

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Pogačnik, N., 2016. Izgradnja visokovodnega prognostičnega in opozorilnega sistema in zagotavljanje njegove zanesljivosti in operativnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentorica Šraj, M.): 102 str.

Datum arhiviranja: 01-09-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Pogačnik, N., 2016. Izgradnja visokovodnega prognostičnega in opozorilnega sistema in zagotavljanje njegove zanesljivosti in operativnosti. M.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Šraj, M.): 102 pp.

Archiving Date: 01-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**PODIPLOMSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

NEJC POGAČNIK

**IZGRADNJA VISOKOVODNEGA PROGNOŠČNEGA
IN OPOZORILNEGA SISTEMA IN ZAGOTAVLJANJE
NJEGOVE ZANESLJIVOSTI IN OPERATIVNOSTI**

Magistrsko delo št.: 268

**FLOOD FORECASTING AND WARNING SYSTEM
DEVELOPMENT ITS RELIABILITY AND
OPERATIONAL ABILITY**

Graduation – Master Thesis No.: 268

Mentor:

prof. dr. Franc Steinman

Somentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 29. 08. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Nejc Pogačnik, vpisna številka 26108390, pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Izgradnja visokovodnega prognostičnega in opozorilnega sistema in zagotavljanje njegove zanesljivosti in operativnosti

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK/UDC:	556.166(043.3)
Avtor:	Nejc Pogačnik, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.
Mentor:	prof. dr. Franci Steinman
Somentor:	doc. dr. Mojca Šraj
Naslov:	Izgradnja visokovodnega prognostičnega in opozorilnega sistema in zagotavljanje njegove zanesljivosti in operativnosti
Tip dokumenta	magistrsko delo
Obseg in oprema:	102 str., 7 preg., 36 sl., 36 en.
Ključne besede:	sistem za hidrološko napovedovanje, prognostični sistem za visoke vode, hidrološki model, hidravlični model, monitoring, opozarjanje, spremljanje hidrološkega stanja, verifikacija

Izvleček

Kakovosten in operativen visokovodni prognostični sistem je eden od osnovnih elementov za pripravo in odziv na poplavne dogodke. Delo opredeljuje namen, sestavo in vpliv sistema pri zmanjšanju škodljivega delovanja voda. V zadnjih desetih letih so v Sloveniji poplave zahtevale izredno visoke stroške in izgradnja sistema je del negradbenih ukrepov za zmanjševanje posledic. Doseganje učinka pri napovedovanju je najpogosteje pogojeno s spremljanjem in preverjanjem. S tem namenom je potrebno opredeliti metodologijo in teoretična izhodišča za operativno spremljanje kakovosti modelskih zasnov ter zagotavljati njihovo kontinuiteto delovanja. Sistem za napovedovanje visokih voda sestoji iz številnih delov, ki so medsebojno povezani in soodvisni. Za delovanje potrebujemo zadosti gosto mrežo merilnih mest, hidrološki model, hidrodinamični model, rezultate meteoroloških modelov, ustrezno predstavitev rezultatov modelskih zasnov in v zadnjem koraku tudi analize kakovosti in/ali učinkovitosti. Metode analiz so medsebojno različne in vsaka omogoča ciljno določanje in predstavitev pomanjkljivosti rezultatov. Pri analizi so bile v obravnavanem primeru uporabljene in predstavljene vizualne, zvezne in binomske analize. Kot najprimernejša in učinkovita se je izkazala metoda relativne operativne karakteristike (ROC), ki prikazuje verjetnost pravilne napovedi. Poleg diagrama zanesljivosti omogoča kakovostno razumevanje preteklega delovanja in s tem razumljivo mero zaupanja za prihodnje rezultate modelskih izračunov. Kazalniki kot Nash-Sucliffe (NSE), Kling - Gubta (KGE) ter drugi statistični kazalniki so se izkazali kot primernejši za umerjanje in analizo, medtem ko so kazalniki uspešnosti v hidrologiji reprezentativni predvsem pri lokacijah s sorazmerno enakomerno porazdelitvijo pretokov.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC / UDK: 556.166(043.3)
Author: Nejc Pogačnik, B.Sc.
Supervisor: prof. Franci Steinman Ph.D.
Cosupervisor: assist. prof. Mojca Šraj Ph.D.
Title: Flood forecasting and warning system development its reliability and operational ability
Document type: M. Sc. Thesis
Scope and tools: 102 p., 7 tab., 36 fig., 36 eq.
Keywords: Flood forecasting system, hydrological model, hydrodynamic model, monitoring, data management, warning, verification

Abstract

Quality of operational flood forecasting system (FFS) is the essential component for efficient response to the foreseen flood events. The thesis is describing why FFS is needed, how does it help, what are its parts and how does it influence the response process. But the basic question is how well the results are. In the last ten years, Slovenian floods demanded extremely high costs. To address this costly water power the development of FFS is part of nonstructural measures to reduce the flood impact. Achieving good forecasts is mostly connected to hard work in verification and learning from the models results. Therefore, it is crucial to define the methodology for operational control of the model formation to ensure continuity and improvement of its operation. FFS consists of several parts, which are interconnected and interdependent. The system requires and operational monitoring network, hydrologic model, hydrodynamic model, meteorological models, visualization and presentation of the results and last but not least the analysis of quality, efficiency, accuracy, reliability and skill. Methods of analysis are very alike and each provides target identification and presentation of the shortcomings of the results. In the analysis, deterministic and continuous analyses were used. As most efficient was proven the relative operating characteristics (ROC), which shows the relative probability of correct prediction. Verification indexes as Nash-Sucliffe efficiency (NSE) or Kling-Gubta efficiency (KGE) are seen as more useful in calibration process and binary success indexes are hydrologically seen often more appropriate for uniform discharge distributions.

ZAHVALA

Delo posvečam svojim prednikom, ki so me vzgojili in mojima otrokoma Zarji in Erazmu Pogačnik.

Največja zahvala za dokončanje moje dolge poti podiplomskega študija gre Evi Rotar, ki je skrbela za družinske obveznosti v času mojega posvečanja nalogi.

Velika zahvala gre tudi sodelavcem na Agenciji za okolje Republike Slovenije, saj brez njihovih prispevkov v celoten projekt BOBER te naloge nebi bilo mogoče izvesti.

Nenazadnje gre zahvala tudi sometorici doc. dr. Mojci Šraj in mentorju prof. dr. Franciju Steinmanu, ki sta me v zadnjih trenutkih podprla in pomagala dopolniti nalogo.

Prof. dr. Franciju Steinmanu še posebej hvala za večletno podajanje napotkov na moji dosedanji strokovni poti.

*Antoine de Saint-Exuperyja je v Malem princu zbral nekaj zelo pomembnih vodil za življenje in delo,
ki jih želim dati v vzpodbudo vsem, ki se bodo srečali z mojim delom:*

*Domišljiji moramo pustiti, da nas preseneti. Verjemite v širino misli, ki vam jih lahko prinesejo vaši
možgani.*

Nikoli ne smemo obupati. Vse se bo obrnilo na boljše in bolj kot bomo v to verjeli, prej se bo to zgodilo.

*Vsakdo, ki se pojavi v našem življenju je pomemben, razlika je le, kako velik pečat kdo pusti v
nas. Nekateri ostanejo za zmeraj, spet drugi pridejo samo na obisk.*

Če hočete videti, morate gledati s srcem.

KAZALO VSEBINE

1	Uvod	1
1.1	Predmet obravnave v magistrskem delu	2
1.2	Cilj	4
1.3	Razlogi za obravnavo	4
1.4	Zgodovinski razvoj vzpostavitve sistema za napovedovanje	7
1.5	Poslanstvo in namen hidrološkega napovedovanja	7
1.6	Predstavitve hipoteze	8
2	Teoretične podlage	10
2.1	Klasifikacija hidroloških napovedi in tipov poplav	12
2.2	Verifikacijske analize hidroloških napovedi	17
2.2.1	Vizualna presoja	18
2.2.2	Metode zvezne verifikacije	19
2.2.3	Binarna verifikacija	26
2.3	Opis hidrološko prognostično opozorilnega sistema	30
2.4	Opis modulov prognostično opozorilnega sistema	32
2.4.1	Hidrološka in meteorološka monitoring mreža v Sloveniji	33
2.4.2	Uporaba meteoroloških modelov	35
2.4.3	Hidrološko-hidravlično modelsko jedro	36
2.4.4	NAM	37
2.4.5	Mike 11	38
2.4.6	Vloga »kvazi 2d« hidravličnega modeliranja v HPS	38
2.4.7	Vizualizacija rezultatov sistema za hidrološko napovedovanje	41
2.4.8	Priprava napovedi in opozorila	46
2.4.9	Vpliv kritične infrastrukture na sistem in možnosti za napredek ob prehodu na Prognostično Opozorilno Odzivni Sistem (POOS)	48
2.5	Kako opredeliti kakovost hidrološke napovedi	51
2.5.1	Zakaj potrebujemo preverjanje in ocenjevanje kakovosti napovedi	52
2.5.2	Povezava med meteorološkimi in hidrološkim napovedovanjem	55
2.5.3	Napredek hidrološkega napovedovanja	55
2.6	Zakonska določila	57
2.7	Obstoječ indikator kakovosti	59
2.8	Predlog metodologije kakovosti napovedovanja pri modelskem in opozorilnem delu	61
3	Testno obravnavano porečje reke Sore	67
3.1	Opis hidroloških značilnosti porečja Sore na vodomerni postaji Suha	67
3.2	Opis uporabljenih podatkov	68
3.3	Opazovano obdobje	69
4	Obdelava, rezultati in primerjava	71
4.1	Ocenjevanje numerične točnosti modelskih zasnov in primerjava rezultatov	71

4.1.1	Ugotovitve o veljavnosti hipotez	87
5	Zaključek	89

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Klasifikacija napovedovanja poplav (Bernard, 1939).....</i>	<i>13</i>
<i>Preglednica 2: Prikaz enostavne enodimenzijske bivariantne (kontingenčne) preglednice.....</i>	<i>26</i>
<i>Preglednica 3: Pregled umestitve hidroloških modelov znotraj različnih HPS (1-5) glede na domeno hidrološkega modela in uporabljenih napovedi meteoroloških modelov (Petan et.al, 2015).....</i>	<i>35</i>
<i>Preglednica 4: Napredek v časovnem dosegu meteoroloških napovedi od 1939 do 2015.</i>	<i>56</i>
<i>Preglednica 5: Primer preglednice za oceno kakovosti hidrološkega opozorila.</i>	<i>60</i>
<i>Preglednica 6 : Izračunane statistične značilnosti v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.....</i>	<i>73</i>
<i>Preglednica 7: Standardni kazalniki zanesljivosti modeliranja v hidrologiji (VE, R2, NSE, KGE) v obdobju 14. 1. 2014 do 29. 2. 2016, v.p. Sora Suha.....</i>	<i>75</i>

LIST OF TABLES

<i>Table 1: Clasification of Flood forecasting from Bernard in 1939.</i>	<i>13</i>
<i>Table 2: A simple one dimensional contingency table.....</i>	<i>26</i>
<i>Table 3: Overview of different flood forecasting model setups (1-5) based on the usege of meteorological model forecasts (Petan at al., 2015)</i>	<i>35</i>
<i>Table 4: Forecast range progress in meteorological forecasting from 1939 to 2015.....</i>	<i>56</i>
<i>Table 5: An example for assessing the quality of hydrological warnings.</i>	<i>60</i>
<i>Table 6: Statistical characteristics in the evaluation period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.....</i>	<i>73</i>
<i>Table 7: Standard measures of modeling reliability in flood forecasting (VE, R2, NSE, KGE) during the period of 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.....</i>	<i>75</i>

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Vizualizacija različnih napovedi in meritev v sistemu VodePro, 20.4.2016, ARSO.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2: Prognostični opozorilno odzivni sistem (dopolnjeno na osnovi Parker, 2003).....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 3: Hidrološka postaja Suha na Sori (vir: ARSO, 2015).....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 4: Novo zgrajena meteorološka postaja v okviru projekta BOBER (vir: ARSO, 2015).....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 5: Zasnova hidrološkega prognostičnega sistema (Petan et al., 2015).....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 6: Primerjava rezultatov območij poplavnih kart testnega »kvazi 2D« modela (programska oprema Mike 11, v izvedbi: ARSO in IZVO-R; z vključitvijo struge Malega Grabna) in referenčenga 2D modela (programska oprema MikeFlood (Mike 21 računsko jedro), v izvedbi: IZVO-R; brez struge Malega Grabna na območju JZ dela Ljubljane), Pogačnik et al., 2013.....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 7: Slika zaslona vizualizacije hidrološkega stanja in napovedi z metapodatki za izbrano vodomerno postajo iz leta 2012.....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 8: Prikaz rezultatov napovedi na pametnem telefonu (testni primer delovanja).....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 9: Spletna aplikacija VodePRO za prikaz meteoroloških in hidroloških podatkov ter izvajanje operativne hidrološke službe (ARSO, 2016).....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 10: Pogoji za obvladovanje in upravljanje s tveganji ob škodljivem delovanju voda.....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 11: Nadgradnja linearnega sistema opozarjanja in odzivanja sistema zaščite pred škodljivim delovanjem voda v prognostično opozorilno odzivni sistem v primeru hudourniških poplav.....</i>	<i>50</i>
<i>Slika 12: Časovna razlika med linearnim modelom opozarjanja in odziva ter POOS.....</i>	<i>51</i>
<i>Slika 13: Srednje mesečne značilne obdobje vrednosti pretokov na v.p. Sora Suha v obdobju 1953 – 2012 (vir podatkov: ARSO).....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 14: Izmerjeni pretoki v obravnavanem obdobju od 14. 1. 2014 do 29. 2. 2016 (vir podatkov: ARSO, 2016).....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 15: Razmere ob poplavah oktobra 2014 na povodju Sore (Poljane nad Škofjo Loko, Poljanska Sora v Zmincu) (Vir: MMC, www.rtvsl.si).....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 16: Statistične značilnosti izmerjenih pretokov v primerjavi z numerično izračunanimi pretoki na v.p. Sora Suha.....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 17: Grafikon kazalcev (VE, NSE, KGE, R²) kakovosti napovedi s povečevanjem časovnega dosega za izbrane modelske zasnove v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 18: Grafikon kazalcev (NSE, KGE, R²) kakovosti napovedi pri pretokih nad 100 m³/s s povečevanjem časovnega dosega za izbrane modelske zasnove v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 19: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi vseh pretokov v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 20: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi pretokov nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.....</i>	<i>78</i>

<i>Slika 21: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi vseh pretokov nad 50 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>79</i>
<i>Slika 22: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi vseh pretokov nad 50 m³/s v obdobju 01. 09. 2014 do 31. 12. 2014, v.p. Sora Suha.</i>	<i>79</i>
<i>Slika 23: Diagram zanesljivosti, model Sava1 s podatkovno asimilacijo pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>80</i>
<i>Slika 24: Diagram zanesljivosti, model Sava1n brez podatkovne asimilacije pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>80</i>
<i>Slika 25: Diagram zanesljivosti, model Sava4 s podatkovno asimilacijo pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>80</i>
<i>Slika 26: Diagram zanesljivosti, model Sava4n brez podatkovne asimilacije pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>80</i>
<i>Slika 27: Porazdelitev pretokov, model Sava1n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>81</i>
<i>Slika 28: Vsota porazdelitve pretokov, model Sava1n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>82</i>
<i>Slika 29: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava1 s podatkovno asimilacijo za pretoke nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>83</i>
<i>Slika 30: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava1n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>83</i>
<i>Slika 31: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava4 s podatkovno asimilacijo za pretoke nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>84</i>
<i>Slika 32: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava4n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad 100 m³/s v obdobju 14.1.2014 do 29.2.2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>84</i>
<i>Slika 33: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava1 s podatkovno asimilacijo v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>85</i>
<i>Slika 34: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava4 s podatkovno asimilacijo v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.</i>	<i>85</i>
<i>Slika 35: Gilbertov (GSS), Piercejev (PSS), Hidkejev (HSS) kazalnik uspešnosti, pretok > 100m³/s, obdobje 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, časovni doseg + 0 ur, razredi 20 m³/s.</i>	<i>86</i>
<i>Slika 36: Gilbertov (GSS), Piercejev (PSS), Hidkejev (HSS) kazalniku uspešnosti, pretok > 100m³/s, obdobje 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, časovni doseg + 48 ur, razredi 20 m³/s.</i>	<i>87</i>

LIST OF FIGURES

<i>Figure 1: Visualization of the various forecasts and measurements in the system VodePro, 04.20.2016, ARSO. .</i>	<i>19</i>
<i>Figure 2: Flood forecasting, warning and response system (supplements based on Parker, 2003).</i>	<i>31</i>
<i>Figure 3: Gauging station at Sora Suha (surce: ARSO, 2015).</i>	<i>33</i>
<i>Figure 4: Newly built meteorological station within the project BOBER (source: ARSO, 2015).</i>	<i>34</i>
<i>Figure 5: A conceptual diagram of flood forecasting system (Petan et al., 2015).</i>	<i>36</i>
<i>Figure 6: Comparison of test flood map of "quasi 2D" model (software Mike 11; developed by ARSO and IZVO-R; with the channel of Mali Graben) with the reference 2D model (software MikeFlood (Mike21 calculation engine); developed by IZVO-R; without the channel of Mali Graben) in the area of SW part of Ljubljana (software Mike 11; IZVO-R and ARSO), Pogačnik et al., 2013.</i>	<i>40</i>
<i>Figure 7: Print screen of hydrological state and forcast with its metadata on teh selected gauging station from 2012.</i>	<i>42</i>
<i>Figure 8: Smart phone results visualization (test case operation).</i>	<i>43</i>
<i>Figure 9: Web application VodePRO to show meteorological and hydrological data with the implementation of operational hydrological service (ARSO, 2016).</i>	<i>44</i>
<i>Figure 10: The conditions for risk management in flood situations.</i>	<i>49</i>
<i>Figure 11: Upgrade of the classical linear warning and response system to flood forecasting warning and response system (FFWRS) in flash floods cases.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 12: The time difference between the linear warninrg and response system and the FFWRS.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 13: Medium monthly dischrage characteristic values at gauging station Sora Suha in the period 1953 - 2012 (data source: ARSO).</i>	<i>68</i>
<i>Figure 14: Measured discharges in the evaluation period from 14. 1. 2014 to 29. 2. 2016 (data source: ARSO, 2016).</i>	<i>70</i>
<i>Figure 15: The situation after and during floods in october 2014 at the Sora river basin (Poljane above Škofja Loka, Poljanska Sora in Zminc) (Source: MMC www.rtvsllo.si)</i>	<i>70</i>
<i>Figure 16: The comparison of statistical characteristics between measured flows to calculated flows at the gauging station Sora Suha.</i>	<i>72</i>
<i>Figure 17: Simulation indexes chart (VE, NSE, KGE, R²) for forecast quality with increasing lead time for different model setups in the time period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.</i>	<i>74</i>
<i>Figure 18: Simulation indexes chart (NSE, KGE, R²) for forecast quality with increasing lead time over 100 m³/s for different model setups in the time period 01. 14. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.</i>	<i>76</i>
<i>Figure 19: Reliability diagram for Sava1n model in discharge frequency distribution for the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.</i>	<i>78</i>
<i>Figure 20: Reliability diagram for Sava1n model, above 100 m³/s in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.</i>	<i>78</i>

Figure 21: Reliability diagram for Sava1n model, discharge above 50 m ³ /s in the period 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.	79
Figure 22: Reliability diagram for Sava1n model, discharge above 50 m ³ /s in the period 01. 09. 2014 to 31. 12. 2016, g.s. Sora Suha.	79
Figure 23: Reliability diagram, Sava1 model, data assimilation included, discharges over 100 m ³ /s in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	80
Figure 24: Reliability diagram, Sava1n model, without data assimilation, discharges over 100 m ³ /s in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	80
Figure 25: Reliability diagram, Sava4 model, data assimilation included, discharges over 100 m ³ /s in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	80
Figure 26: Reliability diagram, Sava4n model, without data assimilation, discharges over 100 m ³ /s in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	80
Figure 27: Discharge distribution, Sava1n model, without data assimilation, discharges over 100 m ³ /s, period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	81
Figure 28: Cumulative distribution discharge function, Sava1n model, without data assimilation, discharges over 100 m ³ /s, period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, Sora Suha.....	82
Figure 29: Receiver operational characteristic, model setup Sava1 with data assimilation discharges over 100 m ³ /s in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	83
Figure 30: Receiver operational characteristic, model setup Sava1 without data assimilation, discharges over 100 m ³ /s in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	83
Figure 31: Receiver operational characteristic, model setup Sava4 with data assimilation, discharges over 100 m ³ /s in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.....	84
Figure 32: Receiver operational characteristic, model setup Sava4n without data assimilation, discharges over 100 m ³ /s in the period 14.1.2014 to 29.2.2016, g.s. Sora Suha.....	84
Figure 33: Receiver operational characteristic, model setup Sava1 with data assimilation, in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.	85
Figure 34: Receiver operational characteristic, model setup Sava4 with data assimilation in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.	85
Figure 35: Gilbert (GSS), Pierc (PSS), Hidkv (HSS) index, discharge > 100m ³ /s, period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, lead time + 0 hour, frequency 20 m ³ /s	86
Figure 36: Gilbert (GSS), Pierc (PSS), Hidkv (HSS) index, discharge > 100m ³ /s, period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, lead time + 48 hours, frequency 20 m ³ /s.....	87

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

WMO	Svetovna meteorološka organizacija (ang. World Meteorological Organization)
EFAS	Evropski sistem za opozarjanje pred visokimi vodami (ang. European Flood Awareness System)
FLOODsite	Sistemi za analiziranje poplavne ogroženosti z metodologijami upravljanja (ang. Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies)
ACTIF	Ovrednotenje, zmanjševanje in diseminacija negotovosti pri hidrološkem napovedovanju (ang. Quantification, reduction and dissemination of uncertainty in flood forecasting)
AMS	Ameriško meteorološko društvo (ang. American Meteorological Society)
HPS	Hidrološki prognostični sistem
MOP, ARSO	Ministrstvo za okolje Republike Slovenije, Agencija Republike Slovenije za okolje
BOBER	Projekt Boljše Opazovanje za Boljše Ekološke Rešitve
UNESCO	Organizacija Združenih narodov za izobraževanje, znanost in kulturo (ang. The United Nations Organization for Education, Science and Culture)
POOS/ FFWS	Prognostično opozorilno odzivni sistem (ang. Flood forecasting warning and response system)
DHI	Danski hidravlični inštitut (ang. Danish Hydraulic Institute)
ECMWF	Evropski center za srednjeročne vremenske napovedi (ang. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)
ALADIN	Omejeno območje - dinamična adaptacija, mednarodno sodelovanje; (franc. Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Développement International)
ARPEGE	Raziskovalni/razvojni projekt za majhne in velike skale, ime globalnega modela Météo-France (fran. Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle)
INCA-CE	Sistem za kratkoročno napovedovanje vremena v srednji Evropi (ang. Integrated NowCasting system for the Central European area)
NAM	Model padavine-odtok (dansko: Nedbor-Afstromnings-Model)
URSZR	Uprava za zaščito in reševanje Republike Slovenije
MORS, CORS	Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije, Center za obveščanje Republike Slovenije
UN	Združeni narodi (ang. United Nations)
NWP	Numerične napovedi vremena (ang. Numerical weather prediction)
EPS	Skupinski napovedovalni sistem (ang. Ensemble prediction systems)

1 UVOD

Navdušenje in fascinacija različnih znanstvenikov nad vodo, kemično snovjo, ki je bistvena sestavina življenja, je neizmerno. Podgornik v predgovoru svoje spletne knjige H₂O (Podgornik, 2015) zapiše, da ima vodo rad. Voda navdušuje umetnike in znanstvenike. Voda ali bolje Živa voda oblikuje naš bit in naše okolje. Albert Szent-Geyorgyi (1893-1986), Nobelov nagradjenec za kemijo leta 1937, pravi: »Voda je življenjska snov in matrika, mati in medij. Brez vode ni življenja.« A voda ima pomensko in dejansko tudi temno plat. Voda se večkrat uporablja kot opredelitev iztekajočega se časa, minljivosti ali kot prihajajoča sprememba. V poglavju Voda za pesnike v knjigi H₂O (Podgornik, 2015) zapiše Podgornik takole:

»Ta skrivnost in temačen del našega občutenja vode je precej izrazit pri Leonardu da Vinciju. Menda ga je bilo vse življenje strah uničujoče vodne kataklizme in v svojih risbah in dnevnikih je z neko morbidno fascinacijo detajlno opisoval uničujoče poplave in grozljive nevihte. Leonardu se je zdelo, da ni bolj uničujoče stvari kot je reka, ki prestopi bregove in pred seboj pomete ljudi, živali, hiše, drevesa, skratka vse kar se ji zoperstavi. Najbrž je vedel, o čem govori, saj je na svoje oči videl poplavljeni reko Arno v letih 1466 in 1478. Iz teh izkušenj, in verjetno tudi iz slabo izražanih strahov, izhaja njegova obsedenost s kontrolo in regulacijo vodnih tokov. Leonardovo razumevanje vode je bilo precej paradokсно na nek način blizu podobam Andreia Tarkovskega (filmski režiser), kjer voda na nek način nastopa v dvojni vlogi: kot hranilna, povezovalna in negovalna matrika ter hkrati kot globoka, skrivnostna in uničevalska slepa sila. Takole opisuje vodo:

Voda je včasih ostra in močna, včasih kislja in včasih trpka, včasih sladka, včasih gosta in redka, včasih prinaša zlo in kugo, včasih daje zdravje, včasih strup. Trpi spremembe skozi tolikšno število svojih naravi kot je krajev, skozi katere teče. In kot se ogledalo spreminja z barvo zrcaljenega, tako se voda spreminja z naravo kraja, postaja hrupna, lenobna, zakisana, žveplena, slana, žalobna, podivjana, jezna, rdeča, rumena, zelena, črna, modra, zamaščena, debela ali suha. Včasih povzroči požar, včasih ga ugasi; topla je in hladna, odnaša in prinaša, izvotli ali pa postavi, razdere ali zgradi, napolni ali izprazni, se dviga ali pada, hiti ali pa se vleče; je lahko vzrok življenja in vzrok smrti, rasti in zatiranja, včasih hrani in včasih ne; včasih ima okus, je vznesena, in včasih lahko pogoltne cele doline v velikih poplavah. V času in skozi vodo se vse spreminja.«

Leonardovo razumevanje vodnega kroga, spoštovanje do vodne sile, do »živosti« (dinamike) vode ga je tako kot mnoge za njim vodila v smeri želji po obvladovanju le te. Princip obvladovanja vode in narave le s tehničnimi regulacijskimi ukrepi je prisoten še danes predvsem v splošnem javnem mnenju kot tudi v delih stroke in ima kot tak dolgo tradicijo tudi v naših krajih. Od objektov zgrajenih v prejšnjih stoletjih (fužine, idrijski klavži), ter pisnih virov Valvazorjeve Slave vojvodine Kranjske o kraškem svetu, smo priča vodnogospodarskemu razvoju na slovenskem. V zborniku Pogubna razigranost »110 let hudourničarstva na Slovenskem, 1884-1994« Stanislav Jesenovec lepo in pregledno prikaže razvoj hudourničarske ali vodnogospodarske oz. vodarske stroke na slovenskem (Jesenovec, 1995). Od poplav jeseni leta 1882 na Tirolskem, Koroškem in Kranjskem se je dejavnost s sprejetjem »Postava od 30. Junija 1884 glede naredb v neškodljivo odvajanje gorskih voda« pričela razvijati v širšem okviru (Jesenovec, 1995, stran 76). Ta veja vzdrževanja in nadzora nad vodami je tudi danes pomemben element urejanja kulturne krajine, zaščite infrastrukture in človeka. Vendar moramo z današnjim znanjem glede na okoljske, socialne, prostorske, funkcijske ter druge parametre dosegati večnamenskost. S tem delo na področju voda dobiva širok nabor novih nalog, s katerimi inženirske rešitve pridobivajo nove dimenzije, funkcije in pomen. Vse pogostejša ekstremna nihanja ter naša neučinkovita uporaba vodnih virov nakazuje na potrebo po ustreznem načrtovanju in upravljanju z razpoložljivimi vodnimi viri. V ta namen je za skupno dobro potrebno zagotavljati učinkovito, neprekinjeno spremljanje in analiziranje vodnega kroga, kot tudi zbiranje prostorskih podatkov, ki bodo pripomogli k čim boljšemu ovrednotenju dinamike gibanja vode v prostoru.

Če pogledamo nekaj desetletij nazaj vidimo, da je bil cilj zaščite in obvladovanja poplav le v gradnji novih objektov, kot so zadrževalniki, prelive, nasipi, akumulacije, saj so smatrali, da so to edini možni protipoplavni ukrepi. To je veljajo vse dokler ni prišlo do novih dokazov (Sugawara, 1974), ki so spodbudili drugačen način razmišljanja. Sedaj govorimo o zadrževanju »ljudi proč od vode in ne vode proč od ljudi«. S takšnim pogledom lahko tudi razumemo nov cilj v vodnogospodarskem in prostorskem načrtovanju, kjer velja načelo »vodi moramo zagotoviti prostor«, saj s poseganjem v poplavna oz. razlivna območja povečujemo našo ranljivost.

1.1 PREDMET OBRAVNAVE V MAGISTRSKEM DELU

Klasična hidrološka znanja temeljijo na analizi in izbiri privzetega tveganja, kar je osnovno delo ali »klasično« delo strokovnjakov. Z izbiro privzetega tveganja določimo projektni pretok na katerega urejamo varovanje določenih območij. Projektni pretok zagotavlja osnovo za dimenzionirane protipoplavne ukrepe (protipoplavne zaščite). Z določitvijo privzetega tveganja se zavestno odločimo,

kakšne so sprejemljive posledice v primeru prekoračitve pretoka ali nastopu višje sile. Takšen primer višje sile (ujme) smo v Sloveniji doživeli leta 1990, 1998, 2007, 2009, 2010, 2012, 2014. Različni avtorji opisujejo dogodke, ko posamezni izredni in redki dogodki presežejo projektni pretok in s tem seveda ni mogoče več pričakovati delovanja obstoječe poplavno zaščitne infrastrukture. Ob takšnih dogodkih pogosto ugotavljamo nepripravljenost prebivalstva in veliko višjo škodo ob takšnem dogodku, saj se le to zanaša na stalno delovanje vodnogospodarske infrastrukture.

Različni avtorji in strokovnjaki v svojih analizah priporočajo uporabo kombinacij različnih protipoplavnih ukrepov, tako gradbenih kot negradbenih. S spremembo razmišljanja in ovrednotenjem tudi drugih dejavnosti v prostoru, za zagotavljanje trajnostnega pristopa, okoljsko varovalnega pristopa, gospodarskega vidika in operativnega razvoja, je potrebno zahteve preostalega tveganja reševati z osredotočenjem na preprečevanje in varovanje ter ustrezni pripravljenosti.

Pri tem lahko poudarimo, da ima morda celo najpomembnejšo vlogo s področja negradbenih ukrepov sistem za napovedovanje visokih voda in opozarjanje (sistem za napovedovanje nevarnosti poplav ali hidrološki prognoistični sistem, ...), ki omogoča predvsem bistveno višjo stopnjo varovanja v primeru nastopa pogostih poplavnih dogodkov, kot tudi ob izrednih, redkih poplavnih dogodkih, ki spadajo v veliki meri v območje preostalega tveganja.

Obravnava visokovodnih ali hidroloških prognoističnih sistemov je v svojem bistvu pomembna zaradi zagotavljanja stalnega spremljanja stanja voda. Pri tem nam različni indikatorji kakovosti ali validacije delovanja omogočajo nadzor in posplošeno spremljanje napredka, kar bo osnovni predmet obravnave v magistrskem delu.

V Sloveniji se je hidrološki prognoistični sistem na Agenciji Republike Sloveniji pričel postopoma razvijati od leta 2006 dalje, velik razvoj pa se je izvedel v okviru širšega kohezijskega projekta BOBER, ko je bilo s hidrološko – hidravličnimi modeli v hidrološkem prognoističnem sistemu v začetku leta 2015 vzpostavljeno operativno delovanje za celotno ozemlje Republike Slovenije.

Dodatno lahko sistem za hidrološko napovedovanje, kar je širše od sistema za napovedovanje visokih voda, pripomore tudi pri upravljanju z vodnimi viri, kot npr: namakanju, proizvodnji električne energije ali predvidenih potrebah pri upravljanju zadrževalnikov ob visokih vodah. Uporabimo ga lahko tudi za razreševanje konfliktov med različnimi deležniki glede uporabe vode. Vendarle je temeljni cilj sistema, zaradi potencialno najvišjih stroškov in škod, opozarjanje pred škodljivim delovanjem voda.

1.2 CILJ

Oddelek za hidrološko prognozo na ARSO izdaja pristojnim službam vsakodnevna hidrološka poročila in opozorila pred izrednimi hidrološkimi pojavi. Opozorila so namenjena predvsem strokovnim službam in posredno medijem, z namenom pravočasnega opozarjanja pred izrednimi hidrološkimi pojavi, kot so poplave in suše. Le pravočasne in natančne modelske napovedi omogočajo pripravo opozoril, ter pravočasno organizacijo odziva za učinkovito zaščito prebivalstva ter materialnih dobrin na ogroženih območjih. Leta 1999 je bil v okviru standarda ISO 9001 uveden sistem kakovosti za proces hidrološke prognoze. Pri tem se za obvladovanje in načrtovanje procesa na Oddelku za hidrološke prognoze vodi indikator: »delež uspešnih opozoril v enem letu«.

Cilj naloge je razširiti metodologijo ocenjevanja hidrološke uspešnosti tudi na področje modeliranja in obstoječi indikator kakovosti napovedovanja razdeliti na uspešnost delovanja modelov in kakovost izdanih opozoril, ki so vezani na visokovodne dogodke na različnih vodnih telesih.

Pri pregledu obstoječih analiz uspešnosti opozoril je bil zastavljen cilj vsaj 80 % pravih opozoril ob predpostavki, da je večina visokovodnih primerov posledica stratiformnih vremenskih procesov. Ob predpostavki, da je večji del visokovodnih dogodkov posledica konvektivnih vremenskih procesov v labilni atmosferi (nevihte), ali vpliva objektov vodne infrastrukture na pretočnost rek, je zanesljivost opozoril manjša. Pri tem ni mogoče razlikovati tipa poplavnega oz. visokovodnega dogodka, prav tako ni določen indikator uspešnosti modeliranja.

1.3 RAZLOGI ZA OBRAVNAVO

V obdobju 1975 - 2001 se je v svetovnem merilu zgodilo 1816 večjih poplav, ki so zahtevale 175.000 življenj in so vplivale na življenje 2.2 milijarde ljudi (Jonkman, 2005). Poplave prispevajo 15 % žrtev povezanih z naravnimi katastrofami (WMO, 2011). Več kot 40 % poplav se zgodi v Aziji in zahtevajo več kot 90 % delež vseh smrtnih žrtev. Izpostavljenost poplavam je v Evropi prav tako velika, saj npr. na Madžarskem 25 % prebivalstva živi na poplavnih območjih reke Donave in njenih pritokov, več kot polovica Nizozemcev živi na območju, ki je nižje od povprečne gladine morja, v Veliki Britaniji živi 12 % prebivalstva na poplavnih območjih rek in morja (WMO, 2011), v Sloveniji je potencialnih hudourniških in dolinskih poplavnih območij 3000 km² kar je skoraj 15 % države, pri čemer na dolinske poplave odpade le 3 – 4 % (URSZR, 2016). Na izpostavljenih območjih velike poplavne nevarnosti živi okrog 7 % prebivalstva (ARSO, 2016). V zadnjih dveh desetletjih je tudi na Evropo vezanih veliko smrtnih žrtev povezanih z vsemi oblikami poplav. Velika izpostavljenost poplavam povečuje škodo in

močno vpliva na lokalno gospodarstvo. Oglejmo si le nekatere znane primere škod in izgub zavarovalnic zaradi večjih poplavnih dogodkov. V Veliki Britaniji so poletne poplave leta 2007 zahtevale 3,2 milijarde funtov škode (Chatterton, 2010). Največje zadnje poplave na Tajskem, v obdobju od julija 2011 do januarja 2012, so peta najdražja naravna katastrofa v svetovnem merilu (Robinson, 2012), kjer so izgube zavarovalniške industrije ocenjene na 15–20 milijard ameriških dolarjev, skupna ocenjena gospodarska škoda pa znaša kar 46 milijard ameriških dolarjev (Robinson, 2012). Če pogledamo Slovenijo, prav tako lahko v zadnjih letih izpostavimo več izrazitih in izstopajočih poplavnih dogodkov. Leta 2007 je v Železnikih¹ hudourniška poplava 18.9.2007 zahtevala tri življenja, zemeljski plaz je sočasno zahteval dve življenji na porečju Savinje, pri reševanju je v Cerkljah izgubil življenje gasilec. Skupna neposredna škoda naravne nesreče je bila ocenjena na preko 187 milijonov evrov brez DDV (187.034.501,37 €). V letu 2009 so Božične poplave², med 22. in 26. decembrom 2009 odnesle okrog 50 milijonov evrov brez DDV (49.155.455,7 EUR). Ocena neposredne škode poplav med 16. in 20. septembrom 2010³ je v skupni višini preseгла 275 milijonov evrov brez DDV (275.761.272,00 EUR). Na 42. seji vlade RS dne 20.12.2012 se je ministrskemu zboru ponovno predložila ocena neposredne škode zaradi poplav med 4. in 5. novembrom 2012, ki je tokrat znašala kar preko 310 milijonov brez DDV (310.908.750,01 EUR). Vlada RS je dne 28.3.2014 potrdila, da znaša končna ocena neposredne škode zaradi posledic poplav, visokega snega in žleda⁴ med 30. januarjem 2014 in 27. februarjem 2014 v Republiki Sloveniji 429.415.980,17 evrov brez DDV. Končna ocena neposredne škode zaradi posledic poplav med 12. in 16. septembrom 2014, ki jo je 13. novembra 2014 verificirala Državna komisija za ocenjevanje škode po naravnih in drugih nesrečah, znaša 153 milijonov evrov (153.895.925,71 EUR), z dvema smrtnima žrtvama na vodotoku Bolska. Le dober mesec kasneje, med 21. in 24. oktobrom se je ponovno razbesnela voda in vlada se je na 21. redni seji 5. februarja 2015 seznanila z oceno škode 50 milijonov evrov brez DDV (50.342.873,56 EUR). Na 23. redni seji vlade februarja 2015 se je vlada RS seznanila z oceno neposredne škode zaradi posledic poplav, ki so med 6. in 14. 11. 2014 prizadele območja Gorenjske, Koroške, Ljubljanske, Notranjske, Štajerske, in Zasavske regije. Škoda je znašala 20.162.930,25 evra brez DDV. Ko seštejemo neposredne škode zaradi poplav od leta 2007 do konca leta 2014, številka presega milijardo evrov, brez davka na dodano vrednost, ter izgubo 8 človeških življenj.

