

PADAVINSKE NAPOVEDI IN NJIHOVA NEZANESLJIVOST V HIDROLOŠKEM PROGNOZIRANJU

Mira Kobold*, Kay Sušelj**

Povzetek

Napovedovanje poplav in zagotavljanje pravočasnih opozoril je osnova za dovolj zgodnje ukrepanje pred nastopom pojava. Meteorološka znanost je z razvojem matematičnih modelov za napovedi vremena naredila velik napredek v razvoju. Meteorološki modeli so danes osnova za napovedovanje vremena in s tem tudi padavin. Poplave in druge vodne ujme lahko tako napovemo tudi za več dni vnaprej. Pri tem si pomagamo z modeli padavine-odtok, s katerimi simuliramo odtok s porečja. V članku so prikazani rezultati aktivnosti, ki smo jih izvajali v okviru projekta EFFS. Za napovedovanje hudourniških poplav, ki so značilne za Slovenijo, je v članku prikazana kalibracija modela HBV za porečje Savinje s časovnim korakom ene ure. Z izpeljanim modelom je bila izdelana analiza občutljivosti modela HBV na vhodne padavinske podatke. Hidrološki modeli so občutljivi na padavine, ki so glavni vhodni podatek v model, zato morajo biti padavinske napovedi čimbolj točne. Verifikacija napovedi padavin modela ECMWF za območje Slovenije je pokazala, da model pravilno predvidi padavinske dogodke, močno pa podceni količino padavin

Ključne besede: hidrološko modeliranje, HEC-1, HBV, model ECMWF, padavinske napovedi, napovedovanje poplav, padavine-odtok, kriging

Uvod

V zadnjih letih po vsem svetu beležimo vse večje število poplav. Poplave so v svetovnem merilu najštevilnejše naravne nesreče, ki zahtevajo veliko število smrtnih žrtev, prizadenejo več ljudi kot katerakoli druga naravna nesreča in povzročijo veliko gospodarsko škodo (Bruen, 1999). Tudi v Evropi so poplave po letu 1990 skoraj vsakoleten pojav. Pogoste poplave in ogromna gmotna škoda, ki jo poplave povzročajo, so sprožile vrsto raziskav in kritičnih analiz na tem področju. V okviru programov Evropske unije potekajo projekti, katerih cilj je narediti napredek na področju napovedovanja poplav za zagotavljanje pravočasnih opozoril. V petem okvirnem programu EU je v letih 2000-2003 potekal mednarodni projekt "Evropski poplavni prognostični sistem", katerega cilj je bil postaviti prototip sistema za napoved poplav za celo Evropo (Kobold in sod., 2003). Sistem na osnovi vremenske napovedi modela ECMWF Evropskega centra za srednjeročne napovedi omogoča napovedi od 4 do 10 dni vnaprej. Na podlagi teh napovedi naj bi bile zagotovljene dnevne informacije o potencialnih poplavah različnega tipa v različnih prostorskih skalah, in to za večja porečja kot tudi za hudourniške ("flash floods") poplave na majhnih povodjih s predopozorilno poplavno periodo do tri dni.

Triletni projekt EFFS (European Flood Forecasting System) je bil osnovan v letu 2000, vanj pa so bile do leta 2002 vključene zahodnoevropske države. V letu 2002 se je projekt razširil na države vzhodne Evrope (EFFS, 2002). Vključitev novih držav v zadnjem letu

* mag., Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

** Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

projekta je prispevala k povečanju območja EFFS, pridobivanju meteoroloških in hidroloških podatkov, povečanju števila pilotnih porečij za uporabo sistema EFFS, uvajanju novih prognostičnih tehnik in omogočila je vzpostavitev medinstitucionalne mreže za bodoče sodelovanje na področju hidrološkega modeliranja in prognoziranja. V okviru projekta je potekalo več medsebojno povezanih aktivnosti: zbiranje in posredovanje podatkov (meteoroloških, hidroloških in podatkov GIS), razvoj hidrološkega modela LISFLOOD, razvoj metodologije za oceno zanesljivosti napovedi, verifikacija meteoroloških napovedi, hidrološko modeliranje in primerjava rezultatov hidroloških modelov, postavitve in testiranje prototipa operativnega sistema za napoved poplav, delavnice o posredovanju hidroloških napovedi in opozoril. Slovenija se je kot vse druge vzhodnoevropske države v projekt EFFS vključila v letu 2002. Izmed naštetih aktivnosti smo v Sloveniji poleg posredovanja podatkov izvedli verifikacijo padavin modela ECMWF za območje Slovenije in testirali hidrološki model HBV, ki ga je dal Švedski meteorološki in hidrološki inštitut na voljo novo pridruženim članicam za obdobje trajanja projekta. Hidrološko modeliranje se v hidrološki prognostični službi na Agenciji RS za okolje že uspešno uveljavlja za potrebe hidrološkega napovedovanja. Izkušnje, pridobljene v projektu EFFS, so bile zelo dobrodošle za nadaljni razvoj.

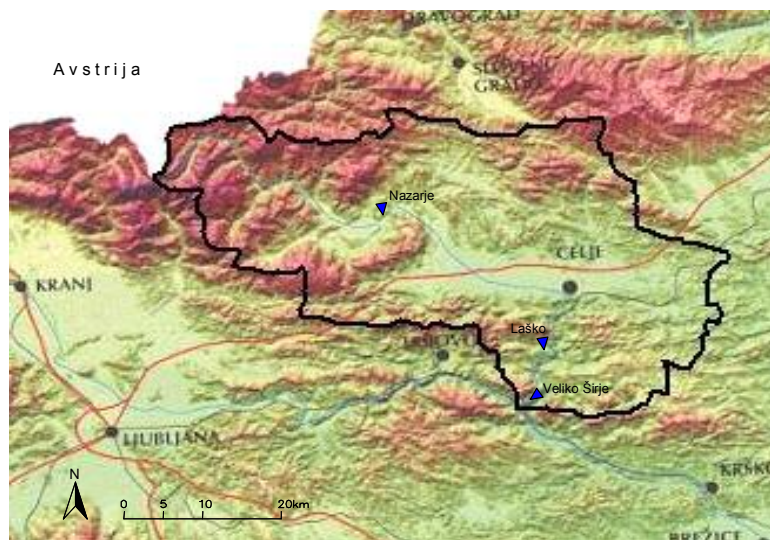
Hidrološko modeliranje in napovedovanje v Sloveniji

