

# Primjena zračnih ventila u vodoopskrbnim cjevovodima

---

**Bukarica, Saša**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:028487>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-06**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Odjel za Tehničke studije



**SAŠA BUKARICA**

**PRIMJENA ZRAČNIH VENTILA U VODOOPSKRBNIM CJEVOVODIMA**

Završni rad

Pula, rujan, 2019. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Odjel za tehničke studije

**SAŠA BUKARICA**

**PRIMJENA ZRAČNIH VENTILA U VODOOPSKRBNIM CJEVOVODIMA**

Završni rad

**JMB: 0303071755, izvanredni student**

**Studijski smjer: PROIZVODNO STROJARSTVO**

**Predmet: MEHANIKA FLUIDA**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: Strojarstvo**

**Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: prof.dr.sc. Bernard Franković**

**Komentor: dr.sc. Damir Karabaić, pred.**

Pula, rujan, 2019. godine



Mentor: prof.dr.sc. Bernard Franković

Komentor: dr.sc. Damir Karabaić, pred.

**Mehanika Fluida**

*(Predmet)*

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**  
**ODJEL ZA TEHNIČKE STUDIJE**  
**ZADATAK TEME ZAVRŠNOGA RADA**

**Pristupniku** Saši Bukarici

**MBS: 0303071755**

Studentu stručnog studija Odjela za tehničke studije, izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:

**NASLOV**  
**PRIMJENA ZRAČNIH VENTILA U VODOOPSKRBNIM**  
**CJEVOVODIMA**

**Sadržaj zadatka: Opisati uzroke pojave zraka u vodoopskrbnim cjevovodima te probleme nastale uslijed te pojave. Objasniti i prikazati načine rješavanja problema i metode upravljanja zrakom u vodoopskrbnim cjevovodima pomoću zračnih ventila. Na praktičnom primjeru pokazati primjenu osnovnih principa dimenzioniranja i pozicioniranja zračnih ventila.**

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Sveučilišta u Puli.

*(Ime i prezime studenta): Saša Bukarica*

**Izvanredni student, proizvodno strojarstvo**

*(status, smjer)*

**Datum:** 27.03.2019.

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_



**IZJAVA**  
o korištenju autorskog djela

Ja, Saša Bukarica, dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom „Primjena zračnih ventila u vodoopskrbnim cjevovodima“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, \_\_\_\_\_, 16.09.2019.

Potpis

---



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Saša Bukarica, kandidat za prvostupnika Proizvodnog strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

---

U Puli, \_\_\_\_\_, 2019. godine

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada jeste primjena zračnih ventila u vodoopskrbnom cjevovodu koji se koriste kao bitan hidromehanički alat za sprječavanje negativnih posljedica pojave zraka u cjevovodu. Uzroci pojave zraka u cjevovodu su višestruki: postojeći zrak u cjevovodu prije inicijalnog punjenja cjevovoda vodom, otopljeni zrak u vodi, zrak koji dospije u cjevovod tijekom funkcioniranja cjevovoda neželjenim usisavanjem iz okoline. Radi boljeg razumijevanja kako učinkovito upravljati zrakom u cjevovodu bitno je upoznati generalne karakteristike strujanja dvofazne smjese vode i zraka u cjevovodu, što je u radu ukratko opisano. Zrak kao pojava u cjevovodnim sustavima može uzrokovati mnoge probleme u funkcioniranju cjevovoda, kao što su smanjeni kapaciteta protoka, povećana potrošnja električne energije, vibracije, kavitacija itd. Zračni ventili spadaju u jedno od ekonomičnijih i učinkovitijih rješenja u upravljanju zrakom u vodoopskrbnim cjevovodima. U ovom radu su opisane tri različite vrste zračnih ventila i njihovo funkcioniranje u cjevovodnom sistemu. Za učinkovito funkcioniranje zračnih ventila, a time i cjevovoda, potrebno je izvršiti pravilan odabir, dimenzioniranje i pozicioniranje ventila. Dimenzioniranje i pozicioniranje ventila je vremenski zahtjevan zadatak te se sve više koriste kompjuterska programska rješenja. Na praktičnom primjeru vodovodnog ogranka Poduzetničke zone Bodulovo u Rijeci, prikazano je korištenje programa za dimenzioniranje i pozicioniranje zračnih ventila ARlavCAD, tvrtke A.R.I. iz Izraela.

**KLJUČNE RIJEČI:** Zračni ventil, vodoopskrbni cjevovod, zračni džep, upravljanje zrakom, dimenzioniranje ventila.

## **SUMMARY**

The topic of this final paper is the application of air valves in the water supply pipeline, which are used as an essential hydromechanical tool for preventing the negative effects of air in the pipeline. The causes of air in the pipeline are multiple: existing air in the pipeline before the initial filling of the pipeline with water, dissolved air in the water, air entering the pipeline during the operation of the pipeline by unwanted suction from the environment. In order to better understand how to effectively manage the air in the pipeline, it is important to know the general flow characteristics of the two-phase mixture of water and air in the pipeline, which is briefly described in the paper. Air as an occurrence in pipeline systems can cause many problems in pipeline functioning, such as reduced flow capacity, increased electricity consumption, vibration, cavitation, etc. Air valves are one of the most economical and efficient solutions for air management in water supply pipelines. This paper describes three different types of air valves and their functioning in a piping system. For the air valves and pipelines to function effectively, proper selection, sizing and positioning of the valves must be performed. Valve sizing and positioning is a time-consuming task, and computer software solutions are increasingly being used. In the practical example of the water supply branch of the Bodulovo Entrepreneurial Zone in Rijeka, the usage of the ARIavCAD air valves sizing and positioning program by A.R.I. from Israel is shown.

**KEY WORDS:** Air valve, water supply pipeline, air pocket, air control, valve sizing.



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Problem, predmet i objekt istraživanja .....	1
1.2. Hipoteza .....	1
1.3. Ciljevi .....	2
1.4. Metode istraživanja .....	2
1.5. Struktura rada .....	2
2. POJAVA ZRAKA U VODOOPSKRBNIM CJEVOVODIMA .....	3
2.1. Vodoopskrbni sustavi i cjevovodi .....	3
2.2. Uzroci pojave zraka u vodoopskrbnom cjevovodu .....	4
2.2.1. Postojeći zrak u cjevovodu .....	4
2.2.2. Otopljeni zrak u vodi .....	5
2.2.3. Usisavanje zraka iz okoline .....	6
2.3. Karakteristike dvofaznog strujanja u vodoopskrbnom cjevovodu .....	7
2.3.1. Vertikalni obrasci dvofaznog strujanja .....	7
2.3.2. Horizontalni obrasci dvofaznog strujanja .....	8
2.4. Problemi uzrokovani pojavom zraka u vodoopskrbnim cjevovodima .....	10
2.4.1. Pad tlaka u cjevovodu uzrokovan pojavom zraka .....	10
2.4.2. Povratni udar (strujanje) zraka .....	12
2.4.3. Hidraulički udar uzrokovan strujanjem zraka .....	13
2.4.4. Smanjenje učinkovitosti rada pumpi .....	13
2.4.5. Pojava kavitacije i korozije .....	13
2.5. Problemi u cjevovodu uzrokovani nedostatkom zraka .....	14
2.6. Metode upravljanja zrakom u vodoopskrbnom cjevovodu .....	15
3. ZRAČNI VENTILI .....	18
3.1. Vrste zračnih ventila .....	18
3.1.1. Zračni vakuumski ventili .....	18
3.1.2. Automatski zračni ventili .....	22
3.3.3. Kombinirani zračni ventili .....	23
3.2. Određivanje pozicije ugradnje zračnog ventila na cjevovodu .....	26
3.3. Dimenzioniranje zračnih ventila .....	28
3.3.1. Dimenzioniranje zračnog ventila za automatsko ispuštanje zraka iz cjevovoda pod tlakom .....	28
3.3.2. Dimenzioniranje zračnog ventila za upuštanje zraka u cjevovod tijekom pražnjenja cjevovoda .....	29
3.3.3. Dimenzioniranje zračnog ventila za ispuštanje zraka iz cjevovoda tijekom punjenja cjevovoda vodom .....	32
3.4. Instalacija i održavanje zračnih ventila .....	33

4. PRIMJER ANALIZE VODOOPSKRBNOG SUSTAVA I ODABIRA ZRAČNIH VENTILA.....	36
4.1. ARIlavCAD softver .....	36
4.1.1. Analiza strujanja kod kontroliranog punjenja cjevovoda .....	37
4.1.2. Analiza strujanja zraka u uvjetima kontroliranog pražnjenja cjevovoda ili djelomičnog puknuća cjevovoda.....	38
4.1.3. Analiza strujanja zraka u slučaju potpunog loma cjevovoda.....	39
4.1.4. Analiza strujanja zraka u slučaju pojave odvajanja vodenog stupca .....	39
4.2. Analiza i odabir ventila pomoću ARIlavCAD softvera.....	40
4.3. Validacija rezultata ARIlavCAD softvera .....	52
5. ZAKLJUČAK.....	56
6. LITERATURA .....	58
7. POPIS SIMBOLA.....	60
8. POPIS SLIKA .....	61
9. POPIS TABLICA I GRAFIKONA.....	62
9.1. Popis tablica.....	62
9.2. Popis grafikona .....	62
PRILOG 1. EXCEL TABLICA PD BODULOVO .....	63
PRILOG 2. ARIlavCAD IZVJEŠTAJ .....	64
PRILOG 3. UZDUŽNI PROFIL .....	67

## 1. UVOD

Učinkovito upravljanje zrakom u cjevovodu ima važnu ulogu u ispravnom funkcioniranju cjelokupnog vodoopskrbnog sistema. Ukoliko se upravljanje zrakom zanemaruje, može doći do negativnih pojava koje mogu prouzrokovati nezanemarivu materijalnu štetu i zastoje u funkcioniranju vodoopskrbe.

### 1.1. Problem, predmet i objekt istraživanja

Pojava zraka u vodoopskrbnom cjevovodu može uzrokovati slijedeće probleme: smanjenje efektivnog poprečnog presjeka cjevovoda što dovodi do smanjenog kapaciteta protoka pa i do samog prekida protoka, smanjenje učinkovitosti rada pumpi i povećanje potrošnje električne energije zbog neučinkovitog rada pumpi, naglog pada i porasta tlaka izazvanog pojavom vodenog udara, pogreške pri mjerenju protoka i poteškoće pri operacijama filtriranja, vibracije i strukturna oštećenja cjevovoda uzrokovanih hidrauličkim skokovima, pojava korozije i kavitacija itd.

Predmet istraživanja je učinkovito upravljanje pojavom zraka u vodoopskrbnom cjevovodu pomoću zračnih ventila. Zračni ventili su hidromehanički uređaji dizajnirani za automatsko ispuštanje, kontrolu i upuštanje zraka u vodoopskrbni cjevovod, tijekom funkcioniranja vodoopskrbnog cjevovoda ili sistema, za vrijeme početnog punjenja cjevovoda, pražnjenja cjevovoda radi servisiranja, zamjene, održavanja, i operativne upotrebe cjevovoda, transporta i distribucije pitke vode.

Objekt istraživanja je upotreba softvera kao dodatnog alata u odabiru zračnih ventila u fazi projektiranja cjevovoda. Učinkovito upravljanje zrakom korištenjem zračnih ventila ovisi u pravilnom odabiru, pozicioniranju i dimenzioniranju ventila, a softverski alati olakšavaju i ubrzavaju navedene procese.

### 1.2. Hipoteza

Zračni ventili su učinkovit i ekonomičan hidromehanički alat za kontrolu i upravljanje pojavom zraka u vodoopskrbnim cjevovodima, te se smatra da se pravilnim odabirom tipa, pozicije ugradnje i kapaciteta zračnih ventila prilikom dizajniranja vodoopskrbnog sustava većina navedenih problema uzrokovanih pojavom zraka u cjevovodu može spriječiti ili barem umanjiti. Upotrebom softvera za odabir, dimenzioniranje i pozicioniranje dodatno se olakšava proces projektiranja cjevovoda.

### 1.3. Ciljevi

Ciljevi ovog rada su slijedeći:

- Pojasniti uzroke pojave zraka u cjevovodu
- Opisati karakteristike strujanja dvofazne smjese vode i zraka
- Definirati probleme uzrokovane pojavom zraka
- Definirati probleme uzrokovane nedostatkom zraka
- Objasniti upravljanje zrakom u cjevovodu putem zračnih ventila
- Opisati vrste zračnih ventila i njihovu funkciju
- Opisati softver za dimenzioniranje i odabir zračnih ventila
- Prikazati primjenu osnovnih principa softverskog dimenzioniranja i pozicioniranja zračnih ventila na praktičnom primjeru vodovodnog ogranka PD Bodulovo

### 1.4. Metode istraživanja

Metode istraživanja koje su korištene u ovom radu za dokazivanje postavljene hipoteze su slijedeće:

- Proučavanje literature
- Proračun pomoću softvera
- Proračun korak po korak prema formulama
- Usporedba rezultata
- Analiza rezultata
- Sinteza i izvođenje zaključka na osnovu proučenog i izračunatog

### 1.5. Struktura rada

U prvom dijelu rada izložena su glavna obilježja i teoretske postavke o strujanju zraka u vodovodnom cjevovodu, te opisane negativne posljedice pojave zraka u cjevovodu. U drugom dijelu je opisano upravljanje zrakom pomoću zračnih ventila, tipovi zračnih ventila i način funkcioniranja u cjevovodnom sustavu. U završnom djelu je prikazan primjer analize vodoopskrbnog sustava i odabira zračnih ventila, opisan odabrani softver za proračun, izvršena analiza i odabir zračnih ventila pomoću softvera, provedena analiza i usporedba rezultata, te donesen zaključak.

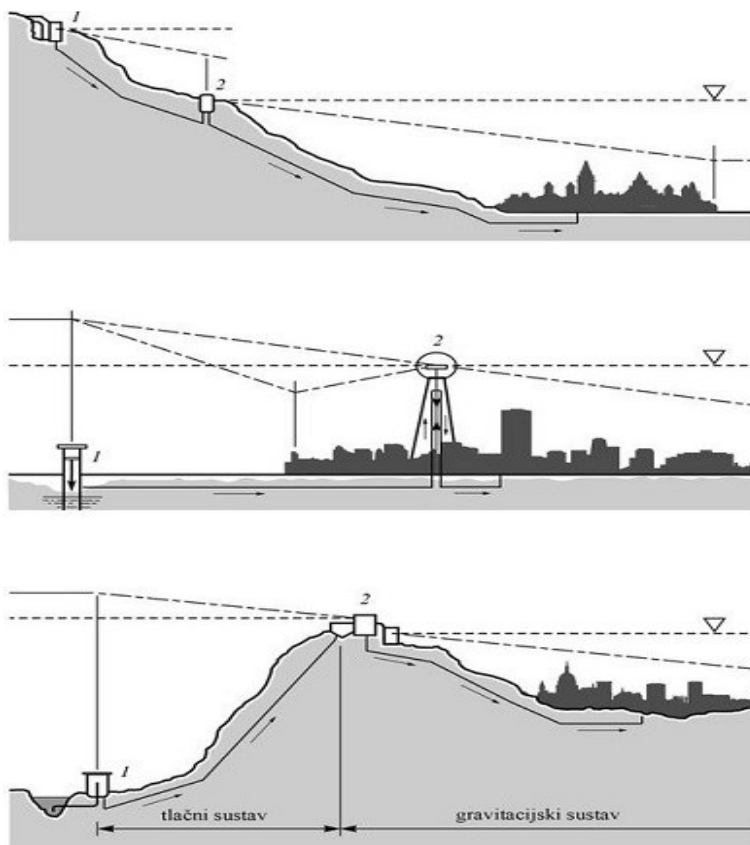
## 2. POJAVA ZRAKA U VODOOPSKRBNIM CJEVODIMA

### 2.1. Vodoopskrbni sustavi i cjevovodi

Vodoopskrbni sustav je prema definiciji skup građevina i naprava, koji najčešće obuhvaća: izvorište, glavni dovodni cjevovod, objekte za poboljšanje vode, vodospremu, glavni opskrbni cjevovod i razdjelnu mrežu. S obzirom na način generiranja tlaka tj. protoka fluida u cjevovodu, možemo ih podijeliti na (Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, 2019.) (slika 2.1.):

- gravitacijske, gdje je protok generiran isključivo gravitacijski tj. silom teže,
- tlačne, protok se ostvaruje potiskivanjem, tj. tlačenjem pumpama
- kombinirane, protok se ostvaruje kombiniranjem gravitacijskih i tlačnih sustava

Slika 2.1. Gravitacijski, tlačni i kombinirani vodoopskrbni sustav



Izvor: Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, 2019

Nadalje, postoje 4 opće vrste cjevovodnih sustava u vodoopskrbnom sustavu (Nayyar, 2000.):

- *prijenosni cjevovod* koji povezuje izvorište napajanja sa distribucijskim

sustavom. Još se naziva i magistralni cjevovod.

- *sustav cjevovoda u postrojenjima* (crpnim stanicama, uređajima za filtraciju, kloriranje i sl.)
- *distribucijske linije cjevovoda* koje povezuju prijenosne cjevovode sa distributivnim potrošnim područjima
- *servisni cjevovodi* su cjevovodi malih promjera koji dovode vodu do krajnjeg potrošača

Primarna funkcija vodoopskrbnog sustava je cjelodnevna opskrba svih potrošača dostatnim količinama vode, pri odgovarajućim tlakovima i protocima, pa tako i u protupožarne svrhe. Nužnost održavanja zadovoljavajućeg tlaka i protoka u vodoopskrbnom sustavu ima važniji utjecaj pri odabiru vrste materijala cjevovoda, promjera cjevovoda, geometrije i konfiguracije distributivne mreže, nego sami ekonomski troškovi crpljenja i distribucije vode (Nayyar, 2000.). Vodoopskrbni cjevovodi bi se trebali dizajnirati i pod pretpostavkom pojave zraka u samom cjevovodu, iako se to često ne čini, što dovodi do izostanka prevencije problema koje pojava zraka može uzrokovati.

## **2.2. Uzroci pojave zraka u vodoopskrbnom cjevovodu**

Pojava zraka u cjevovodima može imati više uzroka koje je potrebno utvrditi i razumjeti da bi se na pravilan način poduzele preventivne i operativne mjere radi upravljanja navedenom pojavom u smislu mjerenja količine zraka, lociranjem pozicija u cjevovodu na kojima se formiraju zračni džepovi, i na kraju ispuštanjem zraka iz cjevovoda, ili u slučajevima kad se provodi pražnjenje cjevovoda, upuštanjem zraka u cjevovod. Koristeći termin zrak, mislimo na atmosferski zrak, ali također i na ostale vrste plinova i plinovitih smjesa koje se mogu pojaviti u vodoopskrbnom cjevovodu. Generalno uzroke pojave zraka u cjevovodu možemo sistematizirati na slijedeći način:

### *2.2.1. Postojeći zrak u cjevovodu*

Prije inicijalnog uključivanja vodoopskrbnog cjevovoda u funkciju provodi se postupak odzračivanja tj. ispuštanja postojećeg zraka iz cjevovoda u okoliš, uz istovremeno punjenje cjevovoda vodom. Zrak se ispušta preko ugrađenih zračnih ventila, ili preko ostalih mehaničkih elemenata cjevovoda, kao što su hidranti, ventili, slavine, zasuni, zračne cijevi i sl. Međutim ukoliko zračni ventili nisu predviđeni uopće,

ili nisu pravilno locirani sukladno potrebama, dolazi do zadržavanja zraka u najvišim točkama cjevovoda.

### 2.2.2. Otopljeni zrak u vodi

Općenito se smatra da voda koja se upotrebljava za vodoopskrbu stanovništva i gospodarskih subjekata, sadrži oko 2% otopljenog zraka pri normalnim uvjetima, koji se pri smanjenju tlaka i pri povećanju temperature može osloboditi kreirajući mjehuriće i zračne džepove.

Zone niskog tlaka u cjevovodu se pojavljuju na najvišim pozicijama cjevovoda, kod djelomično otvorenih ventila, i kod promjene promjera cjevovoda što uzrokuje promjenu u brzini strujanja fluida, u ovom slučaju, vode (Lauchlan et al, 2005.). Kapljevina pod tlakom ima puno veću sposobnost zadržavanja otopljenih plinova u sebi, što se plastično može vidjeti na primjeru gaziranih pića u boci koja nakon otvaranja otpuštaju velike količine CO<sub>2</sub>.

Povećanje temperature također može uzrokovati oslobađanje zraka, preciznije, vodene pare, povećavajući tlak vodene pare (na 15°C tlak pare iznosi 1,70 kN/m<sup>2</sup>, a na 30°C tlak pare iznosi 4,24 kN/m<sup>2</sup>), što znači da je na 30°C potencijalni volumen zraka koji bi mogao biti oslobođen 2,5 puta veći od volumena zraka koji bi mogao biti oslobođen pri temperaturi od 15°C (Lauchlan et al, 2005.).

Omjer topljivosti zraka u vodi se može iskazati formulom (Engineering ToolBox, 2004., Air Solubility in Water):

$$S_a = m_a / m_w \quad (2.1)$$

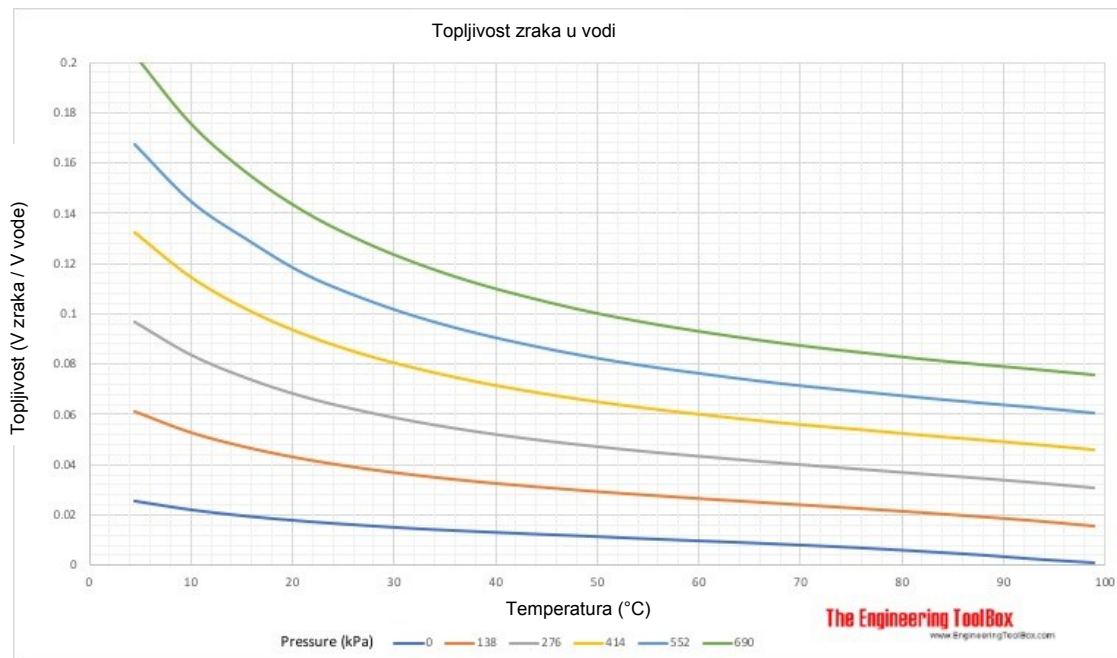
$s_a$  – omjer topljivosti [-]

$m_a$  - masa zraka [kg]

$m_w$  - masa vode [kg]

U slijedećem grafikonu i tablici 2.1. je prikazan odnos vrijednosti volumnog udjela otopljenog zraka u vodi u odnosu na temperaturu:

Grafikon 2.1. Topljivost zraka u vodi

Tablica 2.1. Topljivost zraka u vodi  
TOPLJIVOST (V zraka / V vode)

t (°C)	TLAK (kPa)					
	0	138	276	414	552	690
4,44	0,0258	0,0613	0,0967	0,1321	0,1676	0,203
10	0,0223	0,0529	0,0836	0,1143	0,1449	0,1756
15,6	0,0197	0,0469	0,0742	0,1014	0,1296	0,1559
21,1	0,0177	0,0423	0,0669	0,0916	0,1162	0,1408
26,7	0,0161	0,0387	0,0614	0,084	0,1067	0,1293
32,2	0,0147	0,0358	0,0569	0,078	0,099	0,1201
37,8	0,0136	0,0334	0,0532	0,073	0,0928	0,1126
43,3	0,0126	0,0314	0,0501	0,0689	0,0877	0,1065
48,9	0,0117	0,0296	0,0475	0,0654	0,0833	0,1012
54,4	0,0107	0,028	0,0452	0,0624	0,0796	0,0968
60	0,0098	0,0265	0,0432	0,0598	0,0765	0,0931
65,6	0,0089	0,0251	0,0413	0,0574	0,0736	0,0898
71,1	0,0079	0,0237	0,0395	0,0553	0,0711	0,0869
76,7	0,0068	0,0223	0,0378	0,0534	0,0689	0,0844
82,2	0,0055	0,0208	0,0361	0,0514	0,0667	0,082
87,8	0,0041	0,0192	0,0344	0,0496	0,0647	0,0799
93,3	0,0024	0,0175	0,0326	0,0477	0,0628	0,0779
98,9	0,0004	0,0155	0,0306	0,0457	0,0607	0,0758

Izvor: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-solubility-water-d\\_639.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-solubility-water-d_639.html) [pristupljeno 21.07.2019.]

