

Dimenzioniranje regulacijskog ventila

Krnić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:260056>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-08**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Krnić

Zagreb, godina 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIMENZIONIRANJE REGULACIJSKOG VENTILA

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Galić, dipl. ing.

Student:

Luka Krnić

Zagreb, godina 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Ivici Galiću na ukazanom povjerenju i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem cijeloj obitelji koja mi je pružala podršku i potporu tijekom cijelog studija, kao i svim dragim i bliskim prijateljima. Rad posvećujem članovima svoje obitelji.

Luka Krnić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Krnić** Mat. br.: 0035183958

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dimenzioniranje regulacijskog ventila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Control valve sizing**

Opis zadatka:

Ventili se koriste kao važni elementi upravljanja u procesnoj industriji. Funkcija im je da utječu na parametre procesa na način da povećavaju ili smanjuju protok, tlak ili posredno temperaturu medija koji prolazi kroz njih. Ventili koji se koriste za upravljanje toka medija u cjevovodu nazivaju se regulacijskim. Karakterizira ih kretanje zapornog organa u smjeru toka ili suprotno toku pomoću kojeg utječu na parametre protoka medija.

Potrebno je izraditi smjernice za dimenzioniranje regulacijskog ventila, oblik karakteristike zapornog elementa (pladnja) i koeficijenta protoka. Osim smjernica, potrebno je napraviti i primjer dimenzioniranja regulacijskog ventila uzimajući u obzir slijedeće parametre:

- medij koji prolazi kroz ventil je voda,
- ulazni tlak medija iznosi 92 bar,
- izlazni tlak iznosi 30 bar,
- temperatura medija iznosi 85°C,
- protok je 2000 kg/h,
- smjer strujanja medija je u smjeru otvaranja ventila (tlak medija nastoji otvoriti ventil).

Proračun je potrebno provesti prema odgovarajućoj normi koristeći programski paket SMath Studio. Vrijednosti nužne za provedbu proračuna kao i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih sličnih rješenja, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom.

Uz rad priložiti podatke odabranih komercijalnih proizvoda.

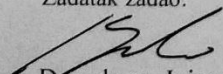
U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:
17. studenog 2016.


Rok predaje rada:
19. siječnja 2017.

Predviđeni datumi obrane:
25., 26. i 27. siječnja 2017.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ivica Galić

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ODREĐIVANJE PARAMETARA REGULACIJSKOG VENTILA.....	4
2.1. Vrste regulacijskih ventila	4
2.1.1. Rotacioni i standardni regulacijski ventili	5
2.1.2. Leptirasti ventili	6
2.1.3. Ostale vrste ventila.....	7
2.2. Metoda dimenzioniranja	7
2.3. Ugradnja ventila	8
2.4. Vrste strujanja fluida.....	9
3. DIMENZIONIRANJE ZA NESTLAČIVE FLUIDE.....	11
3.1. Turbulentno strujanje.....	11
3.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje.....	11
3.1.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata	11
3.1.1.2. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima.....	11
3.1.2. Prigušeno turbulentno strujanje	12
3.1.2.1. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata.....	12
3.1.2.2. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima	12
3.2. Neturbulentno (laminarno i prijelazno) strujanje.....	12
3.2.1. Neturbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata	12
3.2.2. Neturbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima.....	13
4. DIMENZIONIRANJE ZA STLAČIVE FLUIDE	14
4.1. Turbulentno strujanje stlačivih fluida	14
4.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje.....	14
4.1.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata	14
4.1.1.2. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima.....	14
4.1.2. Prigušeno turbulentno strujanje	15
4.1.2.1. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata.....	15
4.1.2.2. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima	16
4.2. Neturbulentno strujanje (laminarno i prijelazno).....	17
4.2.1. Neturbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata	17
4.2.2. Neturbulentno strujanje kroz ventile sa spojnim elementima.....	18
5. FIZIKALNE VELIČINE I KOREKTIVNI FAKTORI.....	19
5.1. Koeficijent protoka K_v	19

5.2.	Faktor geometrije cjevovoda F_P	19
5.3.	Faktor Reynoldsovog broja F_R	22
5.4.	Faktor regeneracije tekućine pod tlakom F_L ili F_{LP}	26
5.4.1.	Faktor regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata F_L	26
5.4.2.	Faktor regeneracije fluida za ventil sa spojnim elementima F_{LP}	26
5.5.	Faktor omjera kritičnog tlaka F_F	26
5.6.	Ekspanzijski faktor Y	27
5.7.	Faktor pada tlaka x_T ili x_{TP}	28
5.7.1.	Faktor pada tlaka ventila bez spojnih elemenata x_T	28
5.7.2.	Faktor pada tlaka ventila sa spojnim elementima x_{TP}	28
5.8.	Faktor specifičnog toplinskog omjera F_γ	29
5.9.	Faktor kompresije Z	29
5.10.	Numeričke konstante N	32
5.11.	Tipične vrijednosti nekih faktora.....	33
5.12.	Dodatak za izvođenje faktora vrste ventila F_d	36
6.	PRORAČUN.....	40
6.1.	Algoritam računanja koeficijenta protoka nestlačivih fluida.....	40
6.2.	Algoritam računanja koeficijenta protoka stlačivih fluida.....	42
6.3.	Dimenzije cjevovoda i brzina strujanja.....	44
6.4.	Minimalni koeficijent protoka $K_{V \min}$	44
6.5.	Ulazni podaci.....	45
6.6.	Dobiveni podaci.....	46
7.	ZAKLJUČAK.....	49
	LITERATURA.....	50
	PRILOZI.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1.	Rotacioni ventil s izrezom [3]	5
Slika 2.	Standardni regulacijski ventil s linearnim gibanjem [4]	6
Slika 3.	Leptirasti ventil [5]	7
Slika 4.	Referentni ventil i spojni elementi	8
Slika 5.	Prikaz podjela strujanja	9
Slika 6.	Shematski prikaz strujanja [8]	10
Slika 7.	Grafički prikaz ovisnosti faktora geometrije cjevovoda o omjeru (C_i/d)	22
Slika 8.	Očitavanje faktora Reynoldsovog broja za ventila sa zapornim elementom bez izreza [1]	23
Slika 9.	Očitavanje faktora Reynoldsovog broja za ventil sa zapornim elementom s izrezom [1]	24
Slika 10.	Grafički prikaz ovisnosti faktora kritičnog tlaka o omjeru p_s/p_k	27
Slika 11.	Objašnjenje smjera strujanja medija [9]	34
Slika 12.	Primjer ventila s konturnim pladnjem	37
Slika 13.	Leptirasti ventil sa zakretim elementom	38
Slika 14.	Provedeni proračun u SMath Studiu	47
Slika 15.	Odabrani ventil [11].	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalni zakoni s obzirom na strujanje [2]	2
Tablica 2. Fizikalne konstante različitih medija [1]	30
Tablica 3. Vrijednosti numeričkih konstanti N	32
Tablica 4. Tipične vrijednosti nekih faktora	34
Tablica 5. Vrijednosti numeričkih konstanti N ; dodatak	36
Tablica 6. Preporučene brzine strujanja u vodovima	44
Tablica 7. Vrijednosti koeficijenta protoka K_v	48

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA Naziv iz sastavnice

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_o	mm ²	Površina najužeg presjeka strujanja mlaza
C	m ³ /h	Koeficijent protoka
C_i	m ³ /h	Pretpostavljeni koeficijent protoka (za iteraciju)
d	mm	Nazivni promjer ventila
D	mm	Promjer cjevovoda
d_H	mm	Hidraulični promjer presjeka strujanja mlaza
d_i	mm	Unutarnji promjer prstenastog prolaza protoka
d_o	mm	Ekvivalentni promjer od ukupne površine strujanja
D_o	mm	Promjer otvora zapornog elementa
D_1	mm	Promjer cjevovoda prije ventila
D_2	mm	Promjer cjevovoda iz ventila
D_o	mm	Promjer grla strujanja
F_d	bezdimenzijsko	Faktor vrste ventila
F_F	bezdimenzijsko	Faktor kritičnog tlaka
F_L	bezdimenzijsko	Faktor regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata
F_{LP}	bezdimenzijsko	Faktor regeneracije fluida za ventil sa spojnim elementima
F_P	bezdimenzijsko	Faktor geometrije cjevovoda
F_R	bezdimenzijsko	Faktor Reynoldsovog broja
F_γ	bezdimenzijsko	Faktor specifičnog toplinskog omjera
G_g	bezdimenzijsko	Specifična gravitacija plina ili relativna gustoća plina
I_W	mm	Opseg jednog kanala strujanja
K_V	m ³ /h	Koeficijent protoka
M	kg/kmol	Molekularna masa
N_o	bezdimenzijsko	Broj nezavisnih i identičnih kanala strujanja
N	varijabilna	Numerička konstanta
p_1	bar	Apsolutni ulazni tlak mjereno na točki A
p_2	bar	Apsolutni izlazni tlak mjereno na točki B
p_k	bar	Termodinamički kritični tlak
p_r	bezdimenzijsko	Reducirani tlak (p_1/p_k)
p_s	bar	Tlak zasićenja pri ulaznoj temperaturi
Δp	bar	Pad tlaka (p_1-p_2)
Q	m ³ /h	Volumni protok
Re_V	bezdimenzijsko	Faktor Reynoldsovog broj
T_1	K	Apsolutna ulazna temperatura
T_k	K	Apsolutna termodinamička kritična temperatura
T_r	bezdimenzijsko	Reducirana temperatura (T_1/T_k)
v	m/s	Brzina strujanja fluida

W	kg/h	Maseni protok
x	bezdimenzijsko	Omjer pada tlaka i apsolutnog ulaznog tlaka ($\Delta p/p_1$)
x_T	bezdimenzijsko	Faktor pada tlaka ventila bez spojnih elemenata
x_{TP}	bezdimenzijsko	Faktor pada tlaka ventila sa spojnim elementima
Y	bezdimenzijsko	Ekspanzijski faktor
Z	bezdimenzijsko	Kompresijski faktor
α	°	Kutna rotacija zapornog elementa
β	°	Maksimalna kutna rotacija zapornog elementa
ν	m ² /s	Kinematska viskoznost
ρ_1/ρ_0	bezdimenzijsko	Relativna gustoća ($\rho_0=1,0$ za vodu pri 15°C)
ρ_w	kg/m ³	Gustoća vode
κ	bezdimenzijsko	Izentropski eksponent
ζ	bezdimenzijsko	Koefijent gubitaka uslijed brzine strujanja
ζ_1	bezdimenzijsko	Koefijent gubitaka uslijed brzine strujanja uzvodno
ζ_2	bezdimenzijsko	Koefijent gubitaka uslijed brzine strujanja nizvodno
ζ_{B1}	bezdimenzijsko	Ulazni Bernoulijev koeficijent
ζ_{B2}	bezdimenzijsko	Izlazni Bernoulijev koeficijent
μ	bezdimenzijsko	Koeficijent pražnjenja

SAŽETAK

Ventili su uređaji za regulaciju protoka fluida koji mogu djelomično ili potpuno zatvoriti prolaz fluida kroz cijev i važni su elementi upravljanja u procesnoj industriji jer utječu na procesne varijable. Regulacijski ventili pomicanjem zapornog elementa u smjeru toka ili suprotno smjeru toka održavaju protok, tlak, razinu i temperaturu u okviru željenog radnog raspona ili na određenoj radnoj točki. Regulacijski ventili su izvršni elementi koji se sastoje od tijela ventila, zapornog dijela, aktuatora koji zaporni dio pomiče u željenu poziciju i niza ostalih dijelova poput senzora, regulatora, prekidača i slično. U ovom diplomskom radu kratko su obrazloženi neki od tipičnih vrsta ventila koji se danas često koriste u regulacijske svrhe. Rekapitulirani su različiti režimi strujanja i utjecaj pojedinih varijabli na njih. Obraden je koeficijent protoka kao jedan od najvažnijih parametara za vrednovanje ventila. Sukladno međunarodnom standardu IEC 60534-2-1 za dimenzioniranje ventila prezentirane su i pojašnjene standardne jednadžbe za dimenzioniranje ventila. Sukladno standardu IEC 60534-2-1 razrađen je algoritam za određivanje koeficijenta protoka standardnim jednadžbama prilikom dimenzioniranja regulacijskog ventila. Standardne jednadžbe su implementirane u programu „SMath Studio“ i tako pripremljene da je pri izračunu koeficijenta protoka omogućeno lako variranje ulaznih podataka to jest varijabli. Na takav način moguće je provesti relativno brzu, laku i standardiziranu analizu učinaka promjene bitnih procesnih varijabli na dimenzioniranje regulacijskih ventila.

Ključne riječi: regulacijski ventil; koeficijent protoka

SUMMARY

Valves are the devices that control, regulate or direct the flow of a fluid. Control valves modulate flow, pressure, level or temperature by partially obstructing or opening the various passageways by trim elements and holding that process variable within a required working range or desired operating point. Control valve assembly is generally composed of the valve body, trim parts, actuator which moves trim and other parts like sensors, switches or similar. This master's thesis gives a short explanation of typical valves commonly used for regulation in industrial process applications. Fluid flow regimes and impact of some important variables are depicted too. Flow coefficient as one of the most important parameters for valve characterization is elaborated. According to the international standard for sizing the control valves IEC 60534-2-1 sizing equations for use with compressible and incompressible fluids are presented. Algorithm for valve sizing based on flow coefficient and standardized equations from IEC 60534-2-1 international standard is elaborated. Valve sizing procedure is implemented in mathematical “SMath Studio“ freeware and it enables simple, fast and efficient variations of input variables. According to that it is possible to undertake analysis based on standardized method and to size the control valve.

Key words: control valve; flow coefficient

1. UVOD

Ventil je uređaj za regulaciju protoka fluida koji može djelomično ili potpuno zatvoriti prolaz medija kroz cijev. Ventili se koriste kao važni elementi upravljanja u procesnoj industriji jer utječu na parametre procesa. Regulacijski ventili, koji su tema ovog diplomskog rada, karakterizirani su pomicanjem zapornog elementa u smjeru toka ili suprotno smjeru toka pomoću kojeg utječu na parametre protoka: količinu protoka, tlak ili posredno na temperaturu. Prilikom stavljanja proizvoda na tržište, koeficijent protoka je jedan od parametara vrednovanja. Regulacijski ventili su izvršni elementi koji se sastoje od tijela ventila, zapornog dijela, aktuatora koji zaporni dio pomiče u željenu poziciju i niza ostalih dijelova poput senzora, regulatora, prekidača i slično. U okviru ovoga diplomskog rada obradit će se vrste strujanja i neke od vrsta ventila, te pojasniti parametri i faktori koji utječu na iste. Obradit će se i jednačbe koje mogu obuhvatiti sve navedene parametre i faktore kako bi se izveo algoritam za predviđanje koeficijenta protoka prilikom konstruiranja regulacijskog ventila. Algoritam vodi kroz jednačbe za izračunavanje koeficijenta protoka, tj. njegovo predviđanje sukladno međunarodnom standardu IEC 60534-2-1 [1]. Sve jednačbe temelje se, tj. izvedene su iz osnovnih jednačbi za nestlačive Newtonovske fluide. Fluide po ponašanju dijelimo na Newtonovske i ne-Newtonovske. Prednost Newtonovog modela je što se velika većina fluida ponaša na ovaj način kao što su voda, zrak, većina vodenih otopina, svi stlačivi plinovi itd. Newtonov model pretpostavlja linearni odnos smičnog naprezanja fluida τ i gradijenta brzine kutne deformacije dx/dy . Veza između tih dviju veličina jest dinamička viskoznost μ , a jednačba glasi:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dx}{dy} \quad (1)$$

Viskoznost su sile slične sili trenja. One pružaju otpor fluida prema tečenju kada se dva sloja fluida gibaju jedan prema drugome. Kod tekućina te sile otpora uzrokuju međumolekularne sile kojima se fluidi privlače, a na taj način se opiru gibanju. Kod plinova viskoznost djeluje po principu difuzije molekula među slojevima uzrokujući izmjenu impulsa te posljedično izjednačava brzinu susjednih slojeva. Kod plinova je puno manji utjecaj viskoznosti, s porastom temperature raste i viskoznost, dok tekućinama opada.

U mehanici fluida se razlikuje stlačivo od nestlačivog strujanja. Kod stlačivog strujanja, prilikom strujanja, gustoća fluida se mijenja, dok kod nestlačivog ostaje nepromijenjena. Zbog te pojave u nestlačivom strujanju se neće moći unutarnju energiju iskoristiti u gibanju fluida pa

se takvo gibanje opisuje samo Newtonovim zakonima, naspram toga za stlačivo strujanje nužno je uzeti i termodinamičke zakone, prikazane u *tablici 1*.

Tablica 1. Fizikalni zakoni s obzirom na strujanje [2]

NESTLAČIVO STRUJANJE	STLAČIVO STRUJANJE
1) Zakon očuvanja mase	
2) Zakon očuvanja količine gibanja	
3) Zakon očuvanja momenta količine gibanja	
4) Zakon kinetičke energije	4) Zakon očuvanja energije (I. zakon termodinamike)
	5) II. zakon termodinamike

U okviru diplomskog rada potrebno je izraditi smjernice za dimenzioniranje regulacijskog ventila, oblik karakteristike zapornog elementa (pladnja) i koeficijenta protoka. Postoji nekoliko glavnih smjernica kojih se treba pridržavati da bi se ispunili svi navedeni zahtjevi:

- 1) **IZRAČUNATI $K_{V \min}$ (minimalni koeficijent protoka)** – koristeći jednadžbu (25). Predstavlja minimalni potrebni koeficijent protoka ventila za zadanu razliku ulaznog i izlaznog tlaka uz traženi volumni protok.
- 2) **ODREDITI D (nazivni promjer cjevovoda)** – koristeći jednadžbu (70). Nazivni promjer cjevovoda definira se s obzirom na traženi volumni protok i preporučene brzine strujanja fluida prikazane u *tablici 6*.
- 3) **IZRAČUNATI K_V (koeficijent protoka ventila)** – koristeći algoritam napisan u poglavlju 6.1. i 6.2. zavisno radi li se o stlačivim ili nestlačivim fluidima. Potrebno je provesti računanje nekoliko koeficijenata protoka ventila. Za različitu vrstu ventila i za različitu vrstu zapornog elementa, kao i za činjenicu da li su na ventil pričvršćeni spojni elementi, dobiva se drukčiji koeficijent protoka ventila. Uzrok tome su promjena faktora regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata F_L , faktora vrste ventila F_d , kao i eventualnih promjena u nominalnom promjeru ventila d uslijed ekspanzije, redukcije ili drugih spojnih elemenata. Posljedično tome moguća je i promjena drugih faktora i eventualno promjena načina strujanja što u konačnici dovodi do različitih vrijednosti koeficijenata protoka ventila K_V .

