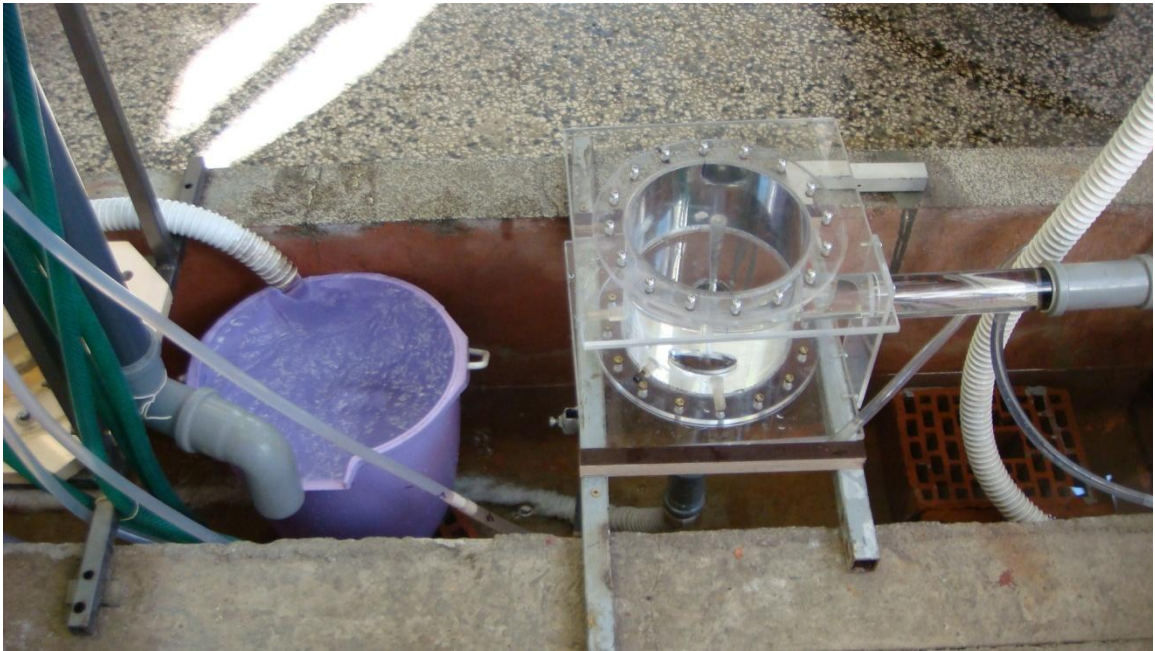


SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

STUDENTI: Ivana Bartolić i Jadran Berbić

HIDRAULIČKA DIODA I MOGUĆNOSTI NJENE PRIMJENE



MENTOR: prof.dr.sc. Goran Gjetvaj

Zagreb, svibanj 2012.

Ovaj rad je izrađen u Zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom prof.dr.sc. Gorana Gjetvaja i predan je za natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2011./2012.

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Osnovne definicije i pojmovi.....	3
2.1.	Fluidika	3
2.1.1.	Teslina dioda	4
2.1.2.	Analogija fluidičkih i elektroničkih veličina	5
2.2.	Spirala - fenomen u prirodi	6
2.3.	Pojmovi vezani uz hidrauličku diodu i tečenje.....	8
3.	Hidraulička dioda.....	12
3.1.	Princip rada diode.....	12
3.2.	Hidraulička dioda u stacionarnom režimu tečenja.....	14
3.3.	Hidraulička dioda u nestacionarnom režimu tečenja.....	15
4.	Eksperimentalna ispitivanja na modelu hidrauličke diode	16
4.1.	Opis modela hidrauličke diode.....	16
4.2.	Opis mjerenja.....	19
4.3.	Rezultati mjerenja	20
4.3.1.	Hidraulička dioda visine 150 [mm]	24
4.3.2.	Hidraulička dioda visine 120 [mm]	27
4.3.3.	Hidraulička dioda visine 90 [mm]	31
4.3.4.	Hidraulička dioda visine 60 [mm]	35
4.4.	Analiza i usporedba izmjerenih veličina	38
4.4.1.	Prigušni smjer.....	38
4.4.2.	Propusni smjer.....	42
4.5.	Greške mjerenja	44
4.5.1.	Greške kod mjerenja protoka i gubitaka ΔH	44
4.5.2.	Greške zbog konstrukcije modela	44
5.	Primjena hidrauličke diode	45
5.1.	Zračni kotlić.....	46
5.2.	Vodna komora	48

6.	Zaključak	51
7.	Zahvale	52
8.	Popis literature	53
9.	Sažetak	55
10.	Summary	56
11.	Prilozi	57

1. Uvod

Živimo u vremenu razvijene znanosti, tehnike, svakodnevnih inovacija i otkrića. No, ipak postoje uređaji koji su relativno davno otkriveni a još uvijek nedovoljno poznati i korišteni. Takav uređaj je i hidraulička dioda, koja je predmet istraživanja ovog rada.

Općenito, dioda je uređaj koji ima svojstvo propuštanja u jednom smjeru a značajnog prigušivanja u drugom smjeru. Hidraulička dioda uređaj je bez pokretnih dijelova koji omogućuje slobodan prolaz tekućine u jednom smjeru, a otpor strujanju u drugom smjeru. Korištena je u fluidici, grani znanosti i tehnike, koja proučava primjenu strujanja fluida za prijenos i preradu informacija.

Početak primjene fluidičkih elemenata vezan je uz razvoj raketne tehnike sredinom 20. stoljeća, kad su električni, elektronički i ostali tada dostupni elementi bili preosjetljivi i nepouzdana. Fluidički elementi bili su rješenje za velike temperature, kozmička te ionizirajuća zračenja, mehaničke udare i vibracije koje elektronički elementi nisu bili u stanju podnijeti [1]. Jedan od osnovnih principa rada fluidičkih elemenata je Coanda efekt. To je tendencija lijepljenja mlaza uz blisku površinu. Pojavu je objasnio rumunjski inženjer H. Coanda, kojeg se smatra osnivačem fluidike. [2]

Pojam fluidička dioda podrazumijeva pneumatičku diodu, koja koristi plin, i hidrauličku diodu, koja koristi tekućinu kao radno sredstvo. Prvu fluidičku diodu (pneumatičku) patentirao je Nikola Tesla 1916. godine dok se bavio problemima hiperpovršina, hipervolumena i multidimenzionalnosti. Hidraulička dioda je detaljnije istraživana tridesetih godina 20. stoljeća na Sveučilištu u Münchenu od strane Zobela i Thome [3]. Mnogi znanstvenici bavili su se fluidičkom (hidrauličkom) diodom. Zadnja dva desetljeća značajniji doprinos istraživanju hidrauličke diode dali su dr.ing. F. Haakh i prof. dr. E. Petrešin. Unatoč brojnim istraživanjima, još uvijek postoji mnogo nepoznanica u opisu gibanja tekućine unutar diode a samim time i problem s dimenzioniranjem iste.

Cilj ovoga rada je izraditi model hidrauličke diode i pokazati utjecaj proporcija diode na svojstvo prigušenja protoka u jednom smjeru te propuštanja u drugom

smjeru. Također, cilj je ukazati na mogućnosti primjene hidrauličke diode te na prednosti njena korištenja.

Kako bi se lakše razumjela problematika hidrauličke diode, kroz prvih nekoliko poglavlja nastojat će se objasniti osnovni pojmovi, principi funkcioniranja i svojstva hidrauličke diode.

2. Osnovne definicije i pojmovi

2.1. Fluidika

Za preradu i prijenos informacija se uglavnom koriste električni i elektronički elementi. U današnje doba fluidika je zapostavljena. Vjerojatno se razlog skriva u nedostatnoj brzini gibanja fluida u odnosu na brzinu elektrona. Mora se istaknuti da je vrlo malo pažnje posvećeno strujanju fluida pri velikim brzinama [4].

Prednosti fluidičkih elemenata su: mogućnost rada u agresivnim i zagađenim okolinama, eksplozivnoj atmosferi, otpornost na ionizirajuća zračenja i magnetska polja te niske i visoke temperature. Fluidički elementi su malih dimenzija i jednostavni su za održavanje. Pouzdanost im je velika i imaju sve kvalitete za primjenu u svim područjima djelatnosti.

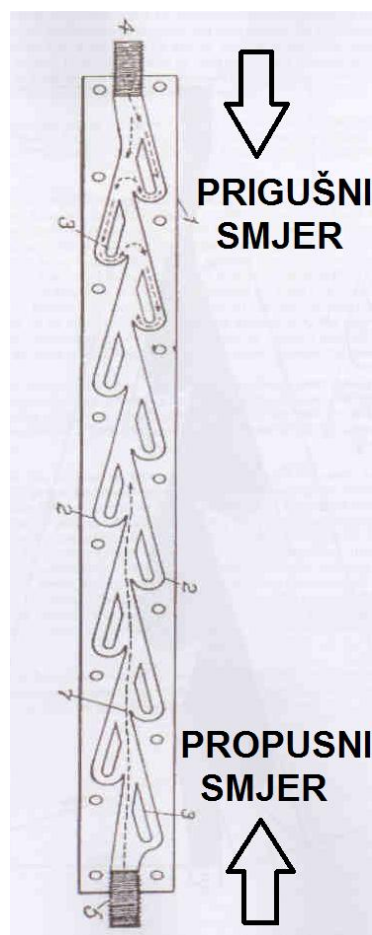
Prema vremenu potrebnom za preradu informacija fluidički elementi se nalaze između relejnih (mehaničkih) i elektroničkih elemenata. Ulazna snaga za preradu informacija podjednaka je za sve tri vrste elemenata. Fluidički elementi mogu se podijeliti na radne, koji ostvaruju neku određenu izlaznu funkciju, i na pomoćne, koji se dodatno uvrštavaju u fluidičke strujne krugove da bi utjecali na izlaznu funkciju. Radni fluidički elementi mogu se svrstati prema svojoj konstrukciji na elemente bez pokretnih dijelova i na elemente s pokretnim dijelovima. Radni i pomoćni elementi zajedno sačinjavaju fluidičke sisteme.

Fluidički elementi bez pokretnih dijelova svoju izlaznu funkciju ostvaruju samo djelovanjem fluida koji struji. Često se još nazivaju i strujni elementi te su po svojim karakteristikama dinamički. Svoju izlaznu funkciju ostvaruju na jednom od dva principa: slobodno djelovanje među mlazovima fluida i djelovanje mlazova i stijenki. Hidraulička dioda spada u skupinu radnih fluidičkih elemenata. Kod diode se ostvaruje slobodan prolaz struji fluida u jednom smjeru a otpor strujanju u drugom smjeru. Odnos protoka u prigušnom i propusnom smjeru dostiže i do 1:200, što predstavlja vrlo visoku funkcionalnu kvalitetu elementa [1].

2.1.1. Teslina dioda

Pneumatička dioda, koju je patentirao Nikola Tesla, nije klasično tehničko rješenje. Riječ je o organskom rješenju. Naime, izradio je strukturu koja podsjeća na kretanje kapi vode po vertikalnoj ili kosoj glatkoj površini pod utjecajem sile gravitacije i adhezije. Kao primjer može se promatrati putanja kapi vode po čaši, odozgo prema dolje. Primjećuje se da se kap vode kreće naizmjenice lijevo pa desno. Tako i Teslina dioda ima odjeljke koji se nalaze s lijeve i desne strane. Taj izum pokazuje sposobnost Teslina uočavanja i razumijevanja prirodnih fenomena, kako i on sam kaže: „Ako ne možeš naći rješenje, promatraj prirodu jer je ona taj problem sigurno već riješila“ [4].

Tesla je kod svoje diode postigao omjer 1:20 između protoka u prigušnom i propusnom smjeru. Spomenuti odjeljci imaju učinak usporavanja toka fluida u prigušnom smjeru, dok u propusnom nemaju značajan utjecaj na tok [4].



Slika 1. Pneumatička dioda Nikole Tesle [4]

2.1.2. Analogija fluidičkih i elektroničkih veličina

Fluidička (tj. hidraulička) dioda može se pomoću analogije između električnih i fluidičkih veličina usporediti s elektroničkom diodom. Pretpostavke su da je tlak analogan električnom naponu a protok fluida jakosti električne struje. Na temelju te pretpostavke definira se fluidička otpornost (R), kapacitativnost (C) i induktivnost (L).

$$R = \frac{\Delta p}{Q}, \quad (1)$$

gdje je: R ... fluidička otpornost [Ns/m^5]
 Δp ... razlika tlakova ulaza i izlaza [N/m^2]
 Q ... volumni protok [m^3/s]

$$C = \frac{Q}{dp/dt}, \quad (2)$$

gdje je: C ... kapacitativnost [m^5/N]
 Q ... volumni protok [m^3/s]
 dp/dt ... totalni diferencijal tlaka po vremenu [$\text{N}/\text{m}^2\text{s}$]

$$L = \frac{p}{dQ/dt}, \quad (3)$$

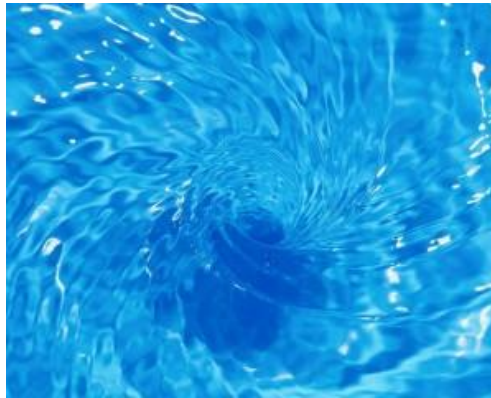
gdje je: L ... induktivnost [Ns^2/m^5]
 p ... tlak [N/m^2]
 dQ/dt ... totalni diferencijal volumnog protoka po vremenu [m^3/s^2]

Elektronička dioda u jednom smjeru vodi struju i tada je izlazni napon podjednak ulaznom a otpor zanemariv. To odgovara propusnom smjeru u hidrauličkoj diodi. U suprotnom smjeru elektronička dioda ne vodi struju (ili vodi do određenog napona), razlika ulaznog i izlaznog napona je velika a time i električni otpor. To odgovara prigušnom smjeru hidrauličke diode. Kao što je kod elektroničke diode odnos jakosti struje i napona nelinearan, tako će i kod hidrauličke diode odnos protoka i tlaka biti nelinearan, što će se vidjeti na rezultatima mjerenja [1].

2.2. Spirala - fenomen u prirodi

Hidraulička dioda svojim oblikom usmjerava tok vode u oblik spirale a u prirodi voda vrlo često ima tendenciju vrtloženja. Može se vidjeti da mnoga kretanja u prirodi imaju oblik spirale. Zemlja, kao planet Sunčeva sustava, okreće se oko svoje osi i time daje dan i noć. Okreće se i pod određenim kutem oko Sunca što daje godišnja doba. Cijeli sunčev sustav se kreće unutar galaksije čime imamo astrološke ere. Na taj način tekućine na Zemlji zapravo zrcale njeno kretanje [5].

Iz jednog vrlo jednostavnog primjera, kao što je otjecanje vode iz umivaonika, može se primijetiti spiralno tečenje vode. Voda se kreće oko središnjeg vrtloga a cjelina također leluja te tako čini dvostruku spiralu.



Slika 2. Vrtloženje vode [6]

Također, zanimljivo je primijetiti da se voda na sjevernoj hemisferi vrtloži suprotno od smjera kazaljke na satu a na južnoj u smjeru kazaljke na satu, što je posljedica Coriolisove akceleracije. Kretanje vode u rijekama, oceanima i morima također je obilježeno oblikom spirale. Zanimljiva je nedavno izrađena animacija kretanja vode u oceanima i morima koju su napravili NASA-inci znanstvenici. Dali su animirani prikaz svih morskih struja na Zemlji kroz period od lipnja 2005. godine do prosinca 2007. Tim prikazom može se vidjeti već spomenut spiralni tok vode [7].

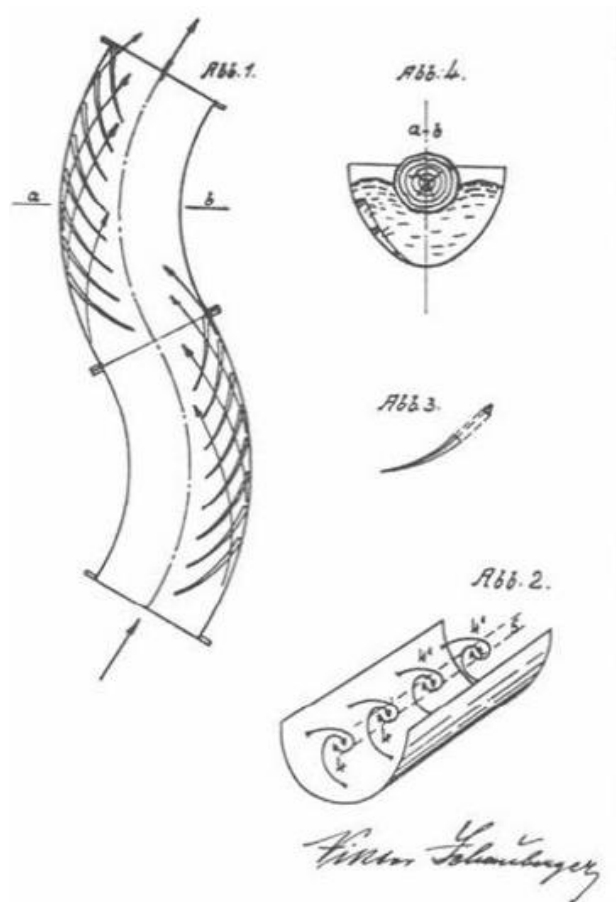


Slika 3. NASA-ina animacija morskih struja „Perpetual ocean“ [7]

Nije samo voda koja se kreće spiralno, tu je i krv u žilama. Molekula DNK ima oblik dvostruke spiralne zavojnice, rogovi ovnova su spiralni, rijeke teže vijugavom tečenju. Oblik spirale može se vidjeti promatrajući puževu kućicu, cvjetaču, virove, tornada te otiske naših prstiju [5].

Kad se govori o spiralnom tečenju i promatranju prirode, valja spomenuti Viktora Schaubergera. Viktor Schauberger je bio lugar u Austriji i živio je u prirodi promatrajući njene zakonitosti. Nije bio znanstvenik i njegov put je bio suprotan od onog kojim se kreće suvremena znanost. Promatrajući prirodu i vodu donio je neke zaključke koji su opće poznati, kao što je anomalna točka vode pri 4 stupnja Celzijusa, a i neke zaključke koji danas znanstveno nisu dokazani. Spominjemo ga iz razloga što je primijetio spiralno tečenje u rijekama i iskoristio ga za svoj izum koji je uistinu funkcionirao. Javio se problem transporta trupaca iz šuma u doline. Bilo mu je žao gledati životinje koje se muče i vuku trupce iz šume te je razmišljao o transportu brdskim potocima. Taj pristup je već dva puta bio odbačen, jer se smatralo da bi se tako oštetila korita bujica i teži trupci ne bi plutali. Došao je na ideju kanala kojima bi tekla voda po uzoru na tok u rijekama. Osmislio je sustav kanala kojima je tekla voda i na određenim mjestima se mijenjala svježom, kako bi bila što bliže anomalnoj točki vode smatrajući da voda pri toj temperaturi ima najveću transportnu moć. Izum nije funkcionirao dan prije puštanja u pogon i trupci su zapinjali. Schauberger je došao na ideju postavljanja usmjerivača toka tj. dijelova koji su usmjeravali tok u oblik spirale. Time je dobio brže kretanje trupaca i

funkcioniranje svoga izuma. Od tog trenutka njegov život se mijenja i postaje tražena osoba u Americi i Njemačkoj.



