) na kraju promatranog presjeka, [kg]}$$

$$(\rho Av)_1 - \text{dotok mase (vode) u promatrani presjek, [kg].}$$

Prethodni izraz se može pojednostaviti usvajanjem uvjeta da je tekućina nestlačiva i cjevovod krut. Time se dobiva da je prvi član jednak nuli, te se uspostavlja jednakost protoka između dva presjeka. Također usvaja se da je član brzinske visine ($v^2/2g$) i član koji je nastao uslijed djelovanja trenja mali, te se može zanemariti (Slika 15.). Tada slijedi izraz:

$$h_1 = h_2 + \frac{1}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t} \Delta l \quad (25)$$

kod kojeg je promjena brzine Δv jednaka razlici brzine prije i iza presjeka promatranja ($v_2 - v_1$), te se odnos $\Delta v / \Delta t$ zamjenjuje brzinom širenja poremećaja a . Bernoullijeva jednadžba tada poprima sljedeći oblik:

$$h_2 - h_1 = -\frac{a}{g} (v_2 - v_1) \quad (26)$$

odnosno:

$$\Delta h = -\frac{a}{g} \Delta v \quad (27)$$

pri čemu je:

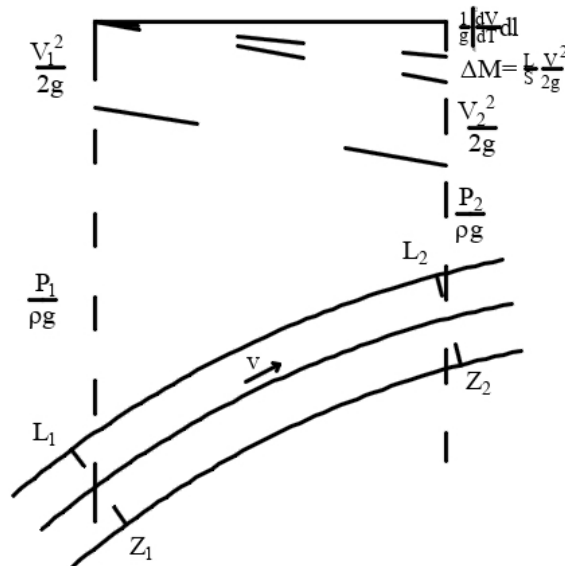
$$h_1 - \text{piezometarska visina prije promjene brzine, [m]}$$

$$h_2 - \text{piezometarska visina nakon promjene brzine, [m]}$$

v_1 - brzina prije promjene zatvaranja ventila [m/s]

v_2 - brzina nakon promjene zatvaranja ventila [m/s]

a - brzina širenja vodnog udara, [m/s].



Slika 15. Strujna cijev sa prikazom članova u Bernoullijevoj jednadžbi [2], [4]

4.3. Brzina širenja vodnog udara

Korištenjem jednadžbe kontinuiteta primijenjenoj na masu kapljevine između presjeka kod kojega je neporemećen tok, te presjeka kod kojega je tok zaustavljen može se izračunati brzina širenja vodnog udara:

$$\frac{\Delta}{\Delta t} (pA)\Delta l + pAv_2 - pAv_1 = 0 \quad (28)$$

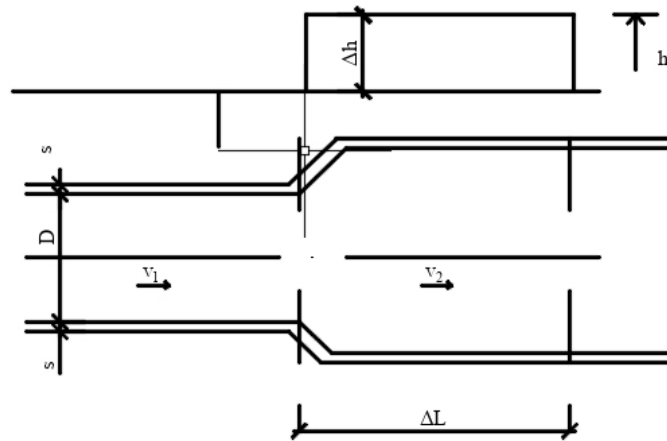
Kao i kod jednadžbe vodnog udara promjena gustoće u odnosu na protok mase u cijevi i rastezanje cijevi mogu se zanemariti. Jednadžba brzine širenja vodnog udara zasniva se na izražavanju relativne promjene gustoće preko elastičnih svojstava vode (E_v – modul elastičnosti vode, E_c - modul elastičnosti cijevi), dok su relativne promjene volumena i gustoća povezane kroz uvjet konstantnosti mase unutar volumena (Slika 16.):

$$a = \frac{\sqrt{\frac{E_v}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_v D}{E_c s}}} \quad (29)$$

No, u slučaju krutog cjevovoda brzina širenja vodnog udara definirana je:

$$a = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}} \quad (30)$$

Za uobičajene dnevne temperature ova brzina iznosi $a = 1425$ m/s.



Slika 16. Širenje vodnog udara u cijevnom sustavu pod tlakom [2], [4]

4.4. Faze propagacije vodnog udara

U nastavku diplomskog rada opisane su faze progresije vodnog udara na primjeru jednostavne cijevi koja izlazi iz vodospreme. Na cjevovodu se nalazi zasun čije će zatvaranje biti trenutno i potpuno. Za pojednostavljenje, linijski gubitci i brzinska visina zbog svojih malih vrijednosti se zanemaruju. Progresija vodnog udara sastoji se od sljedećih faza (Slika 17.), [1]:

- Početno stanje - jednak tlak u čitavom cjevovodu, i u početnom trenutku voda se kreće prema zasunu ($v > 0$)

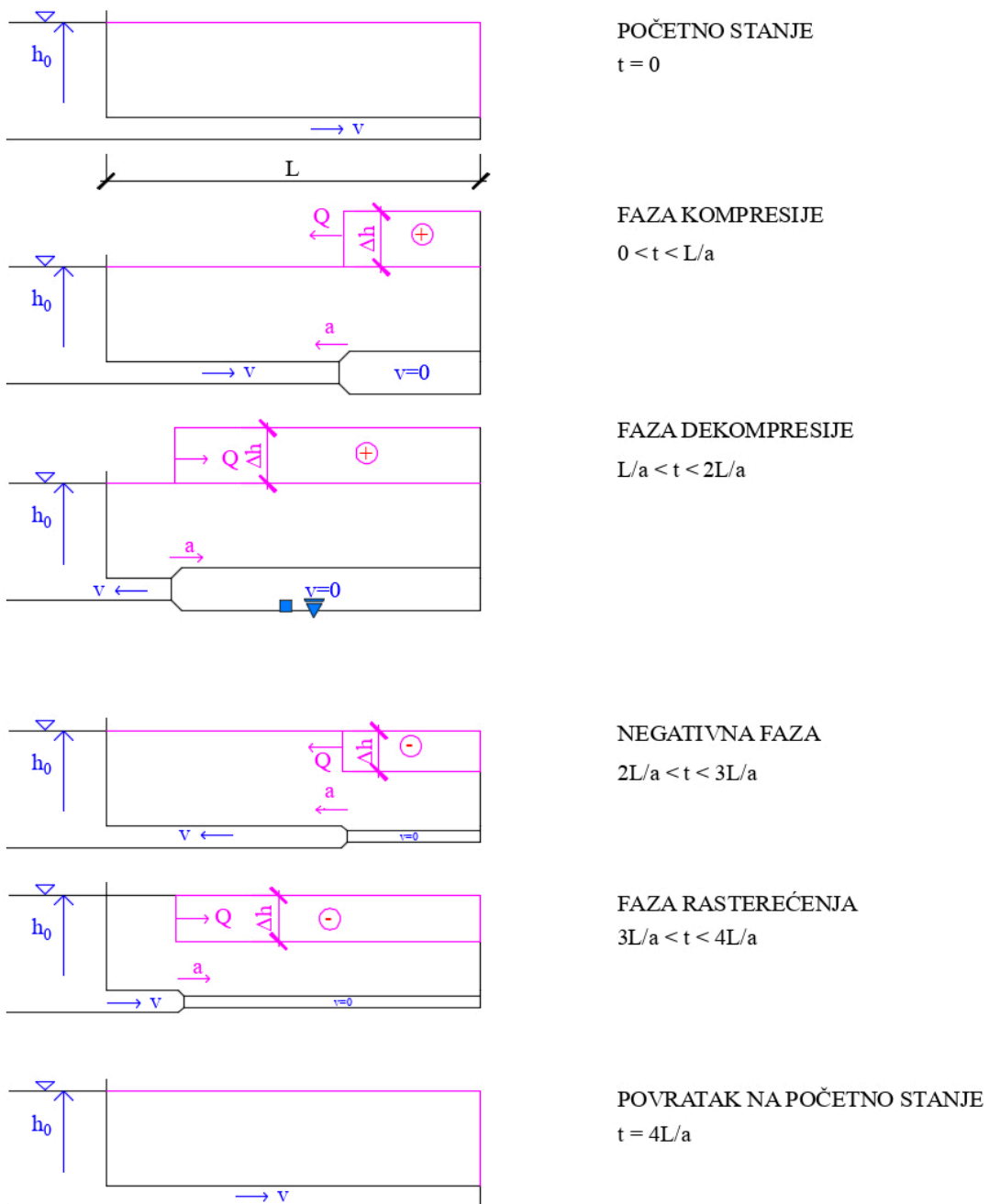
- Faza kompresije - u vremenskom intervalu $0 < t < L/a$ gdje je granica između zone u kojoj voda miruje i zone u kojoj voda struji. Ta se granica kreće prema vodospremi sve do dosezanja profila vodospreme $-t = L/a$ - voda miruje u čitavom cjevovodu, te vlada nadpritisak Δp . Izraz L/a predstavlja tzv. Allijevijevu jedinicu ($1 AJ = L/a$).

- Faza dekompresije - u vremenskom intervalu $L/a < t < 2L/a$ voda u cijevi je pod većim tlakom nego tlak u vodospremi. Zbog razlike u tlakovima dolazi do kretanja vode u smjeru prema vodospremi ($v < 0$), te dolazi do potpunog rasterećenja $-t = 2L/a$. Voda u

cijevi struji ka vodospremi, a tlak u cijeloj cijevi je $\Delta p = 0$.

- Faza podpritiska - voda koja struji prema vodospremi, želi produžiti gibanje u tom smjeru zbog vlastite mase, no nailazi na zatvoreni zasun te će se zbog svoje tendencije za nastavak gibanja stvoriti pad tlaka u profilu zasuna i doći će do sažimanja cjevovoda i razrjeđivanja vode. Pad tlaka ima vrijednost $-\Delta p = \rho a \Delta V$, $-t = 3L/a$. Voda u čitavom cjevovodu je zaustavljena i izložena pritisku Δp .

FAZE PROPAGACIJE HIDRAULIČKOG UDARA



Slika 17. Faze propagacije hidrauličnog udara [2], [4]

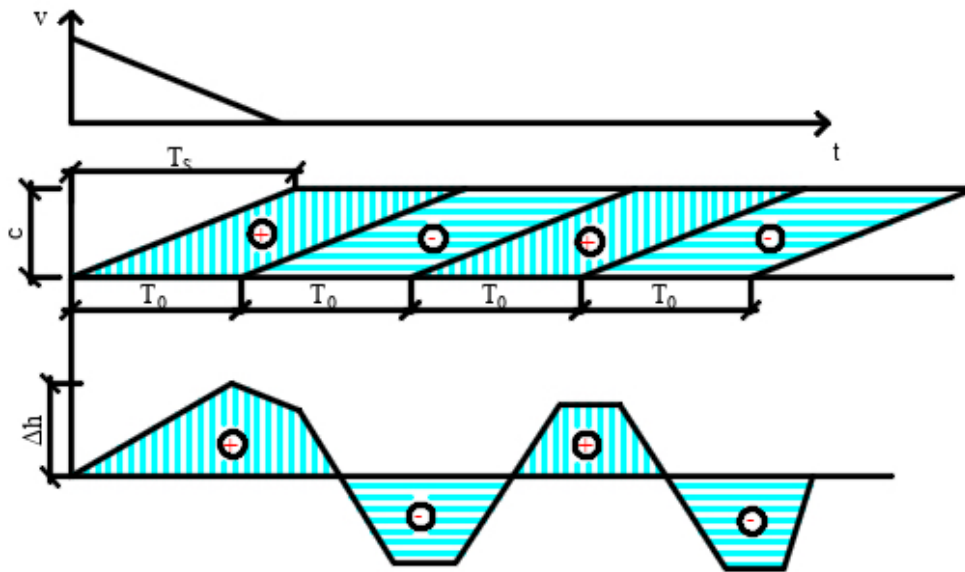
- Faza rasterećenja - sa dolaskom smanjenog tlaka omogućuje se ponovno punjenje cjevovoda brzine v u smjeru prema zasunu. Ispred čela područja vala djeluje podpritisak Δp i brzina vode $v = 0$, dok iza djeluje brzina v i početni tlak $p-t = 4L/a$. U tom trenutku u cijeloj cijevi imamo tlak jednak početnome, tlak p te brzinu jednakoj početnoj brzini v koja je bila u cjevovodu prije zatvaranja zasuna. Sa dolaskom na početno stanje ciklus se završava.

4.5. Linearni i realni zakon promjene brzina

4.5.1. Linearni zakon promjene brzina

Superpozicijom elementarnih promjena može se prikazati svaka postepena promjena brzine. Kod svake elementarne promjene brzine nastaje i elementarna promjena tlaka koji se prenosi duž cjevovoda. Ukoliko se superponiraju pozitivne i negativne faze svake promjene tlaka, dobije se raspored tlakova u željenom profilu. Postupak konstruiranja dijagrama je jednostavan, pomnoži se dijagram promjene brzine sa a/g , te se time dobiva afini dijagram promjene tlaka. Kako bismo dobili raspored pozitivnih i negativnih faza, afini dijagram tlaka se pomiče naizmjenično u desno za interval T_0 . Kod linearnog smanjenja brzine u cijevi, na osnovi geometrijskih odnosa možemo odrediti najveći tlak koji će se pojaviti u cijevi (Slika 19.), [2]:

$$\Delta h_{maks} = \frac{T_0}{T_z} * \frac{a}{g} * v_0 \quad (31)$$



Slika 18. Promjena tlaka pri linearnoj promjeni brzine [2], [4]

4.5.2. Realni zakon promjene brzina

Najčešći slučaj mijenjanja brzina u cjevovodu nastaje zbog korištenja zatvarača. Kako bi se spriječila nagla promjena brzine potrebno je izvršiti postepeno zatvaranje zatvarača. Prilikom zatvaranja zatvarača, istjecajna površina se u kratkom vremenskom intervalu smanji za Δh koji će povećati izlaznu brzinu. Ravnotežno stanje brzine i tlaka kod zatvaranja zatvarača određeno je sljedećim izrazom:

$$v_1 = \mu_0 * \frac{A_1}{A_0} * \sqrt{2g * (h_1 - z_0)} \quad (32)$$

$$h_1 - h_0 = -\frac{a}{g} * (v_1 - v_0) \quad (33)$$

pri čemu je:

v_0 - brzina u cjevovodu prije zatvaranja, [m/s]

v_1 - brzina u cjevovodu nakon zatvaranja, [m/s]

h_0 - piezometarska visina prije zatvaranja, [m]

h_1 - piezometarska visina nakon zatvaranja, [m]

z_0 - geodetska kota ispusta, [m]

A_0 - površina poprečnog presjeka cijevi, [m²]

A_1 - površina izlaznog otvora, [m²]

μ_0 - istjecajni koeficijent (ili koeficijent istjecanja) koji se za problem vodnog udara ne može smatrati stalnim, [/].