- 4) **ODABRATI VENTIL** – ventil se bira s obzirom na izračunati koeficijent protoka K_V . On mora biti što bliži izračunatom minimalnom koeficijentu protoka $K_{V \min}$ kako bi se izbjeglo predimenzioniranje ventila. Treba voditi računa i o pravu prvenstva odabira ventila navedenog u poglavlju 2.1. Ukoliko su ispunjena oba zahtjeva može se krenuti u odabir gotovog „rješenja“ to jest ventila, ukoliko takav postoji na tržištu ili krenuti u konstrukcijsku razradu istog.

Temeljem koeficijenta protoka ventila omogućena je usporedba ventila različitih vrsta, tipova i proizvođača. Općenito se koeficijenti protoka određuju eksperimentalnim putem. Potrebno je naglasiti da predimenzioniran regulacijski ventil može narušiti varijabilnost procesa jer daje veliko pojačanje na ventil te na taj način može remetiti regulaciju. U tim slučajevima regulacija radi češće i u okvirima manjih otvora i povećava mu se beskorisno područje “*dead band*“. Ovisno o mediju za koji se računa, različite su jednadžbe za računanje koeficijenta protoka ventila. Sa određenim koeficijentom protoka moguće je odabrati kontrolni ventil iz kataloga proizvođača.

2. ODREĐIVANJE PARAMETARA REGULACIJSKOG VENTILA

2.1. Vrste regulacijskih ventila

Regulacijski ventili su izvršni elementi koji se sastoje od tijela ventila, zapornog dijela, aktuatora koji zaporni dio pomiče u željenu poziciju i niza ostalih dijelova poput senzora, regulatora, prekidača i slično. Aktuator je dio koji osigurava silu potrebitu za pomicanje zapornog elementa, odnosno za otvaranje ili zatvaranje ventila. Aktuator može biti pokretan pneumatski, hidraulički ili električki. Ovisno o konstrukciji i vrsti materijala od kojeg su izrađeni, kontrolni ventili mogu raditi s gotovo svim medijima, različitim tlakovima i temperaturama. Neki od medija koji prolaze kroz ventile mogu biti jako visokih temperatura (i iznad 500 °C) dok drugi mogu biti na kriogenim temperaturama, pa idu i do -200 °C. Pri odabiru ventila treba voditi računa o nizu utjecajnih faktora i radnih uvjeta. Potrebno je poznavati medij i njegova svojstva (gustoću, viskozitet ...), kapacitet, tlakove (ulazne, izlazne, pad tlaka), temperature... Pri odabiru ventila gotovo uvijek postoji više zadovoljavajućih inženjerskih rješenja ili različitih ventila koji mogu udovoljiti traženim uvjetima. Putanja odabira može se svesti na nekoliko bitnih točaka:

- Definiranje radnih uvjeta,
- izračunavanje minimalnog koeficijenta protoka,
- odabir tipa zapornog elementa,
- odabir vrste ventila,
- odabir materijala zapornog elementa i tijela ventila te
- odabir ostalih elemenata ventila.

Postoji i nekoliko različitih tipova i primjena regulacijskih ventila. S obzirom na normu IEC 5342-2-2, osim ako nije drugačije navedeno u tehničkim zahtjevima ili diktirano načinom ili mjestom primjene, postoji točan redoslijed biranja vrste ventila.

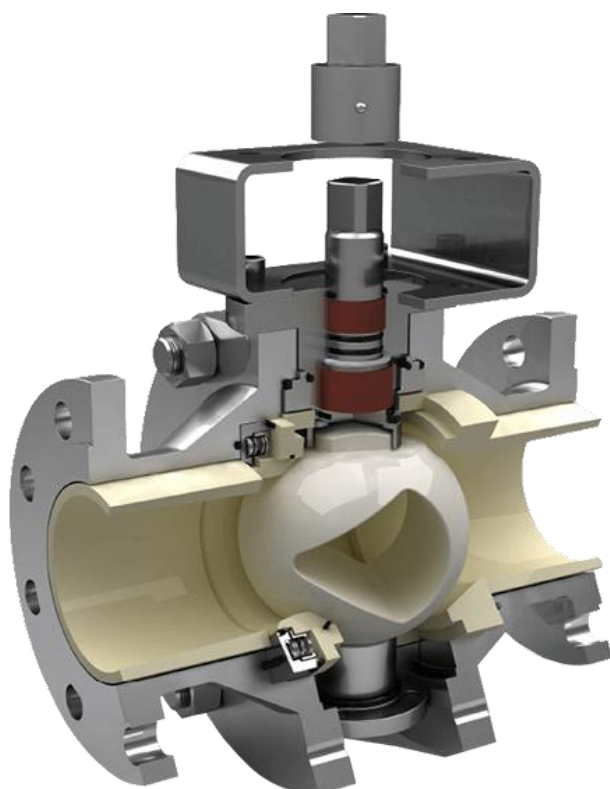
Odabir tipa ventila treba biti u sljedećem :

- Rotacioni ventil (*eng. rotary valve*),
- standardni regulacijski ventil (*eng. globe valve*),
- leptirasti ventil (*eng. butterfly valve*),
- kuglasti ventil (*eng. ball valve*) te
- ostale vrste ventila.

Preporuka je također da se pokušaju upotrijebiti ventili s rotirajućim vretenom kako bi se smanjila količina gubitaka. Prilikom odabira materijala i ocjenjivanja regulacijskog ventila treba voditi računa o klasi cjevovoda i njegovim karakteristikama. Sve identifikacije i/ili pločice s uputama moraju biti od nehrđajućeg čelika te učvršćene vijcima ili zakovicama. Strogo je zabranjeno koristiti prevlake ili zaštite kadmijem bilo koje komponente ventila ili njegovih spojnih elemenata. Potrebna karakteristika regulacijskog ventila dobiva se odabirom odgovarajućeg zapornog elementa (pladnja) i stoga je potrebno provesti proračune s vrijednostima karakterističnim za određenu vrstu ventila, kao i za vrstu zapornog elementa kako bi se pronašlo optimalno rješenje.

2.1.1. Rotacioni i standardni regulacijski ventili

Rotacioni ventil s ekscentričnim pladnjem ili dijelom kugle, te standardni regulacijski ventil s linearnim gibanjem, mogu se koristiti za sve primjene osim u slučajevima gdje je dopušteni pad tlaka toliko nizak da ventil nije u mogućnosti obavljati svoju funkciju. Također, ne smiju se koristiti za tekućine koje sadrže čvrste čestice. Primjeri rotacionog i standardnog regulacijskog ventila nalaze se na *slici 1* i *slici 2*.



Slika 1. Rotacioni ventil s izrezom [3]



Slika 2. Standardni regulacijski ventil s linearnim gibanjem [4]

2.1.2. Leptirasti ventili

Leptirasti ventili moraju biti u skladu s cjevovodom i razmatraju se prema sljedećim uvjetima:

- Potrebne su velike dimenzije ventila (obično zbog velikih brzina protoka s niskim padom tlaka),
- nije moguće koristiti rotacione ili standardne regulacijske ventile i
- u slučaju problema s korozijom, gdje leptirasti ventili imaju ekonomski prihvatljiviji oblik.

Postoje leptirasti ventili visokih performansi koji mogu podnijeti jako visoke temperature i tlakove te zadovoljiti veće klase propisa.



Slika 3. Leptirasti ventil [5]

2.1.3. Ostale vrste ventila

Važno je spomenuti još kutne ventile (*eng. angle valves*) i ventile s membranom (*eng. diaphragm valves*) koji su pogodni za muljevite fluide, te ventile sa zasunom (*eng. gate valves*) koji se koriste primarno za pogone gdje je potrebno češće uključivati/isključivati protok.

2.2. Metoda dimenzioniranja

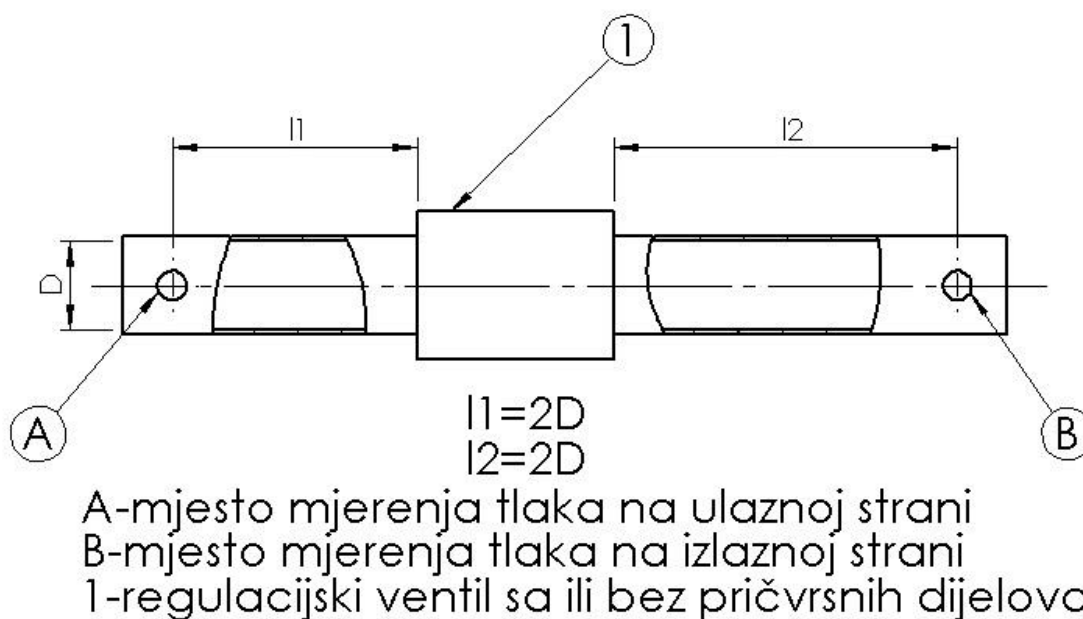
Prilikom određivanja dimenzija regulacijskog ventila koristit će se usvojene metode računanja koje su svjetski priznate. Pogrešno konstruiranje može biti skupo i nefunkcionalno, a predimenzionirani ventili, osim što će biti skuplji, mogu prouzrokovati nestabilnost i druge probleme. Odabir konkretnog ventila, uključujući njegove značajke svih elemenata i dimenzije, bazira se na poznavanju parametara rada u kojima će se nalaziti. Tehnike korištenja podataka bazirane su na dosadašnjim teorijama i eksperimentima.

Još negdje od sredine prošlog stoljeća (1960-ih) bilježe se aktivnosti kojima se nastojalo standardizirati metodu dimenzioniranja kontrolnih ventila. Tada je trgovačka udruga (*eng. Fluids Control Institute*) objavila jednadžbe tj. formule za dimenzioniranje ventila zasnovane

na mehanici fluida za stlačive i nestlačive fluide [6]. Nažalost te su jednadžbe obuhvaćale relativno uske raspone parametara tj. radnih uvjeta pa taj standard nije zaživio. ISA je niti dekadu kasnije pokrenula komitet zadužen za razvoj i publiciranje standardnih jednadžbi te je postupak za dimenzioniranje ventila dosegao status američkog nacionalnog standarda. IEC (International Electrotechnical Commission) je temeljem tog standarda formulirala međunarodni standard za dimenzioniranje ventila i oba standarda u konačnici usuglasila tj. harmonizirala. IEC (*eng. International Electrotechnical Commission*) jest svjetska organizacija za standardizaciju osnovana 1906. godine u Londonu. Ona priprema i objavljuje međunarodne standarde za električne, elektroničke i povezane tehnologije. Broji 60 zemalja članica i usko surađuje s međunarodnom organizacijom za standardizaciju (ISO).

2.3. Ugradnja ventila

U industrijskim primjenama, redukcije, ekspanzije i ostali spojni (pričvrсни) elementi spajaju se na regulacijske ventile. Učinak ovih spojnih elemenata može biti od velikog značaja te se faktor korekcije uvodi baš iz tog razloga. Ostali faktori su uvedeni kako bi uzeli u obzir svojstva fluida koji utječu na kapacitet protoka regulacijskog ventila. Pri dimenzioniranju ventila koristeći matematičke odnose koji će biti prikazani u daljnjem tekstu, uzimaju se u obzir gubitci između točaka A i B prikazani na *slici 4*. Na istoj slici mogu se vidjeti i pravila pričvršćivanja spojnih elemenata, odnosno propisane udaljenosti točaka za mjerenje tlaka od samog regulacijskog ventila.



Slika 4. Referentni ventil i spojni elementi

2.4. Vrste strujanja fluida

Strujanje je u najjednostavnijem objašnjenju usmjereno gibanje fluida. Prema putanji strujanja dijelimo na:

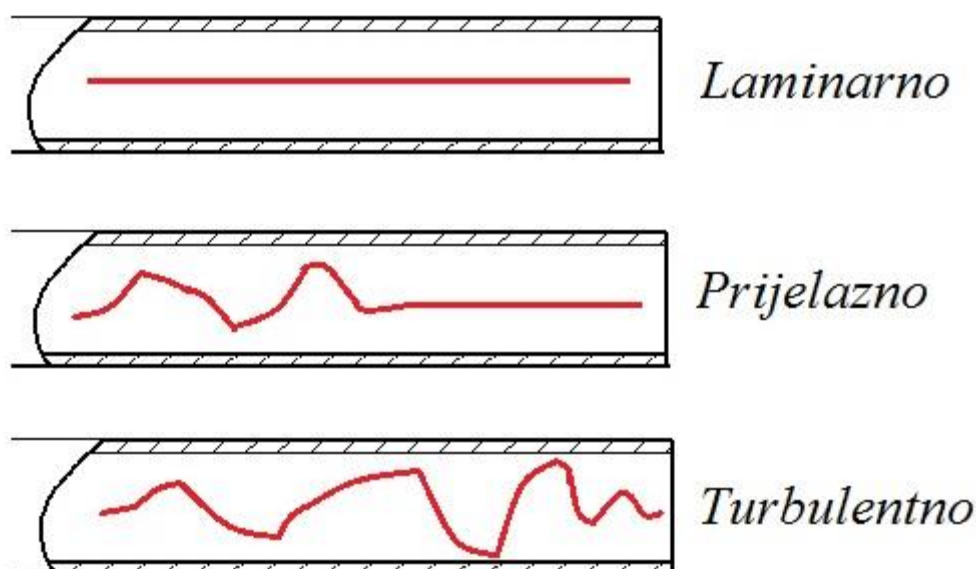
- Laminarno,
- turbulento i
- prijelazno.

Laminarno strujanje je uredno strujanje gdje se čestice gibaju po pravilnim putanjama, uz brzine u pravilnim funkcijama vremena i prostora. Mali poremećaji ostaju prigušeni. Matematički gledano to je strujanje gdje preturbacija slabi u vremenu pa je strujanje stabilno i ostaje stacionarno.

Turbulentno strujanje je naspram laminarnog nemirno, neustaljeno gibanje po nepredvidivim i nepravilnim putanjama. Strujanje je slučajnog karaktera čije se samo srednje strujanje odvija u određenom smjeru s nekim određenim profilom srednjih brzina. Mali poremećaji ne ostaju prigušeni već se povećavaju s vremenom. S matematičkog gledišta, ukoliko se preturbacije povećavaju u vremenu, strujanje postaje nestacionarno dobivajući kaotičan karakter.

Prijelazno strujanje ima karakteristike i jednog i drugog strujanja i kako sam naziv govori nalazi se na prijelazu između ta dva strujanja.

Laminarnost i turbulentnost strujanja su sinonimi za stabilnost i nestabilnost strujanja. [7]



Slika 5. Prikaz podjela strujanja



Slika 6. Shematski prikaz strujanja [8]

Potrebno je spomenuti još prigušeno i neprigušeno strujanje. Prigušeno strujanje je zapravo efekt stlačivih fluida, a vrijednost koja je „ugušena“ jest brzina fluida. Ovo svojstvo događa se prilikom dinamičkih uvjeta povezanih s Venturijevim efektom. Ukoliko prilikom strujanja fluida s određenim tlakom i temperaturom on prođe kroz nekakvo suženje (ekspanzijska ili redukcijaska cijev/ulaz iz cijevi u ventil) ulazi u područje nižeg tlaka, stoga dolazi do povećanja brzine strujanja fluida. Venturijev efekt uzrokuje statički tlak, imajući za posljedicu smanjenje gustoće nizvodno. Prigušeno strujanje jest ograničeno stanje pri kojem se uslijed daljnjeg prigušenja tlaka neće povećavati protok. Treba voditi računa o tome da je brzina strujanja ograničena, što znači da se maseni protok povećava podizanjem uzvodnog tlaka tj. povećanjem gustoće fluida. Pod uvjetima prigušenog strujanja, ventili i prigušnice se mogu koristiti za dobivanje željenog protoka.

3. DIMENZIONIRANJE ZA NESTLAČIVE FLUIDE

Sljedeće jednadžbe predstavljaju odnose između brzine protoka, koeficijenta protoka, faktora koji su definirani oblikom ventila i načinom ugradnje te svih ostalih radnih uvjeta za navedene fluide. Način i koraci računanja prikazani su u dijagramu toka u poglavlju 6.1. Brzina protoka stlačivog fluida zavisi o omjeru pada tlaka i apsolutnog tlaka na ulazu ($\Delta p/p_1$) označenog simbolom x . Pri vrijednostima blizu nule, moguće je nestlačive fluide promatrati kao stlačive i računati po njima zadanim jednadžbama. Međutim, povećanjem iznosa x varijable dolazi do ekspanzije pa je nužno koristiti drukčije definirane vrijednosti.

3.1. Turbulentno strujanje

Jednadžbe su pisane za Newtonove fluide pri strujanju kroz regulacijski ventil u uvjetima neprigušenog strujanja.

3.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje

3.1.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata

Jednadžba (2) za koeficijent protoka je primjenjiva ukoliko je ispunjen uvjet:

$$\Delta p < F_L^2 \cdot (p_1 - F_F \cdot p_s)$$

i koeficijent protoka u tom slučaju može se računati ovisno o algoritmu.

$$C = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho_1 / \rho_0}{\Delta p}} \quad (2)$$

3.1.1.2. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima

Jednadžba (3) za koeficijent protoka je primjenjiva ukoliko je ispunjen uvjet:

$$\Delta p < ((F_{LP} / F_P)^2 \cdot (p_1 - F_F \cdot p_s))$$

i koeficijent protoka u tom slučaju može se računati ovisno o algoritmu.

$$C = \frac{Q}{N_1 \cdot F_P} \sqrt{\frac{\rho_1 / \rho_0}{\Delta p}} \quad (3)$$

U ovom poglavlju, u uvjetima i jednadžbama opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

Δp [bar] – pad tlaka ($p_1 - p_2$)

F_L [-] – faktor regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata (tablica 4)

p_1 [bar] – apsolutni ulazni tlak

F_F [-] – faktor kritičnog tlaka

p_s [-] – tlak zasićenja pri ulaznoj temperaturi

C [m³/h] – koeficijent protoka

Q [m³/h] – volumni protok fluida

ρ_1/ρ_0 [-] – relativna gustoća

N_1 [-] – numerička konstanta (tablica 3)

F_{LP} [-] – faktor regeneracije fluida za ventil sa spojnim elementima

F_P [-] – faktor geometrije cjevovoda

3.1.2. Prigušeno turbulentno strujanje

Ukoliko se radi o prigušenom strujanju, izrazi i uvjeti su nešto drugačiji nego gore navedeni.

