

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

<http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/>

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2013

zbornik del

19. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 30. januar 2014

UREDNIŠKI ODBOR

Miran Kuhar
Rudi Čop
Andrej Gosar
Mira Kobold
Polona Kralj
Vlado Malačič
Jože Rakovec
Gregor Skok
Bojan Stopar
Polona Vreča

RECENZIJA

Mihael Brenčič
Andrej Ceglar
Mira Kobold
Miran Kuhar
Sašo Petan
Jože Rakovec
Simon Rusjan
Radoš Šumrada

ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova 2, Ljubljana

Naklada: 80 izvodov

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

550.3(497.4)(082)
528(497.4)(082)

SLOVENSKO združenje za geodezijo in geofiziko. Strokovno srečanje (19 ; 2014 ; Ljubljana)

Raziskave s področja geodezije in geofizike 2013 : zbornik del / 19. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 30. januar 2014 ; [organizator srečanja Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran Kuhar]. - Ljubljana : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2014

ISBN 978-961-6884-17-4

1. Gl. stv. nasl. 2. Kuhar, Miran 3. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Ljubljana)
271310592

Predgovor

Pričujoči zbornik Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko SZGG že 19. po vrsti prinaša prispevke, ki razlagajo pojave v naravi z različnimi metodami. Na področju hidrologije npr. z regionalizacijo verjetnostnih porazdelitev, ali pa z multivariatno metodo kopul; v našem kraškem svetu pa je hidrologija neizogibno povezana tudi s speleologijo. Na področju meteorologije z razlago, kako od izmerjenih podatkov pridemo do klimatskih informacij; včasih imajo vremenski pojavi svoj odraz tudi v povezavi s speleologijo ali z geomagnetizmom, pomembno pa vremenska dogajanja vplivajo tudi na onesnaženost zraka. Zbornik prinaša tudi kratka poročila o refleksijskih seizmičnih raziskavah in tem, kaj iz jamskih sedimentov pri nas izvemo o geoloških procesih v preteklosti. Poroča pa tudi spletni bazi objav, ki pokaže tudi informacijo o kraju (v Sloveniji), ki ga objava obravnava.

Še nekaj je vredno omeniti. Letošnji zbornik je prvi, pri katerem smo uvedli strokovne recenzije člankov, kot so v navadi pri znanstvenih objavah: z anonimnimi recenzenti, kar naj bi pripomoglo k večji kvaliteti objavljenih prispevkov. Naloga recenzentov je namreč predvsem pomagati avtorjem. Tega se avtorji velikokrat zares zavejo šele potem, ko je njihov članek objavljen – ponavadi je dosti boljši od prve verzije. Zato lahko upravičeno pričakujemo, da bodo z leti objave v zborniku vse kvalitetnejše. Seveda pa objave v njem ne morejo nadomestiti objav v mednarodnih znanstvenih in strokovnih časopisih. Zato člani SZGG svoje najzanimivejše ugotovitve seveda objavljajo v mednarodnih krogih. Domače objave pa med drugim skrbijo tudi za razvoj slovenske strokovne terminologije – v Zborniku SZGG iz vseh področij geofizike in geodezije; zato ima tudi ta zbornik kar pomembno vlogo.

Ob zaključku štiriletnega predsedovanja SZGG se zahvaljujem za sodelovanje vsem članom, še posebej avtorjem prispevkov v zbornikih in predavateljem za predavanja, pri katerih je bila organizatorica ali so-organizatorica SZGG.

predsednik SZGG

Prof .dr. Jože Rakovec

Vsebina

Predgovor	3
Nejc Bezak, Mitja Brilly, Matjaž Mikoš, Mojca Šraj - Uporaba kopul v hidrologiji	7
Katarina Kavčič, Mitja Brilly, Mojca Šraj - Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic	23
Stanka Šebela - Odziv jamske mikro-klime na izjemne dogodke in dolgotrajnejše spremembe vremena.....	35
Janja Kogovšek - Skladiščenje vode v vadozni coni kraških vodonosnikov - primer izvira Malenščica	41
Rahela Žabkar, Luka Honzak - Napovedovanje kakovosti zraka z modelom WRF/Chem...	51
Gregor Vertačnik, Mojca Dolinar, Mateja Nadbath - Od meteoroloških meritev do klimatoloških produktov	63
Rudi Čop, Damir Deželjin - Sprememba lokalnega geomagnetnega polja zaradi prehoda vremenske fronte	77
Klemen Kozmus-Trajkovski, Marjan Čeh, Matevž Domajnko, Nejc Krašovec - Spletni portal akademskih nalog s prikazom položaja	85
Marija Zlata Božnar, Boštjan Grašič, Primož Mlakar - Diagnoza in prognoza onesnaženja ozračja nad Slovenijo *	93
M. Vrabec, M. Buseti, F. Zgur, L. Fachin, C. Pelos, R. Romeo, I. Sormani, P. Slavec, I. Tomini, G. Visnovich, A. Žerjal - Refleksijske seizmične raziskave v slovenskem morju SLOMARTEC 2013 *	97
M. Vrabec, N. Zupan Hajna, A. Mihevc, P. Pruner, P. Bosák - Paleomagnetizem jamskih sedimentov v Sloveniji - implikacije za neotektoniko ozemlja *	103

* razširjeni povzetek (nerecenzirano)

Uporaba kopul v hidrologiji

Nejc Bezak*, Mitja Brilly*, Matjaž Mikoš* in Mojca Šraj*

Povzetek

Funkcije kopula se v svetu vse pogosteje uporabljajo na različnih znanstvenih področjih, v hidrologiji pa se njihova uporaba v večji meri pojavlja šele v zadnjem desetletju. V prispevku so prikazani rezultati nekaterih praktičnih možnosti uporabe kopul v hidrologiji. Naredili smo bivariate ter trivariate verjetnostne analize elementov visokovodnih valov (konice pretokov, volumni ter časi trajanja), analizirali smo povezanost pretokov, volumnov valov ter vrednosti koncentracij suspendiranih snovi ter definirali model, s katerim lahko na podlagi znanih vrednosti pretokov in padavin ocenimo vrednosti koncentracij suspendiranih snovi. Z uporabo statističnih testov smo pokazali, da je kopula model dal boljše rezultate kot nekateri pogosto uporabljeni regresijski modeli. S tem smo v oceno koncentracij suspendiranih snovi vpeljali dodatne informacije (padavine) in dobili ocenjene vrednosti bližje dejanskim, izmerjenim vrednostim. Pri multivariatnih verjetnostnih analizah pa smo izračunali različne skupne povratne dobe.

Ključne besede: Kopula, bivariate analize, trivariate analize, pretok, volumen vala, suspendirane snovi.

Keywords: Kopula, bivariate analysis, trivariate analysis, discharge, wave volume, suspended solids.