Tudi v Sloveniji se s poplavami, običajno hudourniškimi, srečujemo skoraj vsako leto. Slovenija leži v glavnem v povirjih rek, kjer so vzroki poplav velikokrat kratkotrajni in intenzivni nalivi, ki lahko nastopijo tudi v sušnih letih s skromnimi letnimi padavinami. To potrjujejo tudi izkušnje zadnjih let v Sloveniji, ki so bila v letnem povprečju bolj skromna s padavinami, toda bogata z raznimi ujmani, kot so neurja, zemeljski plazovi in poplave. Pri prognoziranju vodnih količin nastopa vrsta težav, saj ima večina slovenskih vodotokov hudourniški značaj. Količine vode se lahko hitro povečajo in tudi hitro odtečejo. V hidrološki prognostični službi Agencije Republike Slovenije za okolje, ki redno spremlja hidrološka stanja rek in izdaja napovedi o predvidenih spremembah pretokov, v primeru visokovodnih situacij pa tudi opozorila o stanju rek in nevarnosti poplavljanja, se operativno uporabljajo klasični regresijski modeli (Sušnik in Polajnar, 1998), v zadnjih letih pa vse bolj tudi konceptualni modeli odtoka (Kobold in Sušnik, 2000). Z regresijskimi modeli je mogoče napovedovati le konice visokovodnih valov, saj ti temeljijo na odnosu med padavinami, običajno 24-urnimi padavinami, in maksimalnim odtokom (konico) vala.

S programskim orodjem Watershed Modelling System (WMS) in hidrološkim modelom HEC-1 so že postavljeni modeli za več porečij v Sloveniji (Kobold in sod., 2000). Bistvo programskega orodja WMS je, da združi GIS podatke s standardnimi hidrološkimi modeli. Model HEC-1, ki ga je razvila ameriška vojska, je dobro poznan in uporabljen model tudi v Sloveniji (Brilly, 1993). HEC-1 modelira posamezne padavinske dogodke v nasprotju s programi, ki lahko zvezno modelirajo dolge, tudi večletne nize padavin in odtokov. V okviru projekta EFFS smo imeli možnost testirati švedski model HBV, ki omogoča kontinuirano računanje odtoka. Kot testno povodje smo izbrali porečje Savinje. Savinja je hudourniška reka in urbana področja vzdolž toka so poplavno ogrožena. Čas zakasnitve med padavinami in odtokom je kratek in ga merimo v urah, poplavni dogodki pa trajajo od enega do dveh dni. Napovedovanje poplav v urnem merilu je bistvenega pomena za hidrološko prognozo in sistem opozorjanja.

Testno porečje Savinje

Savinja je najmočnejši pritok reke Save v Sloveniji in poplavno tudi najbolj ogroženo območje v Sloveniji. Njeno porečje se razprostira od Savinjskih Alp in Karavank preko Celjske kotline do izliva v Savo (Slika 1). Njen tok je dolg 101,7 km in obsega 1847,7 km² prispevne površine (Kolbezen in Pristov, 1998). Po naravi je hudourniška reka. Hudourniški značaj pa ima tudi pretežna večina njenih pritokov. V zgornjem toku reke Savinje je povodje gorato z nadmorskimi višinami preko 2000 metrov. Srednji, pretežno ravninski del leži med 200 in 400 metri nadmorske višine. Tla so povečini plitva na apnenčasti podlagi ali zelo prepustne aluvialne prodne formacije. Skoraj 60 % povodja pokriva gozd. Aluvialne ravnine in rečne doline so gosteje naseljene in v glavnem namenjene kmetijstvu. Ta področja so tudi najbolj izpostavljena poplavam.



Slika 1 - Topografija povodja Savinje z najpomembnejšimi vodomernimi postajami

Topografija povodja Savinje ima močan vpliv na meteorološko dogajanje v porečju. V zgornjem goratem delu povodja znašajo povprečne letne padavine okrog 2000 mm, v srednjem in spodnjem delu pa okrog 1300 mm. Veliko je snežnih padavin v višje ležečih območjih, toda poplave v glavnem povzročijo močne jesenske padavine. Za povodje Savinje sta značilna dva tipa kritičnih vremenskih situacij: jesensko-zimski tip in poletni tip (Marinček, 1992). Za jesensko-zimske situacije so značilne orografske padavine, ki nastanejo ob gorskih pregradah. Relativno široko padavinsko območje in obilne padavine, ki trajajo tudi več dni, povzročijo nastop visokih voda, ki lahko ob intenzivnejših padavinah proti koncu dogodka vodi v poplave. Za poletne padavinske situacije pa so značilne konvektivne padavine, kjer je intenziteta padavin neenakomerno porazdeljena. Te padavine zajamejo manjša območja, na katerih je intenzivnost padavin običajno velika, trajanje pa kratko, zato so poplave lokalnega značaja. Za nastop stoletnih visokih voda je na večjem delu povodja Savinje merodajna jesensko-zimska padavinska situacija. V zadnjih petnajstih letih sta bili na povodju Savinje dve katastrofalni poplavi, 1. novembra leta 1990 in 5. novembra 1998, ki sta povzročili ogromno materialno škodo, in sicer predvsem na območju Celja in Laškega (NIVO, 1991; NIVO, 1999).

Model HBV za porečje Savinje

Model HBV spada med konceptualne modele padavine-odtok in omogoča kontinuirano računanje odtoka (Bergström, 1995; Lindström in sod., 1997). Razvit je bil na Švedskem meteorološkem in hidrološkem inštitutu. Osnovna verzija modela je bila razvita v začetku sedemdesetih let. Prve operativne napovedi so bile izdelane za povodja na severu Švedske leta 1975. Zadnja verzija modela je HBV-96 (Lindström in sod., 1997). Integrirana je v hidrološki sistem IHMS (Integrated Hydrological Modelling System).

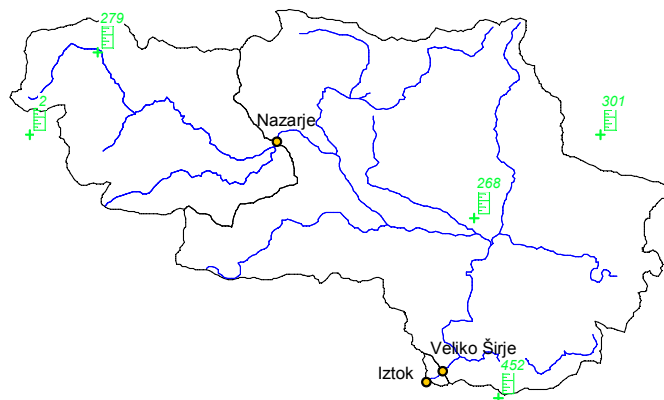
Model HBV lahko opišemo kot semi-distribuirani konceptualni model, saj omogoča delitev povodja na manjše enote, podpovodja. Vsako podpovodje lahko nadalje delimo na območja po nadmorski višini, ta pa še po vegetaciji. Vendar je slednja delitev precej groba, saj loči samo dve kategoriji, in sicer gozdne in negozdne površine. Ta delitev se upošteva pri postopkih za računanje snega in vlage v tleh. Glavni računski postopki v modelu so akumulacija snega in taljenje, evapotranspiracija in računanje vlage v tleh, generiranje odtoka ter potovanje (Bergström, 1995; IHMS, 1999). Vhodni podatki v model so padavine, temperatura zraka in potencialna evapotranspiracija. Za delovanje modela zadoščajo mesečne ocene potencialne evapotranspiracije. Najpomembnejši izhodni produkt je odtok, vendar model omogoča prikaz tudi drugih spremenljivk, ki se nanašajo na komponente vodne bilance in jih model računa (padavine, evapotranspiracija, vlaga v tleh, zaloga vode). Poleg geografskih karakteristik povodja nastopa v modelu veliko število parametrov, katerih vrednosti je potrebno oceniti v postopku kalibracije. Model HBV se lahko uporablja za napovedovanje pretokov rek, zlati v primeru visokih voda in poplav, pa tudi za potrebe obratovanja hidroelektrarn in ocene vodnih virov. Model običajno teče na podlagi podatkov o dnevni vrednostih padavin in temperature zraka ter na podlagi mesečnih ocen potencialne evapotranspiracije.