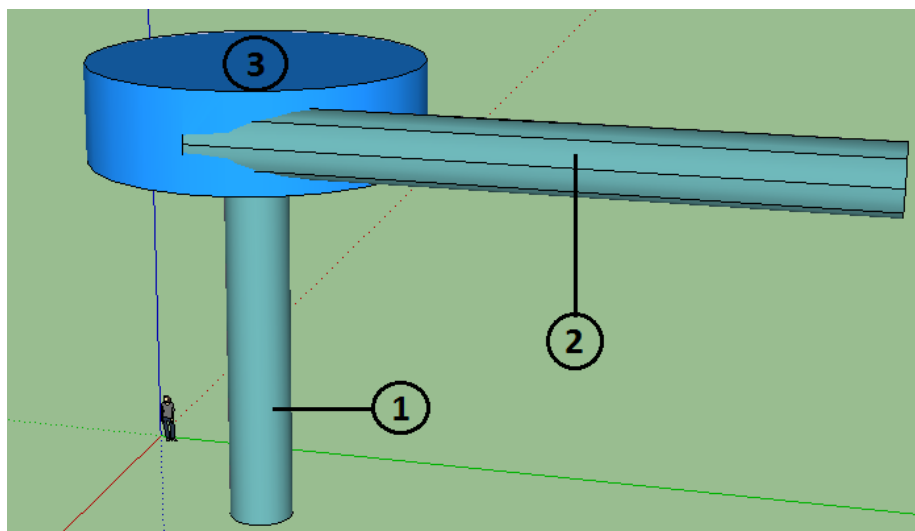
Slika 4. Žlijeb Viktora Schaubergera za transport trupaca

Iz izuma Viktora Schaubergera može se zaključiti da se spiralnim, odnosno vrtložnim kretanjem vode postižu veće brzine, što se događa i u samoj diodi. Detaljnije o povećanju brzine govorit će se kod opisa same diode.

2.3. Pojmovi vezani uz hidrauličku diodu i tečenje

Potrebno je usuglasiti osnovne pojmove vezane uz hidrauličku diodu, kako bi se postigla preciznost i shvatljivost u daljnjem radu.

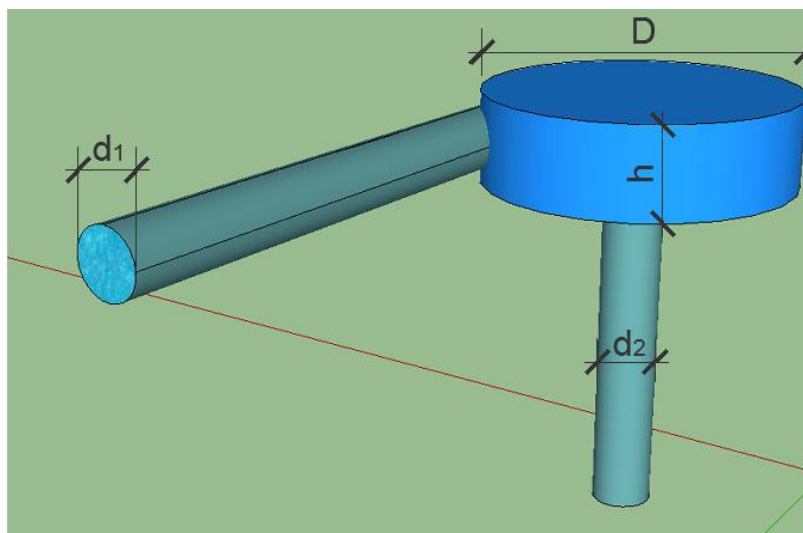
- Osnovni dijelovi diode:
1. aksijalna cijev
 2. tangencijalna cijev
 3. tijelo diode.



Slika 5. Osnovni dijelovi hidrauličke diode

Svaki dio diode ima karakteristične dimenzije svojih dijelova, a njihove oznake su:

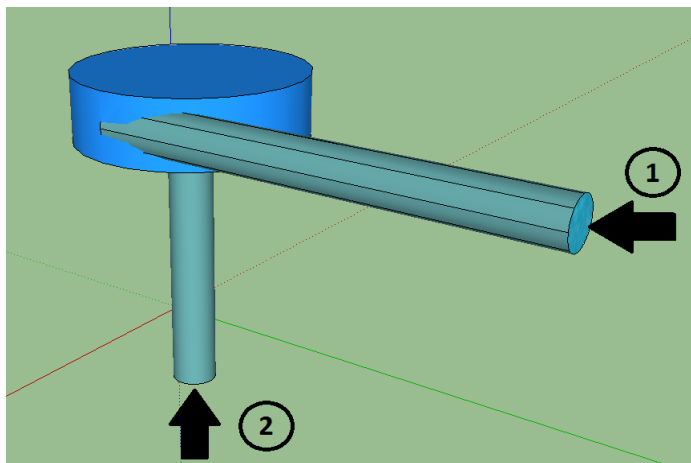
1. D ...promjer tijela diode (ili promjer diode)
2. h ...visina diode
3. d_1 ...promjer tangencijalne cijevi
4. d_2 ...promjer aksijalne cijevi



Slika 6. Oznake dimenzija diode

Još je potrebno definirati dva smjera strujanja u diodi, a to su:

1. prigušni smjer
2. propusni smjer



Slika 7. Smjerovi strujanja hidrauličke diode

Tečenje se može podijeliti prema raznim kriterijima. Za opis gibanja u hidrauličkoj diodi bitan je kriterij promjene u vremenu i prostoru.

Prema kriteriju promjene u vremenu [8]:

1) Stacionarno (ustaljeno) - u promatranoj točki prostora ne postoje promjene toka polja u vremenu.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0; \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Gdje su: Q... protok [m³/s]

v... brzina [m/s]

t... vrijeme [s]

2) Nestacionarno (neustaljeno) – u promatranoj točki prostora postoje promjene toka polja u vremenu.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \quad (2)$$

Gdje su: Q... protok [m³/s]

v... brzina [m/s]

t... vrijeme [s]

Prema kriteriju promjene u prostoru [8]:

1) Jednoliko – tečenje koje duž cijelog svog toka ima jednake karakteristike (nema promjene brzine duž strujnice).

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0; \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0; \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Gdje su: $v_x, v_y, v_z...$ komponente brzine [m/s]

$x, y, z...$ komponente prostora [m].

2) Nejednoliko – tečenje kojem se karakteristike duž toka mijenjaju

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} \neq 0; \frac{\partial v_y}{\partial y} \neq 0; \frac{\partial v_z}{\partial z} \neq 0 \quad (4)$$

Gdje su: $v_x, v_y, v_z...$ komponente brzine [m/s]

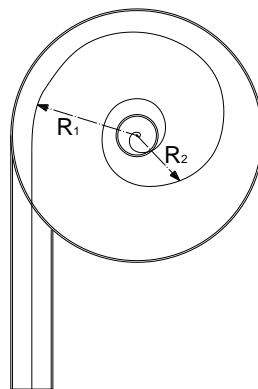
$x, y, z...$ komponente prostora [m].

U hidrauličkoj diodi prema kriteriju promjene u prostoru tečenje je nejednoliko, a s aspekta promjene u vremenu može biti stacionarno i nestacionarno.

3. Hidraulička dioda

3.1. Princip rada diode

U prigušnom smjeru tekućina ulazi kroz tangencijalnu cijev. Zbog oblika stijenke tijela diode prisiljena je na rotaciju. Strujnice su oblika spirale. U aksijalnoj cijevi je tlačna visina mnogo manja nego u tangencijalnoj cijevi. Pad tlačne visine preliminarno se može prikazati pomoću zakona očuvanja kutne količine gibanja. U nekom trenutku čestica na radijusu R_1 [m] u odnosu na os aksijalne cijevi ima polarni moment tromosti I_1 [kgm²] i kutnu brzinu ω_1 [rad/s]. Na nju djeluje centrifugalna sila F_{c1} [N]. U drugom trenutku čestica se približila osi aksijalne cijevi, na radijus R_2 [m]. Polarni moment tromosti I_2 [kgm²] manji je od I_1 [kgm²], a kutna brzina ω_2 [rad/s] veća od kutne brzine ω_1 [rad/s]. Centrifugalna sila F_{c2} [N] je veća od F_{c1} [N]. Kinetička energija rotacije nije sačuvana jer je uloženi rad na savladavanje centrifugalne sile.



Slika 8. Spiralna strujnica u diodi

Zakon očuvanja kutne količine gibanja [9]: $I_1 \cdot \omega_1 = I_2 \cdot \omega_2$

Nadalje, mora vrijediti zakon očuvanja energije. Energija na ulazu u tijelo diode mora biti jednaka zbroju energije koja je utrošena na savladavanje centrifugalne sile i energije na izlazu iz tijela diode.

No, u stvarnosti je problem mnogo kompliciraniji i teško je izvršiti punu matematičku i fizikalnu obradu. U obzir bi trebalo uzeti sljedeće čimbenike:

1. Učinkovitost diode (smanjenje tlaka i prigušenje protoka) uvelike ovisi o dimenzijama (promjeru i visini) te o volumenu diode.
2. Pri relativno malim brzinama i većem volumenu, formirani vrtlog nije stabilan. To znači da mora postojati neka minimalna količina energije da bi se formirao vrtlog.
3. Asimetričnost diode uvjetuje i asimetričnost strujnica. Os oko koje se kreće čestica tekućine neće biti os aksijalne cijevi, nego će biti izmaknuta. Štoviše, zbog nezaobilazne prisutnosti zraka, os vrtloga će stalno fluktuirati.
4. Javlja se trenje uslijed utjecaja mlaza i stijenki te trenje među mlazovima tekućine.
5. U diodi uvijek ima barem malo zraka (što se može vidjeti po stvorenoj 'pijavici') te treba uzeti u obzir i zakone termodinamike.

Valja naglasiti da je osnovni problem kod hidrauličke diode njeno dimenzioniranje. Što je volumen diode veći, potrebna je veća ulazna energija da bi vrtlog bio stabilan. Stabilnost vrtloga izravno utječe na sposobnost smanjivanja tlaka i prigušivanja protoka u diodi. To znači da je učinkovitost diode obrnuto proporcionalna njenom volumenu [9,10].

Centrifugalnu silu tekućina savladava na cijeloj svojoj putanji u diodi. Poželjno je da putanja bude veća, što se postiže većim promjerom diode. Kako volumen mora biti što manji, slijedi da se bolja učinkovitost diode postiže s određenim odnosima D/h . Teorijski pristup je vrlo složen te je nužno pristupiti eksperimentalno. Primjerice Haakh [11] u svom članku, na temelju eksperimentalnih istraživanja provedenim na diodama odnosa $3 \leq D/h \leq 15$, navodi da je optimalan odnos $D/h \sim 9,5$. Važni su i promjeri tangencijalne d_1 i aksijalne cijevi d_2 . Experimentima je pokazano da se veća učinkovitost diode postiže za $d_1 = d_2 = d$, nego u slučaju $d_1 \neq d_2$. Preporuka je i da je $d \sim h$ [11].

U propusnom smjeru voda ulazi kroz aksijalnu cijev, zatim kroz tijelo diode te izlazi kroz tangencijalnu cijev. Dioda je u tom slučaju kombinacija naglog proširenja i suženja cijevi te je koeficijent lokalnog gubitka značajno manji u odnosu na gubitak u prigušnom smjeru.

Kako su gubici tlačne visine u prigušnom i propusnom smjeru značajno različiti, učinkovitost diode može se opisati pomoću pojma diodnosti. Diodnost je definirana

kao odnos gubitka tlačne visine u propusnom smjeru i gubitka tlačne visine u prigušnom smjeru, pri jednakim protocima.

3.2. Hidraulička dioda u stacionarnom režimu tečenja

Proračun hidrauličke diode u stacionarnom režimu tečenja zasniva se na Bernoullijevoj jednadžbi (5) i jednadžbi kontinuiteta (6).

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (5)$$

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (6)$$

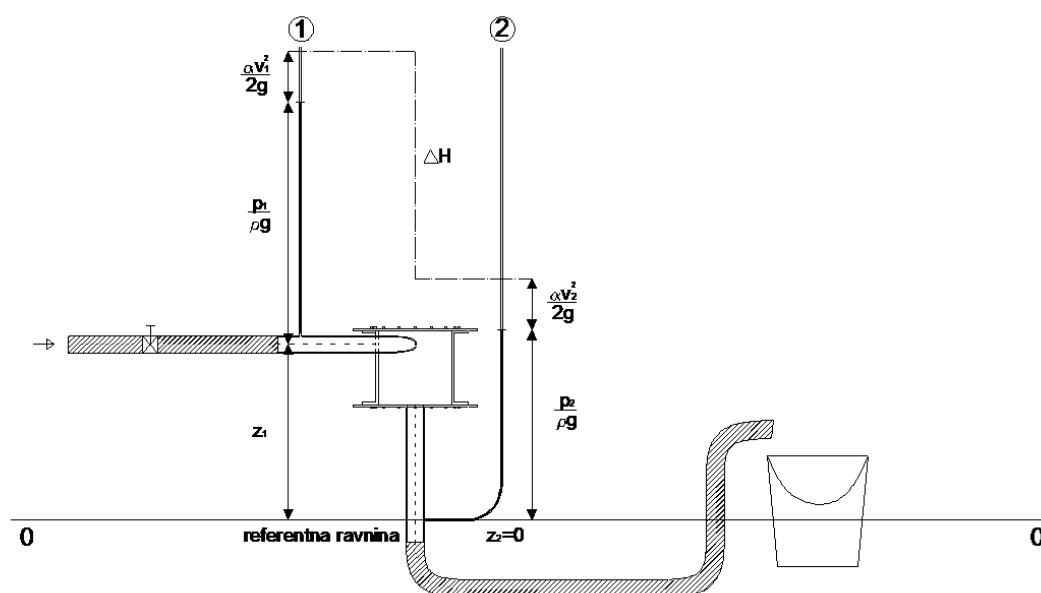
gdje su: z_1, z_2, \dots geometrijska visina [m]

$\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g} \dots$ piezometarska visina [m]

$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \dots$ brzinska visina [m]

A_1, A_2, \dots površina poprečnog presjeka tangencijalne odnosno aksijalne cijevi

v_1, v_2, \dots brzina [m/s]



Slika 9. Model hidrauličke diode s odgovarajućim članovima Bernoullijeve jednadžbe

Za poznate površine tangencijalne i aksijalne cijevi, izmjerenu brzinu i gubitak ΔH [m], može se izračunati koeficijent lokalnog gubitka u diodi ξ [1] (8).

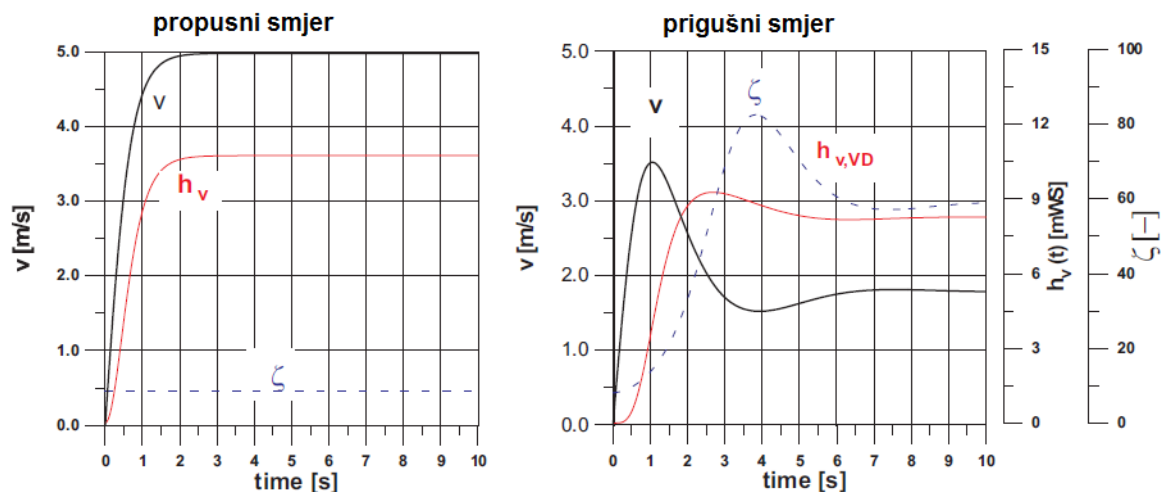
$$\Delta H = \frac{\alpha v^2}{2g} \xi \quad (7)$$

$$\xi = \Delta H \frac{2g}{\alpha v^2} \quad (8)$$

Za prigušni i propusni smjer postupak je isti, o čemu će biti više govora u eksperimentalnom dijelu rada.

3.3. Hidraulička dioda u nestacionarnom režimu tečenja

Prema istraživanjima dr.ing. F. Haakha [11], vrijedi pretpostavka da u propusnom smjeru, kod nestacionarnog tečenja, dioda funkcionira isto kao i u stacionarnom režimu. U tom slučaju može se koristiti Bernoullijeva jednačba za nestacionarni režim, a koeficijent lokalnih gubitaka se smatra konstantnim. Problemi se javljaju u prigušnom smjeru, gdje se koeficijent lokalnih gubitaka diode mijenja u vremenu. Konstantnu vrijednost postiže nakon 7 [s] što se može vidjeti na slici 10. gdje je označen sa ζ [-].



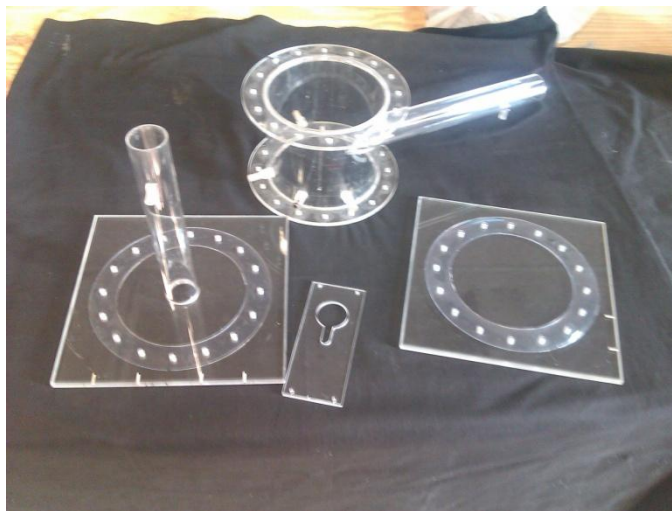
Slika 10. Koeficijent gubitaka hidrauličke diode u nestacionarnom režimu u prigušnom i propusnom smjeru [11]

Problem je mnogo kompliciraniji nego za stacionaran režim i ostavlja prostora za daljnja istraživanja.

4. Eksperimentalna ispitivanja na modelu hidrauličke diode

4.1. Opis modela hidrauličke diode

Kod razrade ideje za konstrukciju diode susreli smo se s problemom dimenzioniranja diode koji je ujedno i jedna od glavnih nepoznanica. Kao što je već spomenuto, dimenzioniranje diode istraženo je samo eksperimentalno. Ne postoji način proračuna dimenzija diode za određene potrebe sustava. Prema smjernicama iz članka F. Haakha [11], diode koje su bile ispitivane su u omjeru $3 \leq D/h \leq 15$. Prvobitna ideja bila je napraviti diodu takvih proporcija, no zbog nedostupnosti materijala i sredstava napravljena je dioda dimenzija materijala koji je bio dostupan.