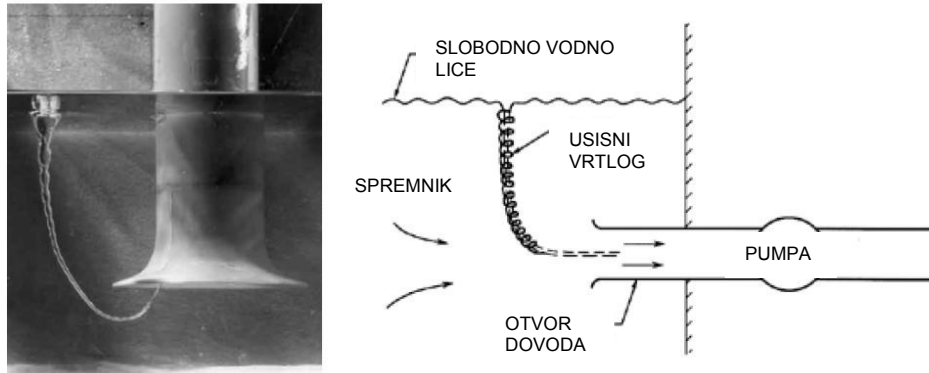
### 2.2.3. Usisavanje zraka iz okoline

Do pojave zraka u cjevovodu dolazi također infiltracijom zraka preko cijevnih spojnih elemenata, prirubnica, naglavaka, brtvenih spojeva, ostalih hidromehaničkih



elemenata cjevovoda kao što su ventili, zasuni, hidranti, slavine, u uvjetima kad je tlak vodoopskrbnog sustava niži od atmosferskog tlaka, tj. u uvjetima tzv. negativnog tlaka ili podtlaka. Također, na usisnim cjevovodima pumpnih postrojenja može doći do pojave vrtloženja (slika 2.2.) ukoliko usis nije na dovoljnoj dubini.

Slika 2.2. Pojava vrtloženja na usisu pumpe



Izvor: Brennen C. E., HYDRODYNAMICS OF PUMPS,

1994 <https://authors.library.caltech.edu/25019/1/chap4.htm> [pristupljeno 25.07.2019.]

### 2.3. Karakteristike dvofaznog strujanja u vodoopskrbnom cjevovodu

Relativni omjeri vode i zraka, kao i nagib cjevovoda, imaju veliki značaj kod nastanka različitih obrazaca strujanja smjese vode i zraka u cjevovodu. U dosadašnjoj literaturi koja se bavi navedenom problematikom definiranja obrazaca strujanja, pojavljuje se preko 80 različitih obrazaca strujanja, što može biti izvor određenih prijepora i nejasnoća. Budući da nagib cjevovoda ima značajnu ulogu u načinu strujanja zračno-vodene smjese možemo ih podijeliti na vertikalne i horizontalne obrasce strujanja (Lauchlan et al, 2005.):

#### 2.3.1. Vertikalni obrasci dvofaznog strujanja

Vertikalni obrasci strujanja su generalno asimetričniji u odnosu na horizontalne i možemo ih opisati na slijedeći način (slika 2.3.):

*Mjehuričasto strujanje* – zrak je raspoređen u vodi u obliku sfernih mjehurića relativno malih dimenzija u odnosu na promjer cijevi. Ovaj oblik strujanja se javlja kad je relativno malen udio zraka u umjerenoj struji vode

*Klinasto strujanje* – pojavljuje se povećanjem udjela zraka, dolazi do formiranja mjehura zraka veličine do  $\frac{1}{2}$  promjera cijevi

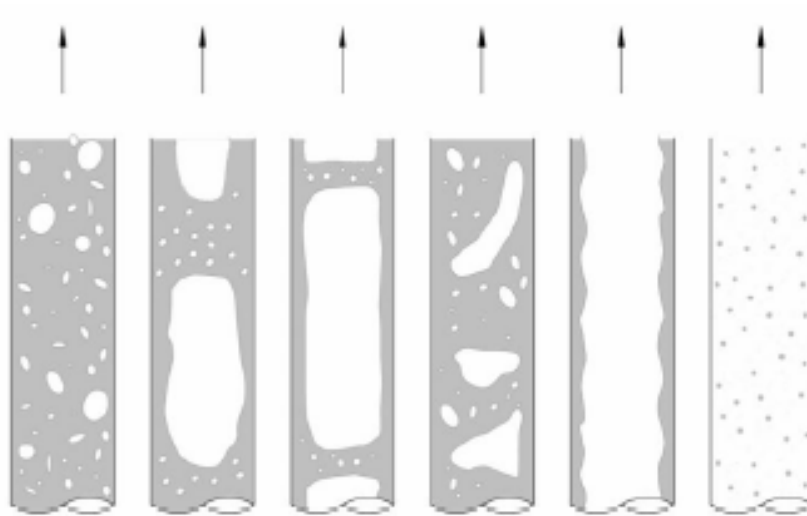
**Zrnato strujanje** – kako se nadalje povećava količina strujanja zraka, uredno se pojavljuju nizovi vrlo velikih mjehura zraka, koji zauzimaju gotovo cijeli presjek cijevi, osim tankog sloja uz samu stjenku cijevi, i njihova duljina je nekoliko puta veća od promjera cijevi

**Zapjenjeno strujanje** – dodatnim povećanjem dotoka zraka, zrnato strujanje prelazi u turbulentno strujanje nepravilnog oblika smjese zraka i vode

**Prstenasto strujanje** – pri relativno velikom udjelu zraka u strujanju i malom udjelu vode, dolazi do prstenastog strujanja, koje odlikuje gibanje vode uz stjenku cijevi u tankome filmu, dok gibanje zraka zauzima centralni dio cijevi

**Raspršeno strujanje** – glavninu strujanja čini zrak, prstenasti vodeni film se otkida sa stjenke cijevi i u vidu sitnih kapljica se giba u struji zraka.

Slika 2.3. Vertikalni obrasci strujanja



MJEHURIČASTO STRUJANJE    KLINASTO STRUJANJE    ZRNATO STRUJANJE    ZAPJENJENO STRUJANJE    PRSTENASTO STRUJANJE    RASPRŠENO STRUJANJE

Izvor: LAUHLAN C. et al (2005.) *Air in pipelines-literature review*, Hr Wallingford

### 2.3.2. Horizontalni obrasci dvofaznog strujanja

Većina obrazaca strujanja u horizontalnim i blago nagnutim cijevima u odnosu na horizontalnu ravninu imaju asimetričan oblik, uzrokovan djelovanjem gravitacije na fluide različitih gustoća. Strujanje vode ima tendenciju zauzimanja donjeg dijela cijevi i istiskuje zrak u više predjele cijevi (Slika 2.4.) ( Lauchlan et al, 2005.):

*Mjehuričasto strujanje* – zrak formira mjehuriće u gornjoj površini cijevi. Brzina strujanja mjehurića zraka i vode je izjednačena. Ovaj oblik strujanja je karakterističan za relativno velike udjele protoka vode sa malim udjelom protoka zraka.

*Klinasto strujanje* – povećanjem udjela protoka zraka, zračni mjehurići okrupnjavaju, formirajući isprekidan obrazac strujanja, pri čemu se formiraju zračni džepovi, klinovi, koji su zarobljeni u glavnoj struji vode i transportiraju se naizmjenično sa strujanjem vode, pri vrhu cijevi

*Slojevito glatko strujanje* – strujanje vode i zraka je jasno razdvojeno glatkom horizontalnom površinom, pojavljuje se kod relativno malih protoka i vode i zraka

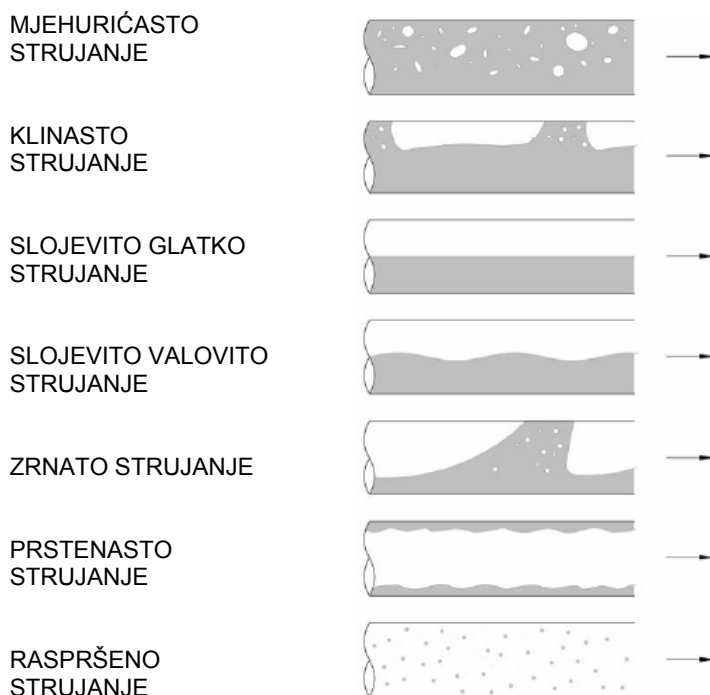
*Slojevito valovito strujanje* – povećanjem protoka zraka, pojavljuju se valovi na vodenoj površini

*Zrnato strujanje* – amplitude valova su dovoljno velike i zauzimaju cijeli poprečni presjek cijevi, formirajući valne čepove koji se kreću većom brzinom od ostatka vode

*Prstenasto strujanje* – pri relativno velikom udjelu zraka u strujanju i malom udjelu vode, dolazi do prstenastog strujanja, koje odlikuje gibanje vode uz stjenku cijevi u tankome filmu, dok gibanje zraka zauzima centralni dio cijevi

*Raspršeno strujanje* – glavninu strujanja čini zrak, prstenasti vodeni film se otkida sa stijenke cijevi i u vidu sitnih kapljica se giba u struji zraka.

Slika 2.4. Horizontalni obrasci dvofaznog strujanja



Izvor: LAUCLAN C. et al (2005.) *Air in pipelines-literature review*, Hr Wallingford

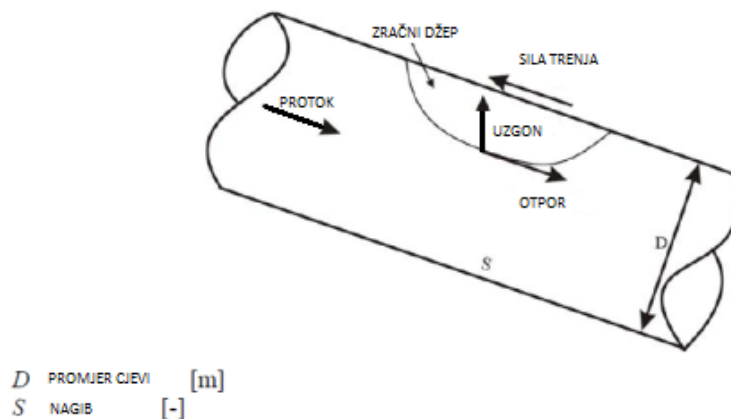
## 2.4. Problemi uzrokovani pojavom zraka u vodoopskrbnim cjevovodima

Neželjena pojava i prisutnost zraka u vodoopskrbnim cjevovodima je uzrok mnogim vrstama problema za koje korisnici i operateri cjevovodnih sustava često nisu ni svjesni. Akumuliranje zraka u najvišim pozicijama uzdužnog profila cjevovoda uzrokuje smanjenu protočnost i pad tlaka u cjelokupnom sistemu, pojava zraka potiče koroziju u metalnim cjevovodima, strujanje zraka uzrokuje pogrešna očitavanja mjerne opreme za mjerenje protoka, prelasci sa strujanja vode po punom presjeku cijevi na strujanje po djelomičnom profilu cijevi, zbog pojave zračnih džepova, uzrokuje vibracije i strukturna oštećenja cjevovoda. Pumpna postrojenja zbog pojave zraka rade sa smanjenom učinkovitošću, uz povećanu potrošnju energije, dok akumulacija značajnijih količina zraka može uzrokovati kompletan prekid strujanja vode, povratne hidrauličke udare i vibracije koje mogu značajno oštetiti cjevovode (Estrada, 2007.).

### 2.4.1. Pad tlaka u cjevovodu uzrokovan pojavom zraka

Prisutni zrak u cjevovodu se prenosi inercijom strujanja vode i može se zadržavati u najvišim točkama cjevovoda, formirajući sve veće zračne džepove povećanjem dotoka manjih količina zraka u vidu zračnih mjehurića. Na dijelovima cjevovoda sa negativnim nagibom, strujanje vode nastoji potisnuti zrak prema dolje, međutim, ukoliko je zračni džep dovoljne veličine, strujanje vode ne može nadvladati silu uzgona zraka, i zračni džep postaje stacionaran, a sila trenja je jednaka nuli (slika br.2.5.) (Estrada, 2007.).

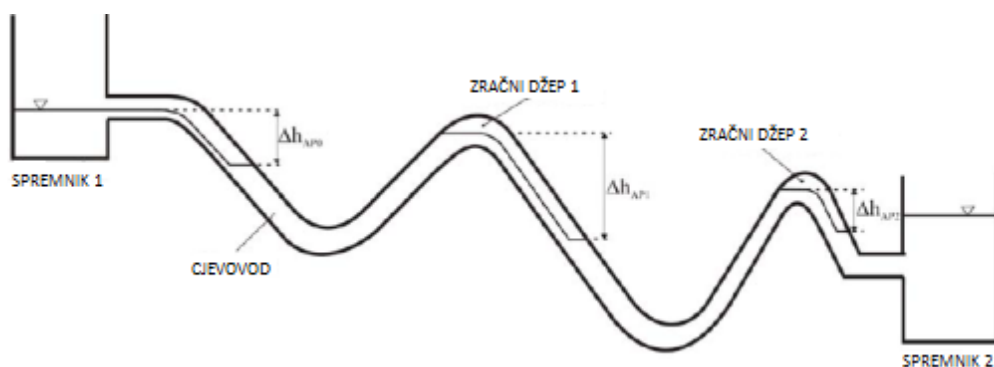
Slika 2.5. Djelovanje sila na zračni džep u cjevovodu sa negativnim nagibom



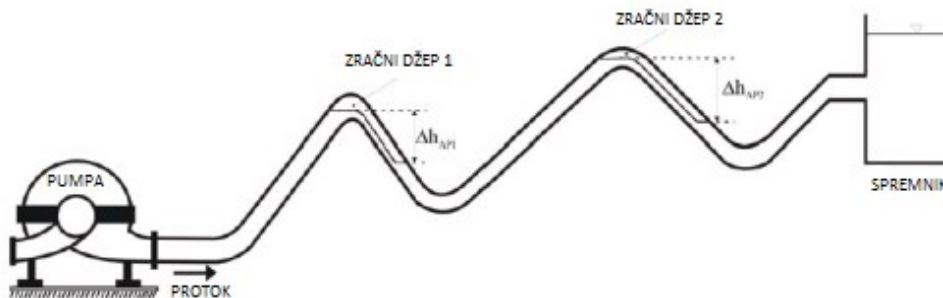
Izvor: ESTRADA O.P., (2007.) Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines

Koncept zadržavanja zraka (eng. Air binding) je prvi put predstavljen 1957.god od strane Richardsa (Richards, R.T., 1957. Air binding in large pipe lines flowing under vacuum, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 83, No. HY6, paper 1454, pp. 1-10.) i ukazuje da nakupljanje zraka koje smanjuje poprečan presjek cjevovoda, onemogućavajući strujanje po punom presjeku cijevi, ima utjecaj na smanjenje energetske vrijednosti. Primjenjujući energetska jednadžbu između vrha i dna svakog zračnog džepa, uočljivo je da je pad tlaka okvirno jednak vertikalnoj komponenti duljine zračnog džepa (slika 2.6. i 2.7.) (Estrada, 2007.).

Slika 2.6. Zračni džepovi u gravitacijskom cjevovodu



Slika 2.7. Zračni džepovi u tlačnom cjevovodu



Izvor: ESTRADA O.P., (2007.) Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines

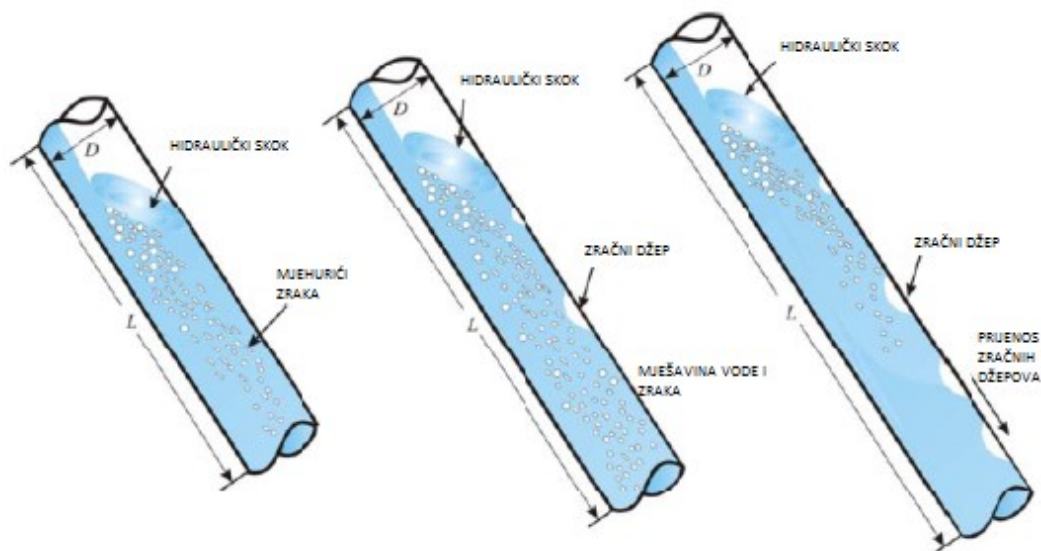
Cjevovodi koji imaju segmente sa negativnim nagibom, bilo da se radi o gravitacijskim ili tlačnim cjevovodima, podložni su nakupljanju zraka u najvišim točkama - lomovima cjevovoda. U tlačnim sustavima akumulacija zraka uvjetuje povećanu potrošnju el. energije i smanjenje protoka ukoliko su zračni džepovi stacionarni uslijed nedovoljnih brzina za transport zračnih džepova u smjeru tečenja. Strujanje može biti u potpunosti zaustavljeno ako kumulativni pad tlaka uzrokovan zračnim džepovima nadilazi tlačni kapacitet pumpe. Što se tiče gravitacijskih cjevovoda, u slučaju da hidrostatički tlak nije dovoljan da nadvlada kumulativni pad

tlaka također može doći do smanjenja protoka i izljeva fluida na odzračnim ventilima (Estrada, 2007.).

#### 2.4.2. Povratni udar (strujanje) zraka

Količina zraka koji se zadržava na najvišim pozicijama cjevovoda može biti značajna, te ukoliko je negativan nagib cjevovoda nakon najviše točke dovoljno strm, dolazi do pojave hidrauličkog skoka (prijelaz iz silovitog u mirni tok). Formiranje hidrauličkog skoka na kraju zračnog džepa je način na koji se zrak može eliminirati strujanjem vode. Međutim, ukoliko povlačna sila strujanja vode nije dovoljno velika da savlada uzgon zraka, postoji mogućnost formiranja stacionarnog zračnog džepa nizvodno od hidrauličkog skoka. Akumulacijom sve veće količine zraka, dolazi do povratnog strujanja zraka s ogromnom silom kroz hidraulički skok, usisavajući vodu i uzrokujući štetu na uzvodnim elementima cjevovoda, ventilima, zasunima, tlačnim posudama i sl. (Estrada, 2007.).

Slika 2.8. Hidraulički skok u cjevovodu



Izvor: ESTRADA O.P., (2007.) Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines

### *2.4.3. Hidraulički udar uzrokovan strujanjem zraka*

Povećanje brzine strujanja iza zračnog džepa može pokrenuti dio ili cijeli zračni džep nizvodno. Nagla i brza promjena u brzini strujanja vode u momentu kad je zračni džep pokrenut i naglo zaustavljen na slijedećoj visokoj točki cjevovoda može inicirati hidraulički udar. Posljedice hidrauličkog udara mogu biti mehanička oštećenja na cjevovodu, lomovi, itd.

### *2.4.4. Smanjenje učinkovitosti rada pumpi*

Prema procjenama, 75% operativnih troškova na cjevovodima su troškovi povezani sa radom crpki. Istraživanja na različitim tipovima cjevovoda diljem svijeta su pokazala da zarobljeni zrak u cjevovodu može smanjiti učinkovitost rada pumpi i do 30%. Većina cjevovodnih sistema u svijetu funkcionira sa smanjenom učinkovitošću u rasponu između 15-20% zbog neželjene prisutnosti zraka u cjevovodu. Zračni džepovi smanjuju tlak u cjevovodnim sustavima i do 20%, što prisiljava pumpe na pojačani rad i potrošnju energije u gotovo istom omjeru (Estrada, 2007.).

### *2.4.5. Pojava kavitacije i korozije*

Ovisno o tlaku i temperaturi, tj. pri određenim termodinamičkim uvjetima ravnoteže kapljevite i plinovite faze, voda isparava tako da se iznad njezine površine formira karakterističan tlak para. Ako u određenim uvjetima strujanja vode tlak padne na tlak para (tlak isparavanja) dolazi do lokalnog isparavanja, tj. do stvaranja mjehurića pare. Struja vode odnosi mjehuriće pare, koji kad dospiju u područje većeg tlaka uz prasak naglo kolabiraju (implodiraju). Time dolazi i do nagle promjene gustoće koja pak izaziva naglu i ekstremnu promjenu tlaka. Ova pojava se naziva kavitacija (slika 2.9.), a posljedica kavitacije je erozija tj. mehanička rupičasta oštećenja na cijevima i hidrotehničkoj opremi koja su progresivne prirode i negativno djeluju na tlak sistema i ukupan protok (Vuković Ž., Halkijević I., 2011.). Mehanička oštećenja na površinskim zaštitnim antikorozijskim slojevima metalnih cijevi i hidrotehničkih uređaja u vidu rupičastih kavitacijskih oštećenja su uz povećanu prisutnost zraka podložna korozijskim procesima i daljnjem propadanju.