Model HBV temelji na enačbi vodne bilance:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + lakes] \quad (1)$$

kjer so P padavine, E evapotranspiracija, Q odtok, SP snežna odeja, SM vlaga v tleh, UZ zgornja cona podzemne vode, LZ spodnja cona podzemne vode in $lakes$ volumen jezera.

Časovni korak v modelu HBV je običajno en dan, vendar model teoretično dopušča krajši časovni korak (Bergström, 1995). V študijah, ki so jih objavili Lindström in sodelavci (1997), Lidén in Harlin (2000), Reihan in Kovalenko (2000), Seibert (2000), EFFS (2003), je bila izvedena aplikacija modela HBV s časovnim korakom en dan na različnih povodjih v različnih klimatskih območjih. Dejstvo je, da je bila večina obstoječih modelov padavine-odtok originalno razvita na osnovi dnevni podatkov in da so lahko omejitve pri uporabi teh modelov v časovni skali ene ure (Mathevet in sod., 2004). Glede na to, da model HBV teoretično dopušča krajši časovni korak od enega dneva, smo z namenom simulacije hudourniških poplav na povodju Savinje umerili HBV s časovnim korakom ene ure. V model smo lahko vključili le padavinske postaje, opremljene z ombrografom, katerega vrednosti so v arhivu ARSO podane na pet minut in omogočajo izračun urne količine padavin. Na povodju Savinje in v bližnji okolici je na razpolago samo pet ombrografskih postaj (Slika 2).



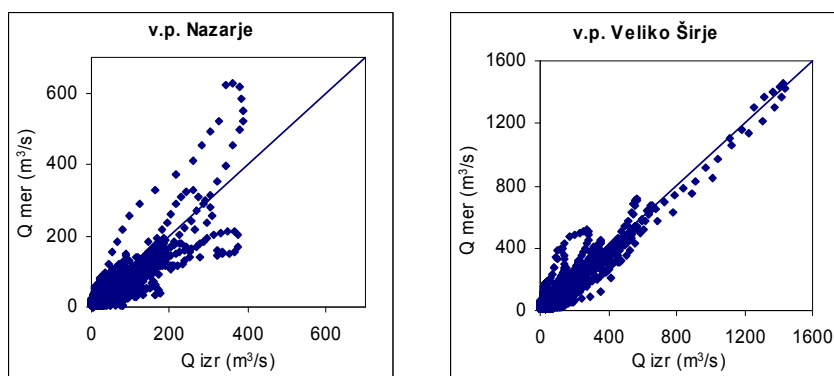
Slika 2 - Model povodja Savinje z ombrografskimi postajami na povodju

Na Sliki 2 je prikazan model povodja Savinje z ombrografskimi postajami na povodju in v bližnji okolici. Povodje smo razdelili na dve podpovodji: podpovodje do vodomerne postaje Nazarje na Savinji in podpovodje od Nazarij do vodomerne postaje v Velikem Širju. Prispevna površina zgornjega podpovodja je 457,3 km² s povprečno nadmorsko višino 940 m, v območju med 340 m in 2340 m, in spodnjega 1384,6 km² s povprečno nadmorsko višino 490 m, v območju med 230 m in 1560 m. Povprečni padec zgornjega podpovodja je 33 % in spodnjega 16 %. Skupno je na povodju 23 meteoroloških postaj, od katerih je samo pet postaj opremljenih z ombrografom.

Umerjanje modela smo izvedli za leti 1998 in 1999. Mesečne ocene potencialne evapotranspiracije so bile na voljo za eno postajo na povodju (268). Andréassian s sodelavci (2004) je pokazal, da preprosto privzete ocene potencialne evapotranspiracije kot vhod v model povodja zagotavljajo podobne rezultate kot izboljšane ploskovne ocene evapotranspiracije. Merilo za ujemanje izračunanega pretoka (Q_{izr}) z merjenim (Q_{mer}) je Nash-Sutcliffov kriterij R^2 , ki sta ga vpeljala Nash and Sutcliffe (Bergström, 1995) in izraža varianco okrog povprečja:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_{izr} - Q_{mer})^2}{\sum (Q_{mer} - \bar{Q}_{mer})^2} \quad (2)$$

Ta kriterij se običajno uporablja v hidrološkem modeliranju. Pri idealnem prilaganju bi bil $R^2=1$, vendar vrednost večja od 0.80 v praksi že pomeni zadovoljivo umerjen model (IHMS, 1999). Za povodje Savinje smo v procesu umerjanja modela dobili za R^2 vrednosti 0.76 za v. p. Nazarje in 0.86 za v. p. Veliko Širje. Vrednost kriterija R^2 je manjša za zgornje podpovodje, ki je pretežno gorato z močnimi orografskimi vplivi in veliko variabilnostjo padavin. Z razpoložljivimi ombrografskimi postajami na povodju porazdelitev in količina padavin ni natančno določena, kar je razlog za večja odstopanja pri odtoku. Pet postaj, od katerih sta samo dve na celotnem povodju Savinje (Slika 2), ni dovolj za natančen opis prostorske in količinske porazdelitve padavin. Za pravilen opis padavin v modelu bi bilo potrebno imeti več ombrografskih postaj zlasti v zgornjem delu povodja ali uporabiti radarske podatke kot vhod v model (Kobold in Zgonc, 1998). Vendar je kljub majhnemu številu padavinskih postaj na povodju model zadovoljivo kalibriran (Slika 3). V spodnjem delu povodja odstopanja niso velika in simulirani odtoki v Velikem Širju se dobro ujemajo z merjenimi.



