

CELOVITI PRISTOP K NOVELACIJI PRETOČNIH KRIVULJ PRELIVNIH OBJEKTOV HE NA REKI DRAVI S KOMBINACIJO FIZIČNEGA IN 3D NUMERIČNEGA MODELIRANJA

dr. Matej Müller, univ. dipl. inž. grad., DHD d.o.o., Praprotnikova ul. 37, 2000 Maribor

dr. Martin Bombač, univ. dipl. inž. grad., Inštitut za hidravlične raziskave – Hidroinštitut, Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

dr. Boštjan Gregorc, univ. dipl. inž. stroj., DEM d.o.o., Obrežna ul. 170, 2000 Maribor

Povzetek

Z namenom zagotavljanja varnega prevajanja visokovodnih valov ter transporta sedimentov znotraj verige hidroelektrarn na reki Dravi je bila izdelana celovita hidravlična študija, v sklopu katere je bila izvedena tudi novelacija pretočnih krivulj prelivnih objektov. Obstoječe pretočne krivulje namreč temeljijo na več desetletij starih raziskavah fizičnih modelov ali poenostavljenih 1D enačbah, ki po objektih med seboj niso usklajene. Ker imata tako fizični kot tudi numerični model vsak svoje prednosti in slabosti, je bil izbran kombiniran pristop. V prvi fazi se je izdelal fizični model objekta hidroelektrarne Vuzenica. Na podlagi izvedenih serij meritev so bile izdelane nove pretočne krivulje prelivnih polj z zapornicami. Vzporedno se je izdelal še 3D numerični model istega objekta z orodjem OpenFOAM, s katerim je možno obravnavati tok s prosto gladino kot dvofazni tok (voda - zrak). Rezultati numeričnega modela so bili verificirani s pomočjo izvedenih meritev. Ugotovljeno je bilo, da je zaradi dobrega sovpadanja numeričnega in fizičnega modela možen prenos pristopa

k izdelavi pretočnih krivulj s pomočjo 3D numeričnega modeliranja še na preostale objekte verige HE na reki Dravi. S takšnim pristopom je časovna in finančna ekonomičnost raziskav optimalna, novelirane pretočne krivulje pa dovolj zanesljive, da bodo prispevale k natančnejši določitvi pretokov reke Drave ter k zagotavljanju varnega prevajanja visokovodnih valov znotraj verige hidroelektrarn.

Uvod

V sklopu celovite študije razmer reke Drave, katere cilj je preučiti in zagotoviti varno prevajanje visokovodnih valov ter transporta sedimentov vzdolž verige HE na reki Dravi, so bile novelirane tudi pretočne krivulje posameznih prelivnih objektov HE. Za izdelavo le-teh je bil izbran pristop, ki vključuje tako fizično kot tudi 3D numerično modeliranje hidrotehničnih objektov. V prispevku so prikazane nekatere raziskave in ugotovitve fizičnega modela HE Vuzenice ter 3D numeričnih modelov HE Vuzenica, HE Dravograd in jezcu Melje.

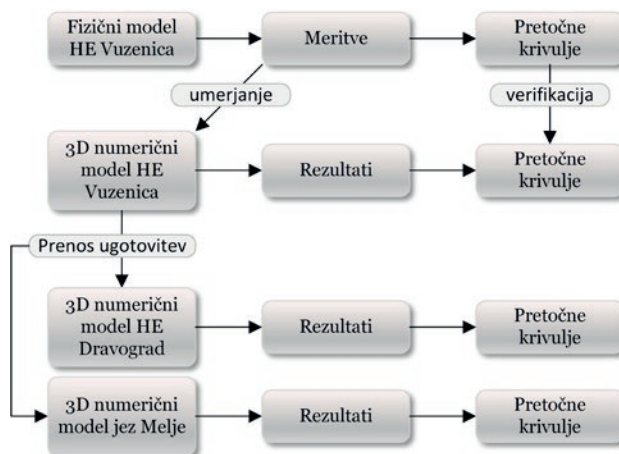
Namen in cilji

V preteklosti izvedene analize prevajanja visokovodnih valov vzdolž Dravske verige hidroelektrarn (HE) so pokazale določena odstopanja med izmerjenimi pretoki in volumni poplavnih valov na posameznih hidroelektrarnah. Obstoječe pretočne krivulje namreč temeljijo na več desetletij starih raziskavah fizičnih modelov ali poenostavljenih 1D enačbah, ki po objektih med seboj niso dobro usklajene.

V preteklih nekaj letih so bili tudi posodobljeni objekti za merjenje zgornje in spodnje vode pri prelivnih objektih HE na reki Dravi. Do nedavnega so se meritve namreč opravljale v neposredni bližini prelivnih polj, kjer je gladina na lokaciji zg. vode lahko pod vplivom depresijske krivulje preliwa, gladina na lokaciji za meritev spodnje vode pa pod vplivom vodnega skoka, mešanja vode in zraka ter izrazitega turbulentnega režima toka vode za prelivnimi polji. Nove lokacije merilnih mest so odmaknjene od prelivnih objektov, s tem pa bo možno zagotoviti ustreznejše in natančnejše meritve zgornje vode, ki so bistvenega pomena za določevanje pretoka. Zaradi prestavljenih merilnih mest pa so obstoječe pretočne krivulje (poleg že omenjenih drugih razlogov) manj natančne, saj so le-te vezane na lokacije starih merilnih mest. Zato je novelacija pretočnih krivulj pomembna za ustrezno prevajanje visokovodnih valov čez celotno verigo HE.

