

UDK/UDC: 502/504:551.509.313.6(497.4)

Prejeto/Received: 15.06.2016

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 25.08.2016

## HIDROLOŠKI PROGNOŠTIČNI SISTEM AGENCIJE REPUBLIKE SLOVENIJE ZA OKOLJE HYDROLOGICAL FORECASTING SYSTEM OF THE SLOVENIAN ENVIRONMENT AGENCY

Sašo Petan<sup>1,\*</sup>, Andrej Golob<sup>1</sup>, Marjan Moderc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

### Izvleček

Hidrološki prognošični sistem Agencije Republike Slovenije za okolje deluje od leta 2012. Omogoča podroben vpogled v trenutno hidrološko stanje rek in ponuja napoved pretokov in vodostajev rek za izbrane prognošične točke do 6 dni vnaprej. Napovedi sistema se praviloma obnavljajo vsako uro za vrsto modelskih postavitev, ki se med seboj razlikujejo predvsem po modelski domeni, izvoru meteorološke napovedi v hidrološkem modelu in tipu uporabljenega hidrodinamičnega modela. V prispevku so ob podrobnem opisu zgradbe in operativnega delovanja hidrološkega prognošičnega sistema podani tudi rezultati krajše analize uspešnosti napovedi sistema. Analiza je pokazala, da je ujemanje med merjenimi in napovedanimi pretoki zelo dobro. Pri večjih porečjih oz. porečjih s počasnejšim hidrološkim odzivom so rezultati simulacij relativno zanesljivi do 36 ur, pri manjših porečjih do 18 ur, pri najmanjših porečjih oz. tistih z izrazitim hudourniškim odzivom pa do 6 ur pred hidrološkim dogodkom. Pozitiven učinek podatkovne asimilacije merjenih pretokov pa se pri rezultatih simulacij kaže le v prvih 12 do največ 18 urah po času opravljene simulacije.

**Ključne besede:** hidrodinamični modeli, hidrološko napovedovanje, hidrološki prognošični sistem, analiza uspešnosti napovedovanja, Slovenija.

### Abstract

The hydrological forecasting system of the Slovenian Environment Agency has been in operation since 2012. It enables detailed insight into the current hydrological state of rivers and provides river discharge and water level forecasts for chosen forecasting points up to six days in advance. As a rule, the system forecasts are updated every hour for a series of model setups that cover different modeling domains with various meteorological forecasts sources for the hydrological model and types of the hydrodynamic model. Beside a detailed description of the hydrological forecasting system design and operation, the article also demonstrates the results of a short forecasting performance analysis. The analysis has shown very good agreement between the measured and forecasted river discharges. The simulation results for bigger river catchments or catchments with a slower hydrological response are relatively reliable up to 36 hours before the occurrence of the hydrological event. This time interval drops to 18 hours for small river catchments and down to 6 hours only for the smallest or the torrential river catchments. The positive effect of the measured

---

\* Stik / Correspondence: [saso.petan@gov.si](mailto:saso.petan@gov.si)

© Petan S. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Petan S. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence.](#)

discharge data assimilation on the simulation results is present in the first 12 and no more than 18 hours after the time of simulation.

**Keywords:** hydrodynamic models, hydrological forecasting, hydrological forecasting system, forecasting performance analysis, Slovenia.

## 1. Uvod

Hidrološki prognostični sistem (HPS) Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) je operativno orodje, ki omogoča podrobnejši vpogled v trenutno stanje hidroloških spremenljivk na slovenskih porečjih in njihovo napoved za nekaj dni vnaprej. HPS je bil zasnovan predvsem z namenom pravočasnega in podrobnejšega opozarjanja pred poplavnimi dogodki na rekah v Sloveniji. Zato ga hidrološka služba ARSO vsakodnevno uporablja, vzdržuje in nenehno razvija. Rezultati HPS so na voljo tudi hidrološkim službam v sosednjih državah, uporabljajo pa jih tudi druge strokovne službe s področja vodarstva in varstva pred naravnimi nesrečami ter proizvajalci električne energije v Sloveniji.

Zametki HPS segajo v leto 2006, ko sta hidrološki službi avstrijske Štajerske in Slovenije v svoje delo vpeljali čezmejni sistem za napovedovanje hidroloških razmer na reki Muri (Ruch in sod. 2006). Po prvih pozitivnih izkušnjah se je ARSO odločila, da bo sistem postopoma razširila na celotno ozemlje Slovenije. V okviru projekta Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja, ki se krajše imenuje BOBER, je bila med letoma 2010 in 2015 izvedena širitev in nadgradnja hidrološkega prognostičnega sistema, sprva na porečji Save in Soče (Petan in sod., 2012), pozneje pa tudi na preostala porečja v Sloveniji. V drugi fazi projekta sta bila hidrološki in hidrodinamični model HPS podrobno prilagojena na predvideno stanje opazovalne hidrološke mreže ARSO po zaključeni nadgradnji v sklopu projekta BOBER. Vzpostavljena sta bila tudi podrobnejša dvodimenzijska hidrodinamična modela za poplavni območji jugozahodnega dela Ljubljane in Ljubljanskega barja ter Spodnje Savinjske doline na eksperimentalni operativni ravni (Pogačnik in sod., 2012), z namenom boljšega vpogleda v prostorsko dinamiko

poplavnih dogodkov na poplavno najbolj ogroženih območjih.

V nadaljevanju prispevka so podani podrobnejši opis zgradbe in delovanja sistema, njegovih rezultatov in omejitev ter krajša analiza uspešnosti napovedi sistema.

## 2. Metode

### 2.1 Zgradba sistema

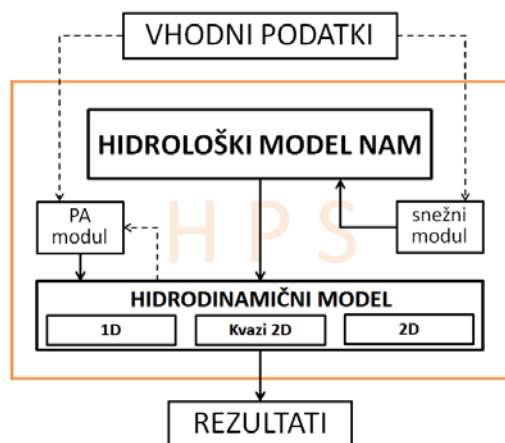
Sistem je zgrajen okoli računskega jedra sistema, ki ga tvorita dve osnovni modelski komponenti programskega paketa DHI MIKE11: hidrološki model NAM in enodimenzijski (1D) hidrodinamični model (slika 1). V poznejši fazi sta bila sistemu dodana še kvazi dvodimenzijski (kvazi 2D) in polni dvodimenzijski (2D) hidrodinamični model, zasnovan s komponento MIKE FLOOD.

