

Vodni udar u tlačnim kanalizacijskim cjevovodima

Martina Tadić¹, Goran Gjetvaj²

¹HIDROPROJEKT-ING projektiranje d.o.o., Draškovićeve 35/I, 10000 Zagreb

² GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Sažetak

Uključivanje i/ili isključivanje crpki kao i naglo otvaranje ili zatvaranje ventila u tlačnim cjevovodima uzrokuju promjene protoka. Kod naglih promjena protoka se dio kinetičke energije pretvara u unutarnju energiju koja se manifestira kroz znatnu promjenu tlaka. Ova pojava se naziva vodni udar a najčešće se javlja i istražuje u cjevovodima koji su izgrađeni za potrebe vodoopskrbe i energetike. Razvoj crpki i druge hidrotehničke opreme, te potreba prikupljanja i pročišćavanja otpadnih voda u područjima u kojima dosad, zbog konfiguracije terena nisu sagrađeni klasični, gravitacijski sustavi odvodnje otpadnih voda je još više potakla projektiranje i građenje tlačnih cjevovoda u sustavima odvodnje otpadne vode. Prilikom projektiranja tlačnih kanalizacijskih cjevovoda treba voditi brigu o nizu čimbenika. Između ostalog i o promjenama tlaka što je posljedica naglog uključivanja ili isključivanja crpki te mogućnosti pojave nedovoljnog vremenskog razdoblja između isključivanja i ponovnog uključivanja crpki. Svi navedeni čimbenici mogu uzrokovati oštećenja cijevi.

Ovim radom su istaknute specifičnosti tlačnih kanalizacijskih cjevovoda u odnosu na dosad učestalo građene tlačne vodoopskrbne sustave. Istaknuta je velika mogućnost pojave opasnog podtlaka te specifičnosti vezane uz minimalne potrebne brzine toka kako bi se izbjeglo taloženje, kao i mogućnosti razdvajanja plinova iz efluenta. U radu su prikazani primjeri iz prakse za koje je izvršeno numeričko modeliranje, odabir adekvatne zaštite tlačnih kanalizacijskih cjevovoda te projektiranje.

Ključne riječi: vodni udar; tlačni kanalizacijski cjevovodi; zračni ventil; modeliranje; projektiranje

Water hammer in pumped sewer mains

Abstract

Switching the pumps on and/or off as well as sudden opening or closing the valves in pumped mains lead to changes in flow. With sudden changes in flow, one part of kinetic energy is transformed into internal energy which manifests itself through a substantial change in pressure. This phenomenon is called water hammer and develops most often in the mains built for water supply and power generation purposes. The development of pumps and other hydraulic equipment and the need to collect and treat wastewater in the areas where conventional gravity sewer systems haven't been built so far due to configuration of the terrain have prompted the design and construction of pumped mains within sewer systems. When designing pumped sewer mains, a number of factors have to be considered; among other things, changes in pressure as the result of suddenly switching the pumps on or off and the possibility of not enough time between switching the pump off and switching it on again. All of these factors may cause pipe damage.

This paper highlights the specifics of pumped sewer mains compared to the pumped water supply systems that have so far been frequently built. It points to a high possibility of dangerous negative pressure forming and the specifics concerning minimum flow rates required in order to avoid settling, as

well as the possibilities of separating gases from the effluent. The paper presents examples from the practice accompanied by numerical modelling, selection of adequate protection for pumped sewer mains, and designing.

Key words: water hammer, pumped sewer mains, air valve, modelling, designing

1 Uvod

Nužnost zaštite okoliša a time i potreba za pročišćavanjem otpadnih voda obvezuje izgradnju sve većih i kompleksnijih sustava odvodnje otpadnih voda. Ovisno o konfiguraciji terena kod nas je najčešća praksa izgradnje gravitacijskih sustava odvodnje, a manje su zastupljeni tlačni i vakuumski sustavi. Gravitacijski sustavi odvodnje tj. gravitacijski kanalizacijski cjevovodi se grade gdje god uvjeti na terenu dozvoljavaju i gdje god se mogu ispuniti tehnički zahtjevi, no na pojedinim dionicama trase potrebno je precrpiti vodu na višu kotu terena što zahtjeva izgradnju crpnih stanica i tlačnih cjevovoda. Projektiranje i izgradnja tlačnih kanalizacijskih cjevovoda je zahtjevana zadaća te je prilikom dimenzioniranja cjevovoda i crpnih stanica potrebno voditi računa o nizu faktora koji utječu na ispravan rad i funkcionalnost tog dijela sustava. Jedan od čimbenika o kojem je potrebno voditi računa prilikom projektiranja tlačnih kanalizacijskih cjevovoda je i analiza toga dijela sustava na prijelazne pojave tj. na pojavu vodnog udara. Takva analiza pri projektiranju je ključna za ispravno funkcioniranje sustava.