Za izdelavo natančnih pretočnih krivulj je potreben čim bolj natančni hidravlični model. Ker imata tako fizični kot tudi numerični model vsak svoje prednosti in slabosti, je bil izbran kombiniran pristop. V prvi fazi se je izdelal fizični model objekta hidroelektrarne Vuzenica. Na podlagi izvedenih serij meritev so nato bile izdelane nove pretočne krivulje prelivnih polj z zapornicami. Vzporedno se je izdelal še 3D numerični model istega objekta. Rezultati numeričnega modela so bili verificirani s pomočjo izvedenih meritev s fizičnega modela. Umerjeni koeficienti in parametri ter druge ugotovitve pa so nato bile prenesene na 3D numerični model HE Dravograd in 3D numerični model jez Melje. Iz rezultatov vseh treh 3D numeričnih modelov so bile izdelane pretočne krivulje prelivnih polj in zapornic. Pri tem pa je bila numerična negotovost pretočnih krivulj določena na podlagi primerjave s pretočnimi krivuljami s fizičnega modela HE Vuzenica. Pretočne krivulje preostalih prelivnih objektov hidroelektrarn na reki Dravi pa so v tej fazi bile verificirane in po potrebi dopolnjene na podlagi analize volumnov preteklih visokovodnih valov Drave in pritokov, pri čemer je bil objekt HE Vuzenica izbran kot merodajna oporna točka, saj je ocenjeno, da imajo na novo izdelane pretočne krivulje zaradi najnovejših raz-

iskav fizičnega in numeričnega modela največjo natančnost.



Slika 1: Shematični prikaz pristopa k novelaciji pretočnih krivulj

Fizično modeliranje

Hidroelektrarna Vuzenica je druga stopnja HE na slovenskem odseku reke Drave. Gre za pretočno hidroelektrarno stebnega tipa, kar pomeni, da se agregati nahajajo v ločilnih stebrih med prelivnimi polji.

Zapornični del je sestavljen iz tablaste spodnje in zgornje zapornice s fiksno ukrivljeno zaklopko.

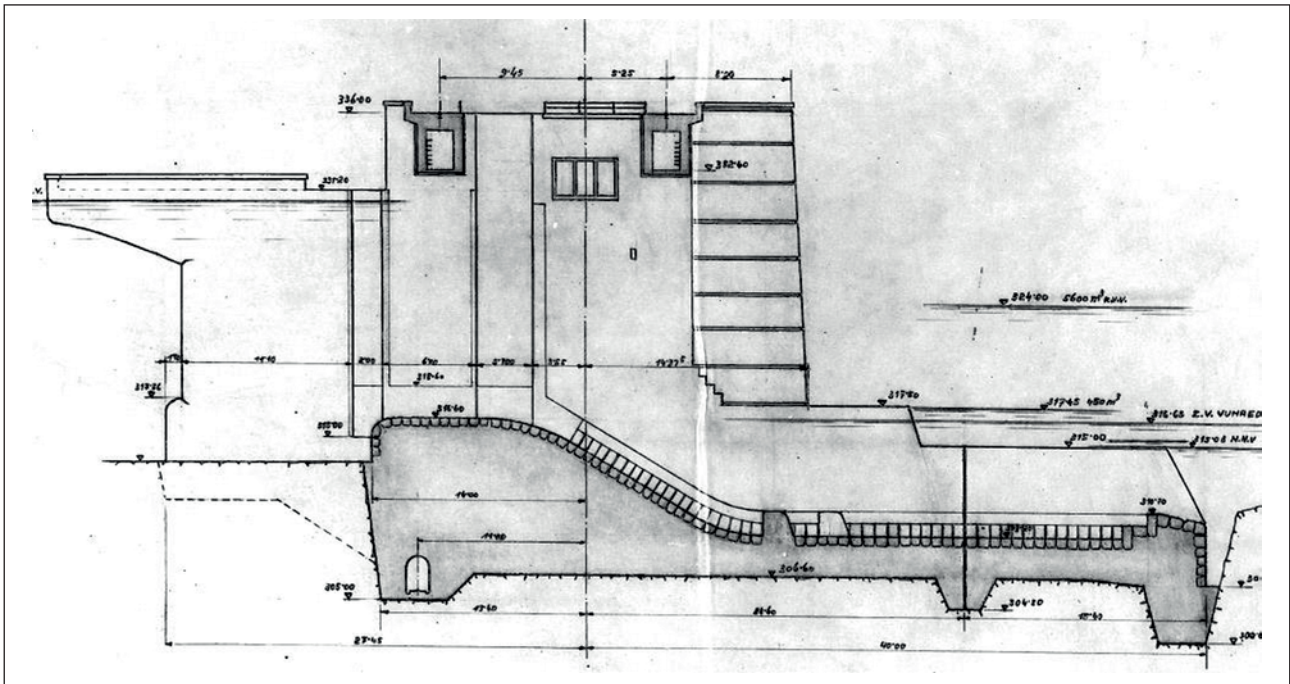
Vzpostavitev fizičnega modela

Za izvedbo hidravlične modelne raziskave (Bombač in sod., 2020) je bil na zunanji ploščadi Inštituta za hidravlične raziskave izdelan prostorski model obravnavanega območja v merilu 1:40. Načrti pregrade so bili pridobljeni od DEM. Gre za digitalizirane in potrjene originalne načrte prelivnih polj, zapornic in turbin iz časa gradnje HE.

Model obsega rečno strugo Drave v dolžini cca 890 m gorvodno od pregrade ter 640 m dolvodno od pregrade.