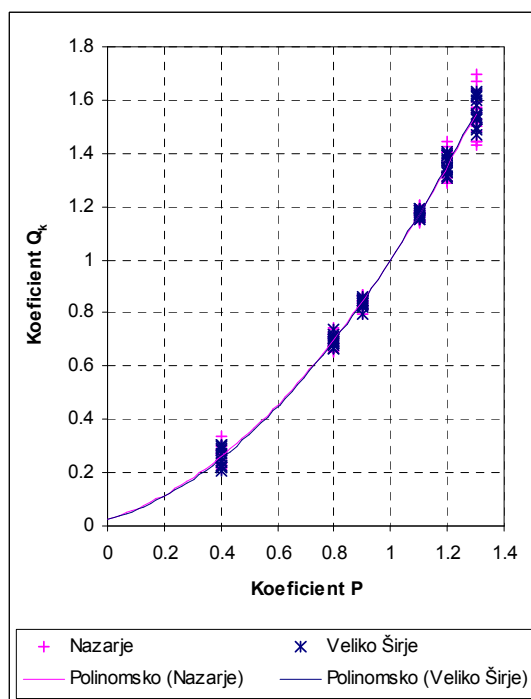
Slika 3 - Primerjava izračunanih in merjenih pretokov

Kalibriran model HBV je možno uporabiti za dnevno napovedovanje odtokov, zlasti visokih voda in poplav na povodju Savinje, pri čemer so vhodni podatki v model prognozirane padavine. Prav tako je lahko uporaba modela tudi analitična.

Občutljivost hidroloških modelov na padavine

Hidrološki modeli so občutljivi na padavine, ki so glavni vhodni podatek v model. Zanesljivost izračunanega pretoka je odvisna od zanesljivosti padavin in od točnosti ocen parametrov modela ter drugih napak vhodnih podatkov (Krzysztofowicz in Herr, 2001). Napake v količini padavin lahko značilno prispevajo k napaki odtoka. Za simulacijo odtokov je zato pomembno, da razpolagamo s točnimi podatki o padavinah, zlasti v procesu hidrološkega napovedovanja, ko imamo na razpolago prognozirane padavine.

S kalibriranim modelom HBV je bila izdelana analiza občutljivosti modela na vhodne padavinske podatke. Analizirano je bilo odstopanje konic visokovodnih valov glede na odstopanje padavin za posamezne padavinske dogodke v obdobju od začetka avgusta do konca novembra 1998. Padavine, ki so povzročile posamezne visokovodne dogodke, smo utežili z različnimi koeficienti med 0.4 in 1.3. Simulacije posameznih dogodkov so bile izvedene neodvisno od drugih dogodkov, da ni bilo vplivov na predhodno namočenost. Za vsak visokovodni val je bil izračunan koeficient odstopanja pretoka konice vala za obe vodomerni postaji (Slika 4). Odstopanje odtoka glede na odstopanje padavin ni linearno, ampak je polinom drugega reda. Napaka v podatkih o padavinah kot vhod v model padavine-odtok vodi k večjemu odstopanju v odtoku. Razmerje napak ni 1:1. Srednje vrednosti koeficientov, standardne deviacije in standardne napake so za obe vodomerni postaji podane v Tabeli 1. Standardna deviacija in standardna napaka se povečujeta z napako v padavinah. Medtem ko je srednja vrednost koeficienta pretoka konice vala skoraj enaka za obe postaji, pa so standardne deviacije in standardne napake večje za Savinjo v Nazarjih (zgornje podpovodje).



Slika 4 - Odstopanje odtoka glede na odstopanje padavin

koefficient P	Nazarje			Veliko Širje		
	povp. vrednost koef. Q_k	stand. deviacija	stand. napaka	povp. vrednost koef. Q_k	stand. deviacija	stand. napaka
0.4	0.27	0.0355	0.0095	0.26	0.0353	0.0094
0.8	0.70	0.0270	0.0070	0.70	0.0196	0.0052
0.9	0.84	0.0200	0.0053	0.84	0.0156	0.0042
1.1	1.17	0.0217	0.0058	1.17	0.0140	0.0037
1.2	1.36	0.0512	0.0137	1.36	0.0325	0.0087
1.3	1.54	0.0836	0.0223	1.56	0.0549	0.0147

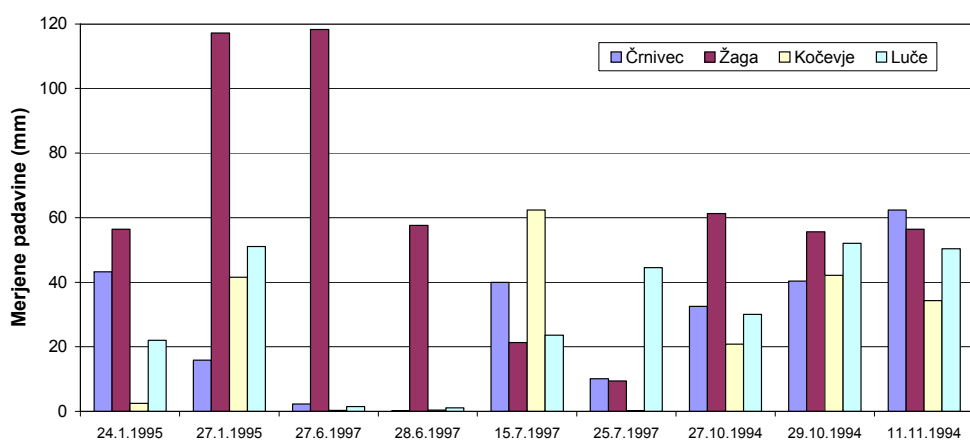
Tabela 1 - Povprečna vrednost koefficientov odtoka konic valov, standardne deviacije in standardne napake, izhajajoč iz napake v padavinah.

V primeru poplavnih dogodkov je pretok konice vala poleg časa nastopa najpomembnejša informacija, zato je pomembno zagotoviti točne podatke o vhodnih padavinah, bodisi iz padavinskih postaj ali drugih virov (radarsko merjene padavine, padavinska napoved). Točna prostorska in časovna razporeditev padavin je bistvenega pomena za modeliranje procesov padavine-odtok, kar je še zlasti pomembno za majhna povodja (Faurès in sod., 1995).

Verifikacija padavinske napovedi modela ECMWF

Numerično modeliranje je orodje za proučevanje vremenskih stanj in njihovo napovedovanje. Na Agenciji RS za okolje razpolagamo z rezultati in s količinskimi napovedmi padavin iz štirih modelov z različno domeno, dveh globalnih modelov (ECMWF in DWD/GM) in dveh modelov za omejeno območje (ALADIN/SI in DWD/LM).