Slika 2.9. Usisno zvono oštećeno kavitacijskom erozijom



Izvor: <http://belzona.hr/wordpress/wp-content/uploads/2011/03/inlet05.jpg>  
[pristupljeno 22.08.2019. 13:50]

## 2.5. Problemi u cjevovodu uzrokovani nedostatkom zraka

Postoje također i slučajevi kada je prisutnost zraka u cjevovodu nužna i to najčešće u uvjetima kada je atmosferski tlak veći od tlaka u cjevovodu, inače može doći do negativnih posljedica kao što su slijedeće:

- Usisavanje blata i nečistoća kroz pukotine, neispravne cijevne spojeve, i cijevni pribor (ventile, zasune, fazonske komade, i sl.)
- Usisavanje brtvila i ostalog cijevnog pribora
- Nekontroliran usis kemikalija
- Kolaps cijevi (slika 2.10.)

Slika 2.10. Kolaps cijevi u SAD, 1820 mm čelična cijev



Izvor: <https://img.ksl.com/slc/2512/251280/25128082.jpeg?filter=ksl/img614> [pristupljeno 27.7.2019.]



## 2.6. Metode upravljanja zrakom u vodoopskrbnom cjevovodu

Akumulirani zrak u vodoopskrbnom cjevovodu se može eliminirati iz cjevovoda hidraulički, koristeći strujanje vode, zatim, mehaničkim uređajima kao što su zračni ventili, odzračnici, zasuni i kombinacijom obiju spomenutih metoda.

Što se tiče hidrauličkih metoda, tj. koristeći strujanje vode, do današnjeg dana ne postoji usuglašeno općeprihvaćeno analitičko rješenje. Dosadašnja eksperimentalna istraživanja nisu univerzalno primjenjiva, i daju različite rezultate ovisno o zadanim uvjetima.

Kent (1952) je došao do zaključka da je stopa uklanjanja zraka hidrauličkim skokom na kraju zračnog džepa povezana sa vučnom silom koja djeluje na zračni džep. Učinkovita stopa uklanjanja zraka postoji onda kada je srednja brzina  $v$  jednaka ili veća od minimalne brzine  $v_{min}$ . Kent (1952) je razvio slijedeću polu empirijsku jednadžbu (Estrada, 2007.):

$$v_{min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \quad (2.2)$$

$v_{min}$  – minimalna srednja brzina potrebna za gibanje volumena zraka [m/s]

$g$  – akceleracija sile teže [m/s<sup>2</sup>]

$D$  – promjer cijevi [m]

$S$  – nagib cijevi [-]

$C_0^{1/2}$  – funkcija oblika zračnog džepa, konstanta za dužinu džepa  $L \geq 1,5D$

Wisner et al (1975) je na osnovu svojih eksperimentalnih rezultata zaključio slijedeće (Estrada, 2007.) :

$$\frac{v_{critical}}{\sqrt{gD}} = 0,25\sqrt{S} + 0,825 \quad (2.3)$$

$V_{critical}$  - kritična brzina za uklanjanje zraka [m/s]

$g$  – akceleracija sile teže [m/s<sup>2</sup>]

$D$  – promjer cijevi [m]

$S$  – nagib cijevi [-]

Prema istraživanju provedenom od strane znanstveno istraživačkog instituta HR Wallingford kritična brzina strujanja vode pri kojoj dolazi do gibanja zračnih džepova je usko povezana sa negativnim nagibom cjevovoda te sa veličinom zračnog džepa. Eksperimentalna istraživanja kod pozitivno nagnutih cijevi daju zaključiti da do gibanja zračnog džepa dolazi zahvaljujući sili uzgona, čak i kad je brzina strujanja vode jednaka nuli. U realnim uvjetima, kod vrlo malih nagiba i relativno izduženih zračnih džepova, može doći do otpora strujanju na spojevima cijevi, i zračni džepovi mogu postati stacionarni. Slijedeća formula služi za proračun kritične brzine kod negativno nagnutih cjevovoda (Lauchlan et al, 2005.):

$$\frac{v}{(gD)^{0,5}} = a + 0,56 (\sin S)^{0,5} \quad (2.4)$$

$$n = 4 V_{zrak} / \Pi D^3$$

$a =$

$$0,45 \quad \text{za} \quad n < 0,06$$

$$0,50 \quad \text{za} \quad 0,06 \leq n < 0,12$$

$$0,57 \quad \text{za} \quad 0,12 \leq n < 0,30$$

$$0,61 \quad \text{za} \quad 0,30 \leq n < 2$$

$v$  – srednja minimalna kritična brzina [m/s]

$g$  – akceleracija sile teže [ $m/s^2$ ]

$D$  – promjer cijevi [ $m$ ]

$S$  – nagib cijevi [-]

Navedena formula se može primjenjivati za nagibe od 0 do 22,5°, a po nekim eksperimentalnim mjerenjima i do 40°, za zračne džepove definirane faktorom  $n=0,0002$  do 2 ( u cijevima promjera 150 mm). Navedena formula se može koristiti za cijevi do promjera 1 m, a za promjere veće od 1 m potrebne su dodatne korekcije. Odvođenje zraka iz vodoopskrbnog cjevovoda hidrauličkim vidom tj. strujanjem vode je sa gledišta ekonomičnosti najoptimalniji način, međutim, zbog velike kompleksnosti u postizanju dovoljnih brzina strujanja, korištenje hidromehaničkih pomagala je neophodno za optimalno upravljanje zrakom u vodoopskrbnom cjevovodu (Lauchlan et al, 2005.).

Početakom 20. stoljeća, dok još nisu bili poznati svi aspekti ponašanja zraka u vodoopskrbnim cjevovodima, pojavljivala su se različita rješenja čija je funkcija bila odvod zraka iz cjevovoda, pa su tako postavljane vertikalne cijevi koje su imale funkciju odzračnika, ručno upravljani zasuni na topografski najvišim točkama cjevovoda, a i danas se ponekad koriste hidranti za odzračivanje dijelova cjevovoda. Međutim, takva rješenja su prepuna manjkavosti, jer ne predstavljaju neprekidnu funkciju upravljanja zrakom u cjevovodu, niti zaštitnu funkciju u uvjetima vakuuma tj., podtlaka u cjevovodnom sustavu. U današnje doba, zračni ventili spadaju u najčešće korištene hidromehaničke uređaje za upravljanje zrakom u vodoopskrbnim cjevovodima, sa primarnim funkcijama otpuštanja zarobljenog zraka u cjevovodu prilikom punjenja cjevovoda, upuštanja zraka u cjevovod prilikom pražnjenja cjevovoda, i ispuštanja manjih količina zraka koje se pojave u cjevovodu tijekom normalne funkcije transporta vode od izvorišta do krajnjeg potrošača.

### 3. ZRAČNI VENTILI

Zračni ventili su hidromehanički uređaji dizajnirani za automatsko otpuštanje, kontrolu i upuštanje zraka u vodoopskrbni cjevovod, tijekom funkcioniranja vodoopskrbnog cjevovoda ili sustava, tj. za vrijeme početnog punjenja cjevovoda, pražnjenja cjevovoda radi servisiranja, zamjene, održavanja, i operativne upotrebe cjevovoda tj. transporta i distribucije pitke vode. Sigurnost i učinkovitost upotrebe vodoopskrbnog cjevovoda ovisi o efektivnom upravljanju pojavom zraka u vodoopskrbnom cjevovodu (AWWA, 2001).

#### 3.1. Vrste zračnih ventila

Zračni ventili se danas uobičajeno dijele na slijedeće tipove:

- Zračni vakuumski ventili (engl. Air Vacuum Valves)
- Automatski zračni ventili (engl. Automatic Air Release Valves)
- Kombinirani zračni ventili (engl. Combination Air Valves)

##### 3.1.1. Zračni vakuumski ventili

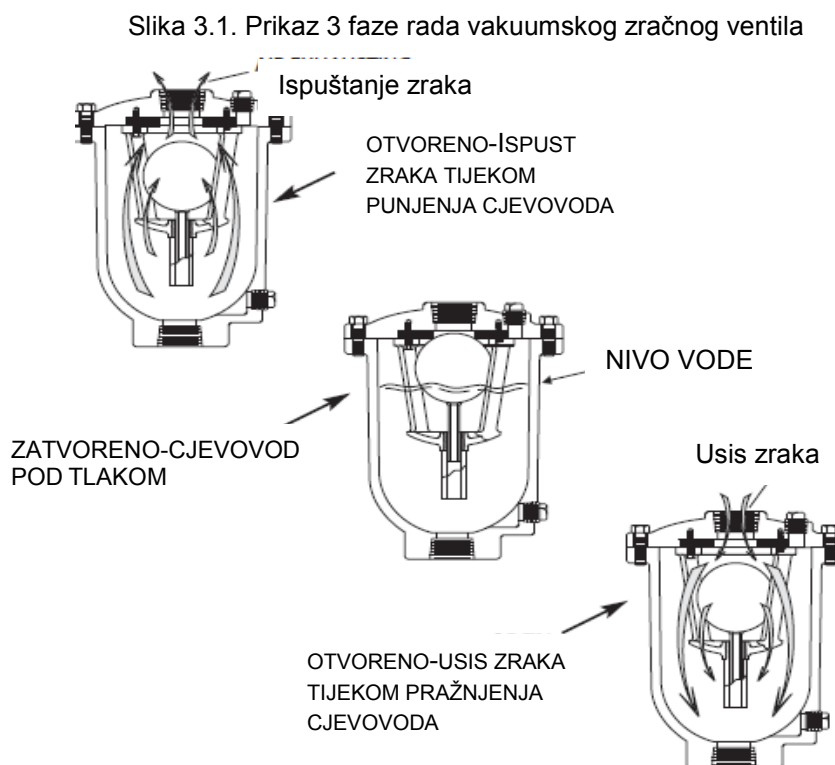
Zračni vakuumski ventili, koje se još nazivaju i kinetički (engl. Kinetic) su ventili sa jednostrukim velikim otvorom, veličine promjera otvora od 13 mm do 500 mm (AWWA, 2001.) čija je primarna funkcija ispuštanje velikih količina zraka prilikom punjenja cjevovoda vodom i upuštanje velikih količina zraka prilikom pražnjenja cjevovoda radi servisiranja, zamjene, održavanja, i u slučajevima iznenadnog pada tlaka unutar cjevovodnog sustava ispod vrijednosti atmosferskog tlaka. Naglo otkazivanje rada crpki, stvaranje odvojenog vodenog stupca, lomovi na cjevovodu i sl. mogu uzrokovati negativan tlak u sustavu.

Prilikom punjenja cjevovoda vodom bitno je da se ispuštanje zraka odvija jednoliko radi sprječavanja naglih promjena tlaka, a također i u obrnutom slučaju, prilikom upuštanja zraka u cjevovod.

Princip rada kod vakuumskih ventila je slijedeći: U početnoj fazi rada, ventil je u otvorenoj poziciji, kako zrak napušta cjevovod, voda ulazi u komoru ventila i podiže plutajuću kuglu koja zatvara otvor ventila. Brzina strujanja izlazećeg zraka je funkcija

tlaka fokusiranog na centralnu točku otvora ventila. Jednom zatvoren ventil ostaje u toj poziciji sve dok je cjevovod u funkciji i tlak sustava nadilazi atmosferski tlak tj. dok voda ispunjava komoru ventila.

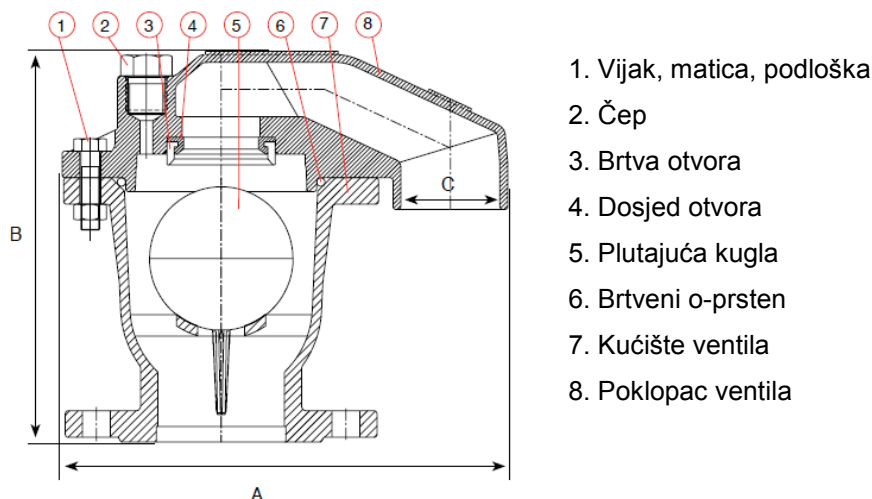
Na slici 3.1. su prikazane faze rada uobičajenog vakuumskog ventila :



Izvor: VAL-MATIC VALVE & MFG. CORP., (2008), *Air Valves*, Val-matic bulletin 1500

Kao primjer vakuumskog ventila na slijedećoj slici 3.2. prikazan je ventil proizvođača A.R.I., tip K010 sa osnovnim dijelovima:

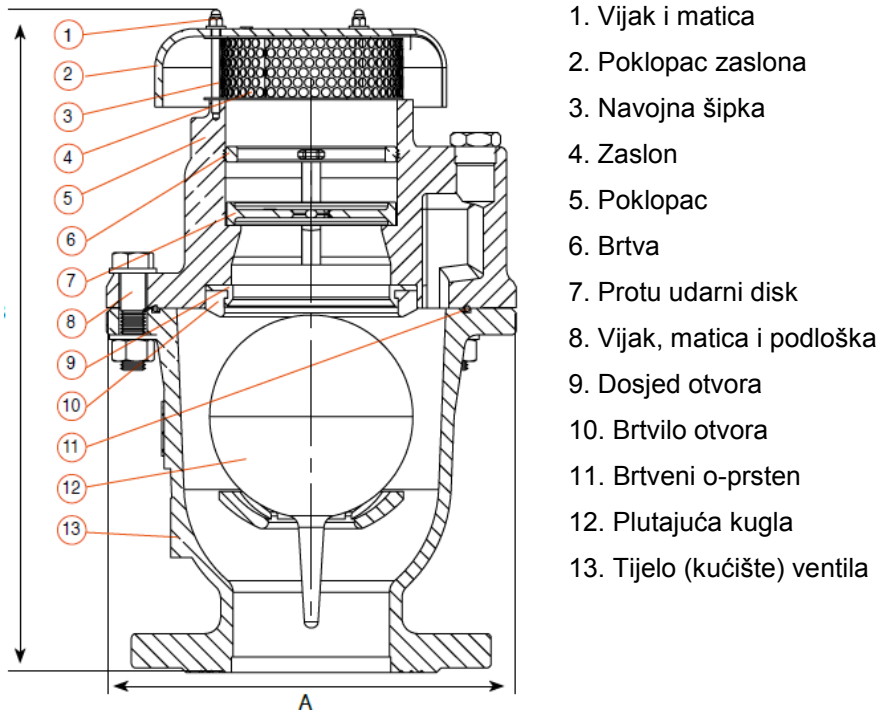
Slika 3.2. Elementi vakuumskog ventila



Izvor: <http://ecat.arivalves.com/catalogue/product/71318> [pristupljeno 15.08.2019.]

Zračni vakuumski ventil može biti opremljen protu udarnim mehanizmom (engl. non-slam), sa ciljem anuliranja pojave udara u samom ventilu izazvanim brzim dotokom vode u kućište ventila. Navedenim mehanizmom se kontrolira postepeno zatvaranje i otvaranje otvora ventila. Na slici 3.3. je prikazan ventil K-060 NS sa non-slam uređajem:

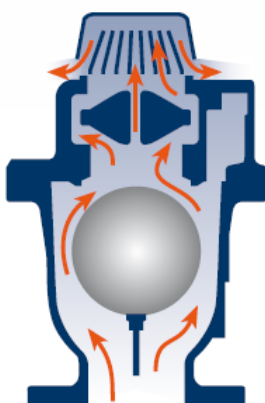
Slika 3.3. Ventil K-060 NS



Izvor: <http://ecat.arivalves.com/catalogue/product/66167> [pristupljeno 15.08.2019.]

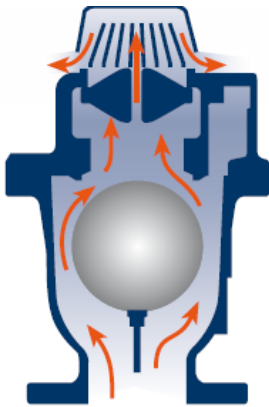
Princip rada zračnih vakumskih non-slam ventila je prikazan na slijedećim slikama 3.4. a-d :

Slika 3.4.a



1. U fazi brzog punjenja cjevovoda vodom, zrak se potiskuje kroz zračni ventil, kreirajući diferencijalni tlak na otvoru zračnog ventila.

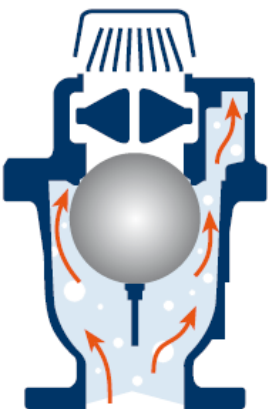
Slika 3.4.b



2. Kada diferencijalni tlak dosegne predodređenu razinu (obično se podešava na 0,02-0,03 bar) protu udarni (engl. non-slam) disk se zatvara.

3. Zrak i dalje nastavlja strujati kroz mali otvor u sredini protu udarnog diska, sve do momenta kada voda dosegne plutajuću kuglu. Ovaj dvostupanjski modus strujanja zraka sprječava udar u ventilu i hidraulički udar u cjevovodu

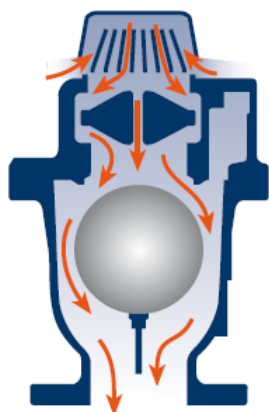
Slika 3.4.c



4. Kada voda dosegne plutajuću kuglu, kugla se podiže i zatvara otvor ventila, čime se završava ciklus ispuštanja zraka iz cjevovoda kroz zračni vakuumski non-slam ventil.

5. Protu udarni disk se vraća u svoj početni otvoreni položaj

Slika 3.4.d.



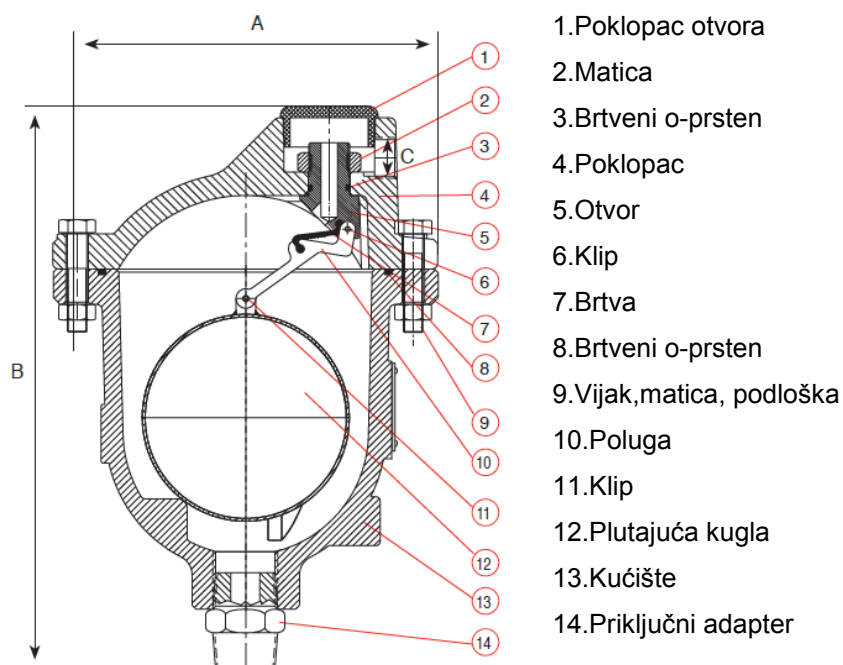
6. Ispuštanje vode iz cjevovoda uzrokuje pad vrijednosti internog tlaka sistema u odnosu na okolni atmosferski tlak, plutajuća kugla se spušta otvarajući otvor ventila za slobodan prolaz zraka u cjevovod.

Izvor: <http://ecat.arivalves.com/catalogue/product/66167> [pristupljeno 15.08.2019.]

### 3.1.2. Automatski zračni ventili

Automatske zračne ventile (engl. Automatic Air Release Valves) karakterizira mali otvor za otpuštanje zraka, a obično su locirani na uzvišenim pozicijama cjevovoda, i automatski otpuštaju zrak iz cjevovodnog sustava tijekom operativne upotrebe, pri čemu su vrijednosti tlaka vodoopskrbnog sistema veće od okolnog atmosferskog tlaka. Veličina promjera otvora kod automatskih zračnih ventila je u rasponu između 1,6 mm -13,00 mm (AWWA, 2001). Plovak ili plutajuća kugla je mehanizmom povezana sa otvorom ventila koji se otvara pri nakupljanju zraka u gornjem djelu kućišta ventila. Za vrijeme funkcioniranja cjevovoda i protoka medija, malene količine zračnih mjehurića ulaze u kućište ventila i snižavaju razinu vode u ventilu u odnosu na plovak, što smanjuje uzgon plovka i dovodi do otvaranja otvora ventila, pri čemu akumulirani zrak napušta ventil. Kad se zrak ispusti u atmosferu, razina vode u kućištu ventila poraste i otvor ventila se zatvara. Na slici 3.5. je prikazan automatski zračni ventil A.R.I. tip S-014:

Slika 3.5. Dijelovi automatskog zračnog ventila



Izvor: <http://ecat.arivalves.com/catalogue/product/52338> [pristupljeno 15.08.2019.]



Automatski zračni ventili zahvaljujući malom otvoru i mehanizmu koji multiplicira silu plovka ili plutajuće kugle imaju sposobnost otvaranja unatoč tome što je tlak u sistemu viši od okolnog atmosferskog tlaka. Sila mora biti veća od tlaka sistema koji djeluje po površini otvora, da bi se zrak ispustio, što objašnjava činjenicu da se povećanjem tlaka sistema smanjuje veličina otvora.

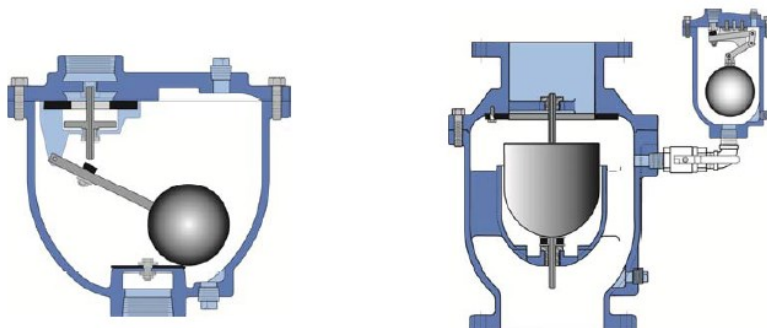
Automatski zračni ventili se također instaliraju na tlačnim vodoopskrbnim cjevovodima, između vertikalnih samousisnih pumpi i upravljanih nepovratnih ventila sa zaklopkom za zaštitu od hidrauličkog udara. Pri tome je bitno napomenuti da je otvaranje nepovratnog ventila podešeno vremenski sa odgodom u odnosu na start pumpe, da bi se zrak ispustio putem automatskog zračnog ventila.

Važno je napomenuti da automatski zračni ventili nisu namijenjeni za sprječavanje pojave vakuuma, niti za upuštanje velikih količina zraka u cjevovod tijekom pražnjenja cjevovoda, zbog svojih konstrukcijskih obilježja tj. malog otvora.

### 3.3.3. Kombinirani zračni ventili

Kombinirani zračni ventili objedinjuju funkcije zračnih vakuumskih ventila i automatskih zračnih ventila, i iz tog razloga se nazivaju kombinirani zračni ventili. Prema dizajnu, obje komponente ventila mogu biti u jednom kućištu ili odvojeno u zasebnim kućištima (slika 3.6.). Kombinirani zračni ventil sa jednostrukim kućištem su kompaktniji i jeftiniji, dok zračni ventili s dvodijelnim kućištem imaju mogućnost servisiranja automatske odzračne komponente dok je vakuumska komponenta još u funkciji.