Za določitev vpliva usedlih sedimentov na pretočno sposobnost prelivnih polj smo predvideli poleg trenutnega in izhodiščnega dna še vmesni varianti z bagranim trenutnim dnem do kote 322 m n.m. in do kote 319 m n.m.

Zaradi prevladujočega vpliva težnostnih sil je bila pri prenosu modelnih veličin med modelom in prototipom upoštevana Froudova modelna podobnost. Ker je pri obravnavanem modelu problematika vezana lokalno na objekt in ne na daljši rečni



Slika 2: Vzdolžni prerez prelivnega polja HE Vuzenica



Slika 3: Fizični hidravlični model HE Vuzenica v merilu 1:40 na zunanji laboratorijski ploščadi Inštituta za hidravlične raziskave – pogled iz dolvodne strani



Slika 4: Fizični hidravlični model objekta – pogled iz dolvodne strani



Slika 5: Fizični hidravlični model objekta – pogled iz gorvodne strani

odsek (gre za t.i. kratki model), je vpliv viskoznih sli zanemarljiv.

Za izvedbo modelne raziskave je bila uporabljena naslednja merilna oprema:

- standardni trikotni merski preliv (Thompsonov preliv) za merjenje dotoka vode na fizični model s točnostjo meritev $< 1,5 \%$ od trenutne vrednosti,
- ostna merila v steklenih valjih oz. neposredno nad gladino vode na fizičnem modelu za merjenje nivoja gladine z resolucijo meritve $0,1 \text{ mm}$,
- diferencialna tlačna merilna sonda z resolucijo $0,1 \text{ mm}$ na novi lokaciji meritev zgornje vode DEM za spremljanje hitrih sprememb gladine v akumulacijskem bazenu in
- 2D ADV merilna sonda Sontek za merjenje hitrosti

Pretočna sposobnost pri prostem prelivu

Z meritvami pretočne sposobnosti prelivnih polj pri prostem prelivanju (t.j. stanje, kjer so zapornice popolnoma dvignjene iz vode) in stanju dna akumulacije iz časa izgradnje HE Vuzenica se je določila nova pretočna krivulja. Na hidravličnem modelu je bil raziskan vpliv nesimetričnega obratovanja prelivnih polj na pretočno sposobnost. Za ta namen so bile opravljene meritve pretočne sposobnosti pri prostem prelivanju za različne primere obratovanja prelivnih polj. Ugotovljeno je bilo, da se pretočna sposobnost posameznih prelivnih polj med seboj bistveno ne razlikuje oziroma so razlike manjše od merilne negotovosti meritev pretoka ($< 1,5 \%$). Pretočna sposobnost pri paralelnem obratovanju treh prelivnih polj (N-1) je večja za povprečno $3,5 \%$.



Slika 6: Prosti preliv preko desnega prelivnega polja – obstoječe dno

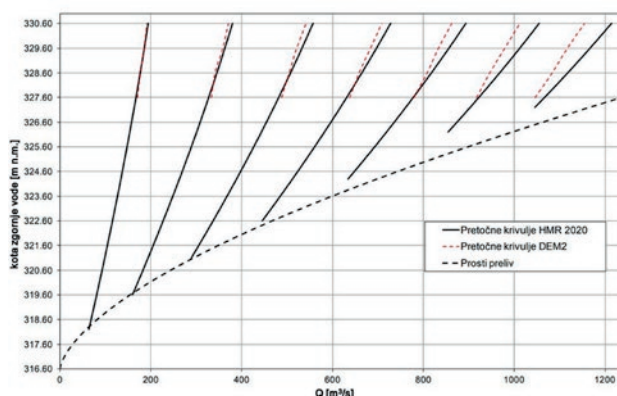
Pretočna sposobnost pri podlivanju pod spodnjo zapornico

Raziskave so obsegale območje odprtja spodnjih zapornic od popolnoma spuščene lege do dviga zapornice za $a = 7,0 \text{ m}$ ter območje gladin zgornje vode v akumulaciji HE Vuzenica od nominalne kote zajezebe $330,36 \text{ m n.m.}$ do kote, pri kateri se ob danem odprtju zapornice vodni curek odlepi od zapornice in preide v prosto prelivanje. Na podlagi meritev pretočne sposobnosti skozi leva tri prelivna polja (N-1) so bile določene pretočne enačbe za podlivanje pod spodnjo zapornico HE Vuzenica za obstoječe, izhodiščno in dve vmesni stanji dna struge.

Nove enačbe pretočnih krivulj so bile izdelane najprej za primere brez vpliva spodnje vode z aproksimacijo polinomske funkcije 3. stopnje v kateri nastopata spremenljivki H (tlačna višina zgornje vode na temenom preliwu, merjena 170 m gorvodno od pregrade) ter a (vertikalna razdalja med ležiščem noža in nožem spodnje zapornice).

Vpliv spodnje vode se pri izračunu pretoka preko prelivnega polja upošteva s vpeljavo koeficienta vpliva spodnje vode σ . Le-ta je funkcija koeficienta potopljenosti preliwu ter odprtja zapornice in relativne višine zgornje vode H . Enačba za σ je bila izdelana na podlagi meritev.