Za simulacijo akumulacije padavin v snežni odeji in sproščanje snežnice v odtok skrbi snežni modul, ki je aktiven v hidrološkem modelu. Sistemu je dodan tudi modul za podatkovno asimilacijo (PA), ki se veže na hidrodinamični model in služi popravljanju simuliranih pretokov in vodostajev z izmerjenimi vrednostmi ob upoštevanju eksponentne funkcije približevanja k napovedanim vrednostim. Sistem dopolnjujejo tudi številne manjše aplikacije, ki na vhodni strani sistema večinoma skrbijo za pripravo vhodnih podatkov, na izhodni strani pa za posredovanje rezultatov sistema.

#### 2.1.1 Hidrološki model

Hidrološki model NAM (Nielsen in Hansen, 1973) je deterministični, konceptualni in združeni (ang. lumped) model odtoka padavin, ki opisuje hidrološki krog pri zemeljskem površju. Osnovna računski enota modela je podporečje, ki predstavlja prispevno območje posamezne reke do izbrane točke, praviloma je to lokacija vodomerne

postaje, ali pa prispevno območje za posamezen odsek reke med dvema vodomernima postajama. Podporečje opredeljujeta njegova velikost in topografija, ki je v snežnem modulu opisana s površinami 100-metrskih višinskih con. Tako ima hidrološki model lastnosti semi-distribuiranega modela, ki izračuna hidrograme površinskega odtoka iz vsake višinske cone in jih nato združi po podporečjih.



**Slika 1:** Konceptualna shema hidrološkega prognostičnega sistema.

**Figure 1:** Conceptual scheme of the hydrological forecasting system.

Hidrološki model porečja Save do meje s Hrvaško ima 40 podporečij s srednjo velikostjo okoli 270 km<sup>2</sup>, model porečja Soče do izliva v Jadransko morje pa ima 31 podporečij s srednjo velikostjo okoli 110 km<sup>2</sup>. V modelu Save je srednja velikost podporečij večja zaradi obsežnih kraških zaledij Ljubljance in Krke z zelo težko določljivimi razvodnicami. Model Soče vključuje tudi italijanski del porečja zaradi zagotavljanja časovnega niza ocenjenega in napovedanega pretoka reke Soče na izlivu v Jadransko morje za potrebe oceanografskega modela severnega Jadrana (Ličer in sod., 2016), ki je ravno tako nastal na ARSO v sklopu projekta BOBER. Podroben model vseh slovenskih porečij (slika 2), brez prispevnih območij Drave in Mure v Avstriji, pa je bil zasnovan z 227 podporečji in srednjo velikostjo podporečij okoli 98 km<sup>2</sup>.

Kalibracija parametrov fizikalnih in semi-empiričnih enačb, ki so v modelu uporabljene za spremljanje akumulirane vode v snegu, na površini tal, v koreninski coni in vodonosniku, je bila opravljena za vsako podporečje. Pri tem so bili uporabljeni časovni nizi padavin, temperatur zraka in pretoka rek iz mreže meteoroloških in hidroloških postaj ARSO za obdobje med letoma 1999 in 2010. Za del kalibracijskega obdobja so bili uporabljeni tudi časovni nizi iz opazovalnih mrež sosednjih držav. Časovni nizi potencialne evapotranspiracije so bili za vsako podporečje izvedeni iz klimatoloških mesečnih vrednosti in deleža posameznih skupin pokrovnosti tal. Tako izračunane klimatološke vrednosti potencialne evapotranspiracije so uporabljene tudi pri operativnem delovanju sistema.

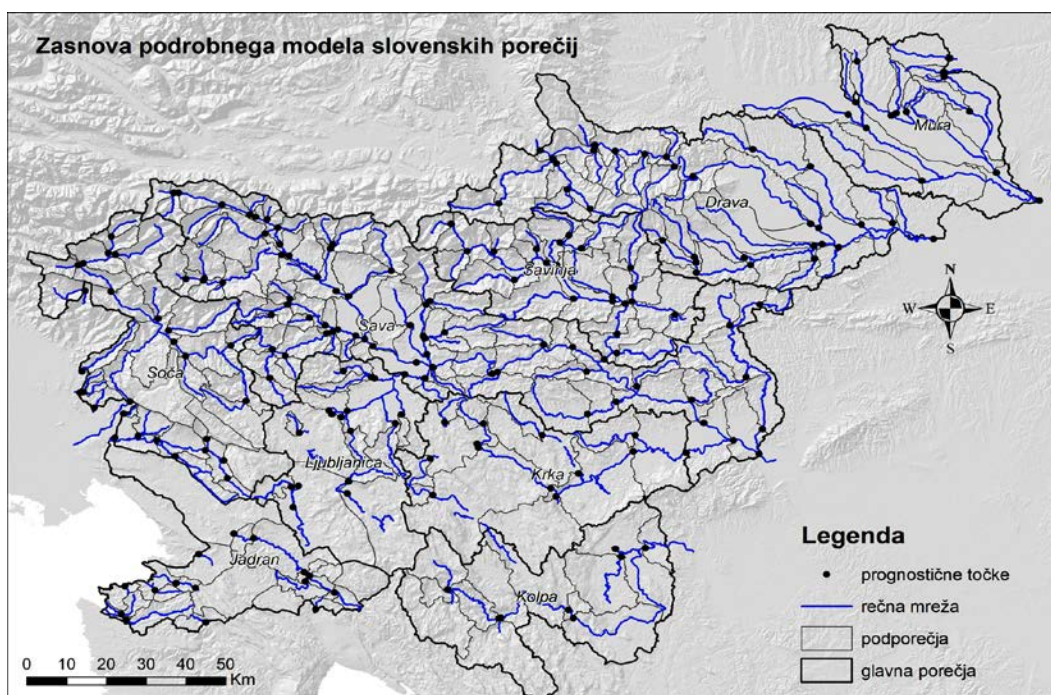
### 2.1.2 Hidrodinamični model

Propagacijo in seštevanje izračunanih hidrogramov površinskega odtoka vzdolž rečnih strug opravi 1D hidrodinamični model (Mike by DHI, 2014), ki je bil zasnovan iz poenostavljenega modela rečne mreže in razpoložljivih prečnih profilov vodotokov ter podatkov o večjih hidrotehničnih objektih na vodotokih (pregrade in akumulacije hidroelektrarn, jezovi in talni pragovi). Hidrodinamični model porečja Save ima enostavno zasnovo s 23 vodotoki, model Soče pa s 17 vodotoki. Podroben model vseh slovenskih porečij je bil zasnovan na 171 vodotokih, ki vključujejo tudi ocenjene glavne povezave v kraškem podzemlju. Koncept 1D hidrodinamičnega modela je bil usklajen s potrebami in operativnimi procesi hidrološke prognostične službe ARSO, ki v splošnem temeljijo na izmerjenih in napovedanih pretokih rek. Zato je bil 1D hidrodinamični model izdelan brez vključevanja številnih vodnih objektov. Tako je zagotovljena tudi večja robustnost celotnega sistema pri operativnem delovanju.

