

Razvoj sistema za napovedovanje hidroloških razmer na porečjih Save in Soče

Sašo Petan^{*}, Nejc Pogačnik^{*}, Mojca Sušnik^{*}, Janez Polajnar^{*}, Gregers Jørgensen^{**}

Povzetek

Agencija Republike Slovenije za okolje je v okviru projekta Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja izvedla nadgradnjo in širitev sistema za napovedovanje hidroloških razmer, ki je bil leta 2006 vzpostavljen za porečje Mure v okviru regijskega sodelovanja s hidrološko službo avstrijske Štajerske. V prispevku so opisani zasnova in zgradba prognostičnega hidrološkega sistema na porečjih Save in Soče, kalibracija hidrološkega in hidrodinamičnega modela, operativno delovanje sistema in prikaz njegovih rezultatov, trenutne omejitve sistema in predviden razvoj v prihodnosti.

Uvod

V okviru projekta River Basin Agenda Alpine Space, ki ga je podprla iniciativa EU INTERREG IIIB, je bil leta 2006 izdelan sistem za napovedovanje hidroloških razmer na reki Muri. To je bil prvi konceptualni hidrološki prognostični sistem, ki sta ga hidrološki službi Slovenije in avstrijske Štajerske vpeljali v svoje operativno delo. Ker se je takšno operativno orodje izkazalo kot zelo koristno in nepogrešljivo pri opravljanju vsakodnevnih nalog prognostičnih služb, so se prav kmalu pojavile tudi potrebe po širitvi prognostičnega sistema na druga porečja in tudi njegovi nadgradnji, kar bi še dodatno povečalo operativno učinkovitost hidrološke prognostične službe v Sloveniji. Tako je Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) že leta 2006 pričela s pripravo projekta Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja ali BOBER (Boljše opazovanje za boljše ekološke rešitve), s katerim je kandidirala na razpisu Evropskega kohezijskega sklada - Operativni program razvoja okoljske in prometne infrastrukture za obdobje 2007–2013 in pozneje tudi pridobila sredstva za njegovo izvedbo. V okviru projekta BOBER je bila pripravljena naloga širitve in nadgradnje obstoječega prognostičnega sistema za porečji Save in povodje Soče. S to nalogo je bil načrtan razvoj Oddelka za hidrološko prognozo na Agenciji RS za okolje med letoma 2010 in 2015.

Širitev in nadgradnja sistema za napovedovanje hidroloških razmer

Sistem za napovedovanje hidroloških razmer se je v okviru projekta BOBER razširil na porečje reke Save do zadnje vodomerne postaje na slovenskem ozemlju – Jesenice na Dolenjskem, in celotno povodje reke Soče, skupaj z italijanskimi pritoki, do izliva v Jadransko morje. Nadgradnja prognostičnega sistema je poleg razvoja kontrolnega orodja in izboljšane uporabniške izkušnje obsegala še naslednje tri bistvene sklope:

- vključitev dodatnih meteoroloških modelov, katerih napovedi služijo kot vhodni podatek za simulacije hidroloških modelov prognostičnega sistema,

