

**MATEMATIČKO MODELIRANJE HIDRAULIČKOG UDARA U POTISNOM
CEVOVODU KANALIZACIONOG SISTEMA PRIMENOM SOFTVERA AFT IMPULSE
MATHEMATICAL MODELING OF WATER HAMMER IN A PRESSURIZED SEWAGE
SYSTEM USING THE AFT IMPULSE SOFTWARE**

Boban Županjac, Ljubomir Budinski, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Oblast- GRAĐEVINARSTVO – HIDROTEHNIKA

Kratak sadržaj – Tema rada je analiza hidrauličkog udara za tri zasebna cevovodna sistema, dva potisna kanalizaciona i jedan gravitacioni vodovodni sistem. Dat je opis sistema i njihovih komponenti, na osnovu čega je formiran model u softveru AFT Impulse. Izvršena je simulacija i analiza hidrauličkog udara u sistemima. Na osnovu dobijenih rezultata, odabrana je adekvatna zaštita sistema za različite varijantne slučajeve.

Abstract – The topic of the paper is the analysis of water hammer in three separate pipeline systems, two pressurized sewage systems, and one gravity water supply system. A description of the system and their components was provided, based on which a model was created in the AFT Impulse software. A simulation and analysis of the water hammer in the systems were conducted. Based on the obtained results, appropriate system protection was selected for different variant scenarios.

Ključne reči: Hidraulički udar, AFT Impulse

1. UVOD

Kada se u cevima pod pritiskom protok naglo zaustavi, pokrene ili doživi naglu promenu pravca, dolazi do fenomena koji se naziva hidraulički udar, koji je karakterističan po propagaciji, odnosno širenju talasa. Kroz istoriju, još od samih početaka korišćenja cevni sistema za prenos tečnosti, inženjeri su se suočavali sa izazovima koje donosi hidraulički udar. Pre više od dve hiljade godina, Marko Vitruvije Polio je opisao posledice hidrauličkog udara i kavitacije distribucionih sistema antičkog Rima, dok je sa matematičke strane prvi formalni opis ove pojave započeo radovima fon Kriesa, Žukovskog i Alevisia [1].

Velike oscilacije pritiska, koje se javljaju kao posledica hidrauličkog udara, dovode do značajnih problema u funkcionisanju cevovoda. Ekstremne vrednosti pritisaka mogu višestruko prevazići radne pritiske u cevovodu, pa su kao posledica moguća oštećenja opreme, kao i samog cevovoda. Sa druge strane, niski pritisci u cevovodu, u kombinaciji sa spoljnim opterećenjem mogu dovesti do velikih deformacija i loma fleksibilnih cevi, pa postoji opravdan praktični interes da se ekstremne vrednosti pritisaka drže u umerenim granicama.

Shodno činjenici da se prilikom prelaznih režima javljaju pritisci u cevovodu koji ugrožavaju statičku sigurnost cevovoda i opreme na njemu, projektant se može odlučiti na dimenzionisanje cevi na povećane pritiske i da odabere jače i skuplje cevi, ili da ne dozvoli pojavu neprihvatljivih vrednosti pritisaka.

Hidraulički udar i prelazni režimi u cevovodima se javljaju kao posledica regulacije u okviru normalnog rada sistema, iznenadnim kvarovima na sistemu, neadekvatnim održavanjem, a mogu biti izazvani i spoljnim faktorima. Najčešće, hidraulički udar nastaje kao posledica naglog prestanka rada pumpi ili naglog zatvaranja zatvarača [2]. Zadatak rada je da se za tri zasebna cevovodna sistema analizira pojava, prikažu posledice i odredi adekvatna zaštita od hidrauličkog udara.

2. OSNOVNE JEDNAČINE HIDRAULIČKOG UDARA

Za izvođenje matematičkog modela za analizu prelaznih režima i hidrauličkog udara, pored osnovnih pretpostavka o linijskom problemu (varijacije brzine po poprečnom preseku se zanemaruju, važi hidrostatička raspodela pritisaka u poprečnom preseku) i korišćenju veličina reprezentativnih za poprečni presek, uvode se i dodatne pretpostavke [2]:

- fluid i materijal cevi ponašaju se kao idealno elastično telo,
- sila trenja se uzima kao kod ustaljenog tečenja,
- nema diskontinuiteta u cevi, što je preduslov za diferencijalni pristup.