3.1.2.1. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata

Jednadžba (4) za koeficijent protoka je primjenjiva ukoliko je ispunjen uvjet:

$$\Delta p \geq F_L^2 \cdot (p_1 - F_F \cdot p_s)$$

i koeficijent protoka u tom slučaju može se računati ovisno o algoritmu.

$$C = \frac{Q}{N_1 \cdot F_L} \sqrt{\frac{\rho_1 / \rho_0}{p_1 - F_F \cdot p_s}} \quad (4)$$

3.1.2.2. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima

Jednadžba (5) za koeficijent protoka je primjenjiva ukoliko je ispunjen uvjet:

$$\Delta p \geq ((F_{LP} / F_P)^2 \cdot (p_1 - F_F \cdot p_s))$$

i koeficijent protoka u tom slučaju može se računati ovisno o algoritmu.

$$C = \frac{Q}{N_1 \cdot F_{LP}} \sqrt{\frac{\rho_1 / \rho_0}{p_1 - F_F \cdot p_s}} \quad (5)$$

3.2. Neturbulentno (laminarno i prijelazno) strujanje

Da bi ocijenili radi li se o ovakvom načinu strujanja potrebno je iz jednadžbe (36) izračunati Reynoldsov broj. Ukoliko je $Re_v < 10000$ primjenjive su jednadžbe u sljedećim poglavljima.

3.2.1. Neturbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata

Za neturbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata koeficijent protoka računa se po jednadžbi (6).

$$C = \frac{Q}{N_1 \cdot F_R} \sqrt{\frac{\rho_1 / \rho_0}{\Delta P}} \quad (6)$$

3.2.2. Neturbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima

Za neturbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima, nije poznato djelovanje spojnih elemenata. Zato se savjetuje koristiti odgovarajuće jednadžbe za F_R faktor za ventil bez spojnih elemenata. Na taj način dobiva se konzervativni koeficijent protoka jer će dodatne turbulencije zbog redukcije ili ekspanzije tek kasnije aktivirati laminarni tok.

U poglavljima 3.1.2 i 3.2.1 u uvjetima i jednadžbama, opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

Δp [bar] – pad tlaka (p_1-p_2)

F_L [-] – faktor regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata (tablica 4)

p_1 [bar] – apsolutni ulazni tlak

F_F [-] – faktor kritičnog tlaka

p_v [-] – tlak zasićenja pri ulaznoj temperaturi

C [m³/h] – koeficijent protoka

Q [m³/h] – volumni protok fluida

N_1 [-] – numerička konstanta (tablica 3)

ρ_1/ρ_0 [-] – relativna gustoća

F_{LP} [-] – faktor regeneracije fluida za ventil sa spojnim elementima

F_P [-] – faktor geometrije cjevovoda

F_R [-] – faktor Reynoldsovog broja

4. DIMENZIONIRANJE ZA STLAČIVE FLUIDE

Jednadžbe navedene u ovom poglavlju predstavljaju odnose između brzine protoka u korelaciji s koeficijentima protoka, faktorima vezanim za instalaciju i uvjetima rukovanja. Protok za stlačive fluide može biti izražen ili preko mase ili preko volumen, stoga je nužno obraditi jednadžbe za oba slučaja. Koeficijent protoka biti će moguće izračunati po sljedećim jednadžbama prateći dijagram toka prikazan u poglavlju 6.2. Brzina protoka stlačivih fluida mijenja se kao funkcija omjera pada tlaka i apsolutnog ulaznog tlaka ($\Delta p/p_1$) označenog simbolom x . Kada su vrijednosti x blizu nule, jednadžbe u ovom poglavlju mogu se vratiti na osnovne Bernulijeve jednadžbe za Newtonovske nestlačive fluide. Međutim, povećavanje vrijednosti x predstavlja ekspanzivne ili kompresibilne učinke fluida koji za sobom povlače potrebu korištenja prikladnih faktora.

4.1. Turbulentno strujanje stlačivih fluida

4.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje

4.1.1.1. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata

Jednadžbe (7) – (10) su primjenjive ukoliko je ispunjen uvjet $x < F_{\gamma, x_T}$ i tada se koeficijent protoka računa po jednoj od njih:

$$C = \frac{W}{N_6 \cdot Y \cdot \sqrt{x \cdot p_1 \cdot \rho_1}} \quad (7)$$

$$C = \frac{W}{N_8 \cdot p_1 \cdot Y} \sqrt{\frac{T_1 \cdot Z}{x \cdot M}} \quad (8)$$

$$C = \frac{Q}{N_9 \cdot p_1 \cdot Y} \sqrt{\frac{M \cdot T_1 \cdot Z}{x}} \quad (9)$$

$$C = \frac{Q}{N_7 \cdot p_1 \cdot Y} \sqrt{\frac{G_g \cdot T_1 \cdot Z}{x}} \quad (10)$$

4.1.1.2. Neprigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima

Jednadžbe (11) – (14) su primjenjive ukoliko je ispunjen uvjet $x < F_{\gamma, x_{TP}}$ i tada se koeficijent protoka računa po jednoj od njih:

$$C = \frac{W}{N_6 \cdot F_p \cdot Y \cdot \sqrt{x \cdot p_1 \cdot \rho_1}} \quad (11)$$

$$C = \frac{W}{N_8 \cdot F_p \cdot p_1 \cdot Y} \cdot \sqrt{\frac{T_1 \cdot Z}{x \cdot M}} \quad (12)$$

$$C = \frac{Q}{N_9 \cdot F_p \cdot p_1 \cdot Y} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot T_1 \cdot Z}{x}} \quad (13)$$

$$C = \frac{Q}{N_7 \cdot F_p \cdot p_1 \cdot Y} \cdot \sqrt{\frac{G_g \cdot T_1 \cdot Z}{x}} \quad (14)$$

U ovom poglavlju u uvjetima i jednadžbama (7) - (14) opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

x [-] – omjer pada tlaka i apsolutnog ulaznog tlaka ($\Delta p/p_1$)

F_γ [-] – faktor specifičnog toplinskog omjera (tablica 2)

x_T [-] – faktor pada tlaka ventila bez spojnih elemenata (tablica 4)

C [m³/h] – koeficijent protoka

W [kg/h] – maseni protok fluida

N_6 , N_7 , N_8 i N_9 [-] – numeričke konstante (tablica 3)

Y [-] – ekspanzijski faktor

p_1 [bar] – apsolutni ulazni tlak

ρ_1 [kg/m³] – gustoća fluida pri ulaznom tlaku p_1 i ulaznoj temperaturi T_1

Q [m³/h] – volumni protok fluida

T_1 [K] – apsolutna ulazna temperatura

Z [-] – faktor kompresije

M [kg/kmol] – molekularna masa (tablica 2)

G_g [-] – specifična gravitacija plina ili relativna gustoća plina (definirana kao omjer gustoće plina i gustoće zraka pri standardnim uvjetima, u praksi jednakog iznosa kao omjer molekularne mase plina i molekularne mase zraka)

4.1.2. Prigušeno turbulentno strujanje

Maksimalni protok kojim će fluid proći kroz regulacijski ventil pri prigušenim uvjetima strujanja računa se na sljedeće načine:

4.1.2.1. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata

Jednadžbe (15) – (18) su primjenjive ukoliko je ispunjen uvjet $x \geq F_\gamma x_T$ i tada se koeficijent protoka računa po jednoj od njih:

$$C = \frac{W}{0,667 \cdot N_6 \cdot \sqrt{F_\gamma \cdot x_T \cdot p_1 \cdot \rho_1}} \quad (15)$$

$$C = \frac{W}{0,667 \cdot N_8 \cdot p_1} \sqrt{\frac{T_1 \cdot Z}{F_\gamma \cdot x_T \cdot M}} \quad (16)$$

$$C = \frac{Q}{0,667 \cdot N_9 \cdot p_1} \sqrt{\frac{M \cdot T_1 \cdot Z}{F_\gamma \cdot x_T}} \quad (17)$$

$$C = \frac{Q}{0,667 \cdot N_7 \cdot p_1} \sqrt{\frac{G_g \cdot T_1 \cdot Z}{F_\gamma \cdot x_T}} \quad (18)$$

4.1.2.2. Prigušeno turbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima

Jednadžbe (19) – (22) su primjenjive ukoliko je ispunjen uvjet $x \geq F_\gamma x_{TP}$ i tada se koeficijent protoka računa po jednoj od njih:

$$C = \frac{W}{0,667 \cdot N_6 \cdot F_p \cdot \sqrt{F_\gamma \cdot x_{TP} \cdot p_1 \cdot \rho_1}} \quad (19)$$

$$C = \frac{W}{0,667 \cdot N_8 \cdot F_p \cdot p_1} \cdot \sqrt{\frac{T_1 \cdot Z}{F_\gamma \cdot x_{TP} \cdot M}} \quad (20)$$

$$C = \frac{Q}{0,667 \cdot N_9 \cdot F_p \cdot p_1} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot T_1 \cdot Z}{F_\gamma \cdot x_{TP}}} \quad (21)$$

$$C = \frac{Q}{0,667 \cdot N_7 \cdot F_p \cdot p_1} \cdot \sqrt{\frac{G_g \cdot T_1 \cdot Z}{F_\gamma \cdot x_{TP}}} \quad (22)$$

U ovom poglavlju u uvjetima i jednadžbama opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

x [-] – omjer pada tlaka i apsolutnog ulaznog tlaka ($\Delta p/p_1$)

F_γ [-] – faktor specifičnog toplinskog omjera (tablica 2)

x_T [-] – faktor pada tlaka ventila bez spojnih elemenata (tablica 4)

C [m³/h] – koeficijent protoka

W [kg/h] – maseni protok fluida

N_6 , N_7 , N_8 i N_9 [-] – numeričke konstante (tablica 3)

Y [-] – ekspanzijski faktor

p_1 [bar] – apsolutni ulazni tlak

ρ_1 [kg/m³] – gustoća fluida pri ulaznom tlaku p_1 i ulaznoj temperaturi T_1

Q [m³/h] – volumni protok fluida

T_1 [K] – apsolutna ulazna temperatura

Z [-] – faktor kompresije

M [kg/kmol] – molekularna masa (tablica 2)

G_g [-] – specifična gravitacija plina ili relativna gustoća plina (definirana kao omjer gustoće plina i gustoće zraka pri standardnim uvjetima, u praksi jednakog iznosa kao omjer molekularne mase plina i molekularne mase zraka)

x_{TP} [-] – faktor pada tlaka ventila sa spojnim elementima

4.2. Neturbulentno strujanje (laminarno i prijelazno)

Jednadžbe za protok Newtonovskih fluida kroz regulacijske ventile pri strujanju koje je neturbulentno izvedene su u normi IEC 60534-2-1, a ovdje su dane kao gotove jednadžbe. Primjenjive su ukoliko je $Re_v < 10000$. U ovom poglavlju korekcija gustoće plinova prikazana je kao $(p_1+p_2)/2$ uslijed ne izentropske ekspanzije.

4.2.1. Neturbulentno strujanje kroz ventil bez spojnih elemenata

Koeficijent protoka moguće je dobiti iz jedne od sljedećih jednadžbi:

$$C = \frac{W}{N_{27} \cdot F_R} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{\Delta p \cdot (p_1 + p_2) \cdot M}} \quad (23)$$

$$C = \frac{Q}{N_{22} \cdot F_R} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot T_1}{\Delta p \cdot (p_1 + p_2)}} \quad (24)$$

U ovom poglavlju u uvjetima i jednadžbama opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

C [m³/h] – koeficijent protoka

W [kg/h] – maseni protok fluida

N_{22} i N_{27} [-] – numeričke konstante

F_R [-] – faktor Reynoldsovog broja

T_1 [K] – apsolutna ulazna temperatura

Δp [bar] – pad tlaka (p_1-p_2)

p_1 [bar] – apsolutni ulazni tlak

p_2 [bar] – apsolutni izlazni tlak

M [kg/kmol] – molekularna masa (tablica 2)

Q [m³/h] – volumni protok fluida

4.2.2. Neturbulentno strujanje kroz ventile sa spojnim elementima

Za neturbulentno strujanje kroz ventil sa spojnim elementima, nije poznato djelovanje spojnih elemenata. Zato se savjetuje koristiti odgovarajuće jednačbe za F_R faktor za ventil bez spojnih elemenata. Na taj način dobiva se konzervativni koeficijent protoka jer će dodatne turbulencije zbog redukcije ili ekspanzije tek kasnije aktivirati laminarni tok.

5. FIZIKALNE VELIČINE I KOREKTIVNI FAKTORI

5.1. Koeficijent protoka K_v

Koeficijent protoka ventila korišten u metričkom sustavu označava se kao K_v , a definira se kao specifični volumni protok vode u m^3/h na temperaturi od $5^\circ C$ do $40^\circ C$ koja prolazi kroz ventil kad je on kompletno otvoren, između ulaznog i izlaznog tlaka od 1 bar s tim da na izlazu ne smije biti atmosferski tlak.

Koeficijent protoka ventila u ovom radu prilikom računanja se označava kao $C=K_v$, jer je norma pisana i za američki sustav mjera koji koristi C_v . S obzirom koji se koeficijent računa uzimaju se drugačije vrijednosti korekcijskih faktora prikazanih u tablicama. Može se definirati i odnos između koeficijenata za različite sustave mjernih jedinica $K_v=0,856C_v$ ili $C_v=1,156K_v$. Vrijednost koeficijenta protoka se može dobiti uz pomoć sljedeće jednadžbe:

$$K_v = Q \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{K_v}}{\Delta p} \cdot \frac{\rho}{\rho_w}} \quad (25)$$

U jednadžbi (25) oznake redom pojavljivanja predstavljaju:

K_v [m^3/h] – koeficijent protoka ventila

Q [m^3/h] – volumni protok

Δp_{K_v} [bar] – statički pad tlaka od 1 bar

ρ [kg/m^3] – gustoća fluida

ρ_w [kg/m^3] – gustoća vode pri temperaturi ($5^\circ C$ do $40^\circ C$)

5.2. Faktor geometrije cjevovoda F_P

Faktor geometrije cjevovoda uzima u obzir spojne elemente pričvršćene na tijelo regulacijskog ventila. To je u prijevodu omjer brzine protoka kroz regulacijski ventil sa i bez spojnih elemenata, a testirano je u uvjetima da ne dolazi do prigušenog strujanja ni za jedan tip ugradnje (slika 4). Kako bi se postigla točnost od $\pm 5\%$ navedeni faktor treba se odrediti testiranjem prema normi ANSI/ISA-75.02-1996.

Kad se koriste procijenjene vrijednosti, F_P se računa po jednadžbi:

$$F_P = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum \zeta}{N_2} \cdot \left(\frac{C_i}{d^2}\right)^2}} \quad (26)$$

U jednadžbi (26) navedene su oznake redom pojavljivanja u jednadžbi:

F_P [-] – faktor geometrije cjevovoda

$\Sigma\zeta$ [-] – suma svih koeficijenata gubitaka uslijed efektivne brzine

N_2 [-] – numerička konstanta (tablica 3)

C_i [m³/h] – pretpostavljeni koeficijent protoka (za iterativne svrhe)

d [mm] – nazivni promjer ventila.

Faktor $\Sigma\zeta$ je suma svih koeficijenata gubitka uslijed efektivne brzine. Gubici samog ventila u ovom faktoru nisu uzeti u obzir.

$$\Sigma\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_{B1} - \zeta_{B2} \quad (27)$$

Za slučaj da promjeri cjevovoda na ulazu i izlazu iz ventila nisu jednaki koriste se jednadžbe (29) i (30), jednadžba kada su jednaki je (28):

$$\zeta_B = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4 \quad (28)$$

$$\zeta_{B1} = 1 - \left(\frac{d}{D_1}\right)^4 \quad (29)$$

$$\zeta_{B2} = 1 - \left(\frac{d}{D_2}\right)^4 \quad (30)$$

Ako su komercijalno dostupni ulazni i izlazni elementi kratke duljine, koeficijenti gubitaka ζ_1 i ζ_2 mogu se aproksimirati sljedećim izrazima:

$$\zeta_1 = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D_1}\right)^2\right]^2 \quad (31)$$

$$\zeta_2 = 1,0 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D_2}\right)^2\right]^2 \quad (32)$$

$$\zeta_1 + \zeta_2 = 1,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^2 \quad (33)$$

U jednadžbama (27) - (33) navedene su oznake redom pojavljivanja u jednadžbi:

$\Sigma\zeta$ [-] – suma svih koeficijenata gubitaka uslijed efektivne brzine

ζ_B [-] – Bernoulijev koeficijent kada je ulaz i izlaz jednakog presjeka

ζ_{B1} [-] – ulazni Bernoulijev koeficijent

ζ_B [-] – izlazni Bernoulijev koeficijent

ζ_1 [-] – ulazni koeficijent gubitaka

ζ_2 [-] – izlazni koeficijent gubitaka

d [mm] – nazivni promjer ventila

D [mm] – nazivni promjer cjevovoda.

D_1 [mm] – promjer cjevovoda prije ventila

D_2 [mm] - promjer cjevovoda iz ventila.

Potrebno je naglasiti kako se jednažba (31) odnosi na ulaznu redukciju, jednažba (32) na izlaznu redukciju ili ekspanziju, a jednažba (33) na slučaj kada su ulazna i izlazna redukcija jednakih dimenzija.

Vrijednosti faktora geometrije cjevovoda s navedenim koeficijentima gubitka mogu dovesti do izbora ventila s nešto većim kapacitetom nego što je to potrebno, stoga je za ovaj postupak potrebno provesti iteraciju. Treba započeti s proračunom za neprigušeno strujanje jer ovaj faktor nije primjenjiv za prigušeno strujanje.