¹ Sklep Vlade RS št. 84400-3/2007/6 z dne 8.11.2007 in končne ocene škode na stvareh št. 84400-3/2007/10 z dne 15.11.2007

² Sklep Vlade RS 84400-1/2010/3 z dne 15.4.2010

³ Sklep vlade RS št. 84400-8/2010/3 z dne 18.11.2010

⁴ Sklep vlade RS št. 84400-3/2014/12

Različni avtorji dokazujejo ekonomsko upravičenost opozarjanja pred visokimi vodami. Tako že leta 1970 (Penning-Rowsell et. al, 1978) pričnejo v Angliji zbirati raziskovalne dokaze o učinkih izdajanja visokovodnih ali poplavnih opozoril. Učinki in delovanje sistemov za napovedovanje poplav ter opozarjanje pa se raziskuje z različnih vidikov še danes (Andryszewski, et al., 2005; Parker, 2007, Le Bihan, 2016; Vincendon, 2016). Enačbo za merjenje učinka izdanih opozoril je zasnoval Green in dodelal Parker leta 1991 (Parker, 1991), ko so jo pričeli uporabljati kot osnovo za oceno učinka koristi poplavnih opozoril na ozemlju Velike Britanije. Uporabo so vpletli tudi v Strategijo zaščite ter opozarjanja pred poplavami, ki jo je pripravila Okoljska agencija Združenega kraljestva Velike Britanije in Severne Irske v letu 2003 (Environment Agency, 2003). Zelo zanimiv je podatek o pričakovanih ekonomskih koristih glede na vložek v obdobju desetih let od 2003 do 2012, ki je enak faktorju 4,82 (Parker, 2005).

V okviru 5. in 6. raziskovalnega projekta Evropske unije so bile pogoste teme raziskav poplave, napovedovanje visokih voda, vodni krog, hidrološko napovedovanje. V nekaterih projektih bolj in v drugih manj (FLOODsite, FLOODRELIEF, ACTIF, WATCH, ...) so se raziskovalci ukvarjali tudi z oceno neposredne ter posredne škode in gospodarskih izgub zaradi poplav in posledično z vlogo ter vplivom sistemov za napovedovanje poplav. Med uspešnimi projekti je bil tudi raziskovalni projekt »European Flood Awareness System« (EFAS) (De Roo, 2003), ki se je pričel septembra 2000. Po katastrofalnih poplavah leta 2002 na Donavi in Elbi je Evropska komisija potrebovala podporo za odločanje, koordiniranje in vodenje odziva na širših poplavnih območjih, ki prizadenejo več evropskih držav. V letu 2002 se je pokazala neusklajenost delovanju s pogostimi zavajajočimi informacijami, kar je pripomoglo, da je EFAS iz projekta prešel v program, ki danes združuje informacije različnih državnih nivojev in omogoča pripravo in obveščanje na regionalni oz. evropski ravni v okviru programa Copernicus.

Glede na smrtne žrtve in velik znesek škod zaradi škodljivega delovanja visokih voda ali poplav je spremljanje stanja in predvidevanje razvoja visokih vod nujno, saj spremljanje in napovedovanje omogoča vsaj preventivno zaščitno delovanje. Odziv in delovanje zaradi napovedi visoke vode pa lahko močno pripore k zmanjšanju neposredne ogroženosti ter posledično manjšemu obsegu poplavnih škod, kot so pokazali že mnogi avtorji. Poplave ne moremo preprečevati le z lokalnimi posegi, temveč je potrebna celovita obravnava in vodenje oz. upravljanje poplavnih dogodkov na porečjih, glede na razpoložljive vire in prostorske omejitve. Vedno pogostejši in izrazitejši vremenski dogodki, pa naj bo to zaradi antropogenih vplivov, podnebne spremenljivosti ali drugih sprememb v okolju, povzročajo, da so poplavni dogodki postali obsežnejši, bolj izraziti ter bolj pogosti. V zadnjih letih se neprestano

odpirajo vprašanja odgovornosti, ustreznosti izvedenih omilitvenih ukrepov, povzročene gospodarske škode in nenazadnje učinkovitost preventivnih dejavnosti za preprečevanje smrtnih žrtev ob poplavih. Vse obravnavane zahteve povečujejo potrebo po zagotavljanju operativnosti, nadgrajevanju in izboljšanju elementov sistema za napovedovanje visokih voda ter sistemov za upravljanje s tveganji, ki lahko znatno izboljšajo odziv, če upoštevamo koncept prognostično opozorilno odzivnega sistema (Pogačnik, 2009). Učinkovitost kriznega upravljanja ob poplavih povečujejo predvsem pravočasne, kakovostne in strokovno ovrednotene informacije pridobljene iz podpornega sistema za napovedovanje oz. predvidevanje razvoja dogodkov. Le takšen pristop omogoča učinkovito načrtovanje in upravljanje aktivnosti v času poplavnih dogodkov kot tudi drugih kriznih situacij.

1.4 ZGODOVINSKI RAZVOJ VZPOSTAVITVE SISTEMA ZA NAPOVEDOVANJE

Od leta 2006 do leta 2015 smo na ARSO vzpostavljali in razvijali sistem za hidrološko napovedovanje oz. hidrološki prognostični sistem (HPS). Še danes se vsakodnevno posodablja in izboljšuje računsko jedro. Do leta 2006 Slovenija na svojem ozemlju ni imela operativnega hidrološkega sistema za napovedovanje visokih voda. Prve izkušnje z delovanjem hidrološkega prognostičnega sistema za napovedovanje so bile pridobljene v okviru Interreg AT-SLO projekta na reki Muri (Ruch, 2006), ko je bil postavljen operativni center za napovedovanje pretokov na reki Muri v Gradcu. V tem obdobju so bile oblikovane prve ideje nadaljnega razvoja sistema za napovedovanje visokih voda. Zastavljeni cilji so se pričeli uresničevati leta 2009 v okviru večjega kohezijskega projekta BOBER. Prvi test natančnosti in kakovosti modeliranja je bil še v času testnega obratovanja modela septembra 2010, ko so bile v septembru zelo natančno napovedane večje poplave. Takrat se je tudi v praksi pokazala velika vrednost in uporabnost takšnega sistema. Sistem je na porečjih reke Save in Soče operativno zaživel leta 2011. V drugem delu podprojekta med leti 2012 do 2015 je bil sistem razširjen na večino ozemlja Republike Slovenije in operativno deluje od sredine leta 2015. Sistem in modelska jedra se stalno spreminjajo in posodablajo. Večino posodobitev in izboljšav z umerjanjem se odvija v kombinaciji z razvojem merilne mreže in dostopnostjo podatkov. V prihodnje bodo posodobitve potekale v smeri izboljšanja posameznih delov sistema, pri čemer bodo najverjetneje poudarki na izboljšanju modeliranja snega, vključevanju delovanja hidroenergetskih objektov in sledenju razvojnih možnosti v smeri skupinskih napovedi.

1.5 POSLANSTVO IN NAMEN HIDROLOŠKEGA NAPOVEDOVANJA

Poslanstvo hidrološkega napovedovanja in opozarjanja je neprekinjeno delujoča služba, ki s svojim izvajanjem nalog pripomore k zmanjševanju poplavne ogroženosti. Za doseganje svojega poslanstva mora zagotoviti:

- izdajo pravočasnega opozorila službam za zaščito in reševanje ter javnosti (s čim daljšim opozorilnim časom),
- podati časovno in količinsko dovolj zanesljive napovedi,
- zagotoviti neprekinjeno delovanje službe in
- paziti na ustrezno razmerje med vloženi sredstvi za delovanje službe v primerjavi s prihranki zaradi zmanjšanja škodnega delovanja voda ob poplavih.

Razvoj hidrološke prognostične verige postavlja uporabo modeliranja v popolnoma drugačno vlogo od obstoječih uporab modelov za reševanje posameznih nalog. Povezovanje modelskih sklopov od meteoroloških, hidroloških in hidravličnih, omogoča nove poglede na obravnavo naravnega procesa, kot tudi prehajanje tehničnih znanj med posameznimi področji. V skladu s tem bo naloga prikazala pomen povezovanja vsebin, prepletanje različnih vplivov in sklopov sistema ter nakazala vpliv le teh na modelske napovedi. Tekom vsebine bodo vseskozi nakazane možnosti nadaljnjega razvoja posameznih delov, saj je vsak sistem lahko dober le toliko, kolikor je dober njegov najšibkejši del.

1.6 PREDSTAVITEV HIPOTEZE

Tradicionalno kakovost napovedi preverjamo z natančnostjo in uspešnostjo numeričnih modelov, saj je ta neodvisna od uporabnika. Kljub temu je potrebno poudariti, da imajo značilnosti potrjevanja (verifikacije) napovedi lahko močan vpliv na ocenjevanje same kvalitete. Predvsem je pomembno ustrezno predpostaviti, kaj želimo analizirati. V tem pogledu je oblikovanje metode ocenjevanja hidrološke napovedi pomembno izhodišče za vrednotenje dela in procesa.

Področje raziskovalnega dela v nalogi lahko razdelimo na dva sklopa:

- Oblikovanje metodologije za oceno kakovosti hidrološkega napovedovanja
- Analiza uspešnosti sistema na testni točki reke Sore in prikaz zanesljivosti numerične napovedi glede na osnovano metodologijo

in na tej osnovi želimo potrditi hipotezi:

- Analiza preteklih numeričnih napovedi omogoča opredelitev zaupanja v delovanje sistema za napovedovanje visokih voda.
- S podaljševanjem časovnega dosega simulacij sistema za napovedovanje upada uspešnost napovedi.

Cilj analiziranja podatkov je poiskati kazalce oz. merila, ki najbolje predstavljajo raziskovan pojav (Haber & McNabb, 1990). Razumevanje podatkov ter izbranih kazalcev je za mnoge znanstvene in inženirske izzive današnjega časa zelo pomembno. Samo s kombinacijo različnih metod lahko v celoti ali delno ovrednotimo kakovost in operativno vrednost hidroloških prognostičnih sistemov. Različne statistične analize lahko prikazujejo tako širši kot tudi lokalni pogled na del podatkov za opredelitev operativne vrednosti in kakovosti sistema za hidrološko napovedovanje.

2 TEORETIČNE PODLAGE

Na področju obravnavane teme so predvsem pomembne definicije iz Hidrološkega izrazja (Mikoš et al., 2002) in Mednarodnega hidrološkega slovarja - »International Glossary of Hydrology (WMO, 1992) :

- Napovedovanje - prognoziranje: predvidevanje gladine, pretoka, časa nastopa in trajanja poplav, zlasti pa vršnega pretoka na izbrani točki struge zaradi padavin in/ali taljenja snežne odeje.
- Hidrološka napoved: obvestilo o pričakovanih hidroloških razmerah.
- Največja verjetna visoka voda, projektna visoka voda, standardna projektna visoka voda: največji vodostaj/pretok, ki ga lahko pričakujemo ob upoštevanju vseh pomembnih krajevnih meteoroloških, hidroloških in geoloških dejavnikov.
- Največja možna visoka voda sin. maksimalni možni visokovodni vodostaj gl. tudi standardna projektna visoka voda: največja visoka voda/vodostaj, ki se lahko pričakuje ob popolnem sovpadanju vseh dejavnikov, ki bi povzročili najmočnejše padavine in omogočali največji odtok.
- Visoka voda gl. tudi poplava: najvišji vodostaj med poplavo ali izpustom vode iz zbiralnika.
- Poplava: navadno hiter dvig vodne gladine v vodotoku do najvišje točke, nakar gladina pada počasneje, kot je narasla. V angleškem prevodu »flood« pri čemer je obrazložitev izraza prevedena definicija, ki izhaja iz Mednarodnega hidrološkega slovarja (WMO, 1992).

Izrazi, ki niso definirani v hidrološkem izrazju, so oblikovani na osnovi meteorološkega izrazja (AMS, 2016) in so pomembni za nadaljnje razumevanje besedila:

- Opozorilo pred visokimi vodami - hidrološko opozorilo: je informacija, ki opredeljuje pričakovan hidrološki dogodek kot nevaren.
- Pravočasnost - je časovno obdobje, potrebno za organiziranje kakovostnega odziva pred prihajajočo poplavno nevarnostjo, ki je odvisen od potreb prebivalstva na poplavno nevarnih območjih. Tako je lahko ob večjih rekah to nekaj dni ali pa le nekaj ur. Glede na hidrološke značilnosti slovenskih vodotokov je pričakovana pravočasnost od ene ure pa tja do dneva pred poplavo (škodljivi visokovodni dogodek).
- Opozorilni čas - »ang. Lead Time« - je čas napovedanega (izračunanega) dogodka pred dejanskim nastopom dogodka. Ko se opozorilni čas skrajšuje, se zanesljivost in verodostojnost izračunane informacije izboljšuje. Opozorilni čas je zato tehnični element sistema in je popolnoma odvisen od lastnosti porečja in numeričnih značilnosti samega hidrološko-hidravličnega modela, zato morajo biti kriteriji uporabe opozorilnega časa zelo prilagodljivi.

- Časovni doseg simulacije – je zaporedje izračunanih dogodkov v sosledju za v naprej določeno obdobje.
- Opozorilne vrednosti - predstavljajo vrednosti, ob katerih nastopijo dejanske poplavne razmere različnih jakosti in obsega.

Najpogosteje uporabljena termina v tuji literaturi »flood forecasting« ali »hydrological forecasting« ali nemški izvirnik: »Hochwasservorhersage« se pomensko v slovenskem neposrednem prevodu, kar precej razlikujeta. Angleška termina lahko prevedemo kot napoved visokih voda, ki poplavlja in hidrološko napovedovanje. Beseda »poplava« je najpogosteje uporabljena v povezavi s škodo oz. z ogroženostjo prostora zaradi nastopa poplave ali visoke vode. Ogroženost nastopi zaradi nevarnosti za nastanek poplav in ranljivosti, katera opredeljuje višina škode na obstoječih človeških dejavnostih v prostoru. Tako ni najbolj primeren prevod napovedovanje poplav, saj takšna uporaba zahteva več od samo predvidevanja gladine vode, pretoka in časa nastopa na določeni točki, potrebno je namreč ovrednotiti tudi stopnjo ogroženosti, kar pogosto presega tehnične in strokovne zmožnosti operativnih oddelkov za hidrološko napovedovanje. Ko govorimo o hidrološkem napovedovanju, smo pomensko bližje namenu. Hidrologija je znanost, ki se ukvarja s procesi izrabe in obnavljanja vodnih virov na kopnem ter obravnava različne elemente hidrološkega kroga (Mikoš, 2002), s čimer je osnovni problem morda preširok, a kljub temu ustrezen. Najbližje namenu vzpostavitve in delovanja sistema napovedovanja na področju voda je prevod nemškega izraza »napovedovanje visokih voda«. Pomensko zajamemo s tem temeljni cilj delovanja, kar je zagotoviti vedenje o nastopu visoke vode. Dejstvo je, da vsaka visoka voda ne povzroči poplave – niti ne na vseh odsekih vodotoka. V kolikor vemo, kdaj pretok presega npr. projektni pretok obstoječe naravne struge, vodnogospodarskega objekta, mlinščice, kanala ali, ko poznamo vpliv razlivanja na nekem območju, pa lahko uporabimo tudi termin »sistem za napovedovanje poplav«. Ker je vzpostavljen sistem, ki omogoča obe funkciji, bomo v nalogi uporabljali oba izraza. Ker pa sistema za napovedovanje visoke vode ne moremo ločiti od opozarjanja in posledično področja upravljanja z vodami (upravljanje vodne infrastrukture), ga lahko opredelimo tudi kot hidrološki prognostični sistem.

Vodne ujme so naravni pojavi in kot taki del narave. Škoda, ki jo povzročajo, pa je antropogeno pogojena. Ker so temeljna načela varstva pred naravnimi ujmami preventiva, so sistemi za napovedovanje visokih voda pomemben element razvitega pasivnega ali preventivnega varstva pred naravnimi nesrečami, ki pa ni edini in je toliko učinkovit, kot so razviti tudi drugi elementi varstva in zaščite pred naravnimi nesrečami. Predvsem je to pogojeno s pripravljenimi študijami in izdelanimi načrti (Kozelj, 2008; Steinman, 2007), kot so:

- Načrti o nevarnosti in ogroženosti prostora (ranljivost in nevarnost) in

- načrti zaščite in reševanja.

Pojasniti moramo še povezavo ali pa razliko med napovedovanjem visoke vode ter standardno projektno visoko vodo ali največjo možno visoko vodo. Napovedovanje visokih voda je predvidevanje stanja v realnem trenutnem času za pričakovan hidrološki dogodek, kar je v svojem bistvu precej drugače od predpostavljenega oz. verjetnega hidrološkega dogodka, pri katerem predpostavimo oziroma ustvarimo podatke. Oba načina dela potrebujeata zgodovinske podatke (časovne vrste) in z veliko verjetnostjo bomo v obeh primerih uporabili enake metode ali modele. Kljub morebitno ekvivalentnemu hidrološkemu jedru pa sistem za napovedovanje visokih voda združuje širše vsebine in več tehničnih področij. Operativni sistem deluje le z urejeno in vzdrževano hidrološko mrežo vodomernih postaj, nadzorovanimi telekomunikacijskimi povezavami, vzpostavljenim daljinskim zaznavanjem, delujočimi modeli za kratkoročno in srednjeročno napovedovanje vremena, informacijsko infrastrukturo ter drugimi elementi, ki omogočajo življenje in delovanje sistema, pri čemer lahko projektno poplavo ali projektno visoko vodo določimo oz. predvidimo tudi brez vseh teh podpornih sistemov.

Oblikovanje neke standardne projektne visoke vode se razlikuje od napovedovanja že v sami hipotezi. Uporabljena analitična orodja ali boljše modeli za obe področji so enakovredni, pa vendar je pogled na rezultat laične in strokovne javnosti na rezultat različen. Inženirju vodarju nihče ne bo očital, da je ob upoštevanju vseh znanih meteoroloških in hidroloških dejstev, njegov izračun visoke vode nepravilen, saj je izračun vedno obremenjen z nezanesljivostjo in se predvideva, da se naj bi zgodil z neko verjetnostjo dogodka. Za hidrologa (vodoslovca) prognostika pa se v nasprotnem primeru tako s strani javnosti kot strokovnjakov pričakuje »točen« rezultat, pri čemer se pri napovedovanju soočamo s podobno ali širšo obliko negotovosti rezultatov.

Od prerokov v antičnih časih do današnjih jasnovidcev s steklenimi krogli, obstaja v človeku želja po poznavanju svoje prihodnosti. In prav napovedovanje poplav je ena od karakterističnih človeških potreb po napovedi dogodkov (Sherman, 1939). Kljub temu pa je napovedovanje visokih voda (poplav) igra negotovosti, kjer je cilj igre modeliranja določitev dejanskega stanja tako negotova kot je negotova sama napoved (Klemes, 1982).

2.1 KLASIFIKACIJA HIDROLOŠKIH NAPOVEDI IN TIPOV POPLAV

Že naslov klasifikacija hidroloških napovedi opredeljuje široko paleto možnosti. Tako danes kot leta 1939 so bili uporabniki ključni za hidrološko napovedovanje (preglednica 1) (Barnard, 1939), pri čemer se je v preteklosti to odražalo tudi v klasifikaciji. Tako se je klasifikacija oblikovala glede na tip

poplavnega dogodka in definirano odliko odziva, kar je nekoliko drugače od današnje klasifikacije, v kateri se osredotočamo predvsem na tip dogodka, namen napovedi in časovni razpon.

Hidrološko napovedovanje lahko tudi danes še vedno opredelimo glede na tri neodvisne spremenljivke, ki jih je definiral Nemeč s sodelavci (1986), glede na temelje in razvoj meteorološkega napovedovanja (Nemeč et al., 1986). To so:

- spremenljivka,
- potrebe in
- časovni doseg simulacije.

Glede na to kaj napovedujemo lahko definiramo najprej napovedovano spremenljivko (Nemeč et al., 1986):

- vodostaj (reke, jezera in gladina/vodostaj v zadrževalniku),
- pretok, volumen in kakovost vode ter
- kopičenje ledu in porušitve naravnih ledenih jezov.

Glede na potrebe ločimo (Nemeč et al., 1986):

- Napoved poplav ali visoke vode: vključuje hudourniške poplave, porušitve pregrad ali jezov, urbane poplave, kombinacije poplavljanja zaradi morja in reke v zalivih ali deltah.
- Napovedi vodnih zalog ali količin za različne časovne periode (dnevne, tedenske, mesečne, sezonske ali letne ter v današnjem času več letne ter klimatske), vključno z napovedmi, potrebnimi za namakanje in proizvodnjo električne energije.
- Napovedi za plovbo na rekah.
- Napovedi za kmetijstvo (predvsem vodostaj zaradi potreb po načrtovanju setve, žetja ali drugih morebitnih potreb, ter klimatskih sprememb kot posledice segrevanja ozračja).

Preglednica 1: Klasifikacija napovedovanja poplav (Bernard, 1939).

Table 1: Clasification of Flood forecasting from Bernard in 1939.

<i>Razred dogodka</i>	<i>Namen</i>	<i>Osnovno vodilo</i>	<i>Parametri, s katerimi opredelimo napoved</i>	<i>Ključni podatki</i>	<i>Uporabljeni postopki</i>
Ekstremna /največja poplava	Za določitev meje potrebnih zmogljivosti za obvladovanje poplav	Socialna korist	Čas trajanja, Velikost	Vsi razpoložljivi meteorološki in hidrološki podatki za območje nastopa dogodka	Analitični, Sintetični

Pričakovana / verjetna poplava	Za ovrednotenje še sprejemljivih odstopanj pri uporabi potrebnih zmogljivosti za obvladovanje pričakovane / verjetne poplave	Gospodarska korist	Frekvenca, Trajanje, Velikost	Vsi razpoložljivi meteorološki in hidrološki podatki za območje nastopa dogodka	Analitični, Statistični
Individualna poplava	Za preprečitev izgube življenj in zmanjšanje škode na nepremičnem premoženju	Socialna, Gospodarska korist	Velikost, Čas trajanja Pričakovan čas nastopa dogodka	Trenutni meteorološki in hidrološki podatki (zbrani v najkrajšem možnem času)	Analitični

Glede na časovni doseg simulacije pa poznamo (Nemec et al., 1986):

- Zelo kratkoročne hidrološke napovedi - so napovedi od trenutnega stanja do 24 ur v prihodnost od časa modelske simulacije.
- Kratkoročne hidrološke napovedi – so napovedi od 24 ur do 3 dni v prihodnost od časa simulacije.
- Srednjeročne hidrološke napovedi – so napovedi od 3 do 10 dni v prihodnost od časa simulacije.
- Dolgoročne hidrološke napovedi - so napovedi od 10 dni v prihodnost od časa simulacije.
- Sezonske hidrološke napovedi – so napovedi, ki obravnavajo predvideno stanje za nekaj mesecev v prihodnost.
- Podnebne ali klimatske napovedi hidroloških kazalnikov (indeksov).

Vsekakor je zgornja klasifikacija napovedi široka in zelo pogosto lahko hidrološko napovedovanje opredelimo le s štirimi kategorijami, kjer za Slovenijo veljajo le tri, saj smo povirna država in se glede na klimatske razmere še ne pojavljajo težave s tvorjenjem večjih gmot ledu na rekah. To so:

- Napovedovanje poplav.
- Srednjeročne in dolgoročne napovedi vodnih zalog oz. količin.
- Napovedi tvorjenja ledu na rekah in formiranje ledenih jezov oz. blokad ter njihova porušitev.
- Napovedi kvalitete vode (povezano s količinskim stanjem).

Kljub opredelitvi tipov poplav je najpomembnejši element izdelane napovedi opozorilni čas, ki definira čas med izdajo napovedi o hidrološkem dogodku ter časom dejanskega nastopa. Opredeljena klasifikacija posega na področja, ki jih v tem raziskovalnem delu ne bomo obravnavali, vendar so pomembna zaradi celovite predstavitve obravnavanega področja in oblikovanja metodologije ocenjevanja kakovosti in operativnosti.

Poleg klasifikacije napovedovanja in opredelitve definicije izraza poplava, ki se uporablja v povezavi s številnimi drugimi izrazi, je potrebno nekoliko bolje razložiti še različne tipe poplav. Poplave v Sloveniji nastanejo največkrat zaradi naravnih vzrokov. Gams (1973) je poplavna območja oziroma poplave razčlenil glede na značilnosti gradiva, ki ga vodni tokovi prenašajo s sabo, saj naj bi bila to prvina, »... ki največ pove o kompleksnem značaju poplavišča...«. Poplave je razvrstil na štiri tipe in sicer napoplave:

- prodonosnih rek (z izrazito hudourniškimi značilnostmi);
- rek s prodonosnimi in neprodonosnimi pritoki (nižinske poplave manjšega obsega);
- neprodonosnih rek izven krasa (obsežne nižinske poplave);
- neprodonosnih rek na krasu (poplave na kraških poljih).

Brilly s sodelavci (Brilly, 1999) opredeljuje naslednje tipe poplav, ki se pojavljajo v Sloveniji:

- porušitveni valovi ob poružitvi pregrad (antropogeni vir),
- obalne (morske) poplave,
- hudourniške poplave,
- kraške poplave,
- obrežne (jezerske) poplave in
- rečne nižinske poplave.

Na podlagi glavnih značilnosti poplav in območij pojavljanja v Sloveniji Natek (Natek, 2005) opredeljuje pet vrst poplav naravnega izvora:

- hudourniške;
- nižinske;
- razlivanja na kraških poljih;
- morske in
- mestne poplave.

Priročnik za napovedovanje poplav in opozarjanje Svetovne meteorološke organizacija (WMO, 2011) poleg teh poplav opredeljuje še:

- sezonske poplave (reka Nil, monsunska podnebje),
- poplave zaradi taljenja snega,
- poružitve naravnih jezov zaradi kopičenja plavja ali ledu,
- poplave ob deltah oz. ustjih večjih rek.

Vendar so to tipi poplav, ki v našem podnebjju niso pričakovane. Nekoliko podrobneje je potrebno definirati tipe poplav, s katerimi se v Slovenji srečujemo in ki jih bomo uporabili pri oblikovanju metodologije indikatorjev kakovosti pri napovedovanju.

Hudourniška poplava – hudourniška poplava je največkrat povezana s konvektivnimi padavinami z veliko intenziteto nad majhnim območjem in velikim naklonom površja. Tako so najbolj pogosto podvržena območja temu tipu poplav gorska območja s pogostimi nevihtami. Hudourniška poplava ima največkrat tudi največjo rušilno moč (FLOODsite, 2016). Velika količina energije, ki jo voda dobi v strmih pobočjih, odnaša hiše, mostove, ceste, brežine. Hudourniške poplave se pojavijo tudi v izrazito sušnih območjih, kjer se voda po dolgi suši ne vpija v tla, pač pa površinsko odteče.

Rečne ali nižinske poplave - Nižinske poplave se v Sloveniji pojavijo v spodnjem toku večjih rek. Nastanejo zaradi razlike v količini in hitrosti dotekajočih visokih vod ter odvodne zmogljivosti rečnih strug ali ko je presežen standardni projektni pretok in voda prelije nasipe. Takrat se voda razlije po poplavni površini. Ta tip poplav se pojavlja ob Sotli, spodnjem toku Save, Dravinji in Krki (Komac et al., 2008; Natek, 2005).

Poplave na kraških poljih - Poplave na kraških poljih nastanejo zaradi dveh razlogov. Ker voda ne more dovolj hitro ponikniti v podzemlje ali ker se nivo gladine podzemne vode dvigne nad površje, saj je zmogljivost odtočnih kanalov v podzemlju premajhna. Ti tipi se pogosto pojavljajo na območjih: Grosupeljsko - Radensko polje, Ribniško - Kočevsko polje, Planinsko polje, Cerknjsko polje, Dobropolje in Loško polje. Po Šifrerju (Šifrerju, 1983) prištevamo k temu tudi poplave Ljubljani (Natek, 2005).

Morske poplave - Morske poplave nastanejo pri nas zaradi kombinacije naslednjih dejavnikov: visoke astronomske plime, nizkega zračnega pritiska, južnega ali jugozahodnega vetra na območju Jadrana ter lastnega nihanja Jadranskega morja. Pri nas se to pojavlja zlasti v Piranu, Kopru ter občasno na območju sečoveljskih solin (Komac et al., 2008).

Mestne poplave - Mestne poplave se pojavljajo v mestih zaradi načrtovanja odvodne infrastrukture, kjer se načrtno odloča o projektnem odtoku. Ti tipi poplav se pojavijo ob lokalnih neurjih oz. nalivih, ko v kratkem času pade velika količina padavin. Povečini ta voda zaradi hitrega odtekanja iz utrjenih

površin v kanalizacijski in meteorni sistem poplavi, saj so odvodni (kanalizacijski) sistemi dimenzionirani na Q_2 in Q_5 in večjih padavin enostavno ne zmorejo odvajati.

Obrežne (jezerske) poplave – jezero lahko opredelimo kot vodno telo na zemeljskem površju, s površino nad 10 000 m², ki ima enakomerno višino vodne gladine in majhen dotok glede na skupno prostornino vode. Pri tem jezero nima neposredne povezave z morjem. Jezero poplavi, ko je odvod vode premajhen glede na dotoke (Remec Rekar et al., 2003). Takrat vodostaj močnejše naraste in voda zalije obrežje ter okolico. Največje težave se pojavijo na jezerih, kjer je zemeljsko površje oblikovano kot »zaprti bazen«, pri čemer so takšna jezera nagnjena k potencialno katastrofalnim poplavam, če se njihov nivo vode dvigne previsoko. Zadnji zelo slikovit primer poplave jezera se je zgodil v Sloveniji ob Bohinjskem jezeru na Božič leta 2009.

Umetne (antropogene) poplave in/ali porušitveni poplavni val – Poleg naravnih zakonitosti prihodnjih poplav je potrebno upoštevati tudi učinkovitost obstoječe grajene protipoplavne obrambne vodne infrastrukture ter vključenost le-te v naš življenjski prostor. Umetne poplave nastanejo zaradi človeških dejavnosti in pogosto vključujejo porušitve, napačno upravljanje, lahko tudi poddimenzioniranost vodnogospodarske infrastrukture (nasipi, zadrževalniki, rezervoarji, jezovi). Med porušitvene valove štejemo tudi naravno tvorjene valove, ki se lahko pojavijo zaradi zdrsa plazov v vodotok, plavja ali ledu in imajo enak učinek kot porušitve umetnih jezov ali nasipov. Tako lahko umetne oz. tehnične poplave povečajo naravni poplavni val ali pa so celo izvor poplave neodvisno od vremenskih pogojev. Kot umetno povečanje naravnega poplavnega vala lahko štejemo tudi delovanje verige hidroelektrarn na reki Dravi v Avstriji novembra 2012⁵.

2.2 VERIFIKACIJSKE ANALIZE HIDROLOŠKIH NAPOVEDI

Ocenjevanje modela je postopek, v katerem primerjamo numerični izračun (napoved) modela z izmerjenimi podatki. Postopek potrditve ali validacije nam omogoča potrditev zanesljivosti modela. Uporabljeni podatki za postopek ocenjevanja ali verifikacijo morajo biti drugačni od tistih, ki so bili uporabljeni za umerjanje modela.

Za ocenjevanje hidroloških numeričnih napovedi obstaja veliko število metod in pristopov. V nadaljevanju so predstavljene tiste, ki so z vidika ocenjevanja hidrološke službe Slovenije primerni

⁵ Zaključki delovne skupine – Meddržavne komisije za obravnavo poplavnega dogodka na reki Dravi novembra 2012 z dne 19. september 2013, Celovec

kazalci za mednarodno primerljivost z vidika kakovosti, zanesljivosti in natančnosti. Že leta 1987 sta avtorja Murphy in Winkler v okviru Svetovne meteorološke organizacije (WMO) pripravila vodila za verifikacijo meteoroloških napovedi. V preteklih desetih letih se je področje hidrološkega napovedovanja pričelo hitro razvijati in slediti možnostim ter razvoju numeričnega meteorološkega napovedovanja ter s tem povezane verifikacije hidroloških numeričnih napovedi. Različni finačni programi, kot so COMET »The Cooperative Program for Operational Meteorology« (COMET, 2015), COST-731 (Zappa, 2010) ali Program verifikacije napovedi⁶, osnovan s strani Svetovne meteorološke organizacije, podajajo na osnovi Murphy-a kakovostne podlage za izbiro verifikacijskih kazalnikov. Na njihovi podlagi lahko za naše potrebe verifikacijske metode razdelimo v tri osnovne skupine:

- vizualna presoja,
- metode zvezne verifikacije in
- metode binomske verifikacije.

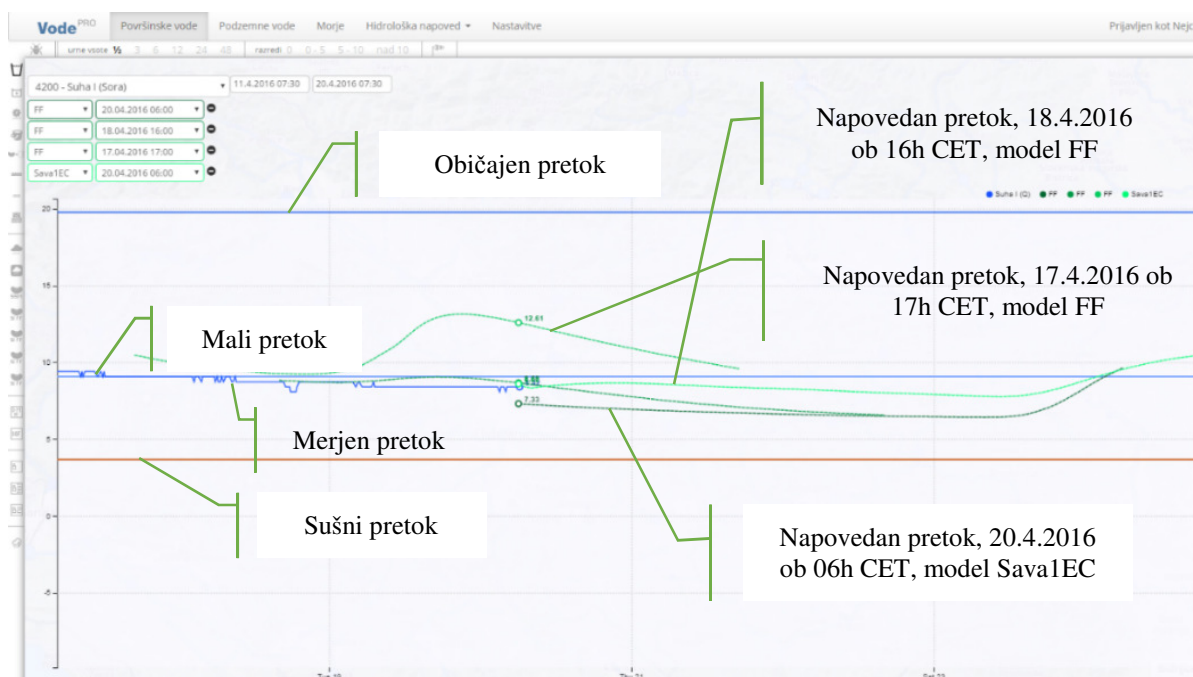
V svojem bistvu lahko rečemo, da je verificiranje ugotavljanje pravilnosti oz. ustreznosti nečesa glede na dejstva stvarnosti. Podatke in napovedi lahko preverjamo oziroma preizkušamo na različne načine in ob tem ovrednotimo pomen rezultatov.

2.2.1 VIZUALNA PRESOJA

Najstarejša in še vedno ena izmed najboljših metod preverjanja je dobra vizualna presoja strokovnjaka - "ocena na palec" pri čemer primerjamo izdelano napoved in meritve (slika 1). Med pravimi in napačnimi napovedmi ločimo torej na podlagi človeške sodbe. Najpogosteje predstavljamo rezultate z uporabo časovne serije in prostorsko porazdelitev v obliki zemljevidov. Metoda vizualne presoje je lahko zadovoljiva, če je na razpolago le nekaj napovedi in veliko časa, pa nas ne zanima kvantitativno preverjanje.

Tudi ko nas zanimajo statistični kazalniki je priporočljivo, da se vsaj na preprosti način oceni kakovost uporabljenih podatkov. Težava vizualne ocene je v subjektivnosti in pristranskosti razlage ocenjenih podatkov. Za dolgoročno primerjavo je potrebno pridobiti kvantitativne rezultate, ki nam do neke mere omogočajo nepristransko ocenjevanje.

⁶ WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research



Slika 1: Vizualizacija različnih napovedi in meritev v sistemu VodePro, 20.4.2016, ARSO.
Figure 1: Visualization of the various forecasts and measurements in the system VodePro, 04.20.2016, ARSO.

2.2.2 METODE ZVEZNE VERIFIKACIJE

Najbolj običajni kazalniki za ocenjevanje odstopanja napovedi od meritve so mediana, aritmetična sredina ali povprečje, srednja absolutna napaka in povprečna napaka (Stanski et al., 1989). Ob tem nas pogosto zanimajo še največja odstopanja, kot so največja absolutna napaka, ter največje negativno in pozitivno odstopanje/odklon.

Mediana (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$\check{Q} = Q_{\frac{N+1}{2}} \text{ če je } N \text{ liho število} \quad (1)$$

$$\check{Q} = \frac{(Q_{N/2} + Q_{\frac{N}{2}+1})}{2} \text{ če je } N \text{ sodo število} \quad (2)$$

kjer so:

\check{Q} – mediana pretoka [m^3/s],

Q – pretok [m^3/s],

N – število izmerjenih/napovedanih vrednosti.

Povprečje ali aritmetična sredina populacije (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (3)$$

Kjer so:

\bar{Q} – povprečje (mean) pretoka [m^3/s],

Q_i – pretok [m^3/s],

N – število izmerjenih/napovedanih vrednosti.