Uvod

V hidrologiji so se do sedaj za izvedbo verjetnostnih analiz večinoma uporabljale univariatne porazdelitvene funkcije, kjer upoštevamo le eno spremenljivko (večinoma je to konica pretoka). V začetku 21. stoletja so se v hidrologiji pojavili prvi članki, kjer so raziskovalci za izvedbo različnih analiz uporabili funkcijo kopula (Favre et al., 2004; Salvadori & De Michele, 2004). V drugih vedah, kot sta ekonomija ali biologija, so se kopule uporabljale že nekoliko prej. Teorija kopul temelji na matematičnem teoremu, ki ga je že leta 1959 predstavil Sklar (Sklar, 1959), in bo nekoliko podrobneje predstavljen v nadaljevanju. Temeljno literaturo o funkcijah kopula pa predstavlja naslednje gradivo: Joe (1997), Nelsen (2006), Salvadori et al. (2007). Kopule omogočajo izgradnjo multivariatnega modela, kjer hkrati upoštevamo dve ali več v naravi odvisnih spremenljivk. Tako lahko pri verjetnostnih analizah poleg konic pretokov hkrati upoštevamo tudi volumne in čase trajanja visokovodnih valov ali druge spremenljivke. Ta koncept lahko uporabimo pri vseh multivariatnih problemih, kjer nastopa d medsebojno bolj ali manj odvisnih spremenljivk, kjer odvisnost določa koeficient korelacije (Kendallov ali Spearmanov) oziroma parameter kopule. Tako so bile kopule uporabljene za izvedbo multivariatnih verjetnostnih analiz visokovodnih valov (Favre et al., 2004; Salvadori & De Michele, 2004; Ganguli & Reddy, 2013), verjetnostne analize padavin (Zhang & Singh, 2007), analize suše (Shiau et al., 2007; Wong et al., 2010; Ma et al., 2011), geostatistične interpolacije kot alternativa običajnemu krigingu (Bardossy & Li, 2008), preverjanje ustreznosti prelivnega objekta na jezu (De Michele et al., 2005) ter še pri mnogih drugih

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

hidroloških problemih. Na spletni strani mednarodnega hidrološkega društva STAHY (angl. *International Association of Hydrological Sciences*; www.stahy.org) so zbrani članki, kjer je bila za izvedbo hidroloških analiz uporabljena funkcija kopula.

Da se kopule v hidrologiji vse pogostejše uporabljajo priča tudi dejstvo, da se je število člankov s to metodologijo v bazi Web of knowledge (kategorija *Water resources*), od leta 2004 povzpelo na več kot 180, v še ne končanem letu 2013 pa je bilo do sedaj objavljenih največ prispevkov v zvezi s kopulami (do oktobra je bilo v letu 2013 indeksiranih 37 člankov).

Namen prispevka je prikaz praktične uporabe kopul v hidrologiji. Prikazan in opisan je postopek uporabe bivariatne ter trivariatne verjetnostne analize visokovodnih valov na primeru hidrološke postaje Litija na reki Savi. Funkcijo kopula smo uporabili tudi za modeliranje pretokov, volumnov valov ter koncentracij suspendiranih snovi. Za izvedbo te analize so uporabljeni podatki z vodomerne postaje Gornja Radgona na reki Muri, kjer so se več kot 25 let neprekinjeno izvajale dnevne meritve koncentracij suspendiranih snovi (ARSO, 2013). Poleg tega smo poskušali funkcijo kopula uporabiti za ocenjevanje vrednosti suspendiranih snovi na podlagi izmerjenih vrednosti pretokov in padavin. Za ta namen smo uporabili podatke z vodomerne postaje Ranca na reki Pesnici ter padavinske postaje Polički vrh. Na teh praktičnih primerih so opisani osnovni koraki za izvedbo analiz z uporabo funkcij kopula.

Podatki in metode

Za izvedbo različnih analiz smo uporabili podatke s hidroloških postaj Litija na reki Savi (vzorec letnih maksimalnih pretokov), Gornja Radgona na reki Muri (vzorec letnih maksimalnih pretokov in suspendiranih snovi), Ranca na reki Pesnici (mesečne vsote pretoka in suspendiranih snovi) ter podatke s padavinske postaje Polički vrh (mesečne vsote padavin), ki leži blizu vodomerne postaje Ranca. Preglednica 1 prikazuje nekatere osnovne značilnosti obravnavanih postaj ter lastnosti obravnavanih vzorcev. Zaradi različne narave obravnavanih problemov smo pri različnih postajah obravnavali različna obdobja meritev. Pri analizah koncentracij suspendiranih snovi smo bili omejeni z relativno kratkimi nizi meritev (Bezak et al., 2013b). Več informacij o podatkih in lastnostih vzorcev so podali Bezak et al., 2013a (postaja Litija) ter Bezak et al., 2013b (postaji Gornja Radgona in Ranca).

Preglednica 1: Pregled obravnavanih postaj in nekatere osnovne značilnosti pripadajočih vzorcev

Postaja	Litija	Gornja Radgona	Ranca	Polički vrh
Reka / Območje	Sava	Mura	Pesnica	Porečje Pesnice
Tip postaje	vodomerna	vodomerna	vodomerna	padavinska
Obdobje	1953-2010	1977-2005	1970-1973	1970-1973
Tip vzorca	letni maksimumi	letni maksimumi	mesečne vsote	mesečne vsote
Opazovane spremenljivke	pretok	pretok, suspendirane snovi	pretok, suspendirane snovi	padavine
Velikost vzorca (število podatkov)	58	29	45	45

Za izvedbo analiz smo torej uporabili funkcije kopula. Osnovni teorem je podal Sklar (1959):

$$F(x_1, \dots, x_d) = C(F_1(x_1), \dots, F_d(x_d)), \quad (1)$$

kjer je C d dimenzionalna funkcija kopula. Multivariatno d dimenzionalno porazdelitev lahko zapišemo kot kombinacijo funkcije kopula C in robnih porazdelitvenih funkcij $F_1, \dots, F_d$ (angl. *marginal distributions*) (enačba 1). Gre v bistvu za običajne univariatne porazdelitvene funkcije, kjer lahko uporabimo različne parametrične (npr. normalna, log-normalna, Pearsonova III, generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti,...) ali neparametrične (kernelova gostota; angl. *kernel density*) porazdelitvene funkcije. Glavna prednost funkcij kopula pred običajnimi multivariatnimi porazdelitvenimi funkcijami (npr. multivariatna normalna porazdelitev) je prav ločenost robnih porazdelitev in funkcij kopula. Ocenjevanje parametrov robnih porazdelitev (običajen postopek) in parametrov funkcije kopula sta tako dva ločena postopka. To dejstvo je pomembno zato, ker lahko kot robne porazdelitve posameznih spremenljivk izberemo različne porazdelitvene funkcije. Tako lahko npr. pri analizah konic, volumnov in časov trajanja visokovodnih valov kot robne porazdelitve izberemo različne porazdelitvene funkcije, npr. Gumbelovo za konice, Pearsonovo III za volumne ter normalno za čase trajanja. Sklarov teorem (Sklar, 1959) pa omogoča, da nato ocenimo parametre kopule povsem ločeno od robnih porazdelitvenih funkcij. Slednje pomeni, da lahko odvisnost med izbranimi spremenljivkami preučujemo ločeno od robnih porazdelitev.

Za modeliranje različnih problemov se uporabljajo različne funkcije kopula iz različnih družin. Tako se v hidrologiji najpogosteje uporabljajo kopule iz Arhimedove družine (angl. *Archimedean family*), kopule iz družine ekstremnih vrednosti (angl. *extreme value family*), nekoliko manj pogosto pa tudi kopule iz eliptične družine (angl. *elliptical family*), ki pa se npr. v ekonomiji uporablja pogosteje (Grimaldi & Serinaldi, 2006; Genest & Favre, 2007; Ganguli & Reddy, 2013). Za modeliranje suše se najpogosteje uporablja kopula Clayton iz Arhimedove družine (Ma et al., 2011), za analize visokovodnih valov se pogosto uporabijo kopule iz družine ekstremnih vrednosti (npr. kopuli Gumbel-Hougaard ali Galambos) (Genest & Favre, 2007), za geostatistične interpolacije se pogosto uporabljajo normalne kopule iz eliptične družine (Bardossy & Li, 2008).