Prilikom dimenzioniranja tlačnih dionica na gravitacijskom sustavu odvodnje potrebno je pravilno dimenzionirati crpne stanice s popratnim crpnim bazenima. Izračun veličine dotoka otpadne vode u crpni bazen te veličina crpnog bazena ključni su elementi za pravilno dimenzioniranje crpnih stanica. Obzirom na dotok, veličinu crpnog bazena te potrebnu manometarsku visinu dizanja odabire se crpka/crpke. Odabir kapaciteta crpke te njen broj uključivanja/isključivanja određuju hidrauličke uvjete u tlačnom cjevovodu. U kontekstu prijelaznih pojava u tom dijelu sustava potrebno je odabrati takvu crpku i profil cjevovoda da brzine u tlačnom cjevovodu ne budu prevelike, no da zadovoljavaju potrebne minimalne uvjete te da razmak između uključivanja i isključivanja crpki bude dovoljno dug da se smiri tok vode u cjevovodu. Naime, u sustavima odvodnje potrebno je postići minimalne brzine u tlačnim cjevovodima u rasponu 0,6-0,8 m/s radi samočišćenja cjevovoda [1]. Minimalna brzina u cjevovodu ovisi o tome da li se radi o sanitarnoj, mješovitoj ili oborinskoj odvodnji. Pravilan odabir crpke i broja uključivanja iste je bitan i radi sprečavanja procesa taloženja u cjevovodu zbog dužeg razdoblja mirovanja crpki te kako bi se izbjegli anaerobni procesi truljenja otpadne vode čiji je nusproizvod metan i sumporovodik. Neželjeno taloženje i truljenje tj. pojava plinova u cjevovodu nepovoljno utječe na pojavu vodnog udara tj. može uzrokovati tlakove veće od očekivanih.

Pravilno projektiranje tlačnih kanalizacijskih cjevovoda uključuje sagledavanje svih faktora koji će imati utjecaja u redovnom i izvanrednom pogonu te predviđanje adekvatne zaštite. Ovim radom se željelo ukazati na važnost cjelovitog sagledavanja problema te posebno skrenuti pažnja na dimenzioniranje zaštite od tlačnih prekoračenja i pojave podtlaka.

2 Vodni udar u tlačnim sustavima odvodnje

2.1 Osnovne jednadžbe za proračun vodnog udara

Osnovne jednadžbe koje moraju biti zadovoljene su Bernoullijeva jednadžba (1) i jednadžba kontinuiteta (2).

Bernoullijeva jednadžba (dinamička) za nestacionarno strujanje se može napisati u obliku :

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

gdje je:

- z, p, v geodetska visina, tlak i srednja brzina mjereni po osi cijevi,
- ΔH zbroj svih lokalnih i linijskih gubitaka energetske visine između dva profila,
- $\frac{1}{g} \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial v}{\partial t} dl$ integralna veličina energetske visine između dva presjeka potrebne za promjene brzine tekućine, taj član pod integralom sadrži promjenu brzine po vremenu integrirajući je duž toka.

Jednadžba kontinuiteta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{l_1}^{l_2} \rho A dl - (\rho Av)_2 + (\rho Av)_1 = 0 \quad (2)$$

gdje:

- prvi član jednadžbe predstavlja promjenu mase u jedinici vremena u volumenu cijevi između dva presjeka, nastalu uslijed sabijanja vode i rastezanja cijevi
- drugi član opisuje istjecanje mase iz presjeka 2
- treći član opisuje dotok mase u presjeku 1

2.2 Parametri osnovnih jednadžbi

Parametri ključni za opisivanje pojave tranzijentnog tečenja su:

- a. brzina propagacije tlačnog vala
- b. promjer cijevi
- c. gustoća tekućine
- d. gubitak energije uslijed trenja
- e. brzina tekućine

Ovdje se neće ulaziti u detalje i obrazlagati svaki pojedini parametar, već će se navesti samo oni parametri kod kojih je potrebno obratiti posebnu pažnju prilikom hidrauličkog proračuna vodnog udara u sustavima odvodnje.

2.1.1 Gustoća tekućine

Gustoća tekućine utječe na brzinu propagacije vala, ali odstupanja od srednje vrijednosti nisu odveć značajna za većinu tekućina. U proračun se ulazi s pretpostavkom da je cijeli cjevovodni sustav ispunjen homogenom tekućinom, te se gustoća smatra konstantnom. Promjena gustoće je značajna kada tlak padne na veličinu tlaka vodenih para, jer može doći do kavitacije, što treba uzeti u obzir.

Mješavina čvrstih čestica i plinova u tekućini također mogu biti značajni faktori promjene gustoće. Plinovi mogu smanjiti brzinu vala uslijed povećanja elastičnosti mješavine i redukcije mase, a stišljivost ne mora biti konstantna. Rezultat toga je deformacija tlačnog vala koji putuje duž cjevovoda. Samo ako je mješavina homogena i ako su oscilacije tlaka u cjevovodu toliko male da se stišljivost mješavine može smatrati linearnom, osnovne jednadžbe su zadovoljavajuće. Općenitiji oblik jednadžbi ćemo upotrebljavati u ostalim slučajevima.

Gustoća otpadne sanitarno-fekalne vode iznosi 1020-1050 kg/m³ [2].

2.1.2 Karakteristika cjevovoda

Ulazni parametri karakteristike cjevovoda koji ulaze u hidraulički proračun tj. utječu na pojavu vodnog udara su materijal i hrapavost cjevovoda te promjer cjevovoda. Vrsta materijala cjevovoda utječe na brzinu propagacije vodnog vala, dok hrapavost cjevovoda utječe na pad energetske linije duž trase tj. na otpore u cjevovodu. Također na hrapavost cjevovoda utječe vrsta materijala cjevovoda te starost cjevovoda. U tablici 1 su dane preporučene vrijednosti hidrauličke hrapavosti za tlačne cjevovode

obzirom na materijal i starost cjevovoda [1]. Stvaranjem biofilma hidraulička hrapavost betonskih cjevovoda se s vremenom može i smanjiti.

