

Proračun hidrauličkog udara na cjevovodu MHE „Mlečva“ usljed zatvaranja zatvarača

PETAR R. PRAŠTALO, Institut za građevinarstvo, „IG“ Banja Luka,
Bosna i Hercegovina

Stručni rad
UDC: 621.643:532.542
DOI: 10.5937/tehnika1801037P

Hidraulički udar je fenomen koji se javlja usljed nagle promene brzine tečenja u cjevovodu pod pritiskom. U ovom radu prikazan je problem hidrauličkog udara na cjevovodu MHE „Mlečva“ u opštini Bratunac u Republici Srpskoj, koji nastaje usled zatvaranja zatvarača. Cilj rada je da se prikaže fenomen hidrauličkog udara na sistemu jedne cjevne hidroelektrane, kao i opasnosti koje mogu nastati izazivanjem ovoga fenomena. U radu je prikazan opis samog problema, prikaz jednačina matematičkog modela hidrauličkog udara, kao i analiza hidrauličkog udara korištenjem softvera SurgePRO (Transient flow analysis) i Bentley HAMMER V8i.

Ključne riječi: mala hidroelektrana, matematički model, hidraulički udar, brzina propagacije, SurgePRO, Bentley HAMMER V8i

1. UVOD

Pod pojmom hidraulički (vodni) udar podrazumjeva se nagla i značajna promjena pritiska usljed promjene brzine vode na jednom kraju cjevovoda. Svaka promjena brzine fluida u cjevi za ΔV , izaziva određenu promjenu pritiska, Δp , kao i promjenu gustine fluida $\Delta \rho$. Kada je promjena pritiska značajna i kada se mora uzeti u obzir promjena brzine duž cjevi, dolazi se do modela hidrauličkog udara [1].

Naziv hidraulički udar je odomačen u hidrotehničkoj praksi. Vjerovatno potiče od toga što se pri prolasku talasa povećava pritisak sa strmim čelom, kroz cjev se čuje kao da je udarena čekićem. Sam pojam hidraulički udar je znatno širi i obuhvata sve talase, promjene pritiska fluida u cjevi. U cilju objašnjenja problema hidrauličkog udara, na narednoj slici je prikazano trenutno i potpuno zatvaranje zatvarača na nizvodnom kraju horizontalne cjevi konstantnog poprečnog presjeka.

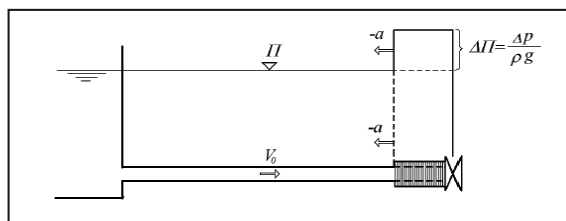
Na prethodnoj slici prikazan je fenomen hidrauličkog udara izazvan naglim zatvaranjem zatvarača na kraju cjevovoda. Usljed naglog zatvaranja zatvarača dolazi do porasta pritiska za Δp .

Adresa autora: Petar Praštalo, Institut za građevinarstvo, „IG“, Banja Luka, Kralja Petra I Karađorđevića 92-94, Bosna i Hercegovina

e-mail: petarprastalo3@gmail.com

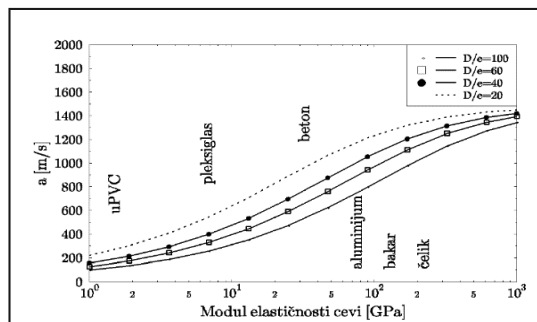
Rad primljen: 09.10.2017.

Rad prihvaćen: 06.02.2018.



Slika 1 - Poremećaj (povećanje pritiska) izazvan zatvaranjem zatvarača na nizvodnom kraju cjevi – hidraulički udar [1]

Kada se pritisak u fluidu poveća, fluid se sabija, a cijev se širi [1]. Uz zavisnosti od vrste materijala, debljine stijenke cijevi kao i samog načina oslonjanja (položaja) cijevi zavisi i brzina propagacije talasa u cjevima. Na sledećoj slici prikazana je promjena brzine propagacije talasa kroz vodu u zavisnosti od elastičnosti zida cjevi i relativne debljine zidova cjevi, odnosno od odnosa D/e [1].



Slika 2 - Uticaj elastičnosti zida cjevi i odnosa D/e na brzinu propagacije talasa u vodi [1]

Hidraulički udar se odvija pod dominantnim uticajem sila inercije i sila elastičnosti (usljed elastičnih karakteristika cjevovoda). Brzine širenja promjene pritiska u cjevovodu su vrlo velike, reda veličine oko 1000 m/s. Porast pritiska usljed hidrauličkog udara obično prati vibracije cijevi i pojavu buke.

Izraženost efekta hidrauličkog udara zavisi od protoka kroz cjevovod, njegove dužine, elastičnim svojstvima, dimenzijama i vremena trajanja rukovanja na samom zatvaraču [3].