Nakon rješenja gornjih izraza dobiva se stanje na kraju prvoga vremenskog intervala $T = T_0$. No za izračun protoka i tlaka na drugom vremenskom intervalu $t = 2t_0$ mora se ponoviti postupak, no ovaj put uzimajući u obzir smanjivanje tlaka koje je uzrokovano negativnom fazom vodnog udara. Za određivanje protoka i tlaka koristi se sljedeći izrazi:

$$v_n = \mu_0 * \frac{A_n}{A_0} * \sqrt{2g * (h_n - z_0)} \quad (34)$$

$$h_n - h_{n-1} = -\frac{a}{g} * (v_n - v_{n-1}) - 2 * (h_{n-1} - h_0) \quad (35)$$

U izrazu (35) h_n predstavlja tlak nakon drugog vremenskog intervala.

4.6. Naglo zatvaranje zatvarača

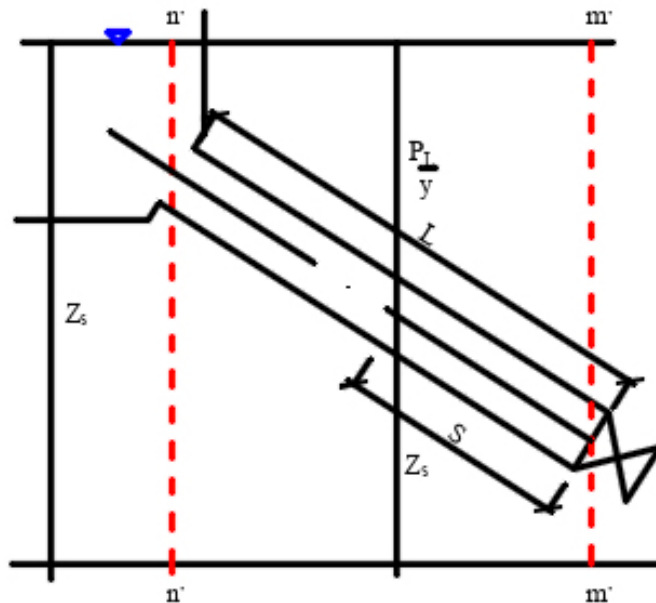
Naglo zatvaranje zatvarača se može promatrati na jednostavnom tlačnom vodu kružnog presjeka, duljine L koji izlazi iz rezervoara (spremnika) A i na svom kraju ima zatvarač (Slika 19.). Pretpostavlja se da je vodosprema dovoljno velika da razina vode ne oscilira zbog promjene protoka u cijevi, te da je srednja brzina malena, pa se može zanemariti. Zbog stišljivosti (kompresibilnosti) vode u vrlo malom razmaku vremena Δt nakon naglog zatvaranja, kod zatvarača će se zaustaviti najbliži sloj, neizmjereno male debljine Δs . Označi li se tlak u točki Q prije zatvaranja sa P_0 , te sa $P_0 + \Delta p$ nakon zatvaranja može se uz pomoć teorema o promjeni količine gibanja odrediti povećanje tlaka Δp . Na presjeku m-m djeluje tlak $P_0 + \Delta p$, dok na presjeku n-n tlak P_0 . Zbog toga će projekcija impulsa vanjskih sila kroz vrijeme Δt na os tunela biti $\Delta p \omega \Delta t$:

$$\Delta p = \frac{c * v_0}{g} \quad (36)$$

pri čemu je:

c - brzina rasprostiranja vala povećanja tlaka, [m/s].

Nakon drugog neizmjernog malog intervala vremena Δt zaustavit će se drugi prilažeci sloj u kojem će također porasti tlak. Zatim će se drugom sloju približiti treći sloj i tako sve do vremena L/c kada će se zaustaviti posljednji sloj u točki M, te će sva tekućina biti u trenutnom mirovanju i stisnuta. Takvo stanje nije stabilno zbog polazne pretpostavke da razina vode u vodospremi ne ovisi o pojavama u cjevovodu. Prema tome, tlak u presjeku $m' - m'$ biti će P_L dok će na strani $n' - n'$ biti $P_L + \Delta p$. Zbog djelovanja razlike tlakova sloj $m'n'$ će se početi gibati u smjeru vodospreme, te će istovremeno višak tlaka Δp u presjeku $n' - n'$ nestati. Pad tlaka će se kretati brzinom c te se stvara novo stanje s početnim tlakom i brzinom. Nakon vremena $T_0 = 2L/c$ sva tekućina u cijevi dobiva početni tlak, ali sa smjerom gibanja od zasuna prema vodospremi. Nakon trenutka T_0 tlak na zatvaraču mora se smanjiti.



Slika 19. Jednostavni tlačni vod okrugla presjeka [2], [4]

4.7. Posebni slučajevi manevriranja sa zatvaračem

4.7.1. Naglo zaustavljanje gibanja pri naglom zatvaranju zatvarača

U nastavku se promatra ponašanje krivulje koja se dobiva iz dijagrama jednostavnim ispravljanjem tlaka OAA_1O_1 i $O_1A_1A_2O_2$ (Slika 20.). Povećanje tlaka biti će jednako $\Delta p_{maks} = \rho c T_c$ te će ovisiti o elastičnim svojstvima sustava. Oznaka T_c se odnosi na potrebno vrijeme zatvaranja zatvarača.

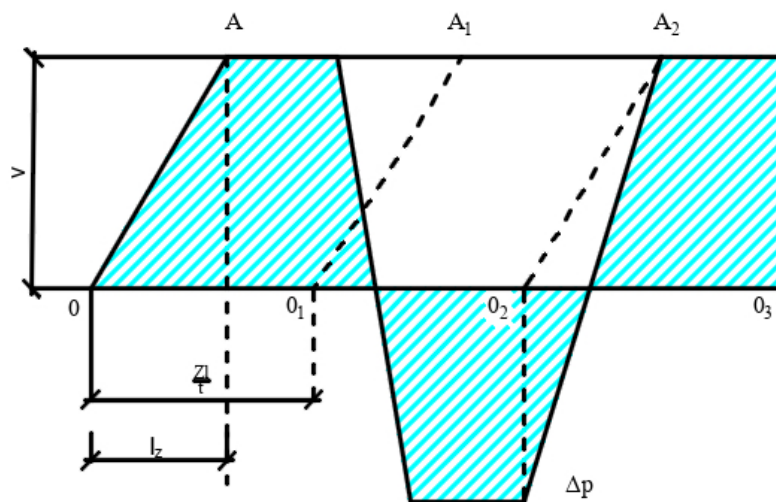
Trenutno smanjenje brzine u početnom presjeku od vrijednosti v_0 do $v_1 > 0$ djelomičnim naglim zatvaranjem zatvarača - dijagram koji ukazuje promjenu tlaka Δp biti će analogan dijagramu koji prikazuje tlak u točki O, ali će se porast i pad tlaka naizmjenično kretati kroz interval $2L/c$.

Postepeno smanjenje brzine do nule tokom vremenskog intervala $T_S < 2L/c$ - zatvaranje se obavlja u vremenskom intervalu koji je manji od trajanja faze. Na kraju intervala vremena T_S tlak na zatvaraču poprima najveći porast te iznosi: $\Delta p_{maks} = \rho c v_0$. Po tome se može zaključiti da porast tlaka ne ovisi o vremenskom intervalu.

Postepeno smanjenje brzine do nule u toku intervala vremena $T_S > 2L/c$ - kod ovog slučaja porast tlaka neće nikad doseći vrijednost $\Delta p = \rho c v_0$. Do toga dolazi iz razloga što veličine u formulama ne ovise o elastičnoj karakteristici sistema. Povećanje tlaka definirano je sljedećim izrazom [2]:

$$\Delta h_{maks} = \frac{2*(L-S)*v_0}{g*T_S} \quad (37)$$

U izrazu (37) L predstavlja duljinu cjevovoda dok S predstavlja duljinu promatranog intervala.



Slika 20. Grafička konstrukcija zaustavljanja gibanja kapljevine (vode) pri naglom zatvaranju zatvarača [2], [4]

4.7.2. Udar pri zatvaranju po linearnom zakonu vremena

Kod realnih manevarskih uvjeta može se koristiti zakon zatvaranja ili otvaranja zatvarača umjesto zakona promjene brzine po vremenu. Zakon se bazira na površini protjecajnog profila zatvarača, koja varira u ovisnosti o vremenu. Najbliži primjer jesu tlačni cjevovodi hidroelektrana, kod kojih turbine imaju automatske regulatore koji se mijenjaju u ovisnosti promjene opterećenja generatora. Najbliži stvarnosti je linearni zakon promjene otvaranja ili zatvaranja zatvarača kojeg približno možemo izraziti pomoću zakona o promjeni brzine V_i prilikom zatvaranja:

$$v_i = \mu \frac{\Omega_e}{\omega} \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) * \sqrt{2g \left(\frac{P_0}{\gamma} + \frac{\Delta p t}{\gamma}\right)} \quad (38)$$

pri čemu je:

$P_0 + \Delta p$ - tlak kod zatvarača, [Pa]

ω - površina živog presjeka cjevovoda, [m²]

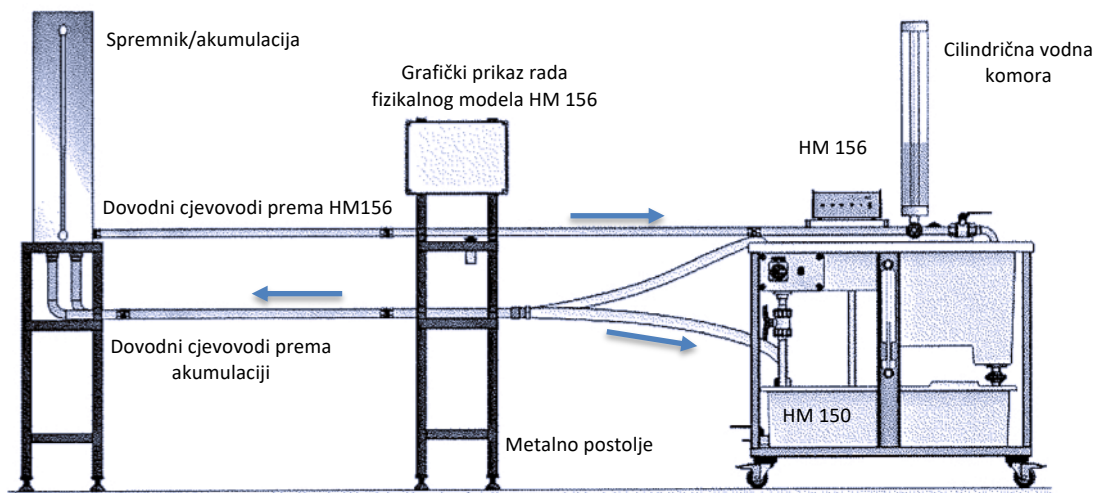
Ω_e - površina propusnog presjeka zatvarača, [m²]

μ - protjecajni koeficijent (koeficijent protoka) regulatornog tlaka, [/].

5. FIZIKALNI MODEL HM 156

5.1. Opis fizikalnog modela

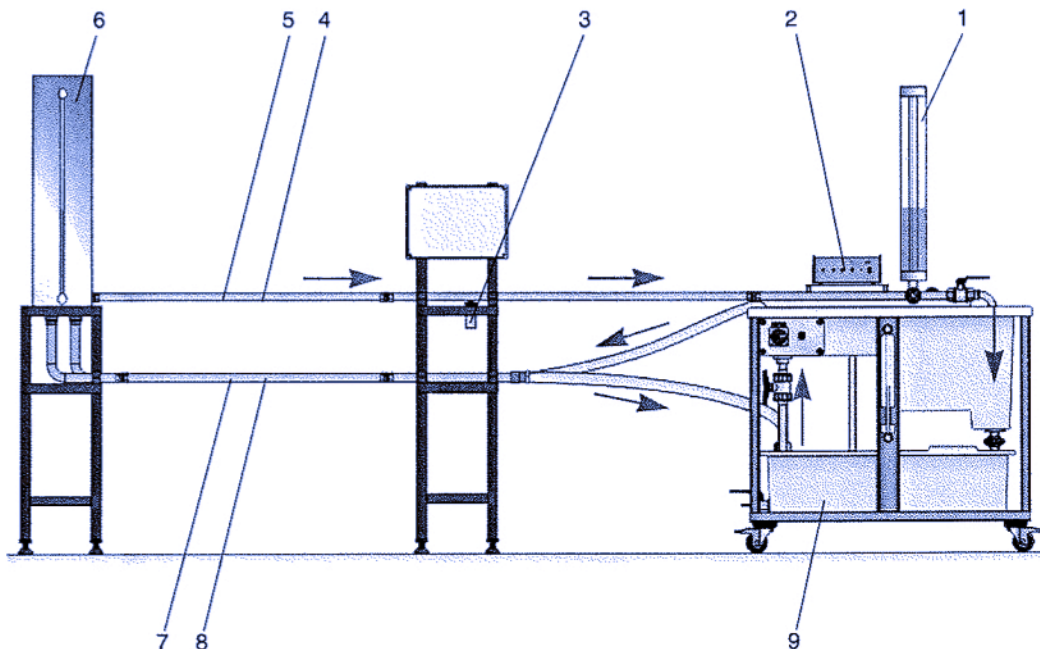
U hidrotehničkim objektima kao što su hidroelektrane ili sustavi za opskrbu vodom pojavljuju se promjene brzine protoka i fluktuacije pritiska. Do tih promjena dolazi zbog pokretanja i zatvaranja hidrauličnih strojeva ili otvaranja i zatvaranja ventila. Između brzih promjena tlaka koji propagiraju brzinu zvuka (vodni udar) i usporene promjene tlaka uzrokovane oscilacijama masa vode. Cijevni sustavi koriste vodne komore za ublaživanje i sprječavanje vodenih udara i velikih oscilacija vodnih masa. Eksperimentalni fizikalni model HM 156 razvijen je za potrebe prikazivanja i mjerenja određenih fizikalnih veličina kod pojave vodnog udara i oscilacija vodnih masa pri cilindričnoj vodnoj komori. Unutar ovog diplomskog rada, a za potrebe dodatne hidrodinamičke analize na fizikalnom modelu, izvršena je modifikacija vodne komore na način da se cilindrična vodna komora zamijenila raščlanjenom vodom komorom. Fizikalni model se također može koristiti i za generiranje vodnih udara u cijevi. Za korištenje fizikalnog modela HM 156 potrebno je imati i baznu stanicu HM 150 za cirkuliranje vode u sustavu (Slika 21.).



HM 150 bazni modul osigurava vodu za izvršavanje eksperimenata u sustavu cirkulacije vode. Voda se iz spremnika za vodu (HM150) pumpa preko cijevi za dovod vode. Spremnik (modifikacija umjetne akumulacije) se nalazi na metalnom postolju. Opremljen je s preljevom koji ulazi u povratnu cijev i povratno vraća vodu u modul

HM150. Ugrađen je indikator razine vode za provjeru razine vode u spremniku. Voda izlazi iz spremnika kroz dvije cijevi, koje djeluju zasebno jedna od druge. Jedna cijev služi za eksperimentiranje kod pojave vodnog udara, dok druga služi za eksperimentiranje (ispitivanje hidrauličkih analiza) i mjerenje oscilacija vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori.