Slika 3.6. Kombinirani zračni ventili, jednostruko i odvojeno kućište

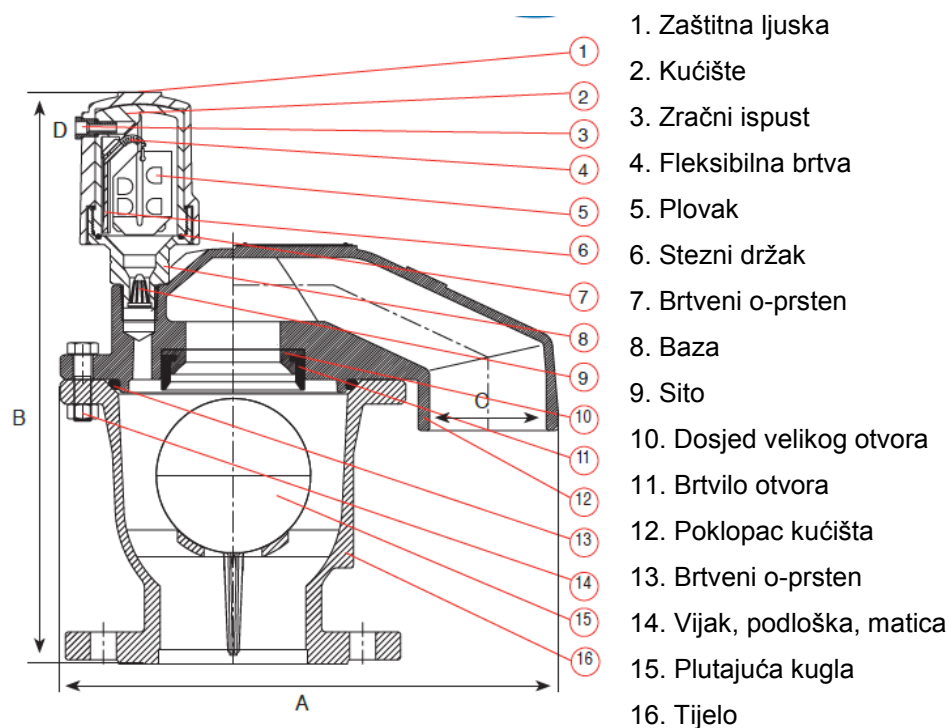


Izvor: VAL-MATIC VALVE & MFG. CORP., (2008), Air Valves, Val-matic bulletin 1500

Automatska zračna komponenta ventila je konstruirana da automatski ispušta malene količine akumuliranog zraka u atmosferu, iz cjevovodnog sistema, dok je sistem u operativnoj funkciji i pod tlakom. Zračna vakuumska komponenta je konstruirana da ispušta velike količine zraka tijekom punjenja cjevovoda vodom, ili da upušta zrak tijekom pražnjenja cjevovoda. U slučaju pojave negativnog tlaka, ventil se otvara.

Na slici 3.7. je prikazan kombinirani zračni ventil A.R.I. D-050:

Slika 3.7. Kombinirani zračni ventil A.R.I. D-050



Izvor: <https://www.arivalves.com/products/water-supply/item/d-050-d-052-combination-air-valve>  
[pristupljeno 25.08.2019.]

Zračna vakuumska komponenta ventila, s velikim otvorom, ispušta zrak velikim brzinama tijekom punjenja cjevovoda vodom, i upušta zrak u cjevovodni sustav tijekom pražnjenja cjevovoda ili pri pojavi odvajanja vodenog stupca. Velike brzine zraka ne uzrokuju zatvaranje ventila, jedino pojava tekućine može podići plutajuću kuglu do razine zatvaranja otvora ventila. Ako u bilo kojem momentu operativnog funkcioniranja cjevovoda interni tlak sustava padne ispod razine okolnog atmosferskog tlaka, zrak ulazi u sustav. Jednolično, kontrolirano ispuštanje zraka smanjuje mogućnost pojave hidrauličkih udara i drugih štetnih pojava u sustavu. Upuštanje zraka, kao posljedica pojave negativnog tlaka, sprječava pojavu vakuuma i odvajanja vodenog stupca. Usisavanje zraka je ključno za efikasno pražnjenje sustava .

Dok se sustav puni vodom i postigne radni tlak, kombinirani zračni ventil djeluje na slijedeći način:

1. Zrak iz cjevovoda je ispušten u okolnu atmosferu putem ventila
2. Voda ulazi u kućište vakuumske komponente, podiže plutajuću kuglu u položaj zatvaranja otvora
3. Voda ulazi u kućište automatske zračne komponente ventila, podiže plovak u položaj zatvaranja otvora
4. Zarobljeni zrak, akumuliran na najvišim pozicijama cjevovodnog sustava, uzdiže se do vrha automatske zračne komponente ventila, potiskujući vodu u tijelu ventila
5. Plovak se spušta, otvarajući otvor zračne komponente. Akumulirani zrak odlazi u atmosferu kroz otvor
6. Voda zamjenjuje ispušteni zrak, podižući plovak u položaj zatvaranja otvora.

U slučaju pojave pada internog tlaka sustava ispod vrijednosti okolnog atmosferskog tlaka (negativni tlak):

1. Plutajuća kugla se spušta u položaj otvaranja velikog otvora vakuumske komponente ventila, istovremeno otvarajući otvor
2. Zrak ulazi u cjevovodni sustav.

Kombinirajući različito dimenzionirane automatske zračne komponente i vakuumske komponente zračnih ventila sa dvodijelnim kućištima, može se zadovoljiti skoro svaka potreba na cjevovodu za zračnim ventilom, te su stoga takvi tipovi ventila prvi izbor u odabiru pojedinih projektanata.

Pojedini dijelovi zračnih ventila su od velikog značaja za ispravno funkcioniranje zračnih ventila i u slučaju oštećenja, postoji mogućnost neispravnog funkcioniranja i zastoja u radu, što može uzrokovati velike probleme i štete na cjevovodnim sustavima. Posebno su osjetljive plutajuće kugle, koje moraju biti savršenog sfernog oblika, da bi u potpunosti brtvile otvor ventila kod zatvaranja. Budući da je zapravo nemoguće postići savršen sferni oblik, koriste se posebno elastična mekana brtvila dosjeda. Deformacije plutajuće kugle izazvane djelovanjem visokih tlakova, trošenje, habanje, skrućivanje brtvila dosjeda, dovode do neispravnog djelovanja zračnih ventila, što upućuje na potrebu redovne inspekcije i održavanja.

### 3.2. Određivanje pozicije ugradnje zračnog ventila na cjevovodu

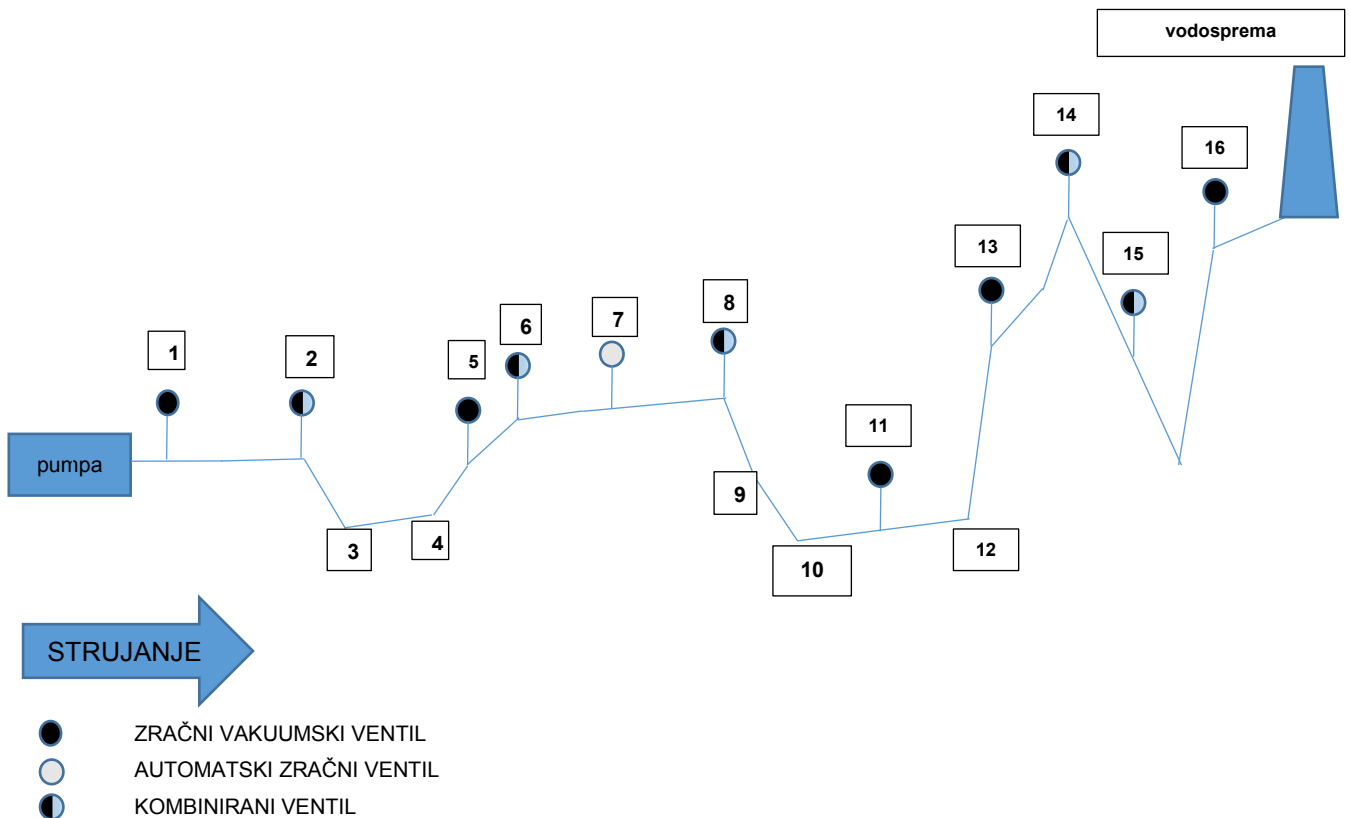
Ispravna pozicija ugradnje zračnog ventila na cjevovodu ima jednako važnu ulogu kao i tip i dimenzija samog ventila, neispravna lokacija ugradnje može učiniti ventil neučinkovitim. Prema priručniku AWWA M51 (2001) predlažu se slijedeće lokacije za ugradnju zračnih ventila na cjevovodima i ujedno i tipovi zračnih ventila, uz napomenu da za sprječavanje hidrauličkog udara i pojave odvajanja vodenog stupca u nekim sustavima treba razmotriti i druge lokacije:

- Povišene lokacije cjevovoda. Predlaže se ugradnja kombiniranih zračnih ventila
- Zasuni na glavnim linijama cjevovoda. Predlaže se ugradnja zračnih vakumskih ili kombiniranih zračnih ventila na odvodnoj strani zasuna radi olakšavanja pražnjenja cjevovoda
- Povećani negativni nagib cjevovoda. Predlaže se ugradnja kombiniranog zračnog ventila
- Smanjenje pozitivnog nagiba cjevovoda. Zračni vakuumski ili kombinirani ventil
- Dugi minimalni usponi cjevovoda. Predlaže se ugradnja zračnog vakuumskog ili kombiniranog ventila na svakih 400 ili 800 m duž uspona cjevovoda.
- Dugi minimalni padovi cjevovoda. Predlaže se ugradnja automatskih zračnih ventila na svakih 400 ili 800 m duž pada cjevovoda.
- Duge horizontalne dionice. Predlaže se ugradnja kombiniranih zračnih ventila na početku i kraju dionice, i automatskih zračnih ventila ili kombiniranih zračnih ventila svakih 400 ili 800 m duž horizontalne dionice cjevovoda. Zahtjevno je isprazniti zrak iz dugih horizontalnih dionica cjevovoda
- Venturi mlaznice za mjerenje protoka. Predlaže se ugradnja automatskih zračnih ventila uzvodno od mjerača protoka sa ciljem eliminacije zraka koji može uzrokovati neprecizna mjerenja
- Duboki bunari i vertikalne pumpe. Predlaže se ugradnja zračnih vakuumskih ventila na ispusnu stranu pumpi. Potrebna su dodatna razmatranja u selekciji ventila zbog specifičnih naglih promjena u režimima protoka tijekom pokretanja i zaustavljanja pumpi.
- Sifoni. Predlaže se ugradnja automatskih zračnih ventila na najvišoj poziciji sifona sa ciljem ispuštanja zraka. Automatski zračni ventil mora imati samo funkciju ispuštanja zraka, a ne upuštanja. U slučaju potrebe za ispuštanjem

veće količine zraka, predlaže se ugradnja zračnog vakuumskog ventila, sa istom funkcijom.

Na slijedećoj grafici (slika 3.8.) su prikazane neke od pozicija ugradnje zračnih ventila :

Slika 3.8. Primjer lokacija zračnih ventila na cjevovodu



R.BR.	OPIS POZICIJE	PREPORUČENI TIP VENTILA	R.BR.	OPIS POZICIJE	PREPORUČENI TIP VENTILA
1	ISPUST PUMPE	VAKUUMSKI	9	SMANJENJE NEG.NAGIBA	NIJE POTREBAN VENTIL
2	NEG. NAGIB	KOMBINIRANI	10	NISKA TOČKA	NIJE POTREBAN VENTIL
3	NISKA TOČKA	NIJE POTREBAN VENTIL	11	DUGI USPON	VAKUUMSKI ILI KOMBINIRANI
4	POVEĆANJE USPONA	NIJE POTREBAN VENTIL	12	POVEĆANJE USPONA	NIJE POTREBAN VENTIL
5	SMANJENJE USPONA	VAKUUMSKI ILI KOMBINIRANI	13	SMANJENJE USPONA	VAKUUMSKI ILI KOMBINIRANI
6	POČETAK DUGE HORIZ.DIONICE	KOMBINIRANI	14	VISOKA TOČKA	KOMBINIRANI
7	DUGA HORIZONTALNA DIONICA	AUTOMATSKI ILI KOMBINIRANI	15	DUGI PAD	AUTOMATSKI ILI KOMBINIRANI
8	KRAJ DUGE HORIZ.DIONICE	KOMBINIRANI	16	SMANJENJE USPONA	VAKUUMSKI ILI KOMBINIRANI

Izvor: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, (2001.) *Manual of Water Supply Practices M51*

### 3.3. Dimenzioniranje zračnih ventila

Dimenzioniranje odgovarajuće veličine zračnog ventila za odabranu lokaciju na vodoopskrbnom cjevovodu je jednako važno kao i odabir prave lokacije. Sukladno namjeni ventila, dimenzioniranje se vrši za funkciju automatskog ispuštanja zraka dok je cjevovod pod radnim tlakom, za funkciju upuštanja zraka u cjevovod tijekom pražnjenja cjevovoda, za funkciju ispuštanja zraka iz cjevovoda tijekom punjenja cjevovoda vodom, i dimenzioniranje za specijalne uvjete (hidraulički udar, odvajanje vodenog stupca i sl.)

#### 3.3.1. Dimenzioniranje zračnog ventila za automatsko ispuštanje zraka iz cjevovoda pod tlakom

Veličina ispusnog otvora na automatskom zračnom ventilu za ispuštanje zraka dok je cjevovod pod radnim tlakom iznosi između 1,6 mm i 25 mm u promjeru dok veličina priključka ventila varira između 13 i 150 mm u promjeru.

Ne postoji konačna metoda izračuna količine zraka koju bi trebalo ispustiti iz određenog cjevovoda, jer je vrlo teško predvidjeti količinu zraka koja će se u određenom periodu pojaviti u cjevovodu, te je uobičajena postavka od koje se polazi da je potrebno predvidjeti ventil kapaciteta dovoljnog za ispuštanje zraka u omjeru od 2 % količine protoka vode, sukladno pretpostavci o udjelu od 2 % otopljenog zraka u vodi pri standardnim uvjetima.

Budući da zadani uvjeti uključuju visoke tlakove, za strujanje zraka kroz otvor ventila se primjenjuje jednadžba koja vrijedi za stlačivo adijabatsko strujanje bez transfera topline zraku (AWWA, 2001.)(Crane Ltd, 1999.):

$$Q = 0,3217Yd^2C \sqrt{\frac{\Delta PP'}{T_1 S_g}} \quad (3.1)$$

Q– protok [m<sup>3</sup>/min]

Y- faktor ekspanzije , 0,71 za protok zraka ( Technical Paper No.410, 1982)

d – promjer otvora [mm]

C<sub>d</sub> – koeficijent ispuštanja 0,7

$\Delta P$  – diferencijalni tlak  $0.47P'$  (za zvučno strujanje) [bar]

$P'$  – apsolutni tlak cjevovoda (atmosferski tlak + tlak u cjevovodu) [bar]

$T$  – temperatura ,  $T=273+t$  [K]

$S_g$  - specifična gravitacija, za zrak=1,0 [-]

Na osnovu gore navedenih formula u slijedećoj tablici 3.1 je dan prikaz izračunatih vrijednosti, uz pretpostavku zvučnog strujanja i ispusnog koeficijenta  $C_d=0,7$ . Za stvarnu vrijednost ispusnog koeficijenta je potrebno konzultirati proizvođače zračnih ventila. Vrijednost  $C_d=0,7$  je aproksimacija između glatke mlaznice i otvora pravokutnog oblika.

Tablica 3.1. Kapacitet zračnog ventila (m<sup>3</sup>/min)  $C_d=0,7$

KAPACITET ZRAČNOG VENTILA (m <sup>3</sup> /min) $C_d=0,7$										
TLAK (bar)	PROMJER OTVORA ZRAČNOG VENTILA (mm)									
	1,59	2,38	3,18	4,76	6,35	7,94	9,53	11,11	12,70	25,40
1,72	0,0448	0,098	0,1764	0,3976	0,7056	1,1032	1,5876	2,1588	2,8	11,256
3,45	0,0728	0,1624	0,2884	0,6468	1,148	1,7948	2,5844	3,528	4,592	18,368
5,17	0,1008	0,224	0,3976	0,896	1,5932	2,4892	3,584	4,872	6,384	25,48
6,89	0,126	0,2856	0,5096	1,1452	2,0384	3,192	4,592	6,244	8,148	32,48
8,61	0,154	0,35	0,6216	1,3944	2,4808	3,864	5,572	7,588	9,912	39,76
10,34	0,182	0,4116	0,7308	1,6464	2,912	4,564	6,58	8,96	11,704	45,08
12,06	0,21	0,4732	0,8428	1,8956	3,36	5,264	7,588	10,332	13,468	53,76
13,78	0,238	0,5376	0,9548	2,1448	3,808	5,964	8,568	11,676	15,26	61,04
15,50	0,266	0,5992	1,064	2,394	4,256	6,664	9,576	13,048	17,024	68,04
17,23	0,294	0,6608	1,176	2,646	4,704	7,336	10,584	14,392	18,816	75,32
18,95	0,322	0,7224	1,2852	2,884	5,152	8,036	11,592	15,764	20,58	82,32
20,67	0,35	0,7868	1,3972	3,136	5,6	8,736	12,572	17,108	22,372	89,6

Izvor: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, (2001.) Manual of Water Supply Practices M51

Strujanje brzinom zvuka se pojavljuje kad se zrak ispušta iz cjevovodnog sustava u atmosferu pri čemu tlak sistema 1,9 puta premašuje okolni atmosferski tlak. Pri zvučnom strujanju, brzina strujanja zraka je ograničena na brzinu zvuka, uzrokujući ograničenje u količini ispuštenog zraka pri višim tlakovima.

### 3.3.2. Dimenzioniranje zračnog ventila za upuštanje zraka u cjevovod tijekom pražnjenja cjevovoda

Kontrolirano pražnjenje vodoopskrbnog cjevovoda radi popravaka i sl. se vrši u rasponu brzina istjecanja vode od 0,3-0,6 m/s. Zračni ventil na susjednoj poziciji do

lokacije istjecanja mora biti dimenzioniran na jednaku količinu volumnog protoka kao i protok istjecanja vode.

U slučaju zastoja rada pumpi ili oštećenja cjevovoda, može doći do nekontrolirane promjene brzine strujanja, odvajanja vodenog stupca i gravitacijskog strujanja, što može uzrokovati pojavu vakuuma u cjevovodu tj. negativnog tlaka. Zračni ventili na povišenim topografskim pozicijama trebaju svojim dimenzijama zadovoljavati količinu dotoka zraka koja minimalizira pojavu negativnog tlaka i sprječava oštećenja pumpi, opreme i cjevovoda.

Nagib cjevovoda određuje količinu potrebnog dotoka zraka za sprječavanje pojave negativnog tlaka kod dimenzioniranja otvora zračnog ventila kod gravitacionog strujanja. Prikladan zračni ventil bi trebao biti pozicioniran na najbližoj topografski povišenoj točki na cjevovodu, sa veličinom otvora prikladnom za upuštanje volumena zraka jednake volumenu vode koja istječe iz cjevovoda.

Gravitacijski tok vode se može odrediti iz Darcy-Weisbach formule (Val-Matic Valve&Mfg Corp, 2018.):

$$v = (2gH/K)^{1/2} \quad (3.2)$$

gdje je :

v – brzina strujanja [m/s]

g – ubrzanje sile gravitacije [m/s<sup>2</sup>]

H – visinska razlika [m]

K – koeficijent otpora  $K = f \cdot L/d + 2,5$  [-]

f – faktor trenja cijevi (željezo=0,019, čelik=0,013, plastika =0,007) [-]

L - duljina dionica cjevovoda [m]

D – unutarnji promjer cijevi [m]

Gravitacijski tok se računa za svaki segment cjevovoda.

U slučaju da je cjevovod izrađen od materijala sklonog imploziji ili kolapsu pri pojavi negativnog tlaka, kao npr. čelični cjevovod, koristi se slijedeća formula za izračun tlaka kolapsa (AWWA, 2001.)

$$P = 455000000 * (T_s/D)^3 \quad (3.3)$$



gdje je:

P - tlak implodije [Pa]

Ts - debljina stjenke cijevi [mm]

D - promjer cijevi [mm]

Na osnovu odabira sigurnosnog faktora, a preporuča se faktor 3 ili 4, prema slijedećoj formuli se definira dopušteni diferencijalni tlak (AWWA, 2001.):

$$\Delta P = P_c / SF \quad (3.4)$$

Pri čemu je:

$\Delta P$  - diferencijalni tlak [Pa]

$P_c$  - tlak implodije [Pa]

SF - sigurnosni faktor[-]

Budući da su i plastične cijevi (PVC, polietilen, polipropilen) također sklone kolapsu pri pojavi negativnog tlaka, o vrijednostima tih tlakova bi se trebalo konzultirati sa proizvođačima navedenih cijevi.

Zračni ventil bi trebao biti sposoban upuštati zrak bez prelaženja vrijednosti diferencijalnog tlaka od 35 kPa, ili u slučaju da je izračunata vrijednost tlaka implodije niža, te niže vrijednosti. Vrijednost od 35 kPa diferencijalnog tlaka je definirana iz razloga da bi se izbjeglo strujanje zraka pri brzinama zvuka koja se pojavljuje pri diferencijalnom tlaku od 48 kPa. Na osnovu krivulja kapaciteta za pojedine tipove ventila različitih proizvođača, vrši se odabir prikladne dimenzije ventila (primjer grafikon 3.1.)