Iteracijski koeficijent protoka računa se po jednažbi:

$$C_i = 1,3 \cdot C \quad (34)$$

S navedenim izrazom vraća se u jednažbu (26) za dobivanje faktora geometrije cjevovoda. Ukoliko je slučaj da su ulaz i izlaz iz ventila jednakih dimenzija, navedni faktor se može očitati na slici 7, a u slučaju iteracije potrebno je poštovati uvjet:

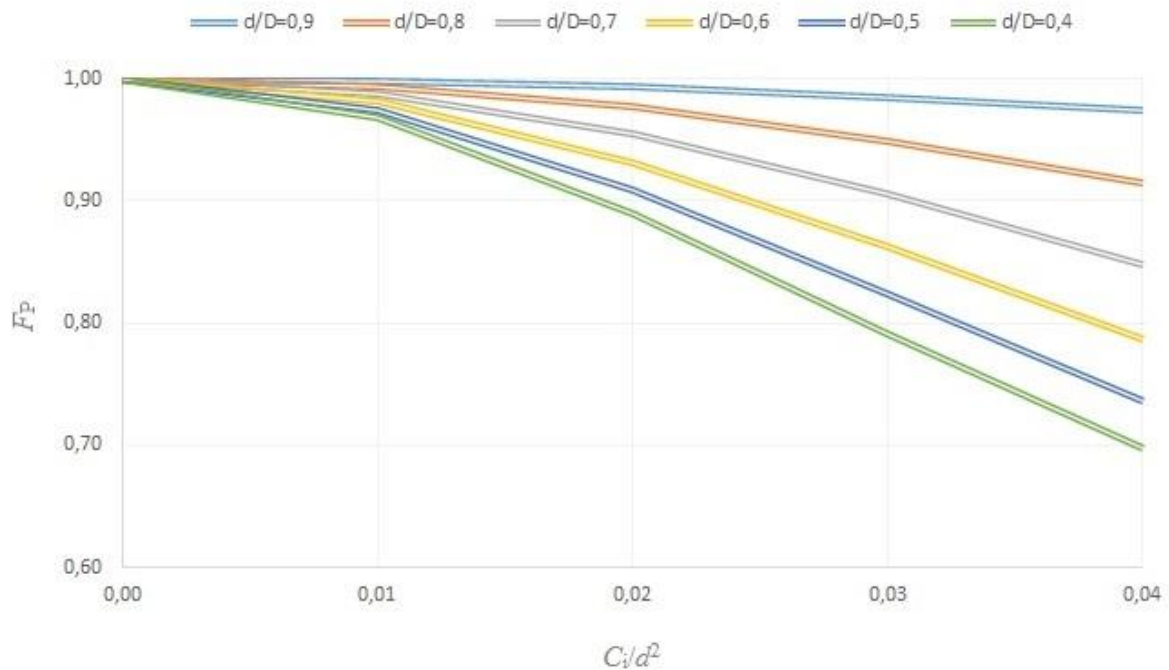
$$\frac{C}{F_p} \leq C_i \quad (35)$$

Oznake u jednažbama (34) i (35) redom pojavljivanja:

C_i [m³/h] – pretpostavljeni koeficijent protoka (za iterativne svrhe)

C [m³/h] – koeficijent protoka

F_p [-] – faktor geometrije cjevovoda.

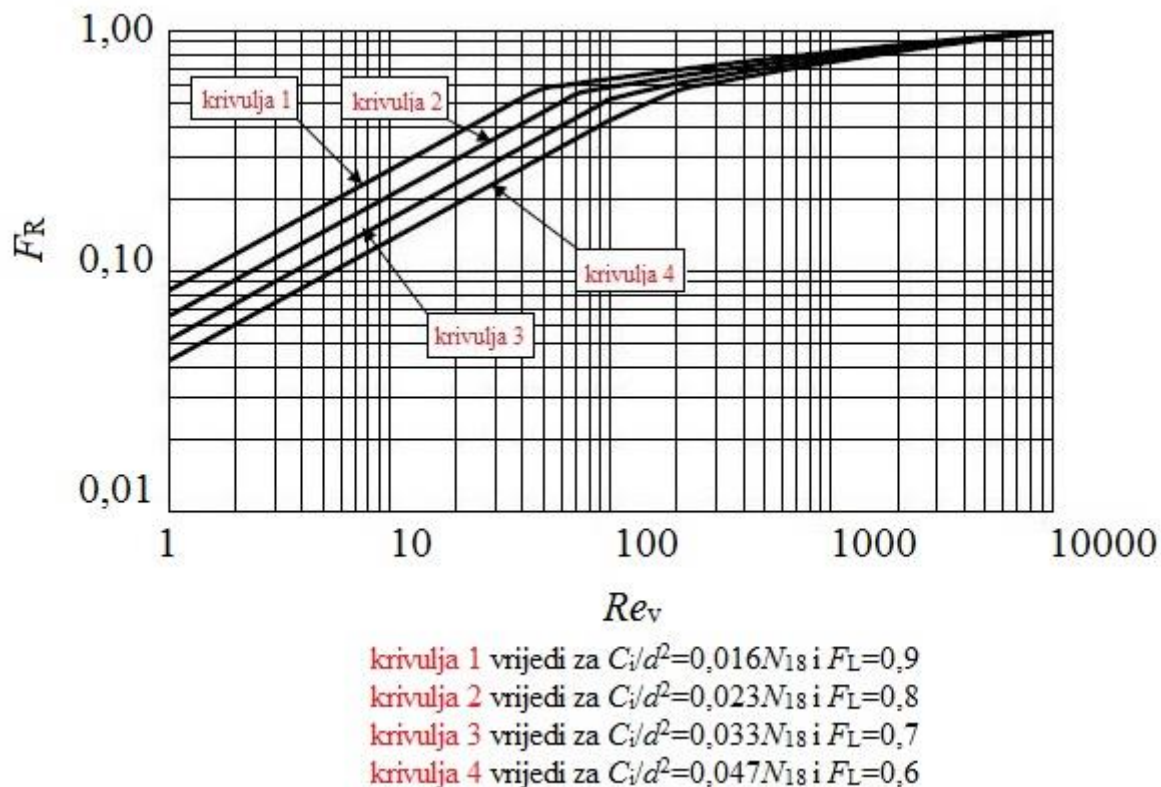


Slika 7. Grafički prikaz ovisnosti faktora geometrije cjevovoda o omjeru (C_i/d)

Ako je zadovoljen uvjet iz jednadžbe (35), potrebno je koristiti izraz iz jednadžbe (34). Ukoliko uvjet nije zadovoljen, povećava se navedeni iteracijski koeficijent protoka za dodatnih 30%.

5.3. Faktor Reynoldsovog broja F_R

Ovaj faktor je potreban kada je uspostavljeno neturbulentno strujanje kroz regulacijski ventil uslijed niskog tlaka, visoke viskoznosti, malog koeficijenta protoka ili kombinacijom svega navedenog. Faktor Reynoldsovog broja se definira kao omjer protoka uslijed neturbulentnog strujanja i turbulentnog strujanja, u istim uvjetima i identičnoj instalaciji. Ispitivanja pokazuju da F_R može biti određen iz krivulje na *slici 8* i *slici 9*.



Slika 8. Očitavanje faktora Reynoldsovog broja za ventila sa zapornim elementom bez izreza [1]

Dijagrami na *slike 8* i *slici 9* izrađeni su korištenjem jednadžbe (36).

$$Re_v = \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\nu \cdot \sqrt{C_i \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C_i^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (36)$$

U navedenoj jednadžbi opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

Re_v [-] – Reynoldsov broj

N_2 i N_4 [-] – numeričke konstante (tablica 3)

F_d [-] – faktor vrste ventila (tablica 4)

Q [m³/h] – volumni protok fluida

ν [m²/s] – kinematička viskoznost

C_i [m³/h] – pretpostavljeni koeficijent protoka (za iterativne svrhe)

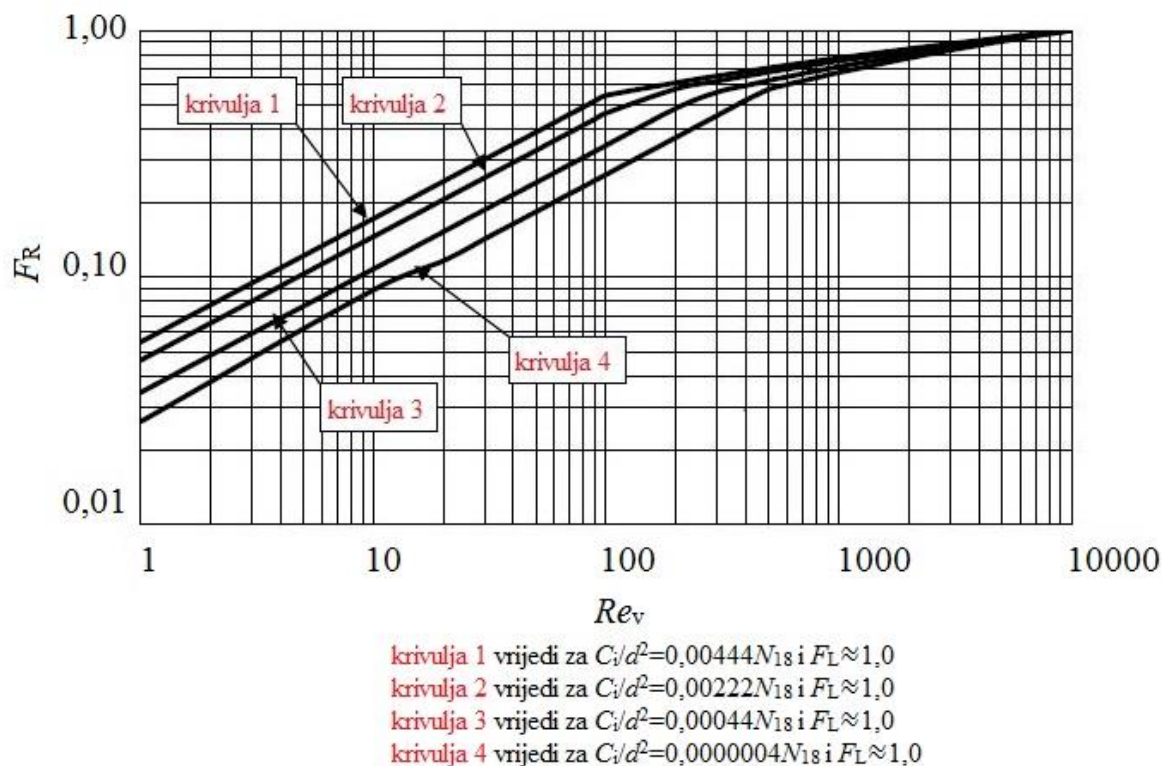
F_L [-] – faktor regeneracije fluida za ventil sa pričvrsnim elementima (tablica 4)

D [mm] – nazivni promjer cjevovoda

Ovakav proračun će zahtijevati iteraciju. Nastavlja se računanje koeficijenta protoka C za turbulentno strujanje. Faktor oblika ventila F_d pretvara geometriju otvora u jednostavni kružni otvor za prolaz fluida. Uglavnom je naveden od strane proizvođača te postoje neke opće prihvaćene vrijednosti za određeni tip ventila koje su prikazane u *tablici 4*. U svrhu postizanja

točnosti od $\pm 5\%$ spomenuti faktor se određuje u skladu s normom IEC-60534-2-3. Postoji i metoda izračuna istoga. Biti će naveden tok i jednažbe, no u radu će se koristiti podaci proizvođača za navedene vrste prikazani u *tablici 4*.

Potrebno je odrediti C_i po jednažbi (34), i s takvim podatkom izračunati F_R . On se može očitati na *slici 8* ako je zaporni element ventila bez izreza. Ako zaporni element ima izrez očitava se na *slici 9*. Za ovakvo očitavanje nužno je ispuniti uvjet da je $C_i/d^2 < 0,016N_{18}$.



Slika 9. Očitavanje faktora Reynoldsovog broja za ventil sa zapornim elementom s izrezom [1]

Ako je zadovoljen uvjet:

$$\frac{C}{F_R} \leq C_i \quad (37),$$

koristi se C_i iz jednažbe (31), ako uvjet ne zadovoljava ponovi se postupak s povećanjem C_i za 30%. Postupak je potrebno ponavljati dok se ne zadovolji uvjet (37).

Za neturbulento strujanje, za ventile čiji zaporni element ima izrez i kao i za one koji nemaju, definiranje faktora Reynoldsovog broja nešto je drugačije.

Za ventile čiji je zaporni element bez izreza uz uvjete $C_i/d^2 \geq 0,016N_{18}$ i $Re_v \geq 10$ koristi se jedna od jednažbi (38) ili (39).

Za prijelazno strujanje vrijedi:

$$F_R = 1 + \left(\frac{0,33 \cdot F_L^{\frac{1}{2}}}{n_1^{\frac{1}{4}}} \right) \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{Re_v}{10000} \right) \quad (38),$$

a za laminarno:

$$F_R = \frac{0,026}{F_L} \cdot \sqrt{n_1 \cdot Re_v}; (ne \text{ smije prelaziti } F_R = 1) \quad (39).$$

Koeficijent naveden u prethodne dvije jednađbe definiran je izazom:

$$n_1 = \frac{N_2}{\left(\frac{C_i}{d^2} \right)^2} \quad (40).$$

NAPOMENA: ukoliko je računato po objema jednađbama, uzeti manju vrijednost.

NAPOMENA: u obje jednađbe C_i/d^2 ne smije preći vrijednost 0,04.

NAPOMENU ukoliko je Re_v koristi se samo jednađba (39).

Za ventile čiji je zaporni element bez izreza gdje je $C_i/d^2 < 0,016N_{18}$ i $Re_v \geq 10$ koristi se jedna od jednađbi (41) i (42).

Za prijelazno strujanje vrijedi:

$$F_R = 1 + \left(\frac{0,33 \cdot F_L^{\frac{1}{2}}}{n_2^{\frac{1}{4}}} \right) \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{Re_v}{10000} \right) \quad (41),$$

a za laminarno:

$$F_R = \frac{0,026}{F_L} \cdot \sqrt{n_2 \cdot Re_v}; (ne \text{ smije prelaziti } F_R = 1) \quad (42).$$

Koeficijent naveden u prethodne dvije jednađbe definiran je izazom:

$$n_2 = 1 + N_{32} \cdot \left(\frac{C_i}{d^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (43)$$

NAPOMENA: kao i u prethodnom slučaju, pri računanju iz obje jednađbe, koristiti manju od dobivenih vrijednosti. Ukoliko je $Re_v < 10$ koristiti samo jednađbu (42).

U ovom poglavlju u navedenim jednađbama opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

F_R [-] – faktor Reynoldsovog broja

F_L [-] – faktor regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata (tablica 4)

Re_v [-] – Reynoldsov broj

N_2 i N_{32} [-] – numeričke konstante (tablica 3)

C_i [m³/h] – pretpostavljeni koeficijent protoka (za iterativne svrhe)

d [mm] – nazivni promjer ventila

5.4. Faktor regeneracije tekućine pod tlakom F_L ili F_{LP}

5.4.1. Faktor regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata F_L

Ovaj faktor računa utjecaj unutarnje geometrije na kapacitet ventila pri prigušenom strujanju. Definiran je kao omjer stvarnog maksimalnog protoka pri prigušenom strujanju i teoretskog protoka pri neprigušenom strujanju koji se računa ako je razlika tlakova drugačija nego je razlika između ulaznog tlaka i tlaka na mjestu najmanjeg promjera (najveće brzine) pri prigušenim uvjetima stujanja. Faktor regeneracije fluida za ventile bez spojnih elemenata može se odrediti mjerenjem u skladu s normom ANSI/ISA-75.02-1996. Tipične vrijednosti faktora F_L prikazane su u *tablici 4*.

5.4.2. Faktor regeneracije fluida za ventil sa spojnim elementima F_{LP}

Ovaj faktor je u osnovi kombinacija navedenog faktora regeneracije i faktora geometrije cjevovoda F_P , a dobiva se na isti način kako je opisano za F_L . Da bi se zadovoljilo odstupanje od $\pm 5\%$, F_{LP} mora biti određen testiranjem, a kada su dozvoljene procijenjene vrijednosti vrijedi:

$$F_{LP} = \frac{F_L}{\sqrt{1 + \frac{F_L^2}{N_2} \cdot (\sum \zeta_1) \cdot \left(\frac{C}{d}\right)^2}} \quad (44)$$

Ovdje je $\sum \zeta_1$ je suma svih koeficijenata gubitka na ulazu uslijed efektivne brzine $\zeta_1 + \zeta_{B1}$.

U navedenoj jednadžbi od opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

F_{LP} [-] – faktor regeneracije fluida za ventil sa spojnim elementima

F_L [-] – faktor regeneracije fluida za ventil bez spojnih elemenata (tablica 4)

N_2 [-] – numerička konstanta (tablica 3)

ζ_{B1} [-] – ulazni bernoulijev koeficijent

ζ_1 [-] – ulazni koeficijent gubitaka

C [m³/h] – koeficijent protoka

d [mm] – nazivni promjer ventila

5.5. Faktor omjera kritičnog tlaka F_F

Ovaj faktor je omjer kritičnog tlaka na najmanjem promjeru strujanja pri uvjetima prigušenog strujanja i tlaka zasićenja pri ulaznoj temperaturi. Za tlak pare blizu nule on iznosi 0,96. Faktor se može ili očitati na *slici 10* ili približno izračunati jednadžbom:

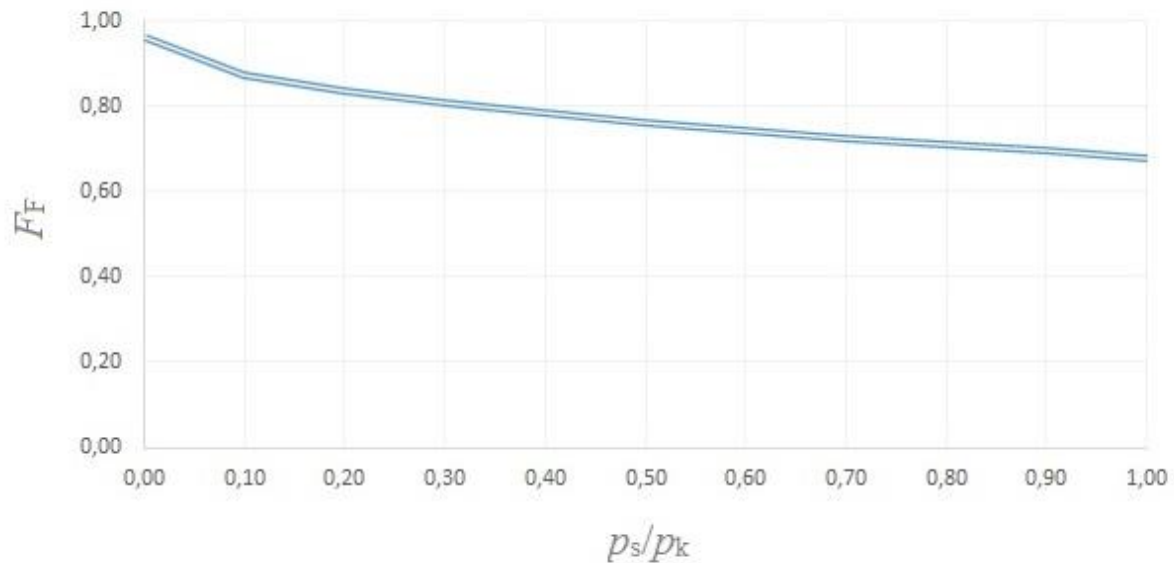
$$F_F = 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{p_s}{p_k}} \quad (45)$$

U navedenoj jednadžbi opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

F_F [-] – faktor kritičnog tlaka

p_s [bar] – tlak zasićenja

p_k [bar] – termodinamički kritični tlak



Slika 10. Grafički prikaz ovisnosti faktora kritičnog tlaka o omjeru p_s/p_k

5.6. Ekspanzijski faktor Y

Ekspanzijski faktor služi za računanje promjene u gustoći kada fluid prolazi područjem najmanje površine mlaza s najvećom brzinom („vena contracta“). Također je odgovoran za promjene u tom području kada je razlika tlakova promjenjiva. Teoretski gledano, ovaj faktor je u ovisnosti o:

- omjeru ulazne površine i tijela ventila,
- obliku kojim fluid prolazi,
- razlici omjera tlakova x ,
- Reynoldsovom broju Re_v i
- izentropskom eksponentu κ .