Solenoidni ventil V1 ugrađen je u dio cijevi koje nazivamo "vodni udar", koji se može zatvoriti preko posebnog računalnog programa ili preko upravljačke jedinice koje su posebno dimenzionirane za dani fizikalni model. Zatvaranje solenoidnog ventila V1 stvara vodni udar u gornje navedenom dijelu cijevi. Senzori za tlak PI1 i PI2 su ugrađeni u cijevi sustav na 3 m međusobnog razmaka (Slika 21.). Vodni udar detektira senzor tlaka PI3 i može se vidjeti u fluktuacijama razine vode u izlaznoj vodnoj komori. Postoje dva prigušujuća ventila (V2 i V4), koji se nalaze na kraju svakog eksperimentalnog dijela cijevi, te služe za zatvaranje eksperimentalnog dijela cijevi koji se u određenim situacijama ne koriste u eksperimentalnom ispitivanju. Vrijednosti tlaka izmjerene senzorima tlaka prikazuju se u posebnom programu na osciloskopu namijenjenom HM156 fizikalnom modelu. No mogu se također prikazati i pomoću linijskog snimača.

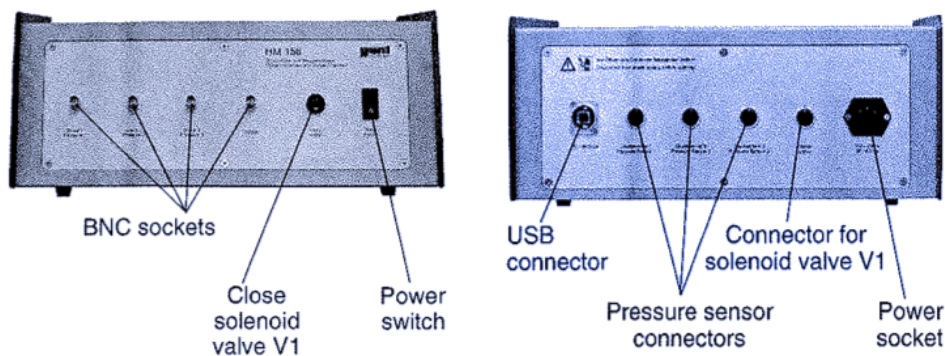


Slika 22. Shematski prikaz baznog modula HM150 i fizikalnog modela HM156 [3]
1 - vodna cilindrična komora, 2 - kontrolna baza, 3 - senzor pritiska PI2, 4 - eksperimentalni dio cijevi za vodni udar, 5 - eksperimentalni dio cijevi za vodnu komoru, 6 - spremnik,

7 - dovodna cijev, 8 - odvodna cijev, 9 - HM150 bazni modul

Na prednjoj strani upravljačke jedinice nalaze se sljedeći priključci i upravljački elementi (Slika 23.):

- 4 BNC utičnice, utičnice za senzor tlaka P1, P2 i P3,
- signali okidača koji se mogu spojiti na osciloskop
- pritisak na gumb ventila zatvara elektromagnetski ventil V1. Što duže traje pritisak na gumb, duže ventil ostaje zatvoren. Preporuka je da ventil bude zatvoren oko 3 sekunde
- prekidač za napajanje se koristi za uključivanje i isključivanje jedinice za kontriranje
- stražnja strana upravljačke jedinice ima priključke za napajanje uređaja i komponenti
- USB priključak za računalo,
- konektori za 3 senzora tlaka,
- priključak za solenoidni ventil V1, te
- glavni strujni adapter.



Slika 23. Dijelovi upravljačke jedinice sa popratnim elementima [3]

Instalacija programa za upravljanje fizikalnim modelom HM156 prilično je jednostavna.

Na računalu kojeg se koristi uz ovaj eksperimentalni fizikalni model instalira se CD sa mjerodavnim računalnim programom za mjerenje i vizualizaciju pojedine fizikalne veličine. Nakon instalacije, program se pokreće, te se odabire jezik sučelja (4 ponuđene varijante jezika). Unutar programa se može definirati eksperiment sa vodnim udarom

ili eksperiment sa oscilacijama vodnih masa u cilindričnoj ili raščlanjenoj vodnoj komori. Ti podaci se kasnije mogu importirati i u neke druge programe, te na njima vršiti detaljnije obrade podataka ili grafičke prikaze ovisnosti pojedinih fizikalnih veličina (npr. u Excelu, Matlabu ili Mathcadu).

5.2. Mjere i uvjeti za pokretanje fizikalnog modela HM156

Prije pokretanja bazne stanice i uređaja treba sprovesti određene korake koje moramo slijediti. Spremnik koji se nalazi na dnu fizikalnog modela (modul HM150) napuni se vodom do približno 10 centimetara ispod gornjeg ruba spremnika, te nakon uključivanja pumpe se otvara ventile za cirkulaciju vode u sustav.

Nakon toga pokrećemo fizikalni model HM 156 te ga spajamo na računalo pomoću USB kabela. Na stražnjoj strani uređaja u konektore uključujemo senzore pritiska PI1, PI2, PI3 te solenoidni ventil V1. Treba obratiti pažnju da se svaki konektor spoji na točno mjesto na osciloskopu. Ukoliko umjesto programa na računalu želimo koristiti osciloskop, njega spajamo pomoću BNC konektora koji se nalazi na prednjoj strani fizikalnog modela HM 156. Kako bi uređaj mogli koristiti što duže vrijeme potrebno ga je održavati, te je tako poželjno vodu u spremniku izmjenjivati jednom tjedno ili 2 puta mjesečno. Također se preporuča da kod dužeg nekorisćenja uređaja vodu ispustimo iz cjelokupnog sustava kako se unutar fizikalnog modela ne bi skupljale alge koje mogu djelovati na neispravna mjerenja. Uređaj se lako može podijeliti na više manjih dijelova što omogućuje lakše spremanje i pomicanje. Prilikom demontaže fizikalnog modela i spajanja dijelova treba voditi računa da se svaki dio spoji sa njegovim odgovarajućim dijelom prema propisanim nacrtima proizvođača.

5.3. Proračun osnovnih fizikalnih veličina

Osnovna načela navedena u nastavku nisu cjelovita, no za provedbu pokusa dovoljno je korištenje osnovnih principa za procjenu vrijednosti koje se očekuju u sustavu rada na fizikalnom modelu HM 156 i njegovom baznom modulu HM150.

5.3.1. *Određivanje brzine zvuka*

Budući da se gustoća tekućina razlikuje ovisno o tlaku, i malena promjena tlaka dp širi se u tekućini kao oblik uzdužnog vala. Prema Laplaceu, brzina širenja male promjene tlaka pod izentropskom kompresijom računa se po sljedećem izrazu:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (39)$$

pri čemu je:

c - brzina zvuka, [m/s]

dp - promjena tlaka tekućine, [Pa]

$d\rho$ - promjena gustoće tekućine, [kg/m³].

Brzina zvuka c na 20 °C iznosi približno 1483 m/s.

5.3.2. *Određivanje periode vala vodnog udara*

Za izračunavanje brzine zvuka c potrebno je poznavati period vala t_L . Period vala t_L je vrijeme koje je potrebno potisnom valu za kretanje između dvije točke, u ovom slučaju između tlačnih senzora PI1 i PI2. Ova vremenska vrijednost može se pročitati iz sučelja računalnog programa koji je namijenjen samom fizikalnom modelu HM156. Perioda vala t_L je iznos na x osi, koja proizlazi iz amplitude (senzora tlaka PI1) do amplitude (senzora tlaka PI2).

5.3.3. *Proračun brzine zvuka*

Nakon poznate vrijednosti periode vala vodnog udara t_L , može se izračunati brzina zvuka prema sljedećoj jednadžbi:

$$c = \frac{l}{t_L} \quad (40)$$

pri čemu je:

c - brzina zvuka, [m/s]

l - udaljenost između senzora pritiska PI1 i PI2 (kod modela HM 156 iznosi 3 m), [m]

t_L - perioda vala vodnog udara, [s].

Periodi vala se iščitavaju iz računalnog programa namijenjenog HM 156 fizikalnom modelu kroz 2 ms. Periode mogu varirati zbog elastične deformacije eksperimentalnog dijela cijevi i neznatnih gubitaka trenja cijevi, tako da se vrijednost 1483 m/s ne može gotovo točno postići u izračunima.

5.3.4. Proračun prirodne frekvencije i oscilacija vodnih masa u vodnoj komori

U pokusu vodne komore može se dokazati da oscilacije vodne mase ne ovise o brzini protoka. Definicije masa se određuju na temelju sljedećih formula (Slika 24.):

$$m_1 = \frac{d^2\pi}{4} * l * \rho \quad (41)$$

$$m_2 = \frac{D^2\pi}{4} * H * \rho \quad (42)$$

$$m = \frac{h * D^2 * \pi * \rho}{4} \quad (43)$$

dok su brzine u cijevnim sustavima definirane kao:

$$v_1 = \frac{D^2}{d^2} * v_2 \quad (44)$$

$$v_2 = \dot{h} \quad (45)$$

Ukupna kinetička energija E_{kin} u sustavu opisana je diferencijalnom jednačbom:

$$E_{kin} = \frac{\pi * \rho}{8} * \left(d^2 * l * \frac{D^4}{d^4} * \dot{h}^2 * + D^2 * H * \dot{h}^2 \right) \quad (46)$$

iz koje se može dobiti izraz za određivanje prirodne frekvencije za dani sustav:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{g}{l * \left(\frac{D^2}{d^2} + H \right)}}}{2 * \pi} \quad (47)$$

U izrazu (47) pojedine fizikalne veličine definiraju:

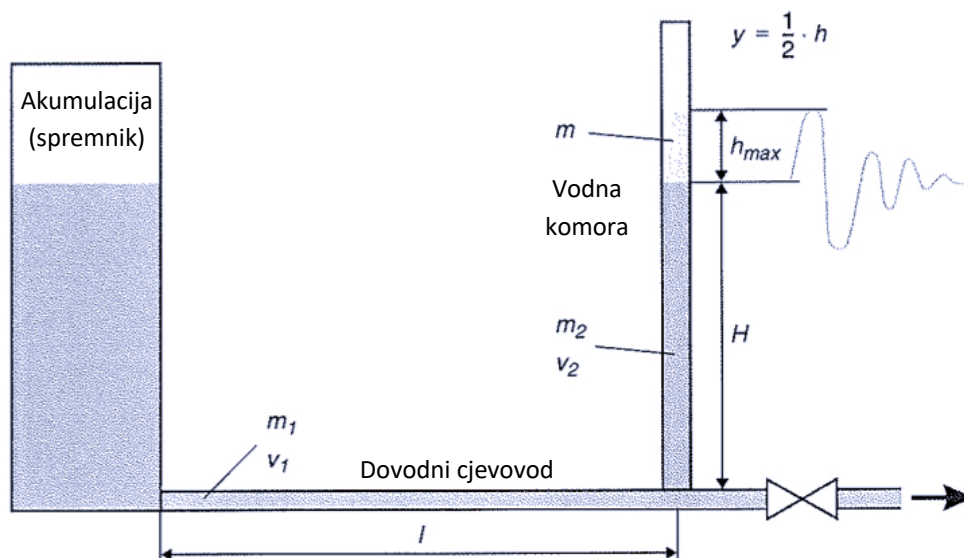
l - duljina cijevi, [m]

d - promjer cijevi, [m]

D - promjer cilindrične vodne komore, [m]

H - visina vode u cilindričnoj vodnoj komori, [m].

Prirodna frekvencija vodne komore ne ovisi o brzini toka. Ova tvrdnja se može dokazati provođenjem eksperimenata s različitim brzinama protoka, a provedena je u nastavku diplomskog rada.



5.4. Primjena fizikalnog modela HM156

Izbor eksperimenata ne zahtijeva cjelovitost, već je namijenjen da bude korišten kao poticaj za vlastite eksperimente. Prikazani rezultati su namijenjeni u nastavne svrhe, kao i za mjerenja i hidrauličke analize u završnim i diplomskim radovima. Ovisno o konstrukciji pojedinih komponenti, eksperimentalnim vještinama i uvjetima okoline, mogu se pojaviti odstupanja u eksperimentima. Ipak, zakoni se mogu jasno pokazati. Na fizikalnom modelu HM 156 može se izvoditi dva eksperimentalna pokusa: a) analiza vodnog udara, te b) analiza oscilacija vodnih masa za određeni tip vodnih

komora (cilindrična ili raščlanjena vodna komora ili određeni modificirani tip vodnih komora opisanih u Poglavlju 2).

5.4.1. Analiza vodnog vala

Cilj pokusa je analiza pojave vodnog udara. Vodni udar se dobiva zatvaranjem ventila V1 u eksperimentalnom dijelu cijevi. Senzori tlaka PI1 i PI2 u eksperimentalnom dijelu cijevi otkrivaju rezultirajuće oscilacije tlaka (Slika 25.).

Kako bi se uspješno provelo ispitivanje potrebno je provesti sljedeće korake prilikom izvođenja ispitivanja, [1]:

1. pokreće se HM 150 osnovni modul i HM 156 fizikalni model
2. na HM 150 osnovnom (baznom) modulu uključuje se glavna sklopka, te posljedično i crpka.
3. na HM 156 fizikalnom modelu starta se prekidač napajanja.
4. zatvara se ventil V4 u potpunosti. Odsječak eksperimentalne cijevi za ispitivanje oscilacija vodnih masa u vodnoj komori je sada isključen.
5. otvora se prigušni ventil V2 u potpunosti. Otvorena je eksperimentalna cijevna sekcija za vodni udar.
6. koristi se prigušni ventil na HM 150 osnovnom modulu i prigušni ventil V2 kako bi se podesila željena brzina protoka, tako da postoji stabilna razina vode u vodnoj komori.
7. za volumetrijsko određivanje protoka ($Q=V/t$) i posljedično brzine toka ($v=Q/A$) u sustavu koristi se štoperica koja za određeni vremenski period daje za sustav određeni volumen cirkulacije vode.