Srednja absolutna napaka (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$MAE = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=0}^N |F_i - Q_i| \right] \quad (4)$$

Največji negativni odklon / napaka (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$\min E = \min(F_i - Q_i) \quad (5)$$

Največji pozitivni odklon / napaka:

$$\max E = \max(F_i - Q_i) \quad (6)$$

Največja absolutna napaka (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$AME = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=0}^N |F_i - Q_i| \right] \quad (7)$$

Povprečna napaka ali tudi sistemska napaka (ang. BIAS) (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$BIAS = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=0}^N (F_i - Q_i) \right] \quad (8)$$

kjer so:

F_i – napovedan pretok [m^3/s] za določen časovni doseg simulacije,

Q_i – izmerjen pretok [m^3/s],

N – število izmerjenih / napovedanih vrednosti ali parov obravnave,

MAE – srednja absolutna napaka,

AME – največja absolutna napaka,

maxE – največji pozitivni odklon,

minE – najmanjši negativni odklon,

BIAS – povprečna napaka / sistemska napaka.

Za hidrologijo je zelo primerna uporaba tudi vodno-bilančnih statističnih kazalnikov, ki opredeljujejo razmerje med napovedanim in izmerjenimi količinami. S tem parametrom kakovostno opredelimo delovanje modela tekom daljšega obdobja. Pri tem lahko uporabimo:

Vodna bilanca v obravnavanem nizu (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$BIAS_v = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (9)$$

Območje rezultatov: 0 do ∞ ; Odličen rezultat: 1.

Kazalnik razmerja volumnov je preprosta oblika beleženja vodno-bilančne uspešnosti, vendar je lahko zavajajoča pri napovedovanju poplav, saj dobro odraža delovanje v območju pogostejših pretokov. V kolikor želimo opredeliti delež volumske napake v času lahko uporabimo tudi naslednji kazalnik (COMET, 2015):

$$PERC_{VOLUME} = 100 * \frac{\sum_{i=2}^N (F_i - F_{i-1})}{\sum_{i=2}^N (O_i - O_{i-1})} \quad (10)$$

ali volumsko učinkovitost (Criss in Winston, 2008).

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - Q_i)}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \quad (11)$$

kjer so:

$BIAS_v$ – razmerje med vsotama volumnov,

$PERC_{VOLUME}$ – delež napake v količini vode [%],

VE – delež pravilno napovedane količine vode.

Območje rezultatov: 0 do 1; Odličen rezultat: 1

Kazalnik predstavlja pravilno napovedan delež vode ob pravem času (Criss in Winston, 2008). Prostorninski izkoristek se uporabi pri interpretaciji učinkovitosti v izogib težavam, ki so povezane z učinkovitostjo parametra Nash-Sutcliffe. Območje rezultatov sega od 0 do 1 in predstavlja ustrezen delež vode ob pravem času.

Uporabimo lahko tudi naslednja merila: standardna deviacija, varianca, kvadratni koren povprečne kvadratne napake (ang. *root mean square error* ali RMSE), koeficient korelacije (r), determinacijski koeficient (R^2), ter merili učinkovitosti po Nash-Sutcliffu (Nash et al., 1970) ali Kling-Gupti (Gupta et al., 2009).

Standardna deviacija in varianca (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}{N}} = \sigma^2 \quad (12)$$

kjer so:

σ_Q - standardni odklon (pretoka, napovedi),

σ^2 – varianca,

Q_i – izmerjen pretok [m^3/s],

N – število izmerjenih/napovedanih vrednosti ali parov obravnave,

\bar{Q} – povprečje (mean) pretoka [m^3/s].

Korelacija je opis moči povezave med dvema numeričnima spremenljivkama, ki pokaže tudi usmerjenost povezave v razsevnem grafikonu (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}) (F_i - \bar{F})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2}} \quad (13)$$

Območje rezultatov je med: -1 in 1, na nepovezanost (neodvisnost) spremenljivk kaže vrednost 0. Z nekoliko bolj matematičnim opisom lahko korelacijo definiramo kot razmerje med kovarianco in standardnima odklonoma obeh spremenljivk.

kjer so:

Q_i – izmerjen pretok [m^3/s],

N – število izmerjenih/napovedanih vrednosti ali parov obravnave,

\bar{Q} – povprečje (mean) pretoka [m^3/s],

F_i – napovedan pretok [m^3/s],

\bar{F} – povprečje (mean) napovedanega pretoka [m^3/s],

R^2 – koeficient determinacije

r – koeficient korelacije.

Koeficient determinacije (Stanski et al., 1989; Jolliffe et al., 2003):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}) (F_i - \bar{F})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2}} \right]^2 \quad (14)$$

Območje rezultatov: 0 do 1 ; Odličen rezultat: 1

Determinacijski koeficient je enak kvadratu korelacijskega koeficienta. Pokaže, kolikšen del napovedi pretoka je pojasnjen z linearno zvezo med napovedjo pretoka (odvisno spremenljivko) in (neodvisno spremenljivko) izmerjeno vrednostjo. Sicer drugače meri moč povezave, a ničesar o smeri povezave. Za smer povezave potrebujemo korelacijski koeficient.

S pomočjo korelacije in determinacije iščemo povezavo, a pogosto dopolnjujemo interpretacijo povezave s hidrološkimi merili, kot sta najpogosteje uporabljeno kazalnik Nash-Sutcliffe (NSE) in modernejši Kling-Gupta (KGE) (Schaeffli et al, 2007).

Kot navajata Schaeffli in Gupta (2007) je NSE normaliziran ukrep ($-\infty$ do 1), ki primerja povprečne kvadratne napake simulacije z varianco ciljne/opazovane serije podatkov. Pri tem predstavlja razmerje med povprečno "velikostjo" (variabilnostjo) modelnih ostankov (napovedi) v odvisnosti od "velikosti" (variabilnosti) ciljnega niza/serije podatkov (merjen pretok). To pomeni, da NSE vrednost enaka 1 označuje popolno uspešen model, tj. model popolnoma simulira ciljni izhod, in nasprotno, NSE vrednost enaka 0 označuje, da je model, v povprečju le toliko dober kot, če bi izbrali za napoved povprečno ciljno vrednost. V kolikor je vrednost NSE < 0 lahko rečemo, da je izbira modela popolnoma vprašljiva. NSE ne meri kakovosti modela v absolutnem smislu. Uporaba srednje opazovane vrednosti kot reference lahko zelo slabo vpliva na zmožnost napovedovanja pri modeliranju/analiziranju sezonskih časovnih vrst (Moriasi, 2007). Obenem je relativno dober pokazatelj pri časovnih vrstah, kadar so nihanja okoli relativno konstantne povprečne vrednosti. Za ustrezno primerjavo med simulacijami različnih modelov je še posebej pomembno, če primerjamo uspešnost modela preko različnih hidroloških režimov. Za primere hidroloških študij je težko, če ne nemogoče, najti splošno in široko uporaben model za kazalnik natančnosti (učinkovitosti). Je pa mogoče vsaj določiti modele ali merila, saj so poznane omejitve zmogljivosti in se jih kot take lahko interpretira v danem kontekstu. Zelo pogosto uporabljen kriterij Nash-Sutcliffe (Nash, 1970) je zapisan v spodnji enačbi:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - F_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \right] \quad (15)$$

$$= 1 - \frac{MSE}{\sigma_o^2}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - F_i)^2 \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (17)$$

kjer so:

Q_i – izmerjen pretok [m^3/s],

N – število izmerjenih/napovedanih vrednosti ali parov obravnave,

\bar{Q} – povprečje (ang. »mean«) opazovanega pretoka [m^3/s],

F_i – napovedan pretok [m^3/s],

MSE – kvadrat povprečne napake (ang. mean-square error),

RMSE – kvadratni koren povprečne kvadratne napake,

σ_o - standardni odklon (opazovanega) pretoka.

Kot prej omenjeno je NSE popularen in pogost kriterij za prikazovanje uspešnosti modela, vendar v stroki že dlje časa poteka živahna razprava o njegovi primernosti. Veliko avtorjev je predlagalo spremembe ali dopolnitve. Gupta et al. (2009) povzema razpravo in se opredeljuje do razlogov kdaj in zakaj NSE ni najprimernejš kazalnik kakovosti modela. V primerih z veliko sezonsko variabilnostjo ali v primeru taljenja snega je kazalnik NSE potrebno upoštevati z veliko mero previdnosti. Pogosto v primeru močnega vpliva snega na hidrološki režim avtorji predlagajo zamenjavo povprečja opazovanih vrednosti s klimatskim povprečjem kot osnovo za uporabo kriterija NSE. V sedanjem času je že splošno sprejeto, da je umerjanje hidrološkega modela več ciljna in večdelna oblika reševanja problema. Ko uporabljamo večdelne kriterije za umerjanje in ocenjevanje, Gupta et al., (2009) predlagajo uporabo nekoliko spremenjenega pristopa umerjanja modelov. Predlagajo kazalnik KGE (*ang. Kling – Gupta efficiency*), ki z uporabo več komponent omogoča nekoliko boljši vpogled v strukturo modela ter upošteva vpliv uporabljenih podatkov. Zakonitosti merila so podane v naslednjih enačbah:

$$KGE = 1 - ED \quad (18)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_F}{\sigma_Q} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\bar{F}}{\bar{Q}} \quad (21)$$

kjer so:

r – korelacijsko koeficient,

\bar{Q} – povprečje (mean) opazovanega pretoka [m^3/s],

\bar{F} – povprečje (mean) napovedanega / simuliranega pretoka [m^3/s],

α – razmerje standardne deviacije med simulacijo in opazovanji,

β – razmerje med povprečnimi vrednostmi simulacije in opazovanji,

σ_F - standardna deviacija simuliranih / napovedanih vrednosti,

σ_Q - standardna deviacija opazovanih ali izmerjenih vrednosti,

KGE – kazalnik Kling – Gupta,

ED - Evklidska razdalja od idealne točke.

2.2.3 BINARNA VERIFIKACIJA

Veliko lažje lahko ocenjujemo kakovost napovedi z binarno verifikacijo v kontingenčni tabeli (Stephenson, 2000; Wilks, 1995). Binarna napoved pravi, "da, se je (bo) dogodek zgodil", ali "ne, dogodek se ni (ne bo) zgodil." Napoved dežja ali megle so tipični primeri »da« in »ne« napovedi. Za hidrološko napovedovanje lahko določimo prag, kjer lahko ločimo »da« in »ne« napoved, na primer, ali bo presežen pretok na reki Ljubljanici, v.p. Moste 145 m³/s. Takrat se namreč voda iz reke Ljubljanice prične razlivati na Ljubljansko barje. V tem primeru lahko uporabimo kontingenčno (binarno) verifikacijsko preglednico (preglednica 2). V tej metodi lahko spremenljivki pripišemo dve vrednosti (1 ali 0). Kot dogodek opredelimo vrednost, ki preseže v naprej določeno mejo, sicer dogodka ni. Kontingenčna preglednica za enostavni primer ima dimenzijo 2 x 2. Polja v njej lahko opredelimo kot (povzeto po Stephenson, 2000):

- a - zadetek (ang. hit) napovedan – dogodek je napovedan in hkrati opažen,
- b - napačna napoved (ang. false alarm) – dogodek je napovedan, a ni opažen,
- c - nenapovedan (ang. false) – dogodek ni napovedan in je hkrati opažen,
- d - pravilna negacija (ang. correct negative) – napoved, da dogodka ne bo in ni opažen, ali dogodka nismo napovedali, niti opazili,
- n - skupno število primerjav.

Preglednica 2: Prikaz enostavne enodimenzijske bivariantne (kontingenčne) preglednice.

Table 2: A simple one dimensional contingency table.

napoved / meritev	Da	ne	
Da	Zadetek – a	Napačna napoved - b	
Ne	Nenapovedano - c	Pravilna negacija - d	
			n

Bivariantno (kontingenčno) preglednico lahko uporabimo za številne različne kazalnike, ki opredeljujejo uspešnosti (ang. *skill scores*) našega napovedovalnega sistema. Kazalniki so sestavljeni tako, da primerjajo uspešnost sistema za napovedovanje glede na izmerjene vrednosti ali z rezultati referenčnih napovedovalnih sistemov (Jolliffe, 2003). Območje rezultatov meril so zato med nič (neuspešno napovedovanje) in ena (optimalno uspešna napoved) (Strajnar, 2006). Nekateri kazalniki preidejo tudi v negativne vrednosti do -1, ki lahko tudi pomenijo uspešnost (saj jim lahko spremenimo predznak z umerjanjem). Vsako predstavljen kazalnik ima svoje posebne prednosti, pa tudi pomanjkljivosti. Ogleдали si bomo nekaj načinov ocenjevanja natančnosti binarnih napovedi in nekatere bomo uporabili pri ocenjevanju natančnosti izbranega primera.

Kazalnik »delež pravilnih napovedi – PN (ang. *accuracy, fraction correct*)« predstavlja delež pravilno napovedanih dogodkov glede na vse dogodke (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003).

$$\text{delež pravilnih napovedi (PN)} = \frac{\text{zadetki} + \text{pravilna negacija}}{\text{skupaj}} = \frac{a + d}{n} \quad (22)$$

Območje rezultatov je med 0 in 1. Vrednost 1 predstavlja odličen rezultat. Kazalnik je preprosta oblika beleženja uspešnosti, vendar je lahko zelo zavajajoča, saj ima zelo velik vpliv na rezultat pravilna negacija, kar ni najboljše za redke dogodke (WWRP, 2015). Zato je pri napovedovanju poplav uporaba tega kazalnika lahko zelo zavajajoča.

Kazalnik »sistemske napake - B (ang. *bias*) « je razmerje števila napovedi dogodka in števila primerov, ko je bil dogodek opažen (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003). Zapišemo ga kot:

$$\text{sistemska napaka (B)} = \frac{\text{zadetki} + \text{napačne napovedi}}{\text{zadetki} + \text{nenapovedano}} = \frac{a + b}{a + c} \quad (23)$$

Območje rezultatov je med 0 in ∞ . Odličen rezultat je 1. V kolikor so vrednosti večje od 1, takrat dogodke prevečkrat napovemo (ang. »*overforecasted*«). V nasprotnem primeru, če je vrednost manjša od 1, takrat dogodek napovemo premalokrat (ang. »*underforecasted*«). Sistemska napaka nam ne pove ničesar o sami natančnosti, opredeljuje le relativno odstopanje napovedi od opazovanih dogodkov (WWRP, 2015).

Kazalnik »verjetnost zadetka – POD (ang. *hit rate*) predstavlja utež zadetkov glede na vse zaznane dogodke (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003).

$$\text{delež zadetkov} = \frac{\text{zadetki}}{\text{zadetki} + \text{nenapovedano}} = \frac{a}{a + c} = \text{POD} \quad (24)$$

Območje: 0 do 1; Odličen rezultat: 1. Kazalnik je občutljiv na zadetke, vendar ne upošteva nenapovedanih dogodkov. Zelo dobro opredeljuje redke dogodke in je občutljiv na pogostost pojava

dogodka. Kljub temu ga lahko umetno izboljšamo s pogostejšim napovedovanjem dogodka. Zato je pomembno, da se ga uporablja skupaj z kazalnikom deleža napačnih napovedi (WWRP, 2015).

Kazalnik »delež napačnih napovedi – NN (ang. *fals alarm ratio*) predstavlja dele dogodkov, ki se niso zgodili, a so bili napovedani. V tem primeru si želimo, da je vrednost tega merila čim nižja (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003; WWRP, 2015).

$$\text{delež napačnih napovedi (NN)} = \frac{\text{napačne napovedi}}{\text{zadetki} + \text{napačne napovedi}} = \frac{b}{a + b} \quad (25)$$

Območje rezultatov: 0 do 1; Odličen rezultat: 0. Kazalnik »Verjetnost napačne napovedi« – POFD (ang. *probability of false detection*) predstavlja delež napovedanih dogodkov, ki se niso zgodili (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003).

$$\begin{aligned} \text{verjetnost napačne napovedi (POFD)} = \\ \frac{\text{napačne napovedi}}{\text{napačne napovedi} + \text{pravilna negacija}} = \frac{b}{b + d} = \text{POFD} \end{aligned} \quad (26)$$

Območje rezultatov je med 0 do 1, odličen rezultat ko je POFD enak 0. Kazalnik je občutljiv na napačne dogodke, vendar ne upošteva nenapovedanih dogodkov. Umetno ga lahko izboljšamo, v kolikor redkeje napovemo dogodek, pri čemer znižujemo število napačnih napovedi (WWRP, 2015).

Kazalnik »kritične uspešnosti CSI (ang. *critical success index*) « je delež zadetkov v razmerju z vsemi zadetki, nenapovedanimi in napačno napovedanimi dogodki (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003). Izračunamo ga kot:

$$\begin{aligned} \text{Kazalnik kritične uspešnosti (CSI)} = \\ \frac{\text{zadetki}}{\text{zadetki} + \text{nenapovedano} + \text{napačna napoved}} = \frac{a}{a + c + b} \end{aligned} \quad (27)$$

Območje rezultatov je med 0 do 1. Odličen rezultat predstavlja vrednost 1. Kazalnik meri natančnost napovedi, pri čemer ne upošteva števila pravilnih negacij. Uporabimo ga lahko predvsem za merjenje uspešnosti napovedovanja redkih dogodkov. Zaradi tega so lahko rezultati zelo slabi. Kazalnik ne razločuje med viri napak (nenapovedane ali napačne napovedi) (Strajnar, 2006).

Gilbertov kazalnik uspešnosti - GSS (ang. *Equitable threat score – Gilbert skill score*) je podoben kazalniku kritične uspešnosti vendar predstavlja delež pravilno napovedanih in/ali zaznanih (opazovanih) dogodkov (zadetkov), ki je zmanjšan glede na slučajne zadetke (pravilne napovedi). Kazalnik se uporablja za primerjavo rezultatov v različnih klimatoloških pogojih. Primerjava je veliko bolj nepristranska v primeru primerjave dveh enakih sistemov napovedovanja ob različnih klimatskih pogojih (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003; Strajnar, 2006, WWRP, 2015).

Gilbertov kazalnik uspešnosti (GSS) =

$$\frac{zadetki - zadetki_{random}}{zadetki + napačno napovedano + nenapovedano + zadetki_{random}} = \frac{a - a_{random}}{a + b + c + a_{random}} \quad (28)$$

$$a_{random} = zadetki_{random} =$$

$$\frac{(zadetki + nenapovedano)(zadetki + napačno napovedano)}{skupaj} = \frac{(a + c)(a + b)}{N} \quad (29)$$

Območje rezultatov je od -1/3 do 1; manjše ali enako 0 predstavlja neuspeh, odličen rezultat je pri vrednosti 1. Kazalnik je občutljiv na zadetke oz. pravilne napovedi in hkrati kaznuje napake, pri čemer ne razločuje med viri napak (nenapovedane ali napačne napovedi) (WWRP, 2015).

Piercejev kazalnik uspešnosti - PSS (ang. *Pierce skill score*) je določen z razliko med deležem zadetkov in deležem napačnih alarmov. Opisuje, kako dobro napovedovalni sistem ločuje med dogodki in nedogodki. Za redke dogodke ima podobne težave kot delež pravilnih napovedi, zato je uporaben predvsem za pogoste dogodke (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003).

Piercejev kazalnik (PSS) =

$$\frac{zadetki}{zadetki + nenapovedano} - \frac{napačno napovedano}{napačno napovedano + pozitivna negacija} = \frac{a}{a + c} - \frac{b}{b + d} \quad (30)$$

Območje rezultatov: -1 do 1; 0 pomeni neuspeh, odličen rezultat je vrednost 1 (WWRP, 2015).

Heidkejev kazalnik - HSS (ang. *Heidke skill score*) - Predstavlja delež pravilnih napovedi z izničenjem pravilnih napovedi, ki so posledica naključja. Zato je bila definirana ocena verjetnosti (E) s katero pravilno napovemo, da se dogodek bo ali ne bo zgodil (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003).

$$\text{Hidkejev kazalnik (HSS)} = \frac{(\text{zadetki} + \text{pravilna negacija}) - E}{\text{skupaj} - E} = \frac{(a + d) - E}{N - E} \quad (31)$$

$$E = \frac{(\text{zadetki} + \text{nenapovedano})(\text{zadetki} + \text{napačno napovedano})}{\text{skupaj}} = \frac{(a + c)(a + b)}{N} \quad (32)$$

Območje rezultatov: -1 do 1; 0 pomeni brez uspeha; Odličen rezultat privrednosti 1 (WWRP, 2015).

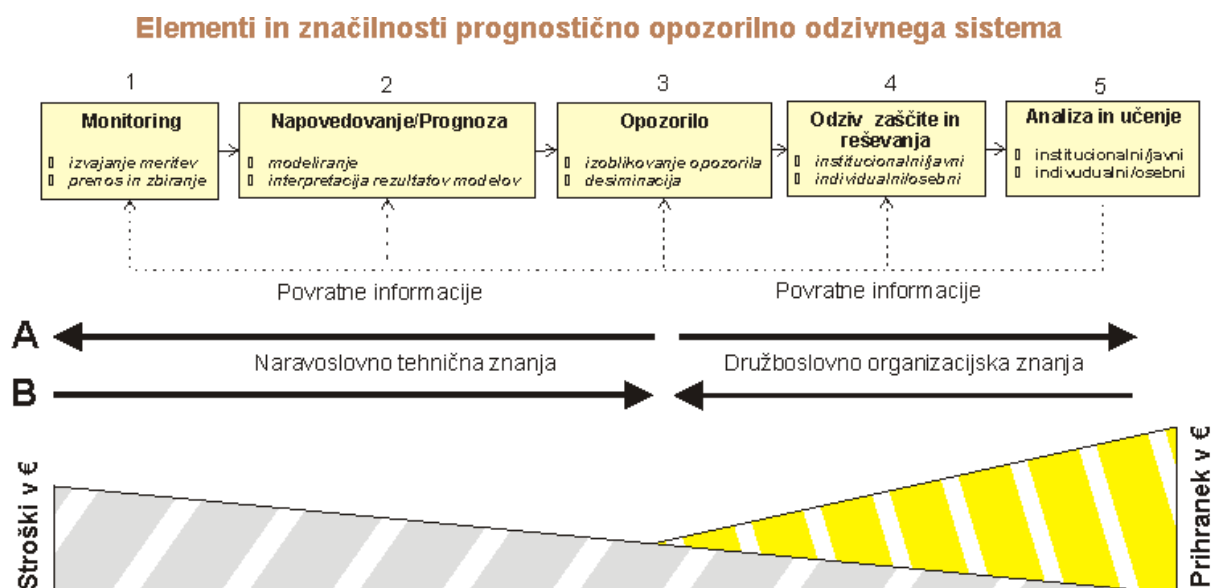
2.3 OPIS HIDROLOŠKO PROGNOŠTIČNO OPOZORILNEGA SISTEMA

Vzpostavitev in ohranjanje uspešnega delujočega sistema za hidrološko napovedovanje in opozarjanje zahteva monitoring in zbiranje podatkov v realnem času, modelska numerična orodja in usposobljene hidrologe »prognostike«. Cilj hidrološkega/meteorološkega napovedovanja je priprava opozorila z dovoljšnim opozorilnim časom, ki bo omogočil odziv in zaščito/reševanje ogroženih skupin. S tem, ko visokovodnim napovedim podaljšujemo opozorilni čas, se poveča potencial za omejevanje škodnega delovanja voda in preprečuje izgubo človeških življenj. Pogosteje, ko so napovedi točne, učinkovitejši postane odziv, saj prebivalci pričnejo napovedim zaupati.

Sistem za napovedovanje visokih voda in izdajo opozoril sestoji predvsem iz naslednjih elementov: zbiranje in obdelava podatkov, monitoring, hidrološko hidravlično modeliranje, izdelava napovedi, opozarjanje in obveščanje, odločanje in ukrepanje (podpora odzivu) ter analiza dogodka.

Vzpostavitev in delovanje celotnega procesa hidrološkega napovedovanja in opozarjanja ter vključevanje odziva sestavljajo številni podprocesi v verigi, kjer mora vsak del iz sheme (slika 2) opraviti svoje naloge, v kolikor želimo zagotoviti učinek. Na sliki 2 je shematsko prikazan petstopenjski

proces prognostično opozorilno odzivnega sistema (POOS). Sistem prikazuje pomembnost povezave med naravoslovno tehničnimi znanji od meteorologije, hidrologije, hidravličnega inženirstva do družboslovno organizacijskih znanj. V praksi pogosto prihaja do razkoraka med tehničnim in družboslovnim delom, kar vpliva na kvaliteto in učinkovitost delovanja POOS.



Slika 2: Prognostični opozorilno odzivni sistem (dopolnjeno na osnovi Parker, 2003).

Figure 2: Flood forecasting, warning and response system (supplements based on Parker, 2003).

Dolgoročno mora program vzpostavitve in vzdrževanja sistema za napovedovanje in opozarjanje zasledovati cilje ublažitve posledic in zmanjševanja poplavne ogroženosti, kot sredstva za celovito upravljanje z vodami. Uspešnost je tako odvisna predvsem od trajnega delovanja na vseh področjih upravljanja z vodami, vodnega gospodarstva in zaščite pred škodljivim delovanjem voda, katerega del je tudi sistem napovedovanja visokih voda. V upravljanje z vodami morajo zato biti enakomerno vključeni aktivni in pasivni ukrepi, kjer ima v preventivnem pomenu prednostno vlogo prostorsko načrtovanje ob jasno oblikovanih strokovnih vodnogospodarskih podlagah (Pogačnik, 2009).

Učinkovito delovanje sistema nam zato po vzpostavitvi omogoča družbene prednosti in neposredne ekonomske koristi:

- izogibanje poškodbam, stresu, boleznim zaradi učinkov ujme in smrtnim žrtvam,
- zmanjševanje škode v zasebnem in javnem sektorju,
- zmanjševanje škode v industriji in kmetijstvu,
- zmanjševanje vpliva na sekundarni in terciarni sektor gospodarstva,
- povečano občinsko, regionalno in državno varnost,

- izogib političnemu dolgu do pomoči prizadetim, zaradi predhodnih jasno postavljenih omejitev in izdanih opozoril,
- boljše meddržavno sodelovanje ob poplavih.

2.4 OPIS MODULOV PROGNOŠTIČNO OPOZORILNEGA SISTEMA

Izdelani sistem na ARSO je pravzaprav razdeljen v dva vsebinska dela: modelski del in opozorilni del. Modelski del temelji na sistemu za hidrološki prognostični sistem, opozorilni del pa na pripravi napovedi in opozoril. Tako lahko pri obravnavanju vodnega kroga oz. geofizikalnega procesa gibanja vode in napovedovanju njenega stanja v prostoru govorimo o hidrološkem prognostičnem sistemu (HPS). Takoj ko s to informacijo seznanjamo tudi javnost oz. uporabnike, razširimo območje aktivnosti na prognostično opozorilni sistem, katerega glavni deli so:

- pridobivanje izmerjenih podatkov iz samodejne merilne mreže hidroloških in meteoroloških postaj v realnem času,
- izmerjeni hidrološki in meteorološki podatki pridobljeni v bilateralnih izmenjavah in z mednarodno izmenjavo,
- rezultati izračunov meteoroloških modelov,
- hidrološko – hidravlično računsko jedro (Programski paket Danskega hidravličnega inštituta (DHI, 2000b),
- informacijska vizualizacijska, komunikacijska in diseminacijska orodja ter
- orodje za oblikovanje in posredovanje opozoril.

Vse navedene vsebine se povezujejo v okviru relacijske podatkovne baze in z vizualizacijskim okvirom spletnega prostorsko informacijskega sistema. Vse te naloge pokrivajo službe v okviru Agencije Republike Slovenije za okolje, pri čemer mora biti za dejanske učinke v lokalnem okolju hidrološki prognostični in opozorilni sistem vezan na odziv in ukrepanje. Hidrološki prognostični in opozorilni sistem je le del širše organizacijske strukture javnih služb za zaščito pred škodljivim delovanjem voda in drugih naravnih nesreč. S pomočjo razvoja koncepta Prognostično opozorilno odzivnega sistema (v nadaljevanju POOS) (Parker, 2003; Pogačnik, 2009) bi lahko prešli na neposredno krizno upravljanje s poplavnimi dogodki. V obstoječi ureditvi za vse naloge v okvirih takšne zasnove delovanja skrbita MOP, ARSO in MORS, URSZR.

2.4.1 HIDROLOŠKA IN METEOROLOŠKA MONITORING MREŽA V SLOVENIJI

Sistem za spremljanje stanja površinskih voda sestavljajo merilne postaje, ki merijo spremenljivke, potrebne za ugotavljanje vodnih količin in odtočnih režimov s poudarkom na sprotnem ocenjevanju stanja površinskih voda in ocenjevanju dolgoročnih sprememb v vodnem krogu. Meritve na površinskih vodah so v letu 2005 tekle na 196 mestih (Roškar, 2015). Opremljenost merilnih mest je bila različna; od različnih limnigrafov do samodejnih senzorjev (tlačne sonde). Na 49 mestih so honorarni opazovalci enkrat ali večkrat dnevno zabeležili višino vodostajev, na ostalih so večinoma mehanski limnigrafi zvezno beležili višine vodne gladine. Samodejni prenos podatkov v center na sedežu ARSO je potekal v letu 2005 s samo 28 vodomernih postaj, leta 2012 je bilo teh postaj 58 (Pogačnik et al., 2012) .



Slika 3: Hidrološka postaja Suha na Sori (vir: ARSO, 2015).
Figure 3: Gauging station at Sora Suha (surce: ARSO, 2015).

Sprotni podatki s samodejnih merilnih postaj so nepogrešljivi za redno spremljanje hidrološkega stanja in za pripravo hidroloških napovedi ter opozoril. Gradnja novih in posodobitev že obstoječih hidroloških merilnih mest na površinskih vodah pomenita bolj kakovostno pridobivanje podatkov o vodnih količinah, zalogah, stanjih, odtočnih režimih in temperaturi vode. Pridobljeni podatki so podlaga za spremljanje vodnega stanja in napovedovanje hidrološkega stanja vodotokov ter opozarjanje ob izrednih hidroloških razmerah. V okviru projekta BOBER se je obnovilo 133 obstoječih merilnih postaj na površinskih vodah in zgradilo 12 novih, skupno torej 145 samodejnih merilnih postaj (slika 3) (Roškar, 2015). Vse samodejne postaje po končanem projektu BOBER, ki jih je 179, bodo vključene v sistem hidrološkega napovedovanja.

Mrežo meteoroloških postaj so v preteklosti glede na namen meritev pretežno sestavljale glavne, podnebne in padavinske postaje. Na vseh postajah so pred samodejnim načinom meritev delo opravljali

opazovalci. V primeru meteorološke mreže glavnih, podnebnih in padavinskih postaj je bilo leta 2005 potrebno obnoviti 30 % tedaj obstoječih samodejnih merilnih postaj. Zaradi vse težjega pridobivanja opazovalcev na obstoječih klasičnih podnebnih in padavinskih postajah bi bilo potrebno znaten del takih postaj opremiti s samodejnimi merilnimi napravami. V okviru projekta BOBER je bilo izgrajenih 90 samodejnih postaj, med njimi 39 na starih lokacijah ter 51 na novih.



Slika 4: Novo zgrajena meteorološka postaja v okviru projekta BOBER (vir: ARSO, 2015).
Figure 4: Newly built meteorological station within the project BOBER (source: ARSO, 2015).

Meteorološke postaje niso enakomerno porazdeljene po celi državi. Večje število novih postaj je na alpsko-dinarski pregradi in v zaledju Kamniških Alp zaradi orografskega vpliva, ki proži procese izdatnih padavin. Stara mreža je zelo slabo pokrivala višje ležeča območja. Vse meteorološke merilne postaje v okviru projekta so priključene na javno električno omrežje. Bistvena tehnična sprememba v primerjavi s starim opazovalnim sistemom je povezava posameznih merilnikov z optičnim kablom s samodejno postajo, ki je postavljena v opazovalnem prostoru, kar močno zmanjša izpostavljenost naprav električnim razelektritvam v ozračju in tako poveča zanesljivost delovanja tudi v izjemnih razmerah (ob nevihtah) (Roškar, 2015). Prav tako kot samodejni hidrološki podatki, so predvsem meteorološki podatki izhodišče za vsakokratni izračun sistema za hidrološko napovedovanje.

Nadgradnja merilne mreže bo v prihodnje zahtevala spremljanje in aktivno vzdrževanje. Nekatera področja, ki bodo s velikom številom dodatnih podatkov in postaj zahtevala večje vložke so:

- osvežitev informacijskih sistemov za potrebe vzdrževanja in spremljanja,
- aktivno delo na bazi podatkov s standardiziranjem vsbinskih in tehničnih procesov,
- vsebinska in strojna nadgradnja kontrole podatkov,
- odprtje podatkovnih baz do uporabnikov preko programskega vmesnika z nitom definicij, protokolov in orodij za pridobitev podatkov, izgradnjo programske opreme in nadaljnjih aplikacij

2.4.2 UPORABA METEOROLOŠKIH MODELOV

Kakšna bo napoved intenzitete padavin, trajanje in njihova porazdelitev so osnovne informacije iz meteoroloških modelov, ki nam oblikujejo delovanje prognošično opozorilnega sistema. Za operativno delovanje sistema moramo imeti vzpostavljeno neposredno povezavo z meteorološko službo in dostop do rezultatov meteoroloških modelov v realnem času, saj nam to podaljšuje opozorilni čas. Pri modeliranju se uporablja različne meteorološke modele, ki za različna časovna in prostorska območja napovedi zagotavljajo najboljše rezultate. Meteorološki modeli so tako globalni, regionalni ali pa lokalni in s tem se spreminja njihova natančnost, časovni korak in dolžina napovedi, kar vpliva na njihovo uporabo pri HPS. V Sloveniji se trenutno za hidrološko modeliranje uporablja več modelov. Uporablja se napovedi regionalnih in globalnih meteoroloških modelov z različno gostoto računske mreže in časovnim trajanjem napovedi, ki se praviloma obnavljajo od 2 do 4 krat na dan. To so: ECMWF⁷ (9 km, 240 ur), ALADIN/SI⁸ (9 km, 72 ur), NMM⁹ (5 km, 72 ur), ALADIN_AR¹⁰ (4 km, 72 ur) in skupinska napoved (angl. "ensemble forecast") LAEF¹¹ (11 km, 72 ur).

Preglednica 3: Pregled umestitve hidroloških modelov znotraj različnih HPS (1-5) glede na domeno hidrološkega modela in uporabljenih napovedi meteoroloških modelov (Petan et.al, 2015)

Table 3: Overview of different flood forecasting model setups (1-5) based on the use of meteorological model forecasts (Petan et al., 2015)

Modelska domena		Sava in Soča						FF		
Zasnova sistema		1	2	3	4	5	Ens	1	2	3
vhodni podatki iz merilne mreže oz. iz meteoroloških modelov	Opazovanja	•		•	•	•	•	•	•	•
	ALADIN/SI	•	•							•
	ALADIN_ECDA				•			•		
	ALADIN_AR					•			•	
	NMM			•						
	ECMWF	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	LAEF						•			
INCA-CE		•								

⁷ Numerični model Evropskega centra za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

⁸ Slovenska različica modela ALADIN (Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International) – mednarodni numerični model za omejeno območje, ki ga razvija konzorcij držav pod vodstvom francoske državne meteorološke službe.

⁹ Slovenska različica modela NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model), katerega razvoj usmerja ameriška državna meteorološka služba.

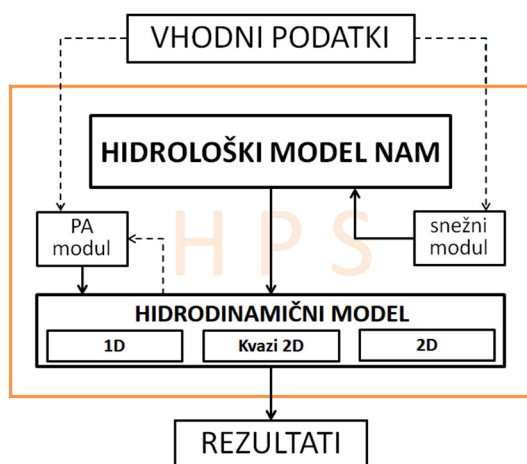
¹⁰ Slovenska različica modela ALADIN z lokalno asimilacijo podatkov in robnimi pogoji iz globalnega modela ARPEGE (Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle).

¹¹ Skupinska napoved, ki jo sestavlja 17 simulacij numeričnega modela ALADIN (LAEF – Limited Area Ensemble Forecasting). Izračuna jo avstrijska meteorološka služba.

V HPS so vključene tudi analize in napovedi nowcasting sistema INCA-CE12 (1 km, 12 ur). Sistem tako vključuje celo vrsto različnih zasnov hidroloških modelov za vse tri domene oz. območja modeliranja (porečje Save – krajše označeno kot Sava, povodje Soče – krajše označeno kot Soča, in vsa slovenska porečja – krajše označena kot FF), ki kot vhodne podatke uporabljajo opazovanja merilne mreže in napovedi različnih meteoroloških modelov ob enakih parametrih umerjanja (preglednica 3). Modelske postavitve so znotraj HPS so označene s kratkim imenom domene modeliranja in vrstnim številom od 1 do 5, razen za modelski postavitvi, ki vključujeta skupinsko napoved LAEF (SavaEns in SočaEns) (Petan et al., 2012; 2015). Predhodne umestitve so opisane predvsem v prispevkih iz leta 2012 (Pogačnik et al, 2012).

2.4.3 HIDROLOŠKO-HIDRAVLIČNO MODELSKO JEDRO

Sistem za hidrološko napovedovanje je zgrajen okoli računskega jedra programskega paketa DHI MIKE11. Le tega sestavljata dve osnovni modelski jedri: hidrološki model NAM in eno-dimenzijski (1D) hidrodinamični model (slika 5). V poznejši fazi smo sistemu dodali še »kvazi« dvo-dimenzijski (kvazi 2D) in polni dvo-dimenzijski (2D) hidrodinamični model, zasnovan s komponento MIKE FLOOD, za podrobnejše simulacije na dveh izbranih poplavnih območjih. Hidrološki model NAM je dopolnjen s snežnim modulom, ki skrbi za simulacijo akumulacije in taljenja snega. Pri delovanju je sistemu dodan še modul asimilacije podatkov (PA), ki se veže na hidrodinamični model, in je namenjen korekciji simuliranih pretokov in vodostajev z izmerjenimi vrednostmi ob upoštevanju eksponentne funkcije približevanja k napovedanim vrednostim.



Slika 5: Zasnova hidrološkega prognoističnega sistema (Petan et al., 2015).
Figure 5: A conceptual diagram of flood forecasting system (Petan et al., 2015).