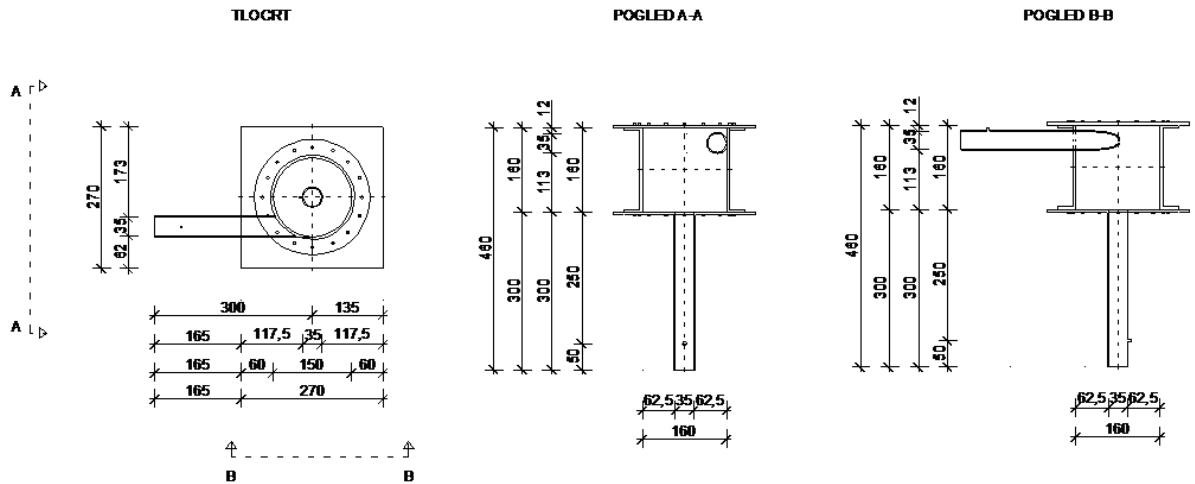


Slika 11. Dijelovi pleksiglasa od kojih je sastavljena dioda

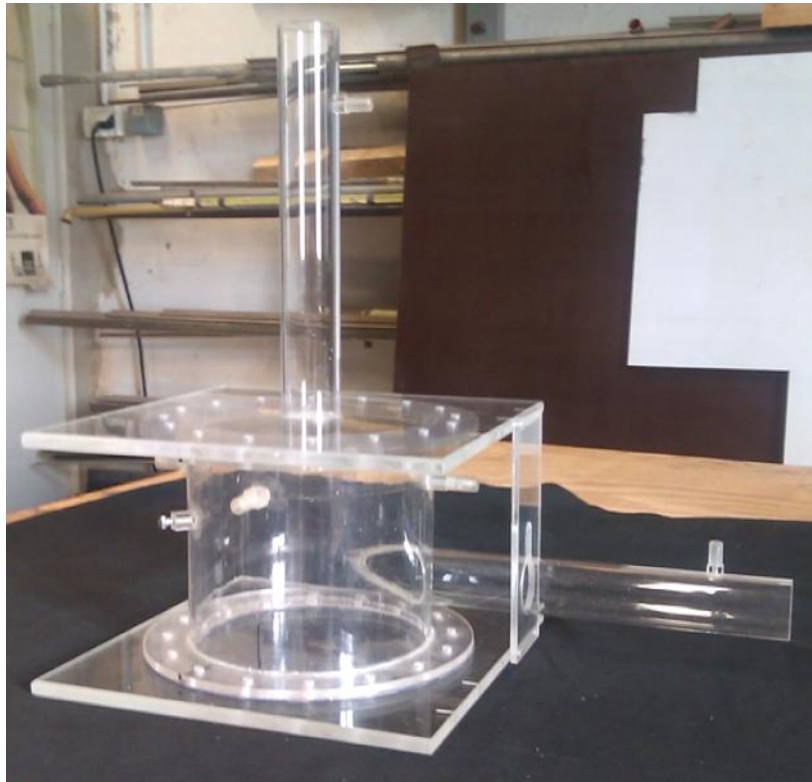
Hidraulička dioda, na kojoj su vršena mjerenja, napravljena je od pleksiglasa. Model diode sastoji se od:

1. Kružnog cilindra unutrašnjeg promjera $D=160$ [mm]
2. Dvije plastičnih cijevi, duljine $l=300$ [mm] i unutrašnjeg promjera $d=35$ [mm], s pripadnim piezometrima
3. Dvije ploče kojima je zatvoren cilindar
4. Ukrute tangencijalne cijevi i 16 vijaka kojima su povezani dijelovi.

Na kružni cilindar, koji je zatvoren dvjema pločama, tangencijalno je pričvršćena plastična cijev na udaljenosti 12 [mm] od gornjeg ruba. U sredini donje ploče probušen je otvor gdje je aksijalno učvrćena plastična cijev. Ukruta je postavljena u svrhu pridržanja tangencijalne cijevi zbog moguće turbulencije i vibracija. Piezometri su udaljeni 50 [mm] od početka tangencijalne cijevi, odnosno 50 [mm] od kraja aksijalne cijevi. (Prilog 1)



Slika 12. Tlocrt i pogledi hidrauličke diode



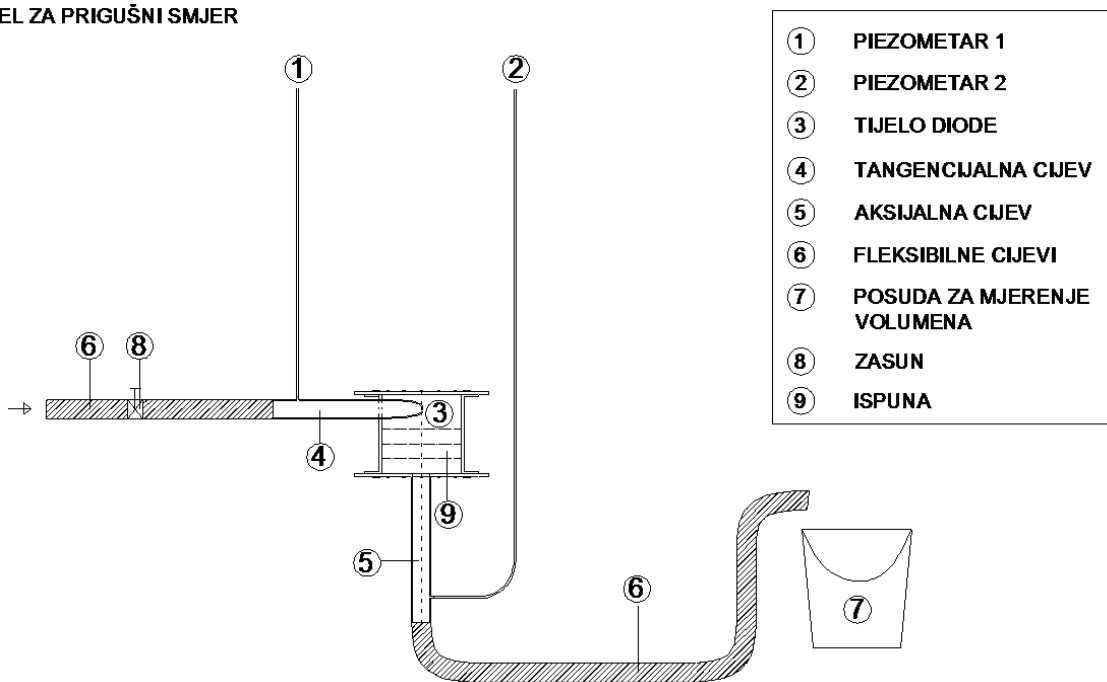
Slika 13. Model hidrauličke diode

Bitno je istaknuti da je konstrukcija napravljena na način da se unutar cilindra može dodavati ispuna. Svaka ispuna je napravljena od pune plastike, visine je 30 [mm] i u središtu ima kružni otvor promjera 35 [mm], kao i aksijalna cijev. Time se unutarnja visina diode, pomoću ispuna, može smanjivati s ciljem ostvarivanja različitog odnosa D/h .



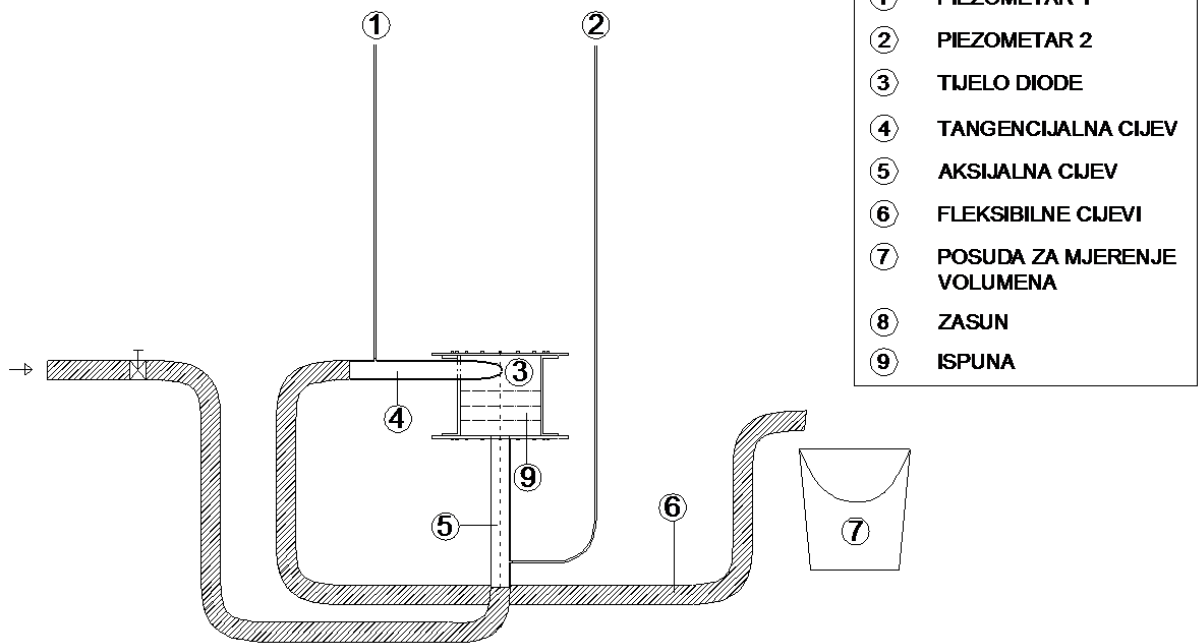
Slika 14. Ispuna za smanjivanje visine diode

MODEL ZA PRIGUŠNI SMJER



Slika 15. Model za prigušni smjer

MODEL ZA PROPUSNI SMJER



Slika 16. Model za propusni smjer

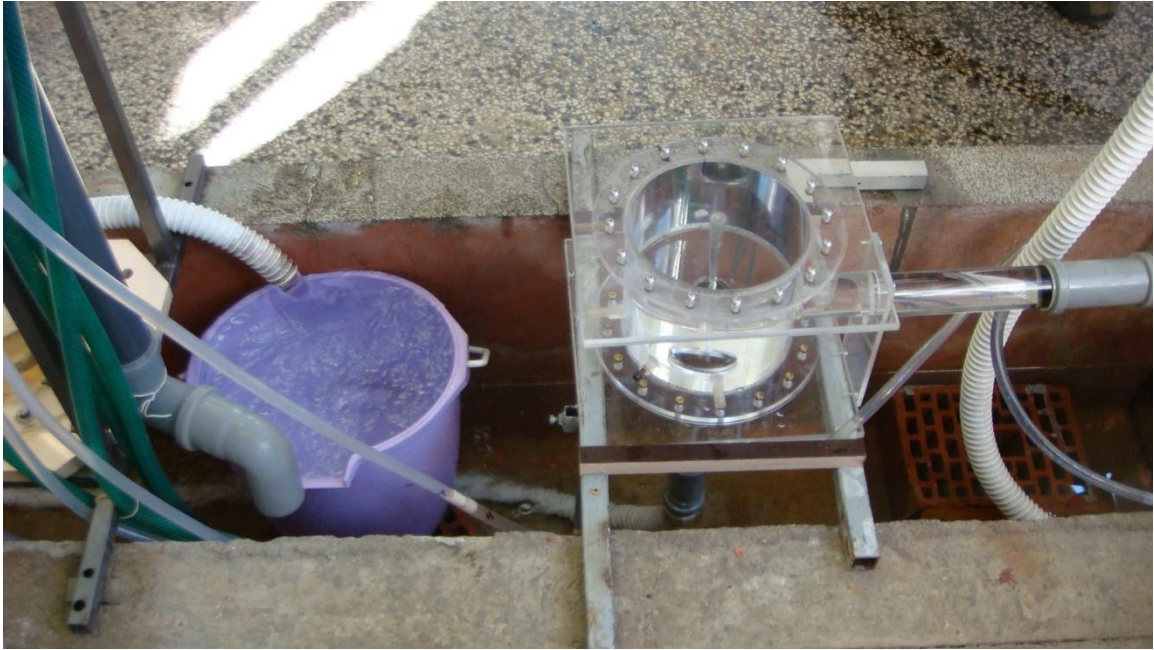
Hidraulička dioda spojena je na vodovodni sustav Hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Protok je moguće regulirati zasunom. Od zasuna do tangencijalne cijevi diode vodi plastično crijevo te također od aksijalne cijevi do mjesta mjerenja volumena vode. Crijeva, kojima je spojen dovod vode, su fleksibilna, što omogućuje jednostavnu zamjenu ulaza i izlaza toka u diodu. Tlačne visine na ulazu i izlazu iz diode mjere se na postavljenim piezometrima ispred i iza diode.

4.2. Opis mjerenja

Cilj je izmjeriti razlike tlačnih visina ulaza i izlaza diode, s namjerom izračunavanja koeficijenta lokalnog gubitka u diodi. Različiti odnosi D/h uzrokuju različite učinkovitosti prigušivanja (veličinu koeficijenta gubitaka) a time i različite brzine i tlačne visine. Treba napomenuti da je strujanje stacionarno i nejednoliko.

Mjerenja su vršena na diodi visine 150, 120, 90 i 60 [mm]. Time se zapravo dobivaju 4 različita omjera D/h za koje su izmjereni gubici. Razlike visina mjerene su prvo u prigušnom smjeru, a zatim u propusnom smjeru, te su dobiveni rezultati obrađeni.

Protok je mjereno volumetrijski, započevši od maksimalnog protoka prema manjem, na način da se na izlazu iz crijeva mjeri vrijeme koje je potrebno da se napuni posuda od 12 [l]. Iz tih podataka izračunat je protok. Za svaki protok mjerene su razlike piezometarskih visina na ulazu i izlazu iz diode, na mjestima postavljenih piezometara. Time je bilo moguće, pomoću Bernoullijeve jednadžbe, izračunati koeficijent lokalnih gubitaka diode. Mjerenja su vršena prvo u prigušnom smjeru pa u propusnom smjeru za navedene visine diode.



Slika 17. Model diode u sustavu

4.3. Rezultati mjerenja

Za svaku visinu diode mereno je:

1. ΔH [cm]... pad tlačne visine u diodi
2. vrijeme t [s] potrebno da se napuni kanta volumena $V=12$ [l],
prvo za prigušni smjer, a zatim za propusni.

A) PRIGUŠNI SMJER

1. ΔH [cm]... pad tlačne visine u diodi

$$\Delta H = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (9)$$

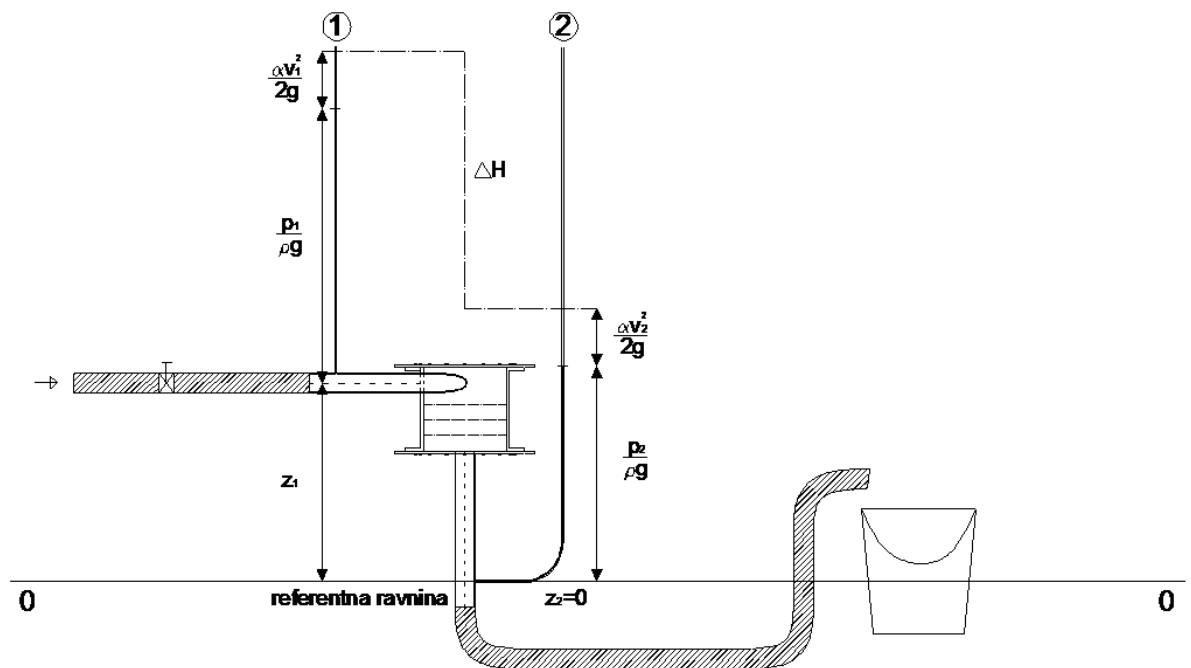
Kod računanja gubitaka ΔH , iz slike 18. je vidljivo da je $z_2=0$. U sustavu vrijedi jednačina kontinuiteta $Q=v \cdot A$ [m^3/s], gdje je v [m/s] brzina, a A [m^2] površina poprečnog presjeka cijevi koja je ista za tangencijalnu i aksijalnu cijev. Coriolisov koeficijent, koji pokazuje omjer stvarne kinetičke energije mase fluida i kinetičke energije izražene preko srednje brzine, za strujanje u cijevima se može uzeti $\alpha_1=\alpha_2=1,0$. Stoga vrijedi:

$$\Delta H = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \frac{p_2}{\rho g} \quad (10)$$

2. vrijeme t [s] potrebno da se napuni kanta volumena $V=12$ [l]

Vrijeme je mjereno štopericom, a protok je izračunat iz relacije:

$$Q = \frac{V}{t} \left[\frac{\text{l}}{\text{s}} \right] \text{ i izražen u } [\text{m}^3/\text{s}]. \quad (11)$$



Slika 18. Model za prigušni smjer s pripadnim članovima Bernoullijeve

B) PROPUSNI SMJER

1) ΔH [cm]... pad tlačne visine u diodi

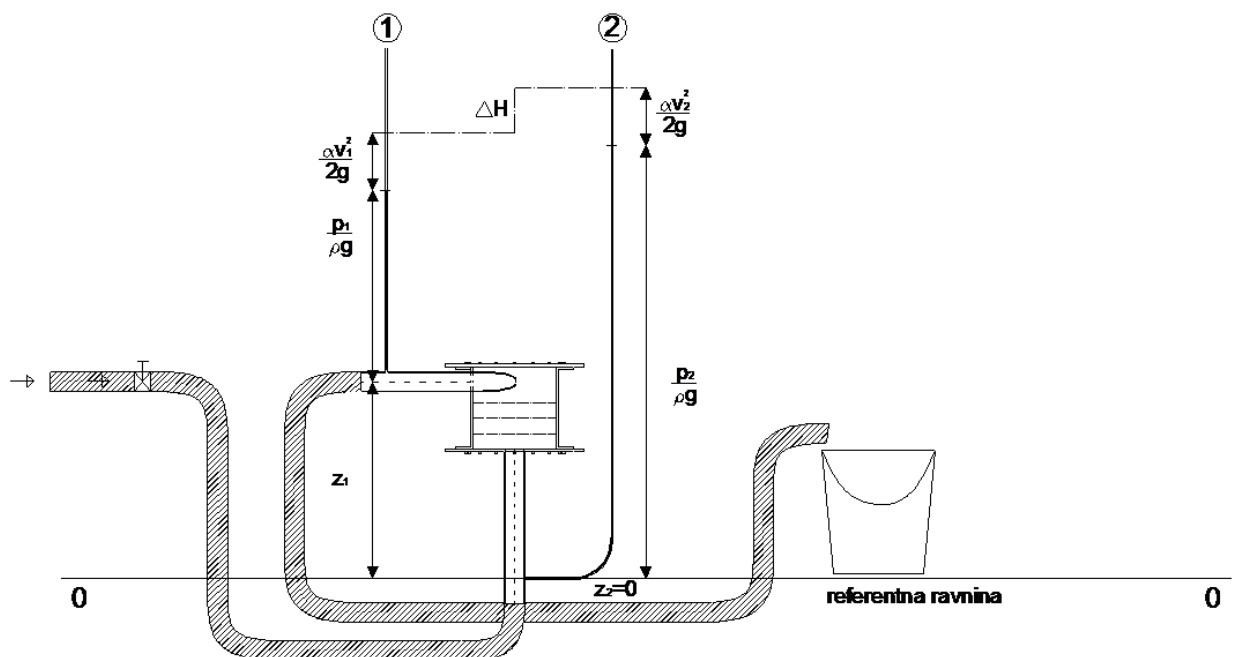
$$\Delta H = \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) - \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \quad (12)$$

U ovom slučaju je piezometarska visina u piezometru 2 veća nego u piezometru 1 jer voda ulazi kroz aksijalnu cijev a izlazi kroz tangencijalnu. Ostalo je sve isto kao i kod prigušnog smjera, samo će zbog zamjena ulaza i izlaza u diodu vrijediti zapis:

$$\Delta H = \frac{p_2}{\rho g} - \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) \quad (13)$$

2) vrijeme t [s] potrebno da se napuni kanta volumena $V=12$ [l]

Isto kao i kod prigušnog smjera.