^{*} Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, SI-1000 Ljubljana

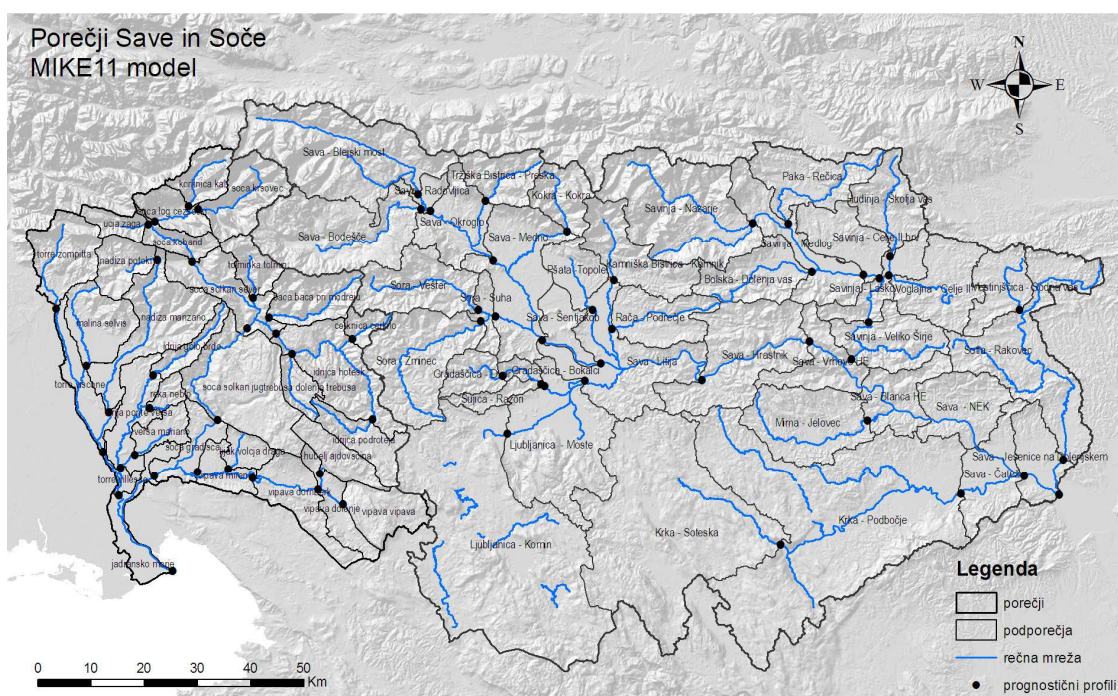
^{**} DHI, Agern Allé 5, DK-2970 Hørsholm, Danska.

- navezavo sistema na sistem za opozarjanje širše javnosti pred poplavno nevarnostjo Hidroalarm,
- izdelavo spletne strani, ki je namenjena prikazu modelskih rezultatov hidrološkega prognostičnega sistema zainteresiranim uporabnikom.

Modelski območji porečij Save in Soče zajemata 53 % oz. 11 % površine Slovenije. Tako lahko Oddelek za hidrološko prognozo pri napovedovanju hidroloških razmer v Sloveniji sedaj uporablja rezultate hidrološkega prognostičnega sistema, ki obsega cca 70 % slovenskega ozemlja na porečjih Mure, Save in Soče.

Zasnova hidrološkega prognostičnega sistema

Osnovna ideja pri izgradnji hidrološkega prognostičnega sistema je bila zasnovati tak sistem, ki bo omogočal enoten, enostaven in hiter pregled hidrološkega stanja in napovedi v izbranih prognostičnih profilih na porečjih Save, Soče in Mure. Zato smo se odločili za ohranitev modelskega jedra sistema – programskega paketa MIKE11 skupine DHI, ki je že bilo uporabljeno na porečju Mure. Hidrološki prognostični sistem smo želeli v največji meri zgraditi okoli že obstoječih hidroloških, meteoroloških in prostorsko-informacijskih baz podatkov na ARSO. Izgradnja sistema se je tako usmerila k pridobivanju podatkovnih virov oz. pregledu njihovega stanja, pripravi potrebnih vhodnih podatkov in parametrov za potrebe modeliranja, zasnovi kontrolnega orodja sistema in pregledovalnika modelskih rezultatov ter njihovega shranjevanja za potrebe poznejših analiz.



Slika 1: Delitev porečij Save in Soče na podporečja glede na izbrane prognostične profile hidrološkega prognostičnega sistema

Na porečju Save (10 843 km²) smo izbrali 40, na povodju Soče (3 426 km²) pa 31 vodomernih postaj za prognostične profile znotraj sistema (Slika 1). Območji obeh porečij smo razdelili na prispevna območja izbranih prognostičnih profilov. Tako smo določili

izhodišča za hidrološka modela Save in Soče, ki smo ju zastavili v osnovni komponenti paketa MIKE11 – NAM. Gre za determinističen in konceptualen hidrološki model, ki s semi-empiričnimi matematičnimi izrazi poenostavljeno opisuje komponente hidrološkega kroga pri tleh. NAM določa površinskih odtok iz prispevnih območij prognostičnih profilov, ki so znotraj modela obravnavana kot posamezne računske enote. Z vključitvijo enostavnega snežnega modula pa model upošteva tudi akumulirano vodo v snegu na različnih višinskih conah prispevnih območij.