Reynoldsov broj je omjer inercijskih i viskoznihi sila na ulazu u regulacijski ventil. U slučaju kompresibilnog protoka, njegova je vrijednost u pravilu izvan značajnog utjecaja, osim gdje je ili protok ili koeficijent protoka veoma nizak pa dolazi do utjecaja.

Razlika omjera tlakova je pod utjecajem specifičnog toplinskog omjera pa se Y može izračunati po jednadžbi (46):

$$Y = 1 - \frac{x}{3 \cdot F_\gamma \cdot x_T} \quad (46)$$

U jednadžbi opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

Y [-] – ekspanzijski faktor

x [-] – omjer pada tlaka i apsolutnog ulaznog tlaka ($\Delta p/p_1$)

F_γ [-] – faktor specifičnog toplinskog omjera

x_T [-] – faktor pada tlaka ventila bez spojnih elemenata pri prigušenom strujanju (tablica 4).

Vrijednost x ne bi smjela preći vrijednost umnoška $F_\gamma x_T$. U slučaju da prijeđe: $x > F_\gamma x_T$, strujanje postaje prigušeno i Y poprima vrijednost od 0,667.

5.7. Faktor pada tlaka x_T ili x_{TP}

5.7.1. Faktor pada tlaka ventila bez spojnih elemenata x_T

Ako se ulazni tlak p_1 održava konstantnim, a izlazni tlak p_2 postupno smanjuje, maseni protok kroz ventil doseći će maksimalnu granicu i dolazi do prigušenog strujanja. Daljnje smanjivanje tlaka p_2 neće za rezultat imati povećanje masenog protoka. Limit je dosegnut onog trenutka kada faktor x dosegne vrijednost $F_\gamma x_T$. Granična vrijednost x je definirana kao kritični omjer razlike tlakova. Vrijednosti dobivene za ekspanzijski faktor Y moraju biti u rasponu do 0,667 kada je $x = F_\gamma x_T$, pa sve do 1 za jako male razlike tlakova. Za slučaj određivanja vrijednosti x_T pomoću mjerenja, propisi za provođenje testiranja opisani su u normi ANSI/ISA-75-02-1996. a neke tipične vrijednosti ovog faktora navedene su u *tablici 4*.

5.7.2. Faktor pada tlaka ventila sa spojnim elementima x_{TP}

Ukoliko je regulacijski ventil ugrađen zajedno sa spojnim elementima, vrijednost x_T biti će promijenjena. Kako bi se zadovoljilo odstupanje od $\pm 5\%$ ventil zajedno i spojni elementi moraju se promatrati i testirati kao cjelina (spojni elementi se smatraju dijelom ventila). Kada je dozvoljeno koristiti procijenjene vrijednosti, a ne stvarne dobivene mjerenjem, upotrebljava se jednadžba:

$$x_{TP} = \frac{\frac{x_T}{F_P^2}}{1 + \frac{x_T \cdot \zeta_i}{N_5} \cdot \left(\frac{C_i}{d^2}\right)^2} \quad (47)$$

Ovdje je ζ_i je koeficijent gubitaka uslijed brzine zbog koeficijenata $\zeta_1 + \zeta_{B1}$.

U navedenoj jednadžbi opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

x_{TP} [-] – faktor pada tlaka ventila sa spojnim elementima ($\Delta p/p_1$)

F_γ [-] – faktor specifičnog toplinskog omjera

x_T [-] – omjer diferencijalnog tlaka regulacijskog ventila bez spojnih elemenata pri prigušenom strujanju [Tablica 4]

F_P [-] – faktor geometrije cjevovoda

ζ_{B1} [-] – ulazni Bernoulijev koeficijent

ζ_1 [-] – ulazni koeficijent gubitaka

N_5 [-] – numerička konstanta

C_i [m³/h] – pretpostavljeni koeficijent protoka (za iterativne svrhe) i

d [mm] – nazivni promjer ventila.

5.8. Faktor specifičnog toplinskog omjera F_γ

Faktor x_T temelji se na zraku s tlakom blizu atmosferskog kao i fluidu u protoku sa specifičnim toplinskim omjerom od 1,4. Ukoliko taj omjer nije 1,4 faktor specifičnog toplinskog omjera se koristi za korekciju x_T . Sljedeća jednadžba koristi se za izračunavanje navedenog faktora:

$$F_\gamma = \frac{\kappa}{1,4} \quad (48),$$

a u navedenoj jednadžbi opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

F_γ [-] – faktor specifičnog toplinskog omjera

κ [-] – izentropski eksponent (tablica 2)

5.9. Faktor kompresije Z

Većina jednadžbi za dimenzioniranje regulacijskog ventila ne sadrži izraze za stvarnu gustoću tekućine pri uzvodnim uvjetima, već se ona dobiva iz podataka o ulaznom tlaku i temperaturi na osnovu zakona idealnih plinova. Faktor kompresije može se definirati kao omjer stvarnog volumena i idealnog volumena pod istim tlakom i temperaturom. Pod određenim uvjetima ponašanja realnih plinova mogu značajno odstupati od idealnih. Kod takvih slučajeva faktor

kompresije bi trebao služiti za kompenziranje te razlike. Faktor kompresije Z je funkcija reduciranog tlaka i temperature. Reducirani tlak p_r definiran je kao omjer apsolutnog ulaznog tlaka i termodinamičkog kritičnog tlaka za određeni fluid, kao i reducirana temperatura T_r kao omjer apsolutne ulazne temperature i termodinamičke kritične temperature. U ovisnosti o reduciranom tlaku i temperaturi moguće je iz postojećih dijagrama za realne plinove očitati faktor kompresije Z , dok isti kod idealnih plinova iznosi 1. Reducirani tlak i reducirana temperatura računaju se prema:

$$p_r = \frac{p_1}{p_k} \quad (49),$$

$$T_r = \frac{T_1}{T_k} \quad (50).$$

U jednadžbama (48) i (49) opis oznaka naveden je redom pojavljivanja:

P_r [bar] – reducirani tlak

p_1 [bar] – apsolutni ulazni tlak

p_k [bar] – apsolutni termodinamički kritični tlak

T_r [K] – reducirana temperatura

T_1 [bar] – apsolutna ulazna temperatura

T_k [bar] – apsolutna termodinamička temperatura

Tablica 2. Fizikalne konstante različitih medija [1]

Plin ili para	Simbol	M	κ	F_γ	p_k [kPa]	T_k [K]
Acetilen	C ₂ H ₂	26,04	1,30	0,929	6,140	309
Amonijak	NH ₃	17,03	1,32	0,943	11,400	406
Argon	A	39,948	1,67	1,191	4,870	151
Benzen	C ₆ H ₆	78,11	1,12	0,800	4,924	562
Izobutan	C ₄ H ₉	58,12	1,10	0,784	3,638	408
n-butan	C ₄ H ₁₀	58,12	1,11	0,793	3,800	425
Izobutilen	C ₄ H ₈	56,11	1,11	0,790	4,000	418
Dušik	N ₂	28,013	1,40	1,000	3,394	126
Dušikov oksid	NO	63,01	1,40	1,100	6,485	180

Plin ili para	Simbol	M	κ	F_γ	p_k [kPa]	T_k [K]
Flour	F ₂	18,998	1,36	0,970	5,215	144
Fluorovodik	HF	20,01	0,97	0,691	6,485	461
Freon 11	CCl ₃ F	137,37	1,14	0,811	4,409	471
Freon 12	CCl ₂ F ₂	120,91	1,13	0,807	4,114	385
Freon 13	CClF	104,46	1,14	0,814	3,869	302
Freon 22	CHClF ₂	80,47	1,18	0,846	4,977	369
Helij	He	4,003	1,66	1,186	229	5,25
n-heptan	C ₇ H ₁₆	100,20	1,05	0,750	2,736	540
Kisik	O ₂	32,000	1,4	1,000	5,040	155
Klor	Cl ₂	70,906	1,31	0,934	7,980	417
Klorovodik	HCl	36,46	1,41	1,007	8,319	325
Metan	CH ₄	16,04	1,32	0,943	4,600	191
Metilni klorid	CH ₃ Cl	50,49	1,24	0,889	6,667	417
Neon	Ne	20,179	1,64	1,171	2,726	44,45
Oktan	C ₈ H ₁₈	114,23	1,66	1,186	2,513	569
Pentan	C ₅ H ₁₂	72,15	1,06	0,757	3,374	470
Propan	C ₃ H ₈	44,10	1,15	0,821	4,256	370
Propilen	C ₃ H ₆	42,08	1,14	0,814	4,600	365
Sumporov dioksid	SO ₂	64,06	1,26	0,900	7,822	430
Ugljični dioksid	CO ₂	44,01	1,30	0,929	7,387	304
Ugljični monoksid	CO	28,01	1,40	1,000	3,496	133
Vodik	H ₂	2,016	1,41	1,007	1,297	33,25
Zasićena para	-	18,016	1,25-1,32*	0,893-0,943*	22,119	647

Plin ili para	Simbol	M	κ	F_γ	p_k [kPa]	T_k [K]
Prirodni plin	-	17,74	1,27	0,907	4,634	203
Zrak	-	28,97	1,40	1,000	3,771	133

NAPOMENA: sve vrijednosti (osim za paru) navedene su za sobnu temperaturu i atmosferski tlak.

5.10. Numeričke konstante N

U pojedinim izrazima korištenim za izračunavanje koeficijenta protoka u svrhu dimenzioniranja regulacijskog ventila pojavljuju se numeričke konstante koje su prikazane u tablici 3[1] i tablici 5.[1] Treba naglasiti da postoje i numeričke konstante za proračun po američkom sustavu mjera, ali one nisu razmatrane već su korištene samo one za metrički sustav. Mjerne jedinice za pojedine konstante se razlikuju i mogu se izvesti s obzirom na navedene mjerne jedinice traženih veličina. U tablici mjerne jedinice nisu navedene, no pisane su u programskom kodu u prilogu.

Tablica 3. Vrijednosti numeričkih konstanti N

konstanta	K_v	W	Q	$p, \Delta p$	ρ	T	d, D	v
N ₁	1×10^{-1}	-	m ³ /h	kPa	-	-	-	-
	1	-	m ³ /h	bar	-	-	-	-
N ₂	$1,6 \times 10^{-3}$	-	-	-	-	-	mm	-
N ₄	$7,07 \times 10^{-2}$	-	m ³ /h	-	-	-	-	m ² /s
N ₅	$1,8 \times 10^{-3}$	-	-	-	-	-	mm	-
N ₆	3,16	kg/h	-	kPa	kg/m ³	-	-	-
	$3,16 \times 10^1$	kg/h	-	bar	kg/m ³	-	-	-
N ₇ ($t = 15,6^\circ C$)	4,82	-	m ³ /h	kPa	-	K	-	-
	$4,82 \times 10^2$	-	m ³ /h	bar	-	K	-	-
N ₈	1,1	kg/h	-	kPa	-	K	-	-
	$1,1 \times 10^2$	kg/h	-	bar	-	K	-	-
N ₉ ($t = 0^\circ C$)	$2,46 \times 10^1$	-	m ³ /h	kPa	-	K	-	-
	$2,46 \times 10^3$	-	m ³ /h	bar	-	K	-	-

konstanta	K_v	W	Q	$p, \Delta p$	ρ	T	d, D	v
N ₁₈	$8,65 \times 10^{-1}$	-	-	-	-	-	mm	-
N ₁₉	2,5	-	-	-	-	-	mm	-
N ₂₂	$1,73 \times 10^1$	-	m ³ /h	kPa	-	K	-	-
($t = 0^\circ\text{C}$)	$1,73 \times 10^3$	-	m ³ /h	bar	-	K	-	-
N ₂₂	$1,84 \times 10^1$	-	m ³ /h	kPa	-	K	-	-
($t = 15^\circ\text{C}$)	$1,84 \times 10^3$	-	m ³ /h	bar	-	K	-	-
N ₂₇	$7,75 \times 10^{-1}$	kg/h	-	kPa	-	K	-	-
($t = 0^\circ\text{C}$)	$7,75 \times 10^1$	kg/h	-	bar	-	K	-	-
N ₃₂	$1,4 \times 10^2$	-	-	-	-	-	mm	-

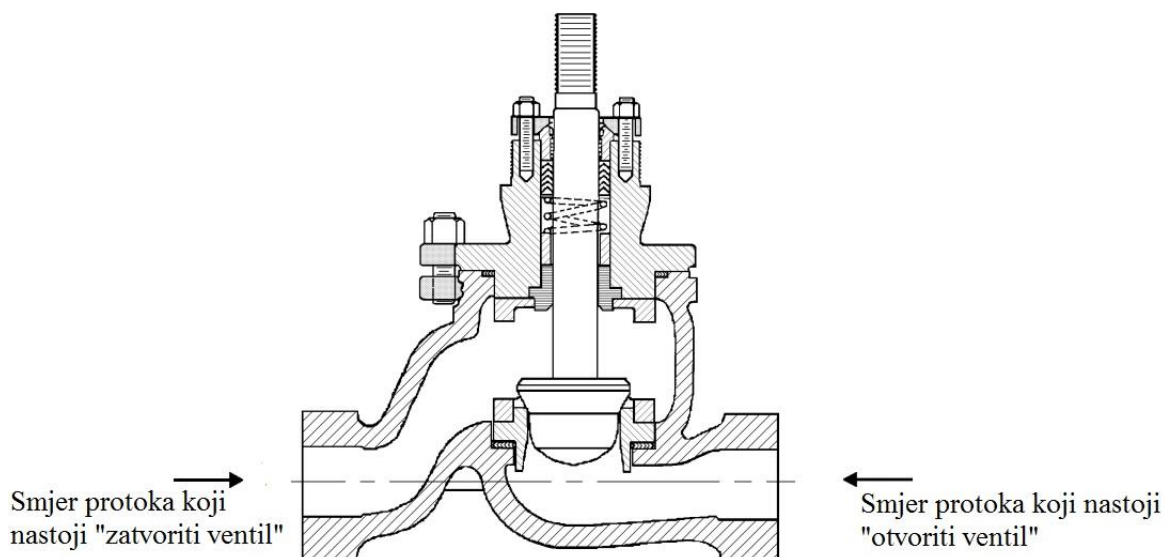
5.11. Tipične vrijednosti nekih faktora

Kako je već prije navedeno pojedini faktori su određeni standardiziranim eksperimentalnim putem od strane proizvođača, testiranjem različitih vrsta ventila. Tipične vrijednosti pojedinih faktora navedene su u *tablici 4* [1] i neke će biti korištene u ovom radu.

Valja napomenuti kako su ovo tipične vrijednosti, a točne vrijednosti proizvođači su dužni navesti za svaki pojedini ventil.

Pojmovi „*eng. flow direction: open/close*“ se koriste kad je gibanje zapornog elementa linearno i ukazuju na smjer strujanja medija gdje medij nastoji ili otvoriti ili zatvoriti zaporni element. Primjer pokazan na *slici 11*.

Pojmovi „*eng. flow direction: outward/inward*“ se koriste kad gibanje zapornog elementa nije linearno, a također ukazuju na smjer strujanja medija koji nastoji ili otvoriti (prema vani je smjer protoka) ili zatvoriti (prema unutra je smjer protoka) zaporni element.



Slika 11. Objašnjenje smjera strujanja medija [9]

Tablica 4. Tipične vrijednosti nekih faktora

Tip ventila	Tip pladnja	Smjer protoka	F_L	x_T	F_d
Regulacijski ventil,	3V izrez	Otvara ili zatvara	0,9	0,7	0,48
	4V izrez	Otvara ili zatvara	0,9	0,7	0,41
Jednosmjerni	6V izrez	Otvara ili zatvara	0,9	0,7	0,3
	Konturni pladanj (linearni i istopostotni)	Otvara	0,9	0,72	0,46
		zatvara	0,8	0,55	1,00
	Kavezni rupičasti, 60 rupa	Prema unutra ili prema vani	0,9	0,68	0,13
	Kavezni rupičasti, 120 rupa	Prema unutra ili prema vani	0,9	0,68	0,09
	Kavezni s 4 izreza	Prema unutra ili prema vani	0,9	0,75	0,41
0,85			0,7	0,41	

Tip ventila	Tip pladnja	Smjer protoka	F_L	x_T	F_d
Regulacijski ventil dvosmjerni	S izrezima	Ulaz između pladnja	0,9	0,75	0,28
	Konturni	Bilo koji smjer	0,85	0,7	0,32
Regulacijski kutni ventil	Linearni	Otvara	0,9	0,72	0,46
	konturni	Zatvara	0,8	0,65	1,00
	Kavezni s 4 izreza	Prema vani	0,9	0,65	0,41
		Prema unutra	0,85	0,6	0,41
Venturi	Zatvara	0,5	0,2	1,00	
Mikroventil	V izrez	Otvara	0,98	0,84	0,7
	Ravni pladanj	Zatvara	0,85	0,7	0,3
	Nazubljena igla	Otvara	0,95	0,84	$N_{19} \frac{(CF_L)^{0,5}}{D_o}$
Rotacioni	Ekscentrično sferični	Otvara	0,85	0,6	0,42
		Zatvara	0,68	0,4	0,42
	Ekscentrično konični	Otvara	0,77	0,54	0,44
		Zatvara	0,79	0,55	0,44
Leptirasti	Zakretanje od 70 stupnjeva	Bilo koji smjer	0,62	0,35	0,57
	Zakretanje od 60 stupnjeva	Bilo koji smjer	0,7	0,42	0,50
	Leptir s utorima zakretanje od 70 stupnjeva	Bilo koji smjer	0,67	0,38	0,30

Tip ventila	Tip pladnja	Smjer protoka	F_L	x_T	F_d
Leptirasti visokih performansi	Zakretanje od 70 stupnjeva	Bilo koji smjer	0,67	0,35	0,57
Kuglasti	Kugla s provrtom	Bilo koji smjer	0,74	0,42	0,99
	Kugla s izrezom	Bilo koji smjer	0,6	0,3	0,98

5.12. Dodatak za izvođenje faktora vrste ventila F_d

Faktor vrste ventila F_d definiran je kao omjer d_H/d_0 uz uvjete strujanja gdje je $C_i/d^2 > 0,016N_{18}$, i za taj slučaj može biti izveden koristeći sljedeću jednadžbu:

$$F_d = \frac{N_{26} \cdot v \cdot F_L^2 \cdot F_R^2 \cdot (C/d^2)^2 \cdot \sqrt{C \cdot F_L}}{Q \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}}} \quad (51),$$

ako je $C_i/d^2 \leq 0,016N_{18}$ faktor F_d iznosi:

$$F_d = \frac{N_{31} \cdot v \cdot F_L^2 \cdot F_R^2 \cdot \sqrt{C \cdot F_L}}{Q \cdot \left[1 + N_{32} \cdot \left(\frac{C}{d^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right]} \quad (52).$$

Vrijednosti numeričkih konstanti iz jednadžbe (51) i (52) navedene u tablici 5 [1].