2. METODOLOGIJA

Brzina propagacije talasa ima veoma važnu ulogu kod povećanja pritiska izazvanog hidrauličkim udarom. Kod MHE „Mlečva“, gdje je korišten čelični cjevovod prečnika DN 610 mm, sa debljinom stijenke od 4 mm, sa kvalitetom čelika ST-37, koji prema svojim tehničkim karakteristikama pokazuje dobre osobine na otpornost prema hidrauličkom udaru.

Brzina propagacije talasa u cjevovodu pod pritiskom, može se izračunati na sledeći način,

$$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{E D}{E_1 \delta}}} \quad (1)$$

gdje su korištene sledeće oznake:

a – brzina propagacije talasa,

E – zapreminski modul elastičnosti vode,

E_1 – modul elastičnosti materijala od kojeg su cijevi izrađene,

D – prečnik cijevi (spoljašnji prečnik cjevovoda),

δ – debljina stijenke cijevi

Na osnovu karakteristika cijevi koje daje proizvođač cijevi određena je brzina propagacije talasa za cjevovod MHE „Mlečva“. Dakle za čelične cijevi prečnika 609.6 mm (spoljašnji promjer cijevi), čija debljina stijenke iznosi 4 mm, brzina propagacije talasa iznosi:

$$a = \frac{1425}{\sqrt{1 + 0.01 \frac{609.6}{4}}} = 896.954 \text{ m/s}$$

Usljed naglog zatvaranja zatvarača izaziva se trenutno zaustavljanje vode uzvodno od zatvarača i povećanje pijezometarske kote za $\Delta\Pi$, koje se može prikazati na osnovu izraza Žukovskog,

$$\Delta\Pi = \frac{a \cdot \Delta V}{g} \quad (2)$$

Gdje su korištene sledeće oznake:

$\Delta\Pi$ – povećanje pijezometarske kote (ujedno i povećanje pritiska),

a – brzina propagacije talasa u cjevovodu pod pritiskom,

ΔV – promena brzine u cjevovodu usljed hidrauličkog udara,

g – gravitaciono ubrzanje

Prilikom brzog otvaranja i zatvaranja predturbinskog zatvarača i iznenadnog zatvaranja regulacionog organa turbine javlja se hidraulički udar koji mogu da oštete cijevi ili da izazovu pucanje istih. Hidraulički udar je utoliko veći ukoliko je veća brzina vode u cijevi kao i ukoliko je veće (brže) zatvaranje zatvarača. Maksimalni pritisak u cijevima izazvan hidrauličkim udarom usljed naglog zatvaranja zatvarača, izaziva povećanje pritiska za Δp .

$$p_{max} = H_{pad} + \Delta p \quad (3)$$

Gdje su korištene sledeće oznake:

p_{max} – maksimalni pritisak koji se javlja usljed hidrauličkog udara,

H_{pad} – pritisak u cjevovodu prije hidrauličkog udara,

Δp – povećanje pritiska izazvano hidrauličkom udarom.

Na osnovu prethodno definisane brzine propagacije talasa u cjevovodu ostaje još da se odredi povećanje pritiska na cjevovodu usljed trenutnog zatvaranja predturbinskog zatvarača kod MHE „Mlečva“. Radni pritisak prije zatvaranja predturbinskog zatvarača neposredno uzvodno od zatvarača iznosi $p_{radno}=8.94$ bara. Dakle na osnovu relacije Žukovskog imamo:

$$\Delta\Pi = \frac{a \cdot \Delta V}{g} = \frac{896.954 \cdot 1.171}{9.81} = 10.71 \text{ bara}$$

Dok je maksimalni pritisak koji se javlja usljed naglog zatvaranja zatvarača:

$$p_{max} = p_{radno} + \Delta p = 19.65 \text{ bara}$$

Dakle, trenutno zatvaranje predturbinskog zatvarača izaziva znatno povećanje pritiska neposredno uzvodno od zatvarača.

Ovo povećanje pritiska usljed hidrauličkog udara je svakako manje u odnosu na pritisak na koji su cijevi testirane to jest $p_{max} < p_{test}$, odnosno vrijednost pritiska koji cijevi mogu da izdrže.

Međutim, ovim proračunom se dobija samo djelimičan prikaz povećanja pritiska usljed hidrauličkog udara, odnosi se samo na jedno mjesto ispred zatvarača, dok nema jasan prikaz šta je sa ostalim mjestima na samom cjevovodu koliko su oni izloženi hidrauličkom udaru, jer je problem znatno složeniji. Pored toga izraz Žukovskog važi kao teoriska aproksimacija (provjera) maksimalnog pritiska koja se javlja usljed hidrauličkog udara.

Dalji prikaz proračuna hidrauličkog udara odnosi se na cijeli cjevovod, a ne sam na jedan dio. Dakle,

korišteni su softveri koji imaju mogućnost da prikazu rezultate proračuna usljed izazivanja hidrauličkog udara na cjevovodu.

Metode proračuna pomoću softvera baziraju se na rješavanju parcijalnih diferencijalnih jednačina pomoću metode karakteristika. Pored stabilnosti i konzistentnosti numeričkog postupka, mora se voditi računa i o numeričkoj difuziji, koja kao posljedicu ima rasplinjavanje približnog rješenja i mogućnost greške u procjeni ekstremnih vrijednosti pritiska [1].