Pri zasnovi kvazi 2D in 2D hidrodinamičnih modelov, ki sta namenjena podrobnejšemu prikazu gladinskega stanja na poplavnih območjih, so bili uporabljeni tudi razpoložljivi podatki lidarskih, geodetskih in batimetričnih snemanj. Kvazi 2D hidrodinamični model poplavnega območja jugozahodnega dela Ljubljane in Ljubljanskega

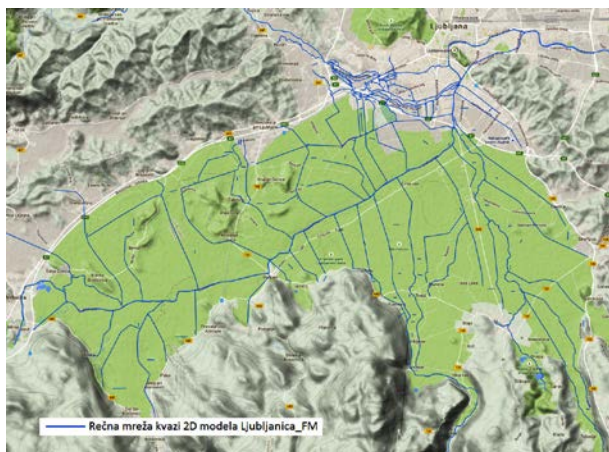
barja (slika 3) je v osnovi še vedno 1D model, ki ima dodano večje število računskih vodnih kanalov za simulacijo smeri in globine tokov na poplavnem območju. Takšen model omogoča podroben vpogled v dinamiko vodnega toka, zmožen je simuliranja kompleksnejših poplavnih vzorcev in preoblikovanja poplavnega vala zaradi razlivanja in zadrževanja vode na poplavnem območju. Tako se približa natančnosti polnih 2D modelov. V model je vključenih preko 85 naravnih ali navideznih vodotokov, njihovo medsebojno interakcijo pa zagotavlja 230 bočnih prelivov. Model vsebuje tudi več kot 40 pomembnejših hidrotehničnih objektov: mostov, prepustov, prečnih prelivov in zapornic. Omogoča tudi simulacijo dreniranja vode iz več kot 30 poplavnih depresij. Podobno kot pri 1D modelu je zgornji robni pogoj kvazi 2D modela opredeljen z izračunanimi hidrogrami površinskega odtoka iz hidrološkega modela, kot spodnji robni pogoj pa je nastavljen obratovalni algoritem sistema zapornic na Mestni Ljubljani in Gruberjevem kanalu. Tako zasnovan model pri operativnem delovanju potrebuje približno 3 minute za izdelavo štiridnevne napovedi.

Prednost kvazi 2D modelskega pristopa pred polnim 2D pristopom je velika računaska hitrost ob doseganju rezultatov z zelo dobro natančnostjo, njegova bistvena pomanjkljivost pa je nujnost natančnega predhodnega poznavanja zakonitosti vodnih tokov na poplavnem območju in obilica ročnega dela (Moderc in sod., 2015). Zato je bil model poplavnega območja reke Savinje s pritoki na širšem Celjskem območju zastavljen kot poln 2D model. Osnovno vodilo pri izdelavi 2D modela je bilo zagotavljanje poznejše operativnosti – modelski rezultati z zadovoljivo natančnostjo morajo biti na voljo v relativno kratkem času. V modelu so rečne struge opredeljene enodimenzijsko s prečnimi profili približno na vsakih 50 m, poplavna območja s skupno površino okoli 70 km<sup>2</sup> pa dvodimenzijsko z lidarskim digitalnim modelom reliefa in velikostjo računске celice 20x20 m. Tako zasnovan model pri štiridnevni napovedi zagotavlja operativne računске čase okoli 40 minut na strojni zmogljivosti razvojnega okolja ARSO.



**Slika 2:** Prikaz izbranih podporečij in prognostičnih točk pri zasnovi podrobnega modela vseh slovenskih porečij.

**Figure 2:** The chosen subcatchments and forecasting points while designing the detailed model of the Slovenian catchments.



*Slika 3: Shematizacija vodnega toka na poplavnem območju jugozahodnega dela Ljubljane in Ljubljanskega barja s kvazi 2D hidrodinamičnim modelom.*

**Figure 3:** *Water flow schematization of the SW Ljubljana and the Ljubljansko barje flood zones used in the quasi-2D hydrodynamic model.*

## 2.2 Delovanje in rezultati sistema

HPS deluje popolnoma avtomatizirano na računalniškem omrežju ARSO. Najpomembnejši vhodni podatki sistema so opazovane in napovedane meteorološke spremenljivke: padavine, temperatura zraka pri tleh in kratkovalovno sončno sevanje. Sistem praviloma vsako uro zbere najnovjše meteorološke in hidrološke podatke iz mreže avtomatskih merilnih postaj, aktualne napovedi različni meteoroloških modelov in opravi simulacijo pretokov in vodostajev rek na različnih modelskih postavitvah za obdobje analize (praviloma za preteklih 72 ur) in napovedi (za prihodnjih 144 ur). Rezultati se nato primerjajo z izmerjenimi vodostaji in pretoki in se po potrebi popravijo s pomočjo modula podatkovne asimilacije. Po opravljeni simulaciji sistem pripravi izhodne produkte za spletni prikaz, zapiše rezultate v podatkovno bazo in jih razpošlje končnim uporabnikom.

V HPS je bilo junija 2016 vključenih 105 avtomatskih padavinskih postaj v Sloveniji in dodatnih 70 ob meji s Slovenijo v sosednjih državah. Do konca leta 2016 bo število slovenskih avtomatskih postaj poraslo za približno 35. HPS uporablja napovedi številnih regionalnih in globalnih meteoroloških modelov, ki imajo različno gostoto računskih točk in dolžino intervala napovedi: ECMWF (9 km, 240 ur), ALADIN/SI (9 km, 72 ur), NMM (5 km, 72 ur), ALADIN\_ECDA in ALADIN\_AR (4 km, 72 ur) in 17-člansko ansambelsko napoved LAEF (11 km, 72 ur). Napovedi modelov se praviloma obnavljajo 2 do 4 krat na dan. V HPS so vključene tudi analize in napovedi nowcasting modela INCA-CE (1 km, 12 ur), ki omogoča zelo podroben opis trenutne vremenske situacije in izdela zelo kratkoročne napovedi, ki večinoma temeljijo na ekstrapolaciji podatkov iz vremenskih satelitov, radarjev in opazovalnih mrež. Sistem tako vključuje celo vrsto različnih postavitvev hidroloških modelov za tri modelske domene (Sava, Soča, SI – vsa slovenska porečja), ki kot vhodne podatke uporabljajo napovedi različnih meteoroloških modelov ob enakih kalibracijskih parametrih.