Simetrične kopule iz Arhimedove družine, ki se najpogosteje uporabljajo, imajo večinoma le en parameter. Ta parameter lahko podobno kot pri univariatnih porazdelitvah ocenimo z različnimi metodami. Uporabimo lahko metodo momentov (Kendallov ali Spearmanov koeficient korelacije), metodo največjega verjetja (angl. *maximum likelihood method*), pseudo metodo največjega verjetja (angl. *pseudo likelihood method*), kjer naj bi bila slednja najprimernejša (Joe, 1997; Nelsen, 2006; Salvadori et al., 2007). V primeru, da obravnavamo vsaj trivariaten primer, lahko analize naredimo tudi z asimetričnimi kopulami, kjer imajo te en parameter več kot simetrične različice kopul (Grimaldi & Serinaldi, 2006; Hofert & Mächler, 2011). Slednje se izkažejo za posebej uporabne v primerih, ko je korelacija med enim parom spremenljivk izrazito večja kot korelaciji med drugima dvema paroma (trivariaten primer).

Podobno kot pri univariatnih porazdelitvenih funkcijah so bili tudi za primer funkcij kopula razviti nekateri statistični testi za primerjavo različnih teoretičnih modelov in izbira najustreznejše kopule. V literaturi prevladujeta dva tipa testov, najpogostejši so testi, ki temeljijo na primerjavi teoretične ter empirične funkcije kopula, nekoliko manj pogosto pa se uporabljajo testi, ki temeljijo na Kendallov porazdelitveni funkciji (Genest et al., 2009; Kojadinovic et al., 2011). Za kontrolo ustreznosti izbrane kopule pa je priporočljivo uporabiti tudi grafične teste, s katerimi lahko potrdimo ali zavrnilo ugotovitve statističnih testov (Genest & Favre, 2007).

Opisane korake (določitev robnih porazdelitvenih funkcij, ocenjevanje parametrov kopul, izbira najustreznejše kopule z uporabo statističnih ter grafičnih testov) je potrebno izvesti pri vseh analizah s kopulami, nato pa se postopki razlikujejo od namena uporabe

modela. Pri verjetnostnih analizah moramo izračunati različne povratne dobe, pri ocenjevanju vrednosti pa moramo izvesti simulacije. Oba koraka bosta malce podrobneje opisana v naslednjih dveh odstavkih.

Pri multivariatnih verjetnostnih analizah z uporabo funkcij kopula lahko izračunamo različne vrednosti pogojnih (angl. *conditional*) ali skupnih (angl. *joint*) povratnih dob (Salvadori et al., 2007; Graler et al., 2013). Skupni povratni dobi imenovani OR ter AND sta definirani z naslednjima izrazoma (bivariatni primer):

$$\begin{aligned} T_{u,v}^{OR} &= \frac{1}{1-C_\theta(u,v)}, \\ T_{u,v}^{AND} &= \frac{1}{1-u-v+C_\theta(u,v)}, \end{aligned} \quad (2)$$

kjer sta u in v izbrani robni porazdelitveni funkciji, C_θ pa predstavlja teoretično funkcijo kopula (v tem primeru bivariatno). Ker pa gre za analize v več dimenzijah, te definicije povratnih dob seveda niso primerljive s tistimi, ki jih večinoma uporabljamo pri univariatnih analizah. To lastnost kopul bi morda lahko ocenili kot največjo težavo, saj je težko (kar naenkrat) v praktično uporabo vpeljati nov koncept povratnih dob. Tako so se v literaturi že pojavili poskusi določitve t.i. kritične plasti (angl. *critical layer*), kjer gre za matematično definicijo prej omenjenega pojma, ki je (bolj) analogna z običajnimi povratnimi dobami (Salvadori et al., 2011). Npr. pri trivariatnem primeru verjetnostnih analiz visokovodnih valov izhajamo iz izbrane vrednosti verjetnosti in na podlagi te vrednosti s pomočjo simulacij določimo ploskev v kopula prostoru, kjer vse točke, ki ležijo nad to ploskvijo, označujejo kritične dogodke (Salvadori et al., 2011). To ploskev lahko nato z uporabo inverznih porazdelitvenih funkcij transformiramo v realni prostor. Povratna doba OR predstavlja primer, ko se zgodi vsaj ena izmed obravnavanih spremenljivk, povratna doba AND pa primer, ko se hkrati zgodijo vse obravnavane spremenljivke. Iz definicije sledi, da je verjetnost pojava povratne dobe AND precej manjša od verjetnosti pojava povratne dobe OR, kar seveda pomeni, da je povratna doba za AND primer precej večja (obravnavamo multivariaten primer).

Funkcije kopula lahko uporabimo tudi za ocenjevanje vrednosti različnih hidroloških spremenljivk na podlagi podatkov, ki jih imamo na razpolago. Prikazana bo praktična uporaba v primeru ocenjevanja vrednosti koncentracij suspendiranih snovi. Pri modelu, kjer bi vrednosti koncentracij suspendiranih snovi ocenili le na podlagi pretokov, lahko izhajamo iz naslednje enačbe:

$$f_q(ssc) = P\{SSC \leq ssc | Q = q\} = \frac{\partial C_\theta(q, ssc)}{\partial q}, \quad (3)$$

kjer moramo z uporabo statističnih ter grafičnih testov ponovno izbrati ustrezno funkcijo kopula C_θ in kjer funkcija f vedno zavzame vrednost med 0 in 1. To pomeni, da lahko to funkcijo zamenjamo z naključno generiranimi števili, ki pripadajo enakomerni porazdelitveni funkciji. Tako pridemo do enačbe, kjer imamo le eno neznanko, to je vrednost porazdelitvene funkcije za spremenljivko SSC. V večini primerov, zaradi kompleksnosti parcialnih odvodov ne moremo poiskati analitične rešitve enačbe 3, lahko pa z uporabo numeričnih metod (npr. Newton-ova metoda) najdemo ničle, ki kot že rečeno ležijo med 0 ter 1. Te ničle pa so v bistvu vrednosti porazdelitvenih funkcij, ki jih želimo oceniti. Ker smo generirali veliko število podatkov (npr. 10000), dobimo raztros možnih vrednosti. Nato lahko določimo najverjetnejšo vrednost koncentracije (glede na maksimum gostote verjetnosti izbrane neparametrične funkcije) in oblikujemo tudi empirične intervale zaupanja (npr. 10, 20 ali 50 % intervali). Te mejne vrednosti nato še transformiramo v realni prostor z uporabo inverzne oblike porazdelitvene funkcije. Tudi v tem primeru za ocenjevanje vrednosti koncentracij uporabimo le vrednosti pretokov, to pomeni, da ne

moremo pričakovati veliko boljših rezultatov kot pri preprostejših regresijskih modelih (npr. linearna ali eksponentna funkcija), ki se večinoma uporabljajo za ocenjevanje koncentracij suspendiranih snovi. Zato smo se odločili, da bomo poskušali oceno izboljšati tako, da bomo v analizah upoštevali še vrednosti padavin. Model, kjer bi za ocenjevanje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi uporabili tudi vrednosti padavin, ima naslednjo obliko:

$$f_{q,p}(ssc) = P\{SSC \leq ssc | Q = q | P = p\} = \frac{\partial^2 C_{\theta}(q,p,ssc)}{\partial q \partial p} / \frac{\partial^2 C_{\theta}(q,p)}{\partial q \partial p}. \quad (4)$$

Koncept določitve najverjetnejše vrednosti koncentracije suspendiranih snovi je enak kot pri uporabi bivariatnih kopul (enačba 3).

Rezultati uporabe kopul na praktičnih primerih

V naslednjih podpoglavjih je prikazana uporaba funkcij kopula na štirih praktičnih primerih. Prikazani so rezultati bivariatnih ter trivariatnih verjetnostnih analiz visokovodnih valov, rezultati trivariatnih analiz konic pretokov, volumnov valov ter koncentracij suspendiranih snovi (SSC) in rezultati ocenjevanja vrednosti suspendiranih snovi na podlagi podatkov o pretokih in padavinah.