¹² Sistem za zelo kratkoročno napovedovanje vremena v srednji Evropi (INCA-CE – Integrated NowCasting system for the Central European area).

Delovanje sistema dopolnjujejo številne druge aplikacije, ki skrbijo za pripravo vhodnih podatkov v sistem in za diseminacijo izračunanih rezultatov (Petan et al., 2015).

2.4.4 NAM

Kratica NAM izhaja iz danščine (*Nedbor-Afstromnings-Model*) in pomeni model padavine-odtok. Gre za deterministični konceptualni model, ki z matematičnimi operacijami poenostavljeno kvantitativno opisuje naravni hidrološki krog na zemeljskem površju. Konceptualni model temelji na numeričnemu reševanju diferencialnih fizikalnih in semi-empiričnih enačb drugih procesov z metodo končnih razlik. Ključno vlogo v strukturi modela ima vsebnost vlage oziroma vode v tleh, na podlagi katere model razporedi padavinsko vodo med napajanje podzemne vode, površinski odtok, tok v nenasičeni coni in evapotranspiracijo. Računsko sosledje procesa je v nadaljevanju deloma povzeto po DHI (2009).

Nekatere računske parametre sicer lahko ocenimo oziroma določimo z obravnavo fizikalnih lastnosti obravnavanega območja povodja, vendar morajo biti končne vrednosti parametrov določene z umerjanjem z znanimi vhodnimi in izhodnimi spremenljivkami. Osnovna računska enota modela je podporečje, ki predstavlja prispevno območje posamezne reke do izbrane točke, praviloma je to lokacija vodomerne postaje, ali pa prispevno vodozbirno območje za posamezen odsek reke med dvema vodomernima postajama. Proces pretvorbe padavin v odtok je obravnavan z vidika interakcije med seboj povezanih con; cona snežne akumulacije (ang. *snow storage*), površinska cona (ang. *surface storage*), koreninska cona (ang. *lower zone storage* ali *root zone storage*) in cona podzemne vode (ang. *groundwater storage*), v kateri sta ločeno obravnavana tok v nenasičeni coni ali medtok (ang. *interflow*) in tok podzemne vode v nasičeni coni ali bazni tok (ang. *baseflow*). Podporečje je v modelu opredeljeno z velikostjo, njegova topografija pa je opisana s površinami 100-metrskih višinskih con. Na nivoju višinskih con je v modelu uporabljen snežni modul, ki simulira akumulacijo padavin v snežni odeji in sproščanje snežnice v površinski odtok. Hidrološki model porečja Save do meje s Hrvaško je zasnovan s 40 podporečji, model porečja Soče do izliva v Jadransko morje pa z 31 podporečji. Razlika v srednji velikosti podporečij izhaja iz dejstva, da so v porečju Save prisotna obsežna kraška območja, na katerih so razvodnice zelo težko določljive. Podroben model vseh slovenskih porečij, brez prispevnih območij Drave in Mure v Avstriji, pa je zasnovan z 227 podporečji in srednjo velikostjo podporečij okoli 98 km² (Petan et al., 2015). S takšno zasnovo hidrološkega modela sistem pridobi semi-distribuiran značaj. Pri umerjanju in verifikaciji parametrov posameznih podporečij so bili uporabljeni časovni nizi padavin, temperatur zraka in pretokov iz mreže meteoroloških in hidroloških postaj ARSO (tudi pomembni podatki iz mednarodne izmenjave) za obdobje med letoma 1999 in 2010.

2.4.5 MIKE 11

Za hidravlično modeliranje in propagacijo vodnega toka vzdolž rečne mreže je bil uporabljen računalniški program Mike11. Mike 11 (DHI, 2009) hidrološki in enodimenzionalni hidrodinamičen model. Uporabljamo ga lahko na različnih področjih vodnogospodarskega načrtovanja, od modeliranja poplavnih valov, upravljanja zadrževalnikov, shematske vključitve delovanja hidroelektrarn ali preverjanja prevodnosti ob lokalnih zožitvah. Osnovna značilnost programa Mike11 je njegov dokaj robustno zasnovan modul nestalnega toka, ki omogoča povezavo večjega števila vodotokov in zagotavlja učinkovit izračun neenakomernega toka. Osnova modela sta St. Venantovi enačbi gibalne količine ter kontinuitetnega masnega toka v eno-dimenzijski obliki. Za izračun zožitev ali pretoka skozi različne objekte se uporablja modificirana St. Venantova enačba. Podrobnejši opis delovanja in hidravlične strukture modela opisujejo že drugi avtorji (Lesjak, 2008; Rak 2013).

Hidrološki model izračuna hidrogram površinskega odtoka za vsako podporečje. Propagacijo in seštevanje izračunanih hidrogramov površinskega odtoka vzdolž rečnih strug pa opravi 1D hidrodinamični model Mike11. V hidrološkem prognostičnem sistemu je hidravlični model zgrajen v obliko poenostavljene rečne mreže in razpoložljivih prečnih profilov vodotokov ter podatkov o večjih hidrotehničnih objektih na vodotokih (pregrade, akumulacije hidroelektrarn, jezovi, talni pragovi). Hidrodinamični model porečja Save ima enostavno zasnovano, ki je ni bilo najlažje zasnovati. Modelska rečna mreža obsega: 23 vodotokov, 6 večjih pragov in 9 kontrolnih objektov. Podobno, model povodja Soče temelji na 17 vodotokih, 10 pragovih in 4 kontrolnih objektih. Podroben model vseh slovenskih porečij je bil zasnovan na 171 vodotokih, ki vključujejo tudi ocenjene glavne podzemne povezave v kraškem podzemlju. Zaradi robustnosti samega delovanja tako obsežnega modela smo se namenoma izognili vgrajevanju/vključevanju vodnih objektov v hidrodinamični model, saj smo se že v konceptu uskladili s potrebami in operativnimi procesi hidrološke prognostične službe, ki napovedi pretokov prepoznava kot bistvene, napovedi vodostajev pa kot manj pomembne. V hidrodinamičnem modelu so kot zgornji in vzdolžni robni pogoji na rečni mreži nastavljeni izračunani hidrogrami površinskega odtoka iz hidrološkega modela, kot spodnji robni pogoji pa pretočne krivulje končnih dolvodnih prečnih profilov oz. vodna gladina Jadranskega morja (Petan et al., 2015).

2.4.6 VLOGA »KVAZI 2D« HIDRAVLIČNEGA MODELIRANJA V HPS

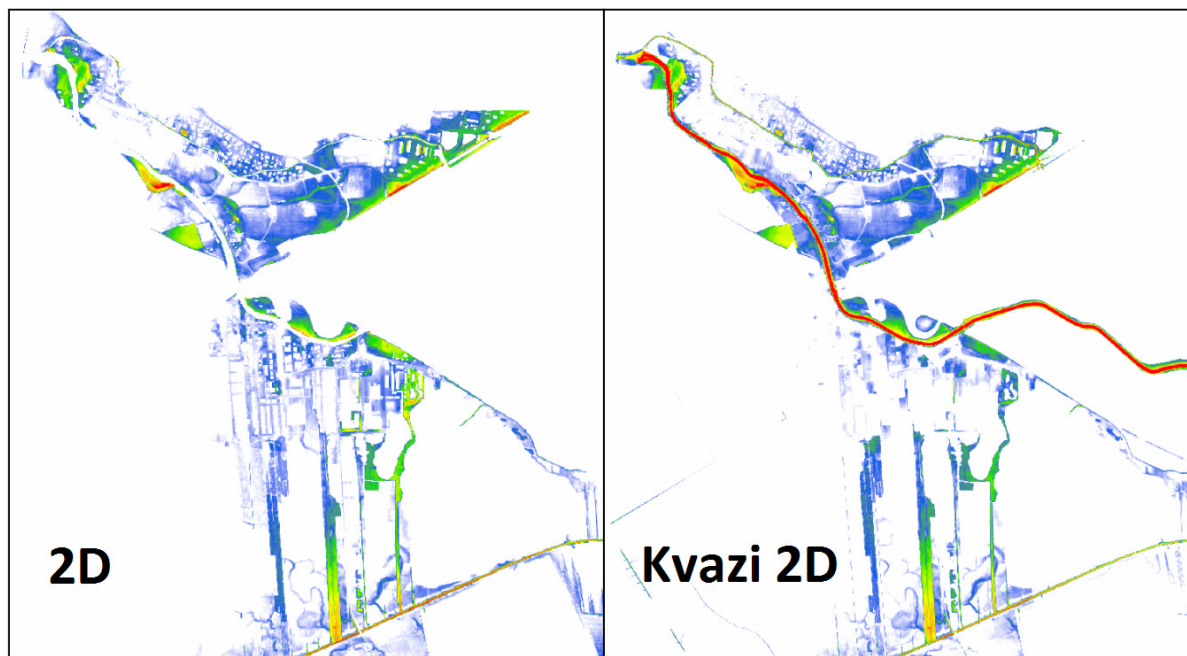
Pomanjkljivo poznavanje prostorske dinamike napovedanih hidroloških stanj je bil glavni motiv za nadgradnjo obstoječega sistema z natančnejšim hidravličnim modelom, ki bi lahko upošteval tudi vpliv

razlitij na spremembo prognoziranega hidrograma, predvsem pa omogočal simulacijo in vizualizacijo poplavne dinamike v primeru razlitja rek. Pri iskanju koncepta modela, ki bi zadostil čim višji natančnosti ob še vedno sprejemljivem času modelskega izračuna, smo se v pilotnem projektu ob danih tehničnih omejitvah odločili za izdelavo hidravličnega modela v kvazi-2D tehnologiji s programom Mike. Uporaba klasičnih dvodimenzionalnih modelov v našem primeru ni bila mogoča. Računski časi 2D modelov s še sprejemljivo velikostjo celic na tako velikih območjih bi namreč močno presegali meje, znotraj katerih bi še lahko govorili o modelu, ki bi zagotavljal izračune v času za potrebe operativne prognoze. Čeprav ima ARSO v lasti zmogljiv večjedrni »super-računalnik«, ki bi zlahka rešil težavo dolgotrajnega izračuna, pa uporaba le-tega ni mogoča, saj osnovna koda uporabljene programske opreme ni zasnovana za vzporedne in porazdeljene izračune. V iskanju alternative, ki bi zadostila tudi zahtevanemu računskemu času, smo se odločili za izdelavo enodimenzionalnega modela v »kvazi 2D« tehnologiji. Bistvena značilnost »kvazi 2D« modelov je uporaba prednosti t.i. vejičastega toka (Steinman, 2010). Z njo lahko ob uvedbi večjega števila dodatnih računskih (»umetnih«) vodnih tokov in kvalitetno komunikacijo med njimi uspešno simuliramo tudi gibanje tiste poplavne vode, katere smer in hitrost se razlikuje od tiste v vodotoku. Na ta način lahko s (precej hitrejšo) enodimenzionalno numerično shemo (povprečenje prečnega in globinskega gibanja vode) natančneje modeliramo tudi kompleksnejše poplave in se tako približamo funkcionalnosti pravih dvodimenzionalnih modelov (Moderc et al., 2015, Pogačnik et al., 2013). Žal pa ta način ne omogoča izračunov povratnih tokov, ko se voda izlije v ravninaska področja. V prihodnje se na ARSO načrtuje testiranje uporaba kakovostne računsko močne grafične kartice in testiranje prostodostopne programske opreme, ki bi omogočala prehod na vzporedno računanje v realnem času.

Vpeljava hidravličnega modela v HPS je izboljšala tudi kvaliteto produktov samega hidrološkega modela. Poplavna območja namreč delujejo kot naravni zadrževalniki velikih volumnov vode, njihov vpliv na odtočno dinamiko pa brez orodij za poznavanje in upoštevanje njihovih zadrževalnih kapacitet ostane zanemarljiv, kar v primeru večjih poplavnih razlitij lahko povzroči napačno interpretacijo dinamike in višine hidrograma napovedi ter same propagacije valov vzdolž rečne mreže (Pogačnik et al., 2013).

Pri umeščanju modela v širšo hierarhično shemo sistema za hidrološko prognozo bi lahko predviden hidravlični model opisali kot samostojno delujoče računsko jedro, ki bo popolnoma integrirano v obstoječi HPS. Razvoj celotne metodologije izdelave tovrstnega modela znotraj tehnoloških omejitev enodimenzionalnega modela je kontinuiran iteracijski proces. Na sliki 6 je prikazana maksimalna ovojnica poplav stoletnih voda Malega Grabna na modeliranem območju JZ dela Ljubljane (Fazarinc,

2011), ki s svojim izrazito dvodimenzionalnim tokom na poplavni ravnici predstavlja odličen testni poligon za preizkus sposobnosti predvidenega »kvazi« 2D modela.



Slika 6: Primerjava rezultatov območij poplavnih kart testnega »kvazi 2D« modela (programska oprema Mike 11, v izvedbi: ARSO in IZVO-R; z vključitvijo struge Malega Grabna) in referenčnega 2D modela (programska oprema MikeFlood (Mike 21 računsko jedro), v izvedbi: IZVO-R; brez struge Malega Grabna na območju JZ dela Ljubljane), Pogačnik et al., 2013.

Figure 6: Comparison of test flood map of “quasi 2D” model (software Mike 11; developed by ARSO and IZVO-R; with the channel of Mali Graben) with the reference 2D model (software MikeFlood (Mike21 calculation engine); developed by IZVO-R; without the channel of Mali Graben) in the area of SW part of Ljubljana (software Mike 11; IZVO-R and ARSO), Pogačnik et al., 2013.

Ena izmed pričakovanih težav hidravličnega dela sistema je vsekakor problem staranja vhodnih podatkov, predvsem na področju geometrije modela tj. topografije in človekovih posegov v prostor. Želja po dolgoročnem zanesljivem operativnem delovanju modela je namreč neobhodno povezana s skrbjo za redno osveževanje samega jedra modela, kar pa v praksi lahko pomeni težave z zagotavljanjem sledenja aktualnim spremembam in pridobivanjem najnovejših prostorskih podatkov. Največje vprašanje s strokovnega stališča je prav gotovo, kakšen je interval zaupanja končnih rezultatov modela (t.j. pretokov in dinamike razlivanja) glede na precej širok interval zaupanja prognoziranih pretokov obstoječega hidrološkega prognostičnega sistema.

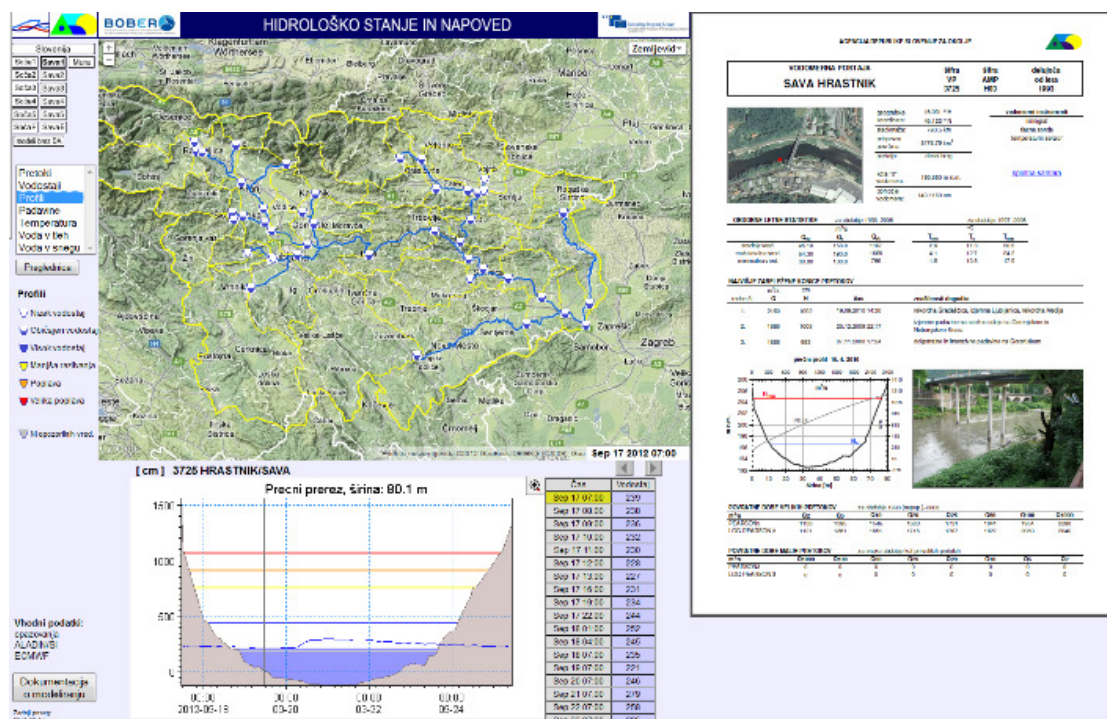
Nekajletna praksa dosedanjega napovedovanja hidroloških razmer namreč potrjuje nepredvidljivost površnega značaja slovenskih vodotokov, kar predstavlja veliko težavo pri zagotavljanju zanesljivega glavnega vhodnega podatka za hidravlični model – vtočnih hidrogramov. Glede na ugotovljene omejitve

lahko koncept »kvazi« 2D hidravličnega modeliranja uporabimo na večjih poplavnih območjih, kjer je rečni odtok nekoliko počasnejši (spodnji del večjih porečij) ali ima lahko velik vpliv na ogroženost prebivalstva. Tako lahko izvedemo vpeljavo hidravličnega modela v hidrološki prognostični sistem le na tistih poplavno ogroženih območjih, kjer bomo kot zgornji robni pogoj lahko uporabili zanesljive vtočne hidrograme. To so nižinska območja Slovenije, konkretno porečje Drave, Mure in Spodnje Save, pogojno pa tudi Ljubljance, Savinje in Vipave.

Modeliranje poplavnih območij v zgornjem toku slovenskih rek zaradi prekratkih časov zakasnitve in povečini hudourniškega značaja vodotokov ter preširokega intervala zaupanja vhodnih podatkov zaenkrat ni smiselno.

2.4.7 VIZUALIZACIJA REZULTATOV SISTEMA ZA HIDROLOŠKO NAPOVEDOVANJE

Ker je pregledovanje rezultatov modelskih izračunov v grafičnem pregledovalniku DHI-jeve programske opreme prilagojeno enemu samemu strokovnjaku z licenco je bila sprejeta odločitev o pripravi širše dostopnega pregledovalnika hidrološkega stanja in napovedi s spletno tehnologijo. S tem je bilo omogočeno sočasno dostopanje hidrologom prognostikom kot tudi preostalim zainteresiranim uporabnikom znotraj omrežja Agencije RS za okolje. Spletni pregledovalnik podatkov je bil zasnovan zelo preprosto, a vendarle z vsemi potrebnimi strokovnimi vsebinami, ki so pripomogle k izboljšanju dela dežurnega hidrologa. Spletni prikaz je sestavljen iz treh glavnih sestavnih elementov: zemljevida v osrednjem delu, navigacijski del z izbiro parametrov na levi strani ter prikaz izračunanih časovnih serij s tabelo pod zemljevidom. Spletni prikaz dopolnjujejo nekateri dodatki kot so legenda, naslovna glava portala, dokumentacija o opisu in delovanju modelov, meta-podatkovni listi o hidroloških postajah (slika 7).



Slika 7: Slika zaslona vizualizacije hidrološkega stanja in napovedi z metapodatki za izbrano vodomerno postajo iz leta 2012.
Figure 7: Print screen of hydrological state and forecast with its metadata on teh selected gauging station from 2012.

Osrednji element delovanja prikaza je zemljevid. Na zemljevidu so vključeni prikazi uporabljenih podporečij izbranega modela, rečne mreže ter prognostične točke na katerih se za izbran modelski sistem prikazuje napoved. V kolikor želimo pregledovati različne parametre, se sočasno spremeni tudi prikaz vsebine na zemljevidu. Levi pas je namenjen izbiri modelske postavitve, legendi in dostopu do dokumentacije. Prikaz podatkov izbiramo v prognostičnih točkah in na prispevnih območjih (podporečjih) z uporabo zemljevida. V prognostičnih točkah (vodomerne postaje ARSO in sosednjih držav, hidrotehnični objekti, npr. jezovi hidroelektrarn) so prikazani časovni nizi napovedanih pretokov in vodostajev. Za prispevna območja prognostičnih točk so prikazani časovni nizi izmerjenih in napovedanih padavin ter temperatur zraka, izračunanih deležev vode v tleh in vodnega ekvivalenta snežne odeje. 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 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.

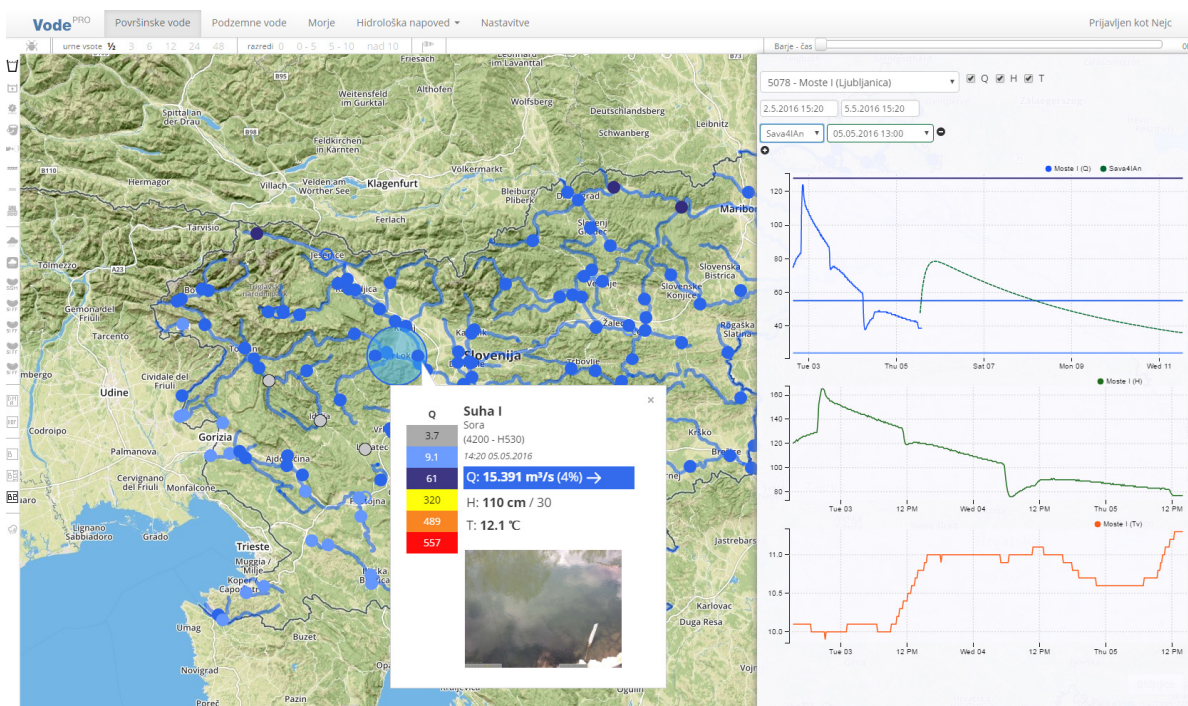
Poleg spletne aplikacije smo dodatno oblikovali okrnjeno različico za zunanje uporabnike in omogočili prikazovanje rezultatov prek tako imenovanih pametnih telefonov, ki imajo omogočen dostop do spleta. Prikaz je omejen na eno samo operativno zasnovo Sava 1 in Soča 1 iz leta 2012 (slika 8).



Slika 8: Prikaz rezultatov napovedi na pametnem telefonu (testni primer delovanja).
Figure 8: Smart phone results visualization (test case operation).

V preteklih letih se osnovna struktura prikaza modelskih rezultatov ni veliko spremenila, le razširila se je z dodatnimi produkti. Zaradi hitre širitve in zahteve po novih orodjih smo pričeli razvijati nova orodja in prikaze v spletni tehnologiji.

Cilj nove razširjene spletne aplikacije VodePro je, na enem mestu združiti čimveč razpoložljivih podatkov in jih predstaviti uporabnikom spletne aplikacije na način, ki omogoča učinkovito in enostavno delo. Glavni poudarek aplikacije je na operativnih procesih, ki jih hidrologi izvajajo redno v postopkih izdelave napovedi in izdaje opozoril splošni javnosti ter zainteresiranim deležnikom (npr. URSZS, CORS, hidroelektrarne itd.). Po drugi strani aplikacija omogoča tudi nadzorni modul, s katerim lahko uporabniki kontrolirajo uporabo različnih delov celotnega sistema in mreže merilnih postaj. Glede na naravo problema, ta del predstavlja enega od ključnih procesov, saj omogoča prepoznavanje neizogibnih napak, ki lahko nastanejo kot posledica napake v merilnem inštrumentu, na komunikacijski poti ali drugih delih sistema, nad katerim sama aplikacija VodePro nima nadzora.



Slika 9: Spletna aplikacija VodePRO za prikaz meteoroloških in hidroloških podatkov ter izvajanje operativne hidrološke službe (ARSO, 2016)

Figure 9: Web application VodePRO to show meteorological and hydrological data with the implementation of operational hydrological service (ARSO, 2016)

Sistem je zasnovan v obliki trinivojske arhitekture, s čimer je zagotovljena kakovostna razširljivost ter prenosljivost celotnega sistema. Za potrebe aplikacijske podatkovne baze, ki vsebuje podatke, vezane na strukturo in delovanje aplikacije, je bila pripravljena nova podatkovna shema znotraj obstoječega strežnika Oracle (Žibert, 2016). Do ostalih podatkov se dostopa neposredno ter posredno preko spletnih vmesnikov (servisov; npr. Visual Weather, EFAS SOS, itd.).

Spletni oz. aplikacijski strežnik je nameščen v namenski virtualni strežnik v računskem centru ARSO, pri čemer je aplikacijo možno zaganjati v prikazovalniku Google Chrome. VodePro povezuje skupaj različne meteorološke in hidrološke podatke na enem mestu. S tem orodjem bo hidrolog/uporabnik lahko dobil dober pregled trenutnih in predvidenih vremensko-hidroloških razmer. Prav tako omogoča pripravo dnevne hidrološke napovedi v besedi, hidrološkega opozorila ter razpošiljanje produktov na različna mesta.

Aplikacija je grajena v tehnologiji HTML5 in je samostojen program, ki teče znotraj brskalnika. Vsi prikazani podatki v aplikaciji so prejeti/poslani od/do preko »RESTful« servisa, ki deluje v okviru Python Django spletnega okvirja. »RESTful« servis je odgovoren za izvedbo poizvedbe in dostopa do podatkov v lokalno bazo podatkov Oracle, razčlenjevanje teh podatkov in posredovanje le teh v obliki

JSON. Servis prejme tudi podatke iz same aplikacije (besedilo hidrološke napovedi, besedilo opozorila, opozorilno vrednost, opozorilno karto, ...) v formatu JSON in le te shrani tudi v lokalno podatkovno bazo. Vsi ti intenzivni postopki se izvajajo na ravni baze podatkov s PL/SQL, tako da so »RESTful« storitve kar najbolj hitre.

Glavne komponente spletne aplikacije VodePRO, ki uporabniku omogoča delo s podatkovnimi viri in izvedbo procesov napovedovanja, so vsebinsko razdeljene na štiri dele:

- Površinske vode, ki vključujejo reke in jezera.
- Podzemne vode.
- Kvaliteta voda.
- Morje.

Vsi sklopi so v svoji strukturi podobni in se razlikujejo predvsem po virih podatkov, ki so privzeto prikazani na glavnih komponentah, zato se bomo na kratko osredotočili le na glavni vir, tj. površinske vode.

Poleg vsebinskih sklopov bo aplikacija omogočala še dva dodatna pogleda, in sicer:

- Hidrološko napoved, ki vsebuje vse podatke in orodja, ki jih hidrolog potrebuje za izdelavo redne dnevne hidrološke napovedi, vključno z izdajo hidroloških opozoril.
- Nadzorno ploščo (ang. *dashboard*), ki uporabniku aplikacije omogoča učinkovit pregled ključnih parametrov, ki jih v danem trenutku želi spremljati za izboljšanje uporabniške izkušnje

Naslednji razdelek opisuje osnovno strukturo spletne aplikacije, ki je bila prikazana na sliki 9. Zaradi narave in načina dela aplikacija izkorišča celotno razpoložljivo površino zaslona, kar omogoča učinkovito razporeditev komponent in preglednejše delo z manj premikanja in odpiranja dodatnih strani.

Ker so zasloni običajno širši, je na sliki levi del rezerviran za osnovne podatke (logotip naročnika, podatki o uporabniku, morebitna sporočila) ter navigacijo med posameznimi vsebinskimi sklopi (nadzorna plošča, površinske vode, podzemne vode, kakovost voda, morje, napovedi). Navigacijska struktura je dvonivojska in ob dveh robovih zaslona omogoča odpiranje različnih vsebin. Osrednji del aplikacije je namenjen odpiranju posameznih vsebinskih slojev izbrane glavne komponente. Znani prikazi so večinoma zelo specifični. Dodatna omejitve, ki otežuje povsem prosto konfiguracijo komponent, je v tem, da morajo biti komponente med seboj usklajene, tako da sprememba oz. izbira v eni povzroči spremembo tudi v drugi. Konfiguracija oz. zahteve za posamezne generične komponente

vključujejo prikaz časovnih serij podatkov, zemljevida, slike, besedila. Poleg generičnih komponent so bile razvite še specifične funkcionalnosti aplikacije, ki omogočajo izvajanje posameznih procesov (npr. hidrološka napoved).

Aplikacija VodePro je v prihodnje pomembna zaradi pričakovanega prehoda večine orodij in aplikacij v spletno okolje in rešitve v oblaku. Prav tako bo omogočala povezovanje z ostalimi viri podatkov, ki so dostopni preko različnih spletnih servisov. Osnovna naloga razvoja takšnega orodja je povezana s preglednostjo velike količine podatkov in produktov, ki omogočajo spremljanje razmer za pripravo kakovostnega opozorila z ustreznim opozorilnim časom v primeru nastopa možnega škodljivega delovanja voda.

Drug del, ki se bo v okviru razvoja aplikacije VodePro, še razvil je osnova za diseminacijo, ki je pri opozarjanju in alarmiranju bistvena. Kakovostna vzpostavitev toka informacij je osnova za delovanje odzivnega sistema ob poplavih kot tudi ob drugih ujmah. Pri tem sledimo naslednjim zahtevam:

- vzpostavitvi kakovostne odprtokodnega platforme za izmenjavo podatkov,
- prilagodljiv format izmenjave podatkov,
- kontinuirano osveževanje in nadgrajevanje usklajenih protokolov za izmenjavo informacij za zaščito pred naravnimi nesrečami.

2.4.8 PRIPRAVA NAPOVEDI IN OPOZORILA

Napovedovalni in opozorilni proces se zaključi preko enostavnega besedila, ki povzema splošno stanje hidroloških razmer. Pravočasno izdana poplavna opozorila so poleg kakovostne napovedi eden najpomembnejših elementov za zmanjševanje poplavnih škod. (Pogačnik et al., 2009). Vedno zahtevnejši pristopi napovedovanja razvoja vremena in odtoka voda povečujejo natančnost ter zanesljivost tako vremenskih kot poplavnih napovedi in s tem izdanih opozoril.

Opozorilne vrednosti kot meja za izdajanje opozoril se v Slovenije že dlje časa oblikujejo glede na dejanske posledice. S sprejetjem »Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030« v Združenih narodih pa je usmeritev oblikovanja opozorilnih vrednosti pridobila tudi uradno potrditev in usmeritev, saj Sandaijev okvir v svojem izhodišču poudarja potrebo po izdajanju opozoril glede na predvidene posledice. V tem pogledu je zelo veliko dela potrebno vložiti v pripravo in izbiro opozorilnih vrednosti, kjer se upošteva pretekle poplavne dogodke, analize tveganj, velikost porečij in značilnosti vodotokov, izdelane poplavne študije in obstoječe dejavnosti v prostoru. Njihovo določanje je mogoče

le z dobrim poznavanjem razmer na terenu ter v sodelovanju in pogovori z različnimi deležniki. V Sloveniji je za odziv zadolžena URSZR, zato je potrebno opozorilne vrednosti vedno uskladiti z njimi, kot tudi v čim večji meri z lokalnimi uporabniki. V sedanji sistem za hidrološko napovedovanje smo dodali na vseh prognoističnih profilih opozorilne meje, ki so vidne na vseh grafičnih prikazih za vse prognoistične lokacije in so podalga za izdajanje opozoril, kot tudi opozorilne karte. Opozorilna hidrološka karta je bila prvič uporabljena v operativnem delovanju in opozarjanju med poplavnimi dogodki od 22. in 27. decembra 2009. Grafični sistem opozorila je bil takrat »ad hoc« uporabljen. Produkt je bil dobro sprejet in je imel tudi zelo velik psihološki učinek. Na opozorilni karti je bila Slovenija razdeljena na 26 območij. Opozorilne barve rumena, oranžna in rdeča so nosile sledeč pomen:

- Rumena: Možno je zastajanje meteorne in zaledne vode. Manjše reke in vodotoki lahko hitreje narastejo in se razlijejo v manjšem obsegu. Plavje lahko zamaši posamezne vodne prepuste.
- Oranžna: Verjetne so posamezne poplave meteorne in zaledne vode. Vodotoki lahko poplavijo na širših območjih. Verjetne so motnje v prometu, oskrbi z energijo in pitno vodo. Plavje lahko zamaši posamezne vodne prepuste. Manjše reke in vodotoki lahko hitreje narastejo in poplavijo.
- Rdeča: Možne so poplave večjih razsežnosti. Poplavljeni so lahko tudi območja, kjer poplave niso pogoste. Hudourniški vodotoki lahko povzročijo hitre in silovite poplave. Možni so zemeljski plazovi. Verjetne so motnje pri oskrbi z energijo in pitno vodo. Promet je lahko oviran ali onemogočen.

Na tej osnovi hidrolog prognostik vsak dan opravi pregled hidrološkega stanja, ki v splošnem obsega:

1. Pregled stanja rek:

- pregled hidroloških podatkov izmerjenih ob 6:00 UTC,
- pregled pravilnosti podatkov (pretoka, vodostaja, temperature vode),
- stanje hidroloških postaj,
- pregled padavin iz različnih meteoroloških modelov, meteoroloških AMP postaj in izračunanih vrednosti iz meteorološke merilne mreže po podporečjih,
- pregled opazovanih vrednosti na postajah,
- pregled izračunanih napovedi sistema za hidrološko napovedovanje.

2. Pregled stanja morja:

- astronomske višine morja,
- dopolnitev astronomske napovedi plime z upoštevanjem zračnega tlaka, vetra in lastnega nihanja in

- višine valov.

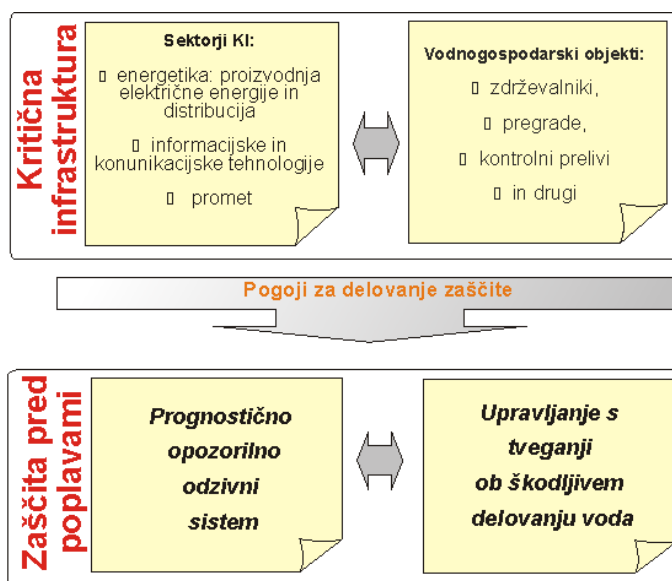
3. Pripravo besedila dnevne hidrološke napovedi za reke in morje.

V kolikor se pričakuje dogodek, ki bi lahko povzročil težave, dežurni hidrolog lahko in mora kadarkoli oceni to kot potrebno izdati tudi Hidrološko opozorilo, ki je sestavljeno iz besedila, hidrološke opozorilne karte in zvočnega zapisa. Poleg opisanih nalog je dolžnost dežurnega hidrologa tudi spremljanje in opredelitev ustreznosti opozorila – spletni obrazec za vnos ocene opozorila in kontrolo kakovosti po standardu ISO 9001:2008.

2.4.9 VPLIV KRITIČNE INFRASTRUKTURE NA SISTEM IN MOŽNOSTI ZA NAPREDEK OB PREHODU NA PROGNOŠTIČNO OPOZORILNO ODZIVNI SISTEM (POOS)

Od nabora pozitivnih lastnosti se je potrebno ozreti tudi proti negativnemu delu gradnje zahtevnih sistemov. Predvsem moramo pogledati, kako so zgrajeni sistemi odvisni od podsistemov in infrastrukture, ki je za delovanje POOS kritična. Po metodologiji raziskave Definicija in zaščita kritične infrastrukture v Republiki Sloveniji (Prezelj, 2008) je POOS funkcionalno najbolj odvisen od naslednjih soodvisnih sektorjev: energetika, informacijske in komunikacijske tehnologije ter promet. Na visoko stopnjo odvisnosti prognostičnih sistemov od kritične infrastrukture je bilo že pokazano (Pogačnik, 2008), pogoji za delovanje zaščite pred škodljivim delovanjem voda pa so prikazani na sliki 10.

Kvaliteto upravljanja s tveganji povečujejo predvsem hitre in kakovostne informacije. V kolikor je kritična infrastruktura, ki zagotavlja prenos informacij, kakorkoli onemogočena, se to odraža na učinkovitosti, natančnosti in operativnosti prognostičnih orodij. Pri tem želimo izpostaviti, da se predvsem pri neurjih in hudourniških poplavah ugotavlja neučinkovitost obstoječih klasičnih linearnih modelov opozarjanja v tekmi s časom (Creton-Cazanave, 2009). Hudourniške poplave zahtevajo od prognostikov in kriznih upravljalcev kar največjo stopnjo pazljivosti in preudarnosti. Sistemi in modeli za napovedovanje nam omogočajo orientacijo, vendar je zaradi pogoste nezanesljivosti napovedi potrebno razvijati dodatne alarmne sisteme in omogočati sočasno sprejemanje odločitev pri kriznem upravljanju.