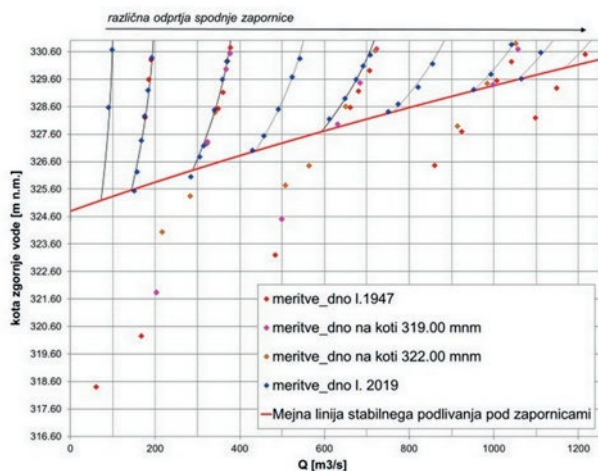
Za projektno stanje dna v akumulaciji (l. 1947), se meritve pretočne sposobnosti tako pri prostem prelivanju kot tudi podlivanju pod zapornico dokaj dobro ujemajo z obstoječimi pretočnimi krivuljami (Slika 7).



Slika 7: Pretočne krivulje za eno prelivno polje za podlivanje pod spodnjo zapornico HE Vuzenica – izhodiščno stanje dna (polne linije), stare pretočne krivulje (črtkane linije)

Vpliv odloženih sedimentov v akumulaciji HE Vuzenica na zmanjšanje pretočne sposobnosti pri podlivanju pod spodnjo zapornico ob nominalni koti zajezebe znaša zgolj 0% do ca. 3% . Krivulje na

sliki 8 predstavljajo izdelane pretočne krivulje za obstoječe dno, točke pa meritve za različna stanja dna.



Slika 8: Pretočne krivulje za eno prelivno polje za podlivanje pod spodnjo zapornico HE Vuzenica v primeru obstoječega stanja dna ter meritve za vsa stanja dna

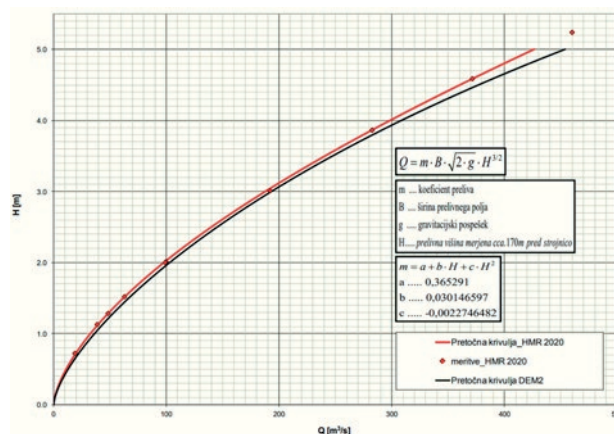
Pretočna sposobnost pri prelivanju preko zaklopke

Meritve so se izvajale ob paralelnem obratovanju vseh štirih prelivnih polj. Zasutje akumulacije s sedimenti v sedanjem stanju ne vpliva na pretočno sposobnost prelivanja čez zgornje zapornice. Na podlagi izvedenih detajlnih meritev je bila določena splošna pretočna enačba, kjer je koeficient preliva funkcija zgornje vode. Enačba za koeficient preliva je izdelana na podlagi meritev.



Slika 9: Meritve prelivanja čez zgornjo zapornico; paralelno odprte vse 4 zapornice

Nova pretočna krivulja bistveno ne odstopa od dosedanje. Do majhnega odstopanja pride pri večjih prelivnih višinah.



Slika 10: Pretočna krivulja za prelivanje preko zgornje zapornice HE Vuzenica (spuščena 5m pod nominalno gladino zg. vode)

Numerično modeliranje

Za izdelavo 3D numeričnih modelov je bilo uporabljeno programsko orodje OpenFOAM. Gre za orodje, s katerim je možno vzpostaviti raznovrstne modele, ki lahko simulirajo različne prenosne pojave. Program uporablja za diskretizacijo parcialnih diferencialnih enačb metodo končnih volumnov. Za potrebe modeliranja toka s prosto gladino je bil uporabljen solver interFOAM, ki zajema enotekočinski dvofazni model s t.i. metodo volumskih deležev.

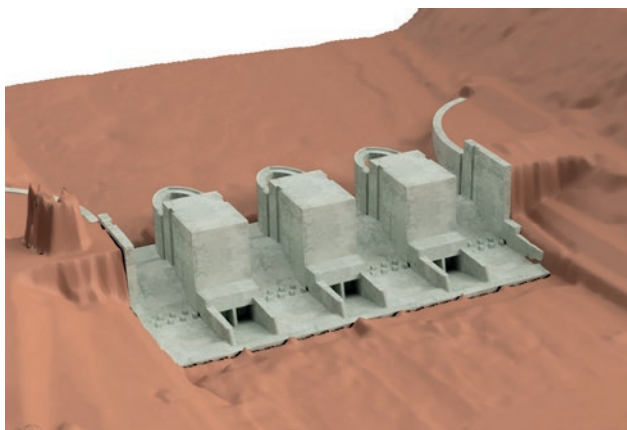
OpenFOAM razpolaga s precej modeli turbulence, tako RAS (Reynoldsova povprečena simulacija) kot tudi LES (simulacija velikih vrtincev). Izhodiščno smo uporabili standardni $k-\epsilon$ model turbulence, ki je v splošnem med najbolj pogosto uporabljenimi modeli tudi za tovrstne primere vodnega toka. V sklopu modela turbulence so bile obravnavane tudi različne stenske funkcije in različni koeficienti, katerih vrednost je precej odvisna od vrste in strukture stene. Za primerjavo je bil uporabljen še standardni $k-\omega$ model turbulence.

HE Vuzenica

Geometrija

3D numerični model obsega odsek Drave dolžine ca. 500m. Izdelani so bili modeli za ista stanja dna struge kot pri fizičnem modelu.