V okviru projekta EFFS je bila izdelana verifikacija napovedi padavin iz modela ECMWF za območje Slovenije. Verifikacijo smo izvedli za padavinske dogodke, ki so bili izbrani v okviru projekta in so se nanašali na velike poplave večjih evropskih rek (1. december 1994 – 31. marec 1995; 25. junij 1997 – 31. julij 1997; 15. oktober 1994 – 15. november 1994). Ti poplavni dogodki ne sovpadajo z največjimi poplavami v Sloveniji. Glede na različne vremenske tipe v Sloveniji (Rakovec in Vrhovec, 2000) smo za izbiro enodnevnih padavinskih dogodkov vzeli štiri padavinske postaje (Luče - 520 m. n. v., Črnivec - 842 m. n. v., Žaga - 353 m. n. v. in Kočevje - 461 m. n. v.). Kriterij za izbiro dogodkov je bil najmanj 40 mm padavin na vsaj eni padavinski postaji (Slika 5).



Slika 5 - Padavinski dogodki na štirih izbranih postajah, ki predstavljajo različne vremenske tipe.

Merjene in interpolirane padavine

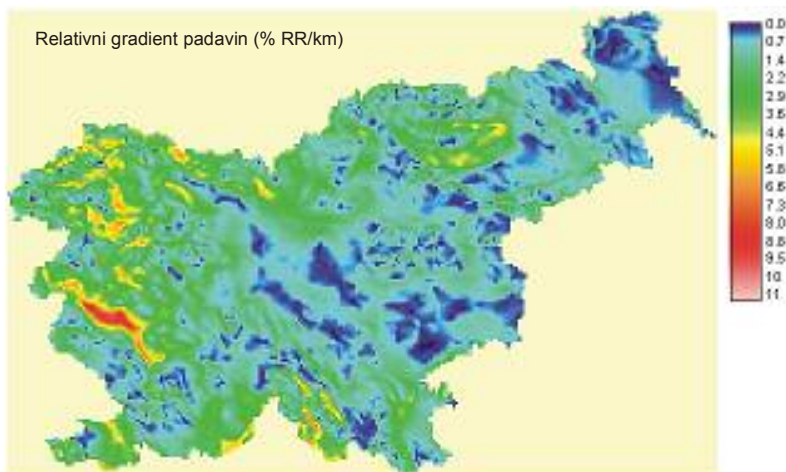
Podatke iz okrog 240 padavinskih postaj, ki pokrivajo Slovenijo, smo s splošnim krigingom (Kastelec, 2001) interpolirali na mrežo 1 km x 1 km. Prednost te interpolacijske metode je upoštevanje prostorske porazdelitve padavin. Točkovne meritve padavin znotraj ene modelne mrežne celice se lahko zelo razlikujejo, odvisno od terena, tipa padavin in resolucije modela. Primerjava merjenih in modelskih padavin je zato v veliki meri odvisna od lokacije postaje, kar nazorno prikazuje relativni gradient povprečnih letnih padavin obdobja 1961-1990, ki smo ga izračunali na mreži 1 km x 1 km (Slika 6). Relativni gradient je izračunan po enačbah 3a in 3b:

$$rel.grad. = \frac{1}{RR_y^{i,j}} \nabla RR_y^{i,j} * 100 \quad (3a)$$

in

$$\nabla RR_y^{i,j} = \sqrt{\left(\frac{RR_y^{i+1,j} - RR_y^{i-1,j}}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{RR_y^{i,j-1} - RR_y^{i,j+1}}{2\Delta y}\right)^2} \quad (3b)$$

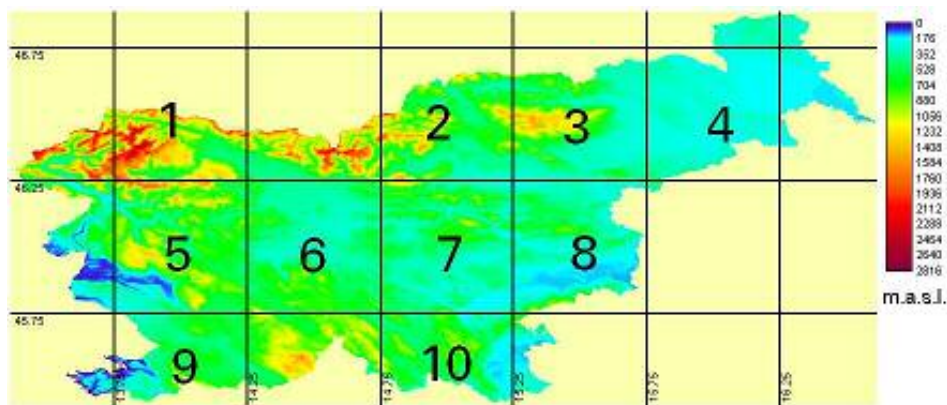
kjer so RR_y povprečne letne padavine obdobja 1961-1990, ∇RR_y je gradient padavin, i in j indeksa, ki označujeta geografsko širino in dolžino, Δx in Δy pa horizontalna resolucija v obeh smereh. Vrednosti relativnega gradienta (Slika 6) so lahko večje od 10 % na razdalji 1 km. V primeru dnevnih dogodkov so lahko gradienti padavinskih polj precej visoki.



Slika 6 - Relativni gradient padavin

Primerjava merjenih in napovedanih padavin modela ECMWF

Globalni model ECMWF ima resolucijo 0.5° . Na Sliki 7 je prikazano območje Slovenije v lat/lon projekciji, prekrito z mrežo modela ECMWF. Verifikacija je bila izpeljana na desetih mrežnih točkah.

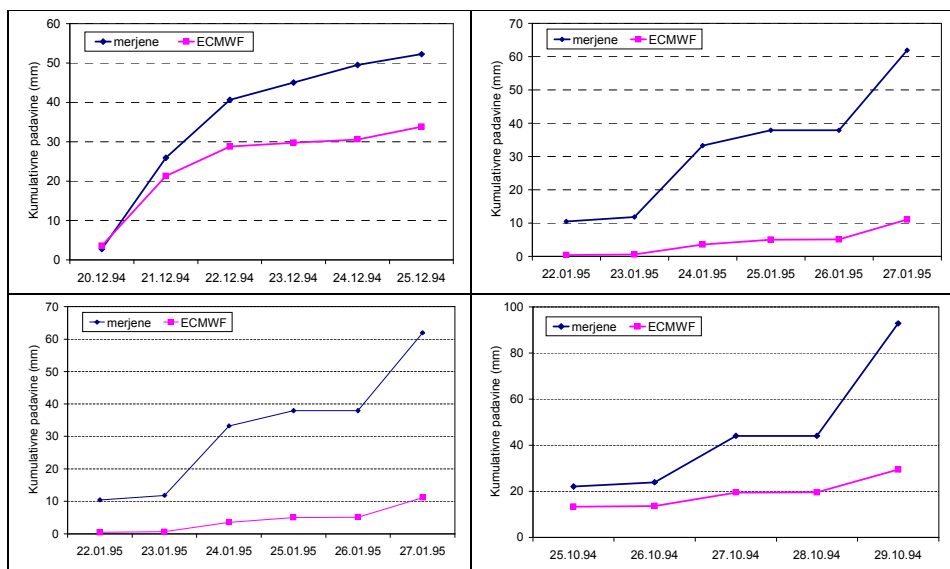


Slika 7 - ECMWF mrežne točke in relief Slovenije

Zagon modela ECMWF poteka vsak dan s podatki ob 12 UTC. Prognostična polja so na voljo do 240 ur vnaprej. Večina meteoroloških postaj meri padavine dnevno, ob 6 UTC, zato je bila narejena primerjava interpoliranih merjenih padavin in napovedi modela ECMWF za naslednje časovne intervale:

- ECMWF-2: napoved padavin med +18 in +42 ur vnaprej,
- ECMWF-3: napoved padavin med +42 in +66 ur vnaprej,
- ECMWF-4: napoved padavin med +66 in +90 ur vnaprej,
- ECMWF-5: napoved padavin med +90 in +114 ur vnaprej.