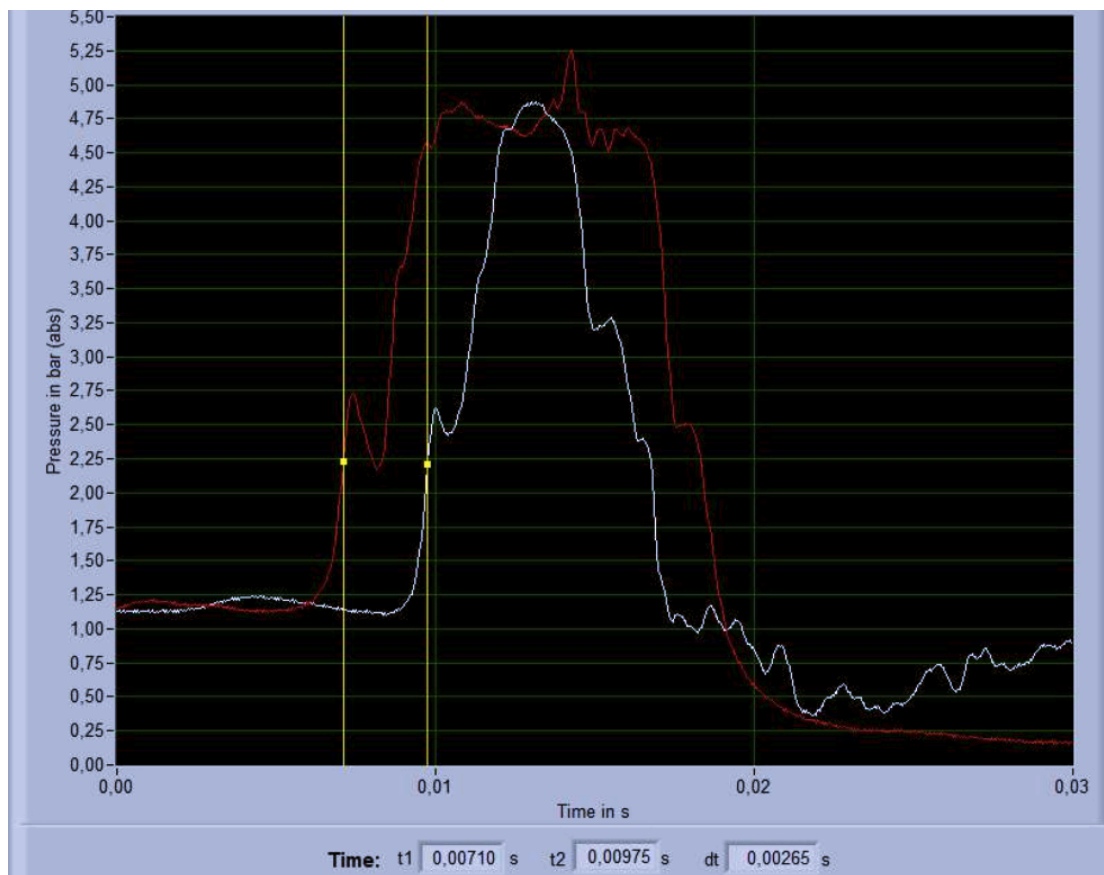
Nakon odrađene pripreme faze kreće se sa provođenjem pokusa sljedećim redom:

1. odabire se u programskom sučelju „Analiza vodnog udara“ („Water hammer“)

2. zatim se odabire gumb "Start". Solenoidni ventil V1 se zatvara i uzrokuje vodni udar. Istodobno, senzori tlaka PI1 i PI2 počinju mjeriti pritiske u cijevnom sustavu. Mjerenje završava nakon otprilike 0,03 s.

3. računalni program prikazuje tlakove mjerene na sensorima tlaka PI1 i PI2 tijekom vremena. Pomoću dva pokazivača unutar samog računalnog programa određuje se razdoblje vodnog udara između tlačnih senzora PI1 i PI2 (vrijednosti t_1 , t_2 i dt). Time se izračunava brzina zvuka u danom cijevnom sustavu pod tlakom koja će biti prikazana u nastavku diplomskog rada.

Nakon provođenja pokusa dobiva se krajnji rezultat prikazan na slici 25..



Slika 25. Analiza vodnog udara na fizikalnom modelu HM156 [3]

5.4.2. Analiza oscilacija vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori

Cilj pokusa je dobivanje oscilacija vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori (Slika 26.). Kuglasti ventil V3 u izlaznoj komori eksperimentalnog dijela cijevi je zatvoren,

čime se stvara vodni udar koji se nastoji smanjiti pomoću vodne cilindrične komore, a senzor tlaka PI3 u eksperimentalnom dijelu cijevi mjeri rezultirajuće oscilacije tlaka.

Kako bi se uspješno provelo eksperimentalno istraživanje potrebno je slijediti naredne korake prilikom izvođenja ispitivanja:

1. pokreće se HM 150 osnovni modul i HM 156 fizikalni model
2. na HM 150 osnovnom (baznom) modulu uključuje se glavna sklopka, te se starta crpka.
3. na HM 156 fizikalnom modelu starta se prekidač napajanja.
4. zatvora se ventil V2 u potpunosti. Odsječak eksperimentalne cijevi za vodni udar je trenutno isključen.
5. otvara se prigušni ventil V4 u potpunosti, te se pomoću kugličnog ventila V3 u potpunosti otvara eksperimentalna cijevna sekcija za cilindričnu vodnu komoru.
6. prigušni ventil na HM 150 osnovnom modulu i prigušni ventil V4 se koristi kako bi se podesila željena brzina toka, tako da se postigne stabilna razina vode u vodnoj komori
7. zatim se podešava ljestvica (mjerna skala) na strani vodne komore tako da je oznaka 0 smještena sa razinom površine vode.
8. koristi se štoperica za volumetrijsko određivanje protoka ($Q=V/t$), odnosno posljedično i brzine toka ($v=Q/A$).

Nakon odrađene pripremne faze kreće se sa provođenjem pokusa sljedećim redom:

1. odabere se u programskom sučelju „Analiza oscilacija vodnih masa“ (eng. Water chamber)
2. vrše se sljedeći koraci u brzom slijedu:

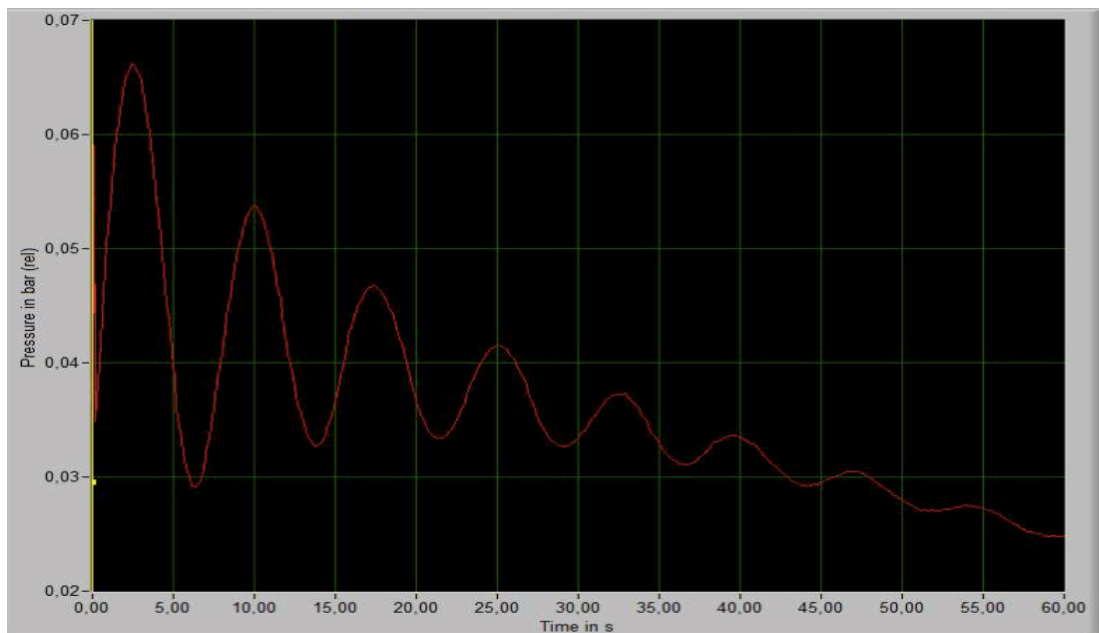
Kliknemo gumb „Start“.

Zatim se brzo zatvori kuglasti ventil V3 u potpunosti.

Trenutno isključujemo pumpu.

Zatvaranjem kuglastog ventila V3 formira se pojava vodnog udara u cijevnom sustavu pod tlakom. Tlak se mjeri na senzoru tlaka PI3. Mjerenje završava nakon 60 sekundi. Pokretanje vala može se promatrati kao oscilacija razine vode u cilindričnoj vodnoj komori.

3. nakon završetka eksperimentalnog mjerenja, tlakovi mjereni na senzoru tlaka PI3 se prikazuju kroz promjenu vremena. Nakon provođenja eksperimentalnog pokusa dobiva se krajnji rezultat koji je prikazan na slici 26.

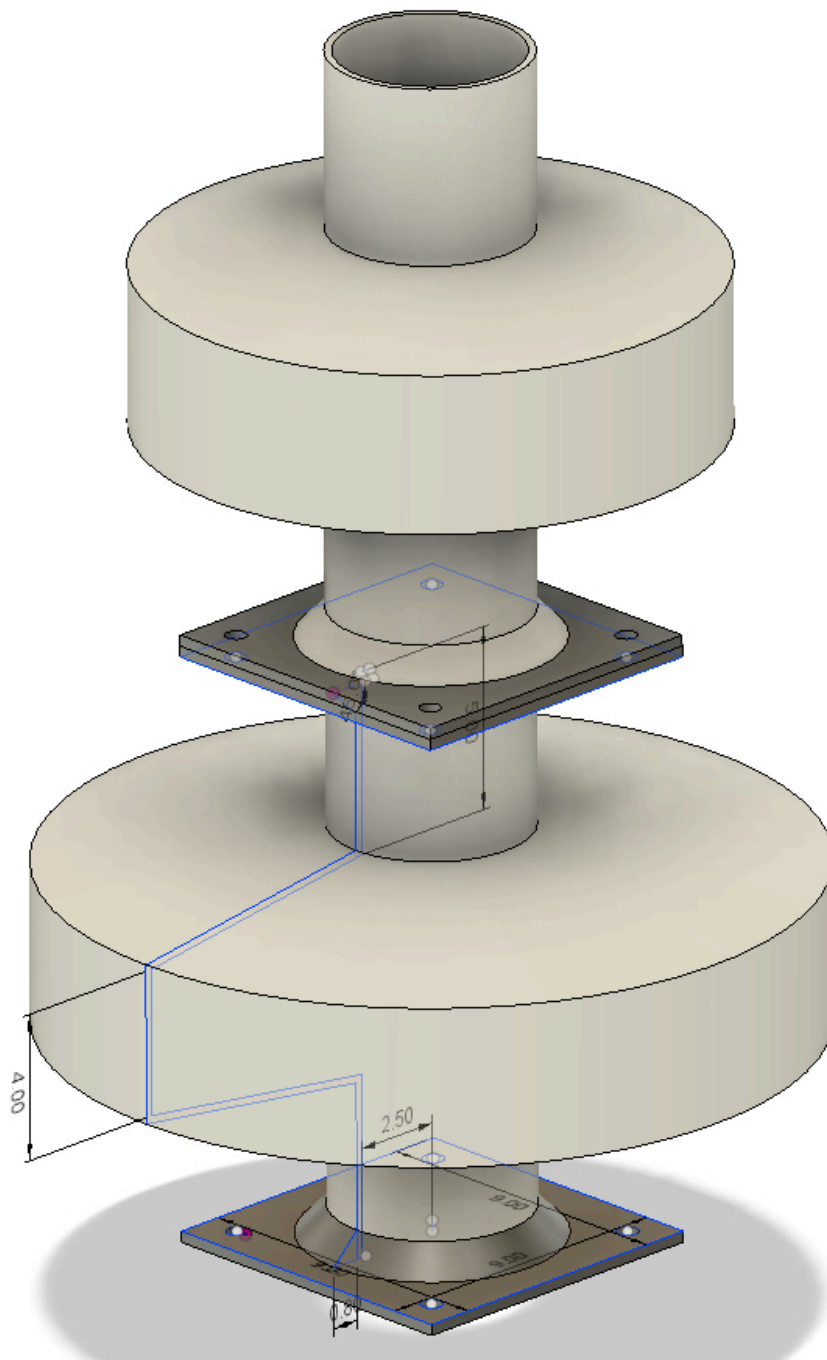


Slika 26. Oscilacije vodnih masa u cilindričnoj vodnoj komori [3]

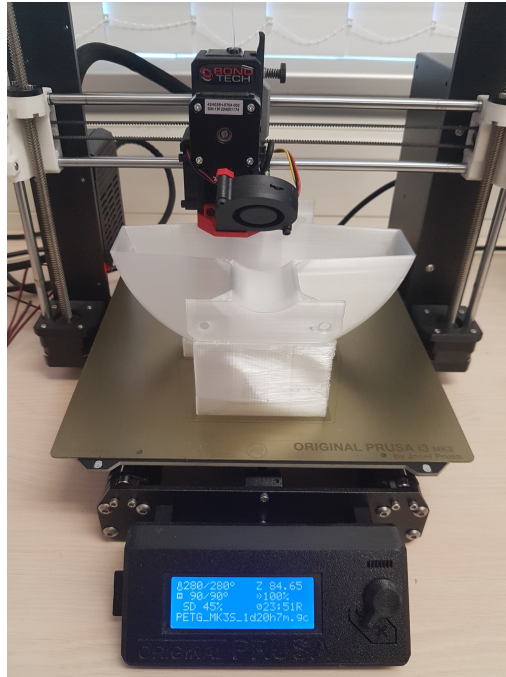
5.5. Raščlanjena vodna komora

Standardni fizikalni model HM156 za provedbu eksperimentalnih ispitivanja ima ugrađenu cilindričnu vodnu komoru. U sklopu ovog diplomskog rada izrađena je dodatno raščlanjena vodna komora kako bi se iste mogle i usporediti kroz fizikalne parametre, odnosno uvidjeti mogućnost smanjenja prigušenja oscilacija vodnih masa kroz novoizgrađenu vodnu komoru. Kako raščlanjenu vodnu komoru za ovaj model nije moguće kupiti ista se morala izraditi. Sve je započelo uzimanjem mjera modela HM156 te nakon toga projektiranje i modeliranje vodne komore. Modeliranje je izvršeno u računalnom programu Autodesk Fusion 360 (Slika 27.). Nakon samog 3D modeliranja vodna komora je printana uz pomoć 3D printera kojeg Građevinski fakultet u Rijeci ima u sklopu svojeg hidrotehničkog laboratorija (Slika 28.) Dimenzije radne

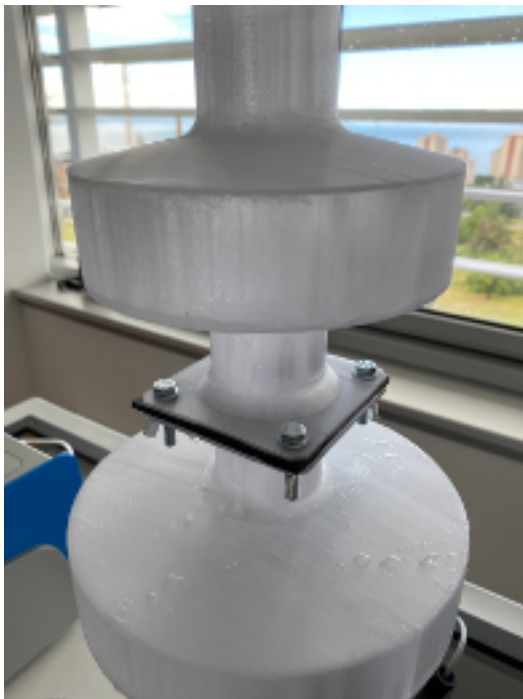
sekcije samog 3D printera su ograničene, te je vodna komora projektirana u tri zasebna djela koji su zatim spajani uz pomoć matica i vijaka (Slika 29.). Za 3D printanje je korišten proziran PLA materijal. Kako bi se dobila dobra prozirnost modela bilo je potrebno 3D printanje sa što manjom debljinom sloja (odnosno u konačnici same stjenke vodne komore), odnosno 3D printanje sa velikom rezolucijom. Kako se povećava rezolucija, tako se povećava i vrijeme 3D printanja koje je na kraju za cijelu vodnu komoru iznosilo oko 80 sati. Sama raščlanjena vodna komora se sastoji od dva proširenja, te središnjih dijelova promjera 4 cm. Donje proširenje vodne komore ima promjer od 20 cm, dok gornje proširenje ima promjer od 15 cm. Debljina stjenke iznosi 2 mm, dok je visina komore otprilike 40 cm.