Kapacitet zračnog vakuumskeg ventila može se odrediti na osnovu već spomenute formule (Crane Ltd, 1999):

$$Q = 0,3217 Y d^2 C \sqrt{\frac{\Delta P P'}{T_1 S_g}} \quad (3.5)$$

Q – protok [m<sup>3</sup>/min]

Y - faktor ekspanzije , 0,71 za protok zraka ( Technical Paper No.410, 1982)

d – promjer otvora [mm]

$C_d$  – koeficijent ispuštanja 0,7

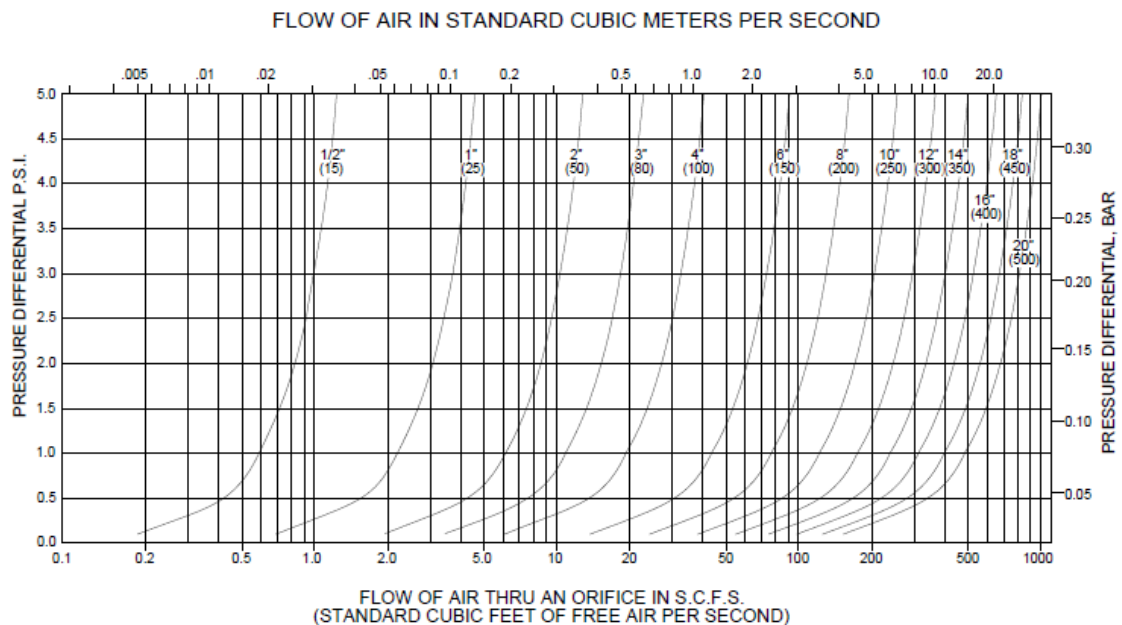
$\Delta P$  – diferencijalni tlak  $0.47P'$  (za zvučno strujanje) [bar]

$P'$  – apsolutni tlak cjevovoda (atmosferski tlak + tlak u cjevovodu) [bar]

$T_1$  - temperatura apsolutna ,  $T=273+t$  [K]

$S_g$  - specifična gravitacija, za zrak=1,0 [-]

Grafikon 3.1. Krivulja protoka zraka s obzirom na diferencijalni tlak zračnih vakuumskih ventila



Revised 7-26-17 (Rev 3)	
VENTING CAPACITY FOR AIR/VACUUM VALVES, IN. (mm)	DATE 4-30-02
<b>VALMATIC®</b> VALVE AND MANUFACTURING CORP.	DRWG. NO. SS-1580

Izvor: <https://www.valmatic.com/products/air-valves/air-vacuum-clean-water#16637-technical-data>  
[pristupljeno 15.08.2019.]

### 3.3.3. Dimenzioniranje zračnog ventila za ispuštanje zraka iz cjevovoda tijekom punjenja cjevovoda vodom

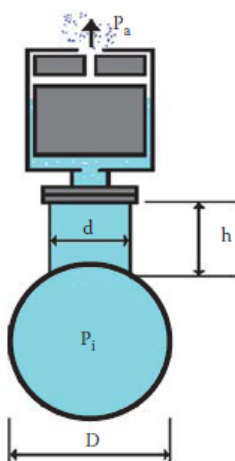
Zračni ventil također treba biti dimenzioniran za ispuštanje zraka tijekom vršenja punjenja cjevovoda vodom. Preporučena brzina protoka prilikom punjenja cjevovoda je u rasponu od 0,3 do 0,6 m/s. Više brzine strujanja mogu uzrokovati hidrauličke udare.

Zrak se ispušta u atmosferu iz cjevovoda pri preporučenom diferencijalnom tlaku od 13,8 kPa, ili ako je ventil opremljen protu udarnim diskom ili mehanizmom protiv naglog zatvaranja, vrijednost diferencijalnog tlaka može iznositi do 34,5 kPa. Ispuštanje zraka pri višim vrijednostima diferencijalnog tlaka od spomenutog nije preporučena zbog pojave buke povezane sa strujanjem brzinom zvuka.

### 3.4. Instalacija i održavanje zračnih ventila

Ispravno funkcioniranje zračnih ventila se osigurava pravilnom instalacijom, redovitim inspekcijama i održavanjem zračnih ventila. Prije svega, potrebno je poštovati upute i preporuke proizvođača zračnih ventila. U praksi se ventili ugrađuju na način da se maksimizira mogućnost prihvata zraka iz cjevovoda, a sa sigurnosnog aspekta teži se minimiziranju mogućnosti vodnog udara. Instalacija mora osigurati mogućnost inspekcije i održavanja, tj. pristupačnost osoblju koje provodi te radnje. Također, način instalacije ne smije umanjiti radne karakteristike zračnih ventila. Na slikama 3.9. i 3.10. su dane smjernice za instalaciju zračnih ventila vezano za dimenzije T komada ili ogranka za priključak zračnog ventila na cijev (Van Vuuren, 2012.):

Slika 3.9. Instalacija ventila

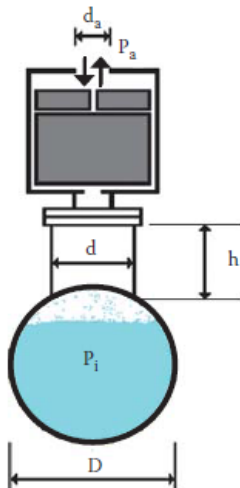


Tablica 3.2. Instalacija automatskog zračnog ventila

Automatski zračni ventil	
LOKACIJA	Prema topografskim zahtjevima
h	$h \geq 1,0D$
	$h \geq 150\text{mm}$
d	$d = D$ za $D \leq 300\text{mm}$
	$d = 0,6D$ za $300 < D \leq 1500\text{mm}$ (min 300 mm)
	$d \geq 0,35D$ za $D > 1500\text{mm}$ (min 900 mm)

Izvor: VAN VUUREN S.J., VAN DIJK M., (2012.) *The discontinuity required at an air valve or vent for effective pipeline de-aeration*

Slika 3.10. Instalacija ventila

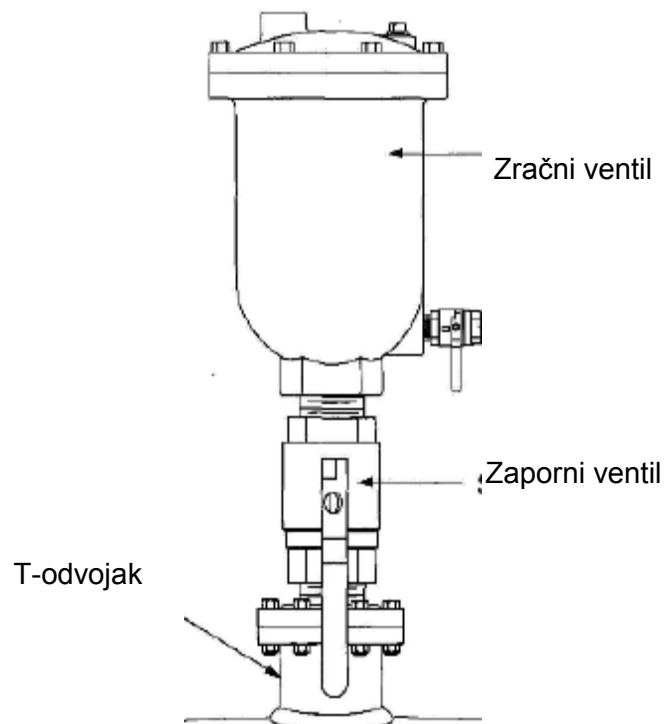


Tablica 3.3. Instalacija vakuumskog zračnog ventila

	Zračni vakuumski ventil	
	USIS ZRAKA	ISPUŠTANJE ZRAKA
DIFERENC.TLAK	$P_a - P_i \leq 40 \text{ kPa}$	$P_i - P_a \leq 5 \text{ kPa}$
LOKACIJA	Između zapornih ventila ili uz mogućnost slobodnog dreniranja	Uzvišena pozicija na izoliranom cjevovodu
h	$h \geq 1,0D$ $h \geq 150\text{mm}$	$h \geq 1,0D$ $h \geq 150\text{mm}$
d	$\frac{\pi d^2}{4} \geq \frac{\pi d_a^2}{4}$	Prema smjernicama za automatski zračni vntil

Izvor: VAN VUUREN S.J., VAN DIJK M.,(2012) *The discontinuity required at an air valve or vent for effective pipeline de-aeration*

Slika 3.10. Instalacija zračnog ventila



Izvor: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, (2001.) *Manual of Water Supply Practices M51*

Zračni ventil se obično odvaja od priključka na cjevovod zapornim ventilom radi lakše inspekcije i održavanja, a svi metalni dijelovi ventila moraju biti antikorozivno zaštićeni, ili napravljeni od materijala otpornih na koroziju. Ako se ventili ugrađuju nadzemno, moraju biti zaštićeni od smrzavanja, vandalizma i onečišćenja. U slučaju podzemne ugradnje, potrebno je osigurati ventiliranje ugradbenog prostora, kao i zaštitu od smrzavanja i poplavlivanja.

Prema najnovijim propisima, tj. prema europskoj direktivi PED 2014/68/EU, Pressure Equipment Directive, zračni ventili su svrstani u kategoriju sigurnosnih ventila, te se naglašava važnost redovne inspekcije i održavanja zračnih ventila. Na tržištu se pojavljuju zračni ventili opremljeni sensorima i transponderima koji omogućuju praćenje stanja i funkcioniranja zračnih ventila u realnom vremenu, što uvelike olakšava održavanje ventila, povećava efikasnost i smanjuje troškove održavanja. Budući da su uslijed svoje funkcije zračni ventili u dodiru sa pitkom vodom, moraju zadovoljavati sve standarde koji su traženi za to područje, a isto tako način instalacije zračnih ventila mora biti takav da se onemogući potencijalno onečišćenje.

## 4. PRIMJER ANALIZE VODOOPSKRBNOG SUSTAVA I ODABIRA ZRAČNIH VENTILA

Na slijedećem praktičnom primjeru vodovodnog ogranka Poduzetničke zone Bodulovo u Rijeci bit će prikazano korištenje programa za odabir zračnih ventila. Poznati su slijedeći podaci dostupni u prilogu 3, gdje je prikazan uzdužni profil cjevovoda.

Vodovodni ogranak od DUCTIL vodovodnih cijevi DN 200mm u ukupnoj duljini od cca 295.00m. Na mjestu spoja s postojećim cjevovodom PVC 150 u čvoru GC1 hidrostatski pritisak iznosi 4,8 bara. Prema zahtjevu projektanta potrebno je izvršiti odabir zračnih ventila za navedenu dionicu cjevovoda.

### DIMENZIONIRANJE CJEVOVODA - KRAJNJA TOČKA CJEVOVODA

K.T. (krajnja točka) 200,84 m.n.m.

TIP I PROMJER CJEVOVODA :DUKTILE DN 200 mm

DULJINA CJEVOVODA L = 294,51 m

NAZIVNI RADNI TLAK:10 bara

PROTOK Q = 24,17 l/s

BRZINA STRUJANJA VODE  $v = 0,77$  m/s

NAGIB I = 2,86 ‰

ENERGETSKI GUBITCI  $\Delta h = 0,84$  m

Kota piezometarske crte radnog tlaka 256,16 m.n.m.

Kota terena u krajnjoj točki cjevovoda 200,84 m.n.m.

Raspoloživi (radni) tlak u krajnjoj točki 55,32 m.n.m.= 5,5 bara

### 4.1. ARIlavCAD softver

U slučaju složenijih cjevovodnih sustava sa dugim linijama cjevovoda, dimenzioniranje i pozicioniranje zračnih ventila predstavlja opsežan i vremenski zahtjevan zadatak, te se kao alat mogu koristiti kompjuterska programska rješenja proizvođača zračnih ventila. Jedan od takvih programa je ARIlavCAD kompanije A.R.I. (<https://www.arivalves.com/>) iz Izraela koji je dostupan za preuzimanje na slijedećem linku, [www.arivalves.com/design-tools](http://www.arivalves.com/design-tools), a za aktivaciju programa nakon instalacije je potrebno zatražiti autorizacijski kod. ARIlavCAD program se koristi kao dopunski alat u dimenzioniranju, pozicioniranju i odabiru zračnih ventila, u ovom slučaju iz proizvodnog

asortimana tvrtke A.R.I. Program se može koristiti zajedno sa drugim programskim alatima kao što su AutoCAD i Excel, jer omogućuje prebacivanje podataka iz jednog u drugi program. Program vrši analizu strujanja zraka kod kontroliranog punjenja cjevovoda, analiza strujanja zraka u slučaju djelomičnog i potpunog loma na cjevovodu, analizu strujanja zraka pri pojavi odvajanja vodenog stupca i analizu upuštanja zraka pri kontroliranom pražnjenju cjevovoda. Provedene analize rezultiraju odabirom tipa i dimenzije zračnog ventila za najoptimalnije pozicije na cjevovodu.

#### 4.1.1. Analiza strujanja kod kontroliranog punjenja cjevovoda

Za cjevovodne sustave koji imaju malu mogućnost pojave negativnog tlaka i implodije i oštećenja cjevovoda, gdje je teren relativno ravan i bez velikih i naglih nagiba, vrši se analiza kontroliranog punjenja koja se oslanja na dimenzioniranje zračnih ventila na bazi količine protoka vode pri zadanoj brzini strujanja, tj. kapacitet ispuštanja zraka je jednak protoku vode pri punjenju cjevovoda (Zloczower, 2004.):

$$Q_{zrak} = Q_{voda} = A * v \quad (4.1)$$

$Q_{zrak}$  –volumni protok zraka [m<sup>3</sup>/s]

$Q_{voda}$  –volumni protok vode [m<sup>3</sup>/s]

$A$  – površina/presjek cijevi [m<sup>2</sup>]

$v$  – brzina strujanja [m/s]

$$Q_f = v_f \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.2)$$

gdje je:

$Q_f$  - kapacitet zračnog ventila [m<sup>3</sup>/s]

$v_f$  – brzina punjenja cjevovoda [m/s]

$D$  – unutarnji promjer cjevovoda [m]

Ova analiza pozicionira ventile na topografski najuzvišenije pozicije cjevovoda, na crpne stanice i rezervoare, te uz zaporne sekcijske ventile glavnih linija.

#### 4.1.2. Analiza strujanja zraka u uvjetima kontroliranog pražnjenja cjevovoda ili djelomičnog puknuća cjevovoda

Dimenzioniranje zračnih ventila na temelju analize kontroliranog pražnjenja cjevovoda putem ispusnih ventila po izboru projektanta sustava, treća je mogućnost koja zahtijevanu količinu protoka zraka potrebnu za zaštitu od negativnog tlaka, izjednačava za volumnim protokom vode kroz ispusni ventil. Protok se računa prema jednadžbi (Zloczower, 2004.):

$$Q_D = C_d \sqrt{(2g\Delta h)} \pi \left(\frac{D_d}{2}\right)^2 \quad (4.3)$$

Gdje je:

$Q_D$  - volumni protok zraka [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$C_d$  - ispusni koeficijent [0,6]

$g$  - ubrzanje sile gravitacije [ $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$ ]

$\Delta h$  - visinska razlika između zračnog i ispusnog ventila [m]

$D_D$  - promjer ispusnog ventila [m]

Navedena formula uzima u obzir visinsku razliku između predložene lokacije zračnog ventila i lokacije ispusnog ventila, bez uzimanja u obzir pada tlaka i nagiba cjevovoda.

Analiza kontroliranog pražnjenja cjevovoda se može upotrijebiti i kao analiza proboja cjevovoda, gdje dimenzija ispusnog ventila simulira dimenziju proboja na cjevovodu. Analiza kontroliranog pražnjenja cjevovoda pozicionira zračne ventile na povišene točke cjevovoda u susjedstvu ispusnih ventila, kod crpnih stanica i rezervoara, te uz zaporne sekcijske ventile glavnih linija.

Analiza kontroliranog pražnjenja cjevovoda je najkompliciranija metoda analize, koja uzima u obzir cjelokupan cjevovodni sustav, sa svim lokacijama primjenjivim za ispusne ventile, uzimajući u obzir i međusoban uzajaman utjecaj odabranih zračnih ventila.



#### 4.1.3. Analiza strujanja zraka u slučaju potpunog loma cjevovoda

Analiza loma na cjevovodu se temelji na Hazen-Williams jednadžbi, a glavna pretpostavka analize jest lom cijevi po punom presjeku, što implicira slobodan protok po punom profilu cjevovoda. Formula za izračun vrijednosti protoka glasi (Zloczower, 2004.):

$$Q_B = \sqrt{\frac{1,852 SD^{4,87} C^{1,852}}{10,69}} \quad (4.4)$$

pri čemu je:

$Q_B$  – količina protoka zraka potrebna za zaštitu od negativnog tlaka [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$S$  – nagib cjevovoda [ $\text{m}/\text{m}$ ]

$D$  – unutarnji promjer cjevovoda [ $\text{m}$ ]

$C$  - Hazen-Williams koeficijent

Analiza loma pozicionira zračne ventile na topografski najviše pozicije cjevovoda, na crpne stanice i rezervoare, te uz zaporne sekcijske ventile glavnih linija. Na pozicijama smanjenja kuta nagiba na uzlaznim dionicama cjevovoda, te na pozicijama povećanja kuta nagiba na negativnim nagibima cjevovoda gdje je razlika tlačne visine brzine između dviju dionica cjevovoda 1,5 m ili viša, zračni ventil se pozicionira na točki promjene nagiba. U slučaju da je  $\frac{v_B^2}{2g} - \frac{v_A^2}{2g} < 1,5 \text{ m}$  program ne predviđa potrebu za zračnim ventilom.

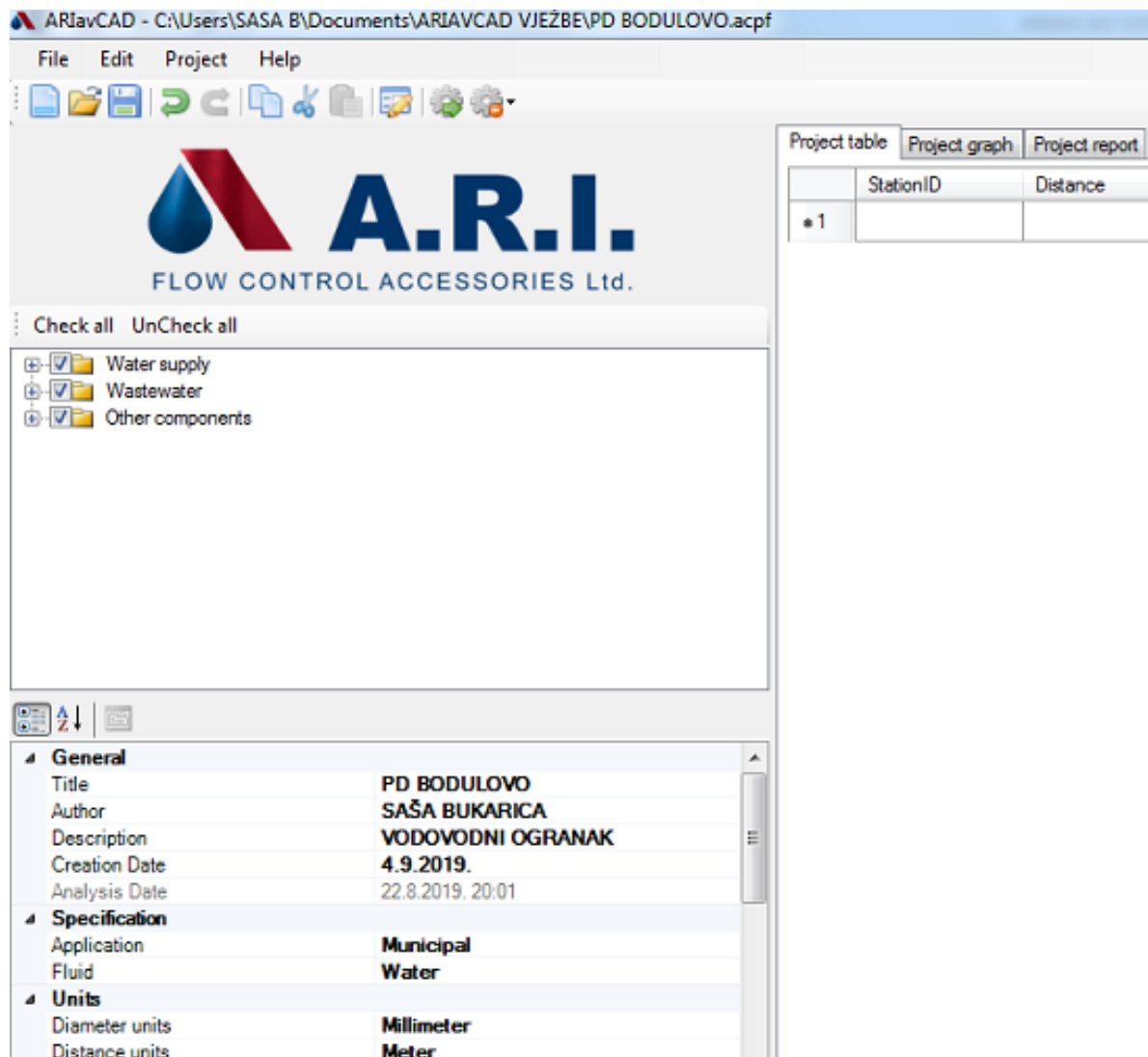
Analiza loma individualno analizira parove spojenih segmenata cjevovoda, na njihovim spojnim točkama, bez uzimanja u obzir uzvodnih i nizvodnih dijelova cjevovoda.

#### 4.1.4. Analiza strujanja zraka u slučaju pojave odvajanja vodenog stupca

Nagle promjene u brzinama strujanja vode uzrokovane zastojsima u radu pumpi, ili naglim zatvaranjem ventila, dovode do pojave odvajanja vodenog stupca, i povratnog strujanja uz naglu promjenu tlaka. Ventili su dimenzionirani na osnovu operativnog protoka u sistemu:  $Q_{\text{vode}}=Q_{\text{zraka}}$ .

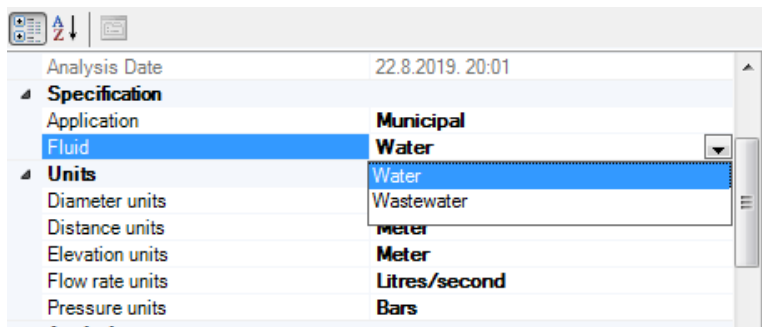
## 4.2. Analiza i odabir ventila pomoću ARIavCAD softvera

Prvi korak u radu je pokretanje programa, zatim odabirom naredbe „File“ snimimo novi projekt koji ćemo ovom prilikom nazvati PD Bodulovo, te unesemo generalne podatke o projektu, naslov, opis i autora.