3D model objekta je bil izdelan na podlagi projektantskih načrtov iz časa gradnje. V modelu so zajete tudi odprtine v turbinskih stebrih (vtok in iztok v in iz turbin).



Slika 11: Izdelani 3D model objekta HE Vuzenica – pogled iz dolvodne strani



Slika 12: Izdelani 3D model objekta HE Vuzenica – pogled iz gorvodne strani

Robni pogoji

Za potrebe določitve robnih pogojev 3D numeričnega modela, predvsem porazdelitve hitrosti na zgornjem robnem pogoju, je bil izdelan 2D numerični model daljšega odseka Drave. Za izdelavo 2D modela je bilo uporabljeno programsko orodje Telemac2D s k- ϵ modelom turbulence.

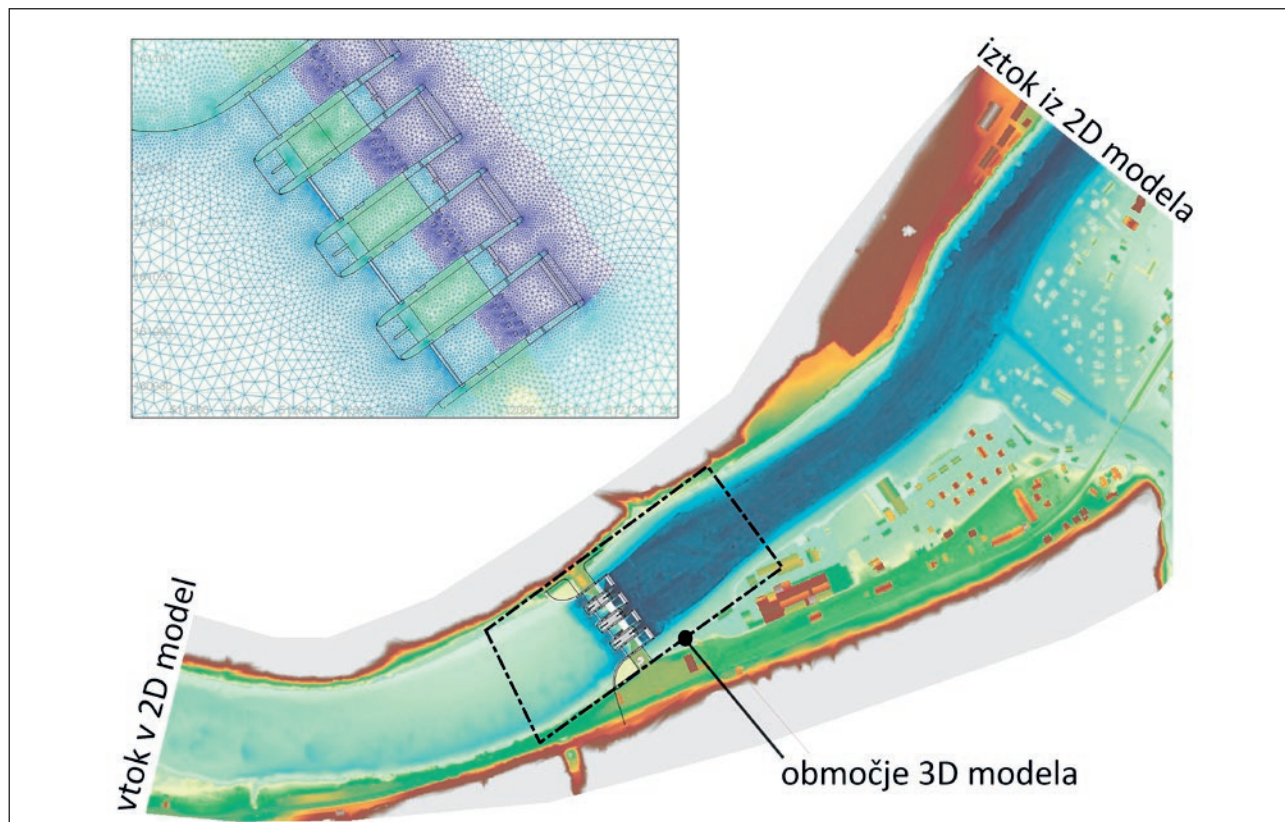
Hrapavost sten je v 3D modelu zajeta v sklopu modela turbulence s pomočjo t.i. stenskih funkcij v katerih nastopa koeficient nadomestne zrnivosti ks. Vrednost koeficienta je bila ocenjena s pomočjo strokovne literature, ki med drugim podaja pri-

poročene vrednosti za prod in beton (Chow, 1959). Za primerjavo so bili izvedeni tudi izračuni z uporabo stenskih funkcij za popolnoma gladke stene.

Občutljivost modela in verifikacija

Izdelana je bila analiza občutljivosti rezultatov na nekatere vhodne podatke. Obravnavani so bili naslednji možni vplivi na rezultate numeričnega modela:

- vpliv robnih pogojev,
- vpliv modela turbulence,
- vpliv hrapavosti sten ter



Slika 13: Območje 2D in 3D modela in primer 2D numerične mreže na območju objekta HE

- vpliv merila modela

Za nekaj izbranih primerov je bilo izdelanih več modelov z različnimi robnimi pogoji, modeli turbulence in drugimi vhodnimi parametri. Obravnavane so bile naslednje variacije numeričnega modela:

- **Izhodiščno:** k-ε model turbulence, enakomerna porazdelitev vtočnih hitrosti, stenska funkcija za hrapave stene, odprtje zapornic $a=300\text{cm}$;
- **U_telemac:** isto kot izhodiščno, le da so vtočne hitrosti povzete iz 2D modela ;
- **k-omega:** isto kot izhodiščno, le da je uporabljen k-ω model turbulence;
- **M1:40:** isto kot izhodiščno, le da je numerična mreža v merilu 1:40;
- **M1:40, gladke stene:** isto kot M1:40, le da so uporabljene stenske funkcije za gladke stene;
- **U_telemac, gladke stene:** isto kot U_telemac, le da so uporabljene stenske funkcije za gladke stene.