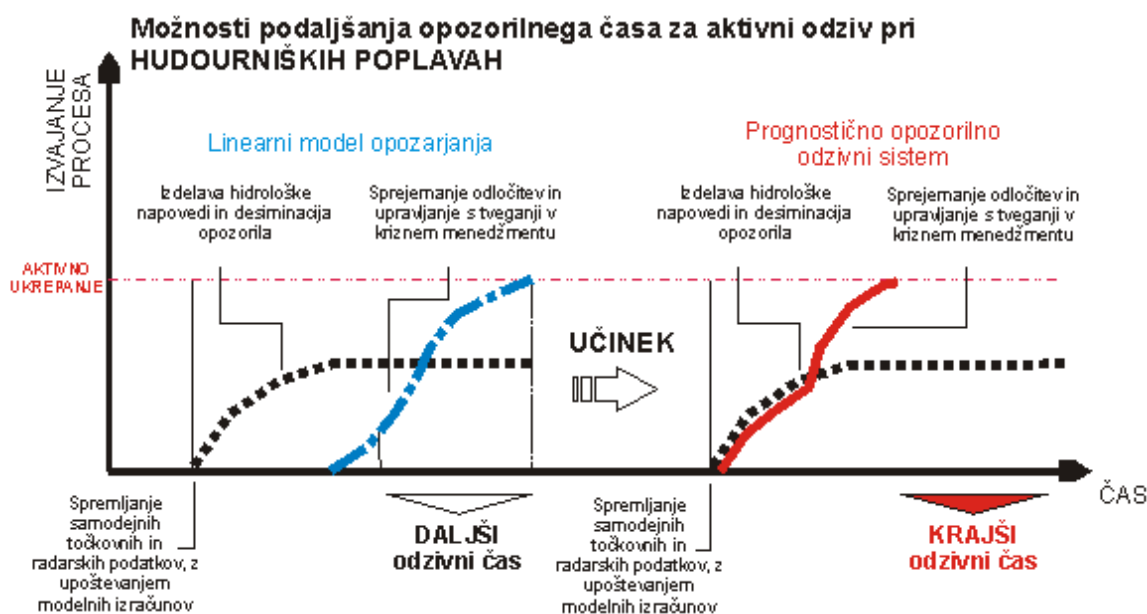
Slika 10: Pogoji za obvladovanje in upravljanje s tveganji ob škodljivem delovanju voda.
Figure 10: The conditions for risk management in flood situations.

V Sloveniji v vseh primerih zaščite in reševanja pred škodljivim delovanjem voda velja linearni model. Časovno in organizacijsko sistem zahteva veliko medresorskega usklajevanja z zapletenim prenosom odgovornosti na različne ravni organov upravljanja in vodenja. O oblikovanem sistemu varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami obstoja veliko pomislekov tudi s strani drugih avtorjev (Ušeničnik, 2002), saj sedanja upravna ureditev ne omogoča učinkovite medsektorske koordinacije ukrepov za varstvo pred naravnimi in drugimi nesrečami. Pretok informacij do pristojnih in odgovornih oseb za ukrepanje je v nekaterih delih sistema prezapleten in bi ga bilo potrebno poenostaviti. Preveč korakov pri potovanju informacije do vodij intervencij in reševanj podaljšuje odzivni čas, ki bi s skrajšanjem že lahko pripomogel k aktivnemu ukrepanju. Podobne organizacijske ugotovitve glede odziva navaja tudi Prezelj (2004) v svojem prispevku Nekatere ugotovitve iz študije Kriznega upravljanja in vodenja ob poplavah novembra 1998. Pomembno je sočasno delovanje seznanjanja s situacijo, pripravo odziva, alarmiranja, stalnega obveščanja javnosti in koordinacij, kar omogoča le učinkovito in kontinuirano izpopolnjevan sistem. V primeru hudourniških poplav, viharjev ter drugih naravnih nesreč lahko le tako zagotovimo hiter in učinkovit odziv. Do danes se sistem delovanja na področju zaščite in reševanja ni veliko spremenil. Tekom leta 2016 so se blikovali posveti in oblikovali so nov pedlog Načrta pred škodljiviim delovanjem voda. Ministrstvo za obrambo pa se je posvetilo tudi pripravi rešitev za Upravljanje kompleksnih kriz v Republiki Sloveniji (Vuga Beršnak, 2016).

Odzivnost in operativnost sistema je pri naravnih ujmah ključnega pomena, vendar je sistem odvisen predvsem od primerno usposobljenega osebja, ki bo lahko sprejemalo zahtevne odločitve in s svojim strokovnim delom pripomoglo k zaščiti ljudi in premoženja. Na slikah 11 in 12 sta prikazani situaciji

v linearnem sistemu prenosa opozorilne informacije, ki trenutno velja v Republiki Sloveniji in teoretično skrajša odzivni čas ob učinkovitem sodelovanju področij napovedovanja in odziva.

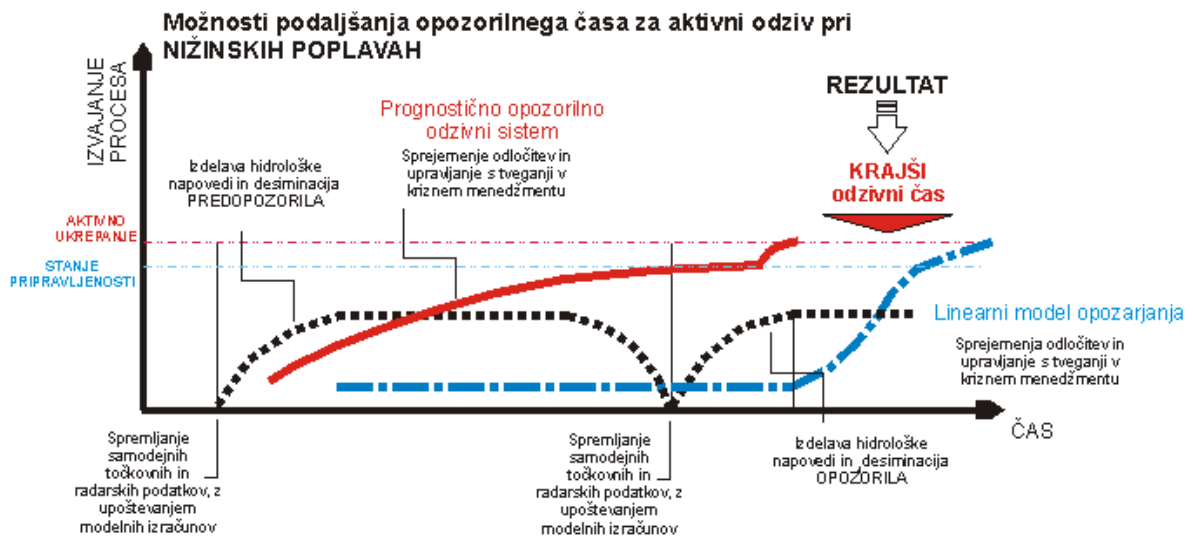
Skladno z veljavnim Načrtom zaščite in reševanja pred škodljivim delovanjem voda (v nadaljevanju Načrt) ARSO izda opozorilo o nevarnosti poplav, s čimer se pričnejo aktivnosti URSZR. V tem zaporedju se izgublja čas, ki bi ga ob sočasnem delovanju lahko uporabili za izboljšanje in izvedbo dodatne zaščite. Nekoliko primernejši je linearni model prenosa informacij pri nižinskih poplavah, vendar stopnja aktivnosti v primeru predopozoril še vedno ni na takšnem nivoju, da bi zagotavljala možnost celovitega aktivnega odziva v najkrajšem možnem času.



Slika 11: Nadgradnja linearnega sistema opozarjanja in odzivanja sistema zaščite pred škodljivim delovanjem voda v prognostično opozorilno odzivni sistem v primeru hudourniških poplav.

Figure 11: Upgrade of the classical linear warning and response system to flood forecasting warning and response system (FFWRS) in flash floods cases.

Učinkovitost delovanja POOS je na slikah 11 in 12 predstavljena kot območje med modro in rdečo krivuljo, kjer prehajamo od sedanje linearne strukture do optimalne izrabe združevanja procesa prognoze in vodenja odziva v okviru koncepta POOS. Učinkovitost delovanja POOS je kljub vsemu pogojena z vrsto naravne ujme, zmožnostjo njene napovedi in zaznavanja pojava z vsemi nepredvidljivimi elementi, ki jih lahko ekstremi dogodki nosijo s seboj.



Slika 12: Časovna razlika med linearnim modelom opozarjanja in odziva ter POOS.
Figure 12: The time difference between the linear warning and response system and the FFWRs.

Za vsak sistem pa velja, kljub njegovi dovršenosti, da deluje le tako dobro, kakor je močan njegov najšibkejši člen. Uspešnost takšnega sistema je tako odvisna predvsem od trajnega sodelovanja in aktivnega delovanja na vseh področjih upravljanja z vodami, vodnega gospodarstva in zaščite pred škodljivim delovanjem voda. V upravljanje z vodami morajo biti enakomerno vključeni aktivni in pasivni ukrepi, kjer mora imeti v preventivnem pomenu prednostno vlogo prostorsko načrtovanje z izdelanimi in jasno oblikovanimi strokovnimi vodnogospodarskimi podlagami.

2.5 KAKO OPREDELITI KAKOVOST HIDROLOŠKE NAPOVEDI

Allan H. Murphy v svojem raziskovalnem opusu na več načinov obravnava kakovost, učinkovitost, ciljno usmerjenost napovedovanja vremena. Pri tem je predvsem pomemben prispevek, ki ga je objavil leta 1992, kjer se v naslovu sprašuje kaj je dobra napoved. V njem Murphy (1993) opredeli tri vidike za dobro napoved.

- Doslednost – stopnja ustreznosti napovedi v odvisnosti od najboljše presoje prognostika, ki temelji na izkušnjah o preteklih dogodkih in znanju .
- Kakovost – stopnja ustreznosti napovedi glede na dejanske izmerjene vrednosti oz. zaznane dogodke.
- Vrednost – pomen, ki ga ima napoved za odločevalca oz. vodjo intervencije za organizacijo odziva in s tem povezanim zmanjševanjem škode.

Pri hidrološkem napovedovanju je takšno obliko potrebe po napovedovanju zaradi koristi izpostavil že Bernard (1939). Danes pa je postalo vprašanje koristnosti napovedi tudi pomemben vidik v dokumentih Združenih narodov, t.i. Priporočila UN za zmanjševanje tveganja pri naravnih nesrečah iz Sandai-a. Prispevek ima vodilno vlogo pri kasnejšem umeščanju vsebin in opredeljevanju pogojev za dobro napoved. V kolikor se ukvarjamo le s tehničnimi orodji ali po Murphyju (Murphy, 1993) z njegovim drugim vidikom in ocenjevanjem kakovosti »ang. *performance*« operativnih modelskih orodij pri podjetju Deltares (Deltares, 2015) priporočajo rutinsko uporabo nekaj standardnih statističnih orodij za razvojne ali operativne hidrološke sisteme. Predlagajo tri indikatorje določanja pravilnosti (točnosti) = kakovosti delovanja sistema za napovedovanje. Prvi pogoj je opozorilni čas, napoved prestopa opozorilne vrednosti in napoved časa prestopa opozorilne vrednosti, poleg rutinskega periodičnega preverjanja in monitoringa opozorilnih vrednosti. Opozorilne vrednosti ob tem predstavljajo vrednosti ob katerih nastopijo dejanske poplavne razmere različnih jakosti in obsega. Če pa upoštevamo morda še vidik koristi in kontinuitete (stalnosti) potem Khatibi (Khatibi et al. (2003) v svojem članku izpostavi, da učinkovit sistem zaščite in reševanja pred poplavami potrebuje pravilne in pravočasne hidrološke napovedi ter zanesljivo delovanje sistema za napovedovanje, ki so osnovni indikatorji kakovosti. Pri tem je pravilnost (točnost) opredeljena kot primerjava napovedanih vrednosti z izmerjenimi vrednostmi v smislu konice pretoka poplavnega vala, časa konice, višine vodne gladine, prelitja protipoplavne zaščite, zaznavanja poplavnih dogodkov itd. Poleg pravilnosti napovedi je pomembna pravočasnost, kar je avtor definiral kot čas, ki je potreben za izvedbo kakovostnega odziva glede na pričakovano poplavno nevarnost. Posebej je pomembna robustnost, zanesljivost in neprekinjeno delovanje sistema, kljub morebitnim izpadom podpornih sistemov (električno omrežje, komunikacijska mreža), ki spadajo pod kritično infrastrukturo. Ali če pogledamo nekoliko drugače. Khatibi s soavtorji izpostavi vse vidike vzdržnosti delovanja nekega sistema, ki ga je z distanco do hidroloških vsebin v grobem postavil že Murphy za napovedovanje vremena.

2.5.1 ZAKAJ POTREBUJEMO PREVERJANJE IN OCENJEVANJE KAKOVOSTI NAPOVEDI

Izraz napoved lahko opredelimo kot napoved bodočega stanja vremena, borznih tečajev, ali karkoli drugega, zato je verifikacija napovedi postopek ocenjevanja kakovosti napovedi. Napoved se preveri z ustreznim opazovanjem, kaj se je dejansko zgodilo, ali kako dober približek pravega rezultata smo z napovedjo dobili. Preverjanje je lahko kvalitativna ("izgleda v redu?") ali kvantitativno ("kako točno je bilo?"). V vsakem primeru lahko izluščimo informacijo o naravi netočne napovedi .

Napoved lahko zelo enostavno primerjamo z eksperimentom – opredelimo niz pogojev, naredimo hipotezo in pričakujemo njeno potrditev. Ko oblikujemo hipotezo oz. predvidimo rezultat pričakujemo

potrditev le-te. Enako je pri napovedovanju. Noben eksperiment (poskus) ni popoln dokler ne poznamo izida. Na enak način se ocenjujejo napovedi, šele ko se obdobje napovedi odvije. Trije najpomembnejši razlogi za preverjanje napovedi so (Jolliffe, 2003):

- Spremljanje kakovosti napovedi: kako natančne so napovedi in ali se izboljšujejo s časom ?
- Izboljšanje kakovosti napovedi: prvi korak k vedno boljši rešitvi je ugotovitev, kaj delaš narobe.
- Primerjava kakovosti različnih napovedanih sistemov: do kolikšne mere se sistemi razlikujejo, kateri sistem da boljše napovedi in na kakšen način oz. zakaj je ta sistem boljši?

Pogosto je mogoče preiti iz ene vrste napovedi v drugo preprosto s preureditvijo, kategorizacijo ali spreminjanjem mejnih vrednosti. Tako lahko za ocenjevanje časovnih vrst avtor predlaga uporabo vizualne, binomne, frekvenčne, zvezne in verjetnostne metode verifikacije, seveda v odvisnosti od potrebe in cilja.

Ker nas zanima predvsem kakovost napovedi, različni avtorji (Stanski, 1989; Murphy, 1993; Katibi, 2003) opredeljujejo metode verifikacije kakovosti z uporabo različnih atributov s katerimi lahko opredelimo kakovost napovedi. Ti so (WWRP, 2015):

- Sistemska napaka (pristranskost) (ang. *bias*) – povprečje razlik med napovedjo in opazovanjem.
- Korelacija (ang. *association*) – moč linearnega razmerja med napovedmi in opazovanj (korelacijski in determinacijski koeficient).
- Natančnost (ang. *accuracy*) - stopnja ustreznosti izračunane količine oz. napovedane glede na njeno dejansko (resnično) vrednost. Razlika med napovedano in opazovano vrednostjo je napaka. Nižja napaka, večja natančnost.
- Uspešnost - (ang. *skill*) – relativna natančnost napovedi glede na referenčno napoved. Pri hidrološkem napovedovanju prikažemo stopnjo napake modela glede na referenčno meritev ali referenčni model.
- Zanesljivost (ang. *reliability*) - povprečna stopnja ustreznosti med napovedanimi in opazovanimi (izmerjenimi) vrednostmi. Zanesljivost je predvsem način predstavitve kakovosti napovedi. Če so vse napovedane vrednosti v enakem območju, potem so v splošnem enako pristranske oz. imajo enako napako. Če napovedi oblikujemo v kategorije, lahko zanesljivost opazujemo v kategorijah, kar pomeni, da ima vsak razred (časovni doseg simulacije) lahko svojo napako.
- Ločljivost (ang. *resolution*) – sposobnost izvedbe izračuna modela za različne dogodke, ob upoštevanju frekvenčne porazdelitve. To pomeni, da se porazdelitev rezultatov napovedi "A"

razlikuje od distribucije rezultatov po napovedi "B". Če je mogoče uspešno ločiti eno vrsto rezultata od drugega potem ima model ločljivost.

- Ostrina (ang. *sharpness*) – težnja po napovedovanju ekstremnih dogodkov. V nasprotju s sistemom ali modelom, ki ima ostrino, je napoved brez ostrine področje "klimatologije". Ostrina je lahko samo lastnost napovedi in podobno kot pri resoluciji, ohranja to lastnost, tudi če je rezultat napačen (v tem primeru bi imel slabo zanesljivost).
- Diskriminacija (ang. *discrimination*) – pri diskriminantni analizi napovedi iščemo dimenzijo podatkov, ki najbolj pojasni razlike med skupinami podatkov. Spremljamo kako so skupine med seboj čimbolj ločene. Diskriminantna analiza ima tudi nalogo napovedovanja. Cilj diskriminantne analize je lahko tudi ta, da skupino napovedi kar se da dobro priredi vnaprej dani ali izmerjeni skupini podatkov.
- Negotovost (ang. *uncertainty*) - negotovost napovedi odraža razpršitev možnih rezultatov glede na referenčno napoved ali meritev.

Tradicionalno kakovost napovedi preverjamo z natančnostjo in uspešnostjo, saj je ta neodvisna od uporabnika (WWRP, 2016). Kljub temu je potrebno poudariti, da imajo drugi atributi verifikacije napovedi lahko močan vpliv na ocenjevanje same kvalitete. Predvsem je pomembno ustrezno predpostaviti, kaj želimo z analizami povedati in raziskati.

Vsekakor ob ocenjevanju kakovosti napovedi ne moremo prezreti povezave med kakovostjo oz. verifikacijo napovedi in vrednostjo te napovedi. Če je napoved zelo kvalitetna in dosega visoke verifikacijske kriterije ni rečeno, da pripomore prejemniku oz. da omogoča sprejemanje boljših odločitev.

Poskusimo situacijo ponazoriti z razvojem neviht in hudourniških poplav. Visoko resolucijski meteorološki modeli napovejo razvoj močnejših neviht z nalivi v neki regiji. Hidrološki modeli ob tem zaradi predvidene visoke intenzitete in količine padavin zaznajo poplave. Tako nevihte kot hudourniki so bili zaznani na širšem območju, vendar ne na pravih lokacijah predvidenih z modeli. Glede na verifikacijske kriterije kakovosti napovedi bi lahko rekli, da je takšna napoved slabe kakovosti, a v resnici je dragocena za prognostika in prejemnika, ki je izdal ustrezno javno opozorilo.

V nasprotnem primeru ima hidrološka napoved v naslednjih treh dneh nizko vrednost ob predvidenem večdnevem suhem in sončnem vremenu nad Slovenijo.

Poglejmo, kako je z situacijami, ko so stroški napačne napovedi zelo visoki in se pojavlja tendenca prepogostega napovedovanja nekega dogodka. Takšen primer je napoved megle na letališčih. V takšnih primerih je število napačnih napovedi lahko večje in so za oceno primernejši pozitivno naravnani testi uspešnosti napovedovanja, kot npr. stopnja zadetkov.

2.5.2 POVEZAVA MED METEOROLOŠKIMI IN HIDROLOŠKIM NAPOVEDOVANJEM

Povezovanje meteoroloških in hidroloških znanj na področju napovedovanja je neizbežno, saj se vse bolj prepletajo tako tehnike, metode, kot tudi poznavanje procesov za zagotavljanje splošnih ali ciljnih informacij za uporabnike. Opisan napredek numeričnega napovedovanja vremena je osnova tudi za hidrološko napovedovanje, saj je doseg in kvaliteta napovedi v veliki meri odvisno od točnosti numerične napovedi vremena. Poleg napovedi pa se hidrološki modeli tudi na modelskem področju vse bolj bližajo konceptu (distribuiranih) meteoroloških modelov. Za področje hidrološkega napovedovanja sta leta 1985 avtorja Blackie in Eeles opredelila, da so za ta namen povprečni fizikalni hidrološki modeli primernejši. V nasprotnem primeru Beven (1982) opredeljuje distribuirani hidrološki model kot bolj primeren za hidrološko napovedovanje na porečjih brez opazovanj, ki bi omogočale umerjanje povprečnega fizikalnega modela. Ker so od takrat močno napredovali vsi podporni sistemi, podatkovne baze, računske zmogljivosti, hkrati pa se je tudi razvoj orodij in produktov premikal v območje zelo kratkoročnih, sezonskih in skupinskih (ansambelskih) napovedim, pri čemer se vedno bolj uporabljajo kombinacije hidroloških in meteoroloških modelov glede na željen končni produkt (De Roo, 2003; Bartholmes et al., 2005; Zappa et al., 2010). Povezovanje modelske verige v vodnem krogu z upoštevanjem tudi oceanografskih sklopljenih modelov z meteorološkimi (Ličer et. al., 2016) tako dobiva popolnoma nove dimenzije možnosti razvoja ter obravnave naravnih procesov.

2.5.3 NAPREDEK HIDROLOŠKEGA NAPOVEDOVANJA

Sistemi za numerično napovedovanje vremena (NWP - *Numerical weather prediction*) temeljijo na trenutnih vremenskih razmerah (stanje atmosfere) in ključne izboljšave takšnih sistemov v zadnjih desetletjih so vezane na razvoj parametrizacije in inicializacije modela, analizo podatkov in načine asimilacije podatkov v modele (glej npr. Lynch, 2006). Naslednji mejnik je nastopil ob predstavitvi skupinskih (ansambelskih) numeričnih napovedi vremena (EPS - *ensemble prediction systems*), ko se izračuna več numeričnih napovedi za enak napovedni čas oz. simulacijski čas. Koncept ansambelskih napovedi zaobjema nelinearno in kaotično delovanje atmosfere z upoštevanjem negotovosti in omejitvami podatkov tako v prostorski kot časovni ločljivosti (Pappenberger, 2011). Deterministični numerični sistemi za napovedovanje vremena so že kar nekaj časa v uporabi tudi pri hidrološkem

napovedovanju, kjer so napovedni časi dosegali 1 uro do 2 dni v 80 letih prejšnjega stoletja. (Kitanidis and Bras, 1980). Njihova zanesljivosti in čas napovedi je postopoma rasla, v desetletju ob prelomu tisočletja pa se je njihova kakovost bistveno izboljšala (Palmer et al., 2007). Tako se je napovedni čas z enako kvaliteto napovedi podaljšal pri EPS od 2,5 do 4 dni in pri NWP 1,5 do 2 dni. Če povemo nekoliko drugače, kvaliteta napovedi, ki so jo numerični meteorološki izračuni vremena zagotavljali v letu 1995 za 2 dni v naprej je bila v letu 2005 enaka kot napoved za 4,5 do 6 dni. Pri tem moramo upoštevati, da se je napovedovanje za daljši napovedni čas izboljšalo predvsem zaradi uveljavitve in uporabe ansambelskih numeričnih napovedi vremena. Leta 1999 se je pričel izvajati evropski raziskovalni projekt EFFS »ang. *European Flood Forecasting System*« (EFFS, 1999–2003)., Tekom razvoja tega projekta se je na področju hidrologije pričela uporaba ansambelske napovedi padavin (de Roo et al., 2003). Kasneje se je z rezultati uporabe EPS v okviru projekta HEPS – »Hydrological ensemble prediction systems« nakazalo na zanesljivost pri podaljšanju napovednega časa. (Bartholmes and Todini, 2005). Tako so ti rezultati vodili v implementacijo EFAS, »European Flood (Alert) Awareness System« od leta 2002 dalje, ki je od predoperativne faze v letu 2005 (Thielen et al., 2009a) postal operativen od leta 2011. Kljub velikemu napredku pri uporabi skupinskih napovedi na širšem regionalnem nivoju, se je na področju manjših območij ohranjal koncept uporabe NWP modelov v kombinaciji z EPS, saj EPS sistemi niso zagotavljali ustrezne prostorske in časovne ločljivosti za manjša porečja. Tako se je v Sloveniji razvil Hidrološki prognostični sistem na osnovi NWP (Rush, 2006; Pogačnik, 2007; 2012), ki pa s sedanjim razvojem sledi izrazitemu napredku NWP in EPS na področju meteorologije.

Preglednica 4: Napredek v časovnem dosegu meteoroloških napovedi od 1939 do 2015.

Table 4: Forecast range progress in meteorological forecasting from 1939 to 2015.

1995	Zmožnost napovedovanja za 4 dni naprej
	=
2005	Zmožnost napovedovanja za 6 dni naprej
	=
2015	Zmožnost napovedovanja za 8 dni naprej
~1,8 (~1,3) dni na desetletje za pretoke (padavine)	

Numerične napovedi so iz leta v leto boljše. Florian Pappenberger v svojem blogu na portalu HEPEx dne 22.5.2015 (<http://hepex.irstea.fr/>) na zelo enostaven način opiše napredek pri napovedovanju. Po strokovnih in znanstvenih dognanjih se napovedni čas (Pappeberger, 2011) v meteorološkem/hidrološkem napovedovanju podaljšuje za 1,8 dneva na desetletje. V kolikor uporabimo

zelo grobo razlago bi lahko rekli, da je bila napoved za 1 dan v naprej leta 1939, tako dobra kot današnja napoved za trinajsti dan. Toda kdo si danes upa napovedati vreme za trinajsti dan?

Pri tem Pappenberger navaja, da glede na opise iz prispevka Sherman (1939) zadnji dosežki s področja hidrološkega napovedovanja še vedno uporabljajo zelo podobne postopke priprave numerične napovedi kot takrat. Tako bi lahko velik del opisanih postopkov in metod iz leta 1939 neposredno prepisali v modern učbenik, so pa učinkovitost in tehnične rešitve pripomogle k veliko enostavnejšemu in učinkovitejšemu delu. Kljub takšnemu širokemu pogledu o napredku napovedovanja, je nekoliko boljša primerjava od začetka uporabe NWP numeričnih matematičnih modelov od konca petdesetih let prejšnjega stoletja in današnjimi sistemi. V grobem bi lahko rekli, da napovedovanje s pomočjo numeričnih matematičnih modelov napreduje za dan vsakih 10 let. Takšna trditev drži le za obdobje uporabe numeričnih matematičnih modelov za napovedovanje vremena, pred tem je bilo kakršnokoli napovedovanje na današnjem nivoju neizvedljivo.

2.6 ZAKONSKA DOLOČILA

Spremljanje stanja okolja in informacije o okolju se izvajajo na podlagi Zakona o varstvu okolja (ZVO-1-UPB1)¹³. V državi se izvaja monitoring naravnih pojavov, stanja okolja in onesnaževanja okolja. Monitoring naravnih pojavov obsega spremljanje in nadzorovanje meteoroloških, hidroloških, erozijskih, geoloških, seizmoloških, radioloških in drugih geofizikalnih pojavov¹⁴.

Monitoring hidroloških pojavov obsega meritve in ocenjevanje količinskega stanja voda, ugotavljanje hidroloških značilnosti vodnih območij in vodnih teles, vodne bilance ter spremljanje, analiziranje in napovedovanje hidroloških sprememb na vseh elementih vodnega kroga. Naloge hidrološkega monitoringa so med drugim zlasti spremljanje hidroloških razmer in pripravljane ter posredovanje hidroloških prognoz¹⁵.

Zakon o meteorološki dejavnosti¹⁶ (ZMetD) določa, da pripravo in posredovanje verodostojnih meteoroloških informacij, ki so potrebne zaradi varstva okolja in varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami ter okolja, varnosti prometa, obrambe države, mednarodnega sodelovanja na področju

¹³ Uradni list RS, št. 39/06 – UPB

¹⁴ 1. in 2. odstavek 96. člena ZVO-1-UPB1

¹⁵ 1. in 2. odstavek 99. člena ZVO-1-UPB1

¹⁶ Uradni list RS, št. 49/2006, z dne 12. 5. 2006, 3. odstavek 1. člena ZMetD

meteorologije in drugih nalog države ali občin v javnem interesu, zagotavlja država, izvaja pa jo ministrstvo, pristojno za meteorologijo, kot državno meteorološko službo.

Dalje ZMetD v 10. in 11. členu opredeljuje naloge državne meteorološke službe in druge naloge, med katere spada tudi priprava in posredovanje napovedi o neugodnih in škodljivih hidroloških, ekoloških pojavih in procesih zaradi vremenskih ali podnebnih razmer ter njihovih sprememb in proučevanje meteoroloških, hidroloških, fenoloških in ekoloških pojavov ter razvoj in uporabo novih metod za analizo in prognozo teh pojavov.

Zakon o vodah¹⁷ (ZV-1-NPB7) v 94. členu določa naloge države na področju varstva okolja, izvajanja monitoringa in drugih pojavov, ki nastopajo v zvezi z varstvom pred škodljivim delovanjem voda in obsegajo zlasti spremljanje in napovedovanje izrednih hidroloških stanj, kot so poplave, hudourni voda, erozije, zemeljski in snežni plazovi ter led.

Podatki monitoringa so tudi del sistema opazovanja, obveščanja in alarmiranja v skladu s 50. členom Zakona o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami¹⁸ (ZVNDN). Uredba o organizaciji in delovanju sistema opazovanja, obveščanja¹⁹ na podlagi ZVNDN v svojem 2. in 4. členu določa dolžnosti Agencije RS za okolje. ARSO mora brez odlašanja in brezplačno v okviru neprekinjeno delujočih stalnih ali dežurnih služb za opazovanje meteoroloških, hidroloških, seizmoloških razmer sporočiti podatke o teh opazovanjih na CORS službe URSZR organa MO. Prav tako mora sporočiti vse podatke o naravnih in drugih pojavih, ki so ali lahko povzročijo naravno ali drugo nesrečo oziroma ogroženost, vključno z napovedmi meteoroloških in hidroloških razmer ter opozorili in nujnimi obvestili, ki so pomembne za varstvo pred naravnimi in drugimi nesrečami. Podrobneje o aktivnostih in nalogah Službe za hidrološko napovedovanje govori Državni načrt zaščite in reševanja pred poplavami (ZiR)²⁰, ki ga določa ZVNDN skupaj z Uredbo o vsebini in izdelavi načrtov zaščite in reševanja²¹.

Hidrološko napovedovanje je tudi eden od poudarkov načrta zmanjševanja poplavne ogroženosti, ki je določen v okviru Uredbe o vsebini in načinu priprave podrobnejšega načrta zmanjševanja ogroženosti pred poplavami²², na podlagi 60.a člena ZV-1-NPB7 in Direktive 2007/60/ES (Poplavne direktive)²³.

¹⁷ Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14 in 56/15: ZV-1-NPB7

¹⁸ Uradni list RS, št. 51/2006 z dne 18. 5. 2006: I. del: ZVNDN

¹⁹ Uradni list RS, št. 45/97, 5/00 in 105/07

²⁰ Številka: 812-03/2004-1, Pripravljeno dne: 15.4.2004, Osveženo: oktober 2010, verzija 3.1

²¹ Uradni list RS, št. 3/02, 17/02 – popr., 17/06, 76/08 in 24/12

²² 3. odstavek 15. člena, Uradni list RS, št. 7/2010 z dne 29. 1. 2010

²³ Direktivo 2007/60/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 23. oktobra 2007 o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti, UL L št. 288 z dne 6. 11. 2007, str. 27

2.7 OBSTOJEČ INDIKATOR KAKOVOSTI

Oddelek za hidrološko prognozo izdaja pristojnim službam vsakodnevna hidrološka poročila in opozorila pred izrednimi hidrološkimi pojavi. Opozorila so namenjena predvsem strokovnim službam in posredno medijem, z namenom pravočasnega opozarjanja pred izrednimi hidrološkimi pojavi, poplavami, sušo.

Leta 1999 je bil uveden sistem kakovosti (ISO 9001) za proces hidrološke prognoze. Pri tem se za obvladovanje in načrtovanje procesa v Oddelku za hidrološke prognoze vodi indikator, in sicer delež uspešnih opozoril v enem letu. Letno zastavljen cilj je vsaj 80 % pravih opozoril. Zastavljen cilj je realen ob predpostavki, da je večina visokovodnih primerov posledica stratiformnih vremenskih procesov. Zaradi pogostejših konvektivnih vremenskih procesov, zahtevnosti izdajanja pravih opozoril pri poplavljanju morja ter vpliva delovanja vodne infrastrukture, je zanesljivost opozoril v tem pogledu lahko letno manjša.

V okvir analize so umeščena opozorila pred izrednimi hidrološkimi pojavi kot podlaga pri obveščanju strokovnih služb in obveščanja javnosti. Analizirana je stopnja uspešnosti hidroloških prognoz v primerjavi z zaznanimi in zabeleženimi spremembami vodnatosti in učinki vodnih ujm ob izrednih hidroloških pojavih (viri: oddelek za hidrološko prognozo in Dnevni informativni bilten URSZR).

Pri izbiri metode so se na ARSO zgledovali po priporočilih WMO (Wang, 1994). Izbrana je bila najpreprostejša binomna metoda ocene opozorila, ki podajo osnovni indikator stopnje zanesljivosti. Delež uspešnih opozoril (I) (ang. *Critical Success Index* (CSI) glej enačbo 33), ki za Slovenijo izkazuje število uspešnih opozoril (UO) glede na vsoto skupnega števila visokovodnih primerov v Sloveniji in odvečnih opozoril (VP) ter neopozorjenih pojavov (OO) v enem letu.

$$I = 100 \frac{UO}{VP + OO} \quad (33)$$

Kjer so:

I – delež uspešnih opozoril v enem letu

UO – število uspešnih opozoril v enem letu

VP – skupno število visokovodnih primerov in odvečnih opozoril v enem letu

OO – neopozorjeni pojavi v enem letu

Po končanem izrednem spremljanju in obveščanju oz. po izdelani analizi o dejanskih hidroloških razmerah v Sloveniji, dežurni hidrolog preveri uspešnost (točnost) izdanih opozoril. V primeru, da vsebina izdanega opozorila ni bila ustrezna v primerjavi z dejanskimi hidrološkimi razmerami, naredi o tem zapis. Po opredelitvi uspešno, neuspešno ali ni bilo opozorila zapišemo še vzrok za neskladje, ki pripomore h kasnejši analizi meteoroloških in hidroloških razmer ter analizi organizacijskih in delovnih razmer vzpostavljenih služb ARSO.

Za oceno pravilnega ali napačnega opozorila so pripravljena naslednja vprašanja/merila do hidrološkega opozorila z možnima odgovoroma, pravilno ali napačno (Polajnar, 2004).

- Predvideno »hidrogeografsko« hidrometrično območje, kjer se pojavijo izredni hidrološki dogodki: Pravilno – Napačno.
- Predvidena tendenca spremembe vodnih količin ob izrednih hidroloških dogodkih: Pravilno – Napačno.
- Predviden scenarij – časovni razpored spremembe vodnih količin v okviru hidrometričnih »hidrogeografskih« območij med potekom izrednih hidroloških dogodkov: Pravilno – Napačno.
- Predvidena »hidrometrična« hidrogeografska območja ali porečja z možnostjo poplavljanja rek in morja: Pravilno – Napačno.

Na podlagi teh meril je opredeljeno, kdaj je opozorilo ovrednoteno kot uspešno ali neuspešno (Polajnar, 2004).

- Uspešno opozorilo je pravilno opozorilo, ki časovno in krajevno pravilno napoveduje kasneje zaznan izredni hidrološki dogodek.
- Neuspešno opozorilo nastopi, ko ni izdanega opozorila, a se je izredni hidrološki dogodek zgodil. Ali pa, ko je izdano opozorilo, a izredni hidrološki dogodek ni bil zaznan. Prav tako nastopi neuspešno opozorilo v primeru, ko je opozorilni čas od izdaje opozorila do pričetka izrednega hidrološkega dogodka v urah enak nič.

Zapis o primernosti opozorila se zabeleži kot sledi:

Preglednica 5: Primer preglednice za oceno kakovosti hidrološkega opozorila.

Table 5: An example for assessing the quality of hydrological warnings.

Območje	Visokovodni primeri (VP)	Uspešna opozorila (UO)	Nepravilna, odvečna opozorila (OO)	Ni opozorila
Slovenija skupaj	65	59	12/18 %	6/9 %

Podatki za izračun: leto 2004, I (2004) = 77 %

Glede na uspešnost hidrološkega in meteorološkega prognoziranja v zadnjih letih, opazamo močno povezavo uspešnosti hidrološkega prognoziranja s tipom hidrološkega leta, oziroma prevladujočim tipom visokovodnih razmer v tekočem letu. Na primer v letu 2012 smo beležili dva hidrološka ekstrema, sušo in velike poplave, soočeni smo bili tudi s kombinacijo naravnih in tehnično modificiranih poplav na reki Dravi. Kljub ekstremnim hidrološkim razmeram leta 2012, so bila opozorila na nivoju zanesljivosti opozoril prejšnjih let. Pogosto nam uspešnost zmanjšujejo predvsem napake pri napovedovanju poplavljanja morja. V letošnjem letu se pojavljajo pogoste težave s krajevno opredelitvijo zelo verjetnih hudourniških poplav zaradi intenzivnih nalivov. Sicer so opozorila tekom zadnjih nekaj let v večji meri pravočasna in krajevno ter količinsko dovolj natančna. Letni načrtovani cilji uspešnosti so največkrat doseženi in tudi trend uspešnosti je pozitiven. Z vidika izboljšanja napovedovanja pa obstoječ kriterij zakrije težave predvsem glede na obravnavano vrsto poplave. Nadgradnja postopka opredeljevanja uspešnosti z razširitvijo kriterijev, bi omogočile izboljšale preglednost o uspešnosti po posameznih vrstah poplav, kontrolo nad opozorilnim časom in dolgoročno tudi ohranjanje pozitivnega trenda obstoječega kazalnika.