Slika 27. Raščlanjena vodna komora modelirana u Autodesk fusion 360 programu [4]



Slika 28. 3D printanje vodne komore na 3D printeru (Građevinski fakultet Rijeka, hidrotehnički laboratorij) [4]



Slika 29. Detalj spoja komore maticama i vijcima (Hidrotehnički praktikuum, Građevinski fakultet u Rijeci) [4]

6. ANALIZA PROVEDENIH ISPITIVANJA NA FIZIKALNOM MODELU HM156

6.1. Analiza vodnog udara

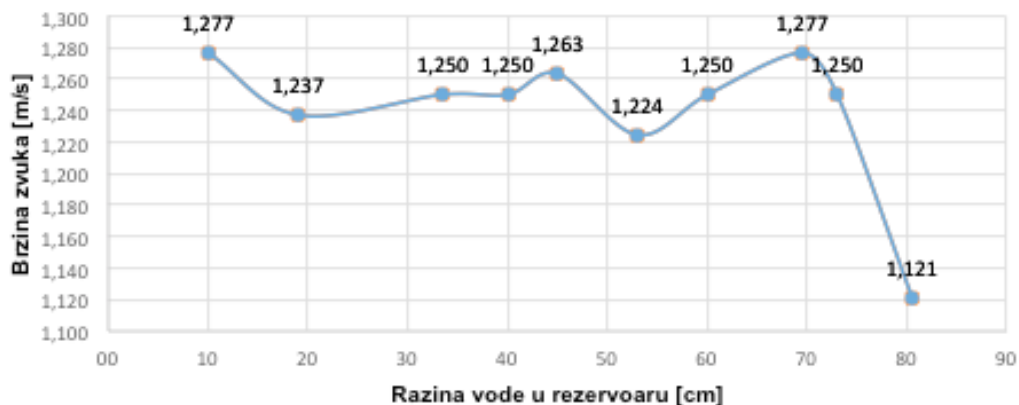
U tablici 1. su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja provedenih u hidrotehničkom praktikumu Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci na fizikalnom modelu HM156. Tijekom samog ispitivanja vodnog udara provelo se 10 pokusa. Svaki od tih pokusa imao je različite ulazne podatke, kao što su različite razine vode u cilindričnoj vodnoj komori, različite brzine toka vode i slično (Tablica 1.).

Tablica 1. Rezultati ispitivanja na eksperimentu vodnog udara [4]

	Temperatura vode	Razina vode u spremniku	Razina vode u cilindričnoj vodnoj komori	Protok
	°C	cm	cm	l/s
POKUS 1	18	80,5	63	0,188
POKUS 2	18	60	43	0,164
POKUS 3	18	69,5	53	0,222
POKUS 4	18	73	56	0,2
POKUS 5	18	45	28	0,172
POKUS 6	18	53	36	0,178
POKUS 7	18	40	23	0,149
POKUS 8	18	19	2	0,136
POKUS 9	18	10	0	0,125
POKUS 10	18	33,5	16	0,135

t1	t2	dt	Duljina između dva senzora tlaka PI1 i PI2	Brzina zvuka
s	s	s	m	m/s
0,0027	0,00265	0,002675	3	1121,5
0,00235	0,00245	0,0024	3	1250,0
0,00225	0,00245	0,00235	3	1276,6
0,00235	0,00245	0,0024	3	1250,0
0,0023	0,00245	0,002375	3	1263,2
0,00245	0,00245	0,00245	3	1224,5
0,00235	0,00245	0,0024	3	1250,0
0,0024	0,00245	0,002425	3	1237,1
0,00225	0,00245	0,00235	3	1276,6
0,00235	0,00245	0,0024	3	1250,0

Kao krajnji rezultat ispitivanja dobivaju se grafički prikazi iz kojih se mogu iščitati razne ovisnosti pojedinih fizikalnih veličina, odnosno kako jedna fizikalna veličina varira u odnosu na drugu (Slike 30. do 34.).



Slika 30. Prikaz odnosa brzine zvuka i razine vode u rezervoaru [4]

Analizom podataka sa slike 30. može se ustanoviti kako brzina zvuka ima približno jednake vrijednosti za različite razine vode u rezervoaru, te prema tome možemo zaključiti kako brzina zvuka ne ovisi o razini vode u rezervoaru.



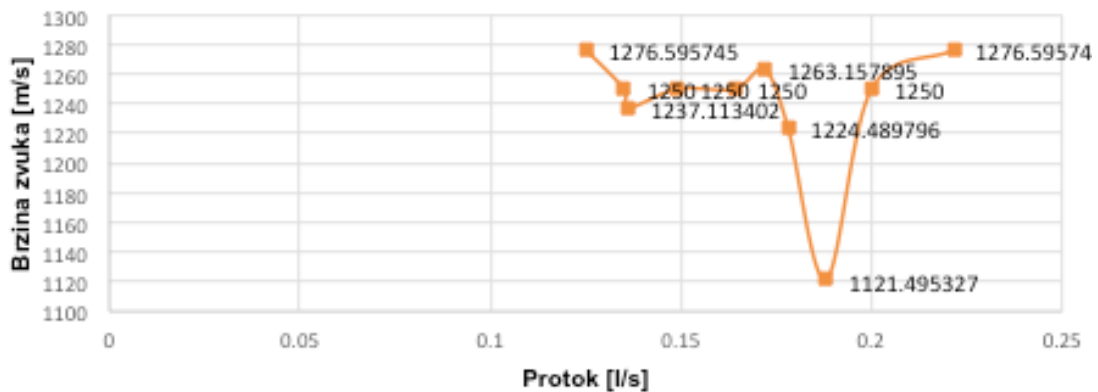
Slika 31. Prikaz odnosa brzine i razine vode u cilindričnoj vodnoj komori [4]

Analizom podataka sa slike 31. može se ustanoviti kako brzina zvuka ima približno jednake vrijednosti za različite razine vode u cilindričnoj vodnoj komori, te se prema tome može zaključiti kako brzina zvuka ne ovisi o razini vode u vodnoj komori.



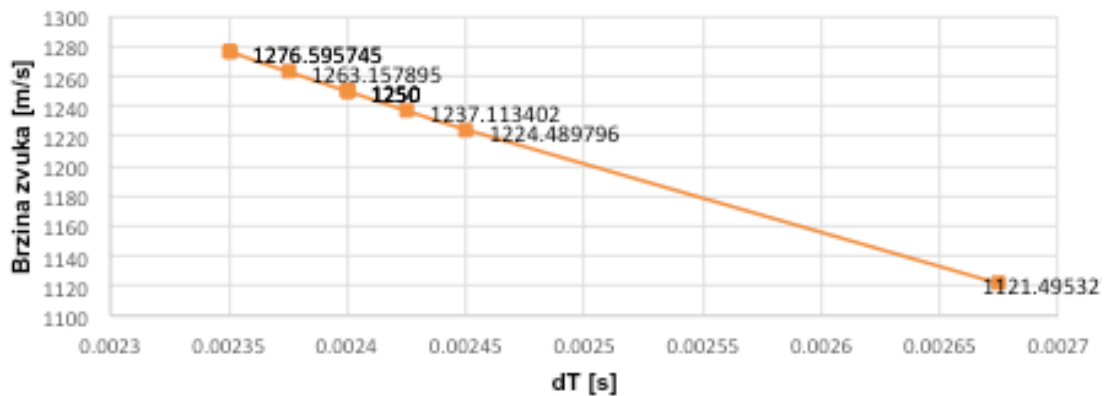
Slika 32. Prikaz odnosa brzine zvuka i razine vode u rezervoaru/vodnoj komori [4]

Analizom podataka sa slike 32. jasno se može vidjeti kako brzina zvuka ima iste varijacije kako sa razinom vode u rezervoaru, tako i sa razinom vode u cilindričnoj vodnoj komori. Prema tome, može se zaključiti kako su razine vode u spremniku i cilindričnoj vodnoj komori linearno povezane.



Slika 33. Prikaz odnosa brzine zvuka i protoka [4]

Iz analize podataka prema slici 33. može se vidjeti kako brzina zvuka ima različite vrijednosti za različite protoke (iako te vrijednosti drastično ne odskaku), te se može zaključiti kako brzina zvuka ovisi o protoku.



Slika 34. Prikaz odnosa brzine zvuka i promjene vremena između dviju izmjerenih vrijednosti tlakova na sensorima tlaka PI1 i PI2 [4]

Analizom podataka sa slike 34. vidi se kako brzina zvuka ima različite vrijednosti za različite promjene vremena između dviju izmjerenih vrijednosti tlakova dobivenih na sensorima tlakova PI1 i PI2 na razmaku od 3 m. Stoga se može zaključiti kako brzina zvuka ovisi o promjeni gore navedenog vremena, odnosno što nam je promjena vremena veća to nam je brzina zvuka manja.

6.2. Analiza oscilacija vode u cilindričnoj i raščlanjenoj vodnoj komori

U nastavku rada su prikazani rezultati ispitivanja provedenih u hidrotehničkom praktikumu na fizikalnom modelu HM156. Kao krajnji rezultat ispitivanja dobiveni su grafički prikazi iz kojih se mogu vidjeti usporedbe dviju vodnih komora: cilindrične i raščlanjene vodne komore.

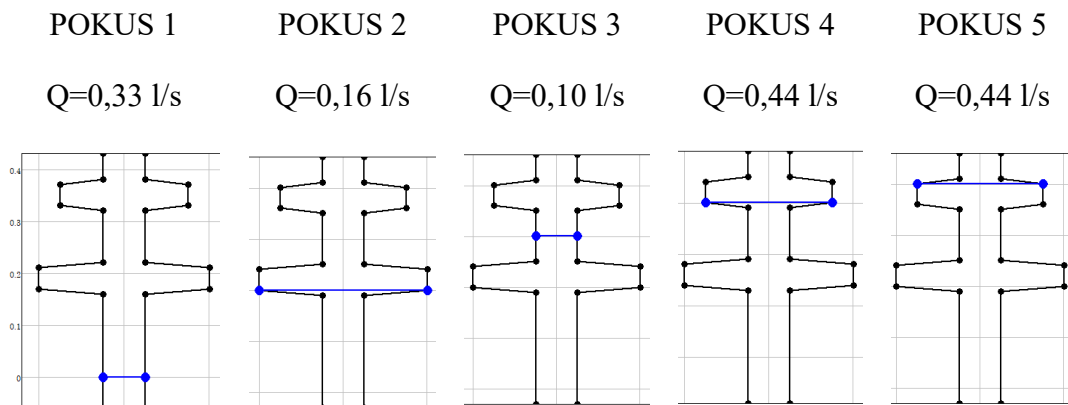
Na slici 35. se može uočiti kako je za isti proračunati volumen, visina raščlanjene vodne komore znatno niža, odnosno u modelima koji su se koristili prilikom eksperimentalnog ispitivanja isti volumen od 2 litre nalazi se u raščlanjenoj komori sa visinom od 40 cm, dok taj isti volumen u cilindričnoj vodnoj komori daje visinu od 105 cm. Zbog toga se danas i primjenjuju raščlanjene vodne komore, jer dolazi do znatne uštede materijala prilikom iskopa istih.



Slika 35. Prikaz raščlanjene (lijevo) i cilindrične vodne komore (desno) [4]

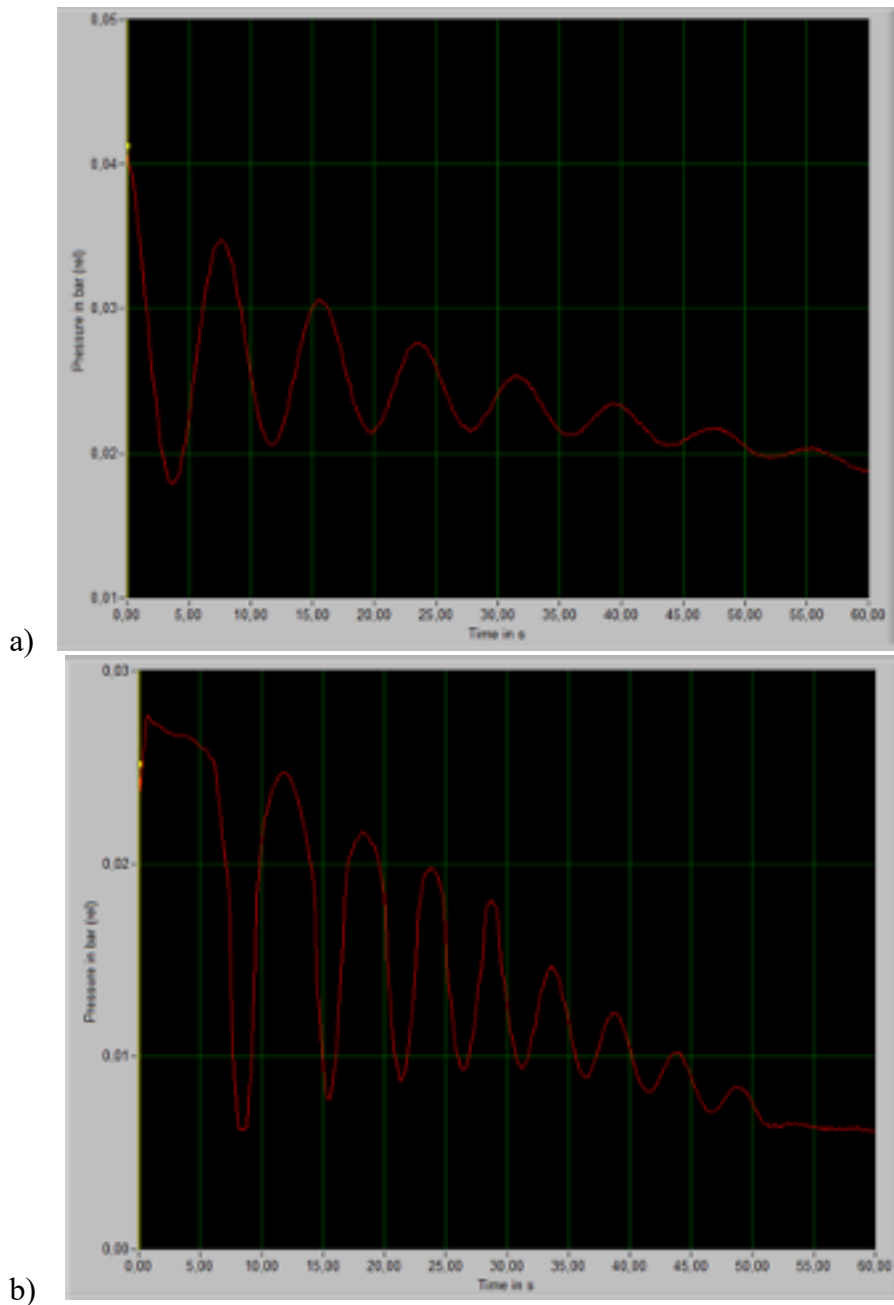
U hidrotehničkom praktikumu je provedeno ukupno 10 eksperimentalnih ispitivanja, 5 ispitivanja na cilindričnoj vodnoj komori, te 5 ispitivanja na raščlanjenoj vodnoj komori. Ispitivanja su sprovedena sa približno istim vrijednostima pojedinih fizikalnih veličina (protoci, razine vode u spremniku i sl.) kako bi se u konačnici postigla što preciznija usporedba fizikalnih modela vodnih komora.