Za izgradnjo enodimenzijskega hidrodinamičnega modela, ki služi kinematični propagaciji valov površinskega odtoka vzdolž poenostavljene hidrografske mreže, smo zbrali razpoložljive prečne profile vodotokov in informacije o večjih hidrotehničnih objektih na vodotokih (pregrade in akumulacije hidroelektrarn, jezovi in talni pragovi). Pri operativnem delovanju je sistemu dodan še modul za korekcijo napovedanih pretokov in vodostajev. Ta modul znotraj hidrodinamičnega modela popravi modelirane pretoke in vodostaje z izmerjenimi vrednostmi ob upoštevanju eksponentne funkcije približevanja k napovedanim vrednostim.

Kalibracija hidrološkega in hidrodinamičnega modela

Po opravljeni delitvi porečij Save in Soče na podporečja oz. računske enote hidrološkega modela so bili pripravljene vsi potrebni podatki za kalibracijo: 10-letni nizi (1998–2007) urnih podatkov o temperaturah in padavinah iz meteorološke mreže merilnih postaj, pretokih in vodostajih na vodomernih postajah hidrološke merilne mreže in potencialne evapotranspiracije na računskih enotah (dnevni podatki). Hidrološki model je bil pripravljen za kalibracijo po izračunu uteži za določitev srednje vrednosti padavin in temperature na posamezno računsko enoto, določitvi površin 100-metrskih višinskih pasov znotraj računskih enot in izbiri temperaturnih in padavinskih gradientov po višini. Glavni kriteriji pri kalibraciji hidrološkega modela so bili naslednji: ujemanje vodne bilance, visokovodnih konic, padajočih delov hidrogramov in baznega odtoka znotraj 10-letnega obdobja kalibracije. Kalibracija parametrov hidrološkega modela je bila opravljena predvsem ročno z občasnimi zagoni modula za avtokalibracijo. Pri tem smo ponekod naleteli na težave predvsem zaradi slabše raziskanih ali določenih razvodnic na kraških območjih. Končni rezultat kalibracije je bil zelo odvisen od kakovosti podatkov o padavinah in pretokih.

Kalibriran hidrološki model je bil nato povezan s hidrodinamičnim modelom. Zaradi preredke mreže znanih prečnih prerezov na vodotokih je bila kalibracija hidrodinamičnega modela opravljena predvsem v izbranih prognostičnih profilih tako, da so bili dodani bistveni elementi, ki opredeljujejo hidrodinamične razmere na obravnavanih odsekih. Tako smo pri različnih vodnih stanjih dosegli odstopanje simuliranega vodostaja od izmerjenega znotraj intervala ± 20 cm. V model so vstavljeni tudi glavni hidrotehnični objekti s pravili obratovanja regulacijskih naprav.

Operativna postavitve sistema za napovedovanje hidroloških razmer

Hidrološki model znotraj operativnega hidrološkega prognostičnega sistema vzame kot vhodne podatke izmerjene količine padavin in temperature na avtomatskih meteoroloških postajah, ki so vključene v mreže hidroloških in meteoroloških opazovanj Slovenije in tudi sosednjih držav, ter napovedane količine padavin in temperature z različnimi meteorološkimi modeli. Hidrološki prognostični sistem izdelava napoved pretokov in

vodostajev v izbranih prognoističnih profilih za 72 in 144 ur vnaprej glede na kombinacijo merjenih in z različnimi meteorološkimi modeli napovedanih količin padavin in temperatur. Tako znotraj sistema obratujejo štiri različne postavitve hidroloških modelov, ki jih prikazuje Preglednica 1. Posebnost druge postavitve je ta, da meteorološki model INCA-CE za zelo kratkoročno napovedovanje, ki izdeluje napovedi v polurnih intervalih, vsebuje tudi analizo meteoroloških razmer za pretekle pol ure glede na meritve avtomatskih meteoroloških postaj in vremenskega radarja. Ob tem se vhodni časovni nizi meteoroloških spremenljivk kreirajo vsako uro tako, da se analize predhodnih napovedi INCA-CE ohranjajo. Četrta postavitev hidrološkega modela je eksperimentalne narave, saj služi testiranju določenih rešitev zaradi slabšega poznavanja dejanske porazdelitve merjenih padavin v prostoru ali pravil obratovanja hidrotehničnih objektov, ki so vključeni v hidrodinamični model.