Pri izdelavi pretočnih krivulj je bistvenega pomena natančnost izračunanih pretočnih koeficientov, saj je pretok čez prelivna polja od njih linearno odvisen. Zveza med pretokom in pretočnim koeficientom je podana v naslednjih enačbah.

Enačba za prosti preliv

$$Q = m \cdot \sigma \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{zv}^{1.5}$$

Enačba za podlivanje pod sp. zapornicami:

$$Q = m \cdot \sigma \cdot B \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot h_{zv}}$$

kjer so

Q ... pretok čez preliv

m ... pretočni koeficient

σ ... koeficient vpliva sp. vode

B ... širina preлива

a ... višina odprtja zapornice

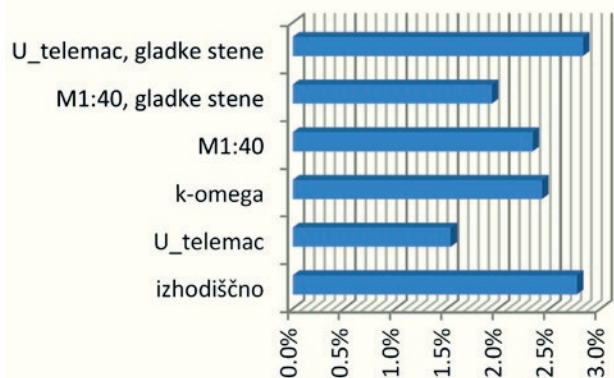
g ... gravitacijski pospešek

h_{zv} ... razdalja med kono preлива in gladino zg. vode

Najmanjše odstopanje izračunanih pretočnih koeficientov od izmerjenih je bilo ugotovljeno v primeru U_telemac (t.j. 1.54%).

Izredno pomembna je tudi ugotovitev, da je vpliv modela turbulence in hrapavosti sten relativno majhen, saj se vsi primeri med seboj bistveno ne razlikujejo. Le-to pomeni, da je model dovolj tog na določene vhodne parametre.

Izdelana je bila tudi primerjava izmerjenih in s 3D numeričnim modelom izračunanih hitrostnih pro

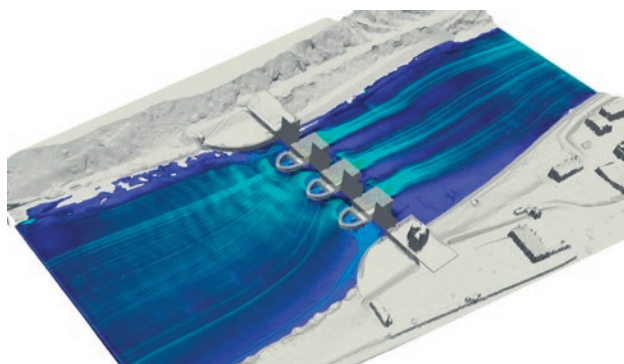


Slika 14: Odstopanje pretočnih koeficientov, dobljenih z numeričnim modelom od izmerjenih

filov. V ta namen so bile na fizičnem modelu za nekaj primerov pretokov Drave in odprtij zapornic dodatno izvedene še meritve hitrosti v dveh vertikalnih oseh in eni horizontalni osi ter gladine v več točkah tik gorvodno od prelivnih polj. Najboljše sovpadanje je bilo tudi v tem primeru ugotovljeno v primeru U_telemac.

Rezultati

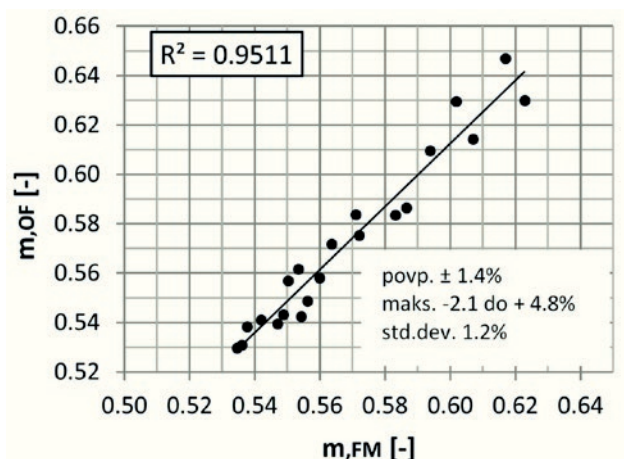
Za potrebe izdelave pretočnih krivulj je bilo izvedenih 63 izračunov, ki zajemajo prelivanje preko zg. zapornice, podlivanje pod sp. zapornico ter vpliv sp. vode. Dodatno je bilo izvedenih še 24 izračunov z različnimi stanji dna ter 12 verifikacijskih primerov.