Slika 19. Model za propusni smjer s pripadnim članovima Bernoullijeve jednadžbe

Kod proračuna gubitaka zanemareni su linijski gubici u tangencijalnoj i aksijalnoj cijevi od piezometra do diode, odnosno od diode do piezometra. Cijevi su od pleksiglasa i relativna hrapavost im je mala te su duljine cijevi također male, time su linijski gubici zanemarivi.

Za izračunavanje koeficijenta gubitka u diodi ξ [1] bilo je potrebno izraziti brzinu v [m/s]:

$$Q = v \cdot A \rightarrow v = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

Površina poprečnog presjeka tangencijalne odnosno aksijalne cijevi dobivena je

kao površina kruga unutrašnjeg promjera 35 [mm]=0.035 [m] : $A = \frac{d^2 \Pi}{4}$ (15)

Koeficijent lokalnog gubitka u diodi je dobiven prema izrazu (8).

Diodnost je izračunata na temelju maksimalne postignute brzine u prigušnom smjeru pomoću relacije (7). Koeficijent lokalnog gubitka je izračunat kao aritmetička sredina izmjerenih lokalnih gubitaka za pojedinu visinu diode.

4.3.1. Hidraulička dioda visine 150 [mm]

A) PRIGUŠNI SMJER

Tablica 1. Izmjerene i izračunate vrijednosti za prigušni smjer i visinu diode

$$h=150\text{mm}$$

h=150mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mjerjenja	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{dioda}	
	[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]	
Prigušni smjer	1	55,50	0,5550	12	0,012	13,38	0,00090	0,00096	0,9322	0,0443	12,53
	2	54,90	0,5490	12	0,012	13,46	0,00089	0,00096	0,9266	0,0438	12,54
	3	50,40	0,5040	12	0,012	14,20	0,00085	0,00096	0,8783	0,0393	12,82
	4	47,30	0,4730	12	0,012	14,84	0,00081	0,00096	0,8405	0,0360	13,14
	5	44,00	0,4400	12	0,012	15,68	0,00077	0,00096	0,7954	0,0322	13,64
	6	40,40	0,4040	12	0,012	15,76	0,00076	0,00096	0,7917	0,0319	12,65
	7	38,20	0,3820	12	0,012	16,51	0,00073	0,00096	0,7555	0,0291	13,13
	8	36,60	0,3660	12	0,012	16,77	0,00072	0,00096	0,7437	0,0282	12,98
	9	33,80	0,3380	12	0,012	16,96	0,00071	0,00096	0,7354	0,0276	12,26
	10	32,10	0,3210	12	0,012	17,09	0,00070	0,00096	0,7298	0,0271	11,82
	11	31,70	0,3170	12	0,012	17,63	0,00068	0,00096	0,7075	0,0255	12,43
	12	28,10	0,2810	12	0,012	19,10	0,00063	0,00096	0,6530	0,0217	12,93
	13	27,70	0,2770	12	0,012	19,46	0,00062	0,00096	0,6409	0,0209	13,23
	14	24,10	0,2410	12	0,012	21,03	0,00057	0,00096	0,5931	0,0179	13,44
	15	23,10	0,2310	12	0,012	21,07	0,00057	0,00096	0,5920	0,0179	12,93
	16	21,50	0,2150	12	0,012	21,20	0,00057	0,00096	0,5883	0,0176	12,19
	17	20,60	0,2060	12	0,012	21,92	0,00055	0,00096	0,5691	0,0165	12,48
	18	17,40	0,1740	12	0,012	24,11	0,00050	0,00096	0,5173	0,0136	12,76
	19	16,20	0,1620	12	0,012	24,23	0,00050	0,00096	0,5149	0,0135	11,99
	20	14,30	0,1430	12	0,012	26,52	0,00045	0,00096	0,4703	0,0113	12,68
	21	11,50	0,1150	12	0,012	30,22	0,00040	0,00096	0,4127	0,0087	13,25
	22	9,40	0,0940	12	0,012	32,37	0,00037	0,00096	0,3853	0,0076	12,42
	23	2,20	0,0220	12	0,012	65,21	0,00018	0,00096	0,1913	0,0019	11,80

B) PROPUSNI SMJER

Tablica 2. Izmjerene i izračunate vrijednosti za propusni smjer i visinu diode
 $h=150\text{mm}$

h=150mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mjeranja	ΔH	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{diode}
		[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]
1	16,80	0,1680	12	0,012	7,92	0,00152	0,00096	1,5758	0,1266	1,33	
2	15,50	0,1550	12	0,012	8,35	0,00144	0,00096	1,4937	0,1137	1,36	
3	14,40	0,1440	12	0,012	8,94	0,00134	0,00096	1,3951	0,0992	1,45	
4	13,20	0,1320	12	0,012	9,06	0,00133	0,00096	1,3774	0,0967	1,37	
5	12,20	0,1220	12	0,012	9,65	0,00124	0,00096	1,2932	0,0852	1,43	
6	11,40	0,1140	12	0,012	10,22	0,00117	0,00096	1,2210	0,0760	1,50	
7	10,40	0,1040	12	0,012	10,36	0,00116	0,00096	1,2039	0,0739	1,41	
8	9,50	0,0950	12	0,012	10,96	0,00110	0,00096	1,1385	0,0661	1,44	
9	8,00	0,0800	12	0,012	12,31	0,00098	0,00096	1,0136	0,0524	1,53	
10	7,00	0,0700	12	0,012	12,92	0,00093	0,00096	0,9654	0,0475	1,47	
11	6,00	0,0600	12	0,012	14,44	0,00083	0,00096	0,8638	0,0380	1,58	
12	4,70	0,0470	12	0,012	16,11	0,00074	0,00096	0,7742	0,0306	1,54	
13	3,70	0,0370	12	0,012	18,13	0,00066	0,00096	0,6881	0,0241	1,53	
14	2,80	0,0280	12	0,012	21,50	0,00056	0,00096	0,5803	0,0172	1,63	
15	2,00	0,0200	12	0,012	24,02	0,00050	0,00096	0,5193	0,0137	1,46	
16	1,60	0,0160	12	0,012	29,39	0,00041	0,00096	0,4245	0,0092	1,74	

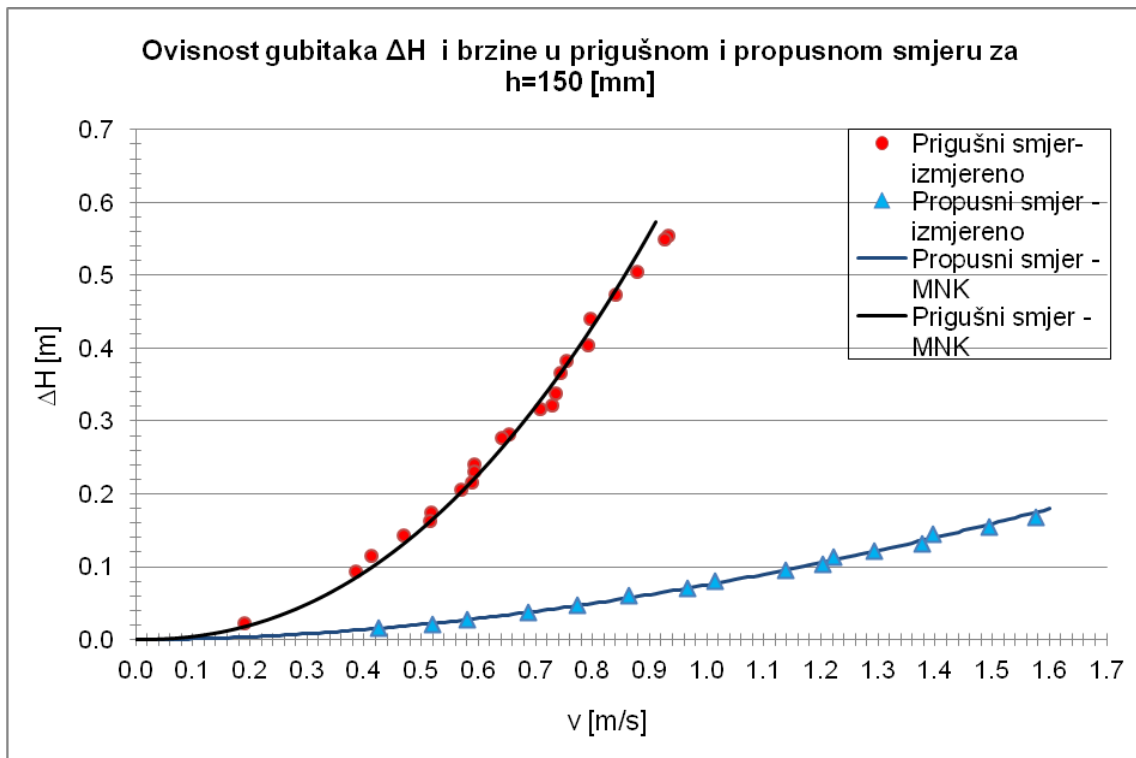
Na temelju izmjerenih podataka metodom najmanjih kvadrata aproksimirane su krivulje za prigušni ($\Delta H=0,70585 \cdot v^{2,21753}$) i propusni smjer ($\Delta H=0,07514 \cdot v^{1,85581}$) (slika 20.). Jednadžbe krivulja dobivene koristeći srednju vrijednost koeficijenta

lokalnih gubitaka: 1. Prigušni smjer : $\Delta H=12,70 \cdot \frac{v^2}{2g}$

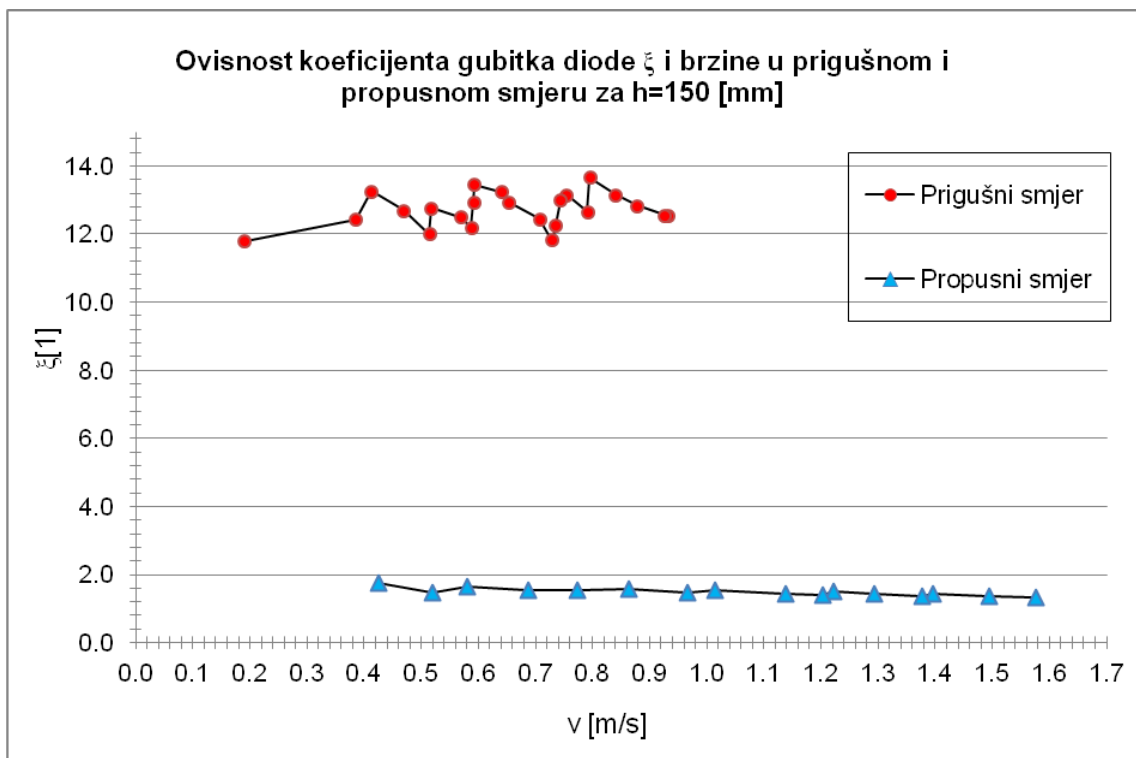
2. Propusni smjer: $\Delta H=1,49 \cdot \frac{v^2}{2g}$

Tablica 3. Diodnost pri maksimalno postignutom protoku u prigušnom smjeru za
 $h=150\text{ [mm]}$

	v [m/s]	ΔH [m]	DIODNOST
PRIGUŠNI SMJER	0,9322	0,563	1:8,5
PROPUSNI SMJER		0,066	



Slika 20. Dijagram ovisnosti gubitaka ΔH [m] i v [m/s] za visinu diode $h=150$ [mm]



Slika 21. Dijagram ovisnosti koeficijenta gubitka diode ξ [1] i v [m/s] za visinu diode $h=150$ [mm]

4.3.2. Hidraulička dioda visine 120 [mm]

A) PRIGUŠNI SMJER

Tablica 4. Izmjerene i izračunate vrijednosti za prigušni smjer i visinu diode

 $h=120$ [mm]

h=120mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mjerjenja	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{dioda}	
	[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]	
Prigušni smjer	1	63,70	0,6370	12	0,012	13,11	0,00092	0,00096	0,9514	0,0461	13,81
	2	61,60	0,6160	12	0,012	13,27	0,00090	0,00096	0,9399	0,0450	13,68
	3	59,20	0,5920	12	0,012	13,74	0,00087	0,00096	0,9078	0,0420	14,10
	4	57,10	0,5710	12	0,012	13,87	0,00087	0,00096	0,8992	0,0412	13,85
	5	55,00	0,5500	12	0,012	14,17	0,00085	0,00096	0,8805	0,0395	13,92
	6	52,90	0,5290	12	0,012	14,22	0,00084	0,00096	0,8774	0,0392	13,48
	7	50,60	0,5060	12	0,012	14,36	0,00084	0,00096	0,8686	0,0385	13,16
	8	48,80	0,4880	12	0,012	14,93	0,00080	0,00096	0,8354	0,0356	13,72
	9	45,70	0,4570	12	0,012	15,48	0,00078	0,00096	0,8057	0,0331	13,81
	10	43,20	0,4320	12	0,012	15,57	0,00077	0,00096	0,8013	0,0327	13,20
	11	41,10	0,4110	12	0,012	16,09	0,00075	0,00096	0,7754	0,0306	13,41
	12	39,00	0,3900	12	0,012	16,43	0,00073	0,00096	0,7591	0,0294	13,28
	13	37,20	0,3720	12	0,012	16,57	0,00072	0,00096	0,7527	0,0289	12,88
	14	34,90	0,3490	12	0,012	17,39	0,00069	0,00096	0,7174	0,0262	13,30
	15	32,60	0,3260	12	0,012	18,06	0,00066	0,00096	0,6908	0,0243	13,40
	16	30,50	0,3050	12	0,012	18,43	0,00065	0,00096	0,6769	0,0234	13,06
	17	28,50	0,2850	12	0,012	19,16	0,00063	0,00096	0,6510	0,0216	13,20
	18	27,00	0,2700	12	0,012	20,05	0,00060	0,00096	0,6221	0,0197	13,69
	19	25,20	0,2520	12	0,012	20,21	0,00059	0,00096	0,6171	0,0194	12,98
	20	22,80	0,2280	12	0,012	20,77	0,00058	0,00096	0,6005	0,0184	12,40
	21	20,90	0,2090	12	0,012	21,94	0,00055	0,00096	0,5686	0,0165	12,68
	22	18,50	0,1850	12	0,012	23,12	0,00052	0,00096	0,5395	0,0148	12,47
	23	15,70	0,1570	12	0,012	25,50	0,00047	0,00096	0,4891	0,0122	12,88
	24	13,40	0,1340	12	0,012	26,90	0,00045	0,00096	0,4637	0,0110	12,23
	25	10,90	0,1090	12	0,012	30,45	0,00039	0,00096	0,4096	0,0086	12,75
	26	8,40	0,0840	12	0,012	33,80	0,00036	0,00096	0,3690	0,0069	12,10
	27	6,50	0,0650	12	0,012	39,16	0,00031	0,00096	0,3185	0,0052	12,57
	28	4,30	0,0430	12	0,012	47,23	0,00025	0,00096	0,2641	0,0036	12,10
	29	3,20	0,0320	12	0,012	53,25	0,00023	0,00096	0,2342	0,0028	11,44
	30	2,40	0,0240	12	0,012	63,32	0,00019	0,00096	0,1970	0,0020	12,14