Svaki od 5 pokusa sproveden je sa različitom razinom vode u vodnoj komori, odnosno svaka razina se nalazi u jednom od karakterističnih presjeka komore. Također, kod eksperimentalnih pokusa je varirao i protok. Položaj razina vode u odnosu na vodnu komoru, te protoke korištene u ispitivanjima prikazane su na slici 36.



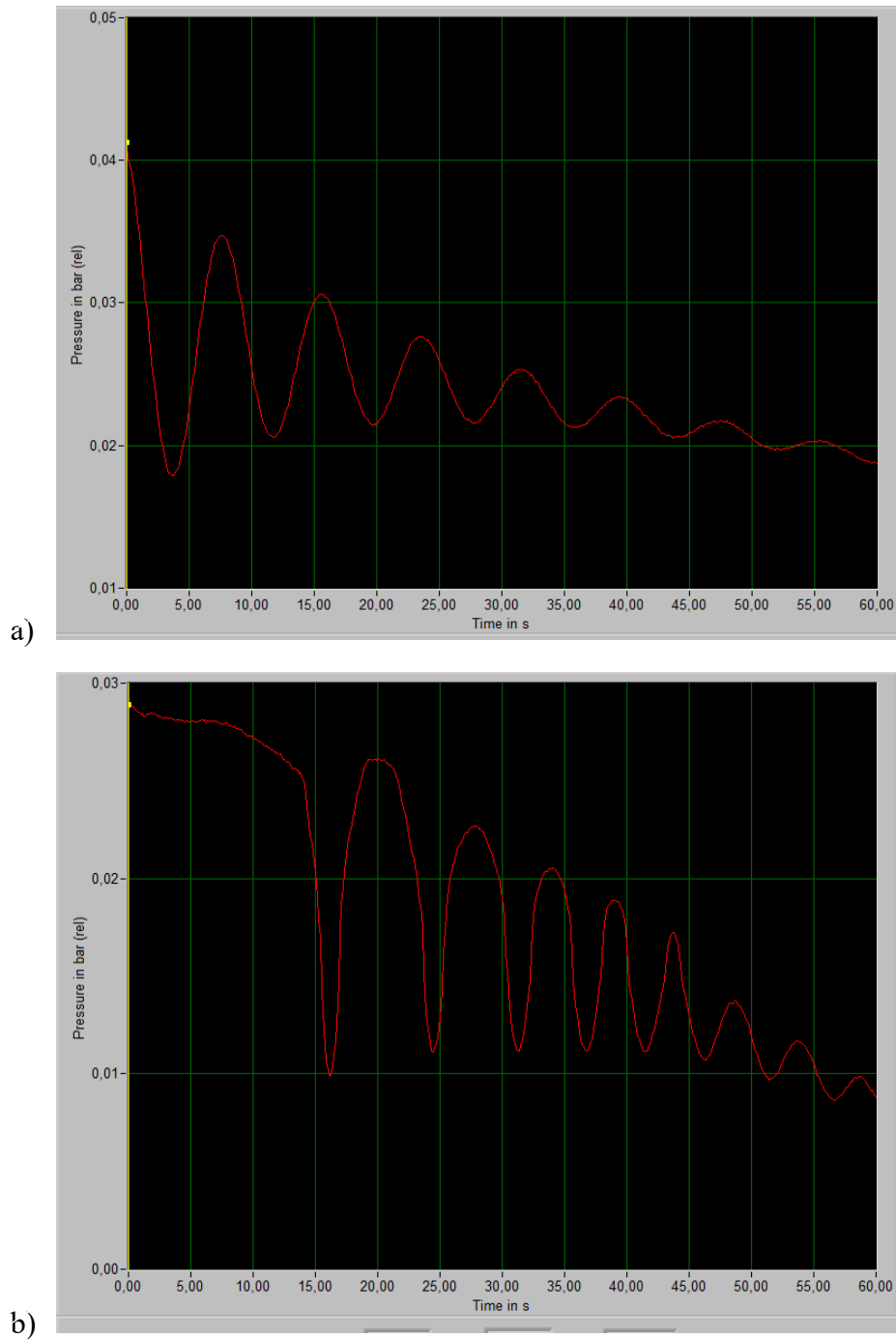
Slika 36. Prikaz početnih razina vode u raščlanjenoj vodnoj komori i protoka za pojedini eksperimentalni pokus [4]

Na slici 37. prikazana je usporedba cilindrične i raščlanjene vodne komore kada se razina vode nalazi u početnom djelu raščlanjene vodne komore. Većina oscilacija vodnih masa događa se unutar užeg dijela vodne komore koji su jednakog promjera na oba dijela vodne komore, te se dobiva približno isti rezultati. No ipak, na samom početku voda ulazi u prošireni dio koji je omogućio brže „spljoštenje“ vala, čime je skraćeno vrijeme oscilacija vodnih masa za 10 sekundi u odnosu na cilindričnu vodnu komoru. Također, vidi se i razlika u maksimalnoj visini razine vode do koje se je voda popela.



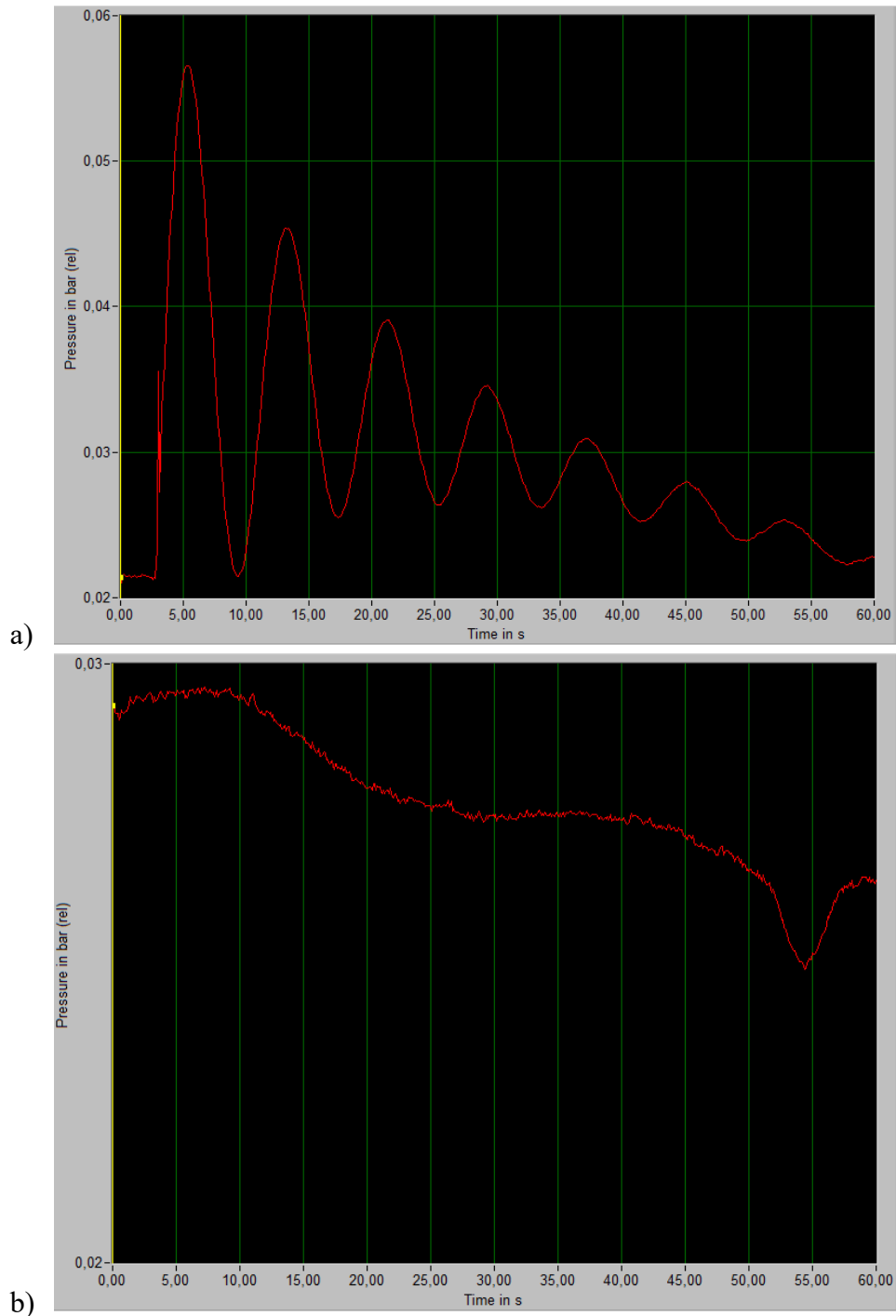
Slika 37. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 1 [4]

Na slici 38. prikazana je usporedba raščlanjene i cilindrične i vodne komore kada se razina vode u vodnoj komori nalazi pri samom ulazu u prošireni dio. Iz donjeg grafičkog prikaza može se uočiti kako se razina vode u vodnoj komori odmah „spljoštila“ (sa malim oscilacijama vodnih masa) odmah pri ulasku u prošireni dio raščlanjene vodne komore. Zbog toga dolazi do skraćenja trajanja oscilacija vodnih masa. Kod ovog slučaja razine oscilacija vodnih masa smanjene su za približno 50 % u odnosu na cilindričnu vodnu komoru.



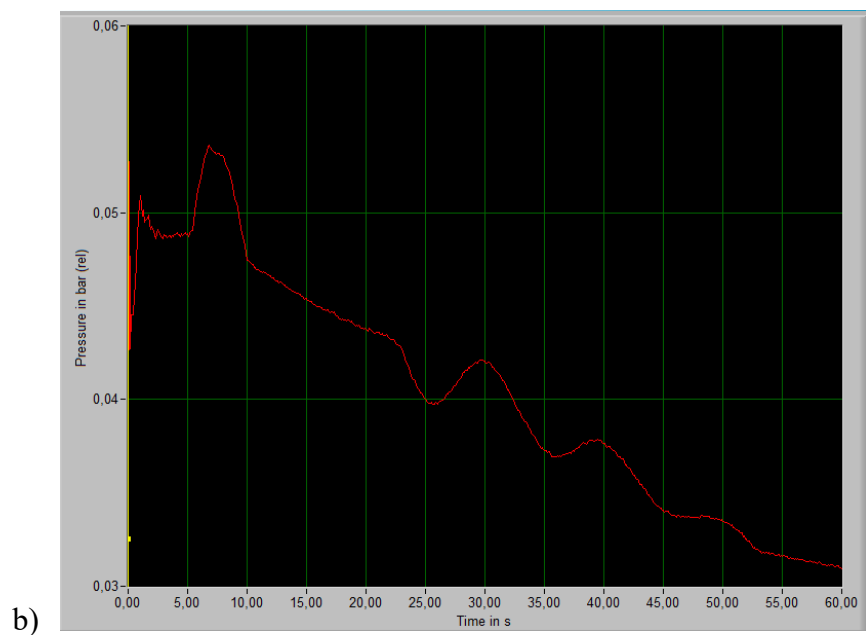
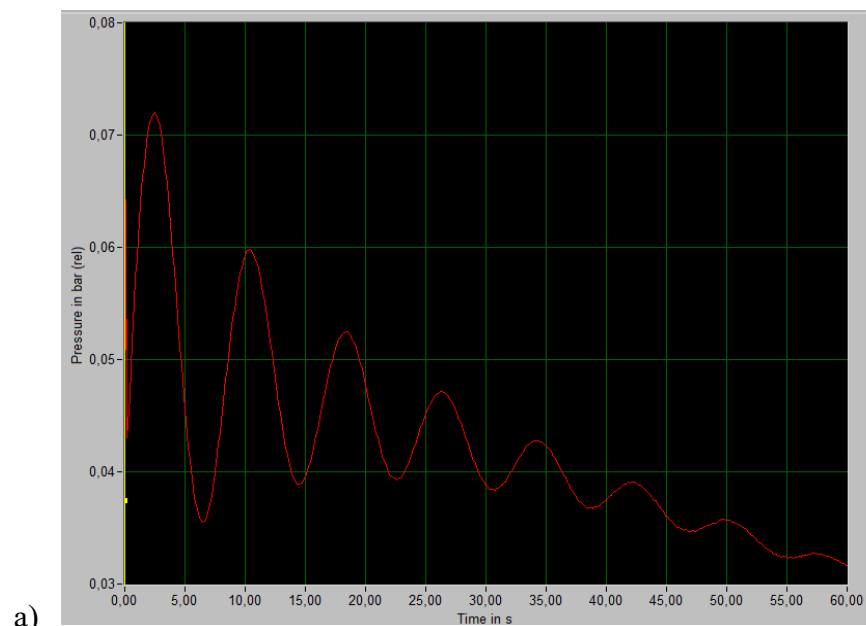
Slika 38. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 2 [4]

Na slici 39. prikazana je usporedba cilindrične i raščlanjene vodne komore kada se razina vode u raščlanjenoj vodnoj komori nalazi u prvom dijelu proširenja raščlanjene vodne komore. U ovom slučaju dolazi do najmanje oscilacije razina voda u vodnoj komori iz razloga što se oscilacije razine vode odvijaju kroz prošireni dio vodne komore koja ima veliku tlocrtnu površinu. Oscilacije razina vode u raščlanjenoj vodnoj komori se pojavljuju unutar visinskog odstupanja od 5 cm, dok kod cilindrične vodne komore iste su u rasponu od 30 cm, odnosno otprilike su 6 puta veće.