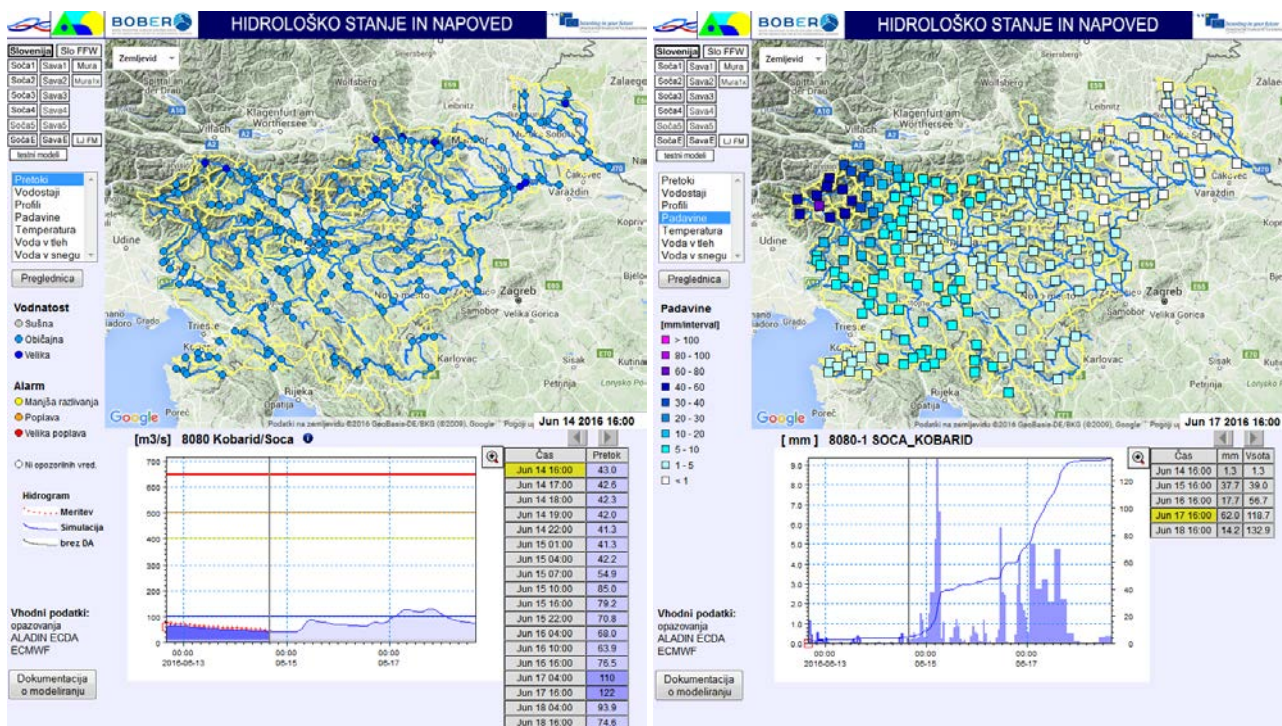
V preglednici 1 je prikazano stanje modelskih postavitvev HPS v obdobju, za katerega je bila opravljena analiza uspešnosti napovedi pretokov (glej točko 2.3). V aprilu 2016 so bile modelske postavitve HPS prilagojene prenovljeni mreži meteoroloških opazovanj, skorajšnji opustitvi delovanja starejšega meteorološkega modela ALADIN/SI in vpeljavi prenovljene nowcasting analize padavin INCA2.

Izračuni vseh modelskih postavitvev za Savo in Sočo, z izjemo ansambelske postavitve Ens, so opravljeni z delovanjem modula za podatkovno asimilacijo (npr. Sava1) in tudi brez njegovega delovanja (npr. Sava1n). Vse simulacije SI modelskih postavitvev so opravljeni brez delovanja modula za podatkovno asimilacijo.

**Preglednica 1:** Pregled modelskih postavitev hidrološkega prognostičnega sistema po modelskih domenah glede na uporabljene napovedi meteoroloških modelov (stanje marec 2016).

**Table 1:** The hydrological forecasting system model setups defined across the model domains and various numerical weather prediction model forecasts (March 2016 state).

Modelska domena in postavitev	Sava in Soča						SI			Ljubljana in Savinja
	1/1n	2/2n	3/3n	4/4n	5/5n	Ens	1	2	3	FM
opazovanja	•		•	•	•	•	•	•	•	•
ALADIN/SI	•	•						•		
ALADIN_ECDA				•			•			•
ALADIN_AR					•				•	
NMM			•							
ECMWF	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
LAEF						•				
INCA-CE		•								



**Slika 4:** Pregledovalnik rezultatov hidrološkega prognostičnega sistema. Primer prikazuje rezultate modelske postavitve vseh slovenskih porečij (SI): levo – simulacija pretoka v prognostični točki, desno – izmerjene in napovedane padavine v podporečju.

**Figure 4:** The Hydrological forecasting system result viewer. Example of results from all Slovenian catchments model setup (SI): left – forecasting point discharge simulation, right – observed and forecasted subcatchment precipitation.

V robnih točkah rečne mreže modelske postavitve vseh slovenskih porečij (SI) je HPS povezan tudi z drugimi hidrološkimi prognostičnimi sistemi. Napoved pretoka reke Drave na mejnem profilu z Avstrijo je zagotovljena preko spletnih servisov sistema EFAS (Thielen in sod., 2009), ki se obnovi

enkrat na dan. Napoved pretoka reke Mure na mejnem odseku z Avstrijo se preko vzpostavljenega ftp protokola obnavlja vsako uro. Slednje napovedi zagotavlja hidrološki prognostični sistem dežele Štajerske, ki deluje v Gradcu in je sistemsko popolnoma kompatibilen s

HPS na ARSO. Tako so v HPS omogočene ponovne simulacije kot tudi pregledovanje vseh rezultatov modelske postavitve reke Mure od izvira do sotočja z reko Dravo.