B) PROPUSNI SMJER

Tablica 5. Izmjerene i izračunate vrijednosti za propusni smjer i visinu diode
 $h=120$ [mm]

h=120mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mje renja	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{diode}	
	[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]	
Propusni smjer	1	17,00	0,1700	12	0,012	7,62	0,00157	0,00096	1,6368	0,1366	1,24
	2	15,80	0,1580	12	0,012	7,93	0,00151	0,00096	1,5738	0,1262	1,25
	3	14,90	0,1490	12	0,012	8,42	0,00143	0,00096	1,4822	0,1120	1,33
	4	13,90	0,1390	12	0,012	8,84	0,00136	0,00096	1,4109	0,1015	1,37
	5	12,80	0,1280	12	0,012	9,08	0,00132	0,00096	1,3744	0,0963	1,33
	6	11,80	0,1180	12	0,012	9,47	0,00127	0,00096	1,3171	0,0884	1,33
	7	10,90	0,1090	12	0,012	10,11	0,00119	0,00096	1,2343	0,0776	1,40
	8	10,00	0,1000	12	0,012	10,70	0,00112	0,00096	1,1657	0,0693	1,44
	9	9,00	0,0900	12	0,012	10,98	0,00109	0,00096	1,1365	0,0658	1,37
	10	8,10	0,0810	12	0,012	11,80	0,00102	0,00096	1,0574	0,0570	1,42
	11	7,00	0,0700	12	0,012	12,71	0,00094	0,00096	0,9817	0,0491	1,43
	12	6,20	0,0620	12	0,012	13,44	0,00089	0,00096	0,9280	0,0439	1,41
	13	5,00	0,0500	12	0,012	16,41	0,00073	0,00096	0,7603	0,0295	1,70
	14	4,00	0,0400	12	0,012	17,55	0,00068	0,00096	0,7107	0,0257	1,55
	15	3,50	0,0350	12	0,012	19,33	0,00062	0,00096	0,6454	0,0212	1,65
	16	2,60	0,0260	12	0,012	21,12	0,00057	0,00096	0,5907	0,0178	1,46
	17	2,00	0,0200	12	0,012	24,96	0,00048	0,00096	0,4997	0,0127	1,57
	18	1,00	0,0100	12	0,012	34,12	0,00035	0,00096	0,3655	0,0068	1,47

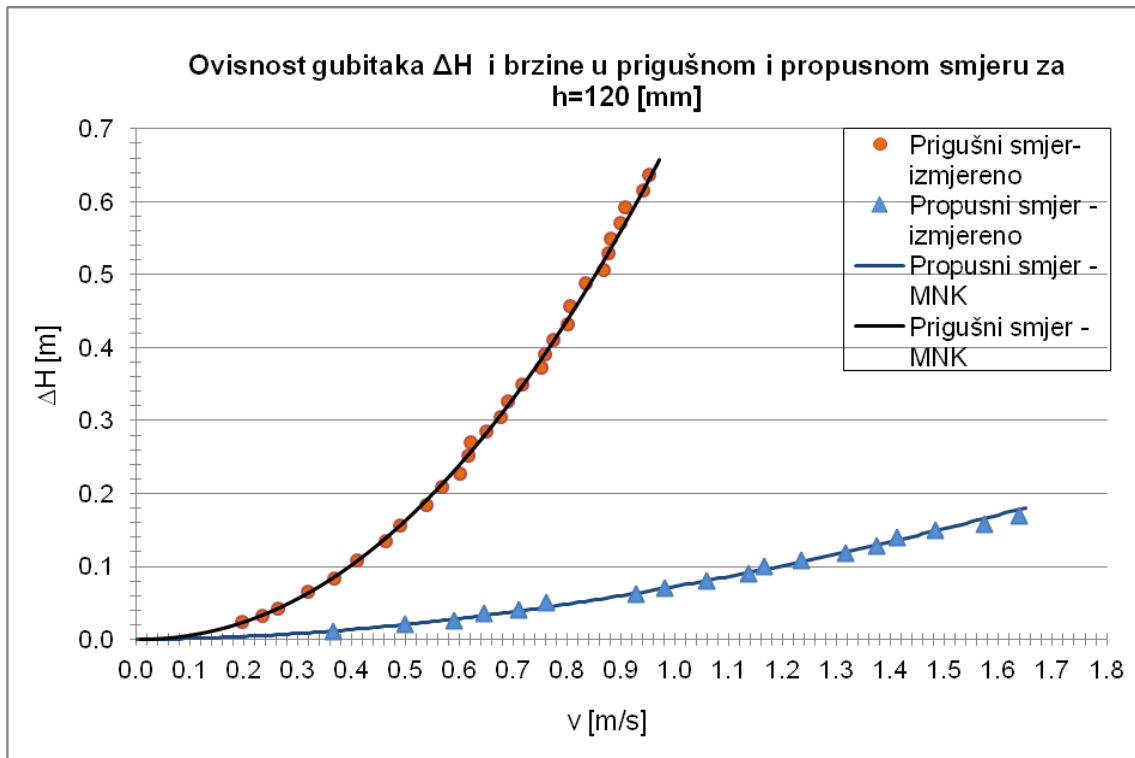
Na temelju izmjerenih podataka metodom najmanjih kvadrata aproksimirane su krivulje za prigušni ($\Delta H=0,70045 \cdot v^{2,10336}$) i propusni smjer ($\Delta H=0,072613 \cdot v^{1,821807}$) (slika 22.). Jednadžbe krivulja dobivene koristeći srednju vrijednost koeficijenta

lokalnih gubitaka: 1. Prigušni smjer : $\Delta H=13,06 \cdot \frac{v^2}{2g}$

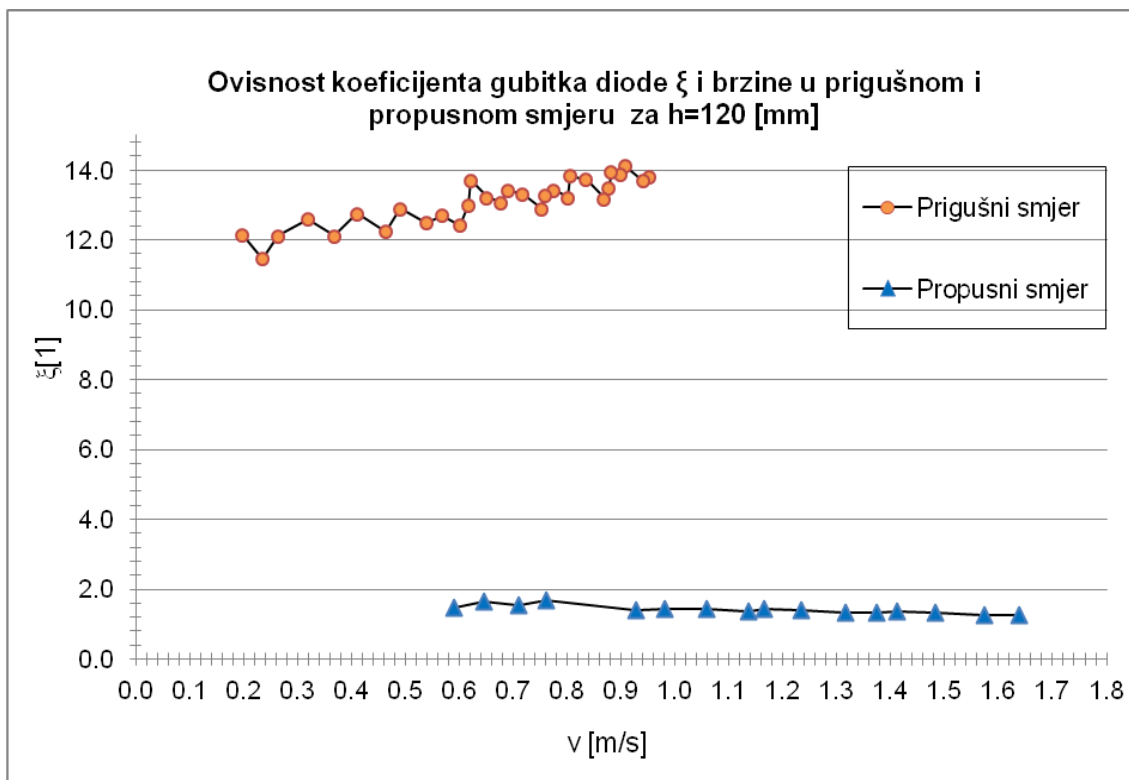
2. Propusni smjer: $\Delta H=1,43 \cdot \frac{v^2}{2g}$

Tablica 6. Diodnost pri maksimalno postignutom protoku u prigušnom smjeru za $h=120$ [mm]

	v [m/s]	ΔH [m]	DIODNOST
PRIGUŠNI SMJER	0,9514	0,603	1:9,1
PROPUSNI SMJER		0,066	



Slika 22. Dijagram ovisnosti gubitaka ΔH [m] i v [m/s] za visinu diode $h=120$ [mm]



Slika 23. Dijagram ovisnosti koeficijenta gubitka diode ξ [1] i v [m/s] za visinu diode $h=120$ [mm]

4.3.3. Hidraulička dioda visine 90 [mm]

A) PRIGUŠNI SMJER

Tablica 7. Izmjerene i izračunate vrijednosti za prigušni smjer i visinu diode

$$h=90 \text{ [mm]}$$

h=90mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mjerjenja	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{dioda}	
	[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]	
Prigušni smjer	1	71,40	0,7140	12	0,012	13,61	0,00088	0,00096	0,9164	0,0428	16,68
	2	69,00	0,6900	12	0,012	13,88	0,00086	0,00096	0,8986	0,0412	16,77
	3	66,40	0,6640	12	0,012	14,54	0,00083	0,00096	0,8578	0,0375	17,70
	4	64,20	0,6420	12	0,012	14,67	0,00082	0,00096	0,8502	0,0368	17,43
	5	61,80	0,6180	12	0,012	14,68	0,00082	0,00096	0,8496	0,0368	16,80
	6	59,50	0,5950	12	0,012	15,09	0,00080	0,00096	0,8265	0,0348	17,09
	7	57,00	0,5700	12	0,012	15,33	0,00078	0,00096	0,8136	0,0337	16,89
	8	54,40	0,5440	12	0,012	15,75	0,00076	0,00096	0,7919	0,0320	17,02
	9	51,80	0,5180	12	0,012	16,15	0,00074	0,00096	0,7723	0,0304	17,04
	10	49,50	0,4950	12	0,012	16,68	0,00072	0,00096	0,7480	0,0285	17,36
	11	47,00	0,4700	12	0,012	17,01	0,00071	0,00096	0,7335	0,0274	17,14
	12	44,30	0,4430	12	0,012	17,49	0,00069	0,00096	0,7131	0,0259	17,09
	13	42,00	0,4200	12	0,012	18,02	0,00067	0,00096	0,6923	0,0244	17,19
	14	40,00	0,4000	12	0,012	18,35	0,00065	0,00096	0,6797	0,0235	16,99
	15	37,70	0,3770	12	0,012	18,99	0,00063	0,00096	0,6570	0,0220	17,14
	16	34,90	0,3490	12	0,012	19,41	0,00062	0,00096	0,6427	0,0211	16,57
	17	32,20	0,3220	12	0,012	20,11	0,00060	0,00096	0,6202	0,0196	16,42
	18	30,00	0,3000	12	0,012	20,97	0,00057	0,00096	0,5949	0,0180	16,63
	19	28,30	0,2830	12	0,012	21,71	0,00055	0,00096	0,5745	0,0168	16,82
	20	27,00	0,2700	12	0,012	22,01	0,00055	0,00096	0,5668	0,0164	16,49
	21	24,60	0,2460	12	0,012	23,02	0,00052	0,00096	0,5419	0,0150	16,43
	22	21,20	0,2120	12	0,012	24,65	0,00049	0,00096	0,5060	0,0130	16,25
	23	19,50	0,1950	12	0,012	25,54	0,00047	0,00096	0,4884	0,0122	16,04
	24	17,30	0,1730	12	0,012	27,17	0,00044	0,00096	0,4591	0,0107	16,11
	25	14,60	0,1460	12	0,012	29,86	0,00040	0,00096	0,4177	0,0089	16,42
	26	11,80	0,1180	12	0,012	32,66	0,00037	0,00096	0,3819	0,0074	15,87
	27	9,00	0,0900	12	0,012	36,99	0,00032	0,00096	0,3372	0,0058	15,53
	28	6,50	0,0650	12	0,012	44,23	0,00027	0,00096	0,2820	0,0041	16,04

B) PROPUSNI SMJER

Tablica 8. Izmjerene i izračunate vrijednosti za propusni smjer i visinu diode

$h=90$ [mm]

h=90mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mjerjenja	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{diode}	
	[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]	
Propusni smjer	1	17,30	0,1730	12	0,012	8,20	0,00146	0,00096	1,5210	0,1179	1,47
	2	16,40	0,1640	12	0,012	8,51	0,00141	0,00096	1,4656	0,1095	1,50
	3	15,50	0,1550	12	0,012	8,48	0,00142	0,00096	1,4708	0,1103	1,41
	4	14,60	0,1460	12	0,012	9,08	0,00132	0,00096	1,3744	0,0963	1,52
	5	13,40	0,1340	12	0,012	9,28	0,00129	0,00096	1,3447	0,0922	1,45
	6	12,70	0,1270	12	0,012	9,69	0,00124	0,00096	1,2878	0,0845	1,50
	7	11,50	0,1150	12	0,012	10,27	0,00117	0,00096	1,2145	0,0752	1,53
	8	10,50	0,1050	12	0,012	10,84	0,00111	0,00096	1,1506	0,0675	1,56
	9	9,50	0,0950	12	0,012	11,35	0,00106	0,00096	1,0989	0,0615	1,54
	10	8,60	0,0860	12	0,012	12,26	0,00098	0,00096	1,0178	0,0528	1,63
	11	7,40	0,0740	12	0,012	12,81	0,00094	0,00096	0,9737	0,0483	1,53
	12	6,90	0,0690	12	0,012	13,71	0,00088	0,00096	0,9097	0,0422	1,64
	13	5,60	0,0560	12	0,012	15,35	0,00078	0,00096	0,8125	0,0337	1,66
	14	4,80	0,0480	12	0,012	15,93	0,00075	0,00096	0,7830	0,0312	1,54
	15	4,10	0,0410	12	0,012	17,92	0,00067	0,00096	0,6962	0,0247	1,66
	16	3,00	0,0300	12	0,012	20,22	0,00059	0,00096	0,6168	0,0194	1,55
	17	2,20	0,0220	12	0,012	23,41	0,00051	0,00096	0,5329	0,0145	1,52
	18	1,60	0,0160	12	0,012	28,43	0,00042	0,00096	0,4388	0,0098	1,63

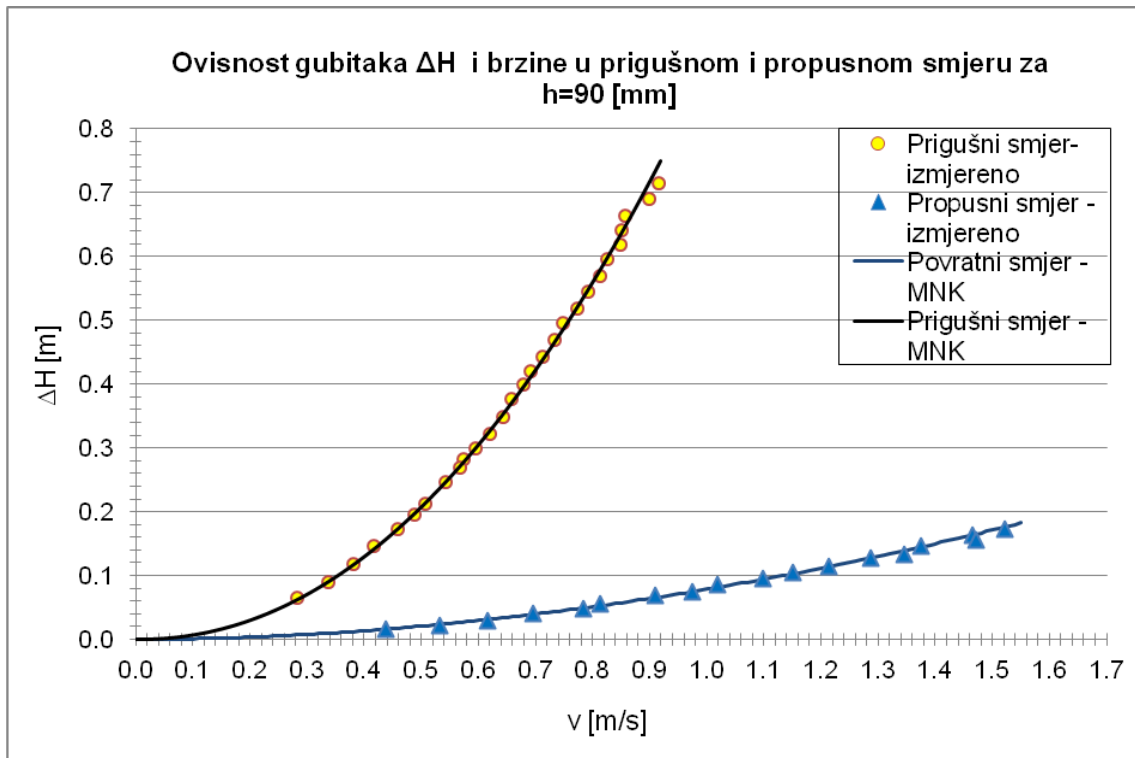
Na temelju izmjerenih podataka metodom najmanjih kvadrata aproksimirane su krivulje za prigušni ($\Delta H=0,89384 \cdot v^{2,10772}$) i propusni smjer ($\Delta H=0,07859 \cdot v^{1,92248}$) (slika 24.). Jednadžbe krivulja dobivene koristeći srednju vrijednost koeficijenta

lokalnih gubitaka: 1. Prigušni smjer : $\Delta H=16,71 \cdot \frac{v^2}{2g}$

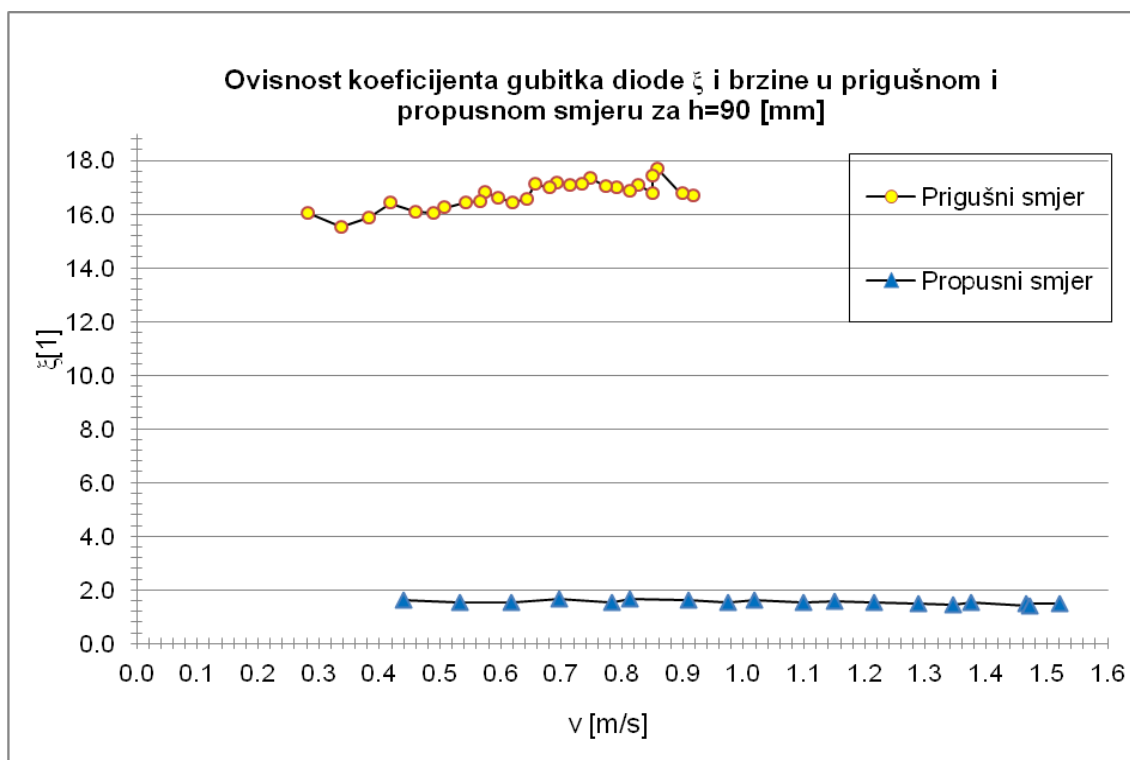
2. Propusni smjer: $\Delta H=1,55 \cdot \frac{v^2}{2g}$