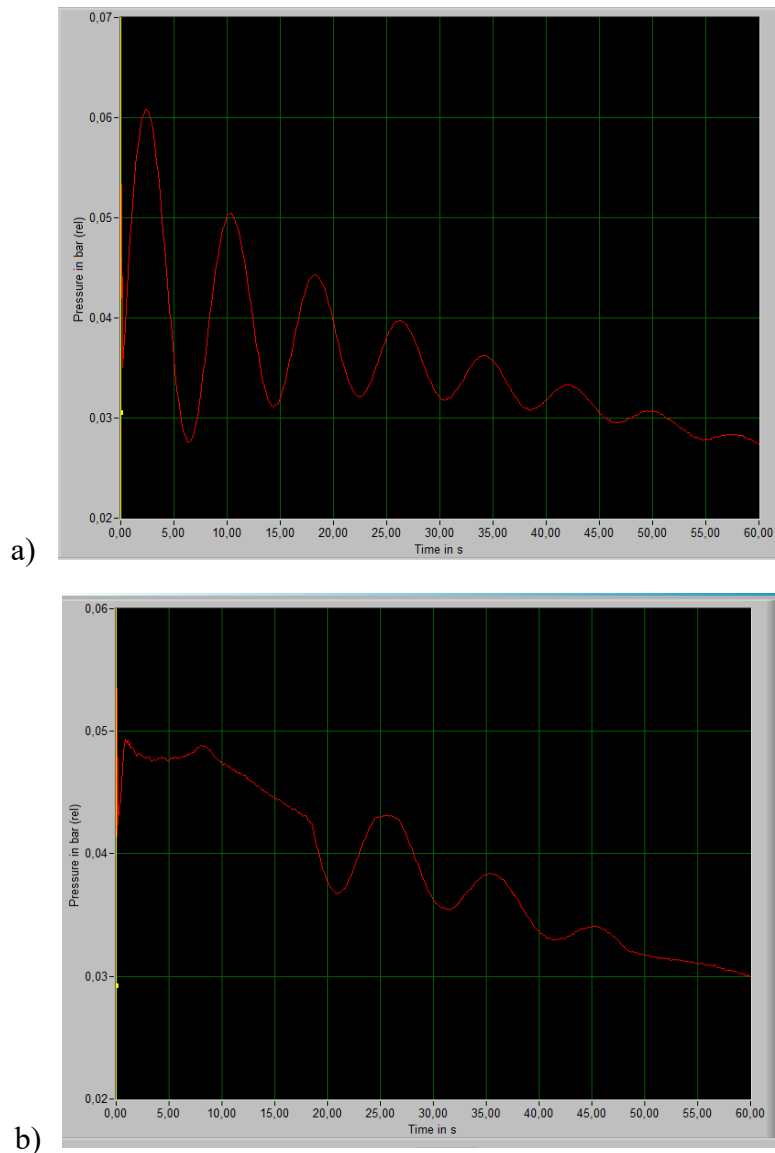
Slika 39. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 3 [4]

Na slici 40. prikazana je usporedba cilindrične i raščlanjene vodne komore kada se razina vode u vodnoj komori nalazi između prvog i drugog dijela proširenja u vodnoj komori. Upravo zbog te pozicije pojavljuje se specifični izgled grafičkog prikaza (Slika 40.b)). Prvo se pojavljuje „sploštenje“ oscilacija razina vode u vodnoj komori koje nastaje kod ulaska vode u prošireni dio, a zatim kada se voda spusti ispod proširenog dijela vodne komore dolazi do vrlo sličnih oscilacija vodnih masa kao kod cilindrične vodne komore. To se pojavljuje zbog istog oblika vodnih komora. Na kraju grafičkog prikaza, kada voda ulazi u donji prošireni dio raščlanjene vodne komore dolazi do ponovnog „spljoštenja“ krivulje, odnosno razine vode u njoj.



Slika 40. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 4 [4]

Na slici 41. prikazana je usporedba cilindrične i raščlanjene vodne komore kada se razina vode nalazi između prvog i drugog dijela proširenja raščlanjene vodne komore. Upravo zbog te pozicije dolazi do specifičnog izgleda grafičkog prikaza na slici 41.b). Prvo se pojavljuje „spljoštenje“ oscilacija razina vode u raščlanjenoj vodnoj komori koje nastaje kod ulaska vode kod proširenog dijela, a zatim, kada se voda spusti ispod dijela proširenja pojavljuju se gotovo slične oscilacije vodnih masa (razina vode) kao kod cilindrične vodne komore. Razlog tome su približno iste tloctne površine vodnih komora. Pri ulasku vode u donji prošireni dio raščlanjene vodne komore dolazi do ponovnog „sploštenja“ krivulje (Slika 41.b)).



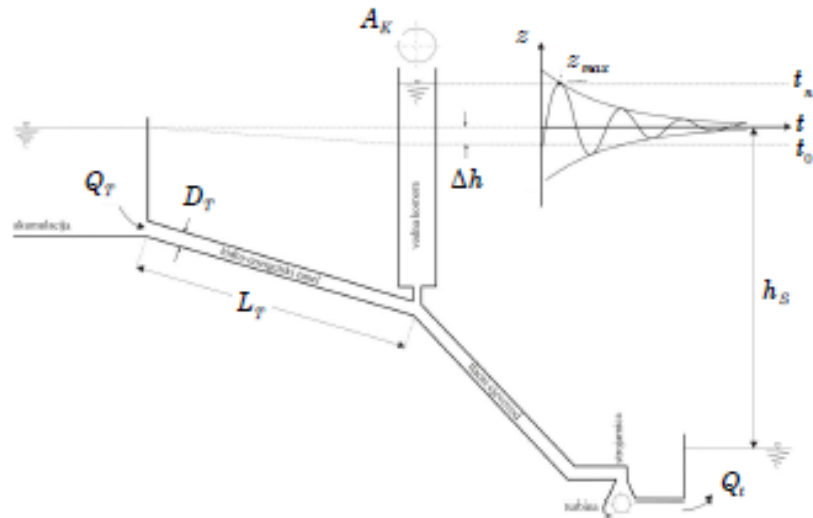
Slika 41. Oscilacije vodnih masa kod a) cilindrične i b) raščlanjene vodne komore za eksperimentalni pokus 5 [4]

Ako se pomno promotre dobiveni rezultati može se zaključiti kako bez obzira na protok ili položaj početne razine vode u vodnoj komori, raščlanjena vodna komora uvijek smanjuje oscilacije vodnih masa i to u kraćem vremenskom intervalu i sa manjom visinskom razlikom u pogledu na cilindričnu vodnu komoru. Iz toga se može konstatirati kako je opravdana današnja sve veća primjena raščlanjenih vodnih komora u praksi, pretežno kod turbinskih postrojenja.

6.3. Usporedba fizikalnog i računalnog modela za oscilacije vodnih masa

Nakon što je provedena hidraulička analiza kroz eksperimentalne pokuse na fizikalnom modelu HM156, dodatno je provedena usporedba tako dobivenih podataka (na dva ista eksperimentalna pokusa) sa računalnim modelom u programu Mathcad 15 kojega je izradio izv. prof. dr. sc. Vanja Travaš [9]. U program se unose dimenzije raščlanjene vodne komore, dimenzije fizikalnog modela HM156 (promjeri cijevi, razmak između spremnika), protok te početnu razinu vode u vodnoj komori. Zatim se pokreće analiza podataka, te se kao rezultat dobiva grafički prikazi oscilacija razina vode po visini vodne komore kroz određeno vrijeme. Na slici 42. prikazan je računarski algoritam u programu Mathcad 15 kojim se računaju oscilacije vodnih masa u raščlanjenoj vodnoj komori. U algoritmu su prikazane sve jednadžbe i funkcije koje su potrebne za dobivanje rezultata. Također zelenim oznakama prikazane su varijabilne veličine odnosno veličine koje se drugačije za svaki eksperimentalni pokus. Geometrija fizikalnog modela HM156 koji je obrađen u programu je definirana sljedećim veličinama: duljina dovodnog cjevovoda $L_f=5,85\text{m}$, promjer dovodnog cjevovoda $D_f=0,026\text{ m}$, apsolutna hrapavost dovodnog tunela (ε_f) $E_f=0,001\text{ mm}$, promjer protočne površine na turbini $D_s=0,026\text{ m}$ te statička razina između razine vode u akumulaciji i na izlazu iz strojarnice $h_s=0,255\text{ m}$. Dobiveni grafički prikazi su uspoređeni sa istim grafičkim prikazima koji je dobiven pri fizikalnom modelu HM156. Kod oba grafička prikaza se vide manja odstupanja koja su posljedica gubitaka i manjih razlika u podacima između fizikalnog i računalnog modela. U nastavku je dana usporedba grafičkih prikaza za oba modela za 2 eksperimentalna pokusa izvršena kroz fizikalno modeliranje (Slike 42. i 43.).

- ➔ koeficijent dinamičke viskoznosti vode pri temperaturi od 10°C $\mu = 1.307 \cdot 10^{-3}$ [Pa s]
- ➔ gustoća vode $\rho = 1000$ [kg/m³]



Slika 42. Računarski algoritam za izračun oscilacija vodnih masa u Mathcadu 15 [9]

	promjer dovodnog tunela	$D_T := 0.026$	[m]	
	dužina dovodnog tunela	$L_T := 5.85$	[m]	
	apsolutna hrapavost dovodnog tunela	$\varepsilon_T := 0.001$	[mm]	
				konverzija dimenzija $\frac{\varepsilon_T}{1000} := \varepsilon_T 0.001$ [m]
	protočna površina dovodnog tunela	$A_T := \frac{D_T^2 \cdot \pi}{4} \rightarrow 0.00$	[m ²]	
	relativna hrapavost stijenki dovodnog tunela	$k_T := \frac{\varepsilon_T}{D_T} \rightarrow 0.0000385$	[m]	
	promjer cijevi na ulazu ustrojarnicu	$D_S := 0.026$	[m]	
	broj turbina	$n_{turbina} := 1$		
	protočna površina cijevi na izlazu iz turbine	$A_S := \frac{D_S^2 \cdot \pi}{4} n_{turbina} \rightarrow 0.00$	[m ²]	
	statička razlika razina gornje i donje vode	$h_g := 0.233$	[m]	
	Coriolis-ov koeficijent	$\alpha := 1.15$	[1]	ubrzanje sile teže
	tolerancija za definiranje uvjeta konvergencije	$tol := 10^{-15}$	[1]	$g := 9.81$ [m/s ²]

lijevi bok		desni bok			
	$xl_0 := -0.025$	$xl_0 := 0$		$xd_0 := -0.025$	$sd_0 := 0$
	$xl_1 := -0.025$	$sl_1 := 0.22$		$xd_1 := -0.025$	$sd_1 := 0.22$
	$xl_2 := -0.1$	$sl_2 := 0.23$		$xd_2 := -0.1$	$sd_2 := 0.23$
	$xl_3 := -0.1$	$sl_3 := 0.27$		$xd_3 := -0.1$	$sd_3 := 0.27$
	$xl_4 := -0.025$	$sl_4 := 0.28$		$xd_4 := -0.025$	$sd_4 := 0.28$
	$xl_5 := -0.025$	$sl_5 := 0.38$		$xd_5 := -0.025$	$sd_5 := 0.38$
	$xl_6 := -0.075$	$sl_6 := 0.39$		$xd_6 := -0.075$	$sd_6 := 0.39$
	$xl_7 := -0.075$	$sl_7 := 0.43$		$xd_7 := -0.075$	$sd_7 := 0.43$
	$xl_8 := -0.025$	$sl_8 := 0.44$		$xd_8 := -0.025$	$sd_8 := 0.44$
	$xl_9 := -0.025$	$sl_9 := 0.49$		$xd_9 := -0.025$	$sd_9 := 0.49$

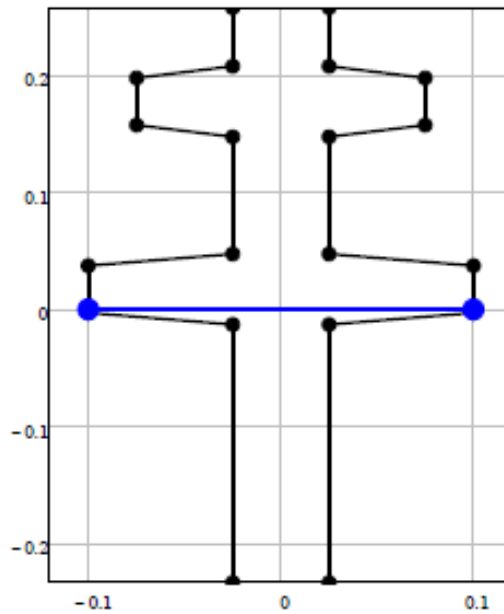
Slika 42. Računarski algoritam za izračun oscilacija vodnih masa u

Mathcadu 15, nastavak [9]

→ $h_{mironjanja} = 0.233$

ENKAPSULACIJA - interpolacija stranica komore

ENKAPSULACIJA - prikaz vodne komore



→ promjer cilindrične vodne komore $D_K(z) := f_{xd}(z) - f_{xt}(z)$ [m]

☀ površina vodne komore $A_K(z) := \frac{D_K(z)^2 \cdot \pi}{4}$ [m²]

☀ $A_{K_sr} := \left| \begin{array}{l} A_{K_sr} \leftarrow 0 \\ cnt \leftarrow 0 \\ \text{for } z = 0, 0.1 \dots \max(Z_d) \\ \left| \begin{array}{l} A_{K_sr} \leftarrow A_{K_sr} + A_K(z) \\ cnt \leftarrow cnt + 1 \end{array} \right. \\ \frac{A_{K_sr}}{cnt} \end{array} \right.$ → $n\Delta t_{pseudo} = 50$

Slika 42. Računarski algoritam za izračun oscilacija vodnih masa u

Mathcadu 15, nastavak [9]

- ☀️ promjer ulaza u vodnu komoru $D_U := x_{d1} - x_{l0}$ [m]
 - ➡️ koeficijent lokalnih gubitaka na ulazu $\zeta_K := 1$ [1]
 - ☀️ površina ulaza u vodnu komoru $A_U := \frac{D_U^2 \cdot \pi}{4} \rightarrow 0.001963495408494$ [m²]
 - ➡️ vrijeme unutar kojeg se analizira tok $t_{analize} := 30$ [s]
 - ☀️ period oscilacija $T_{aproximacija} := 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{L_T \cdot A_U}{g \cdot A_T}}$ $T_{aproximacija} = 9.33$ [s]
 - ➡️ broj vremenskih koraka Δt unutar perioda T $n \Delta t_{period} := 500$ [1]
 - ☀️ vremenski korak $\Delta t := \frac{T_{aproximacija}}{n \Delta t_{period}} \rightarrow 0.02$ [s]
 - ☀️ broj vremenskih koraka $n \Delta t := \text{round}\left(\frac{t_{analize}}{\Delta t}\right) \rightarrow 1608$ [1]
 - ➡️ $t0 := 0$ $postotak_otvorenosti_u_t0 := 0$ [%]
 - ➡️ $t1 := 60$ $postotak_otvorenosti_u_t1 := 0$ [%]
 - ➡️ $t2 := 60$ $postotak_otvorenosti_u_t2 := 100$ [%]
 - ➡️ $t3 := t_{analize}$ $postotak_otvorenosti_u_t3 := 100$ [%]
- $t := 0 .. n \Delta t$



ENKAPSULACIJA - isti algoritam kao i ranije

- ☀️ konvergencija varijable z $z_{pocetno} := 0.233$ $z_{pocetno} = 0.233$ [m]

Slika 42. Računarski algoritam za izračun oscilacija vodnih masa u Mathcadu 15, nastavak [9]

konvergencija varijable QT $Q_{pocetno} = 0.00025$ $Q_{pocetno} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$

```

rezultati :- "inicijalizacija "
Q0T ← Qpocetno
Q0K ← 0
z0 ← zpocetno
hrazlika ← hs + zpocetno
for n ← 0 .. nΔt
  " protok u strojarnici "
  Q0S ← AS · β · zatvaranje_n · √(2 · g · hrazlika)
  vS ← Q0S / AS
  " brzina u dovodnom tunelu "
  vT ← Q0T / AT
  " Darcy-ev koeficijent trenja "
  RE ← (ρ · |vT| · DT) / μ
  λ ← 0 if RE = 0
      64 / RE if RE > 0 ∧ RE ≤ 2300
      [ -1.8 · log( (6.9 / RE) + (εT / 3.7) ) ]-2 if RE > 2300
  " razina vode u vodnoj komori "
  ΔQ ← (Q0T - Q0S) / (nΔt_pseudo)
  " algoritam za postepeno punjenje komore "
  for t_pseudo ← 1 .. nΔt_pseudo
    zt ← zt + (Δt / AK(zt)) · ΔQ
  " protok u dvovodnom tunelu "
  QtT ← (ε · AT · Δt / LT) · [ -(zt + z0) / 2 - ξK · (Q0K / (2 · g · AT2)) ] - (2 · λ · Δt / (π · DT3)) · Q0T · |Q0T| + Q0T
  " protok iz vodne komore "
  QtK ← QtT - Q0S