Na Sliki 8 so prikazani rezultati primerjave večdnevni padavinskih dogodkov med povprečnimi merjenimi kumulativnimi padavinami in povprečnimi kumulativnimi napovedanimi padavinami (ECMWF-2) za območje Slovenije. Model ECMWF pravilno predvidi padavinske dogodke, podceni pa količino padavin v obravnavanih primerih. Faktor podcenitve se giblje med 1.4 in 5.6, povprečna vrednost je 2.8.

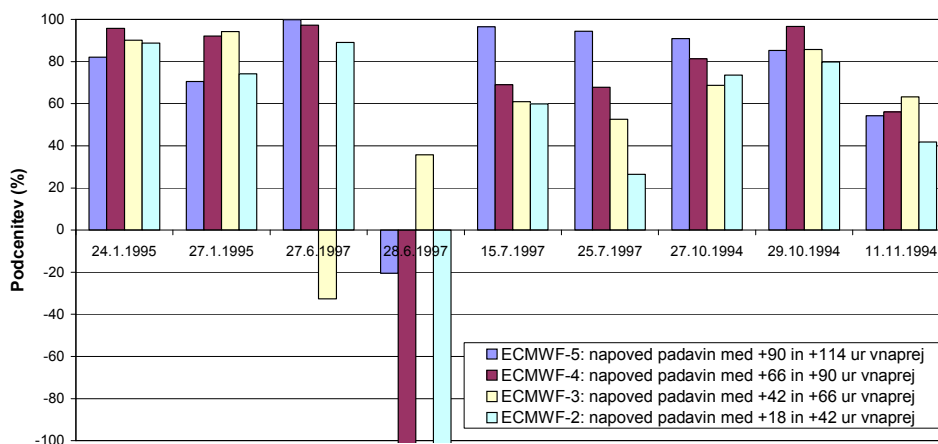


Slika 8 - Kumulativne merjene in modelske ECMWF-padavine (Slovenija, povprečje)

V nadaljevanju je prikazana analiza merjenih in modelskih padavin za enodnevne dogodke. Slika 9 kaže relativno razliko med modelskimi in merjenimi padavinami. Relativna razlika je izračunana po enačbi:

$$\Delta RR_{rel} = \left\langle \frac{RR_{meas} - RR_{mod}}{RR_{meas}} \right\rangle * 100 \quad (4)$$

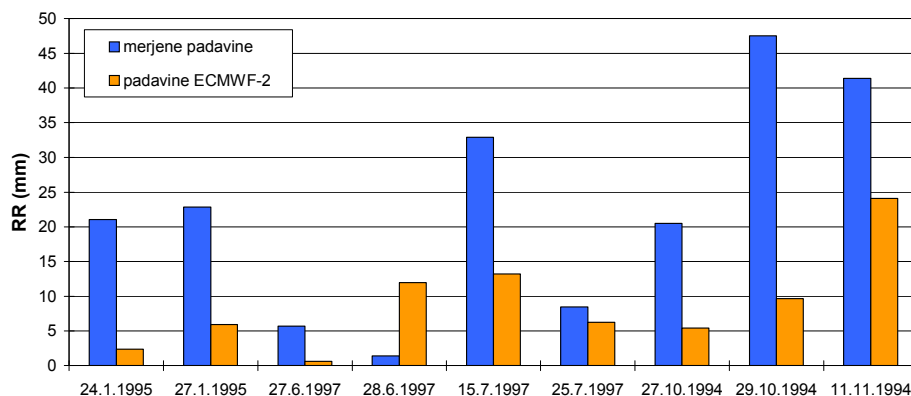
kjer so RR_{meas} povprečne merjene padavine znotraj ene ECMWF-mrežne točke, RR_{mod} je izhod modela za mrežno točko, $\langle \rangle$ pa pomeni povprečenje preko mrežnih točk.



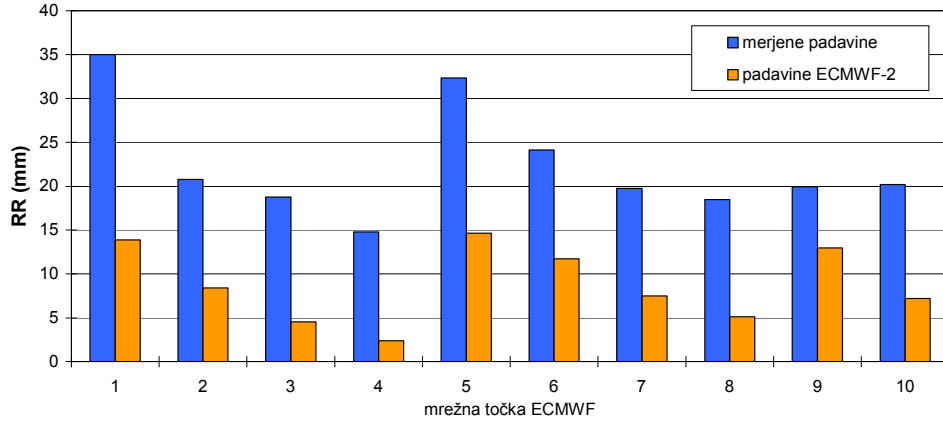
Slika 9 - Relativna razlika med modelskimi in merjenimi padavinami za različne časovne intervale

Model ECMWF podceni količino padavin v vseh primerih z izjemo dveh konvektivnih dogodkov (27. junij 1997 in 28. junij 1997). V splošnem, čeprav ne vedno, je relativna napaka napovedanih padavin manjša, ko so časovni intervale bližje merjenim padavinam (Slika 9). Podcenitev padavin je med 35 % in 85 %, povprečna vrednost je okrog 60 %.

Nadaljne analize vključujejo samo padavine najbližjega časovnega intervala (ECMWF-2). Padavine so bile najprej za obravnavane enodnevne padavinske dogodke povprečene preko mrežnih točk, ki pokrivajo Slovenijo (Slika 10) in potem povprečene še po dogodkih za vsako mrežno točko posebej (Slika 11). Največje relativne razlike so v območjih z najmanjšo količino padavin (mrežne točke 3, 4 in 8). V območjih z največjo količino padavin v Sloveniji so relativne razlike manjše (mrežne točke 1, 5 in 6).