Osnovne jednačine mehanike fluida su:

1. dinamička jednačina:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \frac{\lambda}{2D} v|v| = 0 \quad (1)$$

2. jednačina kontinuiteta:

$$v \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \frac{\partial \Pi}{\partial t} - v \sin \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Jednačine označene sa (1) i (2) su parcijalne diferencijalne jednačine koje nemaju analitičko rešenje, međutim, daljim pojednostavljenjem se može doći do oblika koji se može analitički rešiti. Eliminacijom jedne promenljive i transformacijom se može doći do jedne jednačine:

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 \Pi}{\partial x^2} \quad (3)$$

Jednačina označena sa (3) se može predstaviti i u svom ekvivalentnom obliku, u kom se pojavljuje brzina:

NAPOMENA: Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor redovni profesor dr Ljubomir Budinski

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial X^2} \quad (4)$$

3. SOFTVER AFT IMPULSE

AFT Impulse predstavlja napredan softverski alat koji se koristi za simulaciju i analizu hidrauličkih udara, kao i dinamičkih efekata u cevovodnim sistemima. Softver je razvijen od strane kompanije Applied Flow Technology (AFT), koja se bavi razvojem inženjerskih alata za analizu tečenja fluida. AFT Impulse pruža inženjerima precizno modeliranje ponašanja fluida unutar cevovoda, prepoznaje potencijalne probleme i pruža rešenja za projektovanje sistema sa ciljem smanjenja rizika od hidrauličkih udara [3]. Softver pruža širok spektar funkcija za modeliranje prelaznih režima u cevovodnim sistemima, među kojima su: modeliranje prelaznih režima kod sistema sa grananjem ili petljama, u otvorenim ili zatvorenim (recirkulacionim) sistemima, modeliranje prelaznih režima ventila, pumpi, rezervoara, posuda pod pritiskom itd.

Pre pokretanja modela hidrauličkog udara, potrebno je uneti početne uslove stacionarnog stanja. Rešenje stacionarnog stanja se dobija korišćenjem algoritma Njutn Rafson metode za rešavanje matrice, kako bi se postigla ravnoteža mase i impulsa. Za rešavanje nestacionarnog stanja (prelaznih režima), softver koristi metodu karakteristika (MOC). Ravnoteža mase i impulsa se izvodi na svim računskim stanicama na svakoj cevi, precizno predstavljajući propagaciju talasa pritiska kroz sistem [4].

3.1. Inženjerske pretpostavke u softveru

Softver se zasniva na sledećim osnovnim pretpostavkama mehanike fluida [4]:

- cevovod je u potpunosti ispunjen tečnošću,
- 1D tečenje – jednodimenzijalna analiza,
- nema hemijskih reakcija,
- brzina talasa ostaje konstantna tokom prelaznih režima,
- oslabljavanje nekondenzujućih gasova je zanemarljivo,
- mehuri koji se formiraju tokom tranzijentne kavitacije se ne kreću.

3.2. Interfejs i navigacioni paneli softvera

Nakon pokretanja programa prikazaće se interfejs programa, koji je prikazan na slici 1. Na vrhu interfejsa se nalazi glavni meni, koji omogućava pristup ključnim komandama i alatima za upravljanje projektima, uređivanje modela i pokretanje simulacija.

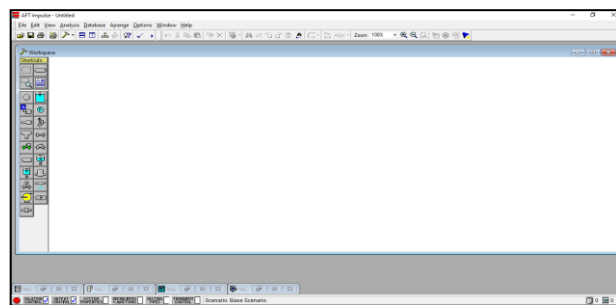
Navigacioni paneli služe za upravljanje modelom, alatima i komponentama, što omogućava korisnicima lakši i efikasniji rad. Osnovni navigacioni paneli su: Workspace (radni prostor), Quick Access Toolbar i Toolbox/Tool Palette.