Tablica 1. Hidraulička hrapavost u tlačnim cjevovodima (preporuke)

Materijal cijevi	Hrapavost	
	Novi cjevovod (mm)	Stari cjevovod (mm)
Ductil	0,1 – 0,2	0,5 – 1,0
Pocinčani čelik	0,1 – 0,3	0,5 – 3,0
Beton	0,3 – 1,5	-
PVC i PE	0,01 – 0,05	0,15 – 0,6
Poliester	0,02 – 0,05	0,15 – 0,6

Hidrauličku hrapavost u sustavima odvodnje teško je točno odrediti. Prema iskustvima britanskih stručnjaka hidraulička hrapavost u kanalizacijskim sustavima je uzrokovana pojavom biofilma i ovisi isključivo o brzini tekućine u cjevovodu, tablica 2. [1]

Tablica 2. Hidraulička hrapavost u kanalizacijskim cjevovodima – preporuke (u funkciji stanja cjevovoda)

Prosječna brzina (m/s)	Dobra (mm)	Normalna (mm)	Loša (mm)
1,0	0,15	0,3	0,6
1,5	0,06	0,15	0,3
2,0	0,03	0,06	0,15

2.3 Uzroci i posljedice vodnog udara

2.3.1 Uzroci vodnog udara

Fizikalni opis vodnog udara se može predočiti Newtonovim II aksiomom, koji kaže da je sila umnožak mase i ubrzanja iz čega proizlazi da se žestoki vodni udar pojavljuje tamo gdje velika količina mase dobiva značajno ubrzanje. Ustanovljeno je da se vodni udar javlja prilikom nagle promjene tlaka ili protoka u cijevi. Promjenu protoka u cjevovodu može uzrokovati paljenje i gašenje crpki, naglo zatvaranje zasuna, zarobljeni zrak u cjevovodu te čvrste čestice zarobljene u cjevovodu.

2.3.2 Posljedice vodnog udara

Najveće očekivano opterećenje na sustav je vodni udar. Uz pojavu vodnog udara u sustavu povezane su pojave poput povećanja tlaka, pojave vakuuma, prekida vodnog stupca s dodatnim udarima, ulaz zraka u cjevovod i rezonancijske vibracije.

Prilikom pojave vodnog udara posljedice mogu biti veoma kobne, tj. može doći do oštećenja opreme, loma i deformacije cjevovoda te uzrokovati velike materijalne štete i kobne posljedice na okoliš. Vodni udar uzrokuje tlakove u sustavu koji mogu biti i do 10 puta veći od tlakova pri normalnom funkcioniranju sustava. Pri velikom predtlaku fazonske komade, cjevovod i armature na cjevovodu vodni udar može raznijeti i tada iz glavnih pukotina voda teče kao iz gejzira. Pojava velikog predtlaka može loše utjecati i na spojeve cijevi, što se u praksi naziva „izbijanje cjevovoda“. U negativnoj fazi propagacije tlačnog vala može doći do stvaranja podtlaka i do pojave vakuuma, što rezultira sisajućim djelovanjem na cjevovod, te se cjevovod sažima. Nastanak vakuuma je višestruko opasniji od nastanka predtlaka, jer postoji mogućnost za veće štete ne samo lokalno nego duž cjevovoda. Vakuum može prouzrokovati

deformacije u obliku spljoštenosti cjevovoda. Pojava vakuuma uzrokuje velika naprezanja na cjevovod, što rezultira umaranjem materijala i na kraju defektom cjevovoda.

Obzirom da su tlačni kanalizacijski cjevovodi niskotlačni sustavi prilikom pojave vodnog udara posebnu pažnju je potrebno posvetiti pojavi podtlaka i zaštiti cjevovoda od pojave vakuuma.

2.4 Zaštita od sustava odvodnje

Zaštita tlačnih cjevovoda i ostalih elemenata na tlačnom dijelu sustava odvodnje od pojave neželjenih tlakova sastoji se u pomnom planiranju te pravilnom dimenzioniranju svih elemenata sustava. Ukoliko se hidrauličkim analizama pokaže da je potrebno osigurati i dodatnu zaštitu sustava dimenzioniraju se zaštitni elementi u sustavu. Adekvatnom zaštitom sustava odvodnje postiže se dulji vijek trajanja sustava, bolja funkcionalnost, smanjenje financijskih troškova pogona i održavanja te smanjenje rizika zagađenja okoliša.

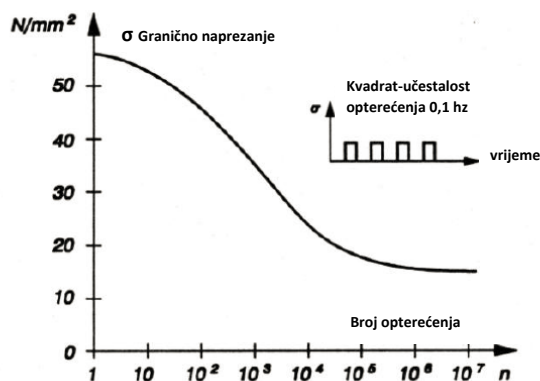
2.4.1 Zaštita od pojave tlačnih prekoračenja

Zaštita sustava od pojave vodnog udara bazira se na principu smanjenja kinetičke energije vodene mase usporenjem promjene toka. Usporenje promjene toka možemo postići pravilnim rukovanjem zapornim i crpnim uređajima. Propisuje se potrebno vrijeme zatvaranja i otvaranja zasuna te vrijeme uključivanja i isključivanja crpki. Zaštita sustava se može postići i posebno konstruiranim elementima za zaštitu kao što su tlačni kotlovi, kompenzacijske komore, zasuni, bypass (premosnice) kod crpke i zračni ventili. Tlačni kotlovi se izbjegavaju u sustavima odvodnje zbog problema u održavanju, skupe izvedbe za agresivnu otpadnu vodu te radi sprječavanja akumuliranja (predugog zadržavanja) otpadne vode. Najčešći oblik zaštite od tlačnih prekoračenja je zaštita posebnim zračnim ventilima.