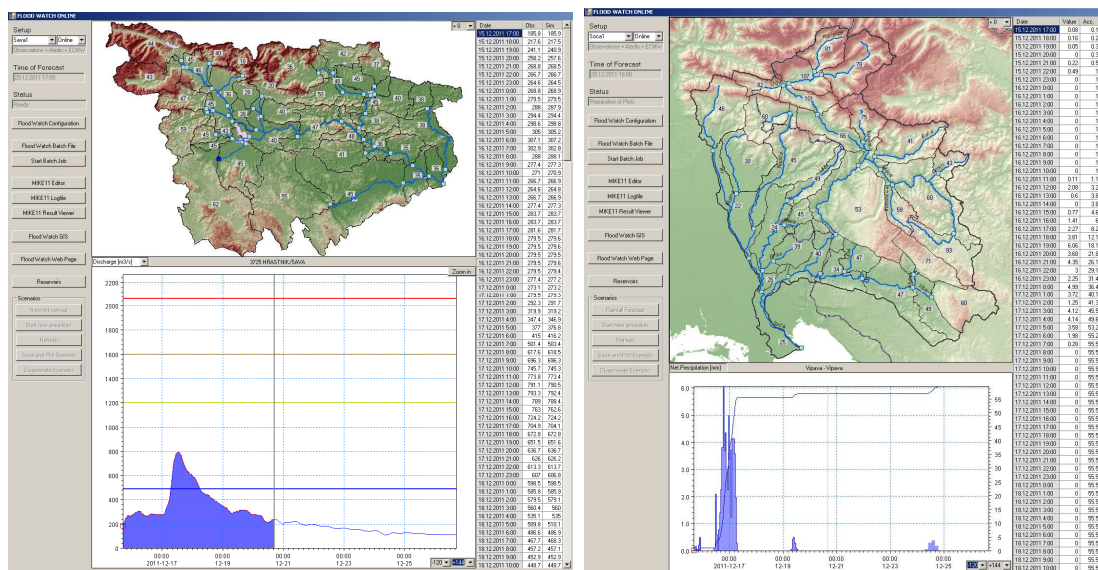
Preglednica 1: Različne postavitve hidroloških modelov znotraj sistema za napovedovanje hidroloških razmer na porečjih Save in Soče

postavitev hidrološkega modela	meritve avtomatskih merilnih postaj zadnjih 120 ur	napovedi meteorološkega modela			
		INCA-CE za prihodnjih 12 ur	NMM za prihodnjih 72 ur	ALADIN/SI za prihodnjih 72 ur	ECMWF za prihodnjih 144 ur
SAVA1/SOČA1	●			●	●
SAVA2/SOČA2	○	●		●	
SAVA3/SOČA3	●		●		
SAVA4/SOČA4*	●			●	

* eksperimentalna postavitev

Hidrološki prognoistični sistem se avtomatično zažene vsako uro in izdelava napovedi pretokov in vodostajev, ki jih korigira glede na izmerjeno hidrološko stanje na avtomatskih vodomernih postajah v zadnji uri. Ob začetku simulacije hidrološkega in hidrodinamičnega modela sistem razbere robne pogoje oz. njihovo začetno stanje iz predhodne simulacije. Napredno pregledovanje rezultatov in krmiljenje hidrološkega prognoističnega sistema omogoča orodje Flood Watch Online (Slika 2), ki ga je izdelal, nadgradil in dopolnil izvajalec naloge glede na zahteve in potrebe hidrološke prognoistične službe ARSO. V sistemu so na prognoističnih profilih prikazane tudi opozorilne vrednosti pretokov in vodostajev, ki so usklajene s sistemom za opozarjanje pred visokimi vodami Hidroalarm. Tako je omogočeno tudi povezovanje obeh sistemov in delne avtomatizacije procesov opozarjanja pred visokimi vodami.

Orodje Flood Watch Online omogoča tudi vpogled v pretekle simulacije hidrološkega prognoističnega sistema in simulacijo scenarijev hidroloških dogodkov, ki jih merilni instrumenti niso zaznali ali pa jih meteorološki modeli niso predvideli: po opravljenem posvetovanju med dežurnim hidrologom in meteorologom lahko zelo hitro izvedemo novo simulacijo z ročno korigiranimi vrednostmi izmerjenih ali napovedanih količin padavin.