Bivariatne verjetnostne analize visokovodnih valov

Za izvedbo bivariatnih verjetnostnih analiz visokovodnih valov smo uporabili podatke z vodomerne postaje Litija na reki Savi. Uporabili smo 58 vrednosti letnih maksimumov. Če želimo določiti vrednosti volumnov in časov trajanja valov, moramo najprej izločiti bazni odtok. Za izločanje baznega odtoka smo uporabili grafično tro-točkovno metodo (Šraj & Bezak, 2013; Šraj et al., 2013b). Naredili smo bivariatne analize parov podatkov: konica pretoka - volumen vala ($Q-V$), konica pretoka - čas trajanja vala ($Q-D$) ter volumen vala - čas trajanja vala ($V-D$). Za modeliranje konic pretokov in časov trajanja visokovodnih valov smo na podlagi statističnih ter grafičnih testov izbrali log-Pearsonovo III porazdelitev, za opis volumnov valov pa Pearsonovo III porazdelitev. Za ocenjevanje parametrov univariatnih porazdelitev smo uporabili metodo momentov L (Hosking & Wallis, 1997), za izbiro najustrežnejših porazdelitvenih funkcij pa različne statistične ter grafične teste (Šraj et al., 2013b). Preglednica 2 prikazuje vrednosti Pearsonovega, Kendallovega ter Spearmanovega koeficienta korelacije za obravnavane pare podatkov. Korelacijski koeficienti določajo odvisnost med dvema spremenljivkama, torej če je vrednost koeficienta blizu vrednosti 1 to pomeni, da sta spremenljivki odvisni, če je koeficient enak 0, to pomeni neodvisnost spremenljivk. Korelacijske koeficiente za opis odvisnosti se lahko uporabi tudi za primer, kjer imamo več kot 2 spremenljivki, vendar se izrazi za izračun korelacijskih koeficientov spremenijo in zato je boljše za opis odvisnosti uporabiti parameter kopule, ki ga lahko v bivariatnem primeru ocenimo na podlagi Kendallovega koeficienta korelacije ali pa npr. s pseudo metodo največjega verjetja, ki jo je nato lažje uporabiti v multivariatnem primeru. Od vrednosti korelacije oz. dejanske odvisnosti, ki jo opiše korelacijski koeficient, je odvisno katero funkcijo kopula bomo uporabili za analize. Nekatere kopule so primerne le za pozitivne vrednosti (npr. Gumbel-Hougaard) odvisnosti, spet druge le za korelacije blizu 0 (npr. Ali-Mikhail-Haq kopula). Torej izračunana vrednost korelacijskega koeficienta določa, katere funkcije kopula lahko uporabimo, nadalje pa tudi kakšen bo odziv modeliranih spremenljivk, ki sta medsebojno (ne)odvisni. Iz preglednice 2 lahko vidimo, da je korelacija med konicami pretokov in časi

trajanja visokovodnih valov negativna. To pomeni, da za izvedbo analize (za ta par) ne moremo uporabiti vseh funkcij kopula, ki smo jih uporabili pri drugih dveh parih, saj so nekatere primerne le za pozitivne vrednosti odvisnosti.

Obravnavali smo različne funkcije iz Arhimedove, eliptične družine ter družine kopul ekstremnih vrednosti. Na podlagi Cramér von-Mises ter Kolmogorov-Smirnov statističnih testov (Genest & Favre, 2007) ter različnih grafičnih testov smo kot najprimernejšo funkcijo določili kopulo Gumbel-Hougaard iz Arhimedove družine kopul. Ta kopula spada tudi v družino kopul ekstremnih vrednosti. Te ugotovitve veljajo za para $Q-V$ ter $V-D$, medtem ko smo pri paru $Q-D$ kot najprimernejšo določili Student-t kopulo iz eliptične družine kopul. Za ocenjevanje parametrov kopul smo uporabili metodo momentov (Kendallov koeficient korelacije). Definicije teoretičnih kopul in izraze, ki povezujejo parametre kopul s koeficienti korelacije (Kendall ali Spearman) lahko najdemo v osnovni literaturi (Nelsen, 2006; Salvadori et al., 2007). Preglednica 3 prikazuje izračunane skupne povratne dobe za OR ter AND primera. Izračunali pa smo tudi univariatne (običajne) povratne dobe za pretoke, volumne ter čase trajanja za mediane in maksimalne vrednosti (preglednica 3).

Preglednica 2: Vrednosti Pearsonovega, Kendallovega ter Spearmanovega koeficienta korelacije za obravnavane pare podatkov

	Pearson	Kendall	Spearman
$Q-V$	0,52	0,39	0,54
$V-D$	0,68	0,48	0,63
$Q-D$	-0,15	-0,08	-0,14

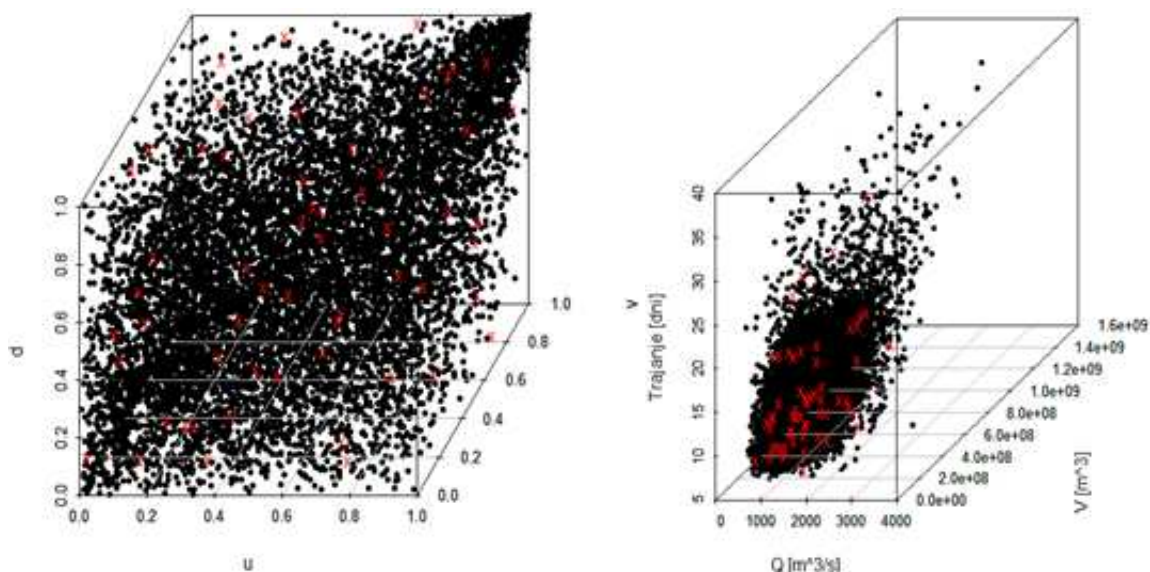
Preglednica 3: Izračunane vrednosti univariatnih in skupnih bivariatnih povratnih dob [leta] za tri funkcije kopula za vsak posamezen par spremenljivk