Zračni ventili imaju višestruku funkciju u zaštiti sustava a to je odzračivanje i dozračivanje cjevovoda te ispuštanje zarobljenog zraka iz cjevovoda. Specijalni ventili za zaštitu od vodnog udara prilikom pojave podtlaka imaju mogućnost brzog upuštanja veće količine zraka. Uvlačenje zraka u cjevovod traje sve do faze podizanja tlaka, nakon čega se otvori za upuštanje zraka zatvaraju i u cjevovodu se zarobljava određena količina zraka koja ublažava povećanje tlaka. Zarobljeni zrak se zadržava u cjevovodu sve do smirivanja oscilacija tlaka pri čemu se istovremeno odstranjuje kroz male otvore posebno dimenzionirane otvore ispuštanje vrlo malih količina zraka.

2.4.2 Zamor materijala

Pojava smanjene čvrstoće materijala pod djelovanjem ciklički promjenjivog opterećenja naziva se umornost (zamor) materijala [3]. Zamor materijala u tlačnim kanalizacijskim cjevovodima je česta pojava zbog učestalog uključivanja i isključivanja crpki. Obzirom da je neophodan takav način funkcioniranja sustava potrebno je veličinu naprezanja na cjevovod svesti na minimalnu vrijednost, što je prethodno opisano. Na primjer ukoliko je amortizacija sustava 40 godina i ako se crpka pali 2 puta na sat znači da će se za životnog vijeka upaliti i ugasi 700.800 puta. Svako paljenje i gašenje crpki uzrokuje promijene brzine tekućine u cjevovodu što za posljedicu ima promjene tlaka duž cjevovoda. Može se očekivati da će cjevovod ukupno doživjeti u prosjeku $1,5 \cdot 10^7$ promijene tlaka. Veličina fluktuacija tlaka značajno utječe na trajnost cjevovoda. Whölerovim dijagramom prikazuje se odnos naprezanja stijenke cijevi prilikom svake promijene tlaka i učestalosti pojave naprezanja. Što su manje oscilacije tlaka to će sporije doći do zamora materijala tj. sustav će moći podnijeti veći broj opterećenja. Na slici 1 prikazan je Whölerov dijagram za PVC cjevovod. [1]



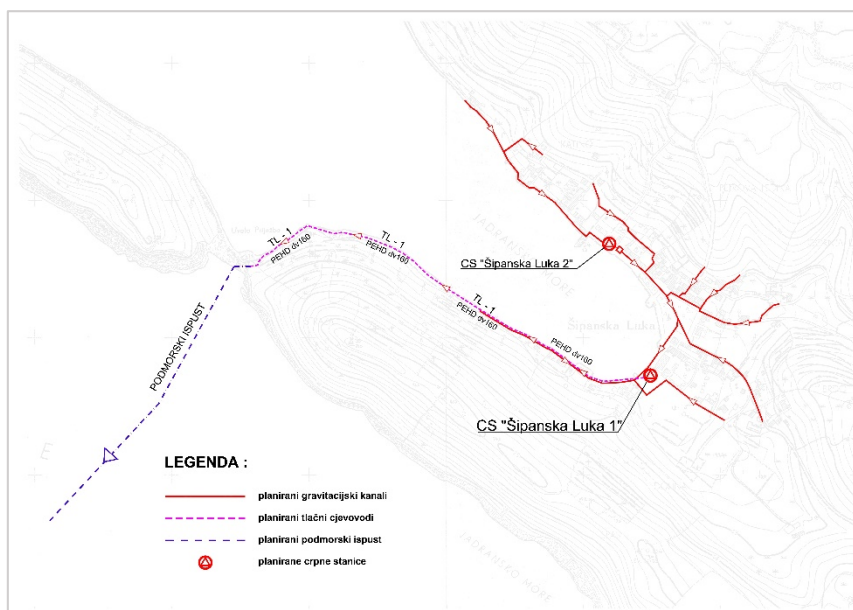
Slika 1. Whölerov dijagram za PVC cjevovod

3 Primjeri iz prakse

Obzirom da pojava vodnog udara uzrokuje najveće opterećenje na sustav izrada hidrauličkog proračuna nestacionarnih pojava je vrlo odgovorna zadaća. Često puta zbog kratkih dionica cjevovoda te zbog relativno malih protoka ali ne i brzina u cjevovodu proračun nestacionarnih pojava se zanemaruje. U nastavku su dani primjeri hidrauličkog proračuna tlačnih kanalizacijskih cjevovoda kako bi se ukazalo na potrebitost izrade proračuna i zaštite cjevovoda od tlačnih prekoračenja. Modeliranje stacionarnog i nestacionarnog pogona izvršeno je računalnim programom Hammer (Bentley Systems), kojim je moguće simulirati stacionarne i nestacionarne hidrodinamičke pojave u sustavima pod tlakom uz razne mogućnosti rubnih uvjeta.