Workspace, odnosno radni prostor, predstavlja centralni i glavni deo interfejsa, u kome se kreiraju i vizualizuju modeli cevovodnih sistema. Omogućava relativno lako snalaženje kroz model (precizno postavljanje elemenata, uvećavanje, smanjivanje, pomeranje prikaza), a pruža i

funkciju drag and drop, koja služi za prevlačenje komponenta iz Tool Palette i postavljanje unutar radnog prostora.

Quick Access Toolbar se nalazi na vrhu interfejsa, i predstavlja brzoalatnu traku koja omogućava brz pristup najčešće korišćenim funkcijama. Sadrži funkcije kao što su: Open Model, Save, Copy, Paste, Delete, Run (pokretanje simulacije) i druge.

Toolbox ili Tool Palette je panel koji sadrži sve dostupne komponente i alate koji se mogu koristiti za izgradnju modela u softveru. Nalazi se sa leve strane radnog prostora i omogućava brz pristup različitim tipovima komponenti, kao što su cevi, čvorovi, pumpe, rezervoari, ventili i dr.

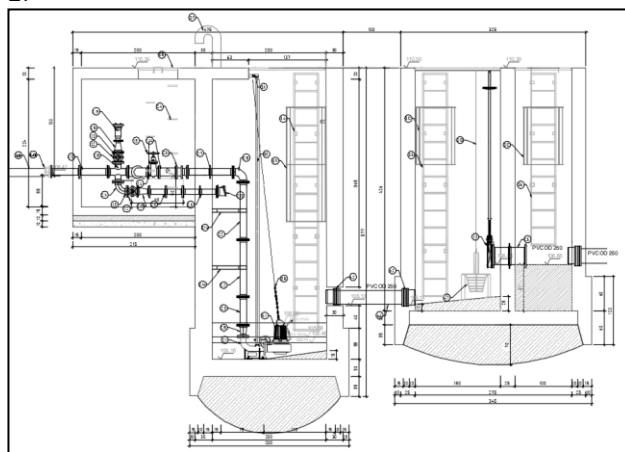


Slika 1. Interfejs softvera AFT Impulse

4. PRIKAZ SISTEMA

4.1. Sistem 1 – potisni kanalizacioni cevovod

Cevovod sistema 1 služi za odvođenje otpadnih voda, a prostire se na ukupnoj dužini od 1561 metara. Cevovod je od polietilena (HDPE), a prečnik je konstantan duž cevovoda i iznosi 140mm. Cevovod je ojačan predizolovanim cevima od duktilnog liva u dužini od 18m na 2 mesta. Crpna stanica sistema 1 prikazana je na slici 2.



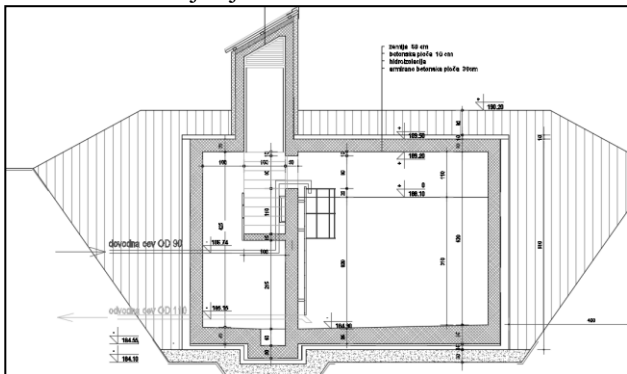
Slika 2. Presek kroz crpnu stanicu sistema 1

4.2. Sistem 2 – potisni kanalizacioni cevovod

Cevovod sistema 2 služi takođe za odvođenje otpadnih voda, a prostire se na ukupnoj dužini od 1325 metara. Cevovod je od polietilena (HDPE), a prečnik je konstantan duž cevovoda i iznosi 200mm. Cevovod je zaštićen čeličnim zaštitnim cevima na 4 mesta.