Na osnovu prethodno navedenih softvera, analizirani su razni slučajevi hidrauličkog udara usljed naglog zatvaranja zatvarača, kao i zatvaranje zatvarača u određenom vremenskom intervalu. U nastavku su prikazani navedeni rezultati, a u podpoglavlju 3.1 prikazane su osnovne jednačine metode karakteristika, a u 3.2 podpoglavlju prikazan je numerički model hidrauličkog udara, u formi metode karakteristika.

3. JEDNAČINE HIDRAULIČKOG UDARA

Relacija Žukovskog izvedena je za naglu promjenu brzine i uz zanemarivanje trenja. Može poslužiti za procjenu ekstremnih vrijednosti pritisaka u kratkim cjevovodima ali nije dovoljna za analizu prelaznih režima u složenim cjevovodima [3].

Za izvođenje matematičkog modela, pored osnovnih pretpostavki o linijskom problemu (varijacije brzine po poprečnom presjeku su zanemarljive, važi hidrostatička raspodjela pritisaka u poprečnom presjeku cjevovoda itd.) i korištenju veličina reprezentativnih za poprečni presjek, uvode se i dodatne pretpostavke:

- Fluid i materijal cijevi ponašaju se kao idealno elastično tijelo
- Sila trenja se uzima kao i kod ustaljenog tečenja
- Nema diskontinuiteta u cijevi, što je preduslov za diferencijalni pristup.

Dinamička jednačina se izvodi za elementarnu dionicu cijevi, a zbog stišljivosti fluida i deformacije cijevi, neophodna je i jednačina kontinuiteta.

Ovdje se nećemo baviti izvođenjem jednačina modela hidrauličkog udara, nego će se samo prikazati jednačine u konačnom obliku, dok se zainteresovani čitalac upućuje na literaturu [1].

Hidraulički udar se opisuje sistemom parcijalnih diferencijalnih jednačina linijskog neustaljenog kretanja realne homogene stišljivosti fluida u cjevovodu.

Osnovne jednačine neustaljenog kretanja u linijskim sistemima pod pritiskom su:

Jednačina održanja količine kretanja:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \lambda \frac{v|v|}{2D} = 0 \quad (4)$$

Jednačina održanja mase (jednačina kontinuiteta):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Gdje su korištene sledeće oznake:

v – srednja brzina kretanja fluida u cijevi,

t – vrijeme,

g – gravitaciono ubrzanje,

$\Pi = \Pi(x)$ – vrijenost pijezometarske kote u presjeku cjevovoda sa apscisom x , u trenutku vremena t ,

x – apscisa,

λ – koeficijent hidrauličkog trenja,

D – prečnik cjevovoda,

a – brzina propagacije talasa

Jednačine su parcijalne diferencijalne jednačine. U njima se javljaju dvije zavisno promjenljive veličine, pijezometarska kota Π , i srednja brzina fluida v , u funkciji od dvije nezavisno promjenljive, x i t . I u nelinearnim članovima javljaju se parcijalni izvodi na prvi stepen, pa se radi o kvazi-linearnim jednačinama.

Kompletne jednačine hidrauličkog udara primjenjene na složene probleme iz prakse, ne mogu se analitički riješiti. Za dobijanje rješenja moraju se koristiti približne metode.

U inženjerskoj praksi dugo su korištene grafičke metode, dok je uvođenjem računara u širu upotrebu kao i razvojem određenih softvera za hidraulički udar uobičajen način rješavanja diferencijalnih jednačina matematičkog modela hidrauličkog udara kao i složenih inženjerskih problema iz prakse [4]. U ovom radu je rješenje upravo tako prikazano primjenom različitih softvera da se vidi na koji način se dolazi do rješenja, kao i kakav je kvalitet konačnih rezultata.

3.1. Osnovne jednačine metode karakteristika

Kod hiperboličkih parcijalnih diferencijalnih jednačina, postoji mogućnost svodenja parcijalnih diferencijalnih jednačina (4) i (5) na obične, koje važe duž određenih linija u ravni (x,t) . To jest postoje dvije familije krivih, koje se nazivaju karakteristike.

Ovaj rad nije predmet izvođenja i formiranja običnih diferencijalnih jednačina u formi karakteristika, već se one daju u konačnom obliku, pogodnom za korištenje i formiranje numeričkog modela. Dakle postoje dva para običnih diferencijalnih jednačina u formi karakteristika označenih sa C^+ i C^- , odnosno pozitivna i negativna karakteristika respektivno [1].

$$\frac{d\Pi}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{\lambda a v |v|}{2gD} - V \sin \alpha = 0$$

$$\Rightarrow C^+, (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + a$$

$$-\frac{d\Pi}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{\lambda a V |V|}{2gD} + V \sin \alpha = 0$$

$$\Rightarrow C^-, (7)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - a$$

Ako su poznate brzina propagacije talasa, a , i brzina, v , kroz tačku P (x_1, y_1) u ravni (x, y) mogu se povući dvije linije nagiba $dt/dx = 1/(v+a)$ i $dt/dx = 1/(v-a)$, koje se nazivaju pozitivna i negativna karakteristika. Jasno je da su karakteristike prave linije, koje definišu presječna tačka u ravni (x, y), na osnovu kojih karakteristike označavaju maksimalni domet poremećaja stvorenog u toj presječnoj tački. Takođe, presječna tačka je ujedno i zona uticaja na neko drugo mjesto duž cjevovoda. U zavisnosti od graničnog uslova koji se može definisati zavisi i sam način proračuna, odnosno smijer samog proračuna kod metode karakteristika.