Slika 15: Primer rezultata 3D numeričnega modela HE Vuzenica - prikaz hitrosti in tokovnic

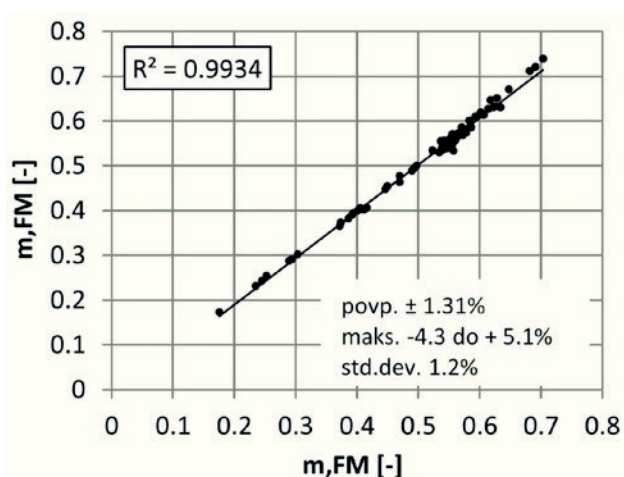
V nadaljevanju je prikazana primerjava pretočnih koeficientov izračunanih s pomočjo 3D numeričnega modela in koeficientov dobljenih s pomočjo fizičnega modela.

V primeru upoštevanja samo primerov podlivanja pod spodnjimi zapornicami za obstoječe stanje dna znaša koeficient linearne korelacije med pretočnimi koeficienti numeričnega in fizičnega modela $R^2=0.95$, povprečno odstopanje pa $\pm 1.4\%$.



Slika 16: Linearna korelacija izračunanih (m_{OF}) in izmerjenih pretočnih koeficientov (m_{FM}) za primere podlivanja pod spodnjimi zapornicami za obstoječe stanje dna struge

V primeru upoštevanja vseh rezultatov numeričnega modela, ki zajemajo tako podlivanje pod sp. zapornicami, prelivanje preko zg. zapornic ter prosti preliv (s popolnoma dvignjenimi zapornicami) za vsa stanja dna znaša koeficient linearne korelacije $R^2=0.99$, povprečno odstopanje pa $\pm 1.3\%$.

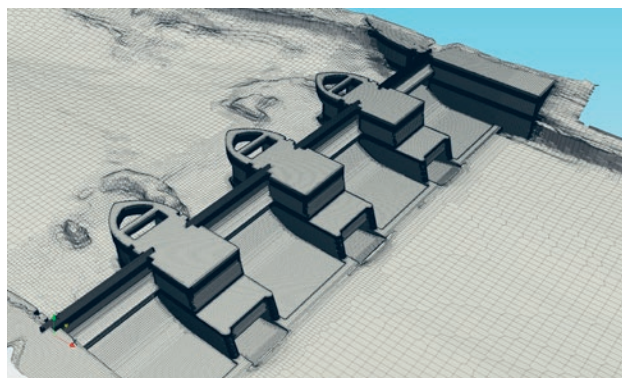


Slika 17: Linearna korelacija izračunanih (m_{OF}) in izmerjenih pretočnih koeficientov (m_{FM}) za vse izračunane primere

HE Dravograd

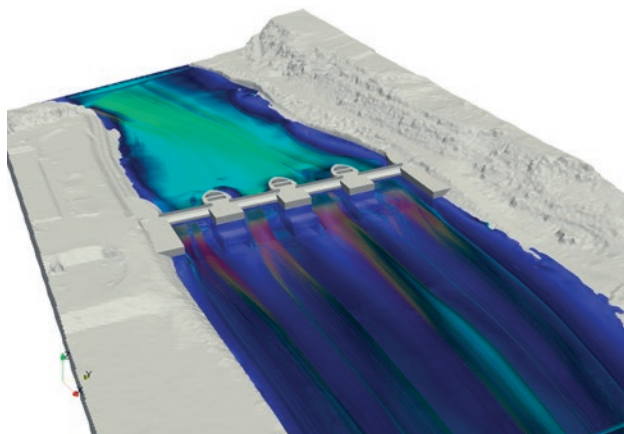
HE Dravograd ima, podobno kot HE Vuzenica, tablaste spodnje zapornice na katerih so nameščene še tablaste zgornje zapornice s fiksnim ukrivljenim robom.

Numerični model za HE Dravograd je bil izdelan po enakem postopku kot za HE Vuzenica. Pri tem je bila uporabljena podobno zgoščena numerična mreža, enaki model turbulence in stenske funkcije ter enaki koeficienti nadomestne zrnivosti k_s .

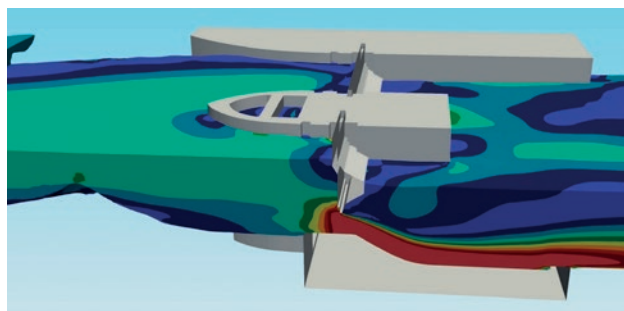


Slika 18: Numerična mreža 3D numeričnega modela HE Dravograd

Za potrebe izdelave pretočnih krivulj HE Dravograd je bilo izvedenih 44 izračunov za obstoječe stanje dna. Dodatno je bilo izvedenih še 12 izračunov za primer različnih stanj dna ter 8 verifikacijskih primerov.