Rezultati HPS so prikazani na spletni strani, ki za vsako modelsko postavitev omogoča hiter in enostaven pregled hidroloških razmer in napovedi v porečjih in izbranih prognostičnih točkah (slika 4). Diagrami časovnih nizov simuliranih pretokov in vodostajev so opremljeni z izbranimi značilnimi vrednostmi (sušna in velika vodnatost) in s tremi vrednostmi iz hidrološkega opozorilnega sistema (rumena, oranžna in rdeča stopnja opozorila). Na diagramih so ob simuliranih prikazane tudi izmerjene vrednosti pretokov in vodostajev na avtomatskih hidroloških postajah. Na voljo so tudi drugi diagrami, ki prikazujejo časovni potek gladine v prečnem prerezu, po podporečjih pa so prikazane izmerjene in napovedane padavine in temperature zraka pri tleh, izračunani deleži vode v tleh in vodni ekvivalent snežne odeje. V podporo spremljanju poplavnih dogodkov so po podporečjih pripravljene tudi opozorilni diagrami za izjemni specifični odtok in ekstremne količine padavin v krajših časovnih intervalih.

Simulacija modelske postavitve kvazi 2D hidrodinamičnega modela (LJ\_FM) se izvede vsake tri ure, potem ko je na voljo aktualna napoved pretokov modelske postavitve SII (Preglednica 1). Rezultati modela so prikazani v obliki niza 25 poplavnih kart s triurnim časovnim korakom znotraj aplikacije VodePro – GIS prikazovalnik hidrološke službe ARSO.

Ob koncu leta 2014 je bila pripravljena testna operativna postavitev 2D hidrodinamičnega modela (Savinja\_FM), ki se zaradi procesne zahtevnosti požene le ob prekoračitvi opozorilnih vrednosti napovedanih pretokov na gorvodnih merilnih mestih, kar se od začetka testnega delovanja še ni zgodilo. Prikaz operativnih rezultatov modela je omogočen na enak način kot pri modelski postavitvi LJ\_FM.

Rezultati sistema še niso dostopni splošni javnosti, saj je za njihovo pravilno interpretacijo nujna

kritična in strokovna presoja ob dobrem poznavanju zgradbe in delovanja HPS. V omejenem obsegu je dostop do rezultatov sistema omogočen sorodnim strokovnim službam v Sloveniji (URSZR, raziskovalne organizacije, proizvajalci električne energije) in hidrološkim službam v sosednjih državah, ki so seznanjene z zgradbo in osnovnim delovanjem sistema ter njegovimi omejitvami.

Z večletno uporabo HPS pri vsakodnevnih dejavnostih hidrološke službe ARSO se je nabralo veliko izkušenj. V začetni fazi je sistem ob izrednih dogodkih pogosto ponujal negotove in nezaupanja vredne rezultate. Rezultati HPS so se zato pričeli shranjevati v podatkovno bazo simulacij, kar je omogočilo validacijo napovedanih pretokov in vodostajev in tudi dostop različnim aplikacijam do rezultatov sistema. Po ponovnih nastavitvah kalibracijskih parametrov hidrološkega modela, sezonskih analizah delovanja in nenehnemu dopolnjevanju možnosti sistema so se rezultati izboljšali do te mere, da jih hidrološka služba ARSO ocenjuje kot nepogrešljive pri napovedovanju in spremljanju poplavnih dogodkov.

### 2.3 Analiza uspešnosti napovedi HPS

Analiza uspešnosti napovedi sistema je bila opravljena s primerjavo napovedanih in izmerjenih pretokov rek na osmih izbranih vodomernih postajah. Pri analizi je bilo upoštevano omejeno število vodomernih postaj z različno velikostjo prispevnega območja iz različnih porečij v Sloveniji, obenem pa je zajet kar se da velik del hidrološke pestrosti Slovenije. Izbor postaj, primerjalnega obdobja in modelskih postavitev je bil opravljen glede na razpoložljivost podatkov o merjenih in z različnimi modelskimi postavitvami napovedanih pretokov (Preglednica 2). Izbrana primerjalna obdobja so dolga med 12 in 18 meseci. Pri analizi uspešnosti sistema je bil ocenjen tudi vpliv delovanja modula za podatkovno asimilacijo – na treh vodomernih postajah je upoštevana modelsko postavitev, ki pri simulaciji opravi korekcijo napovedanih pretokov z merjenimi.

**Preglednica 2:** Izbor vodomernih postaj in modelskih postavitvev za analizo uspešnosti napovedi pretoka sistema. S krepko je označena modelska postavitvev, ki pri simulaciji opravi podatkovno asimilacijo pretoka.

**Table 2:** Selection of hydrological stations and model setups for the analysis of the system discharge forecasting performance. The model setup (in bold) performs data assimilation while simulating discharge.

vodomerna postaja	prispevno območje [km <sup>2</sup> ]	primerjalno obdobje	modelske postavitve HPS
Pristava Ščavnica	273	1. 1. 2015 – 1. 3. 2016	SI1, SI2
Loče Dravinja	176	1. 1. 2015 – 1. 3. 2016	SI1, SI2
Žaga Učja	50	1. 9. 2014 – 1. 3. 2016	Soca1n, Soca4n, SI1
Dekani Rižana	253	1. 1. 2015 – 1. 3. 2016	SI1, SI2
Bodešče Sava Bohinjka	364	1. 9. 2014 – 1. 3. 2016	Sava1n, Sava 4n, SI1, <b>Sava1</b>
Hrastnik Sava	5205	1. 9. 2014 – 1. 3. 2016	Sava1n, Sava 4n, SI1, <b>Sava1</b>
Moste Ljubljana	1778	1. 3. 2015 – 1. 3. 2016	Sava1n, Sava 4n, LJ_FM, SI1
Laško Savinja	1668	1. 9. 2014 – 1. 3. 2016	Sava1n, Sava 4n, SI1, <b>Sava1</b>

V arhivu simulacij HPS se dolgoročno shranjujejo napovedi štirih simulacij dnevno (simulacije ob 01, 07, 13 in 19 UTC+1) za vsako od modelskih postavitvev. Termini shranjevanja simulacij so prilagojeni času razpoložljivosti zadnjih meteoroloških napovedi (npr. rezultati zagona meteoroloških modelov ob 00 UTC se prvič upoštevajo v HPS od 5 do 7 ur pozneje).

Analiza je bila opravljena za različne ure napovedi (0, 6, 12, 18, 24, 36, 48 in 72) ali z drugimi besedami za različne časovne termine po opravljenih simulacijah HPS. Na ta način je bila preverjena uspešnost analize pretokov sistema za uro napovedi 0, ki je v splošnem odvisna zgolj od izmerjenih meteoroloških spremenljivk, za ostale ure napovedi (6 do 72) pa uspešnost napovedi sistema, ki je odvisna tudi od meteoroloških spremenljivk, napovedanih z modeli za kratkoročne (ALADIN) in srednjeročne (ECMWF) napovedi.