4.3. Sistem 3 – gravitacioni vodovodni cevovod

Cevovod sistema 3 služi za snabdevanje naselja vodom, a voda se iz rezervoara (slika 3) gravitaciono dovodi do naselja. Cevovod se prostire na ukupnoj dužini od 2820.45 metara i napravljen je od polietilena (HDPE). Na prvoj deonici, u dužini od 27.97m, cevovod je prečnika 110mm, dok je na svim ostalim deonicama prečnik cevovoda konstantan i iznosi 160mm. U dužini od 36.84m cevovod je ojačan čeličnom zaštitnom cevi.

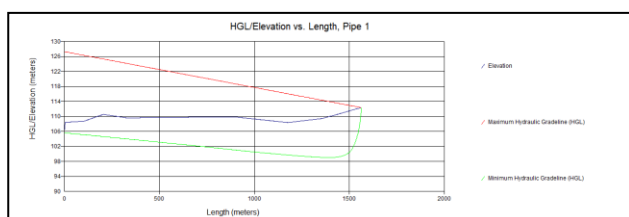


Slika 3. Presek kroz rezervoar sistema 3

5. ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA

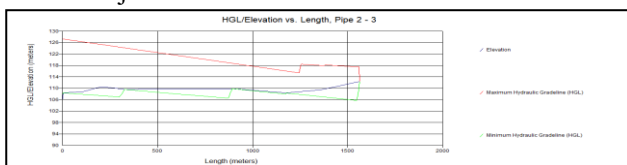
Za sva tri sistema urađeno je nekoliko varijantnih rešenja. Prvi slučajevi su bili sistemi bez zaštite, izvršena je analiza ustaljenog stanja. Nakon toga, za sisteme bez zaštite, rađena je simulacija hidrauličkog udara, sa ciljem da se proveri da li će pritisak pasti više od 4m ispod položaja cevovoda, jer se u tom slučaju može javiti kavitacija.

Kod sistema 1 analizira se nagli ispad pumpe iz rada. Zadatak je zaštititi sistem primenom vazdušnih ventila, odrediti broj potrebnih ventila i njihov položaj duž cevovoda. Nakon završetka simulacije sistema bez zaštite, sa anvelopa minimalnih i maksimalnih pritisaka u sistemu (slika 4), očigledno je da je potrebno postaviti adekvatnu zaštitu.



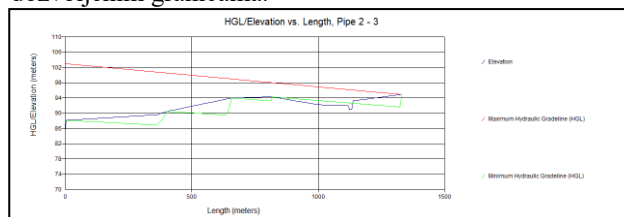
Slika 4. Anvelopa pritiska za sistem 1 bez zaštite

Rezultati su pokazali da je potrebno postaviti četiri vazdušna ventila duž cevovoda, kako bi pritisci duž cevovoda bili u dozvoljenim granicama. Anvelopa pritiska (slika 5) pokazuje da je u blizini izliva potpritisak veći od 4m, ali se ta vrednost može zanemariti, s obzirom da je kod izliva svakako omogućeno ovazdušenje.



Slika 5. Anvelopa pritiska za sistem 1 sa 4 ventila

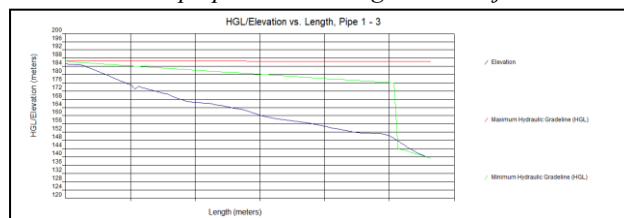
Kod sistema 2 takođe se analizira nagli ispad pumpe iz rada. Zadatak je zaštititi sistem primenom vazdušnih ventila, odrediti broj potrebnih ventila i njihov položaj duž cevovoda. Rezultati (slika 6) su pokazali da ukoliko primenimo 4 vazdušna ventila, pritisci će biti u dozvoljenim granicama.