3.1 Primjer 1

Prvi primjer se odnosi na dio kanalizacijskog sustava na otoku Šipan u Dubrovačko-neretvanskoj županiji. Zbog nemogućnosti odvodnje otpadnih voda gravitacijskim putem na jednoj dionici trase bilo je potrebno precrpiti otpadnu vodu na višu kotu terena kako bi se dalje mogla transportirati do podmorskog ispusta, slika 2.

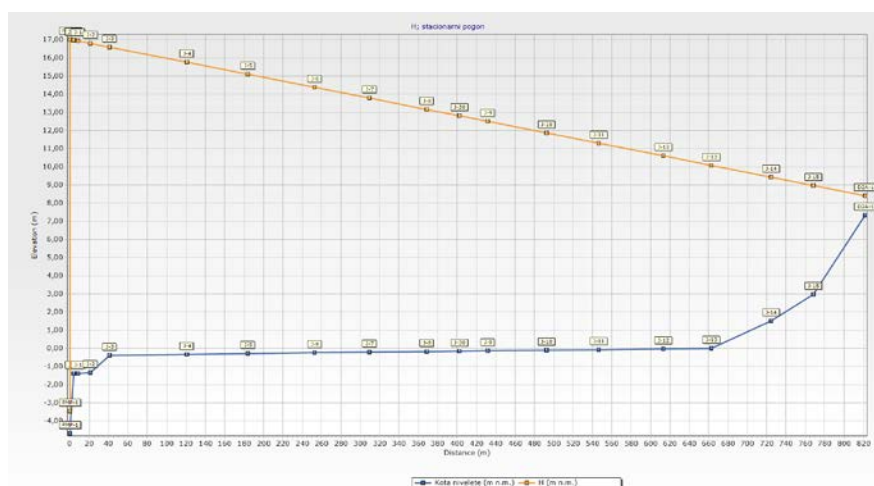


Slika 2. Situacijski prikaz sustava odvodnje Šipanska Luka

Karakteristike tlačnog cjevovoda su: materijal cijevi PEHD, PE100, SDR17, nazivni tlak 10 bara, nazivni promjer Dv160 mm, unutarnji promjer Du=141 mm, debljina stijenke 9,5 mm; duljina tlačnog cjevovoda L = 813,17 m; modelirana pogonska hrapavost 0,35 mm (obuhvaćeni linijski i lokalni gubici). Karakteristike crpne stanice su: protok Q = 16,2 l/s; visina dizanja H = 20,7 m v.s.; nazivna snaga motora N = 9 kW.

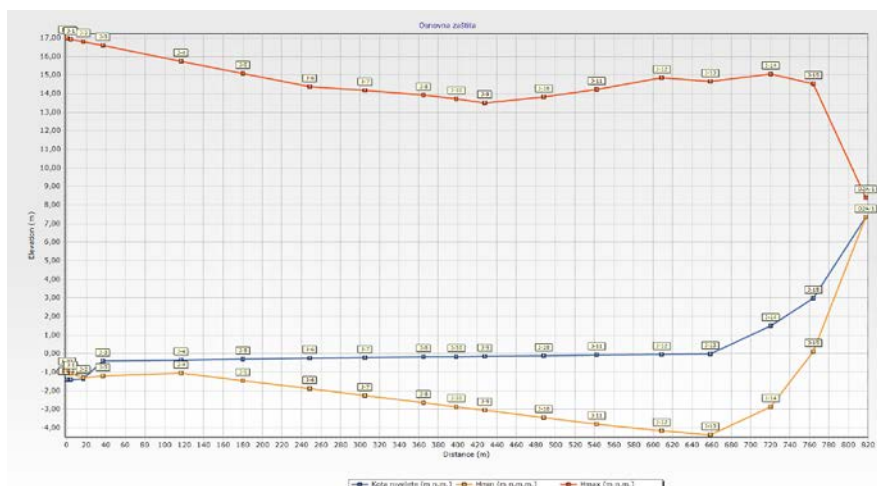
Hidrauličkim proračunom ispitalo se stanje tlakova u predmetnom cjevovodu za prijelazna stanja, te se dimenzionirala zaštita od tlačnih prekoračenja. Za zaštitu od tlačnih prekoračenja odabrani su posebni zračni ventili za kanalizacijske sustave koji imaju mogućnost odzračivanja cjevovoda tokom rada (ispuštanja plinova otopljenih u vodi pri normalnom radnom tlaku), odstranjivanja zraka iz cjevovoda prilikom njegova punjenja, usis zraka prilikom pražnjenja cjevovoda i prilikom pojave podtlaka. Za sprječavanje pojave vodnog udara zračni ventil mora imati mogućnost dotoka velikih količina zraka prilikom pojave podtlaka te sprječavati brzi izlaz zraka iz cjevovoda i time ublažavati pojavu vodnog udara.