3.2. Numerički model

Da bi na osnovu prikazanih jednačina metode karakteristika mogli da primijenimo na praktičnim primjerima slijedi prikaz formiranja numeričkog modela za proračun. Dakle, navedeni softveri koji su korišćeni u ovom radu za proračun hidrauličkog udara, bazirani su na numeričkom modelu formiranom na osnovu jednačina za pozitivnu i negativnu karakteristiku C^+ i C^- . Kako bi izbjegli izvođenje i formiranje numeričkog modela u nastavku slijedi prikaz kompletnih jednačina numeričkog modela, koje se odnose na konkretan slučaj duž linijskog sistema vodozahvat, cjevovod i zatvarač:

$$\Pi_i^{n+1} = \Pi_{i-1}^n - B(Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^n) - MQ_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| + \frac{\Delta t}{A} Q_{i-1}^n \sin \alpha \quad (8)$$

$$\Pi_i^{n+1} = \Pi_{i+1}^n + B(Q_i^{n+1} - Q_{i+1}^n) + MQ_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| + \frac{\Delta t}{A} Q_{i+1}^n \sin \alpha, \quad (9)$$

gdje je skraćeno napisano, $B = a/(gA)$ i $M = \lambda \Delta x / (2gDA^2)$ [1].

3.3. Granični uslov

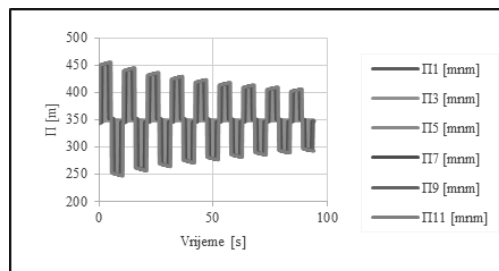
Kao granični uslov na samom sistemu MHE „Mlečva“ jeste zatvarač koji se nalazi u mašinskoj zgradi, pomoću kojeg se može mijenjati režim rada na samoj turbini. Kod ovog derivacionog postrojenja, korišćen je zatvarač čija se konstrukcija sastoji od poluge sa čeličnim tegom na kraju, tako da svojom sopstvenom težinom preko kontrolne table može da izazove veoma brzo zatvaranje zatvarača. Ovakav tip zatvarača, je novijeg tipa koji ima ugrađenu „sondu“ na samom mjestu vodozahvata, tako da su međusobno povezani. Bilo kakva promjena samog nivoa na vodozahvatu izaziva promjenu, odnosno regulisanje samog zatvarača.

Zatvarač predstavlja nizvodni granični uslov, odnosno diktirani uslov za izazivanje hidrauličkog udara u samom cjevovodu MHE „Mlečva“. Pored toga u radu je analiziran hidraulički udar koji se izaziva sa zatvaranjem zatvarača. Međutim, ovim radom nije obuhvaćen uticaj samog nivoa vode na mjestu vodozahvata. Odnosno oscilacije proticaja i doticaja vode u vodozahvat preko sonde utiču na sam rad regulacionog zatvarača. Međutim ove promjene nisu toliko značajne tako da nisu zanimljive za analizu. Ovim radom je prikazan hidraulički udar usljed trenutnog zatvaranja zatvarača, kao i njegovim postepenim zatvaranjem u određenom vremenskom koraku.

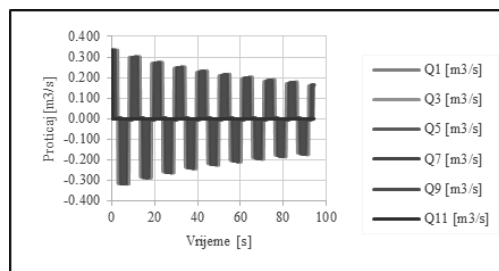
4. PRIKAZ REZULTATA

Za detaljniji prikaz problema hidrauličkog udara u nastavku slijedi prikaz promjene proticaja, pritiska kao i promjene pijezometarske kote. Na osnovu trase cjevovoda čija dužina iznosi cca 2350 m, promjena navedenih veličina prikazana je na svakih 235 m.

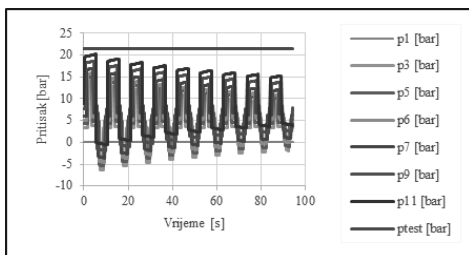
Na osnovu iznešene postavke problema slijedi prikaz promjene pijezometarskih kota, promjene proticaja kao i promjene pritiska usljed naglog zatvaranja predturbinskog zatvarača. Proračun modela hidrauličkog udara radjen je u softveru Excel u kojem je formirana mreža za proračun na osnovu metode karakteristika za proračun hidrauličkog udara. U nastavku slijedi prikaz takvih rezultata usljed trenutnog zatvaranja zatvarača. Ovim manevrom je izazvan direktni hidraulički udar u cjevovodu MHE „Mlečva“, rezultati su prikazani na sledećim slikama.