Tablica 9. Diodnost pri maksimalno postignutom protoku u prigušnom smjeru za $h=90$ [mm]

	v [m/s]	ΔH [m]	DIODNOST
PRIGUŠNI SMJER	0,9164	0,708	1:10,8
PROPUSNI SMJER		0,066	



Slika 24. Dijagram ovisnosti gubitaka ΔH [m] i v [m/s] za visinu diode $h=90$ [mm]



Slika 25. Dijagram ovisnosti koeficijenta gubitka diode ξ [1] i v [m/s] za visinu diode $h=90$ [mm]

4.3.4. Hidraulička dioda visine 60 [mm]

A) PRIGUŠNI SMJER

Tablica 10. Izmjerene i izračunate vrijednosti za prigušni smjer i visinu diode

$$h=60 \text{ [mm]}$$

h=60mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mjerjenja	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{dioda}	
	[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]	
Prigušni smjer	1	76,80	0,7680	12	0,012	14,04	0,00085	0,00096	0,8884	0,0402	19,09
	2	74,30	0,7430	12	0,012	14,21	0,00084	0,00096	0,8777	0,0393	18,92
	3	72,00	0,7200	12	0,012	14,36	0,00084	0,00096	0,8686	0,0385	18,73
	4	68,90	0,6890	12	0,012	14,70	0,00082	0,00096	0,8485	0,0367	18,78
	5	67,50	0,6750	12	0,012	15,03	0,00080	0,00096	0,8298	0,0351	19,23
	6	65,40	0,6540	12	0,012	15,40	0,00078	0,00096	0,8099	0,0334	19,56
	7	63,70	0,6370	12	0,012	15,61	0,00077	0,00096	0,7990	0,0325	19,58
	8	61,80	0,6180	12	0,012	15,74	0,00076	0,00096	0,7924	0,0320	19,31
	9	59,40	0,5940	12	0,012	16,08	0,00075	0,00096	0,7757	0,0307	19,37
	10	56,70	0,5670	12	0,012	16,44	0,00073	0,00096	0,7587	0,0293	19,33
	11	54,30	0,5430	12	0,012	16,77	0,00072	0,00096	0,7437	0,0282	19,26
	12	52,30	0,5230	12	0,012	17,23	0,00070	0,00096	0,7239	0,0267	19,58
	13	50,00	0,5000	12	0,012	17,40	0,00069	0,00096	0,7168	0,0262	19,09
	14	48,00	0,4800	12	0,012	17,71	0,00068	0,00096	0,7043	0,0253	18,99
	15	45,70	0,4570	12	0,012	18,20	0,00066	0,00096	0,6853	0,0239	19,09
	16	43,50	0,4350	12	0,012	18,86	0,00064	0,00096	0,6613	0,0223	19,51
	17	41,20	0,4120	12	0,012	19,09	0,00063	0,00096	0,6534	0,0218	18,94
	18	39,10	0,3910	12	0,012	19,68	0,00061	0,00096	0,6338	0,0205	19,10
	19	37,10	0,3710	12	0,012	20,22	0,00059	0,00096	0,6168	0,0194	19,13
	20	35,00	0,3500	12	0,012	20,76	0,00058	0,00096	0,6008	0,0184	19,02
	21	32,50	0,3250	12	0,012	21,43	0,00056	0,00096	0,5820	0,0173	18,82
	22	30,20	0,3020	12	0,012	22,34	0,00054	0,00096	0,5583	0,0159	19,01
	23	27,20	0,2720	12	0,012	22,86	0,00052	0,00096	0,5456	0,0152	17,93
	24	24,80	0,2480	12	0,012	24,02	0,00050	0,00096	0,5193	0,0137	18,05
	25	23,00	0,2300	12	0,012	25,32	0,00047	0,00096	0,4926	0,0124	18,60
	26	20,70	0,2070	12	0,012	26,52	0,00045	0,00096	0,4703	0,0113	18,36
	27	18,20	0,1820	12	0,012	28,75	0,00042	0,00096	0,4338	0,0096	18,97
	28	16,00	0,1600	12	0,012	29,57	0,00041	0,00096	0,4218	0,0091	17,64
	29	13,60	0,1360	12	0,012	32,36	0,00037	0,00096	0,3854	0,0076	17,96

B) PROPUSNI SMJER

Tablica 11. Izmjerene i izračunate vrijednosti za propusni smjer i visinu diode
 $h=60$ [mm]

h=60mm		IZMJERENO					IZRAČUNATO				
Broj mjerjenja	ΔH		V		t	Q	A	v	$v^2/2g$	ξ_{diode}	
	[cm]	[m]	[l]	[m ³]	[s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m/s]	[m]	[1]	
Propusni smjer	1	16,50	0,1650	12	0,012	8,10	0,00148	0,00096	1,5408	0,1210	1,36
	2	15,70	0,1570	12	0,012	8,47	0,00142	0,00096	1,4726	0,1105	1,42
	3	14,20	0,1420	12	0,012	8,84	0,00136	0,00096	1,4109	0,1015	1,40
	4	13,50	0,1350	12	0,012	9,13	0,00132	0,00096	1,3669	0,0952	1,42
	5	12,50	0,1250	12	0,012	9,79	0,00123	0,00096	1,2747	0,0828	1,51
	6	11,50	0,1150	12	0,012	10,22	0,00117	0,00096	1,2204	0,0759	1,51
	7	10,70	0,1070	12	0,012	10,69	0,00112	0,00096	1,1667	0,0694	1,54
	8	9,80	0,0980	12	0,012	11,39	0,00105	0,00096	1,0955	0,0612	1,60
	9	8,80	0,0880	12	0,012	12,05	0,00100	0,00096	1,0351	0,0546	1,61
	10	7,80	0,0780	12	0,012	12,66	0,00095	0,00096	0,9856	0,0495	1,58
	11	6,90	0,0690	12	0,012	13,42	0,00089	0,00096	0,9297	0,0441	1,57
	12	5,70	0,0570	12	0,012	15,01	0,00080	0,00096	0,8312	0,0352	1,62
	13	4,60	0,0460	12	0,012	16,57	0,00072	0,00096	0,7527	0,0289	1,59
	14	3,90	0,0390	12	0,012	18,74	0,00064	0,00096	0,6657	0,0226	1,73
	15	2,80	0,0280	12	0,012	21,76	0,00055	0,00096	0,5732	0,0167	1,67
	16	2,00	0,0200	12	0,012	25,22	0,00048	0,00096	0,4946	0,0125	1,60
	17	1,00	0,0100	12	0,012	40,23	0,00030	0,00096	0,3100	0,0049	2,04

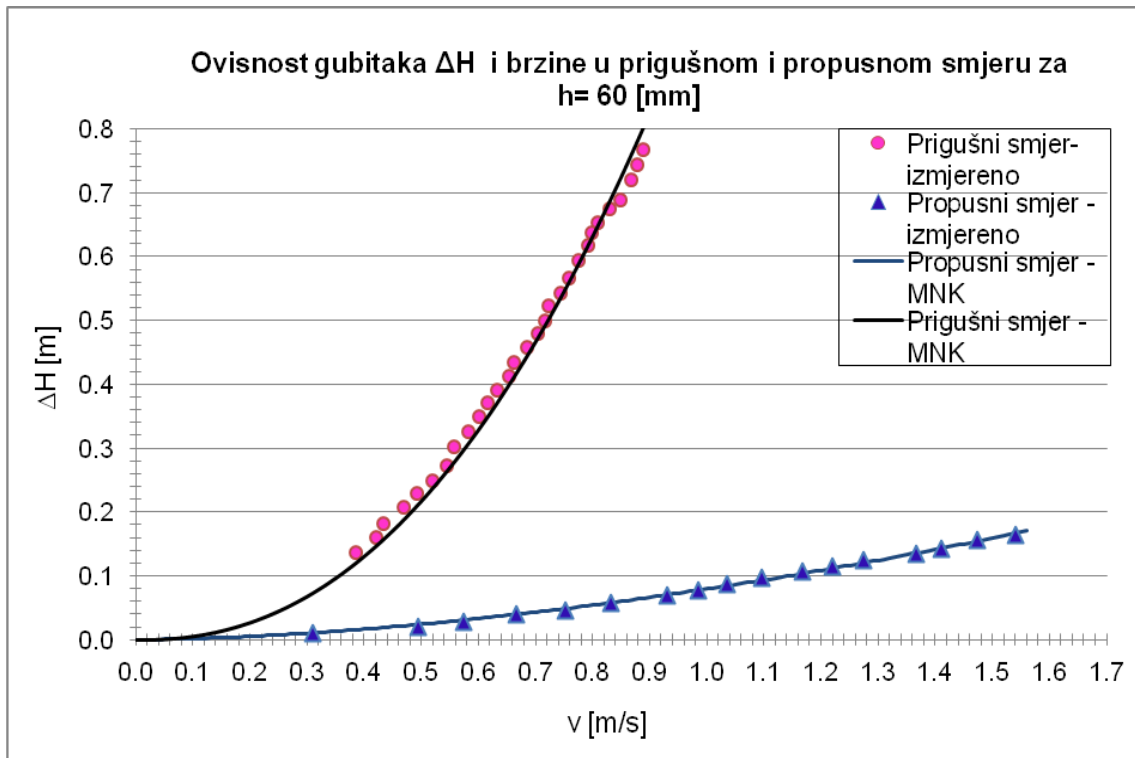
Na temelju izmjerenih podataka metodom najmanjih kvadrata aproksimirane su krivulje za prigušni ($\Delta H=1,05045 \cdot v^{2,26744}$) i propusni smjer ($\Delta H=0,07943 \cdot v^{1,71606}$) (slika 26.). Jednadžbe krivulja dobivene koristeći srednju vrijednost koeficijenta

lokalnih gubitaka: 1. Prigušni smjer : $\Delta H=18,93 \cdot \frac{v^2}{2g}$

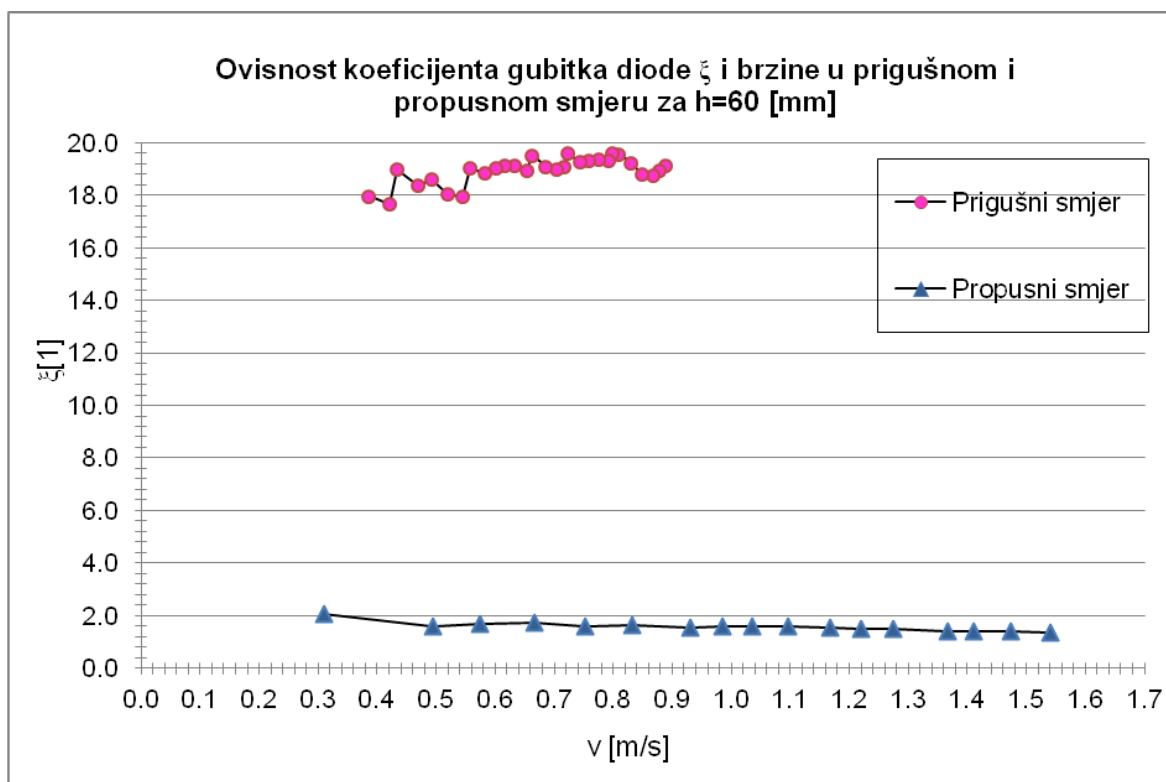
2. Propusni smjer: $\Delta H=1,57 \cdot \frac{v^2}{2g}$

Tabela 12. Diodnost pri maksimalno postignutom protoku u prigušnom smjeru za $h=60$ [mm]

	v [m/s]	ΔH [m]	DIODNOST
PRIGUŠNI SMJER	0,8884	0,761	1:12,1
PROPUSNI SMJER		0,063	



Slika 26. Dijagram ovisnosti gubitaka ΔH [m] i v [m/s] za visinu diode $h=60$ [mm]



Slika 27. : Dijagram ovisnosti koeficijenta gubitka diode ξ [1] i v [m/s] za visinu diode $h=60$ [mm]

4.4. Analiza i usporedba izmjerenih veličina

Iz dobivenih rezultata mjerenja može se vidjeti osnovno svojstvo diode: prigušivanje toka i pojavu do 10 puta većih gubitaka u prigušnom smjeru nego u propusnom smjeru.

4.4.1. Prigušni smjer

Kao što je već rečeno, strujanje je stacionarno i vrijedi jednačina kontinuiteta mase, tj. brzine u tangencijalnoj cijevi i aksijalnoj cijevi su jednake. Različiti odnosi D/h uzrokuju različite učinkovitosti prigušivanja.

- 1) Usporedba maksimalno postignutih gubitaka diode

Tablica 13. Maksimalni gubici ΔH [m] za različite visine diode

D/h	h [mm]	ΔH [m]	v [m/s]
1.07	150	0.5500	0.9266
1.33	120	0.6370	0.9514
1.78	90	0.7140	0.9164
2.67	60	0.7680	0.9084

Vidi se da je pad tlačne visine veći pri smanjenju unutarnje visine diode, tj. pri povećanju odnosa D/h . Također, brzine su manje, osim odskakanja za visinu 120 [mm], što je uzrokovano greškama u mjerenju.

- 2) Usporedba pada tlačnih visina diode za proizvoljno odabrane, ali podjednake brzine

Tablica 14. Gubici ΔH [m] pri podjednakim brzinama za različite visine diode

		1		2		3	
D/h	h [mm]	ΔH [m]	v [m/s]	ΔH [m]	v [m/s]	ΔH [m]	v [m/s]
1.07	150	0.3380	0.7437	0.2770	0.6530	0.1740	0.5173
1.33	120	0.3720	0.7527	0.2850	0.6510	0.1850	0.5395
1.78	90	0.4950	0.7480	0.3770	0.6570	0.2120	0.5060
2.67	60	0.5430	0.7437	0.4120	0.6534	0.2480	0.5112

Može se vidjeti da pri podjednakim brzinama veći odnos D/h daje veći pad tlačne visine.

- 3) Usporedba brzina za proizvoljno odabrani, ali podjednak pad tlačne visine

Tablica 15. Brzine za podjednake gubitke ΔH [m]

		1		2		3	
D/h	h [mm]	ΔH [m]	v [m/s]	ΔH [m]	v [m/s]	ΔH [m]	v [m/s]
1.07	150	0.4730	0.8405	0.3210	0.7075	0.2770	0.6530
1.33	120	0.4880	0.8354	0.3260	0.6908	0.2700	0.6173
1.78	90	0.4700	0.7335	0.3220	0.6570	0.2700	0.5668
2.67	60	0.4800	0.7043	0.3250	0.5820	0.2720	0.5456

Vidi se da je pri podjednakim gubicima ΔH [m], brzina manja za veći odnos D/h .

- 4) Usporedba diodnosti

Tablica 16. Usporedba diodnosti za različite visine diode

D/h	h [mm]	DIODNOST
1.07	150	1 : 8,5
1.33	120	1 : 9,1
1.78	90	1 : 10,8
2.67	60	1 : 12,1

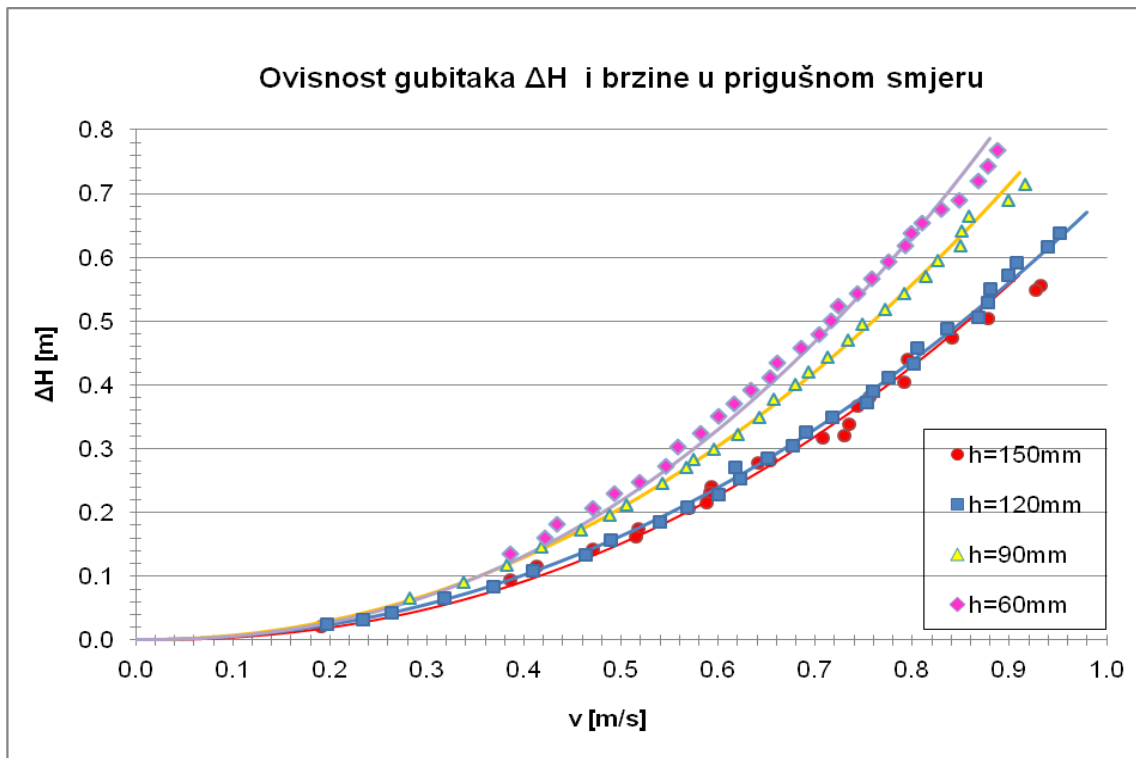
Diodnost raste s porastom odnosa D/h . Za visinu diode $h=60$ [mm] diodnost je najveća.