Prvotno je modelirano stacionarno stanje u tlačnom cjevovodu, te je potom modelirano nestacionarno stanje u sustavu ispadom crpke iz pogona. Kao zaštita sustava od pojave opasnog podtlaka, koji nastaje nakon ispada crpne stanice iz pogona, ispitana je najprije osnovna zaštita modeliranjem kanalizacijskog zračnog ventila, tj. tip ventila posebne konstrukcije i namjene, na tlačnom kraju crpne stanice. Na slici 3 prikazan je uzdužni presjek tlačnog cjevovoda s tlačnom linijom pri stacionarnom pogonu, dok je na slici 4 prikazan uzdužni presjek tlačnog cjevovoda s anvelopama minimalnih i maksimalnih tlakova prilikom ispada crpke iz pogona pri najvećem protoku s osnovnom zaštitom. Obzirom da minimalno dozvoljeno naprezanje na stijenke cijevi koje možemo dozvoliti iznosi -2 m v.s., iz dijagrama na slici 3 je vidljivo da osnovna zaštita na tlačnom kraju crpne stanice nije dostatna jer dolazi do pojave podtlaka -4 m v.s.

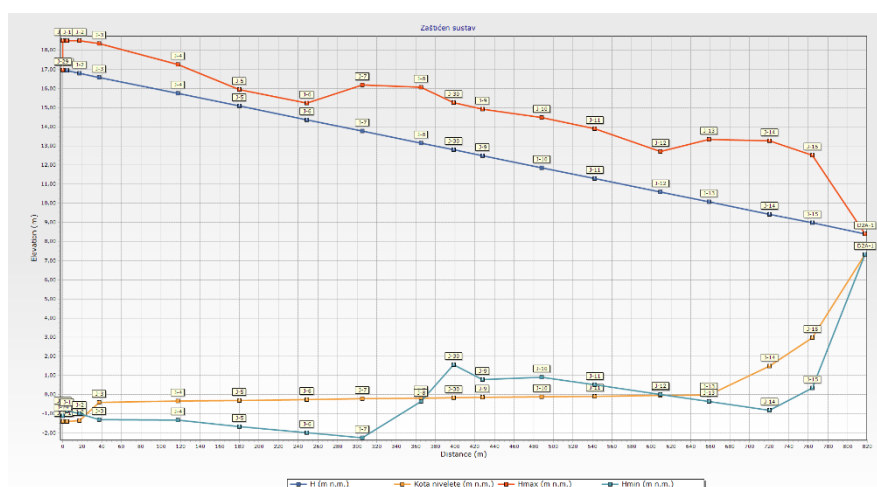


Slika 3. Uzdužni presjek tlačnog cjevovoda – stacionarni pogon Q = 16 l/s

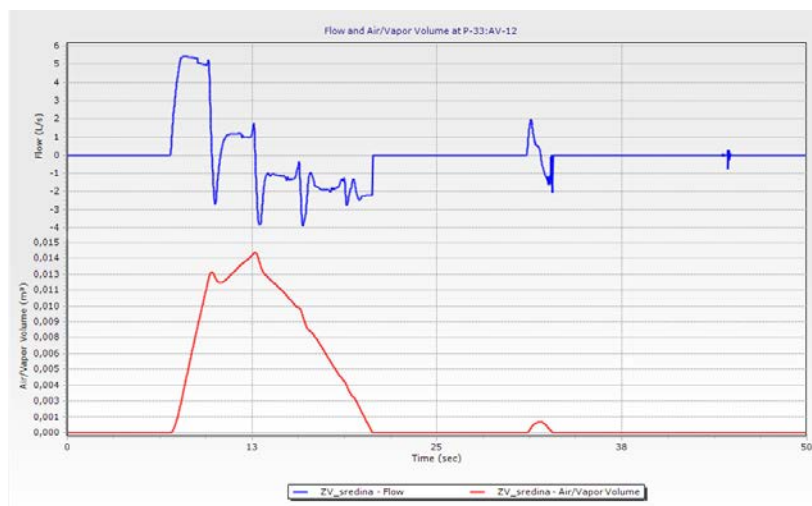
Iteracijskim postupkom odabrana je najpovoljnija lokacija zračnog ventila za zaštitu od pojave podtlaka a rezultat proračuna za usvojenu varijantu je prikazan na slici 5. Valja napomenuti da je u usvojenoj varijanti zračni ventil usvojen na stacionaži 0+400m te je zbog uvjeta na terenu izmaknut od trase i postavljen na nešto višu kotu. Točna lokacija zračnog ventila uzeta je u obzir prilikom proračuna vodnog udara kako bi se uračunao utjecaj priključnog cjevovoda na dotok zraka u tlačni cjevovod prilikom pojave podtlaka. Slika 6 prikazuje dijagram protoka i volumena zraka u spomenutom zračnom ventilu.



Slika 4. Tlačni cjevovod– ispad crpke iz pogona, osnovna zaštita zračnim ventilom kod CS



Slika 5. Tlačni cjevovod– ispad crpke iz pogona, osnovna zaštita zračnim ventilom kod CS i na stac.0+400