Univariatni primer			Bivariatni primer					
Spr.	T^{UNI}		Par	Kopula	$T_{u,v}^{OR}$		$T_{u,v}^{AND}$	
	Mediana	Maks.			Mediana	Maks.	Mediana	Maks.
Q	2,0	69,5	$Q-V$	Gumbel	1,2	40,7	2,8	132,8
V	1,9	56,4		Frank	1,5	32,1	2,7	1035,5
D	2,1	70,7		Tawn	1,5	40,7	2,8	133,0
			$V-D$	Gumbel	1,6	43,6	2,8	111,7
				Frank	1,6	32,6	2,7	801,4
				Normal	1,6	36,4	2,8	224,6
			$Q-D$	Clayton	1,3	35,2	4,5	5700,3
				AMH	1,3	35,1	4,6	8125,7
				Student-t	1,3	36,8	4,5	708,6

Trivariatna verjetnostna analiza visokovodnih valov

Tudi pri trivariatnih analizah visokovodnih valov smo uporabili podatke o letnih maksimumih z vodomerne postaje Litija na reki Savi. Analizirali smo maksimalne konice pretokov in pripadajoče vrednosti volumnov in časov trajanja visokovodnih valov. To pomeni, da so le konice pretokov maksimalne v vseh letih, volumni ter časi trajanja pa so bili določeni glede na vrednosti pretokov in niso nujno letni maksimumi. Uporabili smo kopule Gumbel-Hougaard, Frank, Joe ter Clayton iz Arhimedove družine in normalno ter

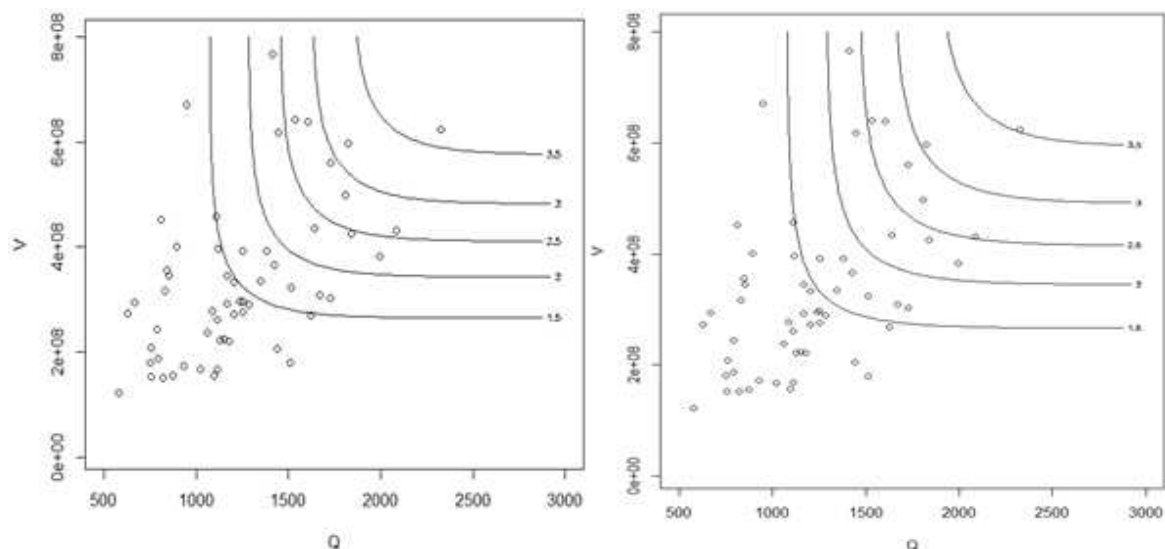
Student-t kopulo iz eliptične družine. Za ocenjevanje parametrov kopul smo uporabili metodo največjega verjetja (Nelsen, 2006; Salvadori et al., 2007), medtem ko so robne porazdelitvene funkcije ostale enake kot pri bivariatnih analizah.



Slika 1: Grafična testa za preverjanje ustreznosti kopule Gumbel-Hougaard pri trivariatni analizi visokovodnih valov Save v Litiji

Slika 1 prikazuje rezultate grafičnega testa za ustreznost kopule Gumbel-Hougaard iz Arhimedove družine kopul, kjer rdeči znaki x označujejo dejanske vrednosti letnih maksimumov, črne oznake pa so generirane vrednosti, ki so bile določene na podlagi popolnoma definiranega modela. Pri izrisu slike 1b smo uporabili tudi robne porazdelitvene funkcije. Na podlagi grafičnih ter statističnih testov (Cramér von-Mises) smo kot najprimernejše določili kopule Gumbel-Hougaard, Frank (Arhimedova družina) ter normalno (eliptična družina). Izračunali smo tudi dve skupni povratni dobi imenovani OR ter AND (enačba 2), ki pa se zaradi tega, ker obravnavamo tri spremenljivke (trivariatni primer) hkrati, malce spremenita (Ganguli & Reddy, 2013)

Slika 2 prikazuje vrednosti pogojne povratne dobe OR, ki označuje primer, ko se zgodi vsaj ena izmed obravnavanih spremenljivk. Prikazani so rezultati za kopuli Frank ter normalno. AND primer pa pomeni, da se hkrati zgodijo vse tri vrednosti spremenljivk. Poleg rezultatov za povratno dobo OR so na sliki 2 prikazane tudi vrednosti letnih maksimumov, ki smo jih uporabili v analizah. Opazimo lahko, da razlika med prikazanima kopulama ni izrazita. Vidimo lahko tudi, da ima večina letnih maksimumov povratno dobo OR manjšo od 1,5 let, le za en dogodek pa je ta večja od 3,5 let, kar si lahko razlagamo tako, da je verjetnost, da se zgodi vsaj ena izmed spremenljivk (konice, volumni ali časi trajanja) relativno velika in posledično je multivariatna vrednost skupne povratne dobe OR dokaj majhna.



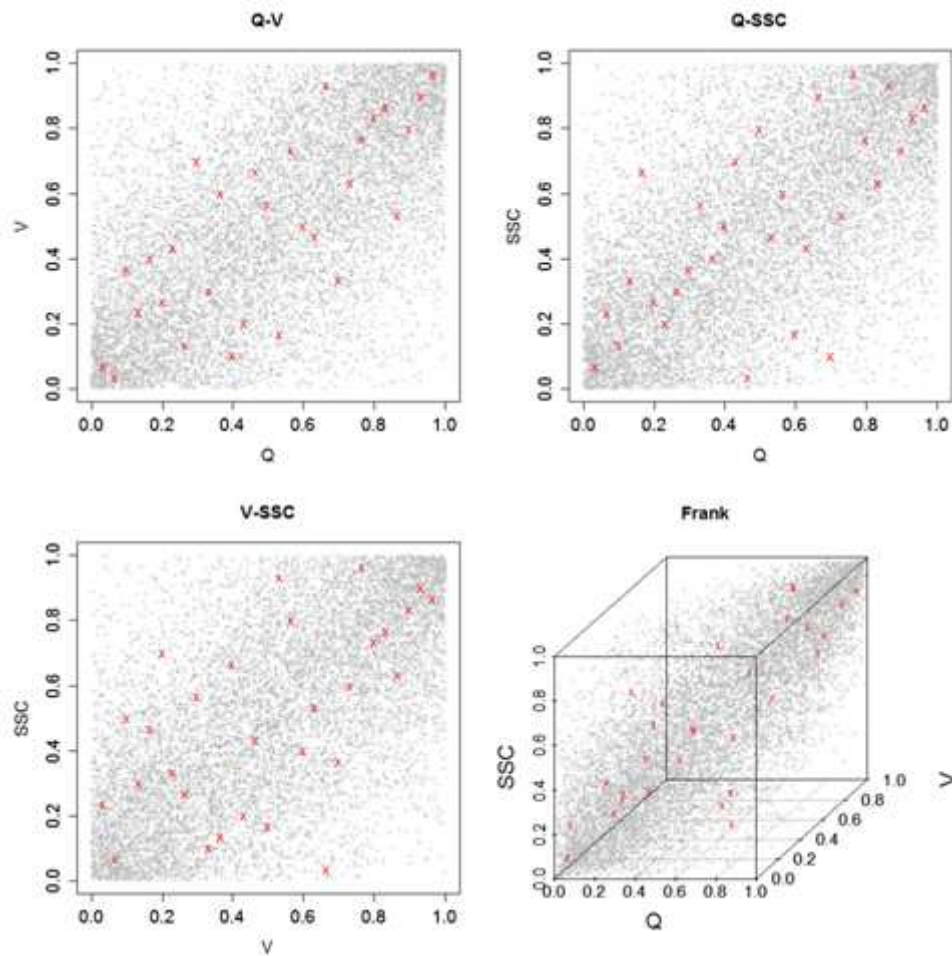
Slika 2: Prikaz izmerjenih podatkov in skupnih povratnih dob (OR primer) za normalno ter Frank kopulo za trajanje visokovodnega vala (D) 15 dni za vodomerno postajo Litija na reki Savi