Slika 10 - Količina padavin za enodnevne dogodke (povprečje po mrežnih točkah)



Slika 11 - Količina padavin v mrežnih točkah (povprečje po enodnevnih dogodkih)

Pri uporabi količinskih napovedi padavin kot vhod v hidrološke modele se običajno predpostavi, da so padavine konstantne znotraj mrežne celice. Glede na to predpostavko je napaka v padavinski napovedi sestavljena iz dveh delov: napake modela, ki je nezmožen točno napovedati padavine, in napake, povzročene s predpostavko enotno razporejenih padavin znotraj mrežne celice.

$$x_{\text{mod}}^k - x_{\text{mea}}^{i,k} = x_{\text{mod}}^k - x_{\text{av}}^k + x_{\text{av}}^k - x_{\text{mea}}^{i,k} \quad (5)$$

V enačbi 5 x_{mod}^k označuje numerični modelski rezultat k -te modelske mrežne točke, $x_{\text{mea}}^{i,k}$ so merjene padavine na lokaciji i znotraj k -te numerične modelske mrežne celice in x_{av}^k je povprečje $x_{\text{mea}}^{i,k}$ znotraj modelske mrežne celice k .

Z računanjem variance (drugega centralnega momenta s seštevanjem po i in k) enačbe 5 lahko varianco napake zapišemo kot:

$$\sigma = \sigma_{\text{mod}} + \sigma_{\text{ua}} \quad (6)$$

kjer je

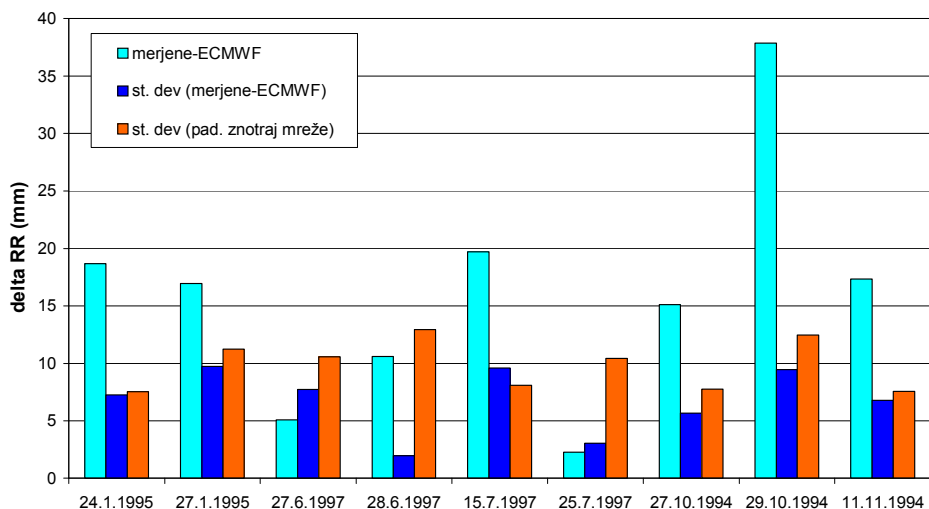
$$\sigma_{\text{mod}} = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_{\text{mod}}^k - x_{\text{av}}^k) \quad (6a)$$

$$\sigma_{\text{ua}} = \frac{1}{(K-1)(I-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (x_{\text{av}}^k - x_{\text{mea}}^{i,k}) \quad (6b)$$

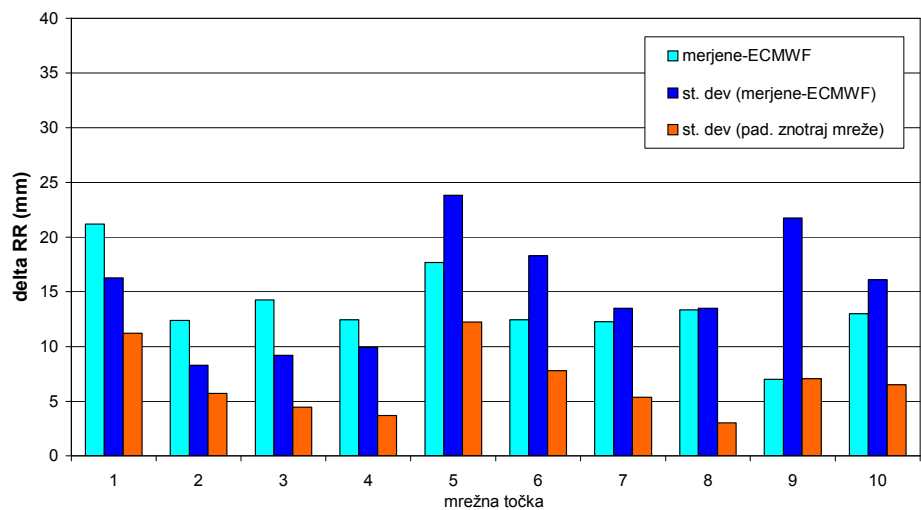
$\sqrt{\sigma_{\text{mod}}}$ imenujemo standardno deviacijo napake modela kot rezultat nezmožnosti modela, da napove padavine točno, in $\sqrt{\sigma_{\text{ua}}}$ standardno deviacijo napake zaradi predpostavke enotno razporejenih padavin znotraj modelske mrežne celice.

Napaka, povzročena s predpostavko enotno razporejenih padavin znotraj modelske celice, ni odvisna od zmožnosti modela, da napove padavine točno, ampak od horizontalne

resolucije modela in naravne variabilnosti padavin. Njegova standardna deviacija je bila ocenjena z računanjem standardne deviacije padavin iz interpoliranih merjenih padavin v mreži 1 km x 1 km na mrežo ECMWF. Na Slikah 12 in 13 so prikazane povprečne razlike med ECMWF in merjenimi padavinami za območje Slovenije (merjene-ECMWF), standardna deviacija napake modela (st. dev. (merjene-ECMWF)) in standardna deviacija napake zaradi predpostavke enotno razporejenih padavin znotraj mrežne celice (st. dev. (pad. znotraj mreže)). Primerjava standardnih deviacij napak pokaže najbolj pomemben vir napak v primeru hidrološke napovedi. To je lahko napaka modela ali slaba resolucija modela. Podobno kot na Slikah 10 in 11, je na Slikah 12 in 13 prikazano povprečje preko modelskih točk in preko dogodkov.