2.8 PREDLOG METODOLOGIJE KAKOVOSTI NAPOVEDOVANJA PRI MODELSKEM IN OPOZORILNEM DELU

Kaj je "resnica", ko preverjamo napoved? "Resnica" so podatki, ki jih uporabljamo za preverjanje napovedi in običajno jih pridobimo iz opazovnih podatkov. To so lahko meritve padavin, vodostajev, pretokov, temperature, opazovanj posameznikov, intervencije gasilcev in tako naprej. V mnogih primerih je težko vedeti natančno resnico, ker obstajajo napake v meritvah in opazovanjih. Viri negotovosti vključujejo naključne napake in napake v sami meritvi, napake pri vzorčenju in druge napake. Upravičeno ali neupravičeno, večino časa lahko prezremo napake v opazovalnih podatkih. Napake v izhodišču so pri meritvah precej manjše od napak, ki jih lahko pričakujemo pri napovedih (visoko razmerje med signalom in šumom). Pri tem je predvsem pomembno zaupanje v validacijo rezultatov. Rezultati validacije napovedi so seveda bolj zaupanja vredni, ko sta količina in kakovost podatkov preverjanja visoka. Vendar je vedno smiselno predpostaviti in določiti okvirni razpon možnih napak. To je še posebej pomembno:

- za redke dogodke, kjer je velikost vzorca majhna,
- ko podatki kažejo veliko variabilnost in
- če želimo vedeti, ali je ena napoved bistveno boljša (statistično) od druge.

Vsi ti pogoji vsekakor veljajo za hidrološko napovedovanje. Glede na obstoječo metodologijo ocenjevanja predlagamo razširitev na dve osnovni področji:

- oceno numeričnih napovedi in
- oceno izdanih opozoril službe za hidrološko napovedovanje.

Na obeh področjih in pri določevanju novih pogojev je priporočljivo slediti trem ključnim vprašanjem (Murphy, 1987):

- Kako natančne so napovedi in ali se izboljšujejo s časom?
- Kje se še pojavljajo napake oz. pomanjkljivost in zakaj?
- Do kolikšne mere se sistemi razlikujejo, kateri sistem poda boljše napovedi in na kakšen način oz. zakaj je ta HPS boljši?

Z vidika zvezne verifikacije ocenjevanja natančnosti numeričnih napovedi se v operativni proces uvede izračun naslednjih meril:

- povprečna napaka,
- največja absolutna napaka,
- kvadratni koren povprečne kvadratne napake,
- volumska učinkovitost,
- koeficient determinacije,
- kazalnik učinkovitosti Nash-Sutcliffe in
- kazalnik učinkovitosti Kling-Gubta.

Ti podatki omogočajo osnovno interpretacijo učinkovitosti delovanja posameznih sistemov na različnih prognostičnih točkah, v različnih obdobjih, v različnih modelskih postavitvah in za izbran časovni doseg. Značilnosti opredeljenih meril in enačb so podane v poglavju 2.2.2.

Poleg različnih statističnih kazalnikov učinkovitosti se lahko uvede tudi enostavnejša in preglednejša binomska analiza kakovosti napovedi, s katero lahko kakovostno ocenjujemo učinkovitost delovanja numeričnih simulacij in izbrane napovedi prognostikov glede na posamezne opozorilne razrede. Preko deleža zadetkov ali verjetnosti pravilne napovedi (POD) in verjetnosti napačne (POFD) napovedi lahko pripravimo ROC krivuljo (ang. *receiver operational characteristics*), s katero lahko grafično prikažemo ravnotežje med pozitivno in negativno stopnjo klasifikatorja. Uporabljamo jo za prikaz binarnih klasifikacijskih sistemov (Wilks, 1995; Jolliffe, 2003; Strajnar, 2006). Ta kazalnik zadostuje za enostaven prikaz kakovosti in enostavno obliko odkrivanja vzrokov za morebitne pomanjkljivosti pri zagotavljanju operativnih rezultatov.

Uvedba objektivnih (merljivih) kazalnikov v oceno zanesljivosti izdanih opozoril v službi za hidrološko napovedovanje je zahtevnejša in ima nanjo zaradi velikega razpona možnih dogodkov velik vpliv izbira dogodkov, uvrščenih v analizo kakovosti.

Dvajset letni niz podatkov o obstoječemu merilu kakovosti že podaja pomemben podatkovni vir in zato je obstoječo metodo potrebno ohraniti. Vendar je potrebno zaradi dostopnosti operativnega hidrološkega modeliranja, avtomatizirane mreže in avtomatizacije procesa hidroloških opozoril dodati dodatna merila, ki so vezana na zahteve uporabnikov. Pri tem še vedno upoštevamo, da je učinkovitost kakovostne in pravočasne napovedi za različne tipe poplav zelo različna. Pri nekaterih tipih, kot so poplave zaradi porušitve ali napak pri upravljanju protipoplavne infrastrukture ali hidroenergetskih objektov, ni mogoče ocenjevati kakovosti hidrološke napovedi. Ob takšnih dogodkih je mogoče le spremljanje stanja, obveščanje in zelo kratkoročno napovedovanje. Izhodišče za določitev kazalnikov pri določevanju kakovosti opozoril so pričakovanja uporabnikov (Izvedena anketa v času izobraževalnega dogodka: Žled in poplave 2014), ki jih zanima predvsem: tip dogodka, lokacija, čas prestopa opozorilnih vrednosti, čas trajanja dogodka, višina konice in čas upada poplavnega vala pod opozorilno vrednost. Strokovne službe si dodatno želijo tudi enostavno matriko zanesljivosti in pogosto osveževanje opozoril. Postavljene zahteve so za objektivno spremljanje kakovosti procesa zelo visoke in zanje lahko le deloma poiščemo ter določimo metode za spremljanje kakovosti.

Pri ocenjevanju napovedi za hudournike, jezera, kraška jezera in umetne poplave lahko ocenjujemo glede na obstoječ indikator kritične uspešnosti (CSI) ali kazalnik uspešnosti (I), saj ni mogoče vedno zagotoviti merjenih podatkov za primerjavo. Ob tem se uvede še Gilbertov kazalnik uspešnosti in Hidkejev kazalnik uspešnosti, pri čemer se opredeli kriterije kontingenčne preglednice, kjer polja v njej opredelimo kot zapisano v poglavju 2.2.3.

Kakovosti izdanih opozoril glede na modelske napovedi in meritve na rekah lahko dodatno ocenjujemo po ugotovitvi pravilnosti opozorila v prostoru in ob pogoju, da je opozorilni čas večji od nič po naslednjih kriterijih:

- opozorilni čas,
- čas trajanja dogodka,
- čas prehoda opozorilne vrednosti,
- opredelitev konice,
- opredelitev zanesljivosti barvne napovedi hidrologa prognostika (binarna verifikacije).

Tipi visokovodnih dogodkov s primeri poplav so opisani v točki 2.1. Zato se v prvem koraku ocenjevanja opredeli visokovodni dogodek glede na tip vodnega telesa:

- hudournikik,
- reke,
- jezera,
- kraška jezera in polja,
- umetne poplave.

Kakovost izdanih opozoril glede na modelske napovedi pri vodotokih dodatno ocenjujemo po ugotovitvi pravilnosti opozorila v prostoru in ob pogoju, da je opozorilni čas večji od nič po naslednjih kriterijih:

- povprečni opozorilni čas,
- odklon konice v času in višini,
- odklon v času trajanja preseženih opozorilnih vrednosti,
- opredelitev zanesljivosti barvne napovedi hidrologa prognostika.

Za analizo dogodkov mora vodja procesa hidrološke prognoze opredeliti obdobje dogodka, čas konice in konico ter obdobje izdanih opozoril za obdobje dogodka. Tako pridobimo prvi kazalnik, ko se opredeli število izdanih opozoril za dogodek, saj s tem odgovarjamo na vprašanje povprečne pogostosti opozoril na dogodek.

Nato vodja procesa hidrološke prognoze izbere iz baz opozoril prvo pravo opozorilo, ki napoveduje ocenjevan dogodek. Iz razlike v času od oddaje opozorila se izračuna povprečni opozorilni čas po enačbi (Environmental Agency, 2005):

$$T_{\text{opozorila}} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^n T(\text{konice dogodka}) - \hat{T}(\text{opozorila}) \quad (34)$$

Kjer so:

$T_{\text{opozorila}}$ – Povprečni opozorilni čas

$T(\text{konice dogodka})$ – Čas konice dogodka

$\hat{T}(\text{opozorila})$ – čas oddaje opozorila za dogodek

N – število parov

V naslednjem koraku se naredi analiza časovnega prečkanja opozorilnih meja med numerično simulacijo izbranega časovnega dosega glede na prekoračitev (pri naraščanju ali padanju) izbrane ali

opozorilne vrednosti za vsako merilno mesto. S tem kazalnikom pridobimo vedenje o povprečni napaki napovedi skupnega trajanja vala nad izbrano mejo, kjer je T_{sim} in T_{obs} vsakokratna razlika v času prehoda določene kategorije.

$$T_BIAS = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^n |\hat{T}(sim) - T(obs)| \quad (35)$$

kjer so:

T_BIAS - povprečna napaka napovedi za skupno trajanje vala preko opozorilne vrednosti

$\hat{T}(sim)$ – čas, ko simulacija preseže ali upade pod izbrano oz. določeno opozorilno vrednost,

$T(obs)$ – čas, ko opazovana oz. merjena vrednost preseže ali upade pod izbrano oz. določeno opozorilno vrednost,

N – število parov.

Poleg tega je potrebno opredeliti odklon konice pretoka in časa izbranih visokovodnih valov glede na časovni doseg simulacije obravnavanega modela (Environmental Agency, 2005). Pri tem spremljamo absolutni povprečni odklon izbranih konic za posamezne numerične simulacije HPS in časovne dosege izračunov. Absolutni povprečni odklon napovedane/nih konic/e od dejansko izmerjene/ih je opredeljen z naslednjo enačbo:

$$MA_{konica} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^n |\hat{Q}_k - Q_k| \quad (36)$$

ker so:

MA_{konica} - absolutni povprečni odklon navedanih konice

\hat{Q}_k - napovedana konica pretoka za določen časovni doseg simulacije v izbranem obdobju dogodka,

Q_k – izmerjena in določena konica pretoka,

N – število primerjanih parov.

Zadnji kriterij je ocena vsakega izdanega grafičnega opozorila. Pri tem nas zanima kakšna bo kakovost vseh izdanih grafičnih napovedi/opozoril pri različnih časovnih dosegih, od trenutnega stanja +0 ur do +48 ur v prihodnosti, v korakih po +6 ur. Primerjava se izvede za vse merjene podatke na vodomernih postajah znotraj opozorilnega grafičnega območja v primerjavi z določeno opozorilno barvo na porečju

s strani prognostika. Za ocenjevanje veljajo enaka merila kot jih opredeljuje kontingenčna preglednica iz poglavja 2.2.3, ki se za prikaz oblikuje v krivulji operativne karakteristike.

Podatkov za ocenjevanje izdanih opozoril službe za hidrolško napovedovanje ni, zato ni možno prikazati analize. Na izbranem testnem obdobju v točki napovedovanja bodo zato v nadaljevanju naloge prikazane pilotne ocene ustreznosti numeričnih napovedi.

3 TESTNO OBRAVNAVANO POREČJE REKE SORE

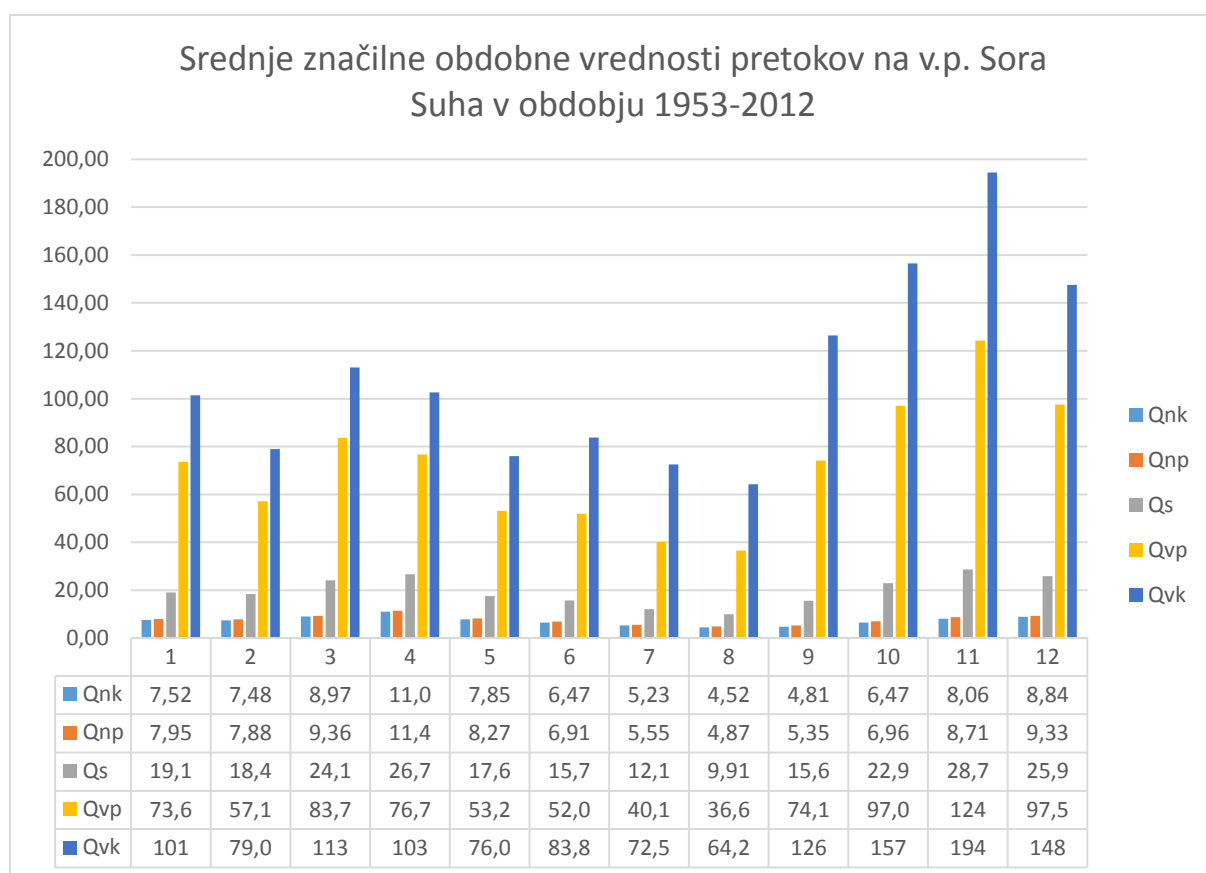
Reka Sora ima zaledje velikosti 568,86 km² in se nahaja v jugozahodnem delu Škofjeloškega hribovja. Po sotočju Selške in Poljanske Sore v Škofji Loki dobimo reko Soro. Združeni povirni hudourniški reki skupaj prvič merimo na merilnem mestu Suha in kasneje ponovno tik pred iztekom v reko Savo. Celotno povirje reke Sore se nahaja v območju Škofjeloškega hribovja. Reka Sora do sotočja dalje teče po južnem robu Sorškega polja proti jugovzhodu do Medvod in se izliva v reko Savo.

Reka Sora ima izrazit dinarsko dežno- snežni režim, s pogosto visokim povprečjem pretokov pozno jeseni (november, december) in spomladi (marec, april). Reka ima izrazito visoko nihanje in ima poleti polovico in več manj vode kot pozimi. Izrazit hudourniški značaj ob močnih padavinah, bodisi ob jesenskih deževjih ali ob neurjih, hitro in močno poveča pretok. Predvsem obe povirni reki Poljanska in Selška Sora tudi prestopita bregove in povzročita hude poplave z veliko hitrostjo vode, kar še dodatno poveča ogroženost. Zadnja dva večja poplavna dogodka na Selški Sori septembra 2007 in 2010 (Marchi et al., 2009) in Poljanski Sori leta 2012 in oktobra 2014 (Golob in Polajnar, 2015), kažeta na izrazito intenzivnost in nepredvidljivost dogodkov ter velik škodni potencial na tem območju. Za prikaz ocene kakovosti in operativnosti vzpostavljenega HPS smo izbrali hidrološko postajo Suha, ki je glede na dinamičnost procesov zahtevnejši primer obravnave.

3.1 OPIS HIDROLOŠKIH ZNAČILNOSTI POREČJA SORE NA VODOMERNI POSTAJI SUHA

V obdobju 1981–2010 so na vodomerni postaji Suha namerili največji pretok ob poplavah 19. septembra 2010 (467 m³/s). Drugi največji pretok je imela Sora ob katastrofalnih poplavah v Železnikih 18. septembra 2007 (431 m³/s). Ponovno je pretok presegel 400 m³/s 5. novembra 2012 (426 m³/s). Največji pretoka doslej je bil izmerjen 1. novembra 1990 (687 m³/s) in ob poplavah v Poljanski dolini 28. septembra 1926 (649 m³/s). Najmanjši pretok pa je bil izmerjen leta 2003, in sicer 31. avgusta (1,84 m³/s). Povprečni letni pretok je glede na srednje mesečne vrednosti (Slika 14) ob vseh naštetih viških le okrog 20 m³/s. V obdobju 1981–2010 je bila razlika med najmanjšim in največjim pretokom 373-kratna, kar nesporno dokazuje hudourniški značaj reke²⁴. Na sliki 13 mali pretok za mesec opredeljuje Q_{nk}, srednji pretok je Q_s, velik pretok Q_{vk}. Mali, srednji in veliki pretoki po mesecih v obdobju so označeni kot Q_{np}, Q_s in Q_{vp}.

²⁴ "Vode – mesečne statistike". ARSO, www.arso.gov.si, Pridobljeno dne 15. aprila 2016.



Slika 13: Srednje mesečne značilne obdobne vrednosti pretokov na v.p. Sora Suha v obdobju 1953 – 2012 (vir podatkov: ARSO).

Figure 13: Medium monthly discharge characteristic values at gauging station Sora Suha in the period 1953 -2012 (data source: ARSO).

Osnovi podatki o vodomerni postaji Sora Suha so:

- hidrološka šifra postaje ARSO: 4200,
- X koordinata GK: 113319; Y koordinata GK: 448320,
- hidrometrično zaledje F (km²): 568,86,
- stacionaža (km): 7,98,
- obdobje meritev od leta: 1953 do danes.

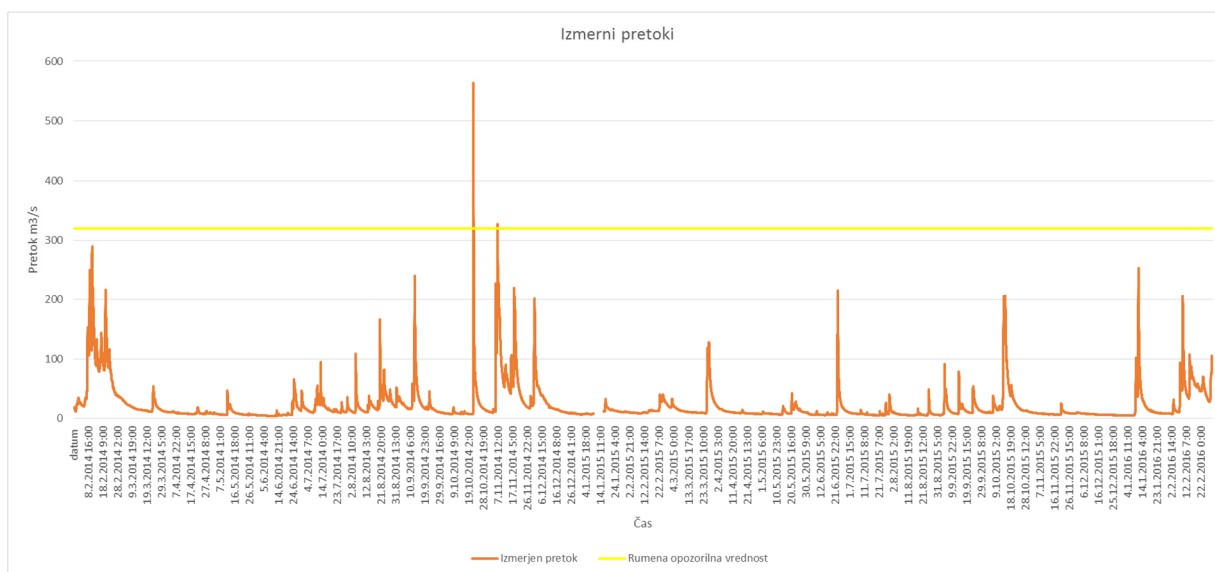
3.2 OPIS UPORABLJENIH PODATKOV

V analizi so bili v študijskem primeru uporabljeni podatki v časovnem obdobju od 30.1.2014 do 1.4.2016 za prognostično in vodomerno postajo Suha na reki Sori. V tem obdobju smo analizirali štiri modelske postavitve (Sava1, Sava1n, Sava4 in Sava4n) sistema za hidrološko napovedovanje. Osnovna razlika med modeli je sledeča. Črka n v imenu modela opredeljuje delovanje podatkovne asimilacije v

modelu, pri čemer so meteorološki vhodni podatki popolnoma enaki. Modelska zasnova Sava1 kot podatkovne vire pridobi točkovne meritve padavin, temperature ter podatke modela Aladin/SI in ECMWF. Model Sava4 za napovedovanje uporabi napovedi modela Aladin/ECDA. Ključna razlika med meteorološkima modeloma je v povečanju števila računskih točk modela Aladin/ECDA ter v podatkovni asimilaciji izmerjenih podatkov iz merilne mreže. Preostali elementi obravnavanih modelskih zasnov so enaki. V arhiv izračunanih simulacij se zapisujejo rezultati štirih izračunov dnevno in sicer ob: 1., 7., 13., in 19. uri dneva v času UTC+1 ali CET. Časovni doseg vseh shranjenih simulacij je 144 ur, od 0 do +72 ur ALASIN/SI in od +72 do +144 ECMWF. Za sam prikaz analize nas zanimajo rezultati do največ +72 ur. V tem časovnem dosegu bomo lahko pogledali razliko med rezultati uporabljenih meteoroloških modelov Aladin/SI in Aladin/ECDA. Analiza napovedi je opredeljena na različne časovne dosege simulacije v razmiku 12 ur. Za nekoliko lažje razumevanje podajmo opisni primer. Čas simulacije je 1. 3. 2016 01:00 CET in za časovni doseg simulacije +12 ur pomeni, da je to podatek v času CET 1. 3. 2016 13:00, ki ga lahko primerjamo z dejansko izmerjenim podatkom na vodomerni postaji ob CET času 1. 3. 2016 13:00. Opozorilne vrednosti na vodomerni postaji Sora Suha so: rumena: 320 m³/s, oranžna 489 m³/s in rdeča 557 m³/s. Rdeča opozorilna vrednost je bila v tem obdobju presežena le enkrat, dne 22. 10. 2014.

3.3 OPAZOVANO OBDOBJE

Velika večina visokih vod se je leta 2014 zgodila jeseni in zgodaj pozimi. Leta 2014 je bilo skupno 83 dni, ko so na vsaj enem porečju v Sloveniji veljale visokovodne hidrološke razmere. Avgusta so bile hudourniške poplave omejene na manjša območja, vendar so kljub temu na območju Polhograjskega in Škofjeloškega hribovja povzročile večjo škodo. Septembra je poplavljal reka Mura, katere pretok se je po letu 2005 ponovno približal najvišji izmerjeni vrednosti iz leta 1946 in je znašal 1327 m³/s. Konec oktobra so izdatne in močne padavine zajele pas od Cerkljanskega hribovja, Polhograjskih dolomitov do severnega obrobja Ljubljanskega polja. Močno so poplaveli Poljanska Sora in njeni hudourniški pritoki ter Gradaščica s pritoki. Škoda na območju Poljanske doline in širšega območja Polhovega Gradca je bila velika. Poplavljeno je bilo tudi strnjeno urbanizirano območje jugozahodnega dela Ljubljane (Golob in Polajnar, 2015).



Slika 14: Izmerjeni pretoki v obravnavanem obdobju od 14. 1. 2014 do 29. 2. 2016 (vir podatkov: ARSO, 2016).

Figure 14: Measured discharges in the evaluation period from 14. 1. 2014 to 29. 2. 2016 (data source: ARSO, 2016).

Na porečju reke Sore so bili dogodki v letu 2014 izrazito dinamični, medtem ko v letu 2015 ni bilo visokih vod. Če podrobneje pogledamo podatke, sta bila le dva dogodka, kjer je pretok na reki v.p. Sora Suha presegel 200 m³/s in sicer 26. 6. 2015 ter 15. 10. 2015. V letu 2016 je do konca meseca marca največji pretok 12. 1. 2016 znašal 244 m³/s.



Slika 15: Razmere ob poplavih oktobra 2014 na povodju Sore (Poljane nad Škofjo Loko, Poljanska Sora v Zmincu) (Vir: MMC, www.rtvsl.si)

Figure 15: The situation after and during floods in October 2014 at the Sora river basin (Poljane above Škofja Loka, Poljanska Sora in Zminc) (Source: MMC www.rtvsl.si)

4 OBDELAVA, REZULTATI IN PRIMERJAVA

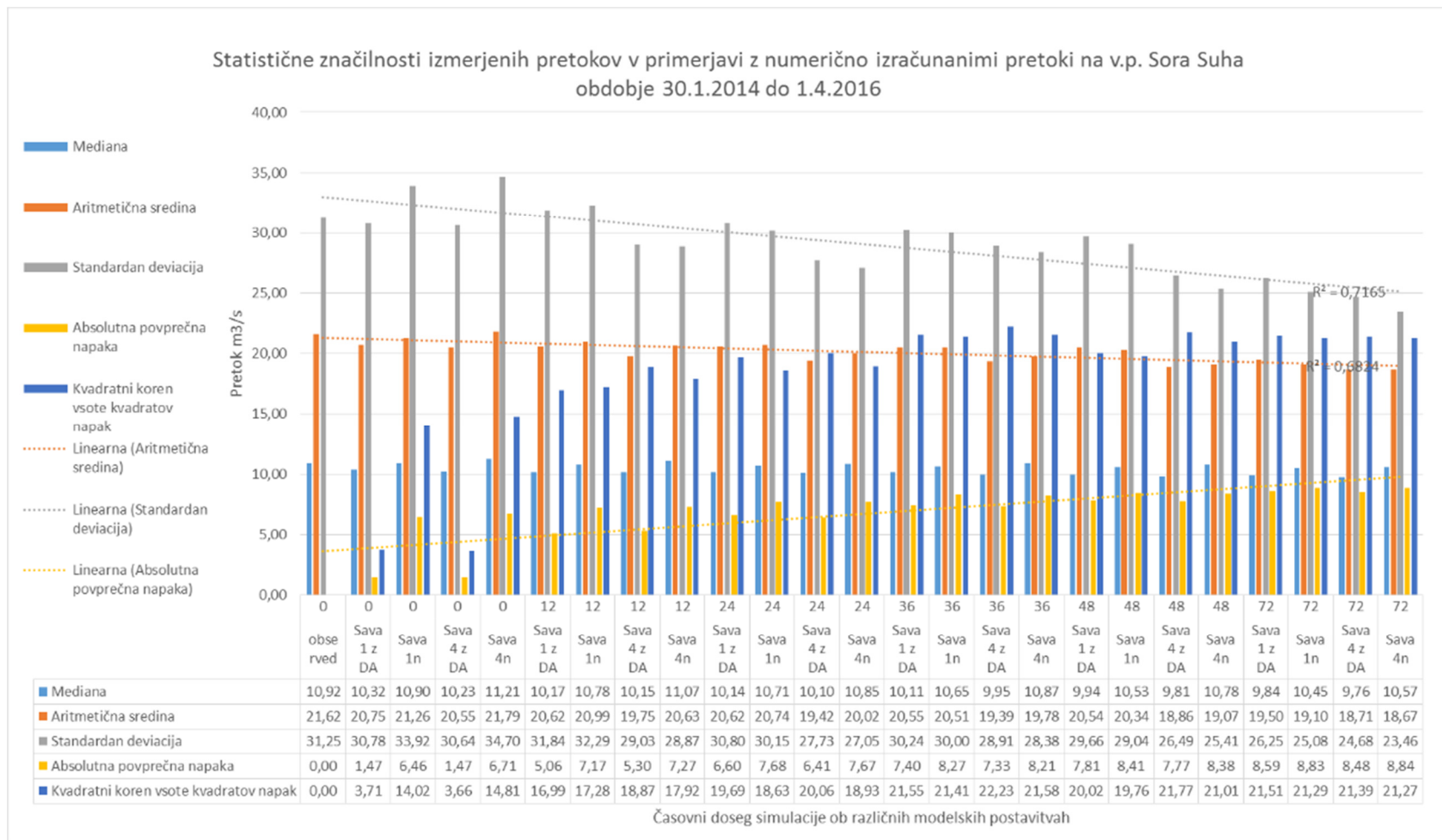
Analiza rezultatov je izvedena s pomočjo programskega okolja Python in knjižnic, ki omogočajo statistično in matematično obdelavo velike količine podatkov. Podatki so bili izvoženi iz podatkovne baze ARSO v datoteke. Rezultati statistične analize so bili izvedeni v okviru programskega jezika Python in v grafični obliki prikazani s pomočjo grafov v okviru grafičnih možnosti Python okolja ali MS Office Excela. Način takšne obdelave je bil izbran predvsem zaradi kasnejšega načrtovanega prenosa algoritmov v aplikacijo VodePro.

4.1 OCENJEVANJE NUMERIČNE TOČNOSTI MODELSKIH ZASNOV IN PRIMERJAVA REZULTATOV

V primeru izračuna numerične točnosti so bila v obdobju 14. 1. 2014 do 29. 2. 2016 za prognostično in vodomerno postajo Suha na reki Sora za štiri modelske postavitve (Sava1, Sava1n, Sava4 in Sava4n) sistema za hidrološko napovedovanje izračunana različna statistična merila, predstavljena v poglavju 5.2.2.

Na sliki 16 so prikazane osnovne statistične značilnosti napovedi in opazovanih vrednosti v obravnavanem obdobju. Aritmetična sredina ali povprečje izmerjenih pretokov v obdobju 1953 do 2012 je $19,7 \text{ m}^3/\text{s}$, zato aritmetična sredina v obravnavanem obdobju z vrednostjo $21,62 \text{ m}^3/\text{s}$ nekoliko pozitivno odstopa od letnega obdobjnega povprečja, predvsem zaradi velike vodnatosti v letu 2014. Vendar je bistveno ujemanje med povprečjem izmerjenih pretokov in različnimi časovnimi dosegi preostalih modelskih zasnov. Pri tem nam mediana z majhnimi odstopanji kaže na ustrezno porazdelitev obravnavanih časovnih vrst. Če pogledamo standardno deviacijo, nam modelski rezultati nakazujejo zmanjševanje raztrosa s povečanjem časovnega dosega simulacij in hkrati povečevanje absolutne povprečne napake, ki se zaradi hudourniškega značaja že po 12 urah močno poveča. Kvadratni koren povprečne kvadratne napake (ang. RMSE), ki v hidrološkem smislu opredeljuje odstopanje velikih pretokov, kaže na ustrezne rezultate modela le z izmerjenimi podatki, medtem ko je odstopanje močnejše že po 12 urah (slika16).

V času simulacije je prikazana tudi razlika med modelskimi postavitvami s podatkovno asimilacijo in brez nje, kar je vidno predvsem v razliki med povprečno absolutno napako in kvadratnim korenom napake za posamezne časovne dosege modelskih zasnov (preglednica 6).

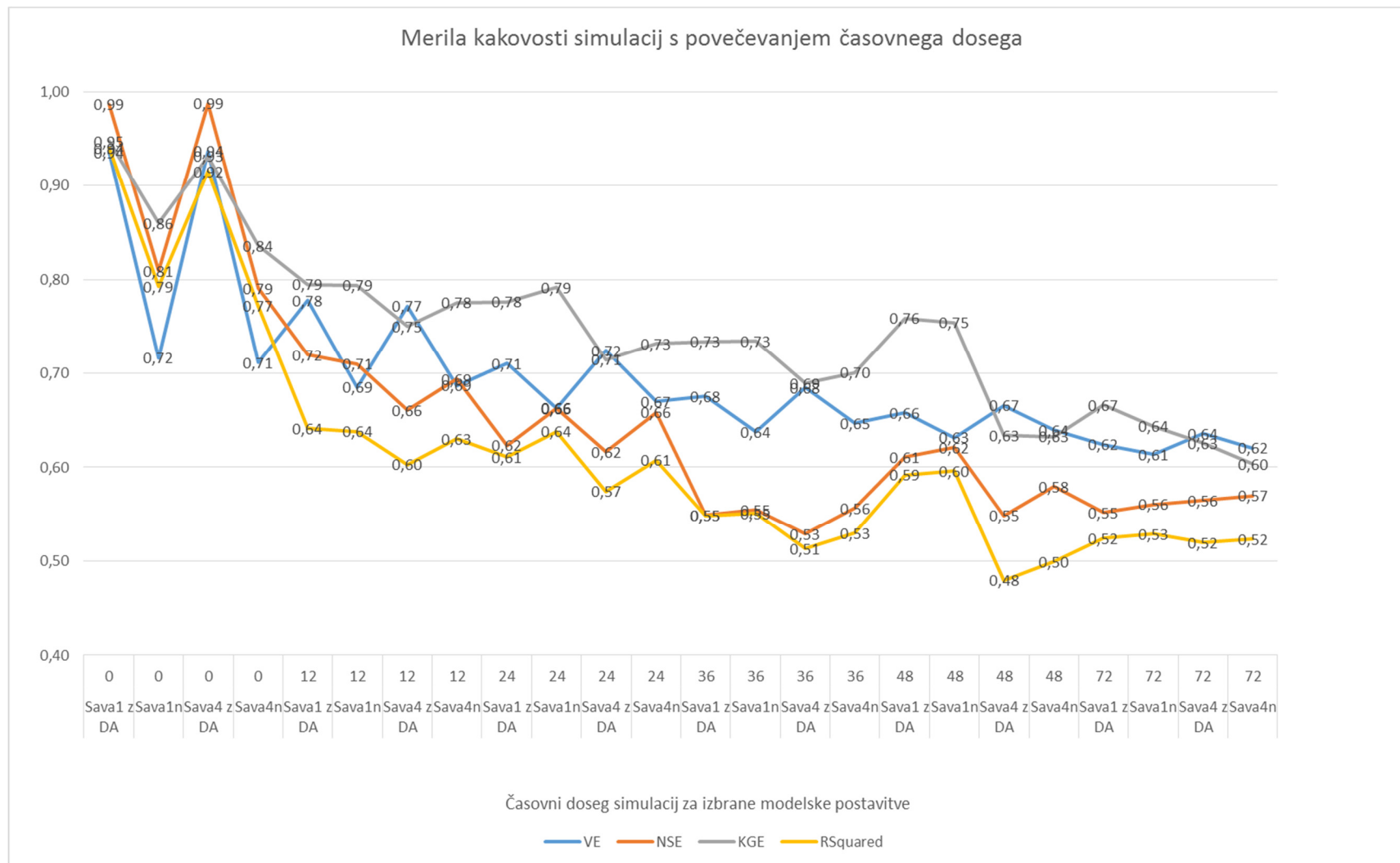


Slika 16: Statistične značilnosti izmerjenih pretokov v primerjavi z numerično izračunanimi pretoki na v.p. Sora Suha.
Figure 16: The comparison of statistical characteristics between measured flows to calculated flows at the gauging station Sora Suha.

Preglednica 6 : Izračunane statistične značilnosti v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.
Table 6: Statistical characteristics in the evaluation period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.

Model	Čas doseg sim.	Mediana	Povprečje (aritmetična sredina)	Standardna deviacija	Varianca	Povprečna absolutna napaka	Največja absolutna napaka	Največja negativna napaka	Največja pozitivna napaka	Kvadratni koren povprečne kvadratne napake (RMSE)
observed	0	10,92	21,62	31,25	976,27	--	--	--	--	--
Sava1 z DA	0	10,32	20,75	30,78	947,42	1,47	61,37	-61,37	57,00	3,71
Sava1n	0	10,90	21,26	33,92	1150,62	6,46	209,75	-81,56	209,75	14,02
Sava4 z DA	0	10,23	20,55	30,64	938,85	1,47	61,57	-61,57	57,00	3,66
Sava4n	0	11,21	21,79	34,70	1203,83	6,71	209,04	-83,06	209,04	14,81
Sava1 z DA	12	10,17	20,62	31,84	1013,95	5,06	312,55	-175,29	312,55	16,99
Sava1n	12	10,78	20,99	32,29	1042,70	7,17	275,09	-169,02	275,09	17,28
Sava4 z DA	12	10,15	19,75	29,03	842,71	5,30	436,29	-436,29	310,17	18,87
Sava4n	12	11,07	20,63	28,87	833,27	7,27	436,20	-436,20	273,42	17,92
Sava1 z DA	24	10,14	20,62	30,80	948,62	6,60	401,90	-401,90	264,62	19,69
Sava1n	24	10,71	20,74	30,15	908,87	7,68	401,89	-401,89	231,88	18,63
Sava4 z DA	24	10,10	19,42	27,73	769,06	6,41	439,48	-439,48	263,14	20,06
Sava4n	24	10,85	20,02	27,05	731,88	7,67	439,48	-439,48	234,07	18,93
Sava1 z DA	36	10,11	20,55	30,24	914,23	7,40	439,10	-439,10	383,37	21,55
Sava1n	36	10,65	20,51	30,00	899,78	8,27	439,07	-439,07	377,64	21,41
Sava4 z DA	36	9,95	19,39	28,91	835,86	7,33	449,99	-414,51	449,99	22,23
Sava4n	36	10,87	19,78	28,38	805,48	8,21	448,96	-414,49	448,96	21,58
Sava1 z DA	48	9,94	20,54	29,66	879,75	7,81	337,49	-337,49	258,16	20,02
Sava1n	48	10,53	20,34	29,04	843,38	8,41	337,37	-337,37	228,75	19,76
Sava4 z DA	48	9,81	18,86	26,49	701,54	7,77	443,55	-443,55	257,37	21,77
Sava4n	48	10,78	19,07	25,41	645,49	8,38	443,43	-443,43	230,00	21,01
Sava1 z DA	72	9,84	19,50	26,25	689,11	8,59	449,64	-449,64	126,53	21,51
Sava1n	72	10,45	19,10	25,08	629,09	8,83	449,57	-449,57	127,35	21,29
Sava4 z DA	72	9,76	18,71	24,68	608,98	8,48	436,86	-436,86	116,28	21,39
Sava4n	72	10,57	18,67	23,46	550,39	8,84	436,79	-436,79	117,08	21,27

Takoj, ko se časovni doseg simulacije poveča na 12 ur, se ta razlika močno zmanjša, kar ni pozitivno znamenje za rezultate operativnega delovanja. Povprečna absolutna napaka v obdobju hitro naraste in se šele po časovnem dosegu simulacije 24 ur ali enega dne skoraj ustali (preglednica 6). Pomembno je tudi spremljanje največje negativne, pozitivne in absolutne napake, ki podaja največji možen razpon rešitev. Širok razpon napak nakazuje ločljivost modela, deloma tudi ostrino, a majhno zanesljivost, natančnost ter povečano negotovost modelskih rezultatov. Kvadratni koren povprečne kvadratne napake (RMSE) nam okvirno opredeljuje napako v območju večjih pretokov. Vsi predstavljeni podatki pa vsebujejo močan vpliv nizkih pretokov in le nakazujejo splošen trend modela. Pogosto uporabljena merila učinkovitosti delovanja modelov so prikazana v preglednici 7 in na sliki 17.