Slika 3 - Prikaz promjene pijezometarskih kota usljed trenutnog zatvaranja predturbinskog zatvarača na svakih 235 m dužine cjevovoda



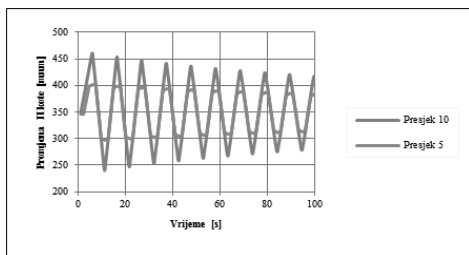
Slika 4 - Prikaz promjene proticaja usljed trenutnog zatvaranja predturbinskog zatvarača na svakih 235 m dužine cjevovoda



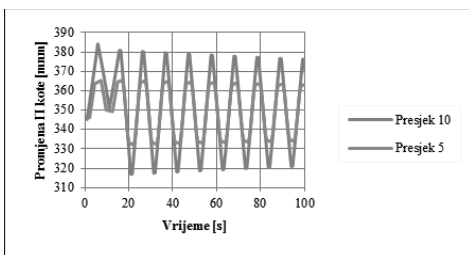
Slika 5 - Prikaz promjene pritiska usljed trenutnog zatvaranja predturbinskog zatvarača na svakih 235 m dužine cijevovoda.

Prikazani rezultati opisuju hidraulički udar izazvan trenutnim zatvaranjem zatvarača u potpunosti nije prikazan fenomen hidrauličkog. U nastavku sljedi dalji prikaz analize hidrauličkog udara na cijevovodu MHE „Mlečva“. Za proračuna je korišten program SurgePRO (Transient flow analysis), pomoću kojeg je cijevovod podjeljen na deset presjeka na međusobnom rastojanju od cca 261 m.

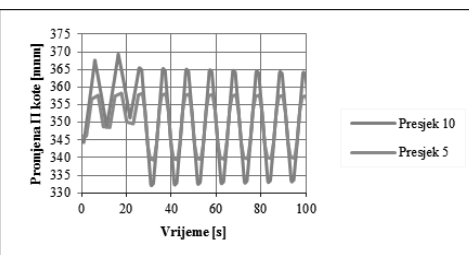
Dalji prikaz riješenja prikazan je na polovini cijevovoda u presjeku 5 kao neposredno ispred samog zatvarača. Rezultati su prikazani za pojedine vrijednosti zatvaranja zatvarača za vrijeme od 5, 15, 25, 60 i 120 sekundi.



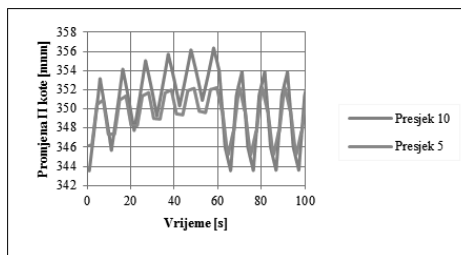
Slika 6 - Zatvaranje predturbinskog zatvarača u trajanju od 5 s



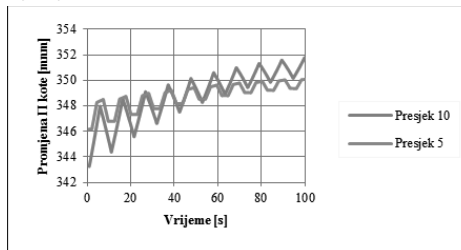
Slika 7 - Zatvaranje predturbinskog zatvarača u trajanju od 15 s



Slika 8 - Zatvaranje predturbinskog zatvarača u trajanju od 25 s



Slika 9 - Zatvaranje predturbinskog zatvarača u trajanju od 60 s

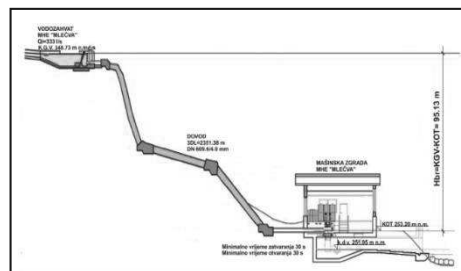


Slika 10 - Zatvaranje predturbinskog zatvarača u trajanju od 120 s

Na osnovu rezultata prikazanih na prethodnim slikama vidi se promjena reprezentativnih veličina u vremenu. Može se primjetiti da usljed trenutnog zatvaranja zatvarača pritisak naglo poraste, dok nakon određenog vremena postepeno se smanjuje. Pored tog za primjetiti je da na 235 m od vodozahvata pritisak ima negativnu vrijednost, to pak znači da njegova vrijednost pada ispod ose cjevi, uslovno rečeno do pojave podpritiska, što u pogledu cijevovoda nije prihvatljivo.