Slika 12 - Povprečna napaka modela, standardna deviacija napake modela in standardna deviacija padavin znotraj mrežnih celic za enodnevne dogodke



Slika 13 - Povprečna napaka modela, standardna deviacija napake modela in standardna deviacija padavin znotraj mrežnih celic za mrežne točke

Standardna deviacija napake zaradi predpostavke enotno razporejenih padavin znotraj modelske celice je okrog 10 mm za enodnevnne dogodke (Slika 12). Izgleda, da je nekoliko večja v konvektivnih padavinskih dogodkih (25. julij 1997, 27. junij 1997 in 28. junij 1997). V splošnem pa model ECMWF sistematično podceni količino padavin preko Slovenije in ta podcenitev je največji vir napake, ko so napovedane padavine vhod v hidrološke modele. V večini primerov daje model z grobo resolucijo okrog 10 mm napake v padavinah in je v splošnem manjša, kot je sistematična podcenitev modelskih rezultatov. Slika 13 kaže, da je variabilnost padavin veliko večja v goratem severozahodnem delu Slovenije (mrežni točki 1 in 5).

Zaključki

Vremenske napovedi nam skupaj z informacijami o lastnostih povodja in modeli padavine-odtok nudijo informacije o možnih poplavah. Vendar so hidrološki modeli občutljivi na padavine kot glavni vhodni podatek v te modele, zato je za zanesljive napovedi in opozorila pred poplavami ključna točnost napovedanih padavin. Konceptualni model HBV s časovnim korakom ene ure se je pokazal za sprejemljivega za simulacijo hudourniških poplav. Glavna ovira, ki se pojavlja pri modeliranju s kratkimi časovnimi koraki, je pomanjkanje podatkov tako za kalibracijo kot za nadaljne aplikacije ali operativno rabo.

Izvedene analize kažejo, da lahko količinske napovedi modela ECMWF v hidrološkem modeliranju povzročijo zelo velike napake v odtokih, saj ECMWF v splošnem podceni količino padavin, v povprečju za 60 %. Variabilnost padavin v Sloveniji je velika in resolucija modela ECMWF je pregraba za opis te variabilnosti. Napovedovanje pojavov v manjši skali z boljšo resolucijo je ključno za točnost regionalnih napovedi in zlasti za območja s kompleksno topografijo, kot je Slovenija. Nadaljne delo mora biti usmerjeno v analize merjenih padavin in napovedanih padavin modela ALADIN/SI, ki pokriva območje Slovenije z resolucijo okrog 11 km (Vrhovec in sod., 1998). Te analize bodo pokazale uporabnost napovedi padavin modela za omejeno območje za napovedovanje odtokov do dva dni vnaprej, kot je časovna napoved modela ALADIN/SI.

Zahvala

Delo je plod sodelovanja Agencije RS za okolje in Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani v projektu EFFS in financirano s strani Evropske skupnosti. Avtorja se želiva še posebej zahvaliti koordinatorju projekta prof. M. Brilly-u za uspešno koordinacijo in dragoceno pomoč.

Viri

- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., 2004. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology* 286, 19-35.
- Bergström, S., 1995. The HBV model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology* (ed. by V. P. Singh), 443-476. Water Resources Publication, Colorado, USA.
- Brilly, M., 1993. Priročnik za program HEC-1, Univerza v Ljubljani, Hidrotehnična smer FAGG, Ljubljana.

- Bruen, M., 1999. Some General Comments on Flood Forecasting. Proc. of Euroconference on Global Change and Catastrophic Risk Management: Flood Risks in Europe. IIASA, Laxenburg, Austria.
- EFFS, 2002. An European Flood Forecasting System, Report Kickoff Meeting EFFS-NAS, 4-5 November 2002, Contract no. EVG1-CT-1999-00011, WL Delft Hydraulics, Netherlands.
- EFFS, 2003. An European Flood Forecasting System. Final Report WP 8, Contract no. EVG1-CT-1999-00011, Deliverable no. 8.3, WL Delft Hydraulics, Netherlands.
- Faurès, J.N., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Sorooshian, S., 1995. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. *Journal of Hydrology* 173, 309-326.
- IHMS, 1999. Integrated Hydrological Modelling System. Manual, Version 4.5. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden.
- Kastelec, D., 2001. Objektivna prostorska interpolacija meteoroloških spremenljivk in njihovo kartiranje. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Slovenija.
- Kobold, M., Sušelj, K., Štravs, L., Brilly, M., 2003. Razvoj evropskega poplavnega prognostičnega sistema. 14. Mišičev vodarski dan 2003, Zbornik referatov, VGB Maribor.
- Kobold, M. and Sušnik, M., 2000. Watershed modelling and surface runoff simulation. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2000 – Villach, Österreich, Tagungspublikation, Band 2. 329 – 338.
- Kobold, M., Sušnik, M. and Polajnar, J., 2000. New approaches in Slovenian hydrological forecasting service, XX. Conference of the Danube countries, Bratislava, Slovakia, Conference abstracts, Zgoščenka z referati.
- Kobold, M., Zgonc, A., 1998. The accuracy of the radar-estimated areal hourly rainfall. COST-75, Advanced weather radar system, Proceedings of International seminar, Locarno, Switzerland, 179-186.
- Kolbezen, M. in Pristov, J., 1998. Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Ljubljana.
- Krzysztofowicz, R., Herr, H., D., 2001. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting: precipitation-dependent model. *Journal of Hydrology* 249, 46-68.
- Lidén, R., Harlin, J., 2000. Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates, *Journal of Hydrology* 238, 231-247.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S., 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* 201, 272-288.
- Marinček, M., 1992. Vzroki poplave v Celju 1. novembra 1990. Zbornik Poplave v Sloveniji, Ministrstvo za obrambo, RUZR, Ljubljana, str.155-161.
- Mathevet, T., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., 2004. Experimental design of a lumped rainfall-runoff model dedicated to the hourly time-step. BALWOIS Conference on water observation and information system for decision support, Abstracts, Ohrid, Macedonia. 394-395.
- NIVO, 1991. Vodna ujma. Slovenj Gradec, Slovenija.
- NIVO, 1999. Vodna ujma 1999. Celje, Slovenija.
- Rakovec, J. in Vrhovec, T., 2000. Osnove Meteorologije za naravoslovce in tehnike. Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, Ljubljana.
- Reihan, A., Kovalenko, O., 2000. Experience of an application of the HBV model for runoff computation in Estonia. Proceedings of the Symposium dedicated to the 40th Anniversary of Institute of the Environmental Engineering at Tallinn Technical University. 126-134.
- Seibert, J., 2000. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 215-224.
- Sušnik, M. and Polajnar, J., 1998. Simple hydrological forecasting models: operational experience. Proceedings of XIXth Conference of the Danube Countries, Osijek, Croatia. 31 – 36.
- Vrhovec, T., Žagar, M., Brilly, M., Šraj, M., 1998. Napovedovanje padavin z modelom ALADIN-SI in modeliranje površinskega odtoka. Zbornik referatov 17. Goljevškovega spominskega dne, Acta hydrotechnica 16/23, Ljubljana. 71-84.