Tablica 5. Vrijednosti numeričkih konstanti N ; dodatak

konstanta	K_v	Q	d	v
N_{23}	$1,96 \times 10^{-1}$	-	mm	-
N_{26}	$1,28 \times 10^7$	m^3/h	mm	m^2/s
N_{31}	$2,1 \times 10^4$	m^3/h	mm	m^2/s

Alternativni način računanja F_d je:

$$F_d = \frac{d_H}{d_0} \quad (53)$$

s tim da je hidraulični promjer d_H definiran kao:

$$d_H = \frac{4 \cdot A_0}{I_w} \quad (54),$$

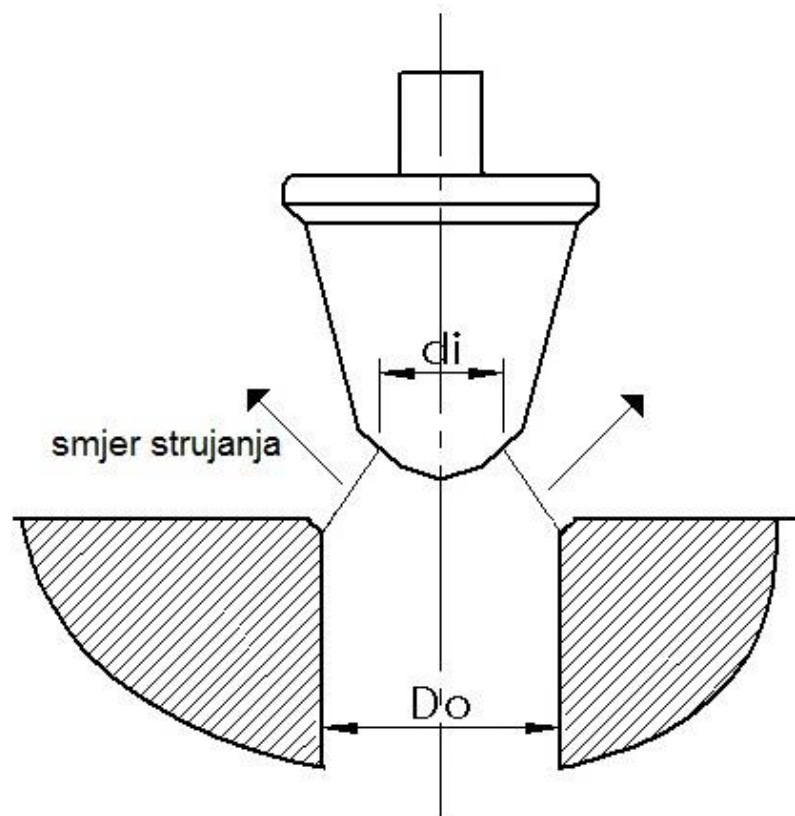
a ekvivalentni kružni promjer d_0 ukupne površine protoka:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot N_0 \cdot A_0}{\pi}} \quad (55).$$

Za ventil s konturnim pladnjem prikazan na *slici 12*. F_d se računa po jednadžbi (53),

a površina najužeg presjeka strujanja mlaza A_0 po jednadžbi (56).

$$A_0 = \frac{N_{23} \cdot C \cdot F_L}{N_0} \quad (56)$$



Slika 12. Primjer ventila s konturnim pladnjem

Kako je za navedeni ventil $N_0 = 1$ ekvivalentni kružni promjer je:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot N_{23} \cdot C \cdot F_L}{\pi}} \quad (57),$$

a hidraulični promjer:

$$d_H = \frac{4 \cdot A_0}{I_w} = \frac{4 \cdot N_{23} \cdot C \cdot F_L}{\pi \cdot (D_0 + d_i)} \quad (58).$$

Uvrštavanjem jednadžbi (57) i (58) u jednadžbu (53) se dobiva izraz za faktor vrste ventila F_d :

$$F_d = \frac{d_H}{d_0} = \frac{\left[\frac{4 \cdot N_{23} \cdot C \cdot F_L}{\pi \cdot (D_0 + d_i)} \right]}{\sqrt{\frac{4 \cdot N_{23} \cdot C \cdot F_L}{\pi}}} = \frac{1,13 \cdot \sqrt{N_{23} \cdot C \cdot F_L}}{D_0 + d_i} \quad (59)$$

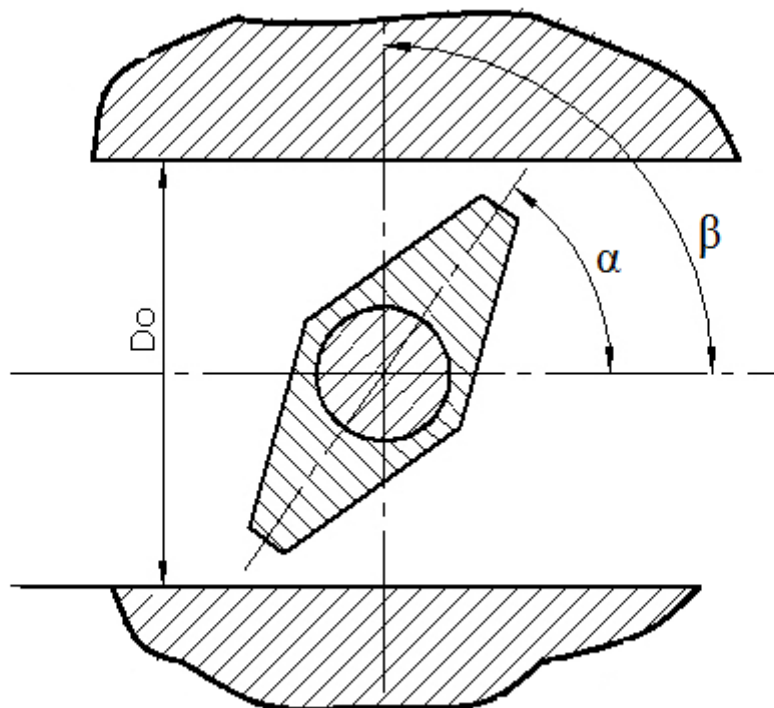
gdje d_i zavisi o koeficijentu protoka. Pretpostavlja se da je vrijednost d_i jednaka nuli ukoliko je ispunjen uvjet $N_{23} \cdot C \cdot F_L = D_0^2$ pri malim vrijednostima koeficijenta protoka C , $d_i \approx D_0$ stoga je i:

$$d_i = D_0 - \frac{N_{23} \cdot C \cdot F_L}{D_0} \quad (60),$$

$$F_d = \frac{1,13 \cdot \sqrt{N_{23} \cdot C \cdot F_L}}{2 \cdot D_0 - \frac{N_{23} \cdot C \cdot F_L}{D_0}} \quad (61).$$

Maksimalna vrijednost faktora vrste ventila F_d iznosi 1,0.

Za leptirasti ventil sa zakretnim elementom prikazan na slici 13



Slika 13. Leptirasti ventil sa zakretnim elementom

efektivni promjer je pretpostavljen kao hidraulični promjer jednog od dva mlaza koji proizlazi iz područja protoka između zapornog elementa i tijela ventila, stoga je $N_0=2$.

Koeficijent protoka C pri prigušenom strujanju tada iznosi:

$$N_{23} \cdot C \cdot F_L = \frac{0,125 \cdot \pi \cdot D_0^2 \cdot (\mu_1 + \mu_2) \cdot \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\sin \beta} \right)}{\zeta_{B1}} \quad (62),$$

uz pretpostavku $\zeta_{B1}=1$ dolazi se do vrijednosti $\mu_1=0,7$ i $\mu_2=0,7$ a zamjenom jednadžbe (56) u (62) dobiva se sljedeća jednadžba:

$$A_0 = \frac{0,55 \cdot D_0^2 \cdot \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\sin \beta} \right)}{N_0} \quad (63).$$

Kako je za ovakvu vrstu ventila $\beta = 90^\circ$ jednadžba (63) postaje:

$$A_0 = \frac{0,55 \cdot D_0^2 \cdot (1 - \sin \alpha)}{N_0} \quad (64).$$

Međutim uzimajući u obzir postojanje dva jednaka područja protoka u paraleli jednadžba (64) prelazi u (65) a izrazi za d_0 i d_H u jednadžbe (66) i (67):

$$A_0 = 0,275 \cdot D_0^2 \cdot (1 - \sin \alpha) \quad (65)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_0 \cdot N_0}{\pi}} = 0,837 \cdot D_0 \cdot \sqrt{1 - \sin \alpha} \quad (66)$$

$$d_H = \frac{4 \cdot A_0}{0,59 \cdot D_0 \cdot \pi} = 0,59 \cdot D_0 \cdot (1 - \sin \alpha) \quad (67)$$

NAPOMENA: vrijednost $0,59 \cdot D_0 \cdot \pi$ je uzeta kao I_w , stoga jednadžba (68) prelazi u jednadžbu (69):

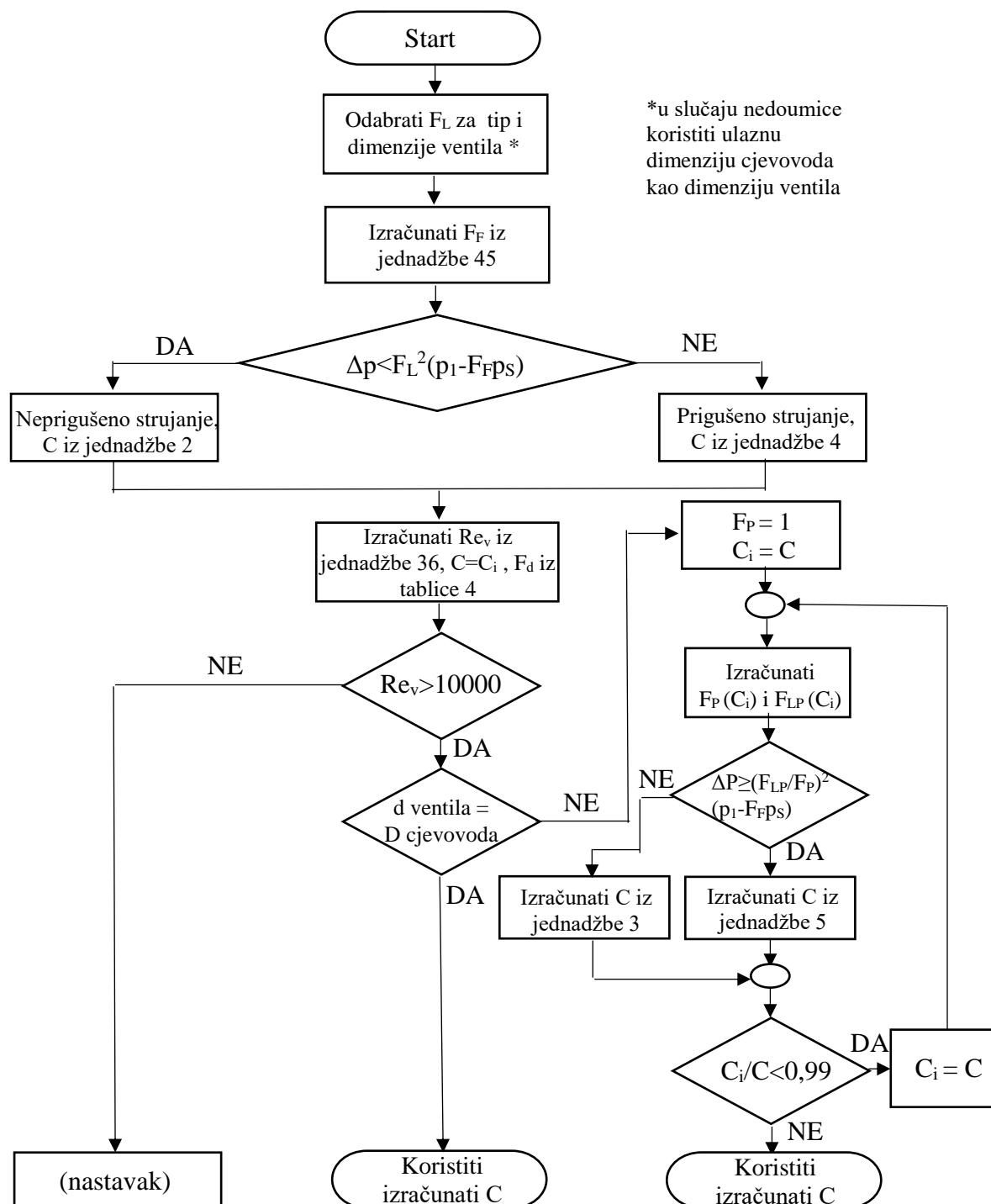
$$F_d = \frac{d_H}{d_0} \quad (68).$$

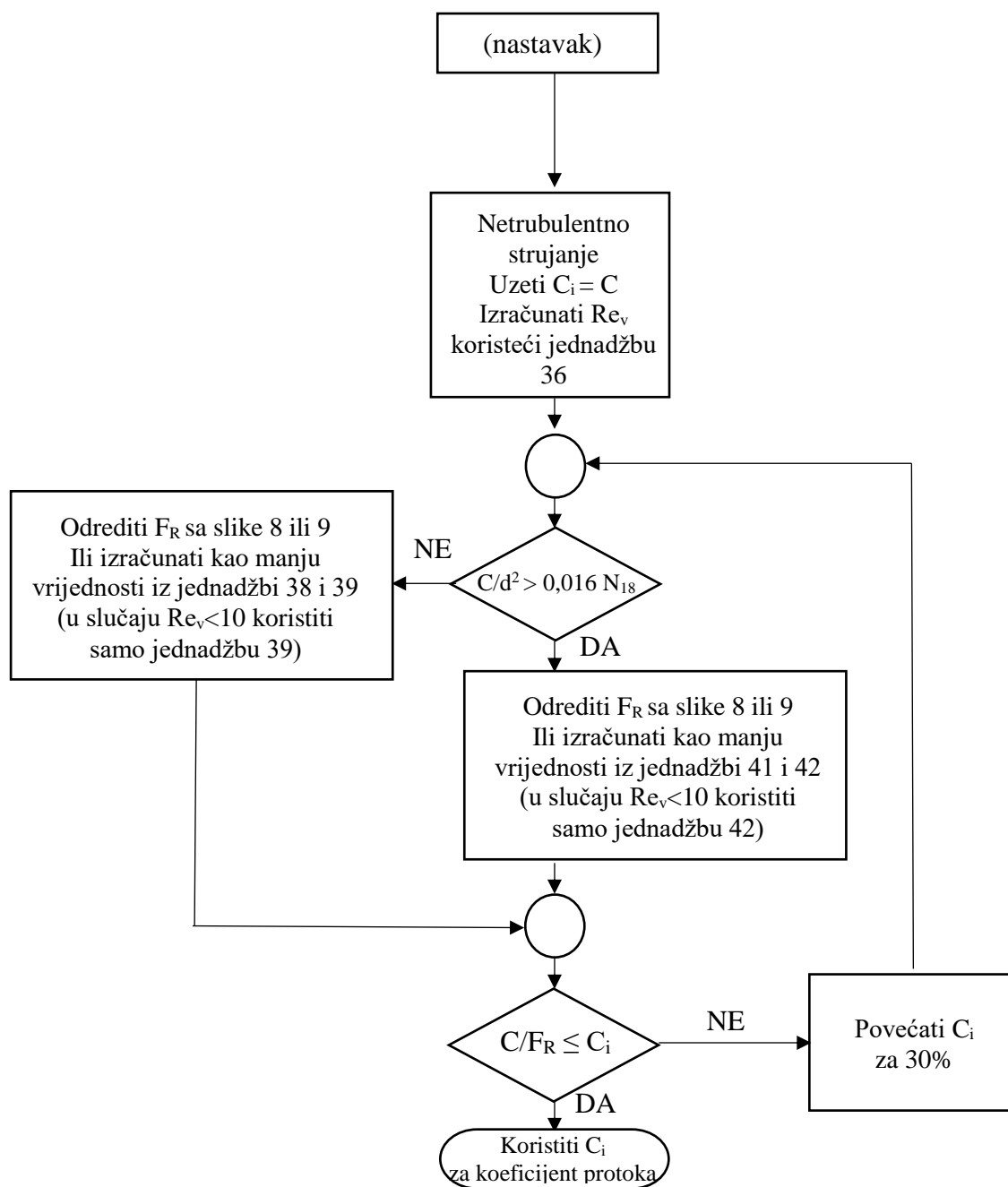
$$F_d = 0,7 \cdot \sqrt{1 - \sin \alpha} \quad (69)$$