Slika 2: Orodje za pregledovanje rezultatov in krmiljenje hidrološkega prognostičnega sistema – Flood Watch Online. Levo – simulacija pretokov na v. p. Sava Hrastnik; desno – prikaz izmerjenih in napovedanih padavin na prispevnem območju v. p. Vipava Vipava.

Verifikacija sistema za napovedovanje hidroloških razmer

S testnim operativnim obratovanjem hidrološkega prognostičnega sistema smo pričeli aprila 2011. Hidrološki model znotraj operativnega sistema se poganja s padavinami in temperaturami, ki so izmerjene na avtomatskih meteoroloških postajah in napovedane z meteorološkimi modeli. Parametri hidrološkega modela so bili v času kalibracije določeni iz podatkov, ki so bili izmerjeni na merilnih mestih najširše meteorološke mreže, in se razlikujejo od tistih znotraj operativnega sistema. Zato načrtujemo izvedbo verifikacije kalibriranega hidrološkega modela na operativnem izboru avtomatskih meteoroloških postaj. V okviru projekta je bila zgrajena tudi podatkovna baza simulacij hidrološkega prognostičnega sistema, ki bo uporabljena za analizo kakovosti simulacij in verifikacijo napovedanih pretokov v posameznih prognostičnih profilih. Tovrstno verifikacijo predvidevamo, ko se bo v podatkovni bazi nabral statistično zadosten vzorec visokovodnih valov.

Bistvena ugotovitev, ki se poraja iz testnega obratovanja sistema je ta, da je trenutna mreža avtomatskih merilnih postaj padavin preredka za podrobnejši zajem precej razgibane prostorske porazdelitve padavin v Sloveniji. Tako so simulacije hidroloških modelov v posameznih primerih dokaj negotove. Kombinacija omenjene ugotovitve in načina delovanja modula za korekcijo napovedanih pretokov in vodostajev privede do omejenih napovedi hidrološkega prognostičnega sistema, ki zahtevajo kritično presojo hidrologa prognostika. Pričakujemo, da se bo to stanje precej izboljšalo v prihodnjih letih s postavitvijo novih avtomatskih merilnih postaj in vremenskega radarja v okviru projekta BOBER ter z nadaljnjim razvojem hidrološkega prognostičnega sistema.

Prikaz rezultatov sistema za napovedovanje hidroloških razmer

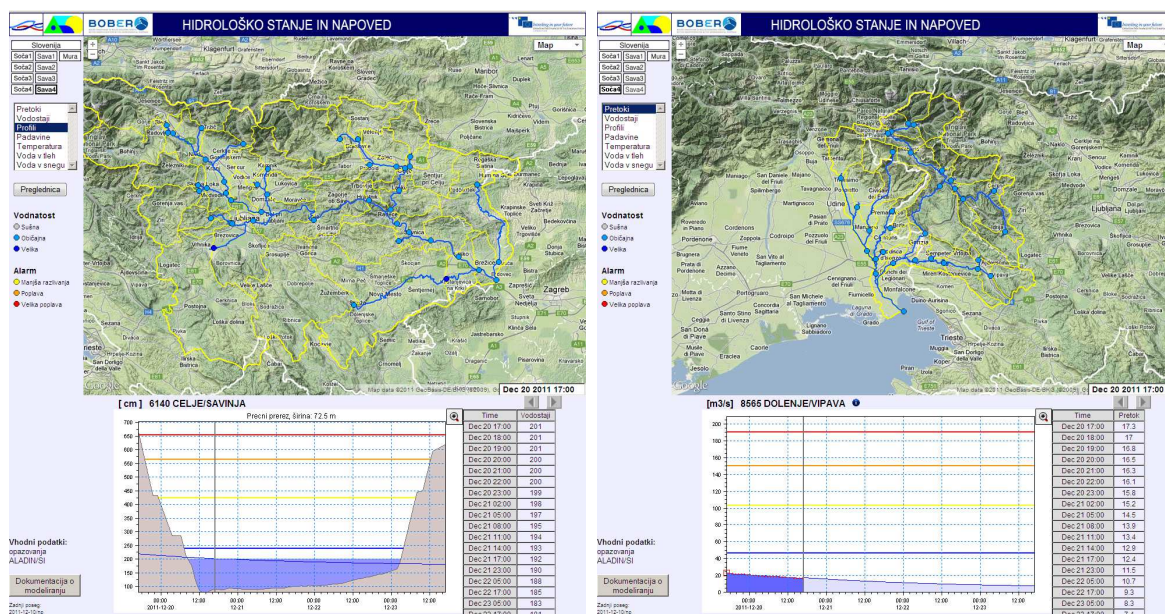
V okviru projekta BOBER je bila izdelana spletna stran, ki prikazuje rezultate hidrološkega prognostičnega sistema in je trenutno dostopna vsem uporabnikom na ARSO,