Ujemanje izmerjenih in napovedanih pretokov je bilo vrednoteno z mero ohranjanja vodne bilance v primerjalnem obdobju, ki je izražena kot delež srednjega napovedanega v srednjem merjenem pretoku (v nadaljevanju označen z  $dQ_s$ ). Uspešnost napovedi pretokov pa je bila ovrednotena tudi s kvadratom Pearsonovega korelacijskega koeficienta ( $R^2$ ) in Nash-Sutcliffovim koeficientom (NS) modelske učinkovitosti (Nash in Sutcliffe, 1970), ki sta pogosto uporabljena pri tovrstnih hidroloških analizah.

### 3. Rezultati in razprava

Rezultati analize uspešnosti napovedi pretokov HPS so povzeti na slikah 5 in 6. Analiza je osredotočena na uspešnost HPS v celotnem primerjalnem obdobju in ne pri posameznih hidroloških dogodkih. V nadaljevanju besedila je podana kratka interpretacija rezultatov z razpravo.

Pri modelskih simulacijah pretokov se vodna bilanca v obdobju analize v splošnem dobro ujema z vodno bilanco merjenih pretokov. Ta zaključek izhaja iz dejstva, da je delež srednjega napovedanega pretoka v srednjem merjenem pretoku  $dQ_s$  pri veliki večini modelskih postavitvev na osmih obravnavanih vodomernih postajah v izhodišču, ob uri napovedi 0, blizu vrednosti 1 ali več (do 1,2). Dobro ujemanje vodne bilance v obdobju analize pripisujemo pravilni količinski oceni padavin po porečjih, ki temelji na izmerjenih padavinah na meteoroloških postajah in parametrih hidroloških modelov opredeljenih v času kalibracije in verifikacije operativnih modelskih postavitvev.

V obdobju napovedi od 6. do 72. ure, se vrednost  $dQ_s$  v štirih primerih zmanjšuje in ob 72. uri znaša okrog 0,9, v treh primerih se ohranja, v enem pa narašča (sliki 5 in 6, diagrami v prvem stolpcu). Spremembe vodne bilance v obdobju napovedi v veliki meri pripisujemo sistematičnim odklonom padavinskih napovedi meteoroloških modelov, ki so upoštevane pri posameznih modelskih



postavitvah. Podobno so ugotovili tudi Kobold in sod. (2007). Ti odkloni so lahko posledica splošne tendence meteoroloških modelov k podcenjevanju količine padavin (Cedilnik in Štrajhar, 2012), ali pa zahtevnejše topografije in lokalnih posebnosti (npr. orografski vplivi, bližina morja), ki so v relativno redki mreži računskih točk meteoroloških modelov težko opisljivi.

Ujemanje urnih vrednosti napovedanih in izmerjenih pretokov je ovrednoteno s koeficienti  $R^2$  in  $NS$  – bližje ko so vrednosti 1, boljše je ujemanje in obratno. Pri modelskih simulacijah pretokov lahko pričakujemo, da so koeficienti ujemanja za obdobje analize višji kot za obdobje napovedi. V splošnem to velja tudi v primeru osmih obravnavanih vodomernih postajah, so pa tudi posamezne posebnosti (sliki 5 in 6, drugi in tretji stolpec). Pri porečjih manjših od 300 km<sup>2</sup> (slika 5) so vrednosti  $R^2$  in  $NS$  ob uri napovedi 0 praviloma nižje od 0,80, izjema je vodomerna postaja Žaga Učja, ki ima zelo visoke izhodiščne koeficiente, ki znašajo več kot 0,90. Pri porečjih s počasnejšim hidrološkim odzivom oz. porečjih večjih od 300 km<sup>2</sup> (slika 6) pa so vrednosti  $R^2$  in  $NS$  ob uri napovedi 0 praviloma višje od 0,80 in pri modelskih postavitvah brez upoštevanja podatkovne asimilacije dosegajo vrednosti do 0,95.

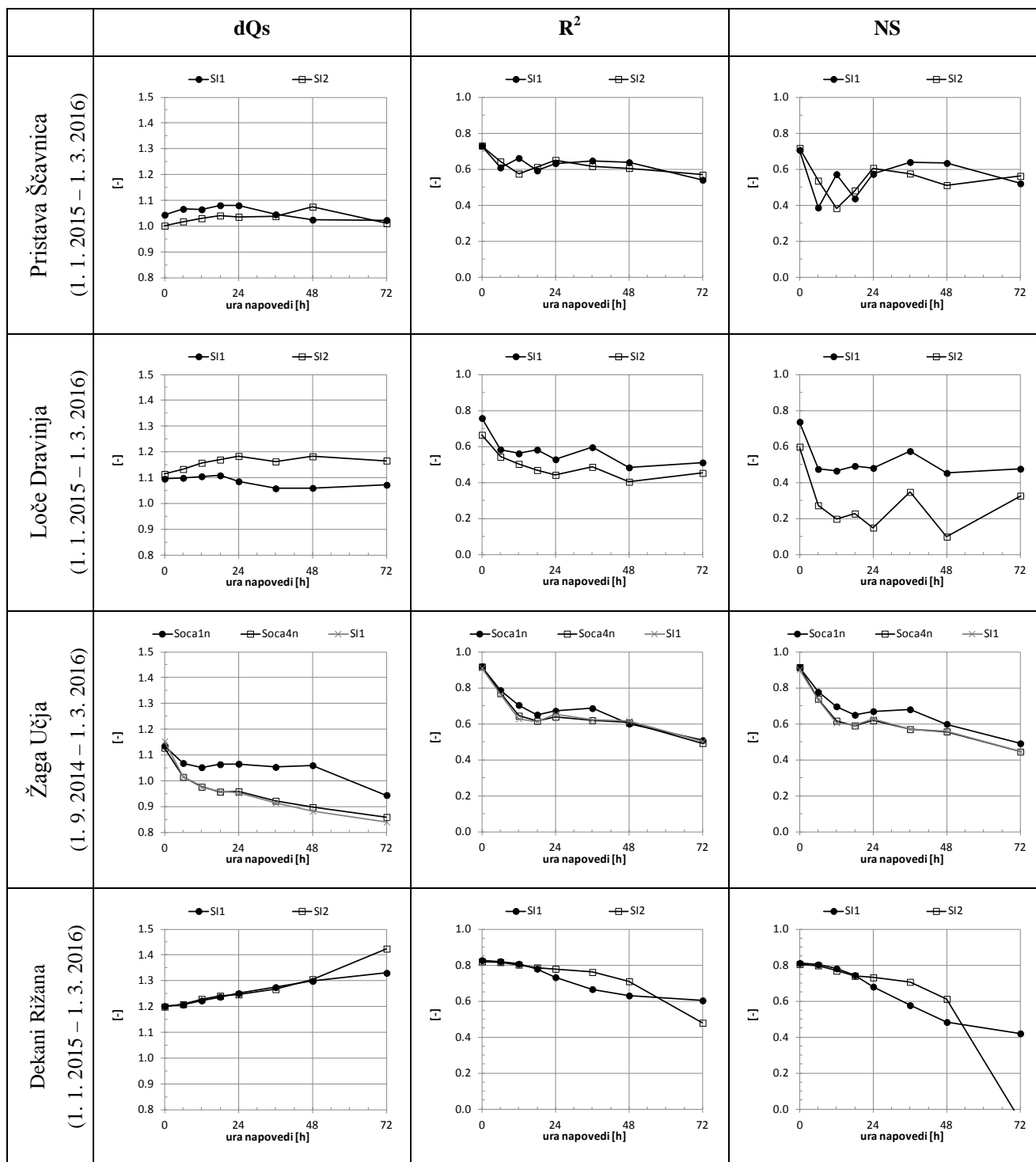
V obdobju napovedi (od 6. do 72. ure) se vrednosti koeficientov  $R^2$  in  $NS$  praviloma zmanjšujejo, v našem primeru je pri večjih porečjih zmanjševanje bolj enakomerno, pri manjših porečjih pa manj enakomerno. Ob koncu obravnavanega obdobja napovedi (72. ura) se vrednosti koeficientov  $R^2$  in  $NS$  pri manjših porečjih gibljejo med 0,4 in 0,6, pri večjih pa med 0,5 in 0,75. V splošnem se vrednosti  $R^2$  in  $NS$  pri manjših porečjih s hitrejšim hidrološkim odzivom značilno zmanjšajo že v