6. PRORAČUN

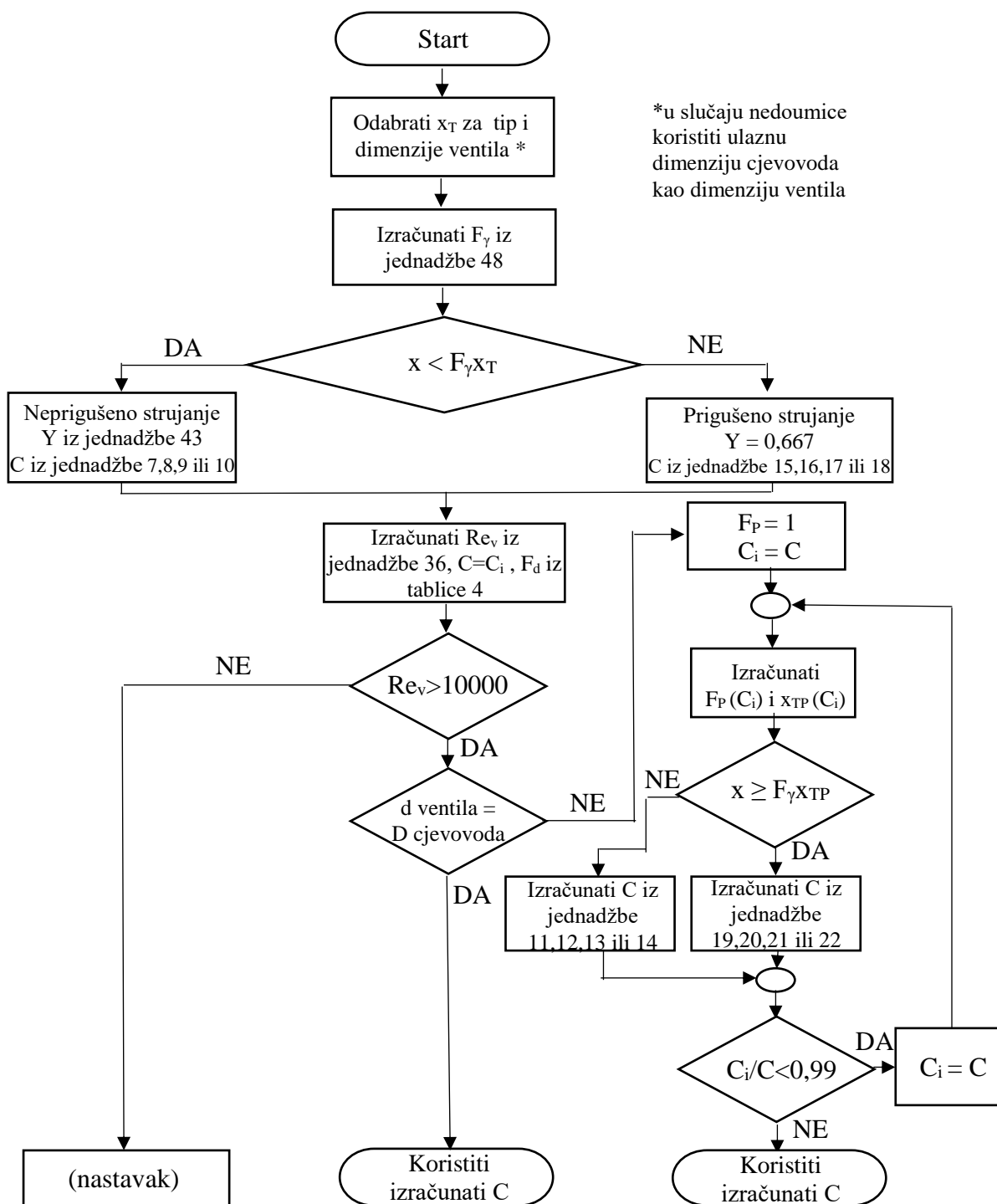
Po algoritmu predočenom u potpoglavlju 6.1. temeljenom na jednadžbama iz poglavlja 4. i faktorima i koeficijentima navedenim u poglavlju 5. provest će se proračun koeficijenta protoka za dimenzioniranje regulacijskih ventila. U tu svrhu korišten je programski paket „SMath Studio“, a rezultati su prikazani u *tablici 7*.

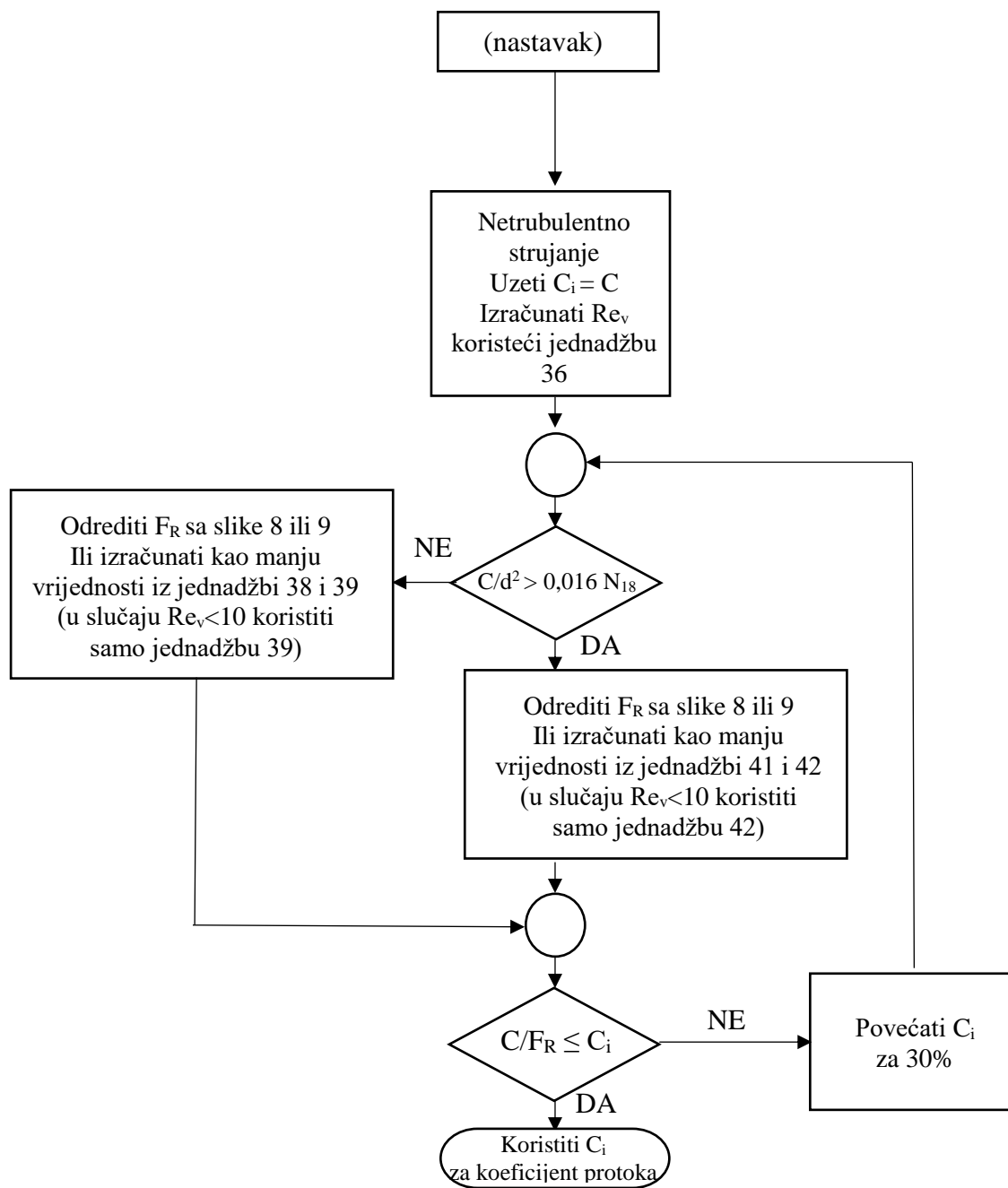
6.1. Algoritam računanja koeficijenta protoka nestlačivih fluida





6.2. Algoritam računanja koeficijenta protoka stlačivih fluida





6.3. Dimenzije cjevovoda i brzina strujanja

U okviru zadatka diplomskog rada zadan je protok vode od $2000 \text{ kg} / \text{m}^3$ pa je temeljem toga potrebno odrediti dimenzije cjevovoda. Postoje preporuke za brzine strujanja vode [10] prikazane u *tablici 6*.

Tablica 6. Preporučene brzine strujanja u vodovima

VRSTA VODA	BRZINA VODE [m/s]
Kućni priključci	1,0 – 2,5
Razvodni vodovi	1,0 – 2,0
Vertikale	1,0 – 2,0
Grane i ogranci	1,0 – 2,5
Vertikale u javnim objektima	0,5 – 0,7
Cirkulacijski vodovi s toplom vodom	0,2 – 0,4

Kako je u okviru diplomskog rada područje primjene industrija, šumovi i vibracije koji nastaju pri većim brzinama strujanja nisu od velikog značaja, shodno tome brzine strujanja biraju se u području od 3 do 6 m/s.

Koristeći jednadžbu:

$$Q = v \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4} ; \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \cdot \left[\text{m}^2 \right] \quad (70)$$

$Q = 2/3600 \text{ [m}^3/\text{s]}$ – volumni porotok i

$v = 3-6 \text{ [m/s]}$ – brzina strujanja fluida,

računanjem dolazimo do raspona od 11-15 mm koji nam odgovara za promjer cjevovoda s obzirom na količinu protoka i moguće brzine strujanja. Uvrštavanjem u algoritam računanja izrađen u programskom paketu „SMath Studio“, za količinu protoka i sve ostale parametre zadane u okviru diplomskog rada, ovaj raspon promjera cjevovoda ne igra nikakvu ulogu. Shodno tome, uzima se promjer cjevovoda u iznosu od 15 mm za brzinu od 3 m/s.

6.4. Minimalni koeficijent protoka $K_{v \text{ min}}$

$$K_{v \text{ min}} = Q \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{K_v} \cdot \rho}{\Delta p \cdot \rho_w}} \quad (71)$$

$Q = 2 \text{ [m}^3/\text{h]}$ – volumni protok

$\Delta p_{KV} = 1$ [bar] – pad tlaka od 1 bar

ρ/ρ_w [-] – omjer gustoće fluida i gustoće vode u navedenim rasponima temperature (5°C do 40°C)

$\Delta p = p_1 - p_2 = 92 - 30 = 62$ [bar] – razlika između ulaznog i izlaznog apsolutnog tlaka

$$K_{V\min} = Q \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{KV}}{\Delta p} \cdot \frac{\rho}{\rho_w}} = \frac{Q}{\Delta p} = \frac{2}{\sqrt{62}} = 0,25 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (72)$$

$K_{V\min} = 0,25$ [m³/h]

6.5. Ulazni podaci

Ulazni podaci diplomskog zadatka:

medij je voda,

smjer strujanja medija je u smjeru otvaranja ventila,

$p_1 = 92$ [bar],

$p_2 = 30$ [bar],

$T_1 = 358,15$ [K],

$Q = 2$ [m³/h].

Veličine određene u ovisnosti o ulaznim podacima:

$d = D = 15$ [mm],

$p_k = 221,2$ [bar],

$p_s = 0,57867$ [bar],

$v = 3,3637 \times 10^{-7}$ [m²/s],

$\rho_0 = 999,1$ [kg/m³],

$\rho_1 = 968,62$ [kg/m³].

Ostale vrijednosti mogu se pronaći u odgovarajućim tablicama točno navedenim u programskom kodu u prilogu. Na primjer vrijednosti numeričkih konstanti ili tipične vrijednosti nekih faktora s obzirom na vrstu ventila i oblik zapornog elementa.

Za slučaj jednosmjernog regulacijskog ventila čiji je zaporni element konturni pladanj (linearni i istopostotni) dva navedena faktora očitanih iz *tablice 4* iznose:

$F_L = 0,9$ i

 $F_d=0,46$.

6.6. Dobiveni podaci

Za navedeni primjer u poglavlju 6.5. koji se odnosi na ulazne podatke, uvrštavanjem parametara u program „Smath Studio“ postupak računanja koeficijenta protoka K_v vidljiv je na slici 14 i iznosi:

 $K_v=0,2501 \text{ [m}^3\text{/h]}.$

U tablici 7 nalaze se još neke vrijednosti koeficijenta protoka za različitu vrstu ventila i zapornog elementa. Pri različitim vrstama ventila i zapornih elemenata dolazi do promjena u ulaznim podacima u vidu dva faktora F_L i F_d .

IZRAČUN KOEFICIJENTA PROTOKA Kv

ULAZNI PODACI

NUMERIČKE KONSTANE

PODACI O VENTILU

PODACI O FLUIDU

$p_1 = 92 \text{ bar}$ apsolutni ulazni tlak

$p_2 = 30 \text{ bar}$ apsolutni izlazni tlak

$T_1 = 368,15 \text{ K}$ apsolutna ulazna temperatura

$Q = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$ volumni protok

$D = 15 \text{ mm}$ nazivni promjer cjevovoda

$F_L = 0,9$ faktor regeneracije fluida pod tlakom ventila bez s.e. (tablica 4)

$F_d = 0,46$ faktor vrste ventila (tablica 4)

$x_T = 0,72$ faktor omjera tlakova ventila bez s.e. (tablica 4)

numeričke konstante N

izračun koeficijenta protoka za nestlačive fluide kroz ventil bez

spojnih elemenata

$p_k = 221,2 \text{ bar}$ termodinamički kritični tlak

$p_s = 0,57867 \text{ bar}$ tlak zasićenja

$\rho_1 = 968,62 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ gustoća fluida pri ulaznom tlaku i temperaturi

$\rho_0 = 999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ gustoća fluida pri temperaturi od 288,15 K

$\nu = 3,3637 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ kinematska viskoznost

$$F_F = 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{p_s}{p_k}} = 0,9457 \quad \text{jednadžba (45)}$$

$$C = \text{if } F_L^2 \cdot (p_1 - F_F \cdot p_s) > (p_1 - p_2)$$

$$\frac{Q}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \frac{1}{p_1 - p_2}} \quad \text{jednadžba (2)}$$

$$\text{else} \quad \frac{Q}{N_1 \cdot F_L} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \frac{1}{p_1 - F_F \cdot p_s}} \quad \text{jednadžba (4)}$$

$$C = 0,2501 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \cdot \frac{1}{4}$$

$$\text{Re}_V = \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\nu \cdot \sqrt{C \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} = 4,0765 \cdot 10^5 \quad \text{jednadžba (36)}$$

$K_V = \text{if } \text{Re}_V > 10000$

C
 else
 "nastavi računati s Ci (C uvećan za 30%)"

$$K_V = 0,2501 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Slika 14. Provedeni proračun u SMath Studiu

Tablica 7. Vrijednosti koeficijena protoka K_v

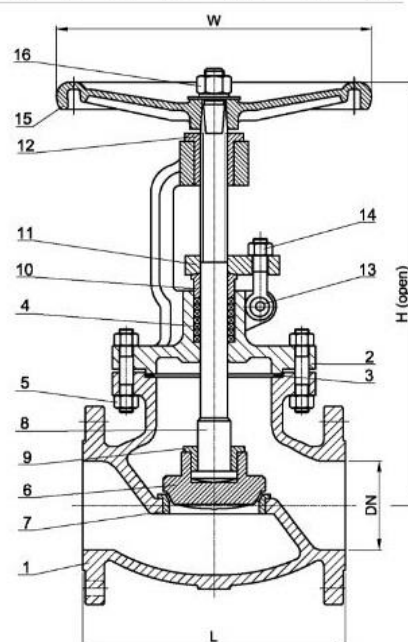
Vrsta ventila	Zaporni element	Koeficijent protoka K_v
Regulacijski ventil, jednosmjerni	Konturni pladanj (linearni i istopostotni)	0,2501
Regulacijski ventil, dvosmjerni	S izrezima	0,2501
Rotacioni	Ekscentrični konični	0,2674

Odabran je ventil:

DIN GLOBE VALVE F1 SERIES

Type: OMV-GLV-F1-PN25

DIMENSIONS																				
Size	mm	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	3	0	350	400	500	600
L	mm	130	150	160	180	200	230	290	310	350	400	480	600	730	850	980	1100	1250	1450	
H	mm	240	260	276	285	300	325	363	415	453	505	556	744	864	948	1269	1450	1760	2105	
W	mm	120	140	160	160	180	200	200	250	300	350	400	450	500	550	600	600	600	600	
Weight	kg	6	7,5	8	9	14	22	27	38	55	82	105	220	450	660	810	1100	1460	1865	
Item	Description	Part name	Material																	
1	Body		GP240GH - 1.0619																	
2	Bonnet		GP240GH - 1.0619																	
3	Gasket		Spral Wound / Soft Iron																	
4	Gland Packing		Graphite																	
5	Bolt & Nut		25CrMo4 / C45E																	
6	Disc		X17CrNi16-2																	
7	Seat Ring																			
8	Stem		Stainless Steel																	
9	Disc Nut		CS + SS / S5 / SS + Stl																	
10	Gland		Stainless Steel																	
11	Gland Flange		GP240GH (equivalent to body material)																	
12	Stem Nut		C45E																	
13	Pin		Carbon steel / SS																	
14	Gland Eyebolt & Nut		25CrMo4 / C45E																	
15	Handwheel		Malleable Iron / Cast steel / Ductile Iron / Fabricated steel																	
16	Handwheel Nut		C45E																	



Slika 15. Odabrani ventil [11].

7. ZAKLJUČAK

Pravilno konstruiranje je iterativna metoda. Za dobro konstruiranje i pravilno konstruiran proizvod potrebno je poznavanje jako puno elemenata koji vrlo često nisu dostupni. Stoga se prilikom predviđanja i odlučivanja u kojem smjeru krenuti koriste do tog trenutka poznati podaci i rezultati eksperimentalnih ili testnih mjerenja. U okviru zadatka diplomskog rada prikazan je algoritam za računanje koeficijenta protoka kako stlačivih tako i nestlačivih fluida. Korišteni su podaci o ventilima dobiveni mjerenjem tipičnih vrsta ventila s tipičnim vrstama zapornih elemenata. Daljni smjer, to jest nastavak na ovaj diplomski rad, bio bi modeliranje i izrada nekog od ventila za kojeg je izračunat koeficijent protoka. Zatim mjerenje po strogo definiranoj normi svih navedenih faktora koji su prilikom računanja uzeti iz tablice, usporedba istih i navođenje eventualnih odstupanja.