Slika 6. Anvelopa pritiska za sistem 2 sa 4 ventila

Kod sistema 3 (gravitacioni vodovodni sistem), izvršena je analiza naglog otvaranja i zatvaranja zatvarača, zadatak je bio proveriti sistem na nekoliko slučajeva – zaštita sistema isključivo vazdušnim ventilima, zaštita isključivo posudom pod pritiskom, a ukoliko je potrebno, analizirati i zajedničku primenu ventila i posude pod pritiskom. Za slučaj naglog otvaranja ventila, potrebno je primeniti 7 vazdušnih ventila, a ukoliko bismo koristili posudu pod pritiskom, dovoljno je primeniti jednu (slika 7). Kod naglog zatvaranja zatvarača, sa strane potpritiska i kavitacije, sistem je siguran i bez zaštite.

Slika 7. Anvelopa pritiska za naglo otvaranje zatvarača



sistema 3 sa posudom pod pritiskom

6. ZAKLJUČAK

Izvršena je analiza hidrauličkog udara za tri zasebna cevovodna sistema. Opisana je pojava hidrauličkog udara i predstavljene su osnovne jednačine matematičkog modela hidrauličkog udara. Analiza prelaznih režima sprovedena je u softveru AFT Impulse. Predstavljene su osnovne mogućnosti i način rada softvera. Ukratko su opisani svi sistemi. Na osnovu podataka o karakteristikama cevovoda izvršen je izbor položaja adekvatne zaštite sistema. Na osnovu podloga o trasi cevovoda i postojećih elemenata sistema, formiran je model u softveru. Nakon definisanja prostornog i vremenskog koraka pokrenuta je simulacija.

Simulacija je izvršena za ustaljeno stanje (Steady Only) sva tri sistema bez zaštitnih komponenti. Zatim je sprovedena analiza prelaznih režima za slučajeve bez zaštite, kao i analiza sa zaštitnim komponentama – za prva dva sistema (slučaj naglog prestanka rada pumpe) slučajevi sa primenjenim jednim, dva, tri i četiri vazdušna ventila, dok je za treći analizirani sistem sprovedena analiza naglog otvaranja zatvarača sa jednim, dva, tri, četiri, pet, šest i sedam primenjenih vazdušnih ventila, kao i sa primenjenom posudom pod pritiskom. Sprovedena je i analiza prelaznih režima usled naglog zatvaranja zatvarača sistema 3.

Rezultati su pokazali da će sistem 1 i sistem 2 biti sigurni u pogledu hidrauličkog udara ukoliko postavimo četiri vazdušna ventila, jedan koji se nalazi u blizini pumpe i nepovratnog ventila, i tri vazdušna ventila koji se nalaze duž cevovoda. Za sistem 3 postoje dva varijantna rešenja: da bi sistem bio adekvatno zaštićen, potrebno je primeniti sedam vazdušnih ventila, ili primeniti jednu posudu pod pritiskom. Na osnovu ekonomskog aspekta, izabrana je varijanta zaštite sistema posudom pod pritiskom.

7. LITERATURA

- [1] K. Urbanovicz, H.M. Ramos – „New Advances in Water Hammer Problems.“
- [2] M. Ivetić – „Računska hidraulika - Tečenje u cevima“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996.
- [3] aft.com – zvanični sajt kompanije „Applied Flow Technology“ (AFT).
- [4] Applied Flow Technology Corporation – „AFT Impulse 8 – Quick Start Guide“, 2020.

Kratka biografija:



Boban Županjac rođen je u Kraljevu 2000. godine. Diplomski rad iz oblasti građevinarstvo, na temu „Projekat hidrotehničkih radova na izmuljenju kanala Begej“, odbranio je 2023. godine na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Master studije istog fakulteta na studijskom programu Građevinarstvo, modul Hidrotehnika, upisao je 2023. godine.

Ljubomir Budinski rođen je u Kuli 1976. godine. Doktorsku disertaciju odbranio je na Građevinskom fakultetu u Subotici.