Trivariatna verjetnostna analiza konic pretokov, volumnov in koncentracij suspendiranih snovi

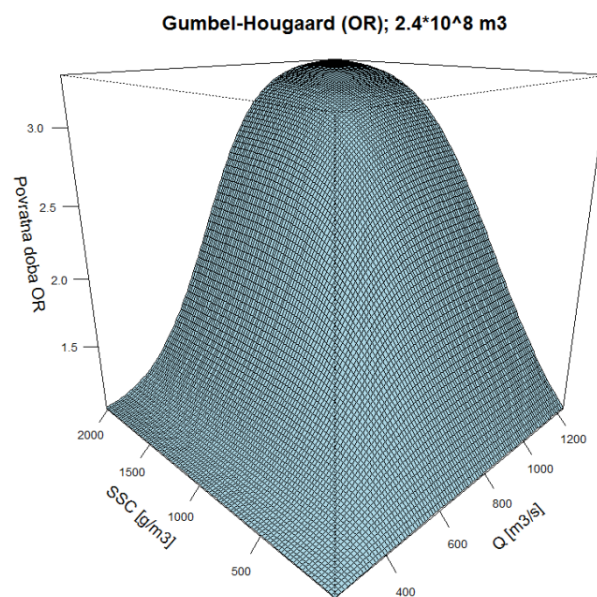
Naslednji problem, ki smo se ga lotili z uporabo funkcij kopula, je analiza konic pretokov (Q), pripadajočih volumnov valov (V) ter pripadajočih vrednosti koncentracij suspendiranih snovi (SSC) (Bezák et al., 2013b). Za izvedbo teh analiz smo uporabili podatke z vodomerne postaje Gornja Radgona na reki Muri (29 vrednosti letnih maksimumov), ki ima najdaljši niz meritev suspendiranih snovi, ki jih je izvajala Agencija RS za okolje (ARSO, 2013). Postopek analize je enak kot pri trivariatnih analizah visokovodnih valov (prejšnje poglavje).

Za izločanje baznega odtoka smo tokrat uporabili dvo-točkovno metodo. Kot robno porazdelitev konic smo izbrali Gumbelovo porazdelitev, za modeliranje volumnov smo določili log-normalno porazdelitveno funkcijo, za opis koncentracij suspendiranih snovi pa generalizirano Pareto porazdelitev. Parametre univariatnih porazdelitev smo ponovno ocenili z uporabo metode momentov L (Hosking & Wallis, 1997). Izračunali smo vrednosti Kendallovega koeficienta korelacije za pare podatkov: Q-V 0,56; Q-SSC 0,50 in V-SSC 0,40. Ker so vse tri vrednosti korelacij statistično značilne (stopnja značilnosti 0,05) in razlike med njimi niso izrazite, smo se odločili za izvedbo verjetnostnih analiz z uporabo simetričnih trivariatnih funkcij kopula (alternativna možnost bi bile asimetrične kopule). Za ocenjevanje parametrov smo tokrat uporabili pseudo metodo največjega verjetja (Salvadori et al., 2007; Ma et al., 2011). Z uporabo grafičnih ter statističnih testov (Cramér-von Mises) smo tudi tokrat poskušali izbrati najustreznejšo kopulo. Sliki 3 in 5 prikazujeta dva grafična testa, kjer so prikazani rezultati za kopulo Frank iz Arhimedove družine kopul. Z rdečimi znaki x so ponovno označeni letni maksimumi, s sivo barvo pa so označeni generirani podatki, ki so bili določeni na podlagi definiranega kopula modela, ki smo ga določili na podlagi podatkov o letnih maksimumih. Z uporabo grafičnih in statističnih testov smo kot najustreznejšo določili kopulo Gumbel-Hougaard iz Arhimedove družine.

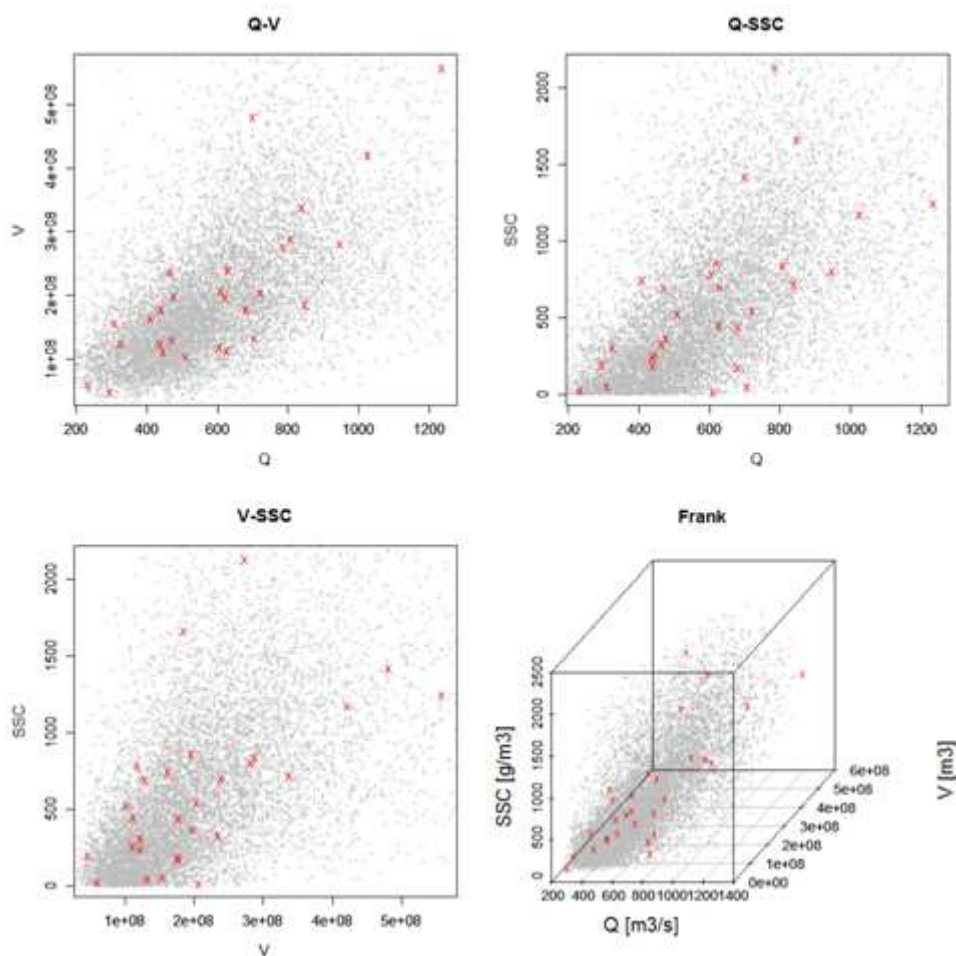
Slika 4 prikazuje rezultate skupne (angl. *joint*) povratne dobe OR za kopulo Gumbel-Hougaard iz Arhimedove družine. Izrisani so rezultati za vrednost volumna visokovodnega vala $2,4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$. Pogojna povratna doba OR ponovno označuje primer, ko se zgodi vsaj ena izmed obravnavanih spremenljivk.