U sljedećem koraku specificiramo o kojoj vrsti tekućine se radi i za koju namjenu, u našem slučaju se radi o vodoopskrbi pitkom vodom te biramo sljedeće:



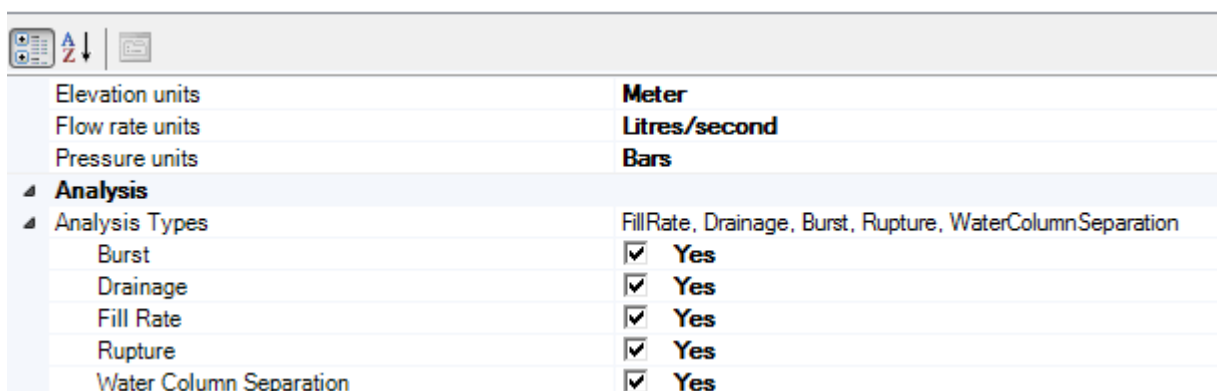


U slijedećem koraku biramo mjerne jedinice promjera cjevovoda, udaljenost, nadmorska visina, protoka tlaka, a u ovom slučaju smo odabrali slijedeće:

- Promjer cjevovoda [mm]
- Udaljenost [m]
- Nadmorska visina [m]
- Protok [l/s]
- Tlak [bar]



U slijedećem koraku je potrebno odabrati tip analize koju želimo provesti, uz mogućnost odabira samo jedne ili kombinacije više vrsta analiza. Program nudi mogućnost odabira slijedećih vrsta analiza čije smo polazne postavke ranije prikazali:



1. Analiza loma po punom presjeku cijevi (engl. Burst) određuje potreban dotok zraka u cjevovod u slučaju iznenadnog loma cjevovoda po punom presjeku. Budući da rezultati analize ponekad znaju biti ekstremni, mogu se ograničiti određivanjem parcijalnog kapaciteta „Burst ratio“, u ovom slučaju ćemo podesiti na 50%.

Elevation units	<b>Meter</b>
Flow rate units	<b>Litres/second</b>
Pressure units	<b>Bars</b>
<b>Analysis</b>	
Analysis Types	FillRate, Drainage, Burst, Rupture, WaterColumnSeparation
Burst	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Yes</b>
Drainage	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Yes</b>
Fill Rate	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Yes</b>
Rupture	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Yes</b>
Water Column Separation	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Yes</b>
Burst Ratio	<b>50.00 %</b>

2. Analiza kontroliranog ispuštanja (engl. Drainage) određuje potreban protok zraka radi sprječavanja pojave vakuuma u slučaju namjernog pražnjenja cjevovoda putem ispusnih ventila. Ispusni ventili se mogu slobodnim izborom pozicionirati na cjevovodu što ćemo prikazati naknadno.

3. Analiza strujanja zraka kod kontroliranog punjenja cjevovoda vodom (engl. Fill Rate) je osnovna analiza koju provodi program ARIlavCAD. Na osnovu brzine strujanja vode prilikom punjenja cjevovoda se određuje brzina protoka zraka koji napušta cjevovod putem zračnog ventila.

4. Analiza strujanja zraka u slučaju djelomičnog oštećenja cjevovoda u vidu pukotina (engl. Rupture) određuje količinu potrebnog zraka koji se usisava u cjevovod da bi se spriječila pojava vakuuma i hidrauličkog udara. Veličina pukotine se simulira preko dimenzije virtualnih ispusnih ventila (Rupture Ratio). Pozicioniranje virtualnih ispusnih ventila vrši program automatski sukladno algoritmima.

5. Analiza strujanja zraka u slučaju pojave odvajanja vodenog stupca (engl. Water Column Separation). Nagle promjene u brzinama strujanja vode uzrokovane zastojsima u radu pumpi, ili naglim zatvaranjem ventila, dovode do pojave odvajanja vodenog stupca, i povratnog strujanja uz naglu promjenu tlaka. Ventili su dimenzionirani na osnovu operativnog protoka u sistemu:  $Q_{\text{vode}}=Q_{\text{zraka}}$ .

U našem slučaju smo odabrali svih pet tipova analiza uz ograničenje loma na 50 % promjera cjevovoda.

U slijedećem koraku unosimo vrijednost brzine strujanja vode prilikom punjenja cjevovoda, preporuka je brzina 1 m/s:

Flow rate units	<b>Litres/second</b>
Pressure units	<b>MetersWater</b>
<b>Analysis</b>	
▶ Analysis Types	FillRate, Drainage, Burst, Rupture, WaterColumnSeparation
Burst Ratio	<b>50,00 %</b>
Filling velocity	<b>1,00 Meters/second</b>
Filling velocity units	<b>Meters/second</b>

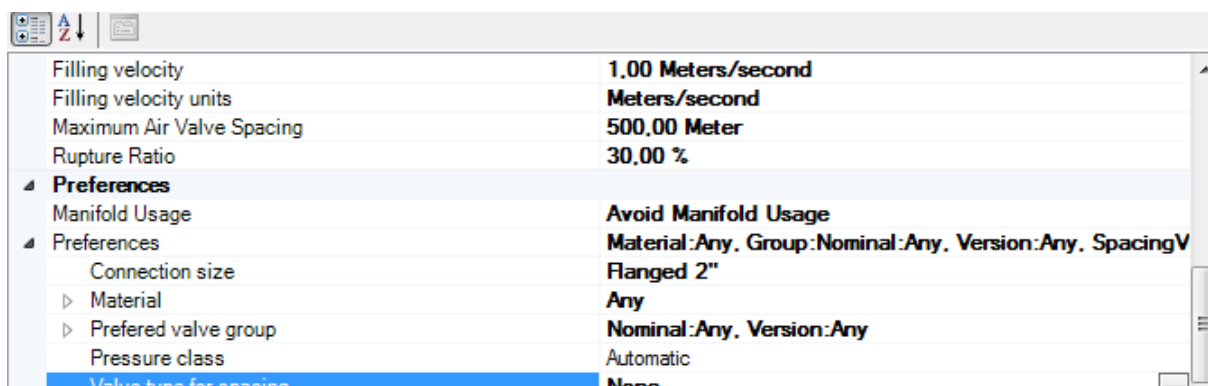
S namjerom sprječavanja akumulacije zraka i osiguranja učinkovitog strujanja u sistemu tijekom niske razine protoka (npr. tijekom noći), te u slučaju dugih ravnih dionica cjevovoda, razmak između zračnih ventila se podešava na vrijednosti maksimalne udaljenosti od 500-800 m. Unosimo vrijednost 500 m:

Flow rate units	<b>Litres/second</b>
Pressure units	<b>MetersWater</b>
<b>Analysis</b>	
▶ Analysis Types	FillRate, Drainage, Burst, Rupture, WaterColumnSeparation
Burst Ratio	<b>50,00 %</b>
Filling velocity	<b>1,00 Meters/second</b>
Filling velocity units	<b>Meters/second</b>
Maximum Air Valve Spacing	<b>500,00 Meter</b>

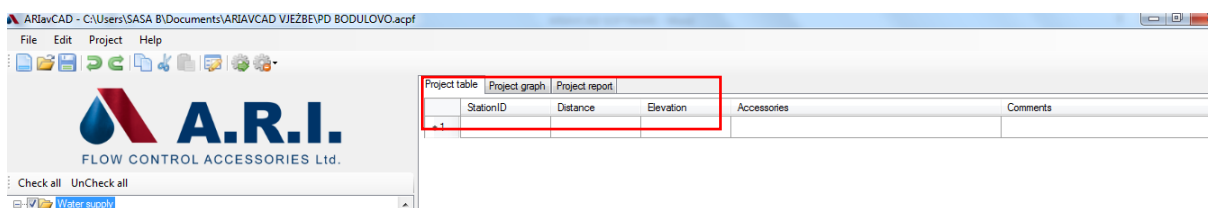
Unošenje vrijednosti Rupture Ratio je povezano s analizom strujanja zraka u slučaju djelomičnog oštećenja cjevovoda u vidu pukotina, određujemo vrijednost 30%, što označava 30% vrijednosti promjera zadanog cjevovoda:

Flow rate units	<b>Litres/second</b>
Pressure units	<b>MetersWater</b>
<b>Analysis</b>	
▶ Analysis Types	FillRate, Drainage, Burst, Rupture, WaterColumnSeparation
Burst Ratio	<b>50,00 %</b>
Filling velocity	<b>1,00 Meters/second</b>
Filling velocity units	<b>Meters/second</b>
Maximum Air Valve Spacing	<b>500,00 Meter</b>
Rupture Ratio	<b>30,00 %</b>

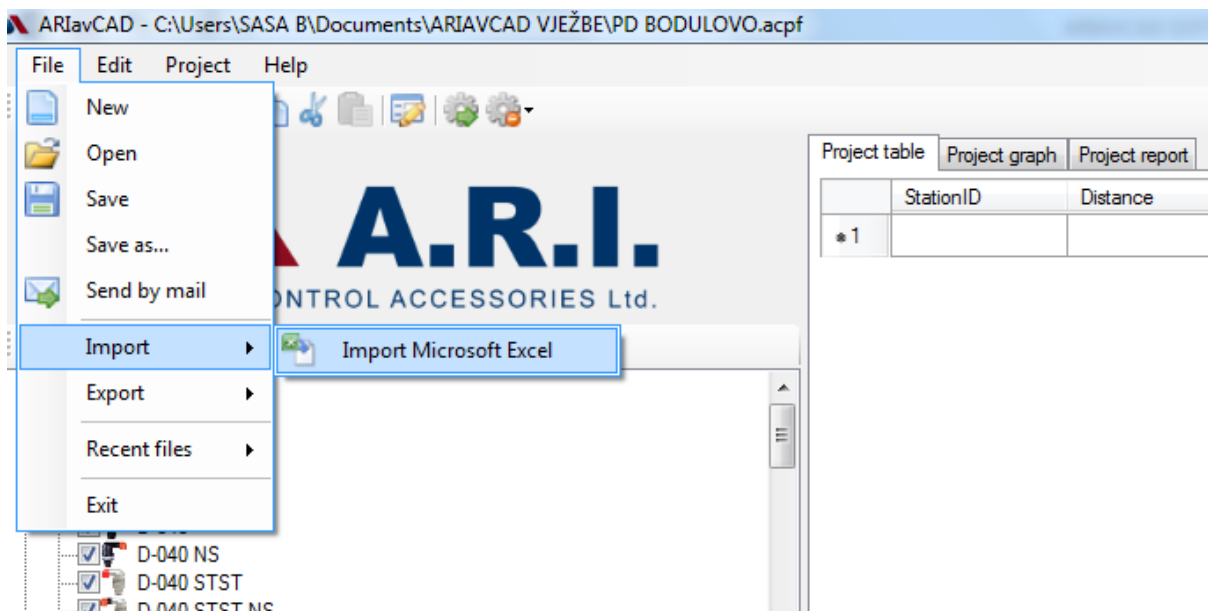
U slijedećem koraku unosimo dodatne projektne zahtjeve, u našem slučaju zračni ventili moraju imati spoj DN 50 mm (2") i moraju biti ugrađeni pojedinačno. Za pojedinačnu ugradnju u izborniku „Preferences“ odabiremo „Avoid Manifold Usage“, a za tip spoja „Connection size“ biramo „Flanged 2““.



U sljedećem koraku unosimo podatke o duljini cjevovoda, visini točaka na cjevovodu i međusobnoj udaljenosti, i to ručno upisujući podatke u radnu plohu „Project table“ ili importiranjem iz Excela ili AutoCAD programa:



U ovom slučaju importiramo podatke iz Excel tablice koju smo kreirali na osnovu uzdužnog profila cjevovoda (Prilog 1):



U prozoru „Data import wizard“ odaberemo Excel file iz kojeg preuzimamo podatke uređene na način da pojedini stupac odgovara traženom u „Data import wizardu“, Station name – naziv čvora, Elevation – kota nivelete ili nadmorska visina, Distance – stacionaža čvora tj. akumulirana udaljenost, Sectional distance – duljina dionice:

	A	B	C	D
1	NAZIV ČVORA	KOTA NIVELETE	STACIONAŽA ČVORA	DULJINA DIONICE
2	GC1	207,66	0	0
3	SC1	208,17	15,43	15,43
4	SC2	208,32	28,18	12,75
5	SC3	207,6	36,55	8,37
6	SC4	207,25	43,33	6,77
7	SC5	206,56	70,03	26,7
8	SC6	206,33	75,28	5,24
9	SC7	206,08	86,4	11,2
10	SC8	206,54	97,12	10,7
11	SC9	206,84	106,43	9,31
12	SC10	207,48	114,48	8,05
13	SC11	207,88	118,89	4,5

Sheet1

**Data Import wizard**

Select file to import: C:\Users\SASA B\Documents\ARIAVCAD VJ

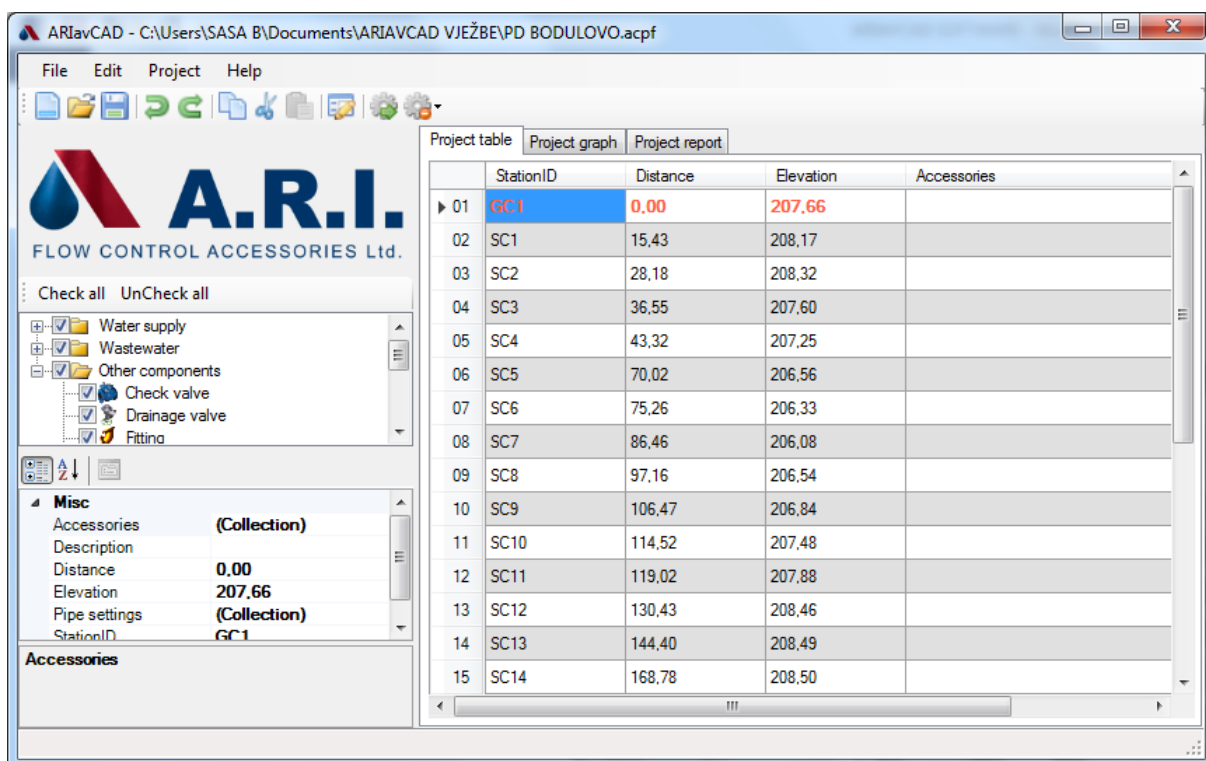
Select table to import: Sheet1\$

Select field mappings:

ColumnName	FieldName
NAZIV ČVORA	Station Name
KOTA NIVELETE	Elevation
DULJINA DIONICE	Sectional Distance
STACIONAŽA ČVORA	Distance

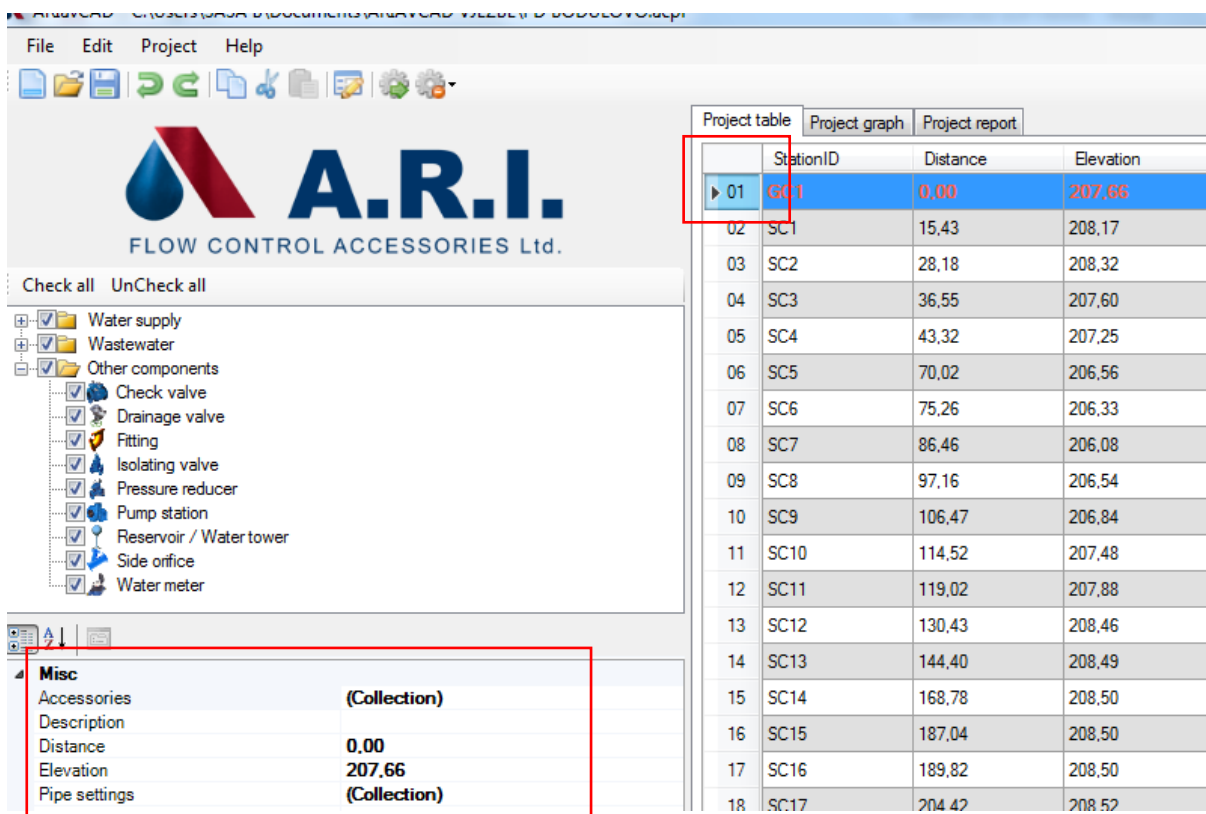
Filtering slope percentage: 0,0

Potvrdom odabranog na tipku ok podaci se importiraju na radnu plohu Project table:



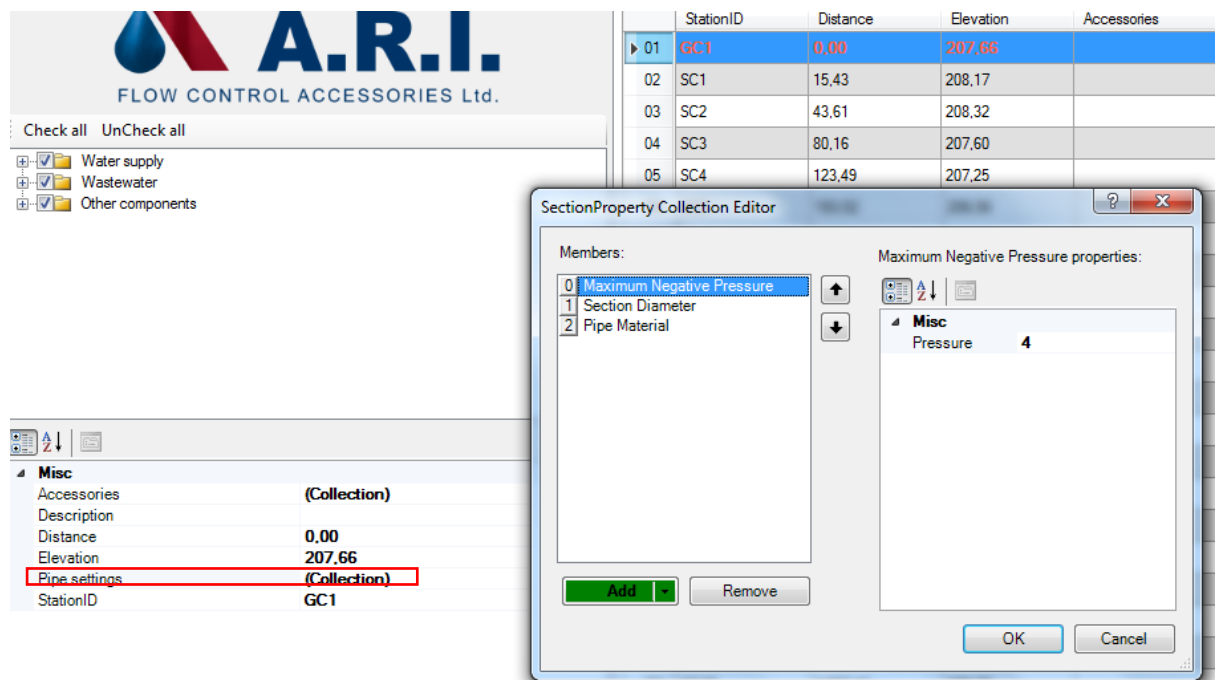
Dosada smo u program unijeli samo osnovne projektne podatke o udaljenostima među čvorovima i visinama, a u slijedećim koracima unosimo podatke o vrsti cijevi, ostalim hidromehaničkim uređajima i opremi kao što su ventili, pumpe i sl. Također unosimo podatke o protoku, tlaku i sl.