saj so rezultati sistema uporabni tudi pri optimiziranju delovanja drugih strokovnih služb, npr. s področja kakovosti voda in hidrometrije. V prihodnje bo dostop do rezultatov sistema omogočen tudi zunanjim zainteresiranim uporabnikom, vendar v omejenem obsegu in pod določenimi pogoji, saj je za pravilno interpretacijo rezultatov sistema potrebna kritična hidrološka presoja. Spletni prikaz rezultatov prognostičnega sistema (Slika 3) temelji na prostorskem prikazu modelskih porečij s podporečji oz. računskimi enotami in lokacij prognostičnih profilov na obstoječih geografskih podlagah, ki jih omogočajo dostopni spletni servisi.

Spletna stran omogoča vpogled v rezultate hidrološkega prognostičnega sistema:

- v prognostičnih profilih, kjer so prikazani časovni nizi napovedanih pretokov in vodostajev ter predviden potek gladine v prečnem prerezu, ter
- na prispevnih območjih posameznih prognostičnih profilov, kjer so prikazani časovni nizi izmerjenih in napovedanih padavin in temperatur zraka, izračunanih deležev vode v tleh in vodnega ekvivalenta snežne odeje.

Na diagramih časovnih nizov so ob napovedanih prikazani tudi merjeni vodostaji in pretoki ter pripadajoče opozorilne vrednosti, ki so skladni s sistemom Hidroalarm.



Slika 3: Spletni prikaz rezultatov hidrološkega prognostičnega sistema. Levo – simulacija vodostajev na v. p. Savinja Celje s prikazom prečnega prereza in opozorilnih vrednosti vodostajev v barvni kodi Hidroalarna; desno – simulacija pretokov na v. p. Vipava Dolenje s prikazom opozorilnih vrednosti pretokov.

Na spletni strani je poleg modelskih rezultatov v vsakem prognostičnem profilu na voljo tudi dokument, ki vsebuje izbor metapodatkov o pripadajoči vodomerni postaji iz katastra vodomernih postaj, informacije o trenutno delujočih merilnih instrumentih, aktualni pretočni krivulji in prečnem prerezu, povezavo do morebitne spletne kamere na postaji ter izbor hidroloških značilnosti, kot so povratne dobe malih in velikih pretokov, obdobje letne statistike pretokov in temperatur ter kratek opis razmer ob treh najvišjih zabeleženih vodah.

Zaključki

Hidrološke napovedi so v preteklih letih temeljile na subjektivnih ocenah hidrologa prognostika in enostavnih regresijskih modelih. Z razvojem kompleksnejših numeričnih modelov in avtomatizacijo meteoroloških in hidroloških merilnih mrež so hidrološke napovedi postale tehnično bolj objektivne. Ob upoštevanju znanih omejitev in nezanesljivosti modelov je mogoče zgraditi dovolj kakovosten hidrološki prognostičen sistem, ki bo omogočal pravočasno in natančnejše opozarjanje pred visokimi vodami.

Sistem za napovedovanje hidroloških razmer je sodobno orodje, ki je izrednega pomena za hidrološko prognostično službo in tudi druge strokovne službe na Agenciji RS za okolje pri opravljanju vsakodnevnih nalog. Z njegovim razvojem so omogočeni enoten, enostaven in hiter pregled hidrološkega stanja in napovedi pretokov in vodostajev v izbranih prognostičnih profilih na porečjih Save, Soče in Mure. Sistem izdelava hidrološke napovedi na osnovi simulacij razvoja vremena različnih meteoroloških modelov.