Slika 3: Grafični test I za kontrolo ustreznosti kopule Frank za podatke z vodomerne postaje Gornja Radgona na reki Muri



Slika 4: Skupna povratna doba OR za kopulo Gumbel-Hougaard za vrednost pretoka $2,4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ na postaji Gornja Radgona na reki Muri



Slika 5: Grafični test II za kontrolo ustreznosti kopule Frank za podatke z vodomerne postaje Gornja Radgona na reki Muri

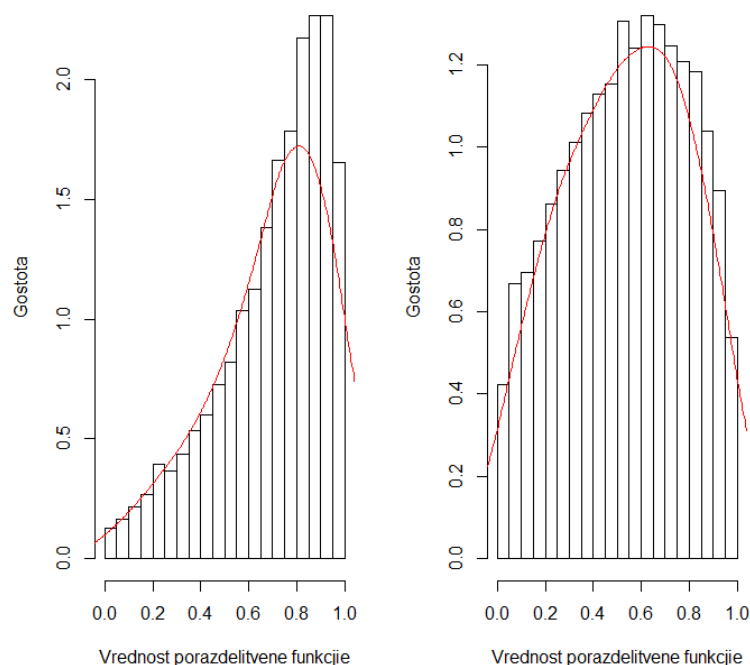
Ocenjevanje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi na podlagi vrednosti pretokov in padavin

Kot zadnji praktični primer smo obravnavali model, s katerim lahko ocenimo vrednosti koncentracij suspendiranih snovi (SSC) na podlagi vrednosti pretokov in padavin. Ker so meritve koncentracij suspendiranih snovi precej redkejše kot meritve pretokov in padavin, se pogosto pojavi potreba po oceni manjkajočih podatkov. Agencija RS za okolje je v letu 2012 (začasno) prenehala izvajati monitoring te hidrološke spremenljivke (Bezák et al., 2013b). Najpogosteje se za ocenjevanje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi uporabljajo različne regresijske funkcije, kot so linearna funkcija, polinomi višjih redov ali eksponentna funkcija. Uporaba teh preprostih modelov je smiselna, ko je korelacija med vrednostmi pretokov in koncentracijami relativno visoka. V primeru, ko je korelacija majhna oz. blizu vrednosti 0, to pomeni, da visoke (nizke) vrednosti pretokov ne pomenijo nujno visokih (nizkih) vrednosti koncentracij suspendiranih snovi. V tem primeru je uporaba regresijskih krivulj vprašljiva. V predstavljenem primeru smo za ocenjevanje manjkajočih SSC vrednosti uporabili mesečne vsote treh merjenih spremenljivk (pretoki, koncentracije suspendiranih snovi ter padavine). Možna je uporaba modela tudi z upoštevanjem dnevnih serij podatkov, vendar je avtokorelacija v tem primeru izrazitejša, zato je potrebno za opis posameznih robnih porazdelitev uporabiti t.i. časovne modele (angl. *time series model*), kot je npr. ARMA model (angl. *autoregressive moving average model*). Z uporabo teh modelov v bistvu transformiramo izhodiščne dnevne vrednosti

spremenljivk tako, da se znebimo avtokorelacije v podatkih. Pogoji za izvedbo vseh analiz s funkcijo kopula ter tudi za izvedbo verjetnostnih analiz je, da podatki niso avtokorelirani. To pomeni, da vrednost pretoka v nekem dnevu ni odvisna od vrednosti pretokov v prejšnjih dnevih. Zato smo se odločili, da bomo model za ocenjevanje koncentracij suspendiranih snovi najprej poskusili narediti na mesečnih vsotah. Tak model bi npr. lahko uporabili za ocenjevanje masne bilance lebdečih plavin.

Uporaba vrednosti padavin je smiselna, ker smo uporabili podatke z vodomerne postaje Ranca na reki Pesnici, ki ima prispevno površino veliko 84 km^2 , in ker padavinska postaja Polički vrh leži blizu hidrološke postaje, poleg tega pa je korelacija med mesečnimi vsotami padavin in mesečnimi vsotami koncentracij suspendiranih snovi večja kot korelacija med pretoki ter koncentracijami.

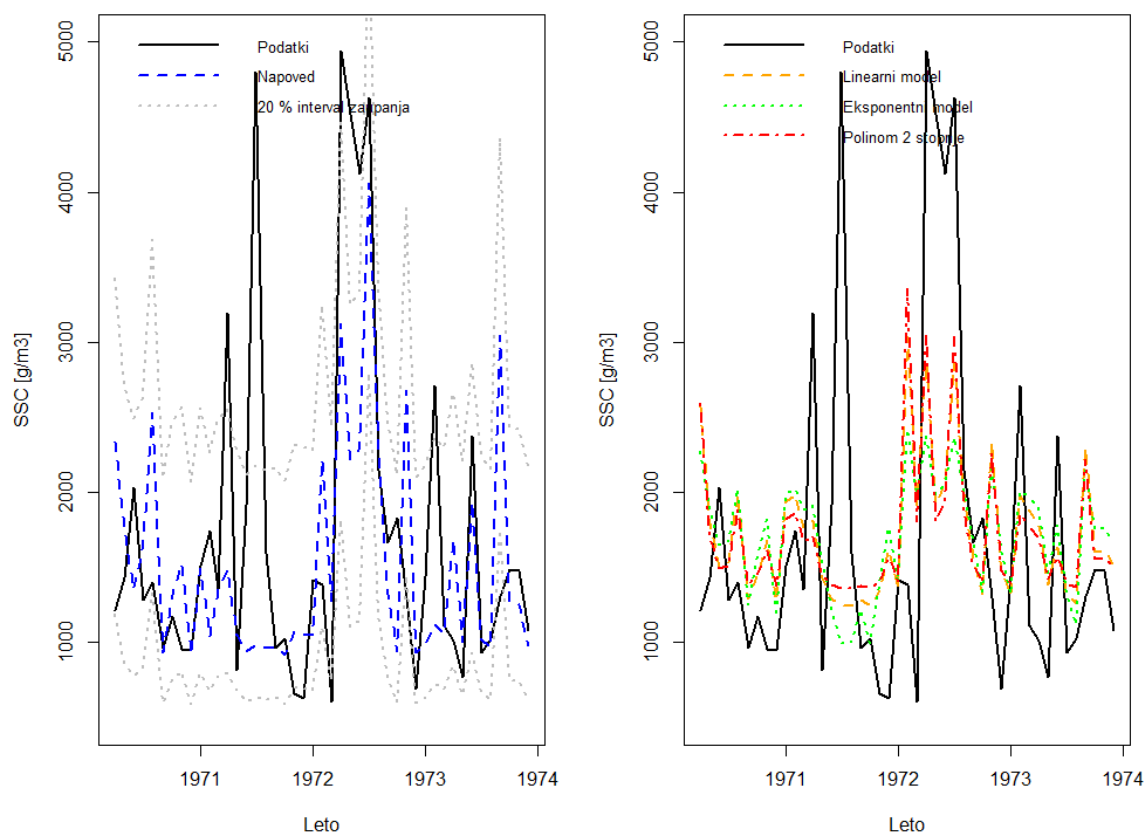
Za izvedbo analize smo uporabili 45 mesečnih vsot pretokov, koncentracij suspendiranih snovi ter mesečnih vsot padavin (preglednica 1). Najprej smo preverili, ali je v vzorcu prisotna avtokorelacija. Z uporabo Box-Pierce testa smo ugotovili, da je v seriji koncentracij suspendiranih snovi prisotna avtokorelacija, smo te podatke najprej transformirali z uporabo Box-Cox transformacije. Za preverjanje stacionarnosti in homogenosti vzorca smo uporabili še Mann-Kendall ter SNHT (angl. *standard normal homogeneity test*) testa. Ugotovili smo, da so vsi vzorci primerni za izvedbo analiz. Z uporabo grafičnih in statističnih testov smo kot robne porazdelitve določili naslednje funkcije: generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti za pretoke, Gumbelova porazdelitev za padavine ter log-normalno porazdelitev za koncentracije suspendiranih snovi. Za ocenjevanje parametrov smo ponovno uporabili metodo momentov L (Hosking & Wallis, 1997). Z uporabo statističnega testa Cramér-von Mises in grafičnih testov smo kopulo Gumbel-Hougaard določili kot najprimernejšo za izvedbo analize. Nato smo generirali 10000 vzorcev na podlagi enakomerne porazdelitve. Z Newtonovo metodo smo poiskali ničle funkcije, zapisane z enačbo 4.