LITERATURA

- [1] ISA: Flow Equations for Sizing Control Valves (IEC 60543-2-1 Mod), USA, 2007
- [2] Virag Z., Šavar M., Džijan I.: Mehanika fluida I, skripta-predavanja, Zagreb, 2014.
- [3] http://www.samsoncontrols.com/sites/default/files/KGT_1.png
(zadnji pristup 17.01.2017.)
- [4] http://www.hubluxe.com/img/products/valves/globe_sectional_cut.png
(zadnji pristup 17.01.2017.)
- [5] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/Butterfly-valve--The-Alloy-Valve-Stockist.JPG>
(zadnji pristup 17.01.2017.)
- [6] N. N.: Control Valve Handbook, Fisher Controls International LLC, Emerson, Process Management, 2005, 283 pp., Fourth ed.;www.EmersonProcess.com/Fisher, prosinac 2016. (zadnji pristup 17.01.2017.)
- [7] N.N.: 8.predavanje, Turbulentno strujanje, FSB
https://www.fsb.unizg.hr/zbrodo/pokus/upload/others/8_MFIIB.pdf
(zadnji pristup 17.01.2017.)
- [8] N.N.:Flow in pipes, chapter 8 , pages 321-343
https://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MEK4450/h11/undervisningsmateriale/modul-5/Pipeflow_intro.pdf
(zadnji pristup 17.01.2017.)
- [9] Cashco: Basic operation and function of control valves
- [10] N.N.: Instalacije zgrada, Proračun vodovoda,
<https://www.fsb.unizg.hr/termolab/nastava/IZ-Proracun%20vodovoda-v02.pdf>
(zadnji pristup 17.01.2017.)
- [11] www.omv-indoil.hr/ventili
(zadnji pristup 17.01.2017.)
- [12] N. N.: Handbook for Control Valve Sizing, Parcol
- [13] Jauschowetz R.:Sustavi toplovodnog grijanja, Hidraulika;Beč, 2004

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Programski kod „SMath Studio“

IZRAČUN KOEFICIJENTA PROTOKA Kv

ULAZNI PODACI

NUMERIČKE KONSTANE

PODACI O VENTILU

PODACI O FLUIDU

$p_1 := 92 \text{ bar}$ apsolutni ulazni tlak

$p_2 := 30 \text{ bar}$ apsolutni izlazni tlak

$T_1 := 368,15 \text{ K}$ apsolutna ulazna temperatura

$Q := 2 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$ volumni protok

$D := 15 \text{ mm}$ nazivni promjer cjevovoda

$F_L := 0,9$ faktor regeneracije fluida pod tlakom ventila bez s.e. (tablica 4)

$F_d := 0,46$ faktor vrste ventila (tablica 4)

$x_T := 0,72$ faktor omjera tlakova ventila bez s.e. (tablica 4)

numeričke konstante N



$$N_1 := 1 \cdot (\sqrt{\text{bar}})^{-1}$$

sve vrijednosti N očitane su iz tablice 3

$$N_2 := 0,0016 \frac{\text{m}^6}{\text{hr}^2 \text{ mm}^4}$$

$$N_4 := 0,0707 \cdot \frac{\frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{\sqrt{\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}}$$

$$N_5 := 0,0018 \frac{\text{m}^6}{\text{hr}^2 \text{ mm}^4}$$

$$N_6 := 31,6 \cdot \frac{kg \cdot m^{-\frac{3}{2}}}{\sqrt{bar \cdot kg}}$$

sve vrijednosti N očitane su iz tablice 3

$$N_7 := 482 \cdot \frac{\sqrt{K}}{bar}$$

$$N_8 := 110 \cdot \frac{kg^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{K \cdot kmol}}{m^3 \cdot bar}$$

$$N_9 := 2460 \cdot \frac{\sqrt{kg \cdot K}}{bar \cdot \sqrt{kmol}}$$

$$N_{18} := 0,865 \cdot \frac{m^3}{hr^2 \cdot mm}$$

$$N_{19} := 2,5 \cdot \frac{mm \cdot \sqrt{hr}}{\sqrt{m^3}}$$

$$N_{22} := 1730 \cdot \frac{\sqrt{kg \cdot K}}{bar \cdot \sqrt{kmol}}$$

$$N_{27} := 77,5 \cdot \frac{kg^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{K \cdot kmol}}{m^3 \cdot bar}$$

$$N_{32} := 1,4 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{hr \cdot mm^2}{m^3} \right)^{\frac{2}{3}}$$

izračun koeficijenta protoka za nestlačive fluide kroz ventil bez

spojnih elemenata

□

$p_k := 221,2 \text{ bar}$ termodinamički kritični tlak

$p_s := 0,57867 \text{ bar}$ tlak zasićenja

$\rho_1 := 968,62 \frac{kg}{m^3}$ gustoća fluida pri ulaznom tlaku i temperaturi

$$\rho_0 := 999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{gustoća fluida pri temperaturi od } 288,15 \text{ K}$$

$$\nu := 3,3637 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{kinematska viskoznost}$$

$$F_F := 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{p_S}{p_K}} = \blacksquare \quad \text{jednadžba (45)}$$

$$C := \text{if } F_L^2 \cdot (p_1 - F_F \cdot p_S) > (p_1 - p_2) \\ \frac{Q}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - p_2}} \quad \text{jednadžba (2)}$$

$$\text{else} \\ \frac{Q}{N_1 \cdot F_L} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - F_F \cdot p_S}} \quad \text{jednadžba (4)}$$

$$C = \blacksquare \frac{\text{m}}{\text{hr}}^3 \\ \text{Re}_V := \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\nu \cdot \sqrt{C \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} = \blacksquare \quad \text{jednadžba (36)}$$

$$K_V := \text{if } \text{Re}_V > 10000 \\ C \\ \text{else} \\ \text{"nastavi računati s } C_i \text{ (C uvećan za 30\%)"}$$

$$K_V = \blacksquare \frac{\text{m}}{\text{hr}}^3 \\ C_i := 1,3 \cdot C = \blacksquare \frac{\text{m}}{\text{hr}}^3 \quad \text{jednadžba (34)}$$

$$\text{Re}_{V2} := \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\nu \cdot \sqrt{C_i \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C_i^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{jednadžba (36)}$$

$$F_{R1} := \text{if} \left(\frac{C_i}{D} \geq 0,016 \cdot N_{18} \right) \wedge (Re_{V2} \geq 10) \\ 1 + \frac{0,33 \cdot F_L^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{N_2}{\frac{C_i}{D}} \right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \log_{10} \left(\frac{Re_{V2}}{10000} \right) \quad \text{jednadžba (38)}$$

$$\text{else} \\ 1 + \frac{0,33 \cdot F_L^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + N_{32} \cdot \left(\frac{C_i}{D} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \log_{10} \left(\frac{Re_{V2}}{10000} \right) \quad \text{jednadžba (41)}$$

$$F_{R2} := \text{if} \left(\frac{C_i}{D} \geq 0,016 \cdot N_{18} \right) \wedge (Re_{V2} \geq 10) \\ \frac{0,026}{F_L} \cdot \sqrt{\left(\frac{N_2}{\frac{C_i}{D}} \right) \cdot Re_V} \quad \text{jednadžba (39)}$$

$$\text{else} \\ \frac{0,026}{F_L} \cdot \sqrt{\left(1 + N_{32} \cdot \left(\frac{C_i}{D} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot Re_V} \quad \text{jednadžba (42)}$$

$$F_{R3} := \text{if} F_{R1} \leq F_{R2} \\ F_{R1} \\ \text{else} \\ F_{R2}$$

$$F_R := \text{if} F_{R3} < 1 \\ F_{R3} \\ \text{else} \\ 1$$

$$K_{Vi} := \begin{cases} \frac{C}{F_R} \leq C_i \\ C_i \\ \text{else} \\ \text{"povećaj } C_i \text{ za još 30\%"} \end{cases}$$

$$K_{Vi} = \left(\frac{m}{hr} \right)^3$$

izračun koeficijenta protoka za nestlačive fluide kroz ventil sa spojnim elementima

$p_k := 221,2 \text{ bar}$ termodinamički kritični tlak

$p_s := 0,57867 \text{ bar}$ tlak zasićenja

$\rho_1 := 968,62 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ gustoća fluida pri ulaznom tlaku i temperaturi

$\rho_0 := 999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ gustoća fluida pri temperaturi od 288,15 K

$\nu := 3,3637 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ kinematska viskoznost

$d := \text{mm}$ nazivni promjer ventila

$D_1 := \text{mm}$ promjer cjevovoda na ulazu u ventil

$D_2 := \text{mm}$ promjer cjevovoda na izlazu iz ventila

$$\zeta_1 := 0,5 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 \right)^2 = \blacksquare \quad \text{jednadžba (31)}$$

$$\zeta_2 := 1 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^2 \right)^2 = \blacksquare \quad \text{jednadžba (32)}$$

$$\zeta_{B1} := 1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^4 = \blacksquare \quad \text{jednadžba (29)}$$

$$\zeta_{B2} := 1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^4 = \blacksquare \quad \text{jednadžba (30)}$$

$$\zeta := \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_{B1} - \zeta_{B2} = \blacksquare \quad \text{jednadžba (27)}$$

$$F_F := 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{p_s}{p_k}} = \blacksquare \quad \text{jednadžba (45)}$$

$$C := \text{if } F_L^2 \cdot (p_1 - F_F \cdot p_s) > (p_1 - p_2) \cdot \frac{Q}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0}} \cdot \frac{1}{p_1 - p_2} \quad \text{jednadžba (2)}$$

else

$$\frac{Q}{N_1 \cdot F_L} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0}} \cdot \frac{1}{p_1 - F_F \cdot p_s} \quad \text{jednadžba (4)}$$

$$C = \blacksquare \frac{m}{hr}^3$$

$$\text{Re}_V := \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\nu \cdot \sqrt{C \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} = \blacksquare \quad \text{jednadžba (36)}$$

$$C_i := \text{if } \text{Re}_V > 10000$$

C

else

"zanemariv utjecaj spojnih elemenata, računati po obrascu bez njih"

$$C_i = \blacksquare \frac{m}{hr}^3$$

$$F_P := 1$$

$$F_{LP} := \frac{F_L}{\sqrt{1 + \frac{F_L^2}{N_2} \cdot (\zeta_1 + \zeta_{B1}) \cdot \left(\frac{C_i}{d} \right)^2}} = \blacksquare \quad \text{jednadžba (44)}$$

$$C_{i2} := \text{if } (p_1 - p_2) \geq (p_1 - F_F \cdot p_S) \cdot \left(\frac{F_{LP}}{F_P} \right)^2$$

$$\frac{Q}{N_1 \cdot F_{LP}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - F_F \cdot p_S}}$$

jednadžba (5)

else

$$\frac{Q}{N_1 \cdot F_P} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - p_2}}$$

jednadžba (3)

$$C_{i2} = \frac{m^3}{hr}$$

$$K_V := \text{if } \frac{C_{i2}}{C} < 0,99$$

"nastavi računati Fp"

else

$$C_{i2}$$

$$K_V = \frac{m^3}{hr}$$

$$F_{Pi} := \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\zeta}{N_2} \cdot \left(\frac{C_i}{d^2} \right)^2}} =$$

jednadžba (26)

$$C_{i3} := \text{if } (p_1 - p_2) \geq (p_1 - F_F \cdot p_S) \cdot \left(\frac{F_{LP}}{F_{Pi}} \right)^2$$

$$\frac{Q}{N_1 \cdot F_{LP}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - F_F \cdot p_S}}$$

jednadžba (5)

else

$$\frac{Q}{N_1 \cdot F_{Pi}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - p_2}}$$

jednadžba (3)

$$K_{Vi} := \text{if } \frac{C_{i3}}{C} < 0,99$$

"vratiti se na gornji korak i povećati C_i za 30%"

else

$$C_{i3}$$

$$K_{Vi} = \frac{m}{hr}^3$$

izračun koeficijenta protoka za stlačive fluide kroz ventil bez

spojnih elemenata

$$W := \frac{kg}{hr}$$

maseni protok

$$\rho_1 := 968,62 \frac{kg}{m^3}$$

gustoća fluida pri ulaznom tlaku i temperaturi

$$\nu := 3,3637 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

kinematska viskoznost

$$M := \frac{kg}{kmol}$$

molekularna masa (tablica 2)

$$\kappa :=$$

izentropski eksponent (tablica 2)

$$F_Y := \frac{\kappa}{1,4}$$

jednadžba (48)

$$x := \frac{P_1 - P_2}{P_1}$$

$$Y := \text{if } (x) < (F_Y \cdot x_T)$$

$$1 - \frac{x}{3 \cdot F_Y \cdot x_T}$$

jednadžba (46)

else

$$0,667$$

$$Y =$$

$$C := \text{if } (x) < (F_Y \cdot x_T)$$

$$\frac{W}{N_6 \cdot Y \cdot \sqrt{x \cdot P_1 \cdot \rho_1}}$$

jednadžba (7)

else

$$\frac{W}{0,667 \cdot N_6 \cdot \sqrt{F_Y \cdot x_T \cdot P_1 \cdot \rho_1}} \quad \text{jednadžba (15)}$$

$$C = \frac{m}{hr}^3$$

$$Re_V = \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\nu \cdot \sqrt{C \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} = \quad \text{jednadžba (36)}$$

$$K_V = \text{if } Re_V > 10000$$

C

else

"nastavi računati s Ci (C uvećan za 30%)"

$$K_V = \frac{m}{hr}^3$$

$$C_i = 1,3 \cdot C = \frac{m}{hr}^3 \quad \text{jednadžba (34)}$$

$$Re_{V2} = \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\nu \cdot \sqrt{C_i \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C_i^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{jednadžba (36)}$$

$$F_{R1} = \text{if } \left(\frac{C_i}{D} \geq 0,016 \cdot N_{18} \right) \wedge (Re_{V2} \geq 10)$$

$$1 + \frac{0,33 \cdot F_L^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{N_2}{\frac{C_i}{D}} \right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \log_{10} \left(\frac{Re_{V2}}{10000} \right) \quad \text{jednadžba (38)}$$

else

$$1 + \frac{0,33 \cdot F_L \cdot \frac{1}{2}}{\left(1 + N_{32} \cdot \left(\frac{C_i}{D}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \log_{10} \left(\frac{Re_{V2}}{10000} \right) \quad \text{jednadžba (41)}$$

$$F_{R2} := \text{if} \left(\frac{C_i}{D} \geq 0,016 \cdot N_{18} \right) \wedge (Re_{V2} \geq 10) \\ \frac{0,026}{F_L} \cdot \sqrt{\frac{N_2}{\frac{C_i}{D}}} \cdot Re_V$$

jednadžba (39)

else

$$\frac{0,026}{F_L} \cdot \sqrt{\left(1 + N_{32} \cdot \left(\frac{C_i}{D}\right)^{\frac{2}{3}}\right)} \cdot Re_V \quad \text{jednadžba (42)}$$

$$F_{R3} := \text{if} \quad F_{R1} \leq F_{R2}$$

$$F_{R1}$$

else

$$F_{R2}$$

$$F_R := \text{if} \quad F_{R3} < 1$$

$$F_{R3}$$

else

$$1$$

$$K_{Vi} := \text{if} \quad \frac{C}{F_R} \leq C_i$$

$$C_i$$

else

"povećaj Ci za još 30%"

$$K_{Vi} = \frac{m}{hr}^3$$

izračun koeficijenta protoka za stlačive fluide kroz ventil sa

spojnim elementima

$$W := \frac{kg}{hr} \quad \text{maseni protok}$$

$$\rho_1 := 968,62 \frac{kg}{m^3} \quad \text{gustoća fluida pri ulaznom tlaku i temperaturi}$$

$$\nu := 3,3637 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad \text{kinematska viskoznost}$$

$$M := \frac{kg}{kmol} \quad \text{molekularna masa (tablica 2)}$$

$$\kappa := \quad \text{izentropski eksponent (tablica 2)}$$

$$d := mm \quad \text{nazivni promjer ventila}$$

$$D_1 := mm \quad \text{promjer cjevovoda na ulazu u ventil}$$

$$D_2 := mm \quad \text{promjer cjevovoda na izlazu iz ventila}$$

$$\zeta_1 := 0,5 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 \right)^2 = \quad \text{jednadžba (31)}$$

$$\zeta_2 := 1 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^2 \right)^2 = \quad \text{jednadžba (32)}$$

$$\zeta_{B1} := 1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^4 = \quad \text{jednadžba (29)}$$

$$\zeta_{B2} := 1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^4 = \quad \text{jednadžba (30)}$$

$$\zeta := \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_{B1} - \zeta_{B2} = \quad \text{jednadžba (27)}$$

$$F_V := \frac{\kappa}{1,4} \quad \text{jednadžba (48)}$$

$$x := \frac{p_1 - p_2}{p_1}$$

$$Y := \text{if } (x) < (F_V \cdot x_T) \\ 1 - \frac{x}{3 \cdot F_V \cdot x_T} \quad \text{jednadžba (46)} \\ \text{else} \\ 0,667$$

Y = ■

$$C := \text{if } (x) < (F_V \cdot x_T) \\ \frac{W}{N_6 \cdot Y \cdot \sqrt{x \cdot p_1 \cdot \rho_1}} \quad \text{jednadžba (7)} \\ \text{else}$$

$$\frac{W}{0,667 \cdot N_6 \cdot \sqrt{F_V \cdot x_T \cdot p_1 \cdot \rho_1}} \quad \text{jednadžba (15)}$$

$$C = \frac{m}{hr}$$

$$\text{Re}_V = \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{u \cdot \sqrt{C \cdot F_L}} \cdot \left(\frac{F_L^2 \cdot C^2}{N_2 \cdot D^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} = \quad \text{jednadžba (36)}$$

$$C_i := \text{if } \text{Re}_V > 10000 \\ C \\ \text{else}$$

"zanemariv utjecaj spojnih elemenata, računati po obrascu bez njih"

$$C_i = \frac{m}{hr}$$

$$F_P := 1$$

$$x_{TP} = \frac{\frac{x_T}{2}}{F_P} \cdot \left(\frac{C_i}{d} \right)^2 = \quad \text{jednadžba (47)}$$

$$\left(1 + \frac{x_T \cdot (\zeta_1 + \zeta_{B1})}{N_5} \right) \cdot \left(\frac{C_i}{d} \right)^2$$

$$C_{i2} := \text{if } (p_1 - p_2) \geq (p_1 - F_{FP} \cdot p_S) \cdot \left(\frac{F_{LP}}{F_P} \right)^2$$

$$\frac{Q}{N_1 \cdot F_{LP}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - F_{FP} \cdot p_S}}$$

jednadžba (5)

else

$$\frac{Q}{N_1 \cdot F_P} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{p_1 - p_2}}$$

jednadžba (3)

$$C_{i2} = \frac{m}{hr}^3$$

$$K_V = \text{if } \frac{C_{i2}}{C} < 0,99$$

"nastavi računati Fpi"

else

$$C_{i2}$$

$$K_V = \frac{m}{hr}^3$$

$$F_{Pi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\zeta}{N_2} \cdot \left(\frac{C_i}{d} \right)^2}} =$$

jednadžba (26)

$$C_{i3} := \text{if } (x) < (F_V \cdot x_{TP})$$

$$\frac{W}{0,667 \cdot N_6 \cdot F_{Pi} \cdot \sqrt{F_V \cdot x_{TP} \cdot p_1 \cdot \rho_1}}$$

jednadžba (15)

else

$$\frac{W}{Y \cdot N_6 \cdot F_{Pi} \cdot \sqrt{x \cdot p_1 \cdot \rho_1}}$$

jednadžba (7)

$$K_{Vi} := \text{if } \frac{C_{i3}}{C} < 0,99$$

"vratiti se na gornji korak i povećati Ci za 30%"

else

$$C_{i3}$$

$$K_{Vi} = \frac{m}{hr}^3$$