```

Slika 42. Računarski algoritam za izračun oscilacija vodnih masa u

Mathcadu 15, nastavak [9]

```

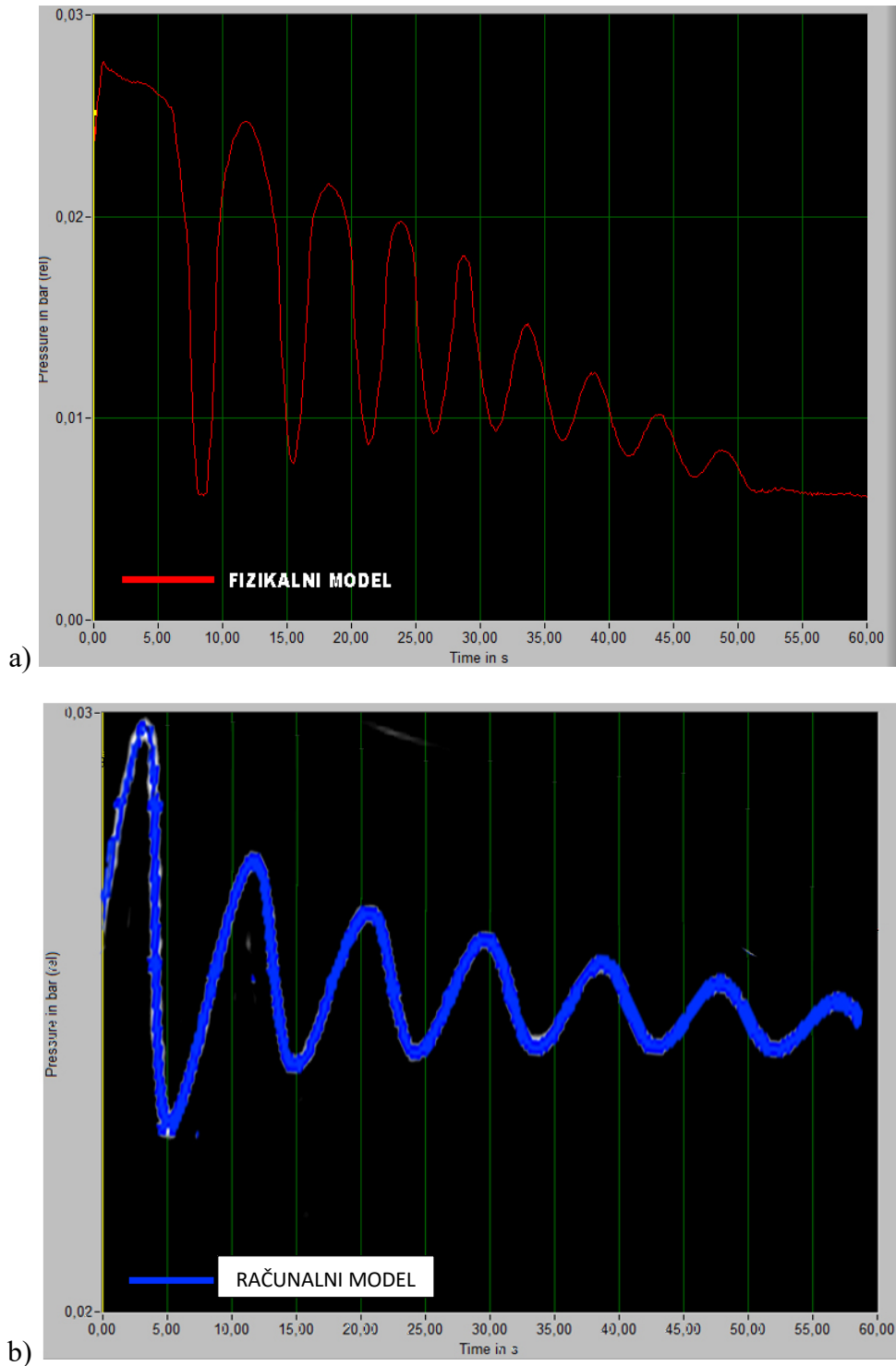
resultati(n) ← (zt QtT QtK QS vT RE λ)T
" ažuriranje varijabli toka "
zb ← z0
z0 ← zt
QT ← QtT
QK ← QtK
hrazlika ← h3 + zt
""
""
resultati
    
```

- ☀ razina vode u vodnoj komori $z := (\text{resultati}^T)^{(0)}$
- ☀ volumetrijski protok u dovodnom tunelu $Q_T := (\text{resultati}^T)^{(1)}$
- ☀ volumetrijski protok u vodnoj komori $Q_V := (\text{resultati}^T)^{(2)}$
- ☀ volumetrijski protok na turbini $Q_S := (\text{resultati}^T)^{(3)}$
- ☀ brzina toka u dovodnom tunelu $v_T := (\text{resultati}^T)^{(4)}$
- ☀ Reynolds-ov broj u dovodnom tunelu $RE := (\text{resultati}^T)^{(5)}$
- ☀ Darcy-ev koeficijent trenja u dovodnom tunelu $\lambda := (\text{resultati}^T)^{(6)}$

Slika 42. Računarski algoritam za izračun oscilacija vodnih masa u

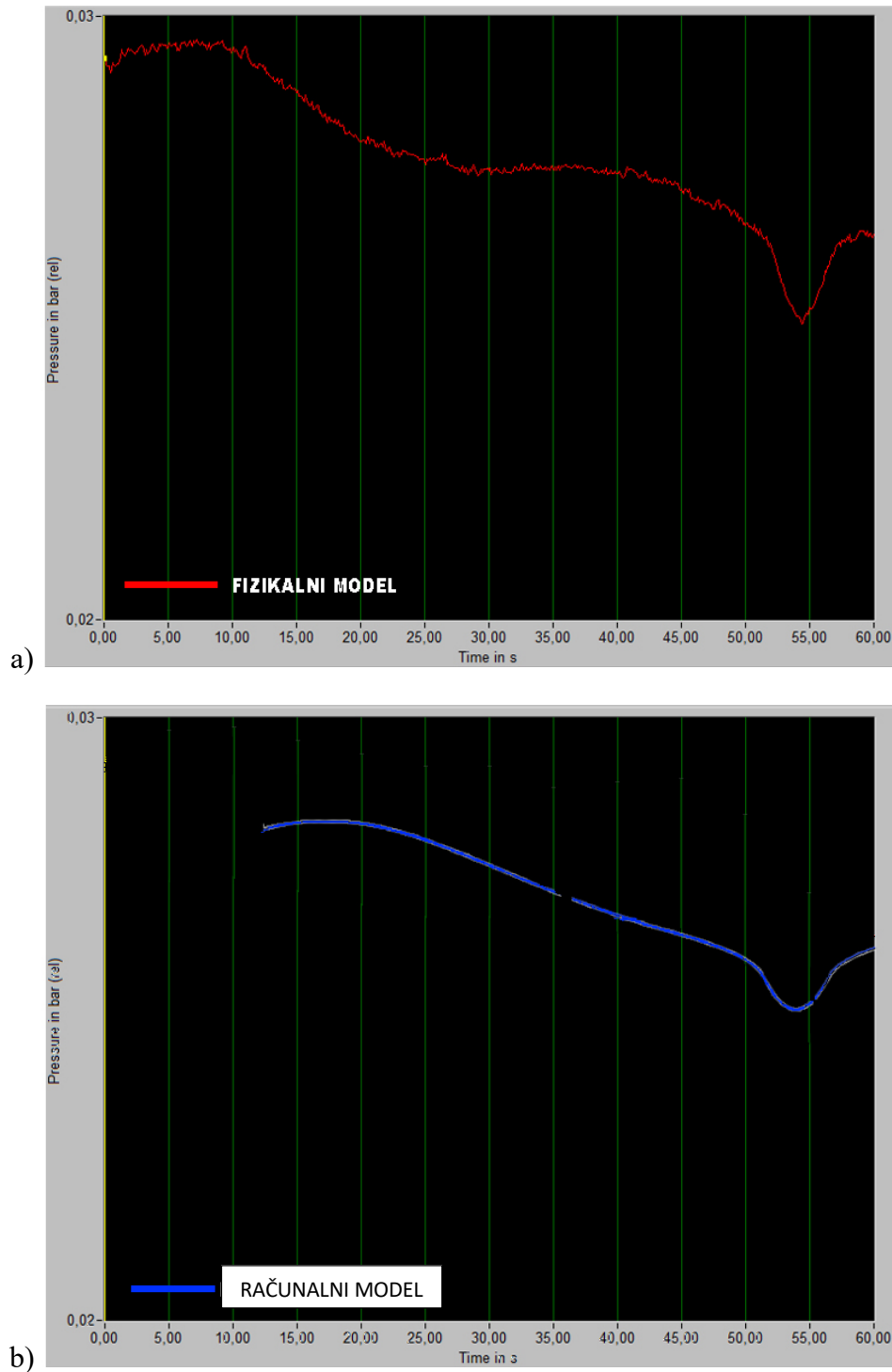
Mathcadu 15, nastavak [9]

Na slici 43. dana je usporedba oscilacija vodnih masa (razina vode) kada je razina vode u prvom djelu vodne komore. Može se vidjeti kako se oscilacije razina vode razlikuju u nekim dijelovima grafičkog prikaza, ali približno su iste. Iz istog se može zaključiti kako je računalni model u Mathcadu dovoljno precizan, te ga možemo koristiti za daljnja istraživanja umjesto provedbe fizikalnih modela, čime ostvarujemo značajnu uštedu vremena i novaca.



Slika 43. Usporedba a) fizikalnog i b) računalnog modela za eksperimentalni pokus 1 [4]

Na slici 44. dana je usporedba oscilacija razina vode kada je razina vode u sredini prvog proširenog dijela raščlanjene vodne komore. Ovdje se također pojavljuju minimalne oscilacije razina vode kroz rezultate, te se opet može zaključiti kako je računalni model pogodan za daljnja istraživanja.



Slika 44. Usporedba a) fizikalnog i b) računalnog modela za eksperimentalni pokus 3 [4]

Ukoliko se želi dobiti još preciznije podatke potrebno je unijeti još precizniju geometriju raščlanjene vodne komore, te odrediti i samu hrapavost stjenki materijala od kojeg je izrađena vodna komore, kao i materijala cijevi koje čine ostali dio cijevnog sustava pod tlakom. No, za takav jedan postupak bi trebalo uložiti mnogo truda i vremena.

7. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj diplomski rad provedena su eksperimentalna istraživanja vezana za oscilacije vodnih masa u sustavima pod tlakom kojega su izazvala nestacionarna gibanja. Tema je analizirana kroz teoretski dio, te kroz praktičnu laboratorijsku primjenu na fizikalnom modelu HM156. U samom radu je promatran sustav u kojemu nastaje vodni udar koji se najbolje prikazuje kroz primjer tečenja vode u hidrocentrali. Osnovni elementi od kojih se sastoji hidrocentrala jesu dovodni tunel, vodna komora, tlačni cjevovod te turbinsko postrojenje.

Nakon toga definirani su tipovi i funkcija vodnih komora, te njezine karakteristike zbog čega je ona bitna u praksi. Analizirani su glavni problemi koji uključuju oscilacije razine vode u cilindričnoj vodnoj komori te njena stabilnost. Dana je jednadžba oscilacija razine vode u cilindričnoj vodnoj komori za slučaj naglog zatvaranja zasuna. Rješenje pokazuje da u dovodnom tunelu nemamo zakašnjenja u promjeni brzine. Iz jednadžbe oscilacija razina tekućine (vode) u sustavu dovodni tunel - vodna komora pri naglom zatvaranju zasuna može se odrediti maksimalni porast i pad razine vode u vodnoj komori.

Zbog nagle promjene tlaka koja se dešava prilikom naglog zatvaranja zasuna u cijevi nastaje hidraulički udar koji je u radu definiran brzinom širenja koja je jednaka brzini širenja zvuka u cijevi. Također su definirane i faze propagacije iz kojih se zaključuje da se promjena tlaka i brzine periodički ponavljaju kroz vrijeme.

Kroz daljnja podpoglavlja prikazane su razlike u pojavama vodnog udara pri naglom zatvaranju zasuna, te zatvaranja zasuna u posebnim slučajevima njegova manevriranja. Razlike se pojavljuju zbog toga što se kod naglog zatvaranja zatvarača javlja maksimalna promjena tlaka, dok kod postepenog zatvaranja maksimalni tlak ovisi o tome je li vrijeme zatvaranja zatvarača kraće ili duže od trajanja faze vodnog udara.

U posljednjem dijelu diplomskog rada dane su karakteristike fizikalnog modela HM156 koji se nalazi u hidrotehničkom praktikumu Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, te je sastavni dio hidrotehničkog laboratorija. Fizikalni model je primijenjen kroz dva eksperimentalna pokusa. Prvi je pokus vezan za pojavu vodnog udara, kod

kojeg se računala brzina širenja zvuka na temelju deset eksperimentalnih ispitivanja. Drugi pokus vezan je za usporedbu oscilacija vodnih masa između cilindrične i raščlanjene vodne komore. U svakoj vodnoj komori provedeno je po 5 eksperimentalnih pokusa sa približno istim ulaznim parametrima te je došlo do zaključka da je raščlanjena komora bolja za apsorpciju oscilacija vodnih masa s obzirom na cilindričnu vodnu komoru.

Drugi dio pokusa vezan je za usporedbu oscilacija vodnih masa između cilindrične i raščlanjene vodne komore. Za svaku vodnu komoru sprovedeno je 5 pokusa te je izvršena usporedba komora. Iz provedenih usporedba dokazujemo kako je današnja sve veća upotreba raščlanjenih vodnih komora u odnosu na cilindrične u potpunosti opravdana. U svakom testiranom pogledu raščlanjena vodna komora se je pokazala efikasnijom, odnosno puno je brže smirila oscilacije i za to koristila manji volumen. Upravo taj volumen je bitna stavka prilikom projektiranja jer nam to omogućuje što manje iskope, a samim time i jeftiniju izvedbu.

8. LITERATURA

[1] Gjetvaj, G.: *Hidraulika - sistemi pod tlakom*, interna skripta iz kolegija Hidraulika, Građevinski fakultet Zagreb, Zagreb, 2009.

[2] Agroskin, I.I., *Hidraulika*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1969.

[3] HM 156, *Water Hammers and Surge Chamber*, priručnik za rad na fizikalnom modelu HM 156, 2013.

[4] Brenko, M.: vlastite slike, Rijeka, 2018., 2020.

[5] https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/PRAKTIKUMI_1/

PRAKTIKUMI/v08-vodna_komora, preuzeto dana 12.9.2018.

[6] Brenko, M., *Oscilacije vodnih masa u sustavu pod tlakom*, Završni rad, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2018.

[7] Stojić, P., *Hidrotehničke građevine - knjiga I*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 1997.

[8] Stojić, P., *Hidrotehničke građevine - knjiga II*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 1998.

[9] Travaš, V., *Oscilacije vodnih masa u vodnoj komori generičkog oblika*, predhodno priopćenje, Građevinar 4/2014, Zagreb, 2014.