Slika 19: Primer rezultata 3D numeričnega modela HE Dravograd – tokovnice in hitrosti



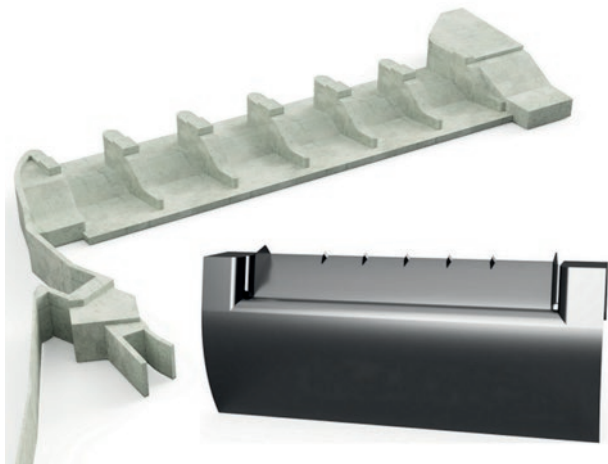
Slika 20: Vzdolžni prerez skozi prelivno polje 3D numeričnega modela HE Dravograd v primeru visoke spodnje vode – hitrosti

Jez Melje

Jez Melje je del objekta HE Zlatoličje, ki je za razliko od HE Vuzenica in HE Dravograd, derivacijskega tipa. Izdelava 3D numeričnega modela jezu

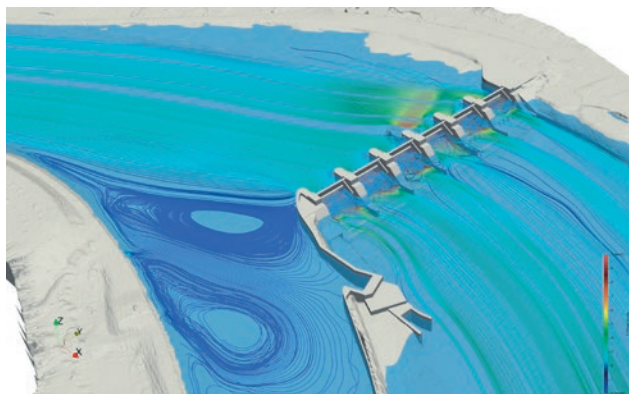
Melje je potekala podobno kot izdelava HE Vuzenica in HE Dravograd. Model zajema tudi začetni del derivacijskega kanala.

Za izdelavo pretočnih krivulj prelivnih polj z zapornicami na jezu Melje je bilo izvedenih 114 izračunov (podlivanje pod spodnjimi segmentnimi zapornicami, prelivanje preko zgornjih zaklopnih



Slika 21: 3D model jezu Melje in zapornice

zapornic, prosti preliv ter primeri s vplivom sp. vode). Dodatno je bilo izvedenih še 5 verifikacijskih izračunov in številni izračuni z različnimi stanji dna struge.



Slika 22: Primer rezultata 3D numeričnega modela jezu Melje – tokovnice in hitrosti

Zaključek

Na prostorskem fizičnem modelu HE Vuzenica v merilu 1:40 so bile določene pretočne krivulje za primere prostega prelivanja, podlivanja pod spodnjo zapornico in prelivanja čez zgornjo zapornico. Obravnavano je bilo obstoječe (iz leta 2020) in izhodiščno stanje dna (iz leta 1947) ter dve vmesni stanji, ki predstavljata stanji v primeru bagranja

sedimentov iz akumulacije. Prav tako so bile izvedene meritve hitrosti v več vertikalnih profilih ter enem horizontalnem profilu za potrebe umerjanja 3D numeričnega modela. Meritve hitrosti, pretokov in gladin so bile uporabljene za umerjanje in verifikacijo 3D numeričnega modela HE Vuzenica, ki je bil izdelan z namenom določitve numerične negotovosti. Ugotovljeno je bilo, da rezultati numeričnega modela izredno dobro sovpadajo z meritvami s povprečnim odstopanjem koeficientov preliva $\pm 1.3\%$. Prav tako je bilo ugotovljeno, da 3D numerični model izkazuje dovolj veliko togost, da se ugotovitve in uporabljeni koeficienti lahko prenesejo na izdelavo 3D numeričnih modelov drugih HE. Tako sta bila izdelana še 3D numerična modela HE Dravograd in jez Melje, iz rezultatov pa so bili izdelane novelirane pretočne krivulje za omenjena objekta. Pretočne krivulje preostalih prelivnih objektov hidroelektrarn na reki Dravi pa bodo v tej fazi verifisirane in po potrebi dopolnjene na podlagi analize volumnov preteklih visokovodnih valov Drave.

Z vsemi izvedenimi raziskavami se bo izboljšala natančnost pretočnih krivulj s tem pa tudi natančnost določitve pretokov preko posameznih pregrad ob pojavu visokovodnih dogodkov, kar je za obratovalno osebje HE zelo pomembno. Preveritev obstoječih pretočnih krivulj je bila med drugim potrebna tudi zaradi določenih sprememb geometrije rečnega dna pred in za pregrado od časa izgradnje pregrad do danes, prav tako pa je bila potrebna zaradi prestavitve merilnih mest, ki so bila v zadnjih nekaj letih prenovljena. Novelacija pretočnih krivulj bo tako posledično izboljšala optimalno prevajanje visokovodnih valov čez verigo HE na reki Dravi.

Viri

- Bombač, M., Mlačnik, J. 2020. Hidravlična modelna raziskava HE Vuzenica. Hidroinštitut
- Müller, M., Hojnik, T. 2021. 3D numerični model HE Vuzenica, HE Dravograd in jez Melje - osnutek končnega poročila. DHD.d.o.o.

Ven Te Chow. 1959. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company Inc.