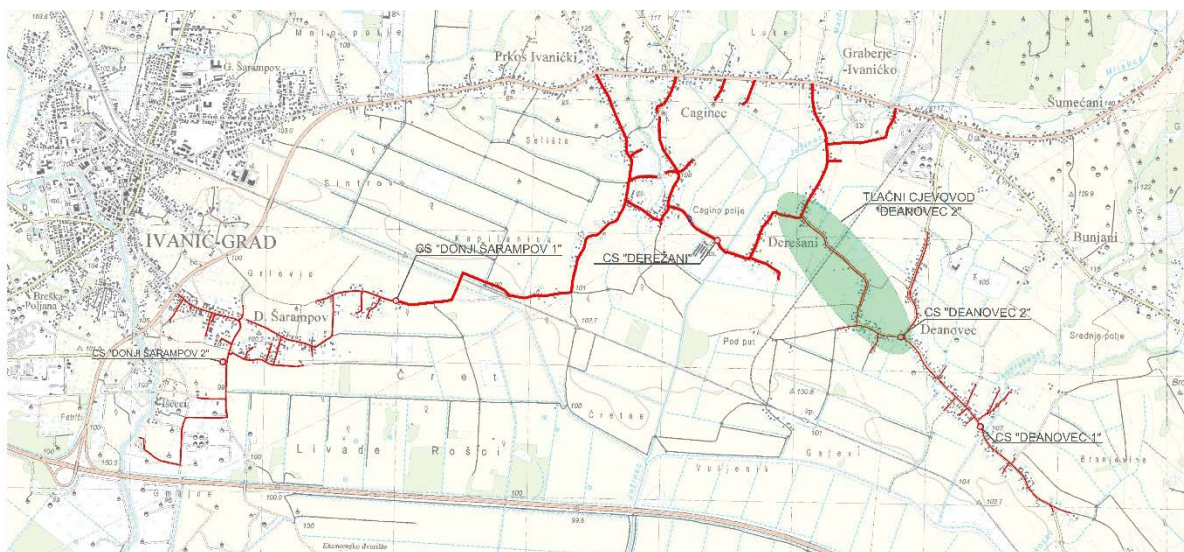


Slika 6. Protok i volumen zraka u zračnom ventilu na stac. 0+400

3.2 Primjer 2

Drugi primjer se odnosi na dio kanalizacijskog sustava na jugu Ivanić Grada. To je klasični gravitacijski sustav odvodnje na kojemu je bilo potrebno izgraditi tlačne dionice kako bi se olakšao transport otpadne

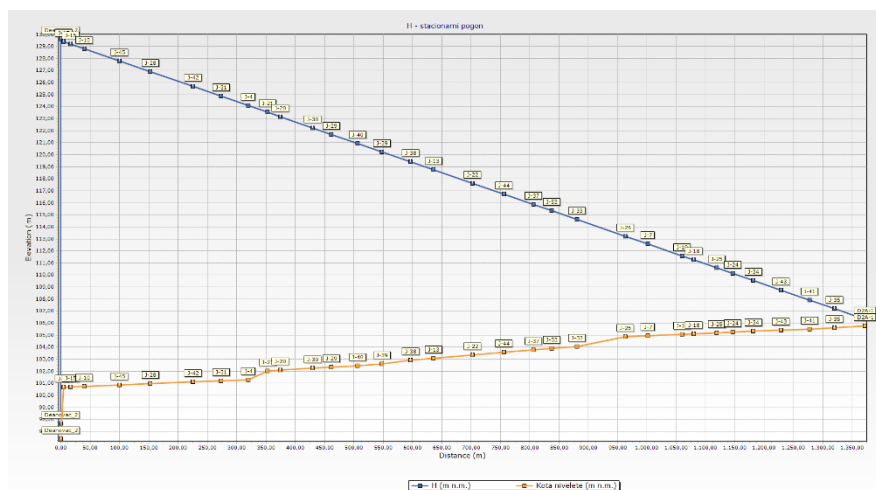
vode. Na ovom dijelu sustava odvodnje interpolirano je nekoliko crpnih stanica, a u ovom primjeru će se obraditi crpna stanica i tlačni cjevovod Deanovac 2, slika 7.



Slika 7. Situacijski prikaz sustava odvodnje južnog dijela Ivanić Grada

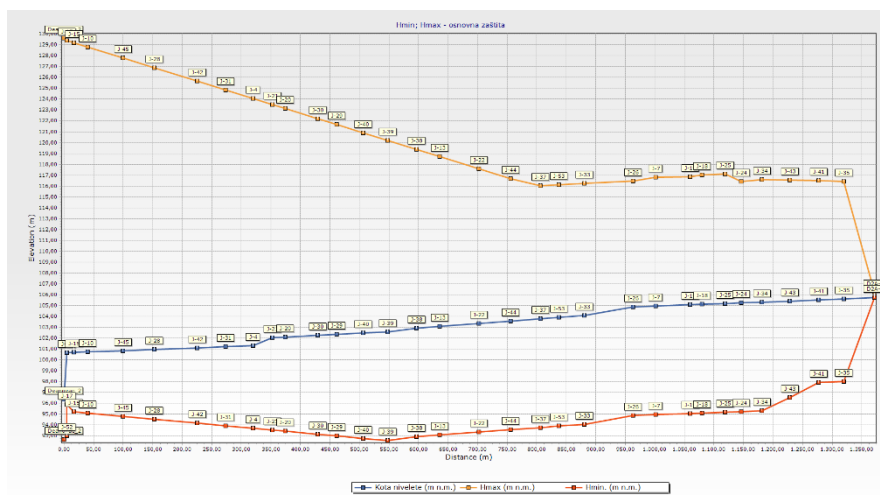
Karakteristike tlačnog cjevovoda su: materijal cijevi PEHD, PE100, SDR17, nazivni tlak 10 bara, nazivni promjer $Dv110$ mm, unutarnji promjer $Du=96,8$ mm, debljina stijenke 6,6 mm; duljina tlačnog cjevovoda $L=1368,70$ m; modelirana pogonska hrapavost 0,35 mm (obuhvaćeni linijski i lokalni gubici). Karakteristike crpne stanice: protok $Q = 8,12$ l/s; visina dizanja $H = 32,3$ m v.s.; nazivna snaga motora $N = 9,2$ kW.