Na osnovu tehničkih specifikacija cjevi, kao i samog kvaliteta materijala od kojeg su cjevi napravljene, kao karakteristika proizvođača cjevi navodi se maksimalni vrijednost pritiska, koju cijevovod može da izdrži u uslovima rada jednog sistema.

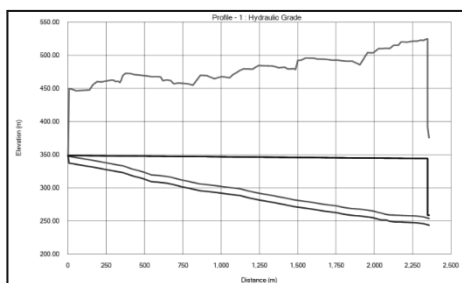
Na kraju ovog razmatranja, ostaje još da se prikaze model hidrauličkog udara na cijevovodu MHE „Mlečva“, korištenjem softvera za analizu hidrauličkog udara. Dakle, riječ je o softveru Bentley HAMMER V8i (Series 6), koji je izrađen za analizu hidrauličkog udara kod sistema pod pritiskom. Na sledećoj slici prikazan je podužni presjek sistema MHE „Mlečva“ od vodozahvata do mašinske zgrade, sa turbinom i odvodnim kanalom.



Slika 11 - Šema sistema MHE „Mlečva“

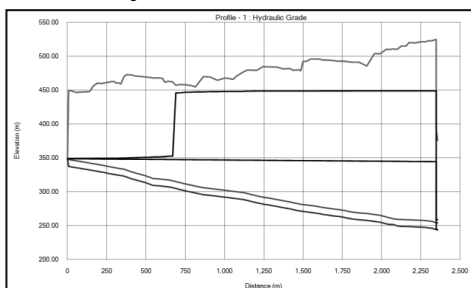
Softver ima mogućnost da se zadaje vrijeme zatvaranja zatvarača u vremenu. Takođe kao ulazne podatke

potrebno je izabrati materijal od kojeg je cjev napravljena, prečnik cjevovoda i debljinu stijenke cjevovoda. Pored toga potrebno je kao ulazni podatak definisati brzinu propagacije talasa, kao i minimalnu vrijednost pritiska koja se može javiti usljed hidrauličkog udara. Dakle, u ovom slučaju prikazan je model u kojem dolazi do trenutnog zatvaranja predturbinskog zatvarača kao i zatvaranje u određenom vremenskom periodu. U ovom softveru postoji mogućnost da se prikaze promjena Π kote duž ose cjevovoda usljed zatvaranja zatvarača na kraju cjevovoda. Pomoću softvera može se prikazati detaljna analiza fenomena hidrauličkog udara na samom cjevovodu uz mogućnost podešavanja samog vremena zatvaranja zatvarača. Na sledećoj slici prikazan je promjena Π kote usljed naglog zatvaranja predturbinskog zatvarača na samom cjevovodu.



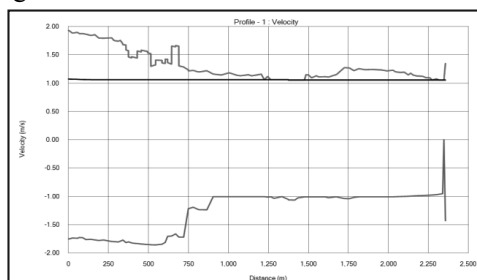
Slika 12 - Prikaz promjene Π kote u vremenu duž cjevovoda

Na prethodnoj slici su prikazane maksimalne i minimalne vrijednosti pritiska duž samog cjevovoda. Crna linija predstavlja pijezometarsku kotu prije izazivanja hidrauličkog udara, crvena linija predstavlja najveću vrijednost pritiska usljed hidrauličkog udara, dok je plava linija predstavlja vrijednost podpritiska, a zelena linija je osa cjevovoda. Iz priloženog se može vidjeti da najveća vrijednost pritiska se javlja na samom mjestu izazivanja hidrauličkog udara to jest na mjestu predturbinskog zatvarača. Međutim, ovo je samo prikaz poslije zatvaranja zatvarača. Naime, šta se dešava kada se zatvarač zatvori, da li tečnost nastavlja da osciluje u cjevovodu, i na koji način se to dešava. Odgovor je svakako da nastavlja, tako da je na sledećoj slici prikazana promjena pritiska, nakod 60 s od vremena zatvaranja zatvarača.

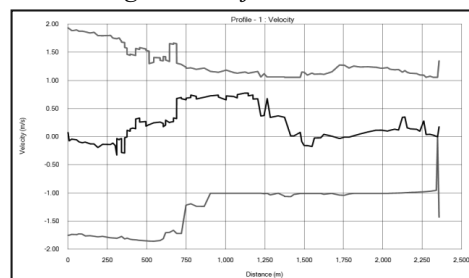


Slika 13 - Prikaz promjene pritiska nakon 60 s od zatvaranja predturbinskog zatvarača

Prednost samog softvera je u tome što se može na adekvatan način simulirati i sama zaštita od hidrauličkog udara kada je ona potrebna. Pored toga može se definisati i samo vrijeme trajanja simulacije, kao i prikaz drugih veličina koje su od interesa. Možemo da prikazemo kao se mijenja brzina u cjevovodu usljed hidrauličkog udara u vremenu. Na sledećoj slici je prikazana takva promjena usljed simulacije kada se zatvarač trenutno zatvori kao i poslije 150 s od hidrauličkog udara.