Iz priloženog se vidi da u diodi s većim D/h dolazi do većeg prigušivanja, tj., većeg smanjenja tlačne visine i pojave manjih brzina. Također se primjećuje da su vrijednosti pada tlačne visine i brzine, za diode visine 150 i 120 [mm] sličniji nego oni za primjerice 120 i 90 [mm]. Za manju visinu diode, vrtlog koji se formira je stabilniji i daje veće prigušenje. Bit je dakle u povećanju odnosa D/h , tj., u smanjenju volumena. Ali treba imati na umu da i povećanje promjera D daje veće gubitke samo do određene vrijednosti (poglavlje 3.1.).

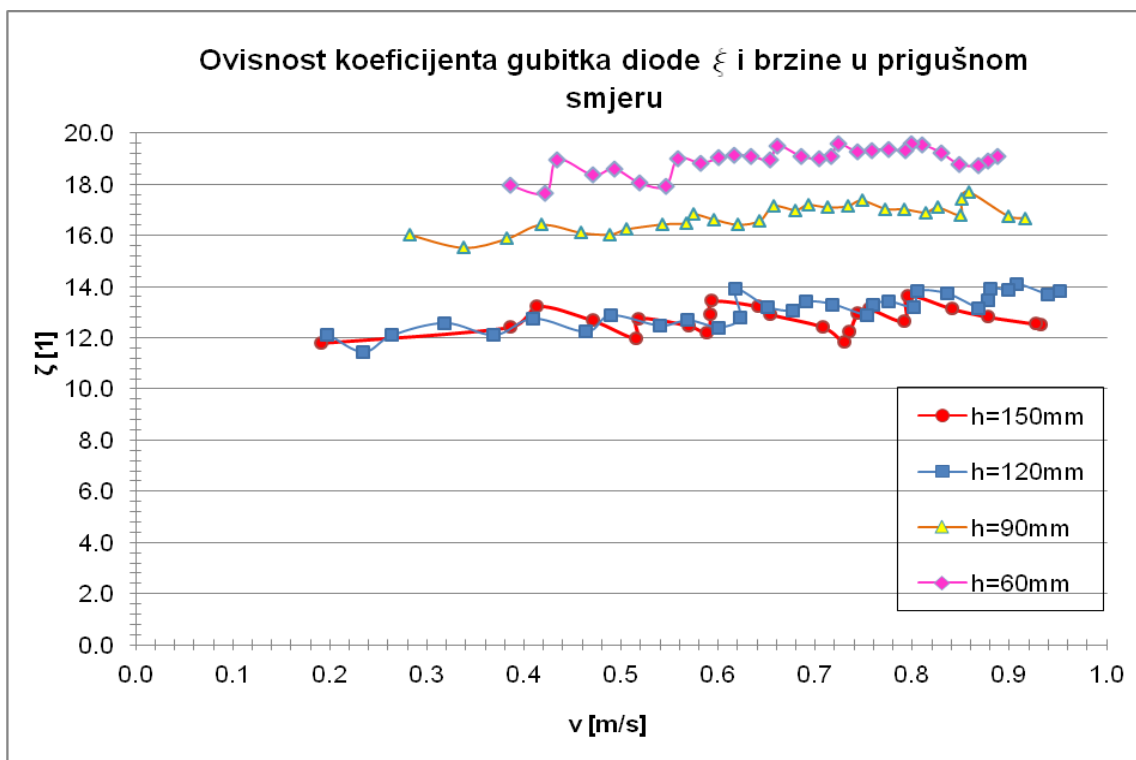


Slika 28. Vrtlog formiran u diodi

Na slici 29. se mogu vidjeti ovisnosti brzine o gubitku tlačne visine. Mjerenjem su dobiveni podaci koji se mogu prikazati u vidu točaka na grafu. Zbog grešaka u mjerenju te točke odstupaju od stvarnih vrijednosti i ne kreiraju glatku funkciju.



Slika 29. Dijagram ovisnosti gubitaka ΔH [m] i v [m/s] u prigušnom smjeru za sve visine diode

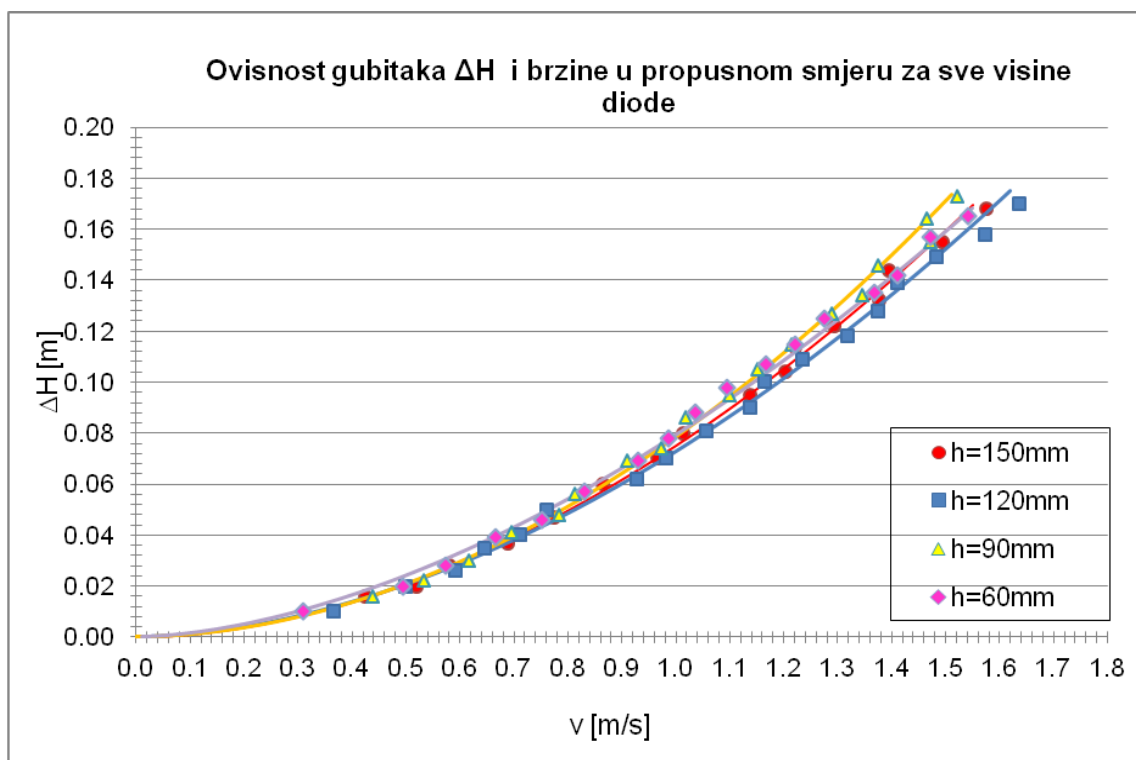


Slika 30. Dijagram ovisnosti gubitaka ΔH [m] i v [m/s] u prigušnom smjeru za sve visine diode

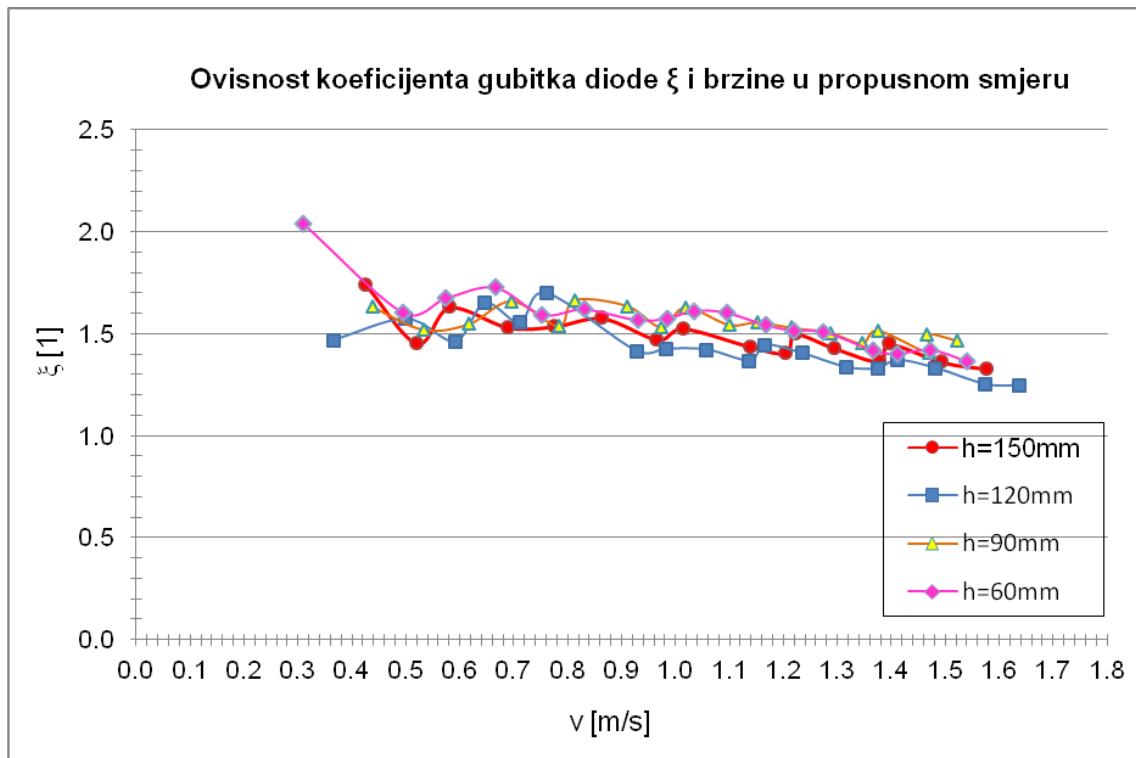
4.4.2. Propusni smjer

U propusnom smjeru dioda je kombinacija koljena i naglog proširenja na ulazu te naglog suženja na izlazu. Iz dobivenih rezultata i dijagrama sa slike 31. i 32. Može se vidjeti da su gubici podjednaki za sve visine ispitivanih dioda izuzev razlika uslijed grešaka mjerenja.

Logično bi bilo da je koeficijent gubitaka u propusnom smjeru veći kod manjih visina diode iz razloga veće zakrivljenosti strujnice. Kod manjih visina tok tekućine mora skrenuti pod oštrijim kutem nego kod većih visina diode. Time bi koeficijenti gubitka diode trebali biti najmanji za visinu diode $h=150$ [mm] a najveći za visinu $h=60$ [mm]. Iz dijagrama na slici 31. i 32. Može se vidjeti da su gubici za visinu $h=150$ [mm] i $h=120$ [mm] podjednaki te gubici za visinu $h=90$ [mm] i $h=60$ [mm] nešto malo veći. Razlog što koeficijent gubitaka nije obrnuto proporcionalan s visinom greške su mjerenja koje su detaljnije obrađene u poglavlju 5.5.



Slika 31. Dijagram ovisnosti gubitaka ΔH [m] i v [m/s] u propusnom smjeru za sve visine diode



Slika 32. Dijagram ovisnosti koeficijenta gubitka diode ξ [1] i v [m/s] u prigušnom smjeru za sve visine diode

Koeficijent gubitka diode za sve izmjerene visine diode kreće se između 1,24-2,67. Kod naglog suženja koeficijent gubitaka je definiran odnosom promjene protočnih površina. Može se uzeti da je A_2 površina tangencijalne cijevi, a A_1 promjer diode D . Time koeficijent gubitaka uslijed naglog suženja iznosi oko 0,4. Koeficijent gubitaka uslijed koljena pod kutom od 90° je 1,1. Za gubitke uslijed naglog proširenja bitni su odnosi promjera prije i nakon proširenja. Prije proširenja može se uzeti da je promjer jednak promjeru aksijalne odnosno tangencijalne cijevi d , a nakon proširenja promjeru diode D . Iz tih kriterija dobiva se da je koeficijent gubitaka uslijed naglog proširenja 0,91.

Tablica 17. Koeficijenti lokalnih gubitaka

Koeficijent gubitka uslijed naglog suženja	0,4
Koeficijent gubitka uslijed koljena od 90°	1,1
Koeficijent gubitka uslijed naglog proširenja	0,91

Kako je dioda kombinacija sva tri navedena gubitka, kada se zbroje navedeni koeficijenti gubitaka dobije se vrijednost 2,41. Dobivena vrijednost je u rasponu izmjerenih. No, nije znanstveno dokazana metoda proračunavanja koeficijenta

lokalnog gubitka diode. Valjalo bi uzeti u obzir visinu diode, koja je jedan od važnijih faktora koji utječe na gubitke. Proračun koeficijenata lokalnih gubitaka diode u propusnom smjeru također je potencijalno područje daljnjih istraživanja.

4.5. Greške mjerenja

Kod obrade rezultata spomenute su greške koje su neizostavni dio svakog mjerenja. U ovom slučaju postoje greške uzrokovane ljudskim faktorom, uvjetima mjerenja te konstrukcijom samog uređaja.

4.5.1. Greške kod mjerenja protoka i gubitaka ΔH

Protok je mjereno volumetrijski. Štopericom je mjereno vrijeme potrebno da se napuni posuda volumena 12 [l]. Greške pri mjerenju protoka javljaju se zbog neravnih površina vodnog lica u posudi i nedovoljne brzine reakcije za početak i kraj mjerenja, što je ljudski faktor. Iz tog razloga, za svaku visinu gubitaka ΔH , vrijeme je mjereno dva puta i uzeta je srednja vrijednost kao mjerodavan rezultat.

Pad tlačne visine ΔH [m] mjereno je metrom. Greške u ovom slučaju mogu biti uslijed krivog očitavanja promatrača, ali i zbog samog modela. Dešavalo se da voda u piezometrima ne miruje, već varira unutar 4-5 [mm], što je posljedica nedovoljne udaljenosti piezometra od diode, o čemu će više biti rečeno u poglavlju 5.5.2.

4.5.2. Greške zbog konstrukcije modela

Dioda je izrađena iz materijala koji je bio dostupan. Tako je i duljina cijevi bila ograničena na 300 [mm]. Piezometri su na udaljenosti 250 [mm] od tijela diode na aksijalnoj i tangencijalnoj cijevi. Time postoji utjecaj turbulencija i varijacija brzine, a time i tlaka u piezometrima. Da bi se dobio što manji utjecaj navedenih faktora udaljenost piezometra od diode bi trebala biti 350 [mm].

Kod mijenjanja visina diode, ispuna nije bila zabrtvljena niti pričvršćena s tijelom diode. Postojali su razmaci od 1-2 [mm], čime se ispuna za isto toliko pomicala lijevo-desno unutar tijela diode. Kod postavljanja dvije ispune jedne na drugu i mjerenja gubitaka u propusnom smjeru, došlo je do odizanja i pojave razmaka između njih koji je iznosio 1-2 [mm]. Time se može smatrati da je dioda za visinu 90 [mm] u propusnom smjeru zapravo bila visoka 88 [mm]. No, u odnosu na greške pri mjerenju protoka, ova greška je zanemariva.

5. Primjena hidrauličke diode

Zbog svojstva hidrauličke diode da prigušuje protok, može se iskoristiti kod ublažavanja vodnog udara, tj. za prigušivanje oscilacija vodne mase. Vodni udar je nagla promjena tlaka uzrokovana naglom promjenom brzine. Kad je cjevovod dugačak (kao u sustavima vodoopskrbe i kod hidroelektrana), velika masa vode se ne može naglo zaustaviti zbog stišljivosti vode i elastičnosti cjevovoda. Nastaje poremećaj tlaka i gustoće vode koji se širi kroz cjevovod. Taj poremećaj se, fizikalno gledajući, širi poput zvuka. Teoretski, brzina širenja poremećaja može doseći brzinu zvuka u vodi (1425 m/s). Zbog elastičnosti cjevovoda, ta je brzina ipak manja (za čelične cjevovode iznosi oko 1000 m/s, ovisno o promjeru i debljini stijenke).

Kod hidroelektrana se, zbog ublažavanja vodnog udara i neželjenog djelovanja tromosti mase vode, ugrađuje vodna komora. Dimenzije vodne komore su vrlo velike, te u slučaju da nema dovoljno prostora za njenu ugradnju, može se izgraditi hidraulička dioda. U tlačnim sustavima vodoopskrbe, vodne komore bi zbog veličine bile neprihvatljive te se za istu svrhu koriste zračni kotlići. Hidrauličkim diodama se mogu poboljšati njihova svojstva prigušivanja, a čak se mogu koristiti i umjesto njih.

Valja napomenuti da postoje različiti tipovi hidrauličkih dioda. U radu je korišten model diode jednostavnog, cilindričnog oblika. Postoji i složeniji, stožasti, hidraulički povoljniji oblik.



Slika 33. Hidraulička dioda stožastog oblika koja se uspješno koristi za zaštitu od vodnog udara [15]

5.1. Zračni kotlić

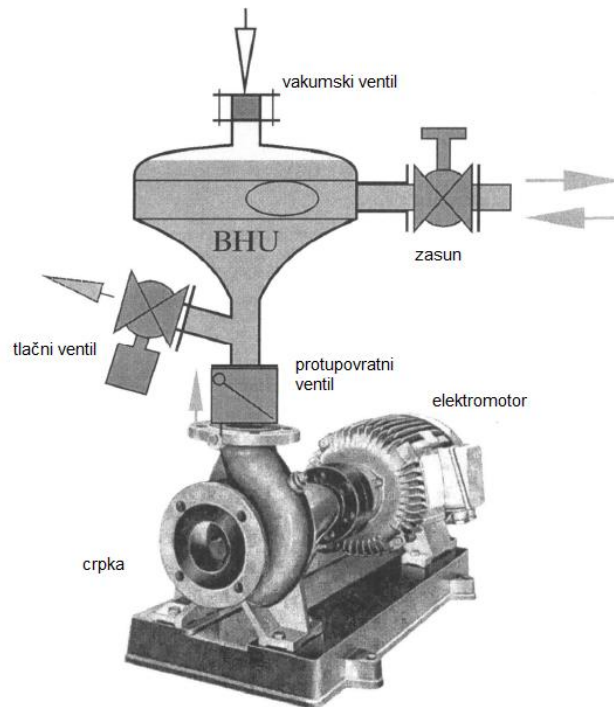
U vodoopskrbi, uslijed uključivanja i isključivanja crpki iz pogona pojavljuje se vodni udar. Cjevovodi su dugački te se vodna masa ne može u kratkom vremenskom periodu pokrenuti ili zaustaviti. Protok suprotnog smjera može oštetiti crpke, te se iza nje iz tog razloga postavlja zračni kotlić.

Primjerice, u slučaju zatvaranja cjevovoda, brzina vode u cijevi se smanjuje a iz zračnog kotlića voda istječe u cjevovod. Kad brzina postane jednaka nuli, tlak u zračnom kotliću je manji od tlaka na drugom kraju cijevi te počinje tečenje u suprotnom smjeru. Kako je u tom smjeru spriječen prolazak vode kroz crpku protupovratnim ventilom, puni se zračni kotlić. Time u kotliću raste tlak, a nakon postizanja maksimalnog tlaka, tekućina počinje izlaziti iz kotlića. Proces se ponavlja sve dok, zbog lokalnih gubitaka u kotliću i linijskih gubitaka u cjevovodu, oscilacije ne prestanu. Sličan proces se događa i pri otvaranju cjevovoda [12].