Hidrološki prognostični sistem je v svojem temelju zasnovan za napovedovanje poplavnih dogodkov. Tako lahko pri manjših in zmernih porastih rek prihaja do relativno velikih odstopanj med napovedanim in pozneje izmerjenim hidrološkim stanjem v posameznih prognostičnih profilih. Lahko nastanejo tudi nelogične napovedi prognostičnega sistema kot posledica delovanja modula za korekcijo napovedanih pretokov in vodostajev z merjenimi vrednostmi. Zato je za pravilno interpretacijo rezultatov sistema nujno potrebna kritična in strokovna presoja hidrologa prognostika.

Glavne omejitve hidrološkega prognostičnega sistema izhajajo predvsem iz pomanjkljivosti vhodnih podatkov ali relativno preprostih modulov, ki so vključeni znotraj sistema. Zaradi relativno redke mreže prečnih prerezov, ki je vključena v hidrodinamični model sistema, lahko pride do nestabilnosti in nepričakovanih nihanj simuliranih pretokov in vodostajev, predvsem pri visokih in izredno nizkih hidroloških stanjih. Trenutna mreža avtomatskih merilnih postaj padavin je preredka za natančen zajem precej razgibane prostorske porazdelitve padavin v Sloveniji. Tako so simulacije hidrološkega modela v posameznih primerih dokaj negotove. Snežni modul, ki je trenutno vključen v hidrološki model sistema, uporablja relativno enostavno računsko metodo, ki daje nezanesljive rezultate predvsem na območjih z razgibanim reliefom. V našem primeru modelske napovedi o vodnem ekvivalentu snežne odeje odstopajo od dejanskega poteka akumulacije in taljenja snega.

Hidrološka prognostična služba upošteva vse zgoraj omenjene omejitve pri operativnem delovanju sistema. Tako se bodo z operativnim delovanjem sistema nabirale izkušnje, ki bodo omogočale pripravo izboljšav hidrološkega prognostičnega sistema kot celote. Že v okviru projekta BOBER se bosta do leta 2015 zgostili mreži avtomatskih meteoroloških in tudi hidroloških merilnih mest. Tako bomo hidrološki model sistema poganjali s prostorsko boljše porazdeljenimi padavinami in korigirali napovedane pretoke v več prognostičnih profilih. To pomeni, da bo sistem omogočal točnejše napovedi, delovanje sistema pa bo stabilnejše. Načrtujemo tudi zamenjavo snežnega modula z bolj kompleksnim, ki bo ravno tako prispeval k boljšim napovedim sistema. Prihodnje analize modelskih rezultatov pri izjemnih hidroloških dogodkih bodo omogočile izboljšanje kalibracije tako hidrološkega kot tudi hidrodinamičnega modela. Že v prihodnjih mesecih pa bomo hidrološkemu prognostičnemu sistemu dodali še hidrološke napovedi na osnovi skupinskih numeričnih napovedi razvoja vremena z meteorološkim modelom ALADIN in izvedli povezavo s sistemom Hidroalarm ter tako dosegli višjo stopnjo avtomatizacije procesov pri opozarjanju pred visokimi vodami.

Literatura

Arhiv Agencije RS za okolje.

DHI Software, 2009. Mike 11, A modelling system for rivers and channels, User manual (<http://www.dhigroup.com/Software/WaterResources/MIKE11.aspx>)

Pogačnik, N., Gosar, L., Ruch, C., 2008. Hidrološki prognostični sistem : uporaba prostorskih podatkov. V: PERKO, D. (ur.), Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008, (GIS v Sloveniji, 9), Ljubljana, str. 129-141.

Pogačnik, N., Petan S., Sušnik, M., Jørgensen, G., Polajnar, J., Ruch, C.: Development of a flood forecasting system on the Sava river in Slovenia, XXVth Conference of the Danubian Countries, 16-17 June 2011 – Budapest, Hungary.

Ruch, C., Jørgensen, G., Polajnar, Sušnik, M., Hornich, R., Schatzl, R., Pogačnik N. 2006: Trans - boundary forecasting system on Mur river. 23. Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological basis of water management, 28.-31, August 2006, Belgrade.