Slika 17: Grafikon kazalcev (VE, NSE, KGE, R²) kakovosti napovedi s povečevanjem časovnega dosegga za izbrane modelske zasnove v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 17: Simulation indexes chart (VE, NSE, KGE, R²) for forecast quality with increasing lead time for different model setups in the time period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.

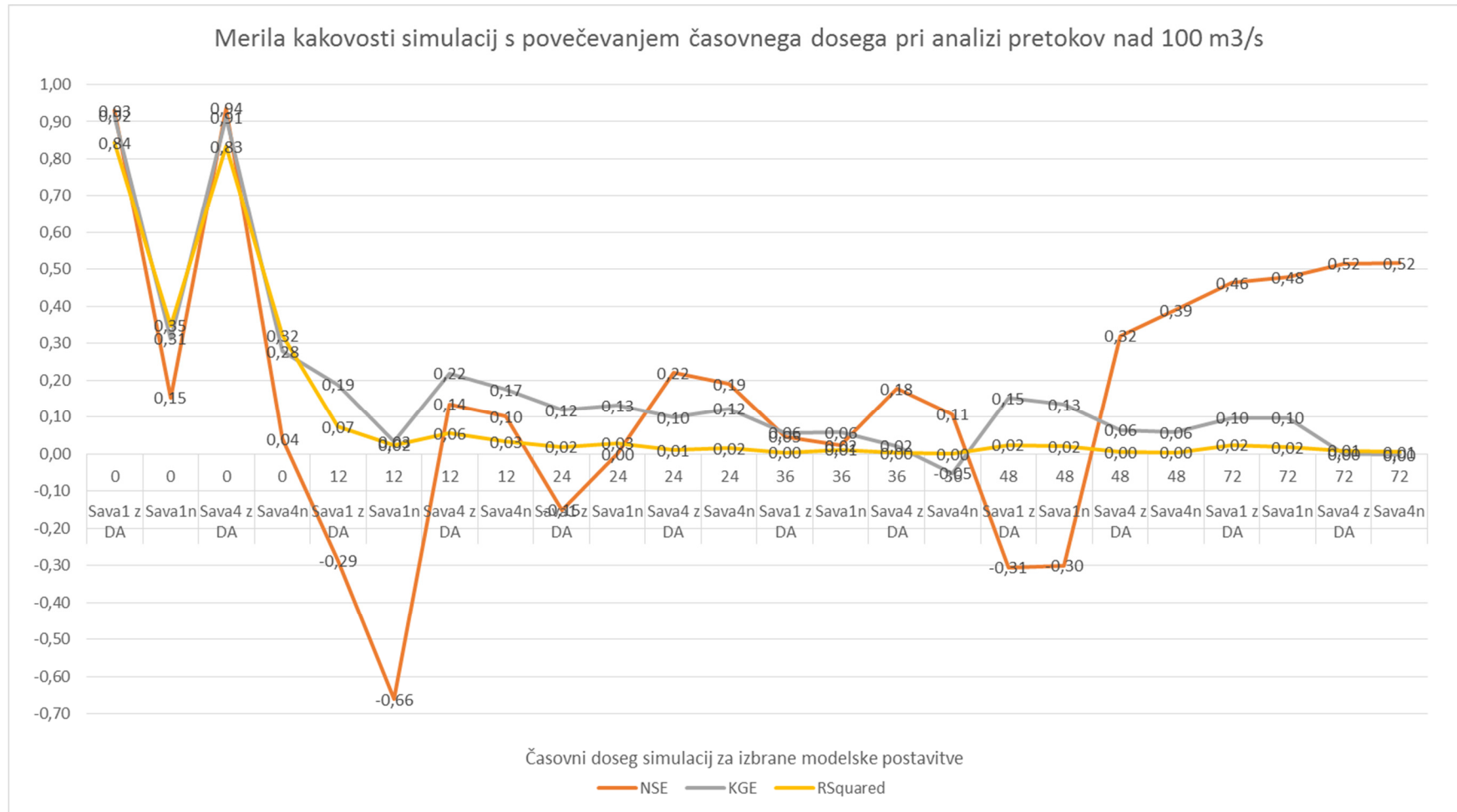
Preglednica 7: Standardni kazalniki zanesljivosti modeliranja v hidrologiji (VE, R2, NSE, KGE) v obdobju 14. 1. 2014 do 29. 2. 2016, v.p. Sora Suha.

Table 7: Standard measures of modeling reliability in flood forecasting (VE, R2, NSE, KGE) during the period of 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.

Model	Čas. doseg sim.	VE	R ²	r	NSE	KGE	BIAS - povprčna napaka	PBIAS	PERC_VOLUME
observed	0	--	--	--	--	--	--	--	--
Sava1 z DA	0	0,94	0,94	0,97	0,99	0,95	-0,74	-3,23	98,20
Sava1n	0	0,72	0,79	0,89	0,81	0,86	-0,23	-1,00	7,33
Sava4 z DA	0	0,94	0,92	0,96	0,99	0,93	-0,80	-3,46	15,96
Sava4n	0	0,71	0,77	0,88	0,79	0,84	0,39	1,67	-51,73
Sava1 z DA	12	0,78	0,64	0,80	0,72	0,79	-0,68	-2,97	101,64
Sava1n	12	0,69	0,64	0,80	0,71	0,79	-0,31	-1,36	-3,84
Sava4 z DA	12	0,77	0,60	0,78	0,66	0,75	-1,55	-6,68	261,90
Sava4n	12	0,69	0,63	0,79	0,69	0,78	-0,68	-2,92	187,45
Sava1 z DA	24	0,71	0,61	0,78	0,62	0,78	-0,81	-3,57	168,46
Sava1n	24	0,66	0,64	0,80	0,66	0,79	-0,69	-3,05	72,83
Sava4 z DA	24	0,72	0,57	0,76	0,62	0,71	-1,92	-8,28	175,53
Sava4n	24	0,67	0,61	0,78	0,66	0,73	-1,32	-5,68	93,36
Sava1 z DA	36	0,68	0,55	0,74	0,55	0,73	-0,88	-3,86	-60,41
Sava1n	36	0,64	0,55	0,74	0,55	0,73	-0,92	-4,06	-152,24
Sava4 z DA	36	0,68	0,51	0,72	0,53	0,69	-1,96	-8,42	-221,44
Sava4n	36	0,65	0,53	0,73	0,56	0,70	-1,56	-6,69	-276,20
Sava1 z DA	48	0,66	0,59	0,77	0,61	0,76	-0,89	-3,88	-18,88
Sava1n	48	0,63	0,60	0,77	0,62	0,75	-1,09	-4,76	-99,40
Sava4 z DA	48	0,67	0,48	0,69	0,55	0,63	-2,34	-10,07	103,71
Sava4n	48	0,64	0,50	0,71	0,58	0,63	-2,13	-9,17	60,99
Sava1 z DA	72	0,62	0,52	0,72	0,55	0,67	-1,94	-8,48	63,50
Sava1n	72	0,61	0,53	0,73	0,56	0,64	-2,35	-10,28	-27,64
Sava4 z DA	72	0,64	0,52	0,72	0,56	0,63	-2,62	-11,24	47,05
Sava4n	72	0,62	0,52	0,72	0,57	0,60	-2,66	-11,41	53,83

V splošnem model lepo ponazori le simulirane vrednosti s podatkovno asimilacijo, pri čemer je učinkovitost veliko nižja brez podatkovne asimilacije v trenutnem času. Ko povečujemo časovni doseg že v prvih 12 urah učinkovitost glede na koeficient Nash-Sutcliffe (NSE) in koeficient Kling-Gubta (KGE) upade na 0,68 (NSE) in 0,79 (KGE) iz 0,81 (NSE) ter 0,86 (KGE) pri simulaciji brez podatkovne asimilacije. Ko primerjamo simulacijo s časovnim dosegom dveh dni v primerjavi z izmerjenimi vrednostmi, upadeta obe merili še za približno 10 %. Slika 17 prikazuje nazoren vpliv podatkovne asimilacije in postopnega upada kakovosti oz. učinkovitosti napovedi s podaljševanjem časovnega dosega simulacije.

Ker nas zanima predvsem visokovodna časovna in količinska točnost numeričnih napovedi so bili v nadaljnji analizi izpuščeni vsi pretoki pod 100 m³/s. Slika 18 zato prikazuje operativno uspešnost modela pri napovedovanju višjih pretokov, ki bi ob hudourniškem značaju reke Sore lahko presegli opozorilne vrednosti in so pogojeni s prehodom postavljene meje 100 m³/s. Na sliki je lepo viden vpliv podatkovne asimilacije, ki vpliva na rezultat prikazan hidrologu prognostiku za modela Sava1 in Sava4. Rezultati



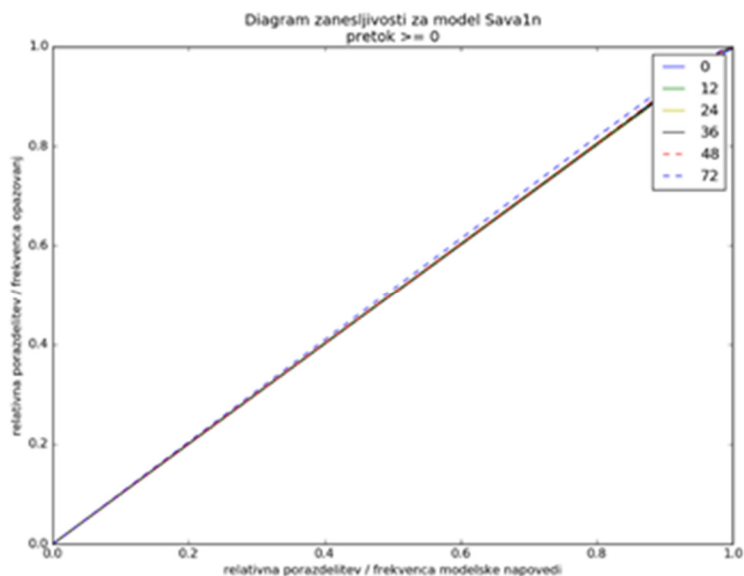
Slika 18: Grafikon kazalcev (NSE, KGE, R^2) kakovosti napovedi pri pretokih nad 100 m³/s s povečevanjem časovnega dosega za izbrane modelske zasnove v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 18: Simulation indexes chart (NSE, KGE, R^2) for forecast quality with increasing lead time over 100 m³/s for different model setups in the time period 01. 14. 2014 to 29. 02. 2016, gauging station Sora Suha.

samostojne simulacije so slabi, a presenetljivo naraste kakovost oz. učinkovitost napovedi v časovnem dosegu 72 ur pri kriteriju NSE. V tem časovnem dosegu lahko opazimo vpliv težnje merila NSE k srednjim vrednostim. V kolikor bi tudi koeficient KGE sledil temu porastu, bi lahko upravičeno trdili, da je smiselno upoštevati za napovedane/izračunane pretoke nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ le tiste s časovnim dosegom tri dni. Zaradi nizkih vrednosti KGE tega ne moremo trditi.

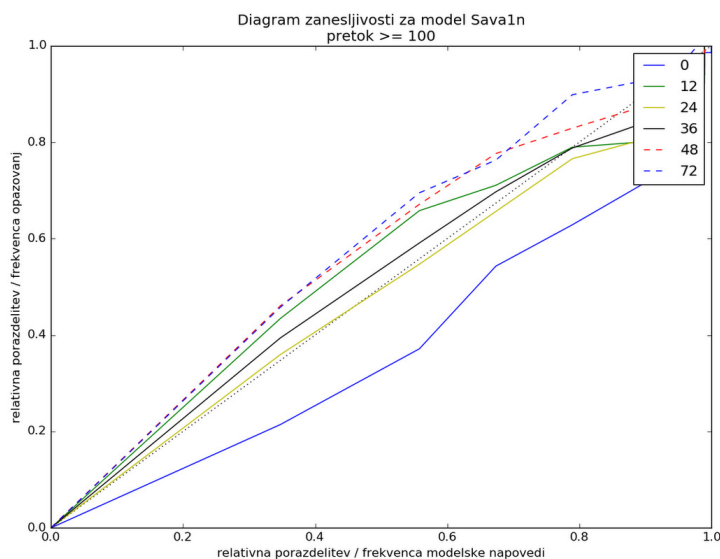
V tem primeru se prvič izkaže pomembnost dodatne analize s koeficientom KGE. Prav tako nam determinacijski koeficient (R^2) kaže na nepovezanost med napovedmi in izmerjenimi vrednostmi. Vse te statistike so vezane na diskretne spremenljivke in lahko v tem pogledu delujejo močno pristransko, saj bi morali z modelom tako časovno kot količinsko skoraj popolnoma zadeti napoved za doseganje dobrih rezultatov. Kot primernejši prikaz uspešnosti, zanesljivosti in natančnosti se pogosto uporabi zvezno obliko predstavitve. V ta namen lahko uporabimo diagram zanesljivosti in krivuljo operativne karakteristike.

Diagram zanesljivosti prikazuje razmerje med relativno porazdelitvijo opazovanj v primerjavi z relativno porazdelitvijo modelske napovedi glede na opredeljene časovne dosege in / ali območje ter obdobje pretokov. Ciljno ali željeno stanje je, da se vse razredne točke približajo diagonali kvadrata na risbi. Bolj ko krivulje odstopajo slabši so rezultati. Na slikah 19 do 22 so prikazani diagrami zanesljivosti za celoten in izbran niz podatkov, ločeno za pretoke nad $50 \text{ m}^3/\text{s}$ in pretoke nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vzorec je oblikovan v diskretno porazdelitev z razredi velikosti $25 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 19: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi vseh pretokov v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

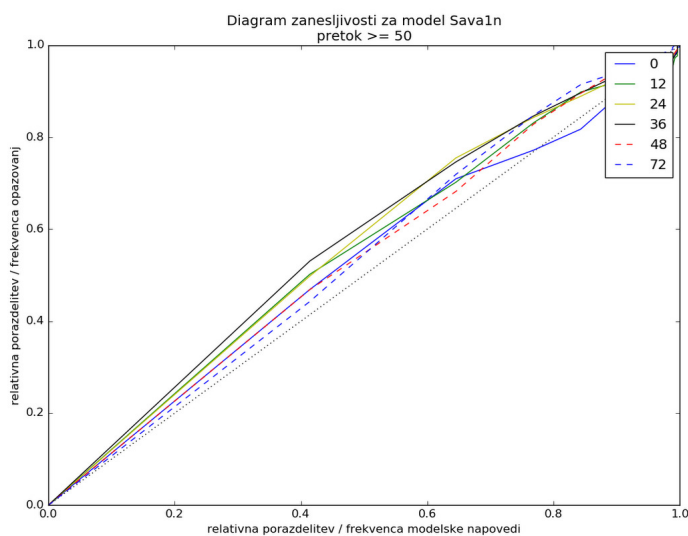
Figure 19: Reliability diagram for Sava1n model in discharge frequency distribution for the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.



Slika 20: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi pretokov nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

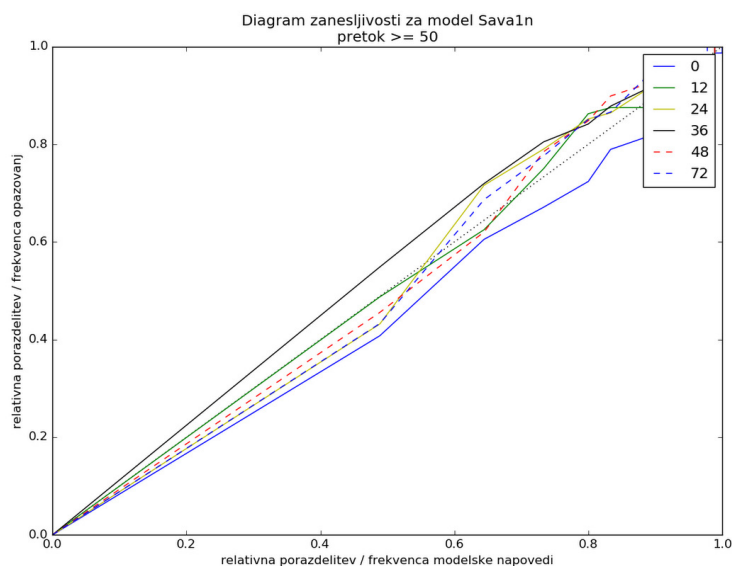
Figure 20: Reliability diagram for Sava1n model, above 100 m³/s in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.

Na sliki 19 so se krivulje izrazito približane diagonali, saj je okrog 80 % pretokov v obravnavanem obdobju manjših od 25 m³/s in takšen prikaz zelo močno vpliva na neustrezno predstavitev rezultatov. Rezultati na sliki 19 v taki obliki niso uporabni.



Slika 21: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi vseh pretokov nad 50 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

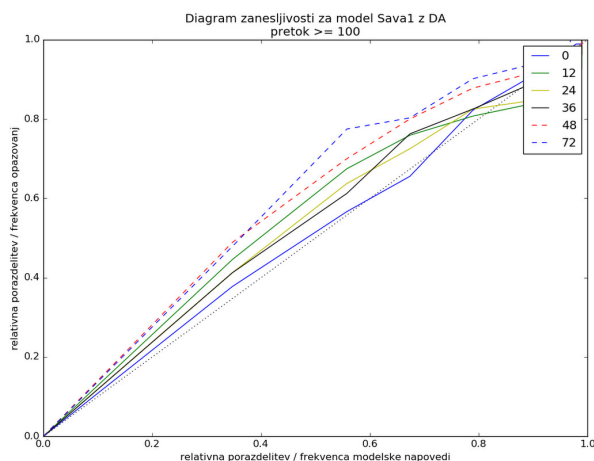
Figure 21: Reliability diagram for Sava1n model, discharge above 50 m³/s in the period 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.



Slika 22: Diagram zanesljivosti za model Sava1n pri razredni porazdelitvi vseh pretokov nad 50 m³/s v obdobju 01. 09. 2014 do 31. 12. 2014, v.p. Sora Suha.

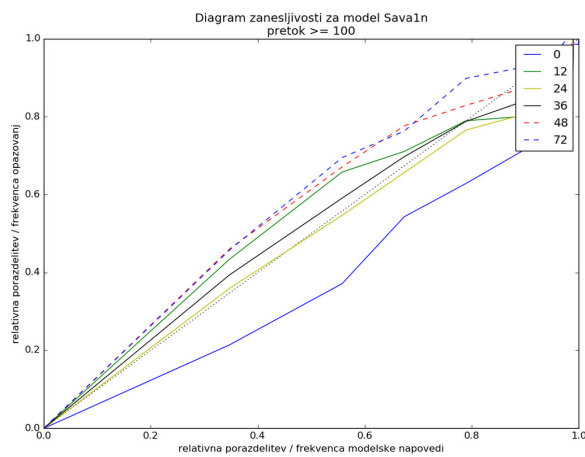
Figure 22: Reliability diagram for Sava1n model, discharge above 50 m³/s in the period 01. 09. 2014 to 31. 12. 2014, g.s. Sora Suha.

Za zagotavljanje kakovosti in operativnosti pri velikih pretokih je na sliki 20 veliko bolje prikazana porazdelitev in odstopanje simulacij od meritev. Predvsem je pomemben prikaz modela z dosegom 0 ur, ali trenutni izračun, kjer je razvidno močno odstopanje, saj je delež pretokov v razredih nad 100 m³/s premajhen. Rezultat nakazuje neko ločljivost v zaznavanju dogodkov, vendar se ponovno izkazuje izražena prenizka stopnja ostrine, natančnosti in zanesljivosti.



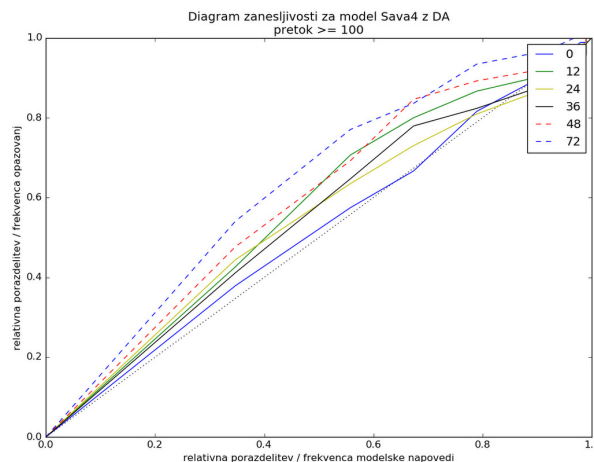
Slika 23: Diagram zanesljivosti, model Sava1 s podatkovno asimilacijo pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 23: Reliability diagram, Sava1 model, data assimilation included, discharges over $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.



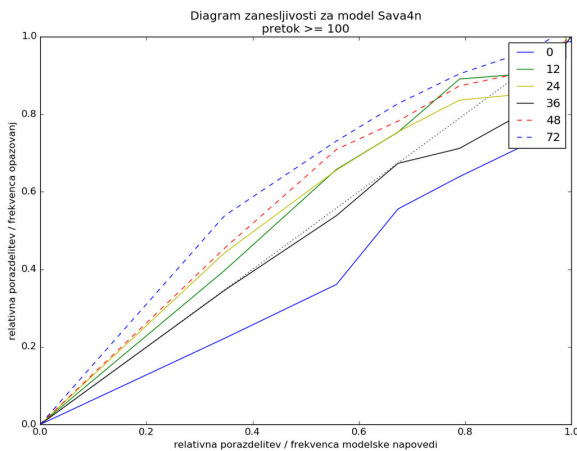
Slika 24: Diagram zanesljivosti, model Sava1n brez podatkovne asimilacije pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 24: Reliability diagram, Sava1n model, without data assimilation, discharges over $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.



Slika 25: Diagram zanesljivosti, model Sava4 s podatkovno asimilacijo pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 25: Reliability diagram, Sava4 model, data assimilation included, discharges over $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.

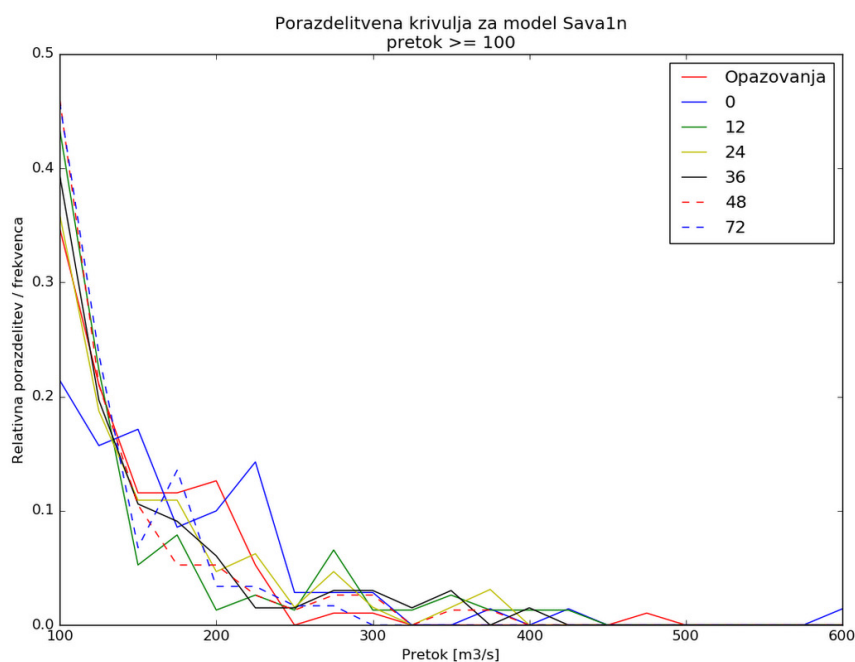


Slika 26: Diagram zanesljivosti, model Sava4n brez podatkovne asimilacije pri razredni porazdelitvi pretokov velikosti nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 26: Reliability diagram, Sava4n model, without data assimilation, discharges over $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in the period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.

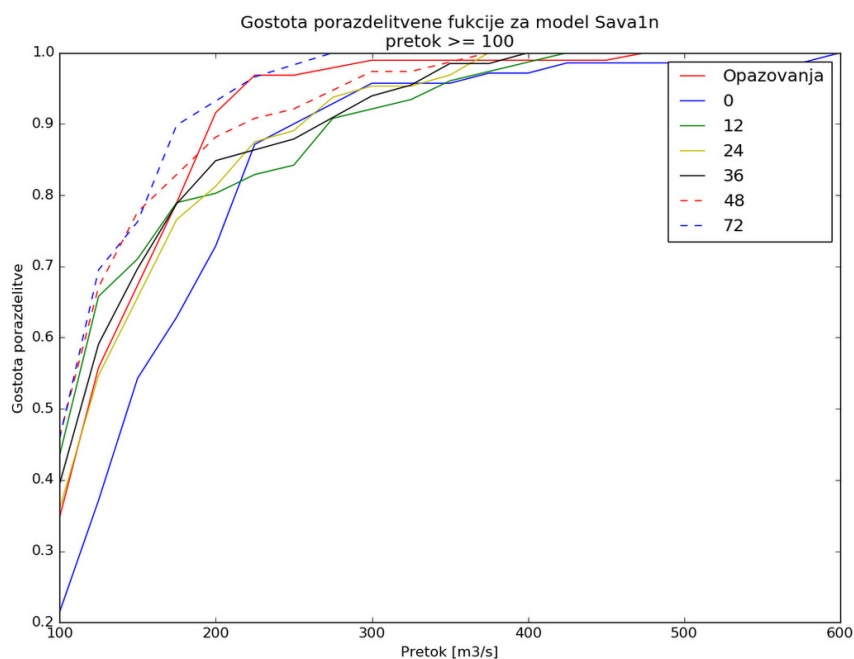
S slikama 21 in 22 smo želeli prikazati dinamiko in spreminjanje rezultatov glede na obravnavani obdobji. V vseh porečjih, predvsem pa v izrazito hudourniških s pretežno majhnimi pretoki, je za

prepoznavanje značilnosti potrebno oceniti katera območja pretokov želimo spremljati, jih ocenjevati in izvajati popravke za dolgoročno izboljšanje rezultatov. V obravnavanem primeru nas zanimajo predvsem redki dogodki nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Z določitvijo območja se nato lahko odločamo o modelski postavitvi, ki nam zagotavlja največjo verjetnost za uspešen rezultat. Tako lahko izbiramo med izbranimi modelskimi postavitvami in časovnimi dosegmi. Slike 23 do 26 prikazujejo razlike med modelskimi postavitvami. Tako pri modelski postavitvi Sava1 in Sava4 lahko razberemo, da podatkovna asimilacija pozitivno vpliva na nekoliko manjše odstopanje izračunanih vrednosti glede na merjene, vendar so modelske napovedi velikokrat višje od izmerjenih. Brez vpliva podatkovne asimilacije je predvsem numerična napoved s 36 urnim dosegom Sava1n porazdelitev visokega uspeha, saj je najbližje diagonalni. S tem ugotovimo, da je najprimerneje upoštevati modelsko zasnovo Sava1n v časovnem dosegu + 36 ur, vendar ne vemo za katero območje pretokov. Da pridobimo celovito informacijo še o območju, moramo diagramu zanesljivosti dodati še sliko relativne porazdelitve pretokov nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$, s katero lahko določimo, kateri del pretokov se najbolj ujame. Na podlagi slike 27 in 28 vidimo, da je to območje med $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in $175 \text{ m}^3/\text{s}$ za prej omenjeno modelsko zasnovo.



Slika 27: Porazdelitev pretokov, model Sava1n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 27: Discharge distribution, Sava1n model, without data assimilation, discharges over $100 \text{ m}^3/\text{s}$, period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.

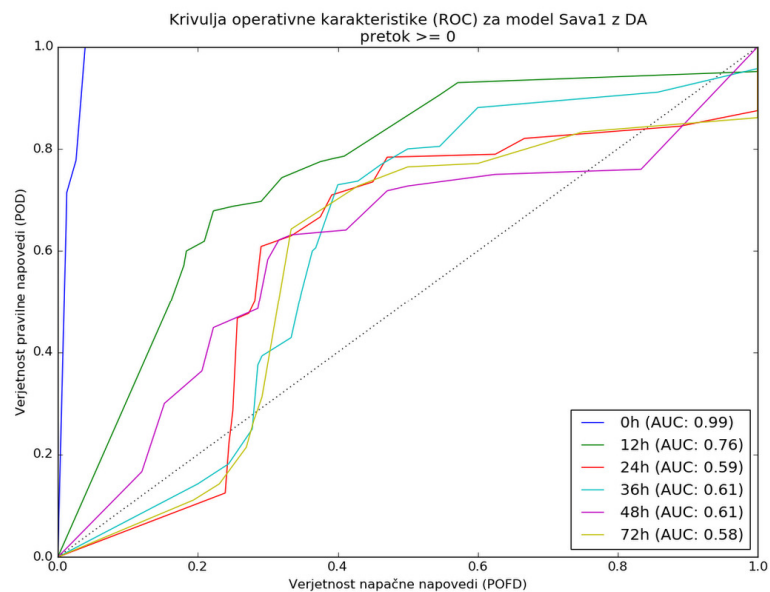


Slika 28: Vsota porazdelitve pretokov, model Sava1n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad 100 m³/s v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

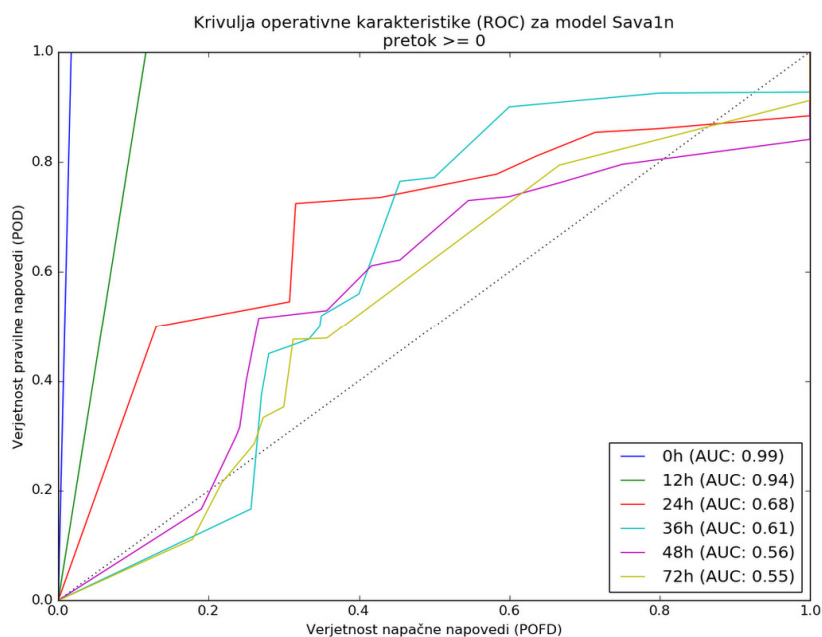
Figure 28: Cumulative distribution discharge function, Sava1n model, without data assimilation, discharges over 100 m³/s, period from 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, Sora Suha.

Verjetno najbolj učinkovita in zanesljiva verifikacijska metoda za določanje kakovosti modelske postavitve pri napovedovanju je relativna operativna karakteristika, ki jo prikažemo kot krivuljo operativne karakteristike (ROC). Gre za graf, kjer na abscisno os naneseemo verjetnost napačne napovedi (POFD) in na ordinatno os verjetnost pravih napovedi / zadetkov (POD). Sistem za napovedovanje je uspešen, če imamo čim večje število pravih napovedi ter hkrati čim manjše število napačnih napovedi. Zelo kvaliteten napovedovalni sistem bi bil tik ob ordinatni osi navzgor, nato pa tik ob premici $POD = 1$ proti desni. Diagonalna premica predstavlja napovedovalni sistem z enakim deležem pravih napovedi in napak ob vseh vrednostih praga – uspešnost takšnega sistema pa je enaka nič. Torej je najboljši kazalnik za uspešnost sistema površina pod karakteristiko (Strajnar, 2006).

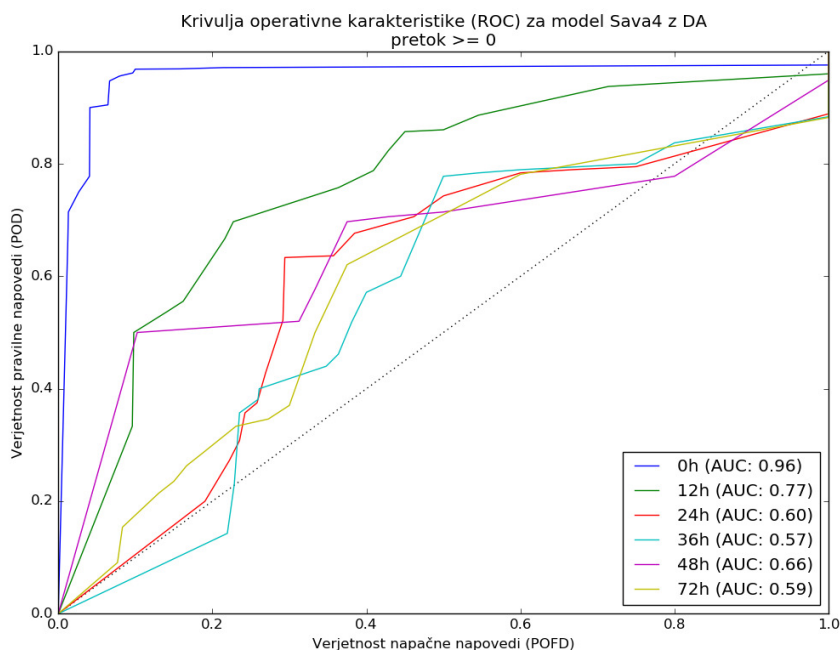
V nadaljevanju so prikazane krivulje relativne uspešnosti za območje pretokov med 100 m³/s in 600 m³/s. Krivulje so oblikovane na osnovi prilagojenih intervalov za ustrezen prikaz relativne operativne karakteristike. Ponekod krivulje padejo pod diagonalno premico, kar je znak, da so pri posameznih časovnih dosegih in predvsem v območju pogostejših velikih pretokov (nekoliko nad 100 m³/s) in ob zelo velikih pretokih modelske postavitve večinoma delovale neuspešno.



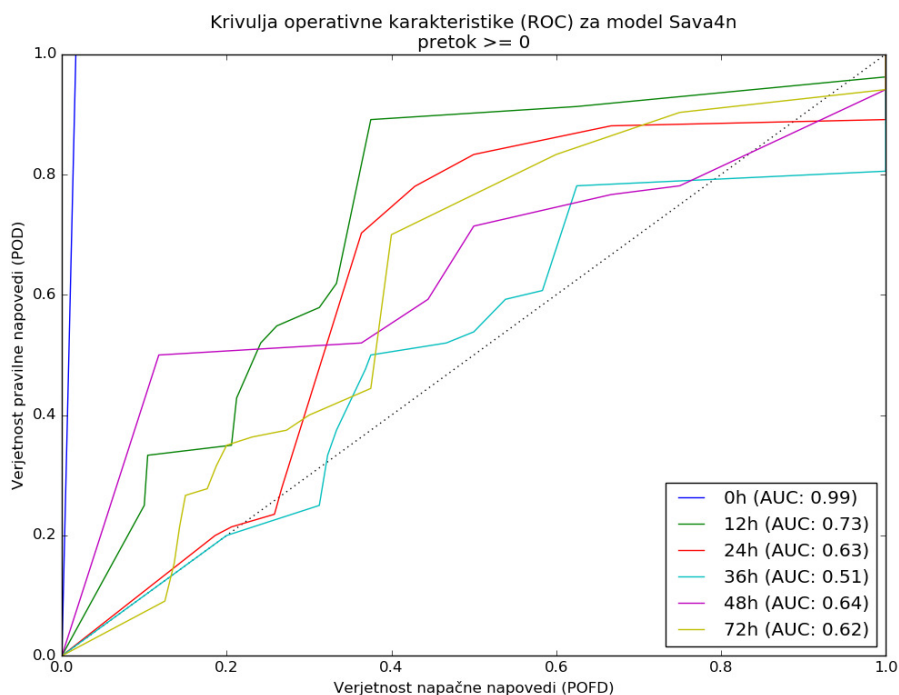
Slika 29: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava1 s podatkovno asimilacijo za pretoke nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.
Figure 29: Receiver operational characteristic, model setup Sava1 with data assimilation discharges over $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.



Slika 30: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava1n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad $100 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.
Figure 30: Receiver operational characteristic, model setup Sava1 without data assimilation, discharges over $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.

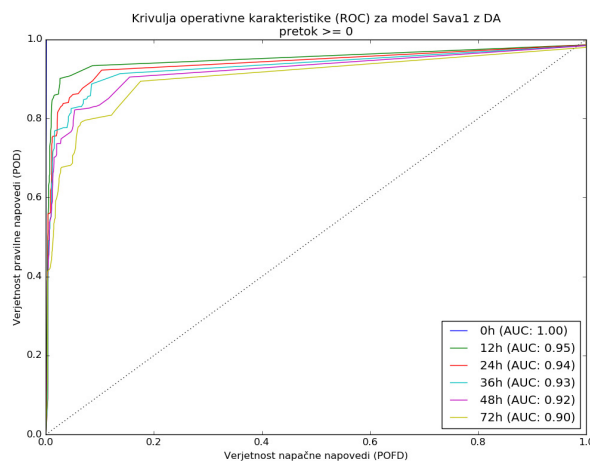


Slika 31: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava4 s podatkovno asimilacijo za pretoke nad $100\text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.
Figure 31: Receiver operational characteristic, model setup Sava4 with data assimilation, discharges over $100\text{ m}^3/\text{s}$ in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.