Klikom na broj reda označimo čvor za koji ćemo unositi dodatne podatke:

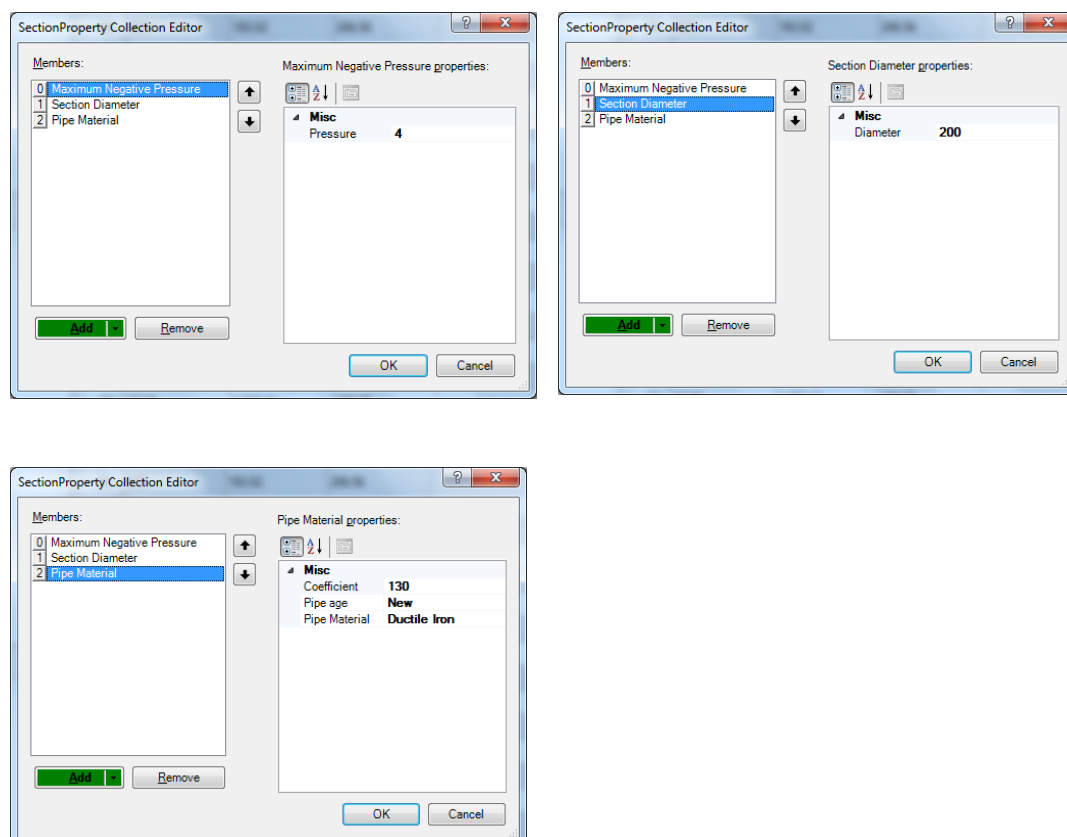




U prozoru lijevo odaberemo „Pipe settings“ čime nam otvara prozor u kojem unosimo podatke o maksimalnom negativnom tlaku, promjeru cjevovoda, i vrsti materijala .



U ovom slučaju se radi o duktilnim cijevima promjera DN 200 mm, a za maksimalnu vrijednost negativnog tlaka ostavljamo programski određenu vrijednost od 4 m.



Budući da se radi o istom profilu i vrsti cjevovoda po cijeloj duljini, nije potrebno unositi nove podatke za ostale sekcije cjevovoda.

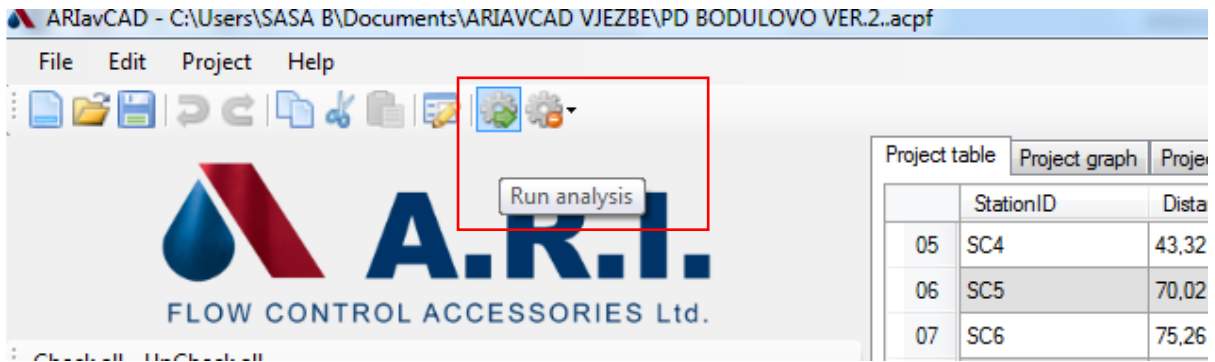
Budući da raspolažemo podacima u ulaznom tlaku i protoku na početnoj poziciji GC1 izlaznim tlaku i protoku na završnoj poziciji analiziranog segmenta GC3, dodajemo na te pozicije element Side orifice i unosimo podatke o tlaku i protoku:

StationID	Distance	Elevation	Accessories	Comments
01	GC1	0,00	207,66	
02	SC1	15,43	208,17	
03	SC2	28,1		
04	SC3	36,5		
05	SC4	43,3		
06	SC5	70,0		
07	SC6	75,2		
08	SC7	86,4		
09	SC8	97,1		
10	SC9	106,		
11	SC10	114,		
12	SC11	119,		
13	SC12	130,		
14	SC13	144,		
15	SC14	168,		
16	SC15	187,		
17	SC16	189,		
18	SC17	204,		

Na poziciji GC 3 unosimo negativnu vrijednost protoka jer se radi o istjecanju iz analiziranog dijela cjevovoda, a za vrijednost tlaka razliku u odnosu na početnu točku.

11	SC10	114,52		
12	SC11	119,02		
13	SC12	130,43		
14	SC13	144,40		
15	SC14	168,78		
16	SC15	187,04		
17	SC16	189,82		
18	SC17	204,42		
19	SC18	225,16		
20	GC2	227,87		
21	SC19	233,75		
22	SC20	252,26		
23	SC21	255,14		
24	SC22	270,24		
25	SC23	277,53		
26	SC24	292,95	199,54	
27	GC3	294,55	199,44	

Nakon što smo unijeli sve raspoložive podatke možemo provesti odabrane analize za odabir i pozicioniranje zračnih ventila:



Rezultati analize se mogu reprezentirati u vidu:

Project Table

Project Profil

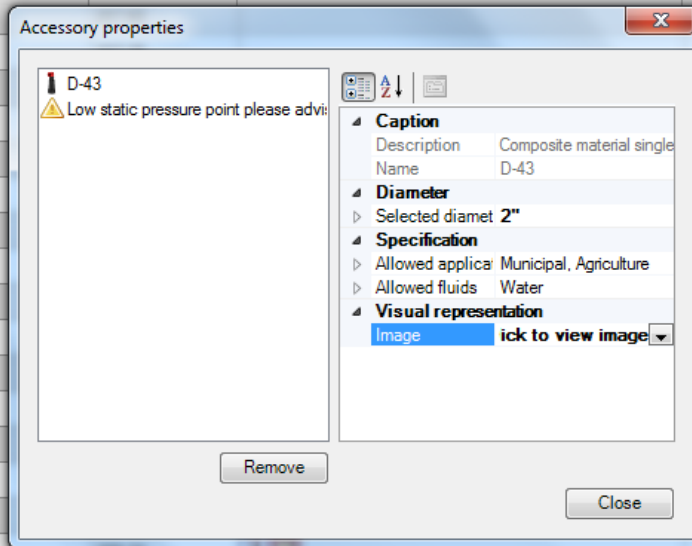
Project Report

Rezultati prikazani opcijom Project Table uključuju lokaciju, dimenziju i tip zračnog ventila koji je prikazan u koloni Accessories

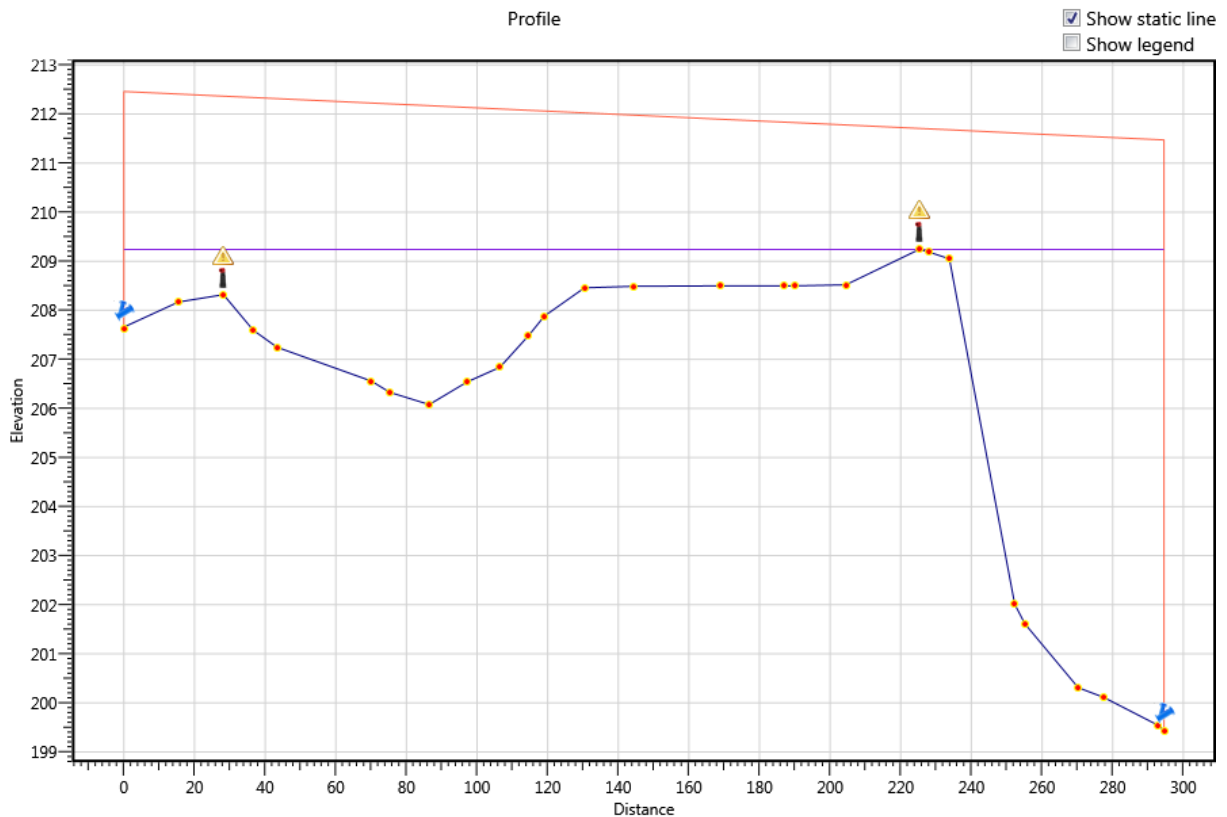
	StationID	Distance	Elevation	Accessories
01	<b>GC1</b>	<b>0,00</b>	<b>207,66</b>	
02	SC1	15,43	208,17	
03	SC2	28,18	208,32	
04	SC3	36,55	207,60	
05	SC4	43,32	207,25	
06	SC5	70,02	206,56	
07	SC6	75,26	206,33	
08	SC7	86,46	206,08	

Duplim klikom na ikonu zračnog ventila prikazuju se osnovni podaci o odabranom ventilu:

02	SC1	15,43	208,17	
03	SC2	28,18	208,32	
04	SC3	36,55		
05	SC4	43,32		
06	SC5	70,02		
07	SC6	75,26		
08	SC7	86,46		
09	SC8	97,16		
10	SC9	106,47		
11	SC10	114,52		
12	SC11	119,02		
13	SC12	130,43		
14	SC13	144,40		
15	SC14	168,78		
16	SC15	187,04		
17	SC16	189,82		
18	SC17	204,42		
19	SC18	225,16	205,24	
20	GC2	227,87	209,19	

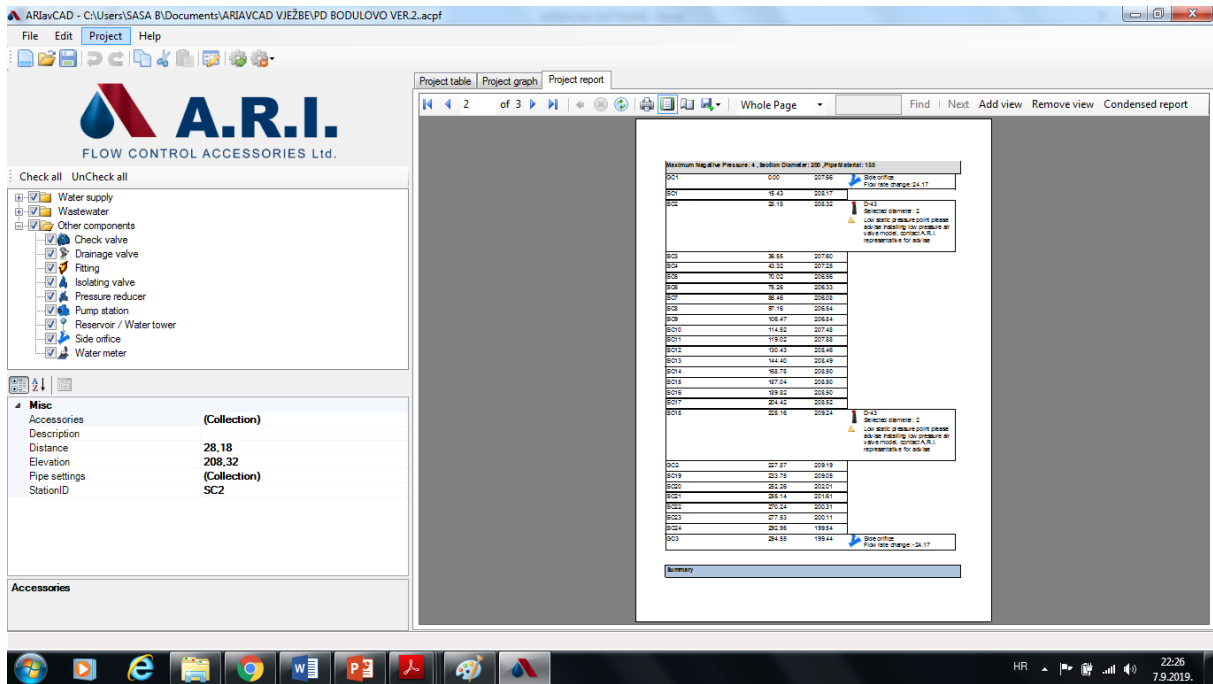


Ako želimo grafički prikaz rezultata koristimo opciju Project Profil:

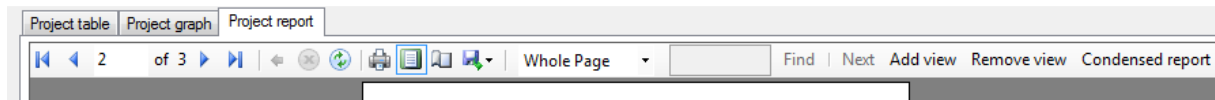


Prikaz se sastoji od uzdužnog profila cjevovoda (plava linija), hidrauličke gradijentne linije i statičke linije.

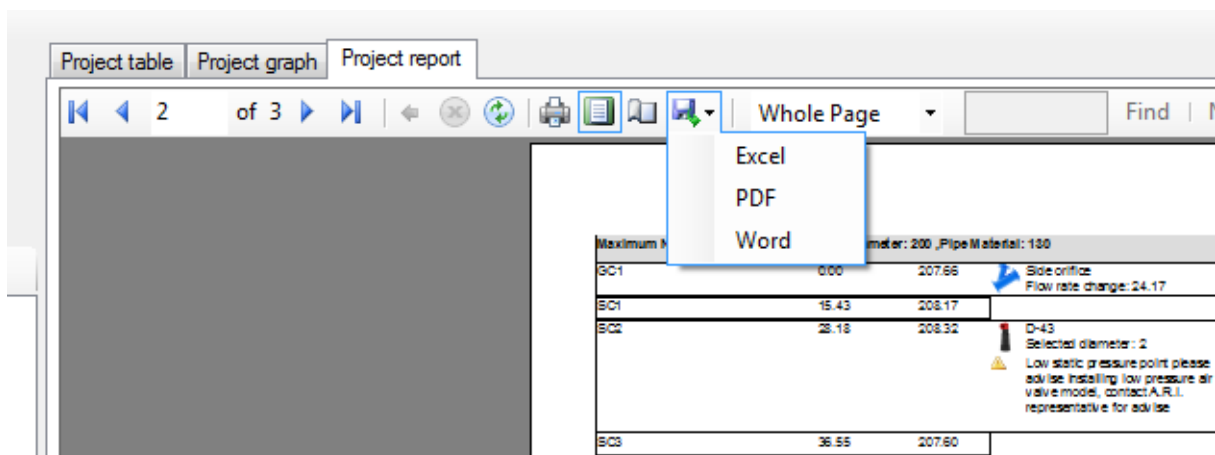
Opcija Project Report sažima cjelokupne podatke o provedenom izračunu :



Daljnja upotreba izvještaja, prikaz te izvoz u druge formate je omogućen putem funkcijskih tipki:



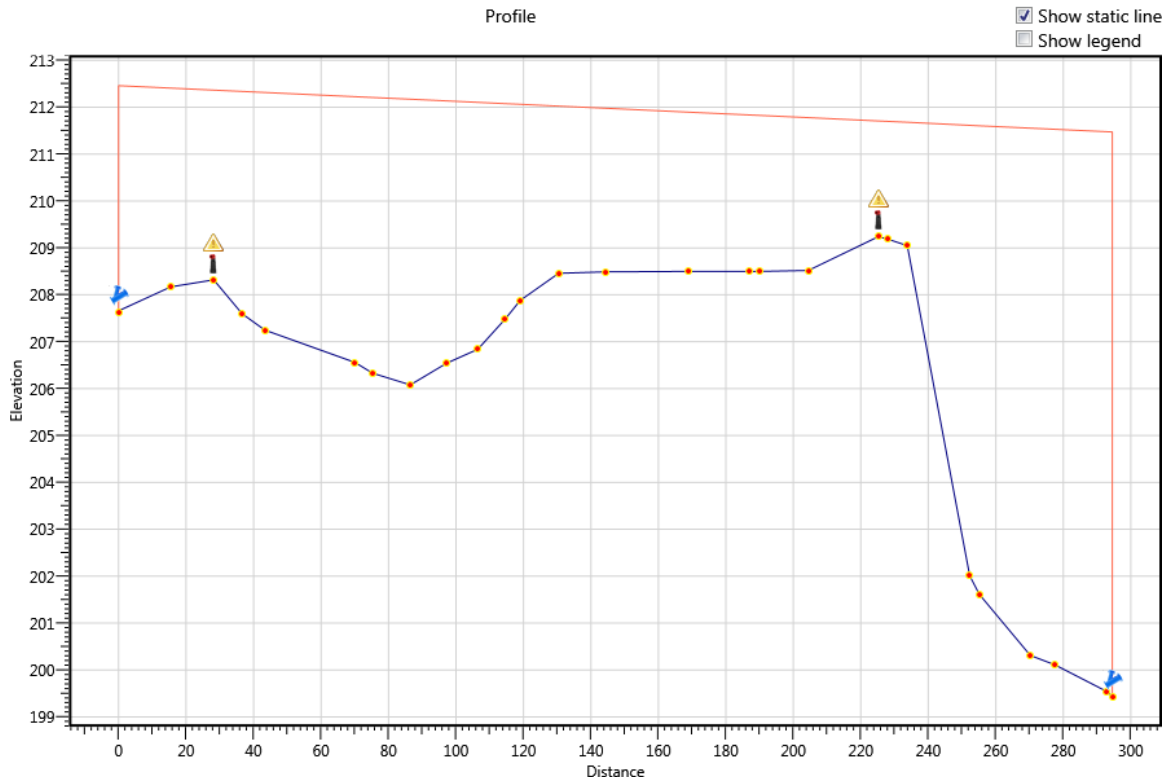
Izvještaj je moguće eksportirati u format Word, Excel ili PDF dokumenta:



### 4.3. Validacija rezultata ARIlavCAD softvera

Izvršenom analizom u programu ARIlavCAD dolazi se do odabira kombiniranih zračnih ventila tip D-43 DN 50 mm pozicioniranih na čvorišta: SC2, H=208,32 m.n.m. L=28,18 m, te SC18, H=209,24 m.n.m, L=225,31 m (slika 4.1).

Slika 4.1. Uzdužni profil cjevovoda ARIlavCAD izvještaj

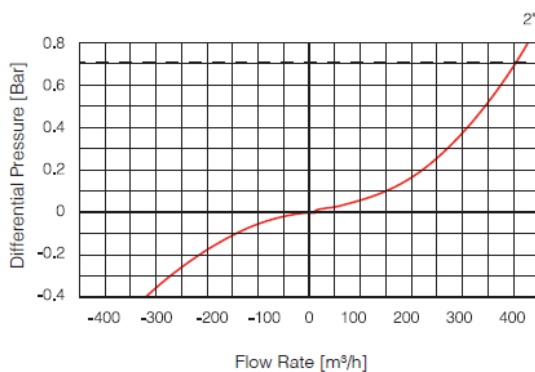


Izvor :Prilog 2. Izvještaj ARIlavcad projekt PD Bodulovo – obrada autora

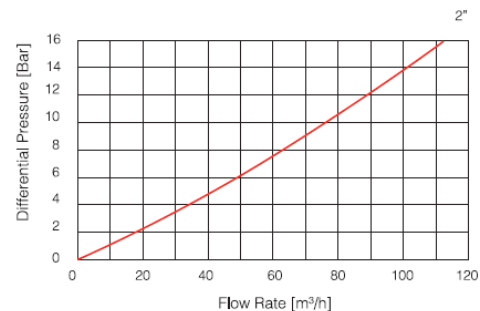
Iz kataloškog lista proizvoda (grafikon 4.2.) koji je dostupan na online katalogu preuzimamo podatke o kapacitetu zračnih ventila za provjeru rezultata programske analize:

Grafikon 4.2.kapacitet vakumske i automatske komponente zračnog ventila

AIR & VACUUM FLOW RATE



AUTOMATIC AIR RELEASE FLOW RATE



Izvor:[https://www.arivalves.com/products/water-supply/air-valves/item/d-43-combination-air-valve-barak-pro-2?category\\_id=44](https://www.arivalves.com/products/water-supply/air-valves/item/d-43-combination-air-valve-barak-pro-2?category_id=44) [pristupljeno 04.09.2019.]

Rezultate dobivene programskom analizom usporedit ćemo s izračunom prema American Water Works Association, AWWA Manual M51,(2001.) za provjeru automatske komponente ventila za ispuštanje malih količina zraka dok je cjevovod pod radnim tlakom.

Prema formuli za izračun strujanja zraka za automatsko ispuštanje zraka dok je cjevovod u funkciji vršimo izračun (Crane Ltd, 1999.):

$$Q = 0,3217Yd^2C \sqrt{\frac{\Delta PP'}{T_1 S_g}} \quad (4.5)$$

Q – protok[m<sup>3</sup>/min]

Y- faktor ekspanzije , 0,71 za protok zraka ( Technical Paper No.410, 1982)

d – promjer otvora [mm]

Prema dostupnim kataloškim podacima površina otvora automatske komponente zračnog ventila iznosi A= 11,9 mm<sup>2</sup>

Iz formule  $A = \frac{d^2 \pi}{4}$  slijedi d= 3,89 mm

C<sub>d</sub> – koeficijent ispuštanja 0,7 [-]

ΔP – diferencijalni tlak 0.47P' (za zvučno strujanje) [bar]

ΔP= 0,47 (4,8+1,01)= 2,73 bar

Prema projektnim podacima radni tlak sistema iznosi P<sub>r</sub>= 4,8 bar

P' – apsolutni tlak cjevovoda (atmosferski tlak + tlak u cjevovodu) [bar]

P'= 1,01+4,8= 5,81 bar

T- temperatura , T= 273+t [K],

T= 273+ 15= 288 K

S<sub>g</sub> specifična gravitacija, za zrak= 1,0 [-]

Implementiramo poznate podatke, te dobivamo slijedeći rezultat:

Q=0,56777 m<sup>3</sup>/min= 34,0667 m<sup>3</sup>/h

Uvidom u grafikon 4.2. kapaciteta strujanja odabranog zračnog ventila pri diferencijalnom tlaku od 4,8 bar protok strujanja zraka iznosi Q= 40 m<sup>3</sup>/h što predstavlja zadovoljavajuću vrijednost.