prvih urah napovedi, kar je vidno na primerih Ščavnice, Dravinje in Učje, izjema pa je primer Rižane, ki ima velik del prispevne površine v kraškem svetu in posledično počasnejši hidrološki odziv.

Pri analizi rezultatov za manjša porečja najdemo tudi nekaj posebnosti ob različnih urah napovedi, ki večinoma kažejo na izzive pri numeričnem napovedovanju vremena za potrebe hidrološkega modeliranja porečij s hitrejšim hidrološkim odzivom. Pri vodomerni postaji Pristava Ščavnica, na primer, so vrednosti  $R^2$  in  $NS$  v obdobju napovedi med 6. in 18. uro nepričakovano nižje od tistih med 24. in 48. uro. Za dogodek ob najvišjem zabeleženem pretoku v primerjalnem obdobju so napovedi meteorološkega modela ALADIN 6 do 18 ur pred dogodkom bistveno precenjevale količino padavin, 24 do 48 ur pred istim dogodkom pa so bile napovedane količine precej bližje pozneje izmerjenim količinam padavin.

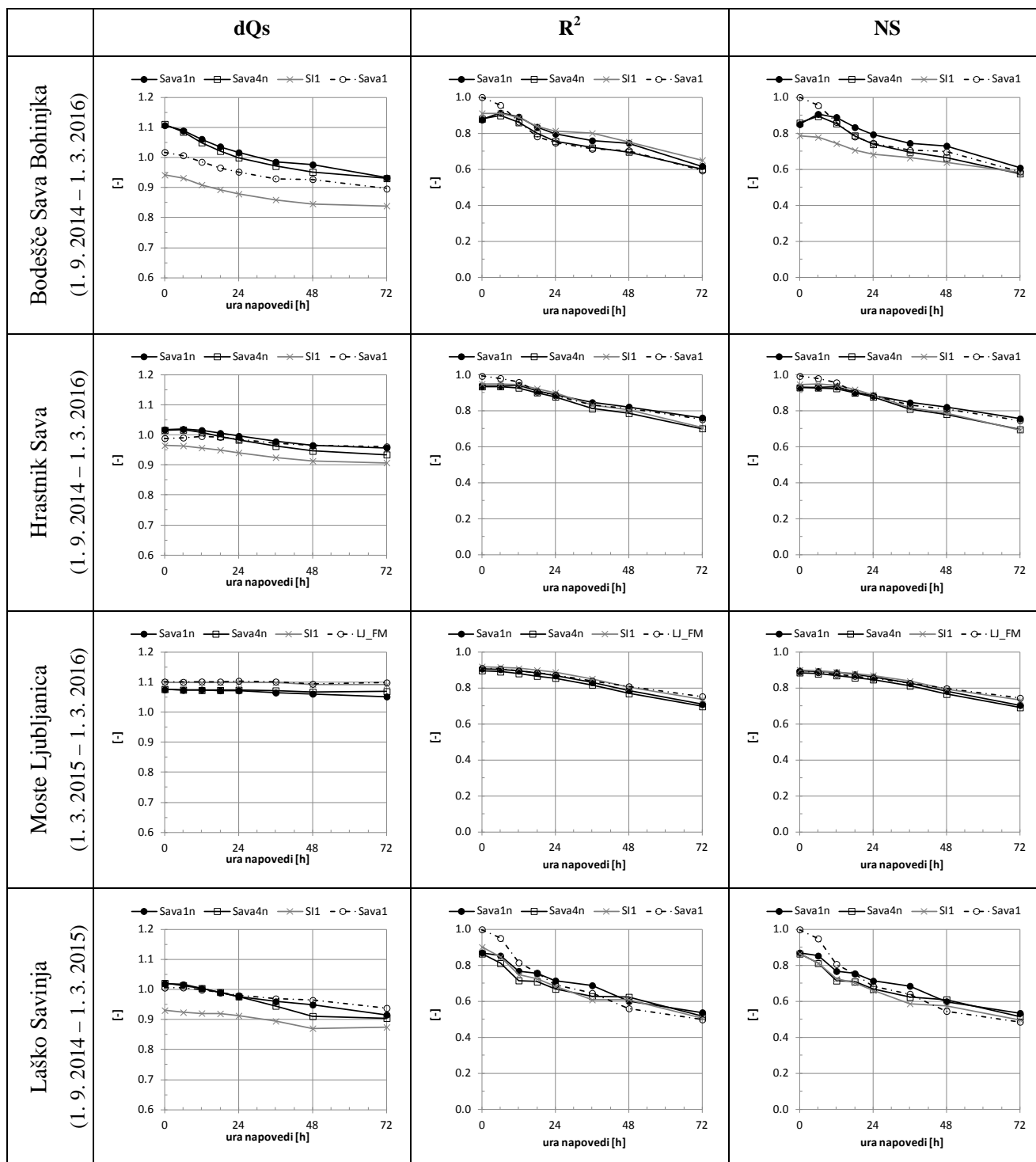
V primeru modelske postavitve z upoštevanjem podatkovne asimilacije (Sava1) so vrednosti  $R^2$  in  $NS$  ob uri napovedi 0 pričakovano enake 1, vendar se pozitiven vpliv podatkovne asimilacije v obdobju napovedi praktično izniči že med 12. in 18. uro. Pri vodomerni postaji Laško Savinja pa se po 36. uri vpliv podatkovne asimilacije kaže celo v negativno smer.