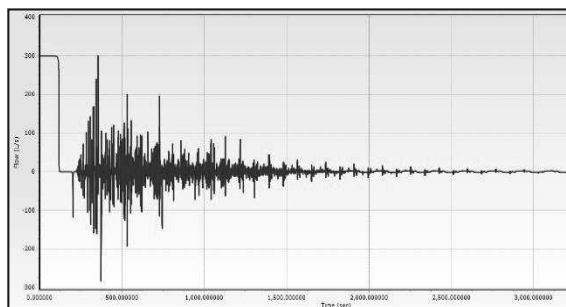
Slika 14 - Prikaz promjene brzine na cjevovodu usljed trenutnog zatvaranja zatvarača



Slika 15 - Prikaz promjene brzine poslije 150 s od zatvaranja predturbinskog zatvarača

Na prethodnim slikama gdje je prikazana promjena brzine usljed hidrauličkog udara u vremenu. Možemo da vidimo da je crvenom linijom prikazana vrijednost maksimalnih brzina, dok je zelenom linijom prikazana vrijednost minimalnih brzina na samom cjevovodu. U ovom slučaju možemo da vidimo na dijagramu da brzina ima negativnu vrijednost. Njeno fizičko tumačenje je najjednostavnije objasniti time da se mijenja smjer tečenja vode to jest da vode usljed inercije mijenja smjer strujanja, pa je prikazana sa negativnom vrijednosti.

Kao još jedna veličina koja se može posmatrati izazivanjem hidrauličkog udara a koja je od interesa jeste protok. Dakle softver ima mogućnost da se prikaze i promjena protoka u određenom dijelu cjevovoda usljed hidrauličkog udara. U ovom slučaju zanimljivo je posmatrati proticaj na mjestu najvećeg pritiska, to jest uzvodno od samog zatvarača na tom presjeku. Sam instalisani protok na ovom sistemu je 330 l/s, pa je baš u tom slučaju u ustaljenom režimu rada i izazvan hidraulički udar. Na sledećoj slici prikazana je promjena proticaja neposredno uzvodno od predturbinskog zatvarača u funkciji vremena.



Slika 16 - Prikaz promjene proticaja neposredno uzvodno od predturbinskog zatvarača

Simulacija dodatne zaštite od hidrauličkog udara nije predmet ovog rada, pa se zainteresovan čitalac upućuje na literaturu [1], [2], [3]. Pored toga kao preporuka ostaje da se prikaže samo vrijeme potrebno za zatvaranje predturbinskog zatvarača. Dakle vrijeme zatvaranja zatvarača treba da je duže od $T_z > \frac{2L}{a}$, odnosno duže od 5.22 s. Dakle adekvatnim radom na samom predturbinskom zatvaraču mogu se izbjeći preveliko povećanje pritiska koja može da izazove oštećenje cjevovoda.

Ukupno vrijeme t , za koje talasi dostižu do zatvarača od početka cjevovoda i obrnuto, na osnovu prethodno iznetog, iznosi,

$$t = \frac{2 \cdot L}{a} \quad (10)$$

Ako T označava vrijeme zatvaranja zatvarača, onda mogu da nastupe dva slučaja: $T < t$ i $T > t$. Kada je u pitanju prvi slučaj, tj kad je $T < t$, javlja se direktni hidraulički udar.

Nejednačina $T < \frac{2 \cdot L}{a}$, može se napisati kao $L > \frac{a \cdot T}{2}$, što pokazuje da se direktni hidraulički udar javlja kod velike dužine cjevovoda ili kod brzog zatvaranja zatvarača.

Direktni hidraulički udar se javlja uglavnom prilikom zaustavljanja rada male MHE i nezavisno od dužine cjevovoda.

Drugi slučaj kada je $T > t$ ($T > \frac{2 \cdot L}{2}$) javlja se indirektni hidraulički udar. U ovom slučaju povratni talas dolazi do donjeg kraja cjevovoda prije zatvaranja zatvarača i smanjuje pritisak u cjevovodu, koji je manji nego kod direktnog hidrauličkog udara.

$$L < \frac{a \cdot T}{2} \quad (11)$$

Pošto je $L < \frac{a \cdot T}{2}$, proizilazi da se indirektni hidraulički udar pojavljuje kod male dužine cjevovoda ili kod sporog zatvaranja zatvarača. Za određivanje Δp – povećanje pritiska kod indirektnog hidrauličkog udara na kraju cjevovoda, koriste se približne metode i izrazi, jer je tačno izračunavanje porasta pritiska Δp znatno komplikovano.

Kod brzog podizanja zatvarača, pritisak u cjevovodu se smanjuje. Ova pojava se naziva negativni hidraulički udar, kod kojeg su takođe moguća dva slučaja, kao i kod pozitivnog hidrauličkog udara to jest kad je $T < t$ kada se javlja pojava direktnog hidrauličkog udara i $T > t$ kada se javlja pojava indirektnog hidrauličkog udara.