U slijedećem koraku provjeravamo vakuumski kapacitet ventila tj. kapacitet ventila u slučaju gravitacijskog istjecanja po punom presjeku cijevi. Gravitacijski tok vode se može odrediti iz Darcy-Weisbach formule (Val-Matic Valve&Mfg Corp, 2018.):

$$v = (2gH/K)^{1/2} \quad (4.6)$$

gdje je :

$v$  – brzina strujanja [m/s]

$g$  – ubrzanje sile gravitacije [ $m/s^2$ ]

$H$  – visinska razlika [m]

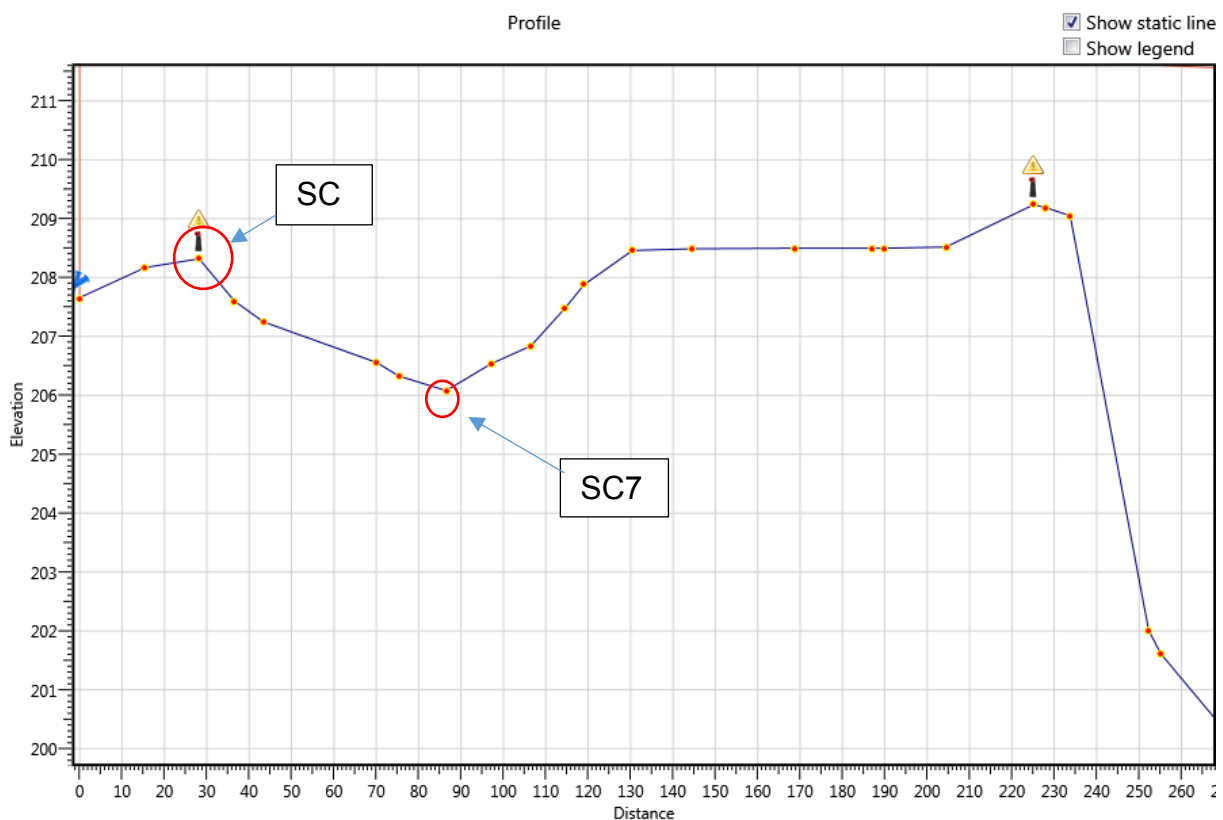
$K$  – koeficijent otpora  $K=f*L/d + 2,5$  [-]

$f$  – faktor trenja cijevi (željezo= 0,019, čelik= 0,013, plastika = 0,007) [-]

$L$  - duljina dionica cjevovoda [m]

$d$  – unutarnji promjer cijevi [m]

Slika 4.2. Uzdužni profil cjevovoda ARIacCAD izvještaj



Izvor :Prilog 2. Izvještaj ARIacCAD projekt PD Bodulovo – obrada autora

Za razmatranje uzimamo dionicu cjevovoda od pozicije zračnog ventila SC2 208,32 m.n.m. do pozicije muljnog ispusta SC7 206,08 m.n.m ukupne duljine 58,28 m (slika 5.2.). Poznati su nam slijedeći podaci:



$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$H = 208,32 - 206,08 = 2,24 \text{ m}$$

$$K - \text{koeficijent otpora } K = f \cdot L/d + 2,5$$

$$K = (0,019 \cdot 58,28 / 0,2032) + 2,5 = 7,949$$

$$f - \text{faktor trenja cijevi (željezo} = 0,019, \text{ čelik} = 0,013, \text{ plastika} = 0,007) [-]$$

$$L = 58,28 \text{ m}$$

$$d = 0,2032 \text{ m}$$

$$v = ((2 \cdot 9,81 \cdot 2,24) / 7,949)^{1/2} = \underline{2,35 \text{ m/s}}$$

$$Q = v \cdot A = (v \cdot d^2 \cdot \pi) / 4 = (2,35 \cdot 0,2032^2 \cdot \pi) / 4 = 0,0762 \text{ m}^3/\text{s} = \underline{274,35 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Uvidom u grafikon 4.2. odabranog zračnog ventila koja se odnosi na vakuumsku komponentu, traženi protok zraka je zadovoljen pri diferencijalnom tlaku od -0,3 bara. U programskom izračunu smo ograničavali poprečni presjek istjecanja na 30% (Rupture ratio) ili 50 % (Burst ratio). U tom slučaju usporedivi rezultati bi iznosili:

$$\text{Rupture ratio (30\%)} \quad Q = 0,3 \cdot 274,35 = 83,30 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Burst ratio (50\%)} \quad Q = 0,5 \cdot 274,35 = 137,175 \text{ m}^3/\text{h}$$

Odbrani zračni ventil zadovoljava traženi kapacitet vakuumske komponente.

U slučaju kontroliranog punjenja preporučenom brzinom od 1 m/s i unutarnjeg promjera cjevovoda ID 0,2032 m vršimo proračun protoka (Zloczower, 2004.):

$$Q_f = v_f \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.7)$$

$Q_f$  - kapacitet zračnog ventila [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$v_f$  – brzina punjenja cjevovoda [ $\text{m/s}$ ]

$D$  – unutarnji promjer cjevovoda [ $\text{m}$ ]

$$Q = (1 \cdot 3,14 \cdot 0,2032^2) / 4 = 0,0324 \text{ m}^3/\text{s} = \underline{116 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Odabrani zračni ventil zadovoljava izračunati protok pri diferencijalnom tlaku od 0,1 bar pri čemu je protok 150  $\text{m}^3/\text{h}$  (grafikon 4.2.).

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je obrađena primjena zračnih ventila u vodoopskrbnom cjevovodu kao načinu upravljanja pojavom zraka u cjevovodu i sprječavanju negativnih posljedica te pojave. U prvom djelu rada iznesene su osnovne teorijske postavke i zaključci određenih empirijskih istraživanja o strujanju smjese vode i zraka, uz opis uzroka pojave zraka u cjevovodu i negativnih posljedica koje pojava zraka uzrokuje, kao što su: pad tlaka u cjevovodu, povratni udar (strujanje) zraka, hidraulički udar, smanjenje učinkovitosti rada pumpi, korozija i kavitacija.

Iz proučene dostupne literature o upravljanju zrakom u vodoopskrbnim cjevovodima, izvodi se zaključak o zračnim ventilima kao trenutno jednom od ekonomičnijih i učinkovitijih hidromehaničkih alata za upravljanje zrakom u cjevovodu.

Opisane su tri osnovne vrste zračnih ventila, automatski, vakuumski i kombinirani, njihovo funkcioniranje u sklopu cjevovoda, te osnovna načela instalacije i održavanja.

Nadalje se iz literature zaključuje da učinkovito upravljanje zrakom korištenjem zračnih ventila ovisi o pravilnom odabiru, pozicioniranju i dimenzioniranju ventila. Što se tiče pozicioniranja ventila i metoda izračuna kapaciteta zračnog ventila, iz literature se zaključuje da ne postoji univerzalna metoda, nego smjernice, koje se uglavnom oslanjaju na AWWA standard C512, i AWWA Manual M51, dok su različiti proizvođači razvili svoje metode izračuna, i to uglavnom u vidu softvera za odabir, pozicioniranje i dimenzioniranje zračnih ventila.

U nastavku rada je obrađen program ARLavCAD proizvođača zračnih ventila tvrtke A.R.I. iz Izraela. Prikazan je u najvažnijim koracima redoslijed unošenja potrebnih podataka za izračun, vrste analiza koje se nude, i konačan rezultat u vidu izvještaja sa specifikacijom odabranih ventila i pozicijama ugradnje na cjevovodu. Za prikaz je izložen primjer odabira ventila za cjevovodni vodoopskrbni priključak Poduzetničke zone Bodulovo u Rijeci. Vodovodni ogranak je projektiran od DUCTIL vodovodnih cijevi DN 200 mm u ukupnoj duljini od cca 295,00 m, sa radnim tlakom 4,8 bar i protokom  $Q = 24,17$  l/s. Projektom predviđene pozicije za ugradnju zračnih ventila se podudaraju sa programskim odabirom. Odabrani su kombinirani zračni ventili tip D-43, proizvođač A.R.I., sa kombiniranom automatskom i vakuumskom zračnom funkcijom. Usporednom računskom provjerom je utvrđeno da karakteristike protoka

zračnih ventila zadovoljavaju tražene parametre kod punjenja, pražnjenja i operativnog funkcioniranja cjevovoda.

Kao dodatna mjera provjere učinkovitosti odabranih ventila, predlaže se provedba simulacije, puknuća na cjevovodu ili hidrauličkog udara u kompatibilnom software-u za simulacije prijelaznih strujanja kao npr. softver Pipe2018 (KYPipe, 2019.).

Kao završna mjera provjere učinkovitosti, predlaže se vršenje mjerenja radnih parametara tlaka i protoka nakon ugradnje odabranih zračnih ventila, i usporedba sa projektnim parametrima.

## 6. LITERATURA

- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION-AWWA, (2001.) *Manual of Water Supply Practices M51*
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION-AWWA, (2013.), *Manual M11 Steel Pipe - A guide for Design and Installation*
- CRANE LTD., (1999.) *Flow of fluids through valves, fittings, and pipe-SI edition*
- ESTRADA O.P., (2007.) *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*, Stuttgart: Inst. für Wasserbau
- HAM BAKER GROUP, (2019.), *Working with air valves*, [online] Iwl Flow Control, Dostupno na <http://www.hambaker.co.uk/> [pristupljeno 21.7.2019]
- LANDON, P.O., (1997.) *Air in pipelines: sources, system impact, removal by air valves*, Val-Matic Valve & Mfg. Corp.
- LAUCHLAN C. et al (2005.) *Air in pipelines-literature review*, Hr Wallingford
- LZ Miroslav Krleža *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje* (2019)
- ZLOCZOWER N. (2004.) Pressure Surges and Air Valve Specification, Location, and Sizing, *Prezentirano na Workshop on Air Valves, WL Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands*, [online] dostupno na <https://www.arivalves.com/library/articles/> [pristupljeno 15.08.2019.]
- NAYYAR M.L., (2000.) *Piping Handbook*, Seventh Edition Mc-Graw-Hill
- VAL-MATIC VALVE & MFG. CORP., (2018.) *Theory, Application, and Sizing of Air Valves*,
- VAL-MATIC VALVE & MFG. CORP., (2008), *Air Valves*, Val-matic bulletin 1500
- VAN VUUREN S.J., VAN DIJK M., (2012.) *The discontinuity required at an air valve or vent for effective pipeline de-aeration*, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol 54 No 2, 2012, Pages 94–100, Paper 630
- VUKOVIĆ Ž., HALKIJEVIĆ I., (2011.), Kavitacija u centrifugalnim crpkama, *Građevinar* 63 1, 11-17

### INTERNET STRANICE:

<http://belzona.hr/tag/kavitacija/> [pristupljeno 22.08.2019.]

<http://ecat.arivalves.com/catalogue/product/52338> [pristupljeno 15.08.2019.]

<http://ecat.arivalves.com/catalogue/product/66167> [pristupljeno 15.08.2019.]

<http://ecat.arivalves.com/catalogue/product/71318> [pristupljeno 15.08.2019.]

<http://kypipe.com/surge/> [pristupljeno 10.09.2019.]

<https://authors.library.caltech.edu/25019/1/chap4.htm> [pristupljeno 25.07.2019.]

<https://img.ksl.com/slc/2512/251280/25128082.jpeg?filter=ksl/img614> [pristupljeno 27.7.2019.]

[https://www.arivalves.com/products/water-supply/air-valves/item/d-43-combination-air-valve-barak-pro-2?category\\_id=44](https://www.arivalves.com/products/water-supply/air-valves/item/d-43-combination-air-valve-barak-pro-2?category_id=44) [pristupljeno 04.09.2019.]

<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=65155>, [pristupljeno 21.07.2019.]

[https://www.engineeringtoolbox.com/air-solubility-water-d\\_639.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-solubility-water-d_639.html) [pristupljeno 21.07.2019.]

<http://www.hambaker.co.uk/sites/default/files/Working%20with%20Air%20Valves.pdf> [pristupljeno 21.7.2019]

<https://www.valmatic.com/products/air-valves/air-vacuum-clean-water#16637-technical-data> [pristupljeno 15.08.2019.]

## 7. POPIS SIMBOLA

A	površina/presjek cijevi [m <sup>2</sup> ]
C	Hazen-Williams koeficijent
C <sub>0</sub> <sup>1/2</sup>	funkcija oblika zračnog džepa, konstanta za dužinu džepa L≥1,5D
C <sub>d</sub>	ispusni koeficijent [-]
D	unutarnji promjer cijevi [m] [mm]
d	promjer otvora [mm]
D <sub>D</sub>	promjer ispusnog ventila [m]
f	faktor trenja cijevi (željezo=0,019, čelik=0,013, plastika =0,007) [-]
g	ubrzanje sile gravitacije [m/s <sup>2</sup> ]
H	visinska razlika [m]
K	koeficijent otpora $K=f*L/d + 2,5$ [-]
L	duljina dionica cjevovoda [m]
m <sub>a</sub>	masa zraka [kg]
m <sub>w</sub>	masa vode [kg]
P	tlak [Pa]
P <sub>·</sub>	apsolutni tlak cjevovoda (atmosferski tlak + tlak u cjevovodu) [bar]
P <sub>c</sub>	tlak implozije [Pa]
Q	volumni protok [m <sup>3</sup> /min]
Q <sub>D</sub>	volumni protok zraka [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>f</sub>	kapacitet zračnog ventila [m <sup>3</sup> /s]
S	nagib cijevi [-]
s <sub>a</sub>	omjer topljivosti [-]
SF	sigurnosni faktor[-]
S <sub>g</sub>	specifična gravitacija, za zrak=1,0 [-]
T	temperatura [K]
Ts	debljina stijenke cijevi [mm]
v	brzina strujanja [m/s]
V <sub>critical</sub>	kritična brzina za uklanjanje zraka [m/s]
v <sub>f</sub>	brzina punjenja cjevovoda[m/s]
v <sub>min</sub>	minimalna srednja brzina potrebna za gibanje volumena zraka [m/s]
Y	faktor ekspanzije , 0,71 za protok zraka ( Technical Paper No.410, 1982)
Δh	visinska razlika između zračnog i ispusnog ventila [m]
ΔP	diferencijalni tlak [Pa]

## 8. POPIS SLIKA

Slika 2.1. Gravitacijski, tlačni i kombinirani vodoopskrbni sustav

Slika 2.2. Pojava vrtloženja na usisu pumpe

Slika 2.3. Vertikalni obrasci strujanja

Slika 2.4. Horizontalni obrasci dvofaznog strujanja

Slika 2.5. Djelovanje sila na zračni džep u cjevovodu sa negativnim nagibom

Slika 2.6. Zračni džepovi u gravitacijskom cjevovodu

Slika 2.7. Zračni džepovi u tlačnom cjevovodu

Slika 2.8. Hidraulički skok u cjevovodu

Slika 2.9. Usisno zvono oštećeno kavitacijskom erozijom

Slika 2.10. Kolaps cijevi u SAD, 1820 mm čelična cijev

Slika 3.1. Prikaz 3 faze rada vakuumnog zračnog ventila

Slika 3.2. Elementi vakuumnog ventila

Slika 3.3. Ventil K-060 NS

Slika 3.4. Princip rada zračnih vakumskih non-slam ventila

Slika 3.5. Dijelovi automatskog zračnog ventila

Slika 3.6. Kombinirani zračni ventili, jednostruko i odvojeno kućište

Slika 3.7. Kombinirani zračni ventil A.R.I. D-050

Slika 3.8. Primjer lokacija zračnih ventila na cjevovodu

Slika 3.9. Instalacija automatskog zračnog ventila

Slika 3.10. Instalacija vakuumnog zračnog ventila

Slika 3.11. Instalacija zračnog ventila

Slika 4.1. Uzdužni profil cjevovoda ARIavCAD izvještaj

Slika 4.2. Uzdužni profil cjevovoda ARIacCAD izvještaj

## **9. POPIS TABLICA I GRAFIKONA**

### **9.1. Popis tablica**

Tablica 2.1. Topljivost zraka u vodi

Tablica 3.1. Kapacitet zračnog ventila ( $m^3/min$ )  $C_d=0,7$

Tablica 3.2. Instalacija automatskog zračnog ventila

Tablica 3.3. Instalacija vakuumskog zračnog ventila

### **9.2. Popis grafikona**

Grafikon 2.1. Topljivost zraka u vodi

Grafikon 3.1. Krivulja protoka zraka s obzirom na diferencijalni tlak zračnih vakuumskih ventila

Grafikon 4.2. Kapacitet vakumske i automatske komponente zračnog ventila



**PRILOG 1. EXCEL TABLICA PD BODULOVO**

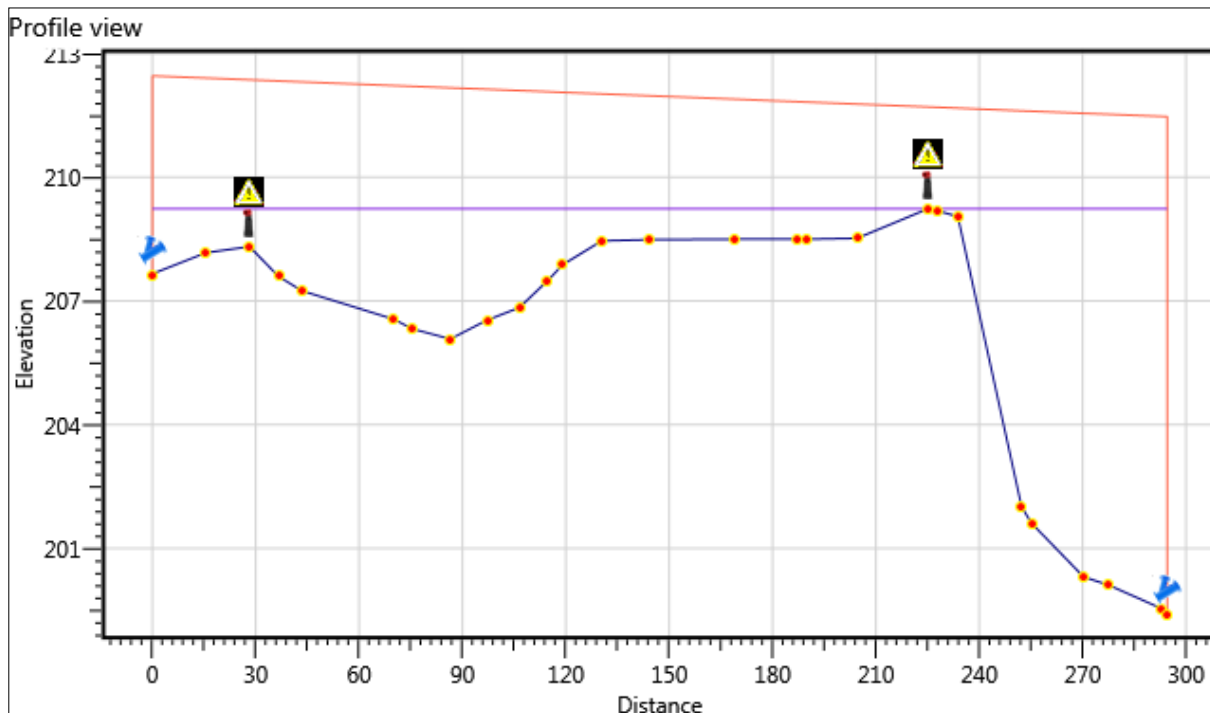
NAZIV ČVORA	KOTA NIVELETE	STACIONAŽA ČVORA	DULJINA DIONICE
GC1	207,66	0	0
SC1	208,17	15,43	15,43
SC2	208,32	28,18	12,75
SC3	207,6	36,55	8,37
SC4	207,25	43,33	6,77
SC5	206,56	70,03	26,7
SC6	206,33	75,28	5,24
SC7	206,08	86,4	11,2
SC8	206,54	97,12	10,7
SC9	206,84	106,43	9,31
SC10	207,48	114,48	8,05
SC11	207,88	118,89	4,5
SC12	208,46	130,39	11,41
SC13	208,49	144,36	13,97
SC14	208,5	168,74	24,38
SC15	208,5	186,99	18,26
SC16	208,5	189,77	2,78
SC17	208,52	204,38	14,6
SC18	209,24	225,12	20,74
GC2	209,19	227,83	2,71
SC19	209,05	233,71	5,88
SC20	202,01	252,22	18,51
SC21	201,61	255,1	2,88
SC22	200,31	270,2	15,1
SC23	200,11	277,49	7,29
SC24	199,54	292,92	15,42
GC3	199,44	294,15	1,6

## PRILOG 2. ARIavCAD IZVJEŠTAJ

### ARIavCAD project: PD BODULOVO





#### VODOVODNI OGRANAK

Report date:	<b>9/14/2019 8:36:33 AM</b>	Project date:	<b>9/4/2019</b>
Designer:	<b>SAŠA BUKARICA</b>	Distance units:	<b>Meter</b>
Application:	<b>Municipal</b>	Elevation units:	<b>Meter</b>
Fluid type:	<b>Water</b>	Diameter units:	<b>Millimeter</b>
Analysis type:	<b>FillRate, Drainage, Burst, Rupture, WaterColumnSeparation</b>	Flow units:	<b>Litres/second</b>
Burst ratio:	<b>50%</b>	Pressure units:	<b>MetersWater</b>
Rupture ratio:	<b>30%</b>	Manifold usage:	<b>Avoid Manifold Usage</b>




**ARIavCAD does not perform water hammer or surge analysis. A.R.I. Flow Control Accessories, or its representatives, are not responsible for any damages resulting from actions taken in response to ARIavCAD analysis results.**  
**Clarification: ARIavCAD analysis assumes full-pipe pressurized flow in all pipe sections. Pipe sections with partial flow, either constant or intermittent, require special treatment, not covered by ARIavCAD. ARIavCAD analysis is suitable only to A.R.I air valves !!**

Station ID	Distance	Elevation	Accessories
------------	----------	-----------	-------------

Maximum Negative Pressure: 4 ,Section Diameter: 200 ,Pipe Material: 130			
GC1	0.00	207.66	 Side orifice Flow rate change: 24.17
SC1	15.43	208.17	
SC2	28.18	208.32	 D-43 Selected diameter: 2
SC3	36.55	207.60	
SC4	43.32	207.25	
SC5	70.02	206.56	
SC6	75.26	206.33	
SC7	86.46	206.08	
SC8	97.16	206.54	
SC9	106.47	206.84	
SC10	114.52	207.48	
SC11	119.02	207.88	
SC12	130.43	208.46	
SC13	144.40	208.49	
SC14	168.78	208.50	
SC15	187.04	208.50	
SC16	189.82	208.50	
SC17	204.42	208.52	
SC18	225.16	209.24	 D-43 Selected diameter: 2
GC2	227.87	209.19	
SC19	233.75	209.05	
SC20	252.26	202.01	
SC21	255.14	201.61	
SC22	270.24	200.31	
SC23	277.53	200.11	
SC24	292.95	199.54	
GC3	294.55	199.44	 Side orifice Flow rate change: -24.17

### Summary

Quantity	Accessory name
2	 D-43 2"

## PRILOG 3. UZDUŽNI PROFIL