U zračnom kotliću se iznad vode nalazi zrak pod pritiskom. Učinkovitost rada ovisi o raspoloživoj količini zraka u trenutku nastanka poremećaja. Zrak se topi u vodi te se njegova količina stalno smanjuje. Zbog toga ga je potrebno nadopunjavati, što se vrši kompresorom. No, većina prijelaznih režima se događa neočekivano i naravno, ne nužno pri dovoljnoj količini zraka. Zbog toga se analizom obuhvaćaju maksimalna i minimalna količina zraka u zračnom kotliću. Postoje i tehnička rješenja u kojima se zrak drži odvojenim od vode pomoću membrane, što onemogućava otapanje zraka u vodi [13].

Ako se dioda spoji na cjevovod, iza crpne stanice, može se iskoristiti za sprječavanje vodnog udara i prigušivanje oscilacija vodne mase. Cjevovod mora biti spojen na tangencijalnu cijev diode. Nakon što poremećaj dođe u diodu, pri vrtloženju dolazi do značajnog pada tlaka. Pad tlaka mora biti toliki da ne dođe do oštećenja protupovratnog ventila i drugih dijelova pumpe. Zbog znatnog smanjenja tlaka, oscilacije vodne mase će biti brže prigušene nego u slučaju korištenja zračnog kotlića.

Na gornjem dijelu tijela diode poželjno je ugraditi vakumski ventil. Na modelu diode vidjelo se da se u diodu može uvući zrak. Zrak se može ispustiti vakumskim ventilom. U slučaju sile koja je veća od predviđene aktivira se tlačni (sigurnosni) ventil [14].



Slika 34. Dioda sa horizontalnom crpkom [15]

Volumen zračnih kotlića može biti i nekoliko tisuća litara. Volumen hidrauličke diode istog učinka kao i zračni kotlić može biti i do 50 puta manji.

Hidraulička dioda se može iskoristiti kao prigušivač u kombinaciji sa zračnim kotlićem, čime bi mu volumen bio znatno smanjen.

Prednosti koje se postižu su sljedeće [14,15]:

1. smanjuje se vrijednost investicije jer nije potreban poseban otvor i dizalica za zračni kotlić, nije potreban kompresor za zrak, a tlocrt crpne stanice se može znatno smanjiti
2. minimalni su troškovi održavanja
3. jednostavno se montira, direktno na pumpu ili tlačni cjevovod
4. djeluje mehanički, bez električne struje
5. protok kroz diodu ima bolji sanitarni efekt jer voda nikad ne zaostaje u njoj.

Problem se svodi na sljedeće dvije stavke. Prvo, potrebno je odabrati dimenzije diode koje će učinkovito smanjiti tlak. Ulazne veličine bi bile tlak neposredno prije ulaza u diodu te brzina širenja poremećaja a rezultat smanjenje tlaka pri izlazu iz

diode. Drugo, dioda svojom čvrstoćom mora biti u stanju podnijeti maksimalni tlak da ne bi eksplodirala. Valjalo bi razmotriti mogućnost korištenja više dioda u kombinaciji spojenih paralelno ili serijski. To je jedno od područja mogućih daljnjih istraživanja.

5.2. Vodna komora

Kad je dovodni cjevovod hidroelektrane dugačak, pri pokretanju elektrane se velika količina vodne mase ne može pokrenuti u kratkom vremenskom roku i formirati dovoljnu snagu na turbinama za proizvodnju električne energije. Pri zaustavljanju turbina, vodna masa se ne može trenutno zaustaviti pa zbog stišljivosti vode nastaje vodni udar. Ovi problemi rješavaju se ugradnjom vodne komore u blizini turbine. Osnovne uloge vodne komore su: osigurati dio vode pri pokretanju turbine, prije nego što ona poteče kroz dovodni tunel, u dovoljnoj količini te prihvatiti dio vode koja se kreće dovodnim tunelom pri zaustavljanju turbina.

Pri dimenzioniranju vodne komore glavni zadaci su određivanje najniže kote u komori, da ne dođe do uvlačenja zraka u dovodni i tlačni tunel, i ispitivanje stabilnosti komore te sprječavanje prelijevanja. Stabilnost komore podrazumijeva učinkovito amortiziranje oscilacija. Naime, regulator protoka, ugrađen u sisteme turbina i generatora, ima tendenciju stvaranja progresivnih oscilacija. Ako je vodna komora premalog poprečnog presjeka i ako uzrokuje male gubitke, oscilacije će se povećavati s vremenom [12].

Također jedan od problema predstavlja i prelijevanje vode uslijed oscilacija, a to je energetski neprihvatljivo jer je riječ o čistom gubitku [14].

Raspon oscilacija u vodnoj komori vrlo je velik pa vodne komore moraju biti velikih dimenzija. Postoji više tipova vodnih komora: cilindrična vodna komora, raščlanjena vodna komora, vodna komora s gornjim proširenjem, vodna komora s prigušivačem itd.

Najbolja teorija razrađena je za cilindričnu vodnu komoru jer je najjednostavnija. No, ona se koristi samo za razradu idejnih projekata. Ne grade se jer im je prigušenje oscilacija vodne mase vrlo sporo. Vodna komora s gornjim proširenjem se gradi zbog nastojanja da se smanji maksimalno dizanje vodnog lica pri čemu će

dovodni tunel biti manje opterećen. Gradnjom raščlanjene vodne komore se smanjuju visine maksimalnih i minimalnih vodnih lica i postiže se veća sigurnost od uvlačenja zraka. Danas se najčešće primijenjuje.

Dakle, vodna komora:

1. mora osigurati učinkovito prigušivanje oscilacija vodne mase
2. mora imati dostatan volumen da prihvati dio vode pri zaustavljanju i pokretanju turbine
3. ne smije dozvoliti prelijevanje vode iz komore
4. ne smije dozvoliti uvlačenje zraka u cjevovod
5. dovodni tunel ne smije biti preopterećen.

Ako se upotrijebi hidraulička dioda, očigledno je da se može postići učinkovito prigušivanje oscilacija. Ta dioda bi imala slobodno vodno lice. U konkretnom slučaju bi funkcioniranje izgledalo na sljedeći način. U trenutku kad amplituda raste, voda se kreće kroz propusni smjer diode. Nakon što razina vode dosegne maksimum i uđe u kanal tangencijalno spojen na diodu, voda se počne kretati prema dolje, nastaje vrtložno strujanje i hidraulički otpor je mnogo veći nego u propusnom smjeru.

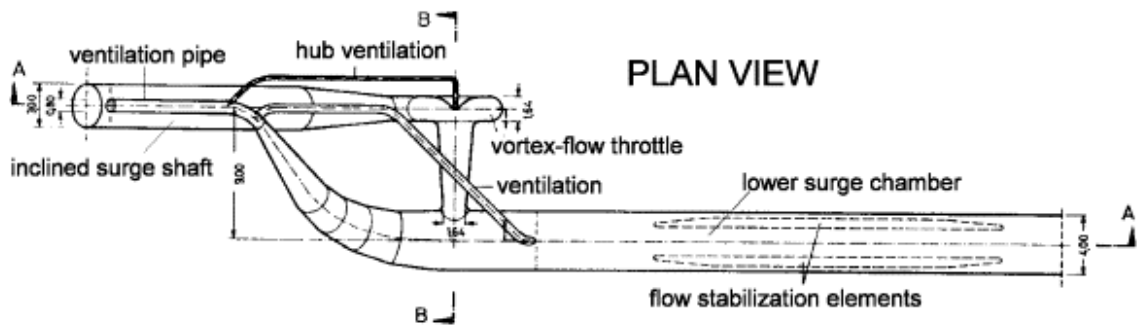
Prednosti koje se postižu su:

1. kraće trajanje oscilacija vodne mase
2. smanjenje maksimalnih amplituda vodne mase, time i manje opterećenje dovodnog tunela
3. jednostavnija konstrukcija kombinacije diode i vodne komore u odnosu na npr. raščlanjenu vodnu komoru
4. u slučaju manjka prostora za ugradnju postojećih rješenja vodne komore, dioda može biti optimalno rješenje

Vodna komora je građevina vrlo velikih dimenzija a zna se dogoditi i da nema dovoljno mjesta za njenu gradnju. Jednostavnije je sagraditi vodnu komoru koja je u donjem dijelu uža, a na gornjem dijelu ima hidrauličku diodu. Takva konstrukcija ne bi bila komplicirana (jednostavnija od npr. raščlanjene vodne komore) a bila bi učinkovita. Najveći problem je i dalje dimenzioniranje hidrauličke diode, odnosno

traženje najpovoljnijeg odnosa promjera i visine s ciljem dobivanja što većeg hidrauličkog gubitka u vrtložnom smjeru.

Prva praktična upotreba hidrauličke diode bila je u hidroelektrani Kaunertal (Austria). Kasnije su napravljene i u hidroelektranama Zemm i Malta (Austria) [16].



Slika 35. Hidraulička dioda u hidroelektrani Kaunertal [16]

6. Zaključak

Hidraulička dioda je uređaj čija osnovna karakteristika je različita propusnost ovisno o smjeru toka pa ju se po tome može usporediti sa električnom diodom. Voda koja ulazi u hidrauličku diodu iz tangencijalnog smjera te izlazi u osi diode, ima izraženu komponentu radijalnog ubrzanja i vrtloženja. Disipira značajnu količinu kinetičke energije pa time prigušuje tok vode u jednom smjeru. U drugom smjeru, kad je ulaz vode u osi cilindričnog dijela diode a izlaz kroz tangencijalnu cijev, gubici energije su znatno manji. Zbog složenosti i relativno kompliciranog opisa strujanja unutar diode, njeno dimenzioniranje za potrebe inženjerske prakse je složeno te se dioda rijetko koristi. Mora se priznati i da je riječ o nekonvencionalnom tehničkom, ali u nekim slučajevima i vrlo praktičnom rješenju.

Diodu je prvi put detaljno opisao Nikola Tesla te istaknuo njene prednosti. Dioda, najbližnja ispitivanoj u radu, se opisuje u radovima Zobela i Thome. Ona je osnovni element koji se koristi u fluidici te je bila vrlo značajna u prvim svemirskim letovima. U novije vrijeme se sve više koristi za ublažavanje negativnih posljedica koje nastaju pri nestacionarnom tečenju fluida kao što su oscilacije vodnih masa i vodni udar.

U okviru ovog istraživanja je napravljen model hidrauličke diode te su provedena ispitivanja diodnosti za različite odnose promjera i visine diode (odnosa D/h). Smanjenjem visine diode pri konstantnom promjeru, odnosno smanjivanjem volumena, postignuta je veća učinkovitost diode. Najveća diodnost je dobivena za najmanju visinu diode ($h=60$ [mm]), a iznosi 1:12,1.

U daljnjim istraživanjima hidrauličke diode, veću pažnju bi trebalo posvetiti centrifugalnoj sili u prigušnom smjeru, a teoretsko rješenje bi se prvenstveno trebalo tražiti kroz proračun energije utrošene na savladavanje iste. Naravno, ne smiju se zanemariti niti drugi čimbenici kao što su prisustvo zraka, trenje tekućine o stijenku, trenje među mlazovima tekućine i stabilnost vrtloga. Također, ne treba zapostaviti niti istraživanja gubitaka u propusnom smjeru. Vodni udar i oscilacije vodnih masa uključuju nestacionarnost te je i daljnja istraživanja nužno vršiti za nestacionaran režim tečenja.

7. Zahvale

Posebno se želimo zahvaliti našem mentoru prof. dr. sc. Goranu Gjetvaju koji nam je bio velika podrška i usmjeravao nas je na putu ka konačnom cilju. Također, našeg modela ne bi bilo bez gospodina Franje koji je zaslužan za njegovu izradu i pomoć u laboratoriju. Njemu se također zahvaljujemo. Hvala svim kolegama koji su trpili naše svakodnevne priče o hidrauličkoj diodi i obitelji koja nam je bila velika podrška.

8. Popis literature

- [1] Skupina autora, *Tehnička enciklopedija*, 5. svezak, *Elektrons – F*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1976.
- [2] Dostupno: <http://en.wikipedia.org/wiki/Coand%C4%83_effect>.
Posjećeno: [22.04.2012.]
- [3] Kulkarni, A.; Rande, V.; Rajeev, R.; Koganti, S. B. (2009), *Pressure drop accros vortex: Experiments and design guidelines*
Dostupno:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250908006131>>.
Posjećeno: [10.01.2012.]
- [4] Petrešin, E. (2009), *The energy form of flow*, Ljubljana, Aena
- [5] Cobbald, J. (2004), *Život u učenju od prirode: Viktor Schauburger*, Bad Ischl, Agom
- [6] Dostupno: Slika 2. Vrtloženje vode <<http://www.marcdussault.com/mindset/blog/flow-and-being-in-the-zone/>> Posjećeno: [07.04.2012.]
- [7] Hand, R.(2012) *NASA's Perpetual Ocean*, Dostupno: < <http://www.vizworld.com/2012/03/nasas-perpetual-ocean/> > Posjećeno: [01.04.2012.]
- [8] Jović, V. (2006), *Osnove hidromehanike*, Zagreb, Element
- [9] Kilić, S. (1986), *Fizika I*, Split, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu
- [10] Yin, J.; Jiao, L.; Wang, L. (2010), *Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode* Dostupno: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549310000348>>. Posjećeno: [24.01.2012.]
- [11] Haakh, F. (2003), *Vortex chamber diodes as throttle devices in pipe systems. Computation of transient flow* Dostupno:<<http://www.iahr.org/publications/assets/jhr41-1/haakh.pdf>>. Posjećeno: [24.04.2012.]
- [12] Gjetvaj, G. (2006), *Rukopis predavanja iz predmeta hidraulika*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[13] Ivetić, M. V. (1996), *Računska hidraulika*, Beograd, Građevinski fakultet Sveučilišta u Beogradu

[14] Petrešin, E.; Jecl, R., (1998), *Osnove teorije vodnega udara*, Ljubljana

Dostupno: <<http://mvd20.com/LETO1998/R23.pdf>>. Posjećeno: [30.03.2012.]

[15] Petrešin, E.; Nekrep Perc, M., *Vodni udari v vodovodnih sistemih, praktične rešitve in izkušnje s hidravlično diodo*, Maribor Dostupno:<http://www.sdzvdruštvo.si/si/VD-06_Referati/04%20Petresin%20vd06.pdf>.Posjećeno:

[25.03.2012.]

[16] Huber, B.; Prenner, R., *The influence of vortex flow throttle on transmission and reflection of pressure wave*, Austria Dostupno: <<http://www.iahr.org/membersonly/grazproceedings99/doc/000/000/109.htm>>.Posjećeno

[25.04.2012.]

9. Sažetak

Ivana Bartolić i Jadran Berbić

HIDRAULIČKA DIODA I MOGUĆNOSTI NJENE PRIMJENE

Hidraulička dioda uređaj je bez pokretnih dijelova koji omogućuje slobodan prolaz tekućine u jednom smjeru, a otpor strujanju u drugom smjeru. Prva primjena joj je bila za svemirske letove. U novije vrijeme sve se više koristi za ublažavanje negativnih posljedica koje nastaju pri nestacionarnom tečenju fluida kao što su oscilacije vodnih masa i vodni udar.

Cilj ovoga rada je izraditi model hidrauličke diode i pokazati utjecaj proporcija diode na svojstvo prigušenja protoka u jednom smjeru te propuštanja u drugom smjeru. Također, cilj je ukazati na mogućnosti primjene hidrauličke diode te na prednosti njena korištenja.

Prvo je dan uvod u spiralno tečenje i opis samog gibanja u diodi. Na modelu hidrauličke diode izmjereni su tlačni gubici i protok na izlazu iz modela u prigušnom i propusnom smjeru za različite visine diode (odnos D/h). Na temelju toga je određena diodnost, koja doseže vrijednost 1:12,1 za najmanju visinu diode.

Pokazano je da odnos proporcija D/h diode znatno utječe na koeficijent lokalnog gubitka u diodi. Približavanjem vrijednosti visine diode h promjeru tangencijalne cijevi d , a time i smanjenja volumena diode, dobiva se bolja učinkovitost diode.

Ključne riječi: hidraulička dioda, prigušivanje protoka, odnos D/h , primjena hidrauličke diode

10. Summary

Ivana Bartolić i Jadran Berbić

HYDRAULIC DIODE AND POSSIBILITIES OF ITS APPLICATION

Hydraulic diode is a device without movable parts which allows a free passage of fluid in one direction and flow resistance in the other direction. Her first application was for space flights. In recent decades it is increasingly used to alleviate negative consequences caused by unsteady fluid flow, such as water mass oscillations and water hammer.

The aim of this paper is to develop a model of hydraulic diode and to show the influence of proportion to the throttle characteristic of flow in one direction and transmission in the other direction. Also, the aim is to point out the possibilities of hydraulic diode application as well as advantages of its use.

First, there is an introduction to the spiral flow and the description of the motion in the diode. Pressure losses and flow at the exit are measured on the hydraulic model in the throttled and transmissive direction for different heights of diode (D/h). On this basis, diodicity is calculated and reaches the value 1:12,1 for the lowest height of diode. It is shown that the ratio of proportion D/h of diode, substantially affects the local loss coefficient in the diode. When the value of height h of diode approaches diameter of tangential pipe d , the volume of diode is reduced, the performance of diode is improved.

Key words: hydraulic diode, dampening the flow, the ratio D/h , usage of hydraulic diode

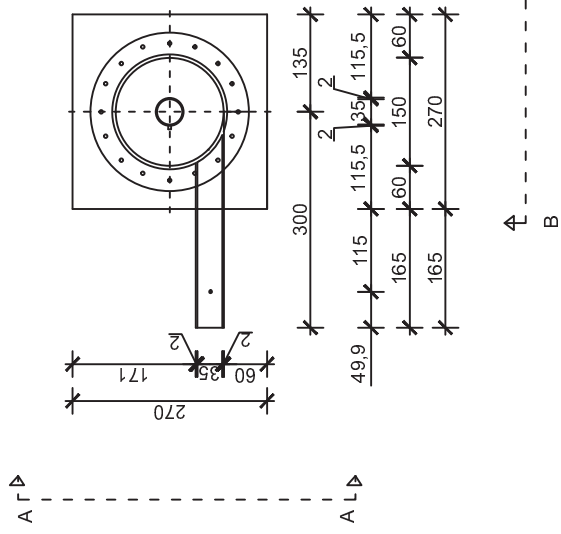
11. Prilozi

Prilog 1. Nacrt modela hidrauličke diode u mjerilu 1:10

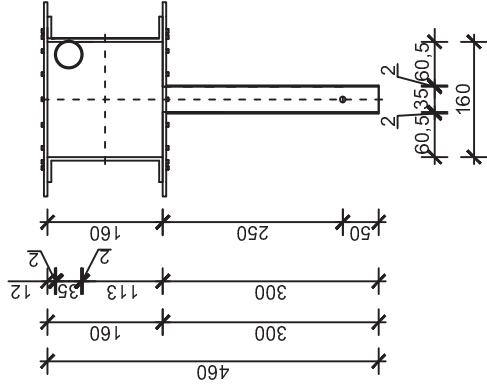
MODEL HIDRAULICKE DIODE

MJ 1:10

TLOCRT



POGLED A-A



POGLED B-B