Na osnovu definisanih slučajeva pojave hidrauličkog udara kako direktnog tako i indirektnog, ostaje još da se definiše vrijeme za koje treba da se zatvori zatvarač, kako vrijednost pritiska ne bi prešla maksimalnu vrijednost definisanu na osnovu karakteristika cijevi kada je u pitanju povećanje pritiska kao i da pritisak ne padne ispod kote osovine cijevi do te mjere da stvori vakum.

Vrijeme za koje treba da se zatvori zatvarač da se ne bi prešla data vrijednost pritiska p , može se odrediti sledećom formulom,

$$T = \frac{v \cdot L}{g \cdot \Delta p} + \frac{L}{a} \quad (12)$$

Kada je u pitanju vrijeme zatvaranja zatvarača kod MHE „Mlečva“ ova vrijednost iznosi 5.22 s.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih riješenja na cjevovodu MHE „Mlečva“ može se primjetiti da trenutnim zatvaranjem predturbinskog zatvarača izaziva se povećanje pritiska za Δp . Dake, na osnovu prikazanih riješenja možemo da primjetimo da kod „ručnog“ proračuna korištenjem samo Excel softvera pomoću metode karakteristika može da se dođe do prihvatljivih inženjerskih rezultata. I ako je postupak dosta jednostavan ipak se može prikzati šta se dešava na samom cjevovodu usljed hidrauličkog udara.

U zavisnosti od nivoa same analize do koje se želi analizirati hidraulički udar zavisi i sam kvalitet rezultata. Pored toga što je sistem na samoj MHE „Mlečva“ dosta kompleksan, rezultati su prikazani pomoću različitih softvera.

Kada se na kraju uporede rezultati dobijeni preko navedenih softvera možemo slobodno da kažemo da rezultati mogu biti prihvatljivi u zavisnosti od slučaja samog problema. Dakle, za grube analize kada se želi doći do vrijednosti maksimalnih pritisaka, može se koristiti relacija Žukovskog. Međutim, sa ovim proračunom ostajemo uskraćeni za ostale dijelove cjevovoda, kakve promjene se na njima dešavaju usljed hidrauličkog udara.

Korištenje softvera SurgePRO, ima veće prednosti jer obuhvata više potencijalnih mjesta na samom cjevovodu koji se analiziraju. Pored toga može se obuhvatiti i vremenski korak potreban za zatvaranje zatvarača, odnosno definisanjem samog vremena zatvaranja zatvarača, šta se dešava sa vrijednostima

pritisaka. Sve ove prednosti koje imaju prethodno navedeni softveri, obuhvata softver Bentley HAMMER V8i, jer u potpunosti prikazuje sve veličine od interesa koje mogu da budu od koristi projektantu.

Dakle, kada su u pitanju velika investiciona ulaganja, kao što su hidroenergetski objekti, zahtjeva se detaljno projektovanje svakog dijela takvog objekta. Prilikom projektovanja malih hidroelektrana svakako treba da se analizira hidraulički udar kao i adekvatna zaštita ako je potrebna.

Bentley HAMMER V8i, za ovu analizu pokazao se kao veoma pouzdan i detaljan softver, koji može da prikaze promjene određenih veličina od interesa u realnom vremenu koje su svakako od velike koristi.

Na kraju može se samo skrenuti pažnja da treba biti oprezan u korištenju ovakvih i sličnih softvera koji se koriste u rješavanju ovako velikih i složenih inženjerskih problema. Naime, na tržištu ima veliki broj nekomercijalnih softvera koji mogu biti na raspolaganju inženjeru projektantu, ali treba poznavati njegov

princip rada, kao i kakav je kvalitet njegovih rezultata nakon završetka simulacije.

LITERATURA

- [1] Ivetić M, *Računska hidraulika-tečenje u cijevima*, Građevinski fakultet Beograd, 1996,
- [2] Bentley HAMMER V8i Edition *User's Guide*, 2014,
- [3] Mihailović M, *Male hidroelektrane*, I knjiga, 1983.
- [4] Mihailović M, *Male hidroelektrane - istraživanje, projektovanje i izgradnja*, 1985.
- [5] Ramos H, *Civil Works – Hydraulic design of small hydro plants*, 2011.
- [6] Schleiss A, *Standardization of civil engineering works of small high-head hydropower plants and development of an optimization tool*, 2006.
- [7] Tanchev Lj, *Dams and Appurtenant Hydraulic Structures*, 2004.

SUMMARY

CALCULATION OF THE HYDRAULIC STROKE IN THE MLEČVA MHPP PIPELINE CAUSED BY SUDDEN CLOSING OF THE CLOSER

Water hammer is a pressure surge phenomenon that occurs in pressurised pipelines as a result of a change of the flow velocity. This paper presents analyses of water hammer in the pipeline of mini-hydro power plant (MPP) Mlečva in Bratunac, Republika Srpska. The objective of this paper is to analyse water hammer in the pipeline as well as to assess risks to the system from pressure surge

The paper presents a description of the problem, equations of water hammer mathematical model and water hammer analysis using the software SurgePRO (Transient flow analysis) and Bentley HAMMER V8i.

Key words: *mini-hydro power plant, mathematical model, water hammer, propagation, SurgePRO, Bentley HAMMER V8i*