Pri vodomerni postaji Moste Ljubljanice je obravnavana tudi modelska postavitve s kvazi 2D hidrodinamičnim modelom (LJ\_FM), ki upošteva isti hidrološki modelski izračun kot modelska postavitve SI1. Pri modelski postavitvi LJ\_FM se kaže pozitiven vpliv podrobnega hidrodinamičnega modela, saj so vrednosti  $R^2$  in  $NS$  v obdobju napovedi med 48. in 72. uro za odtenek višje kot pri ostalih modelskih postavitvah.



**Slika 5:** Prikaz rezultatov analize uspešnosti napovedi pretokov HPS na 4 izbranih vodomernih postajah z relativno malimi prispevnimi območji v Pomurju, Podravju, Posočju in slovenski Istri. Kratice so razložene v poglavju 2.2 in ob koncu poglavja 2.3.

**Figure 5:** Result of the discharge forecasting performance analysis for four hydrological stations with relatively small catchment areas in Pomurje, Podravje, Posočje and Slovenian Istria region. The abbreviations are explained in section 2.2 and at the end of section 2.3.



**Slika 6:** Prikaz rezultatov analize uspešnosti napovedi pretokov HPS na 4 izbranih vodomernih postajah v porečju Save z relativno večjimi prispevnimi območji oz. počasnejšim hidrološkim odzivom. Kratice so razložene v poglavju 2.2 in ob koncu poglavja 2.3.

**Figure 6:** Result of the discharge forecasting performance analysis for four hydrological stations in the Sava River catchment with relatively larger catchment areas or slower hydrological response. The abbreviations are explained in section 2.2 and at the end of section 2.3.

#### 4. Zaključki

Hidrološki prognostični sistem je na Agenciji Republike Slovenije za okolje v uporabi od leta 2012. Omogoča podroben vpogled v trenutno hidrološko stanje rek in ponuja napoved pretokov in vodostajev rek za izbrane prognostične točke do 6 dni vnaprej. Napovedi sistema se praviloma obnavljajo vsako uro za različne modelske postavitev, ki se med seboj razlikujejo predvsem po modelski domeni (Sava, Soča, SI), izvoru napovedanih meteoroloških spremenljivk in uporabljenem hidrodinamičnem modelu (1D, kvazi 2D ali 2D). HPS je kot tak postal nepogrešljivo orodje pri vsakdanjem delu hidrološke službe ARSO.

Analiza uspešnosti napovedi HPS je pokazala, da je ujemanje med merjenimi in napovedanimi pretoki zelo dobro, kar kaže na pravilno kalibracijo modelov in verifikacijo operativnih modelskih postavitev. Iz analize je moč sklepati, da so rezultati HPS pri večjih porečjih oz. porečjih s počasnejšim hidrološkim odzivom, kot sta primera vodomernih postaj Hrastnik in Moste, relativno zanesljivi (vrednosti kvadrata Pearsonovega korelacijskega koeficienta in Nash-Sutcliffeovega koeficienta višji od 0,80) do največ 36 ur pred hidrološkim dogodkom. Pri manjših porečjih, kot sta primera vodomernih postaj Dekani in Bodešče, se ta meja zmanjša na največ 18 ur, pri najmanjših porečjih oz. tistih z izrazitim hudourniškim odzivom pa na največ 6 ur. Pozitiven učinek podatkovne asimilacije merjenih pretokov v HPS pa se kaže le v prvih 12 do največ 18 ur po času opravljene simulacije.

Kritična in strokovna presoja tako rezultatov kot tudi vhodnih podatkov HPS je nujna pred uporabo rezultatov HPS v procesih odločanja, ne glede na ugotovitve analize uspešnosti napovedi. Poglobljena izkušnja pri interpretaciji rezultatov HPS ponuja pomoč uporabnikom pri pridobivanju strokovnih veščin in spoznavanju ter razumevanju širokega nabora hidrometeoroloških procesov, podatkovnih virov in operativnih procesov. Ob delovanju HPS v preteklih letih so strokovni sodelavci ARSO razvili in realizirali ideje za izboljšanje in vzpostavitev novih delovnih

procesov in produktov. Kot velik izziv pa se kaže zagotavljanje ažurnosti topografskih podlag in geodetskih podatkov v HPS, zlasti pri operativnih kvazi 2D in 2D hidrodinamičnih modelih. Ena večjih nadgradenj HPS v bližnji prihodnosti pa bo izdelava hidrološkega modela za porečje reke Drave od izvira do meje s Hrvaško.

#### Viri

- Cedilnik, J., Štrajhar, M. (2012). Razvoj modela ALADIN skozi prizmo napovedovanja nekaterih vremenskih dogodkov. Slovensko meteorološko društvo, Ljubljana. *Vetrnica*, 0412, 23–29
- Kobold, M., Zgonc, A., Sušnik, M. (2007). Nezanesljivost padavinskih meritev in napovedi pri modeliranju hudourniških poplav. *Acta hydrotechnica* **23(39)**, 79–98
- Ličer, M., Smerkol, P., Fettich, A., Ravdas, M., Papapostolou, A., Mantiziafou, A., Strajnar, B., Cedilnik, J., Jeromel, M., Jerman, J., Petan, S., Malačič, V., Sofianos, S. (2016). Modeling the ocean and the atmosphere during an extreme bora event in northern Adriatic using one-way and two-way atmosphere-ocean coupling. *Ocean Science* **12**, 71–86
- Mike by DHI. (2013). Mike 11, A modelling system for rivers and channels, User guide. *DHI*, 544 p.
- Moderc, M., Pogačnik, N., Udovč, M., Petan, S. (2015). Operativni hidrodinamični model Ljubljanskega barja. *Ujma* **9**, 378–382
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282–290
- Nielsen, S.A., Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology* **4**, 171–190
- Petan, S., Pogačnik, N., Sušnik, M., Polajnar, J., Jørgensen, G. (2012). Razvoj sistema za napovedovanje hidroloških razmer na porečjih Save in Soče. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. Zbornik predavanj. *Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko*, Ljubljana. 103–110
- Pogačnik, N., Petan, S., Sušnik, M., Polajnar, J. (2012). Razvoj hidrološkega prognostičnega sistema v Sloveniji in dostopnost vodarskih prostorskih podatkov. *Geodetski vestnik* **56(4)**, 769–785
- Ruch, C., Jørgensen, G., Polajnar, J., Sušnik, M., Hornich, R., Schatzl, R., Pogačnik, N. (2006). Trans-boundary forecasting system on Mur river. *23rd*

*Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological basis of water management.* 28.-31. Avgust 2006, Beograd.

Thielen J., Bartholmes J., Ramos M.-H, de Roo A. (2009). The European Flood Alert System - Part 1: Concept and development, *Hydro. Earth Syst. Sci.* **13**, 125–140