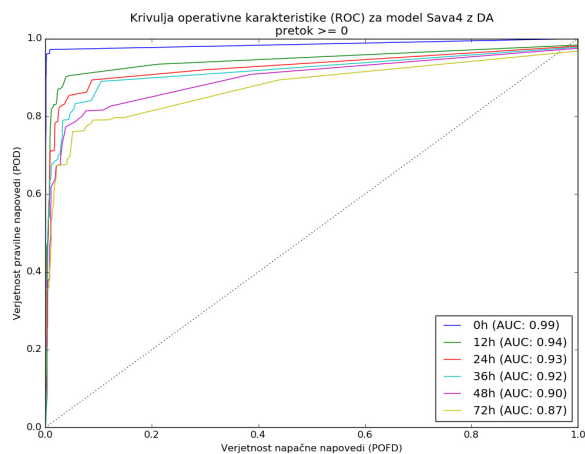
Slika 32: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava4n brez podatkovne asimilacije za pretoke nad $100\text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 14.1.2014 do 29.2.2016, v.p. Sora Suha.
Figure 32: Receiver operational characteristic, model setup Sava4n without data assimilation, discharges over $100\text{ m}^3/\text{s}$ in the period 14.1.2014 to 29.2.2016, g.s. Sora Suha.

Zelo podobno kot prej diagram zanesljivosti, graf na sliki 30 kaže podobno stopnjo zaupanja v verjetnost pravilne napovedi za časovni doseg +36 ur modelske postavitve Sava1n. Glede na prej zapisne pogoje uspešnosti pri ROC krivuljah za različno delovanje modelske postavitve, ima v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016 največjo površino pod krivuljami s pretoki nad 100 m³/s Sava4 z DA (s podatkovno asimilacijo), ki deluje na osnovi vhodnih meteoroloških numeričnih izračunov modela AladinSI/ECDA. Takšno trditev potrjujeta tudi sliki 33 in 34, kjer je prikazana relativna operativna karakteristika v celotnem obdobju, saj so rezultati modelske postavitve Sava4 nekoliko boljši kot modelske postavitve Sava1.



Slika 33: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava1 s podatkovno asimilacijo v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 33: Receiver operational characteristic, model setup Sava1 with data assimilation, in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.



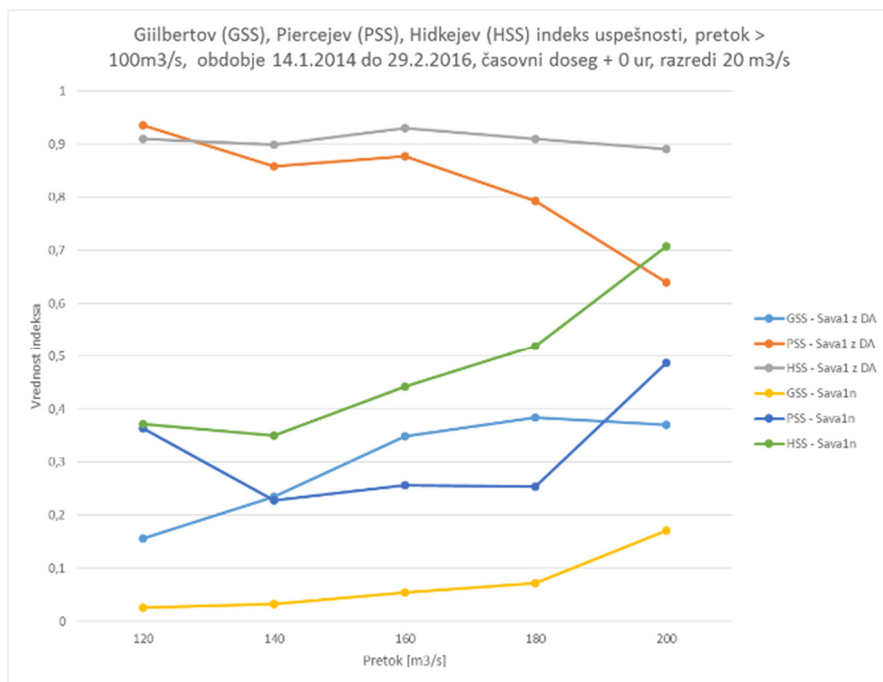
Slika 34: Krivulja relativne operativne karakteristike, modelska zasnova Sava4 s podatkovno asimilacijo v obdobju 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, v.p. Sora Suha.

Figure 34: Receiver operational characteristic, model setup Sava4 with data assimilation in the period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, g.s. Sora Suha.

Oba rezultata relativne operativne karakteristike nakazujeta zanesljivost in operativnost pri delovanju sistema in dopolnjujeta statistična merila iz prvega dela analize, ki so veliko bolj primerna za umerjanje ali hidrološko analizo.

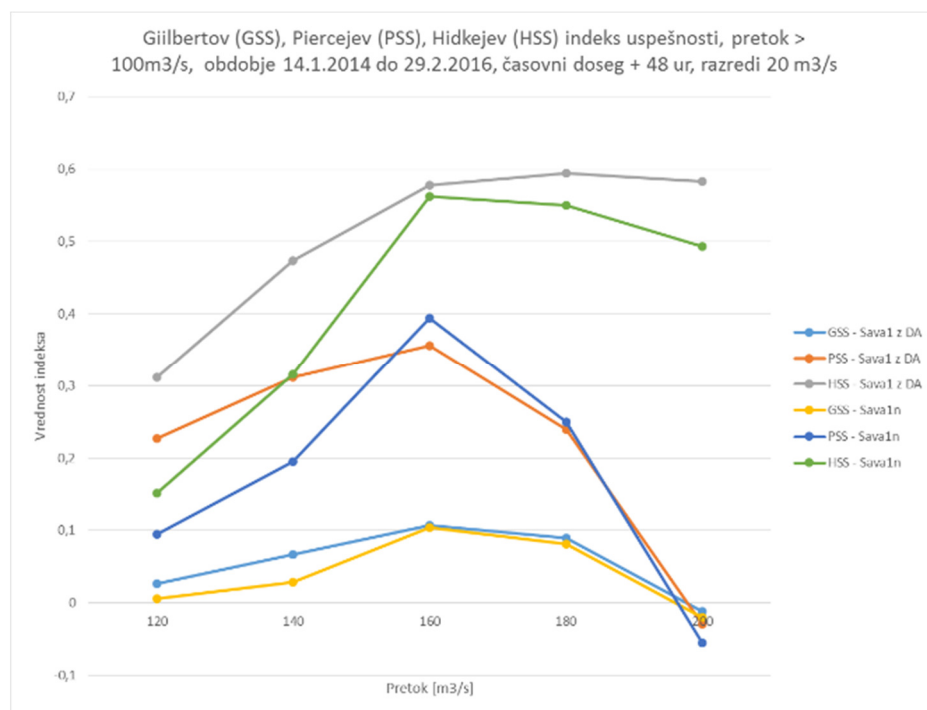
Predvsem pri večjih rekah, kjer lahko ocenjujemo pogostejše dogodke oz. za analize hidrogramov z manjšim razponom vrednosti, je možno uporabiti tudi kazalnike uspešnosti, ki nam dovolj dobro opredelijo kakovost napovedi. Na slikah 35 in 36 so prikazani kazalniki uspešnosti za modelski postavitvi Sava1 s podatkovno asimilacijo in Sava1n za pretoke med 120 in 200 m³/s. Tako kot pri

diagramu uspešnosti, statističnih značilnostih in krivulji relativne uspešnosti rezultat nakazuje velik vpliv podatkovne asimilacije in kasneje upad uspešnosti s časom. Omejitev območja pretokov nad 100 m³/s in pod 200 m³/s smo uvedli, ker kazalniki prikazujejo ustrezne rezultate le v primeru zadostnega števila dogodkov.



Slika 35: Gilbertov (GSS), Piercejev (PSS), Hidkejev (HSS) kazalnik uspešnosti, pretok > 100m³/s, obdobje 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, časovni doseg + 0 ur, razredi 20 m³/s
Figure 35: Gilbert (GSS), Pierc (PSS), Hidkv (HSS) index, discharge > 100m³/s, period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, lead time + 0 hour, frequency 20 m³/s

Upoštevati je potrebno tudi dejstvo, da nas zanimajo predvsem veliki pretoki, pri čemer je delež pretokov v obdobju pod 100 m³/s kar 95 %. Hidkejev kazalnik je podoben deležu pravih napovedi, le, da je reduciran z vzorčno oceno verjetnosti, da naključno pravilno napovemo dogodek oz. naključno pravilno napovemo, da se dogodek ne bo zgodil. Piercejev kazalnik opredeljuje razmerje med dogodki in »ne dogodki« in ima težave pri zelo redkih dogodkih. Gilbertov kazalnik je podoben kazalniku kritične uspešnosti, vendar predstavlja delež pravilno napovedanih in/ali zaznanih (opazovanih) dogodkov (zadetkov), ki je zmanjšan glede na slučajne zadetke (pravilne napovedi).



Slika 36: Gilbertov (GSS), Piercejev (PSS), Hidkejev (HSS) kazalniku uspešnosti, pretok > 100m³/s, obdobje 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016, časovni doseg + 48 ur, razredi 20 m³/s
Figure 36: Gilbert (GSS), Pierc (PSS), Hidkv (HSS) index, discharge > 100m³/s, period 14. 01. 2014 to 29. 02. 2016, lead time + 48 hours, frequency 20 m³/s

4.1.1 UGOTOVITVE O VELJAVNOSTI HIPOTEZ

Opravljen pilotna analiza, na točki napovedovanja in vodomerni postaji Sora Suha, nam podaja veliko zanimivih informacij in potrjuje zastavljeno hipotezo. Predstavljena analiza omogoča opredelitev zaupanja v rezultate modelskih zasnov. Prav tako je pokazan padec uspešnosti s podajševanjem časovnega dosega. Predlagana metodologija omogoča podroben vpogled v numerično uspešnost izračunov. Kot najpomembnejše lahko smatramo potrebo po uporabi različnih metod, saj vsaka uporabljena metoda nakazuje specifične značilnosti in primerjave. Deterministična merila uspešnosti podajajo zelo natančna izhodišča za celoten niz podatkov. V kolikor bi nam že te metode podale visoko stopnjo zaupanja bi lahko trdili, da so sposobnosti modelske postavitve zelo visoke. Vendar pogosto ni tako, zato je potrebno predvsem pri analizi visokovodnih razmer, za obravnavoomejenega števila dogodkov uporabiti tudi porazdelitve za prikaz uspešnosti v diagramu zanesljivosti in/ali krivulji operativne karakteristike. Za različne kazalnike smo pokazali, da niso najprimernejši kazalnik za opredelitev uspešnosti hudourniškega porečja, so pa zelo verjetno primerni za večje reke v spodnjem toku, predvsem kadar je v obravnavanem časovnem nizu podatkov standardna deviacija primerno majhna in porazdelitev pretokov sorazmerno enakomerna.

Analiza je prikazala dovolj veliko ostrino in ločljivost modelskih zasnov, vendar slabo uspešnost, zanesljivost, natančnost in v nekaterih območjih porazdelitve tudi precejšnjo negotovost pri rezultatih visokovodnih konic. S tem je postavljena zahteva po opredelitvi zaupanja potrdila potrebo tudi po ustrezni metodologiji, s katero se bodo rezultati numeričnega napovedovanja lahko kvalitetno spremljali.

V primeru štirih analiziranih zasnov je bila najboljša modelska zasnova Sava1 v primeru obravnave celotnega niza podatkov. Ko se omejimo le na pretoke nad 100 m³/s so, glede na krivuljo operativne karakteristike, najboljši rezultati pri postavitvi Sava4. Nekoliko slabše lahko glede na diagrame zanesljivosti ocenimo kakovost napovedi nad 100 m³/s, saj sta si postavitvi Sava1 in Sava4 zelo blizu in predvsem ROC nam omogoča določitev končnih ugotovitev. Modelske postavitve izkazujejo največjo zanesljivost delovanja pri časovnem dosegu do +12 ur, kjer je površina pod krivuljo operativne karakteristike vseh modelov za pretoke nad 100 m³/s približno enaka, in sicer okrog 0,7. To nam opredeljuje, da so rezultati napovedi zmerno zanesljivi. Vsi daljši časovni dosegi nakazujejo veliko nižjo stopnjo zaupanja.

Za točko napovedovanja v.p. Sora Suha bi na osnovi izvedenih analiz učinkovitosti priporočali ponovno umerjanje, s prednostno uporabo merila King-Gubta in osredotočenostjo na obdobje pogostejših velikih pretokov med 20. 06. 2014 in 20. 12. 2016. Po ponovnem umerjanju, ki se mora osredotočati na konice in velike pretoke, bi se lahko izvedla (po ustreznem številu visokovodnih dogodkov) ponovna analiza kakovosti operativnih modelskih zasnov.

5 ZAKLJUČEK

V magistrski nalogi so predstavljeni razlogi za vzpostavitev in delovanje sistema za napovedovanje visokih voda ter njegovega pomena, s podanimi predlogi za nadaljnje systemske izboljšave, ki bi omogočale učinkovitejši odziv. Ključni del naloge je oblikovanje predloga metodologije za spremljanje kakovosti napovedi oz. opozoril, ki se deli na oceno numeričnih izračunov ter oceno izdanih opozoril službe za hidrološko prognozo. Ker je na področju hidrološkega napovedovanja malo ustreznega besedišča, so podane tudi definicije kot podlaga za nadaljnji razvoj izrazoslovja s področja hidrološkega napovedovanja. Tekom naloge so podana teoretična izhodišča z navedbo referenčnih študij in priporočil različnih avtorjev in projektnih skupin. V analitičnem delu naloge smo glede na osnovna teoretična izhodišča z različnimi metodami obravnavali točko napovedovanja pri kraju Suha na reki Sori v obdobju od 14. 01. 2014 do 29. 02. 2016. Uporabljene metode in analiza prikazujejo pomen različnih tehnik pri ocenjevanju numeričnih napovedi z vidika kakovosti in operativne uporabnosti za pripravo opozorila. Rezultat analize točke napovedovanja na reki Sori prikazuje potrebo po izvedbi ponovnega umerjanja predvsem za visoke pretoke, pri čemer je potrebno poudariti tudi splošno kakovost rezultatov, ki jih analize ne prikazujejo najboljše. Pri tem je potrebno poudariti, da gre za deterministični pristop analize kakovosti v kateri zanemarimo splošen pogled na ujemanje situacije, kljub količinskemu ali časovnemu zamiku. Izvedena analiza na hudourniškem porečju je že po značilnostih zahtevnejša in je kot taka predstavljala dodaten izziv. Ocenjevane modelske postavitve nad 100 m³/s prikazujejo dovolj veliko ostrino in ločljivost, vendar zmerno uspešnost ter natančnost in zelo slabo zanesljivost v nekaterih območjih porazdelitve.

Analiza ocene izdanih hidroloških opozoril se ni izvedla, saj za takšno oceno še ni pripravljenega ustreznega sistema shranjevanja podatkov, ki bi omogočala binarno verifikacijo in izračun povprečnega opozorilnega časa pred dogodkom ali prognozičnega zadetka območja konice visokovodnega dogodka. Takšna analiza bi podala dopolnitev determinističnemu pristopu obstoječe analize in bi mogočala vpogled v kakovost napovedi s subjektivnim dodatkom hidrologa prognostika. Predlog metodologije opredeljuje predvsem potrebo po shranjevanju ustreznih podatkov, ki bodo omogočali izvedbo objektivno merljive verifikacije kakovosti izdanih opozoril ali napovedi, ne le obstoječega kvalitativnega pristopa. Vsebina se dotika prav vsakega od naštetih poudarkov in poskuša prikazati njihove osnovne značilnosti in uporabnost, s predlogi za uvedbo izboljšav posameznih elementov kot tudi sistema.

Sistem za napovedovanje visokih voda v sedanjem stanju zahteva zagotavljanje operativnosti. Operativnost je mišljena v smislu zagotavljanja delovanja in postopnega izboljševanja kakovosti.

Ključne razvojne naloge temeljijo na potrebi po dodatnih podatkih, namenjenih modeliranju. Med pomembnejše podatkovne zbirke, ki bi koristile lahko štejemo:

- opredelitev infiltracijskih sposobnosti tal glede na: rabo tal, geološko, pedološko karto ter izvedene kontrolne točke,
- razvoj atributnega opisa rečne mreže v Sloveniji (smer toka, poimenovanje, stacionaža), kar se trenutno že izvaja,
- vpeljava postopnega systemskega zajema (terenska izmera, projekti, ...) prečnih profilov v povezavi z rečno mrežo,
- razširitev evidence vodne infrastrukture za potrebe inženirskega prostorskega načrtovanja in modeliranja (prednostno na večjih vodotokih),
- prenos poplavnih linij oz. hidrološko hidravličnih študij v enotno karto, ki bi z vidika POOS opredeljevala škodni potencial in opredeljevala območja nevarnosti v primeru razvoja visokih voda.
- pridobitev kart pomembnejše oz. kritične javne infrastrukture, kjer je potrebno najhitrejše ukrepati (bolnišnice, zdravstveni domovi, šole, ceste, železnice, telekomunikacije, zadrževalniki, večji hidroenergetski objekti, ...),
- zgodovinska kronološka obdelava hidroloških, hidravličnih in hidromorfoloških zakonitosti površinskega vodnega toka ter plavin na porečjih oz. rekah in
- izboljšanje opozorilnega procesa in shranjevanje izdanih grafičnih opozoril in napovedi za možnost izvedbe analize in pripravo opredeljenih kazalnikov kakovosti napovedi.

Z vidika uvedbe meril kakovosti je predvsem potrebno ohranjati visoko kakovostno in strokovno skupino strokovnjakov s področja hidravličnega in hidrološkega modeliranja, ki bo neprestano nadgrajevala in skrbela za razvoj in prilagajanje sistema za napovedovanje. Naloga opredeljuje uporabnost orodij, ki lahko pri zagotavljanju operativnosti pomagajo.

V kolikor pogledamo uporabnost sistema za napovedovanje še z vidika odziva, so ključne naloge postavljene tudi v smeri izboljšanja opozorilnega procesa. Metodologija ocenjevanja podaja izhodišča za nadgradnjo in tehnološko izboljšanje procesa, ki bo poleg tehnologije potreboval tudi nadgradnjo uporabljenega jezika z usmeritvijo po prepoznavanju dejanskih posledic ob prepoznanih napovedanih oz. numerično izračunanih visokih vodah. Pri pripravi napovedi opozorila je vedno potrebna ustrezna interpretacija in kritična presoja hidrologa prognostika, ki temelji na poznavanju in spremljanju vremenskih razmer, kontrole vhodnih podatkov in spremljanju operativnega delovanja hidrološkega in hidravličnega modela. Hidrološki prognozično opozorilni koncept povezan v sistem predstavlja

napredno in kakovostno orodje, ki nam s pridobljenim znanjem, ob poznavanju omejitev, spremljanju kakovosti in operativne uporabnosti podaja podlago za pravočasno opozarjanje.

VIRI

Agroskin, I.I., Dimitrijević, G.T., Pikalov F.I. 1969. Hidraulika. Tehnička knjiga: 331 str.

American Meteorological Society (AMS), Glossary of Meteorology. 2016.

<http://glossary.ametsoc.org/wiki/> (Pridobljeno 20. 02. 2016.)

ARSO, Kazalci okolja v Sloveniji, Delež prebivalcev, ki živijo na poplavno ogroženih območjih. 2016.

http://kazalci.arso.gov.si/?data=indicator&ind_id=523 (Pridobljeno 16. 06. 2016.)

Banovec, P., Roškar, B., Cerk, M. 2006. GIS za vodenje evidence vodne infrastrukture v upravljanju koncesionarja. Mišičev vodarski dan 2006. Maribor:115-119.

Bartholmes J, Todini E. 2005. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. Hydrology and Earth System Science 9: 333–346.

Bernard, M. 1939. Recent developments in flood forecasting, Transactions of the American Geophysical Union 20: 187-193.

Black, A. R., Law, F. M. 2004. Development and utilization of a national web-based chronology of hydrological events. Hydrological Sciences Journal. 49: 237-246.

Blackie, J., R., Eeles, C., W., O. 1985. Lumped Catchment Models in Hydrological Forecasting. John Wiley and Sons: 311–345.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme: varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana, FGG: 186 str.

Brooks, H., E., Doswell III, C., A. 1996. A comparison of measures-oriented and distributions-oriented approaches to forecast verification. Weather Forecasting 11: 288-303.

Byers, H.,R. 1939. The meteorological phase of flood forecasting, Transactions of the American Geophysical Union, Volume: 20, part 2: 205-207.

COMET, MetED, Teaching and Training Resources for Geoscience Community. 2015.

<https://www.meted.ucar.edu/> (Pridobljeno 09. 09. 2015.)

Chatterton, J., Viavattene C., Morris, J., Penning-Rowsell, E., Tapsell S. 2010. The costs of the summer 2007 floods in England, Project: SC070039/R1, Environment Agency, ISBN: 978-1-84911-146-1: 51 p.

Creton-Cazanave, L., 2009. Warning! The use of meteorological information during a flash-flood warnign process. Advances in Science and Research, Publ.no. 3: 99-103.

Criss, R., E., Winston, W., E. 2008. 'Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals', Hydrological Processes, Vol 22: 2723–2725.

De Roo, A., Gouweleeuw, B., Thielen, J., Bates, P., Hollingsworth, A. 2003. Development of a European Flood Forecasting System, International Journal of River Basin Management: 49–59.

Deltares Wiki, Performance Indicator Module. 2015.

<https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/10+Performance+Indicator+Module#id-10PerformanceIndicatorModule-Configurationofperformancemodule> (Pridobljeno 24. 07. 2015.)

Deltares, Communities, Skill Scores Display. 2015.

<https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/11+Skill+Scores+Display>. (Pridobljeno 24. 05. 2016.)

DHI – Water & Environment. 2009. MIKE 11 – NAM and HD – Reference and User Guide. version 2009.

ftp://213.143.90.70/Uporabniki/UrosZ/MIKE/Manuals/MIKE_11/MIKE11_UserManual.pdf
(Pridobljeno 18. 06. 2016.)

Environmental Agency, 2003. Flood Warning Investment Strategy Appraisal Report 2003/04 to 20012/13, National Flood Warning Centre, Environment Agency.

Environmental Agency. 2005. Performace measures for flood forecaasting. Rewiew and recommendations. R&D Technical report W5c-021/2b/TR, Environmental Agency, 71 str.

Fazarinc, R., Udovč, M., Zidarič, M. 2011. Izdelava kart poplavne nevarnosti za območje DPN za zagotavljanje poplavne varnosti JZ dela Ljubljane; Mali Graben od Bokalc do izliva, Inženiring za vode, št.elab. A71-FR/09, Ljubljana, junij 2010; Izdelava KPN za območje DPN za zagotavljanje poplavne varnosti JZ dela Ljubljane; Mali Graben od Bokalc do izliva, Modeli 2,3,4,5,6,7; dopolnitev – območje veljavnosti, Inženiring za vode, št.elab. A71-FR/09, Ljubljana, feb. 2011

FLOODsite, Flood types. 2016.

<http://www.floodsite.net/juniorfloodsite/html/en/student/thingstoknow/hydrology/floodtypes.html>

(Pridobljeno 20. 04. 2016.)

Gams, I. 1973. Prispevek h klasifikaciji poplav v Sloveniji. Geografski obzornik 20, 1–2. Ljubljana.

Globevnik, L., Radovan, D., Nučič, U., Stopar, B., Koler, B. 2011. Posledice nezanesljivega višinskega sistema za upravljanje z vodami, Geodetski vestnik 55/I (2011): 150-152

www.geodetski-vestnik.com/55/1/gv55-1_150-152.pdf (Pridobljeno 16. 06. 2016.)

Gouweleeuw B, Thielen J, de Roo A, Buizza R. 2005. Flood forecasting using probabilistic weather predictions. *Hydrology and Earth System Science* 9(4): 365-380

Gupta, H.,V., Kling, H., Yilmaz, K.,K., Martinez, G., F. 2009. 'Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling', *Journal of Hydrology*, Vol 377: 80-91.

Haber, R.B., McNabb, D.A. 1990. Visualizations idioms: A conceptual model for scientific visualization systems. V: Nielson, G.M., Shriver, B.D., Rosenblum, L. (ur.), *Visualization in scientific computing*. Washington, IEEE Computer Society Press: 75-83.

Hamill, T., M., Juras, J. 2006. Measuring forecast skill: is it real skill or is it the varying climatology? *Q. J. Royal Met. Soc.*, 132: 2905-2923.

Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models. Part I: theory. *Tellus* 28: 473–485.

Jesenovec, S. 1995. Pogubna razigranost: 110 let organiziranega hudourničarstva na Slovenskem: 1884-1994, Ljubljana, PUH – Podjetje za urejanje hudournikov: 276.

Jonkman, S. N. 2005. Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods, *Nat. Hazards* 34: 151–175.

Khatibi, R., Stokes, R., Ogunyoye, F., Solheim, I., Jackson, D. 2003. Research issues on warning lead-time and synergy in flood mitigation measures. *International Journal of River Basin management*, Vol 1, No 4: 331-346.

Kitanidis, P., K., Bras, R., L. 1980. Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 1. Analysis of uncertainty, *Water Resour. Res.*, 16(6): 1025–1033.

Klemes, V. 1982. The desirable degree of rigour in the testing of rainfall-runoff models. *AGU Fall Meeting 1982, San Francisco*; abstract in *Eos* 63(45), 9 November: p. 922.

Kohne, B. 2014. Uporaba programa R za hidrološko modeliranje. *Dipl.nal. UNI. Ljubljana, UL FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva*: 89 str.

Kozelj, D., Kozelj, K., Steinman, F., Gosar, L. 2008. Poplavna ogroženost in posledice dogodkov preostalega tveganja = Flood threats and the consequences of residual risks events. *Ujma*, št. 22: 145-151.

Krzysztofowicz, R., Davis, D., R. 1983. Category-unit loss functions for flood forecast-response system evaluation, *Water Resour. Res.*, 19(6): 1476–1480.

Le Bihan, G., Payrastre, O., Gaume, E., Pons, F., Moncoulon, D. 2016. Regional hydrological models for distributed flash-floods forecasting: towards an estimation of potential impacts and damages, *Geophysical Research Abstracts* Vol. 18, EGU2016-12862, EGU General Assembly 2016. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-12862.pdf> (Pridobljeno 17.08.2016)

Lesjak, U. 2008. Analiza hidroloških in hidravličnih razmer na povodju Koprivnice 18. 09. 2007. *Dipl. nal. UNI. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Hidrotehnična smer*: 57 str.

Licer, M., Smerkol, P., Fettich, A., Ravdas, M., Papapostolou, A., Mantziafou, A., Strajnar, B., Cedilnik, J., Jeromel, M., Jerman J., Petan, S., V. Malačič. V., Sofianos, S. 2016. Modeling the ocean and atmosphere during an extreme bora event in northern Adriatic using one-way and two-way atmosphere–ocean coupling. *Ocean Sci.*, 12, p. 71–86.

Lynch P. 2006. *The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream*, Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Sangati, M., Gaume, E., Bain, V., Delrieu, G., Bonnifait, L., Pogačnik, N. 2009. Comprehensive post-event survey of a flash flood in Western Slovenia : observation strategy and lessons learned. *Hydrol. process.*, December 2009, letn. 23, št. 26: 3761-3770.

Mclendon, R., *Floods: When water attacks*. May 6th. 2011.

<http://www.mnn.com/earth-matters/translating-uncle-sam/stories/floods-when-water-attacks>,

(Pridobljeno 24. 05. 2016.)

Mikoš, M., Kranjc A., Matičič B., Müller B., Rakovec, J., Roš M., Brilly M. 2002. Hidrološko izrazje – Terminology in Hydrology, *Acta hydrotechnica* 20/32: 3-324.

Moderc M., Pogačnik N., Udovč M., Petan S. 2015. Operativni hidrodinamični model Ljubljanskega barja, *Ujma*, številka 29: 378–383

Moriasi, D., N., Arnold, J., G., Van Liew, M., W., Bingner, R., L., Harmel, R., D., Veith, T. L. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Transactions of the ASABE*, 50 (3): 885–900.

Murphy, A., H. 1993. What is a good forecast? An essay on nature of goodness in weather forecasting. *Wea. Forecasting*, 8: 281-293.

Murphy, A., H., Winkler R.L. 1987. A general framework for forecast verification. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1330-1338.

Murphy, A., H., Epstein E., S. 1989. Skill scores and correlation coefficients in model verification. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 572-581.

Natek, K. 2005. Poplavna območja v Sloveniji. Geografski obzornik 52: 13-18

http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski_obzornik/go_2005_1.pdf (Pridobljeno 15. 02. 2016.)

Nash, J., E., Sutcliffe J., V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles, J. Hydrol. 10: 282–290.

Nemec J. 1986. Hydrological Forecasting: Design and Operation of hydrological Forecasting systems, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland: 240.

Pappenberger, F., Thielen, J., Del Medico, M. 2011. The impact of weather forecast improvements on large scale hydrology: analysing a decade of forecasts of the European Flood Alert System, Hydrol. Process., 25, 1091–1113.

Parker, J., D. 2003. Designing flood forecasting, warning and response systems from societal perspective, International conference on Alpine Meteorology and Meso-Alpine Programme, May 19 -21, Brig, Switzerland.

http://www.map.meteoswiss.ch/map-doc/icam2003/Presentation/10.1/Brig_document.pdf (Pridobljeno 20. 04. 2009.)

Parker D. J. , Tunstall M. S., McCarthy S. 2007. New insights into the benefits of flood warnings: Results from a household survey in England and Wales, Environmental Hazards. Vol. 7, Iss. 3: 193-210.

Parker D. J., Tunstall M. S., Wilson T. 2005. Socio-economic benefits of flood forecasting and warning” Proc. International conference on innovation advances and implementation of flood forecasting technology 17 to 19 October 2005, Tromsø, Norway.

http://www.tbm.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Waterbouwkunde/sectie_waterbouwkunde/people/personal/gelder/publications/citations/doc/citatie_Parker_Dennis.pdf (Pridobljeno 20. 04. 2009.)

Paudel, M. 2010. An Examination of Distributed Hydrologic Modeling Methods as Compared with Traditional Lumped Parameter Approaches. All Theses and Dissertations. Paper 2219: 156 p.

Petan, S., Pogačnik, N., Sušnik, M., Polajnar, J., Jorgensen, 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. (<http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/>) (Pridobljeno 15. 12. 2012.)

Petan S., Golob A., Moderc M. 2015. Sistem za hidrološko napovedovanje Agencije Republike Slovenije za okolje, Vetrnica 08.

www.meteo-društvo.si (Pridobljeno 15.4.2016.)

Podgornik, R., H2O.

<http://www.fmf.uni-lj.si/~podgornik/download/water.pdf>. (Pridobljeno 20.4.2015)

Polajnar, J., 2004. Tehnično nalodilo: Navodilo za izponjevanje zapisov o neskladnosti glede na izbrani indikator: Delež pravih opozoril za Slovenijo ISO 9001/2000, Ljubljana (interno): 4 str.

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: 129-141.

Pogačnik, N., Steinman, F., Gosar, L., Banovec, P. 2009. Vzpostavitev izmenjave podatkov in predlog medsebojnega obveščanja med Slovenijo in Italijo v projektu SIMIS = The creation of a data exchange and proposal for bilateral communication between Slovenia and Italy as part of the SIMIS project. Ujma, št. 23: str. 233-244.

Pogačnik, N. 2009. Nadgradnja opozorilnega sistema za zaščito pred škodljivim delovanjem voda, 20. Mišičev vodarski dan 2007, Maribor: str. 59-67.

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

Pogačnik, N., Petan S., Sušnik M., Polajnar J., 2012. Razvoj hidrološkega prognostičnega sistema v Sloveniji in dostponost vodarskih prostorskih podatkov, (Flood forecasting sywstem developement and availability of water related spatila data), Geodetski vestnik 26/4: 769 – 785.

Pogačnik, N., Petan S., Sušnik, M., Polajnar J., Jorgensen G., 2012. Razvoj hidroloških prognozičnih sistemov v Sloveniji, Development of hydrological forecasting systems in Slovenia, Ujma, številka 26: 144 – 152.

Pogačnik N., Moderc M., Udovč M. 2013. Vpeljava operativnega kvazi 2d hidravličnega modela v hidrološki prognozični sistem, 23. Mišičev vodarski dan 2013: 311 – 318.

Pogačnik, N., Rotar, E., Rak, G. 2010. Opozarjanje javnosti pred škodljivim delovanjem voda: Začetek Razvoja sistema HIDROALARM v okviru sedanjega sistema za Opozarjanje pred vremensko nevarnostjo – METEOALARM, Ujma, št. 24: 132-140.

Prezelj, I., 2004. Nekatere ugotovitve iz študije kriznega upravljanja in vodenja ob poplavah novembra 1998, Findings from a study on crisis management of floods – November 1998, Ujma 2003/2004, številka 17/18: 221-226.

Prezelj, I., Kopač, E., S, U, Grošelj, K., Sotlar, A., Kustec Lipicer, S., Žiberna, A., Kolak, A., 2008. Definicija in zaščita kritične infrastrukture Republike Slovenije : raziskovalni projekt : končno raziskovalno poročilo. Fakulteta za družbene vede, Obramboslovni raziskovalni center, Ljubljana, 526 str.

Remec-Rekar, Š., Bat, M., 2003. Jezara, Bat M. ur., Vodno bogastvo Slovenije, Ljubljana, Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje: 39-45.

Robinson, G. 2012. Floods unsettle Thai insurance industry. Financial times (FT)
<http://www.ft.com/cms/s/0/0e9b9dec-62b3-11e1-9245-00144feabdc0.html#axzz26APaivUM>,
(Pridobljeno 5. 03. 2012.)

Roebber, P. J., and L. F. Bosart, 1996. The complex relationship between forecast skill and forecast value: A real-world analysis. Wea. Forecasting, 11, 544-559.

Roebber J. P. 1998. The Regime Dependence of Degree Day Forecast Technique, Skill, and Value. Wea. Forecasting, 13, 783–794.

Roškar J. 2015. BOBER Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja v Sloveniji, Vetrnica 08

www.meteo-društvo.si (Pridobljeno 15.5.2016)

Rak, G., 2013. Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov. Magistrsko delo. UL- FGG, Ljubljana: 131 str.

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.

Ruch, C., Jørgensen G., Polajnar, J., Sušnik M., Hornich, R., Schatzl R., Pogačnik N., Continuous flood forecasting combined with automatic forecast correction – application on the Mur river, XXIV- Conference of the danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Bled, Slovenia, 2 – 4 June 2008

http://ksh.fgg.uni-lj.si/bled2008/cd_2008/01_Hydrological%20forecasting/111_Ruch.pdf (Pridoblejmo 15. 08. 2008.)

World Meteorological Organization (WMO). 2011. Manual on Flood Forecasting and Warning, WMO- No. 1072. 2011 edition:142 p.

Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, 03. 08. 2015 ,

<http://www.preventionweb.net/drr-framework/sendai-framework> (Pridobljeno 24. 05. 2016)

Sherman, L.,K. 1939. Recent advances in applied hydrology with reference to flood forecasting, Transactions of the American Geophysical Union, Volume: 20 Pages: 174-176

Steinman, F. 2007. Vodnogospodarske zgradbe, naprave in ureditve. V: Vukelič, Ž., (ur.). Gospodarjenje z vodami : zbornik 7. dneva inženirjev. Ljubljana: IZS - Inženirska zbornica Slovenije, str. 9-17

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Učbenik. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, 294 str.

Stanski, H.R., Wilson, L.J. and Burrows, W.R. 1989. Survey of common verification methods in meteorology. Research report No. (MSRB) 89-5, July 1989 Environment Canada http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/Stanski_et_al/Stanski_et_al.html (Pridobljeno 15. 10. 2015.)

Stephenson, D. B. 2000. Use of the 'odds ratio' for diagnosing forecast skill. *Wea. and Forecasting*, 15: 221–232.

Strajnar B., 2006. Verifikacija napovedi količine padavin, Seminar, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Katedra za meteorologijo.
http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2006_2007/VerifPadavin.pdf (Pridobljeno 15. 10. 2015.)

Schaefli, B., Gupta, H., V. 2007. Do Nash values have value?. *Hydrol. Process.*, 21: 2075–2080.

Jolliffe I., T., Stephenson D., B. 2003. Forecast verification. *A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. Wiley and Sons Ltd, England: 267p.

Šifrer, M. 1983. Vzroki in učinki rečnih poplav na Slovenskem. *Naravne nesreče v Sloveniji kot naša ogroženost*. Ljubljana.

Tobin, G., A. 1995. The levee love affair: A stormy relationship, *Water Resources Bulletin*, 31(3), 359-367.

Thornes, J., E., Stephenson, D., B. 2001. How to judge the quality and value of weather forecast products. *Meteorol. Appl.*, 8: 307-314.

Thielen J, Bartholmes J, Ramos M-H, de Roo A. 2009. The European Flood Alert system—part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Science* 13: 125-140.

URSZR, Poplave, Kako ravnamo ob poplavah. 2016,
<http://www.sos112.si/slo/page.php?src=np13.htm> (Pridobljeno 15. 05. 2016.)

Vincendon, B., Dewaele, H., Edouard, S., Ducrocq, V., Lespinas, F., Delrieu, G. and Anquetin, S., 2016, Modeling flash floods in southern France for road management purposes, *Journal of Hydrology*, <http://www.sciencedirect.com/science/journal/aip/00221694> (Pridobljeno 17. 08. 2016.)

Vuga Beršnak, J. (ur.). 2016. Upravljanje kompleksnih kriz v Sloveniji, Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije. 112 str.

Wang J., 1994. WMO: Methods for Verification of Hydrological Forecasts; Technical reports in Hydrology and Water Resources No. 44.

Werner, M. G. F. 2004. A comparison of flood extent modelling approaches through constraining uncertainties on gauge data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8: 1141-1152.

Wilks, D. S. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press: 465 pp.

White, GF. 1939. Economic aspects of flood forecasting, *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 20: 218-233.

WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research, Forecast verification. 2015. <http://cawcr.gov.au/projects/verification/> (Pridobljeno 24. 05. 2015.)

Yen, B., C, Gonzalez, J., A. 1994. "Determination of Boneyard Creek flow capacity by hydraulic performance graph," Research Report 219, Water Resources Center, University of Illinois

Zambrano-Bigiarini, M. 2013. Package 'hydroGOF': 74 str. <http://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/index.html>. (Pridobljeno 26. 08. 2015.)

Zappa, M., K., Beven, M. Bruen, A. Cofino, K. Kok, E. Martin, P. Nurmi, B. Orfila, E. Roulin, A. Seed, K. Schroter, J. Szturc, B. Vehvilainen, U. Germannand A. Rossa, Propagation of uncertainty from observing systems and NWP into hydrological models: COST-731 Working Group 2, *Atmos. Sci. Lett.*, 2010, 11: 83-91.

Žibert, Ž. 2016. Sodobni načini prikazovanja hidroloških meritev in napovedi. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL FGG, Odd. za okoljsko gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 61 str.