Dijagram na slici 8 prikazuje uzdužni presjek predmetnog tlačnog cjevovoda pri stacionarnom pogonu.

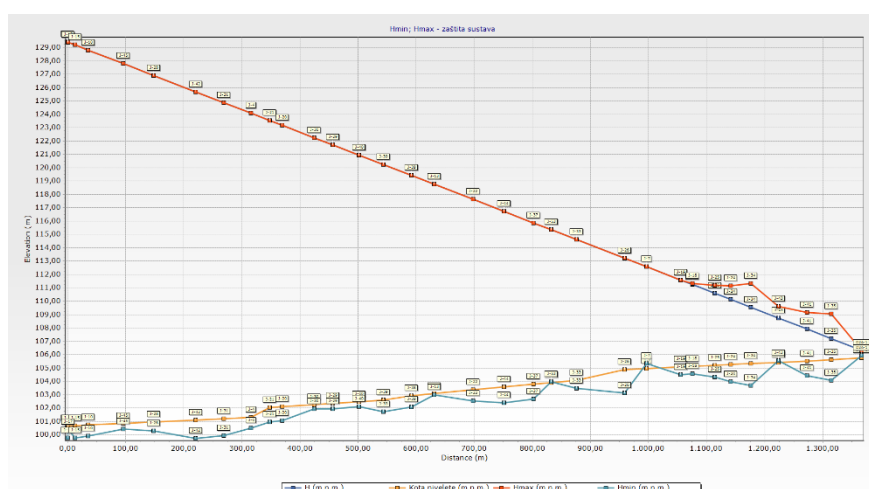


Slika 8. Uzdužni presjek tlačnog cjevovoda – stacionarni pogon $Q = 8$ l/s

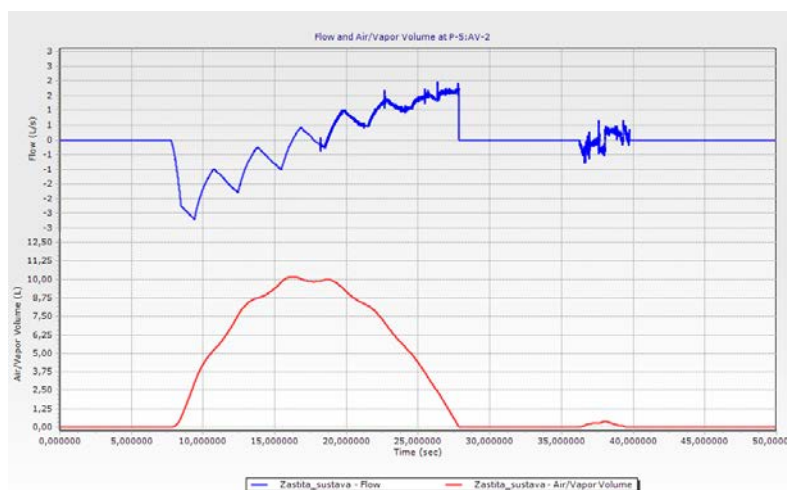
Dijagram na slici 9 prikazuje anvelope tlaka pri ispadu crpki iz pogona s osiguranom osnovnom zaštitom sustava, zračnim ventilom kod crpne stanice. Na dijagramu možemo vidjeti pojavnost tlakova (podtlaka) i nižih od napona vodenih para što je fizikalno nemoguće jer dolazi do prekida vodnog stupca. Razlog tome je što računalni program ne prekida simulaciju kada podtlak dosegne apsolutni vakuum. Na slici 10 su prikazane anvelope tlakova pri potpunoj zaštiti sustava. Na ovome tlačnom cjevovodu bilo je potrebno ugraditi ukupno 6 zračnih ventila za zaštitu od vodnog udara. Slika 11 prikazuje dijagrame protoka i volumena zraka na zračnom ventilu na tlačnoj strani crpne stanice.



Slika 9. Tlačni cjevovod– ispad crpke iz pogona, osnovna zaštita zračnim ventilom kod CS



Slika 10. Tlačni cjevovod– ispad crpke iz pogona, osnovna zaštita zračnim ventilom kod CS i duž trase



Slika 11. Protok i volumen zraka u zračnom ventilu kod CS

4 Zaključak

Obzirom da se pojava vodnog udara u tlačnim kanalizacijskim cjevovodima često zanemaruje ovim radom se željelo ukazati na važnost analize prijelaznih pojava prilikom projektiranja kako bi se mogla

predvidjeti odgovarajuća zaštita na sustavu. Analiza prijelaznih pojava u sustavima odvodnje treba biti sveobuhvatna u cilju optimalne funkcionalnosti i dosega rentabilnosti sustava odvodnje.

Priloženim primjerima se pokazalo da unatoč malim protocima u cjevovodima te relativno kratkim dionicama tlačnih cjevovoda postoji opasnost pojave opasnog podtlaka te da je nužno napraviti odgovarajuće hidrauličke proračune i na osnovu njih izraditi projekt kojim se izbjegavaju pojave neželjenih tlakova.

Literatura

- [1] Larsen, T.: Water hammer in pumped sewer mains, 2012.
- [2] Pećar H., Rješavanje problema vonja u tlačnim transportnim sustavima otpadnih voda, *EGE* 04/09 pp.132-136, 2009.
- [3] Šimić, V.: *Otpornost materijala II*, II. Izdanje Školska knjiga Zagreb, 2002.