Slika 6: Primer raztrosa možnih rešitev enačbe 4 v obliki histograma z izrisano neparametrično gostoto verjetnosti

Slika 6 prikazuje raztros možnih rešitev enačbe 4, ki smo jih dobili s simulacijo, na sliki pa je izrisana tudi neparametrična gostota verjetnosti, na podlagi katere smo določili

najverjetnejšo vrednost porazdelitvene funkcije (maksimum neparametrične gostote verjetnosti). Za vsak mesec smo tako dobili tak raztros vrednosti (slika 6), na podlagi teh rezultatov pa smo določili tudi empirične intervale zaupanja.



Slika 7: Primerjava rezultatov kopula modela (levo) za ocenjevanje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi z izrisanimi 20 % intervali zaupanja in rezultati običajnih regresijskih modelov (desno)

Primerjava med modelom kopula ter med običajnimi regresijskimi modeli je prikazana na sliki 7. Pri modelu kopula so izrisani tudi empirični intervali zaupanja. Nato smo z uporabo testov primerjali 4 predlagane modele. Odločili smo se za uporabo Nash-Sutcliffe, RMSE (angl. *root mean square error*) ter MAE (angl. *mean absolute error*) testov, poleg tega smo izračunali tudi povprečno razliko med izmerjenimi in napovedanimi (modeliranimi) vrednostmi, preverili pa smo tudi, kakšne so razlike med minimalnimi, maksimalnimi in srednjimi vrednostmi. Rezultati so prikazani v preglednici 4. Opazimo lahko, da pri modelu kopula dobimo boljše rezultate kot pri regresijskih modelih. Rezultati tudi z uporabo modela kopula niso najboljši (slika 7), so pa boljši kot tisti, do katerih bi prišli z uporabo metod, ki se večinoma uporabljajo za ocenjevanje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi. Iz preglednice 4 lahko vidimo, da regresijski modeli podcenijo maksimalne vrednosti in precenijo minimalne vrednosti koncentracij. Tudi v tem primeru smo z uporabo modela kopula dosegli izboljšanje rezultatov. Cilj je dobiti čim manjše vrednosti testov RMSE in MAE, ter vrednost testa NSE čim bližje vrednoti 1. Regresijski modeli so dali boljše rezultate le pri oceni povprečne vrednosti, kar pa je verjetno posledica dejstva, da je varianca teh modelov manjša.

Preglednica 4: Primerjava rezultatov različnih modelov za ocenjevanje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi

	Podatki	Model kopula	Linearni model	EkspONENTNI model	Polinom 2. stopnje
Nash-Sutcliffe	1	0,22	0,16	0,08	0,16
RMSE	0	1015	1053	1101	1048
MAE	0	682	773	798	762
Povprečna razlika [%]	0	6,7	28,6	29,5	28,6
Minimalna napoved [g/m ³]	604	918	1243	997	1364
Srednja napoved [g/m ³]	1724	1520	1725	1712	1725
Maksimalna napoved [g/m ³]	4939	4058	3037	2421	3360

Analiza rezultatov in razprava

Pri bivariatnih verjetnostnih analizah visokovodnih valov smo ugotovili, da razlike med posameznimi kopulami iz Arhimedove družine kopul, kot so Gumbel-Hougaard ali Frank, niso izrazite (Šraj et al., 2013a). Za modeliranje para konice pretokov in pripadajočih volumnov visokovodnih valov smo izbrali kopulo Gumbel-Hougaard, kar je v skladu z ugotovitvami nekaterih drugih raziskovalcev (Poulin et al., 2007; Karmakar & Simonovic, 2009). Uporaba kopul, ki nimajo poudarka na zgornjem robu porazdelitve (angl. *upper tail dependence*), kar je recimo kopula Frank iz Arhimedove družine kopul, lahko pripelje do tega, da podcenimo vrednosti, ki pripadajo določeni povratni dobi (Poulin et al., 2007). Pri primerjavi univariatnih (običajnih) in skupnih bivaraitnih povratnih dob smo ugotovili (Šraj et al., 2013a), da velja zveza $T_{u,v}^{OR} < T_{u,v}^{UNI} < T_{u,v}^{AND}$, kar je v skladu z ugotovitvami drugih raziskovalcev (Salvadori et al., 2007).

Pri trivariatnih verjetnostnih analizah smo uporabili različne v literaturi pogosto uporabljene kopule (Ma et al., 2011; Ganguli & Reddy, 2013). Z uporabo statističnih ter v literaturi pogosto uporabljenih grafičnih testov (Genest & Favre, 2007) smo določili najustreznejšo funkcijo kopula. Ponovno smo izbrali kopulo Gumbel-Hougaard. Izračunali pa smo tudi skupni povratni dobi OR ter AND (Ganguli & Reddy, 2013). Tudi pri trivariatnem primeru smo ugotovili, da velja zveza $T_{u,v,d}^{OR} < T_{u,v,d}^{UNI} < T_{u,v,d}^{AND}$. Vrednosti povratnih dob so bile odvisne od lastnosti funkcij kopul, predvsem od obnašanja na zgornjem robu porazdelitve (Poulin et al., 2007).

Pri trivariatnih verjetnostnih analizah konic pretokov, volumnov valov ter vrednosti koncentracij suspendiranih snovi smo uporabili enak postopek kot pri trivariatnih analizah visokovodnih valov. Z uporabo grafičnih in statističnih testov (Genest & Favre, 2007; Genest et al., 2009; Kojadinovic et al., 2011) smo določili kopulo Gumbel-Hougaard kot najprimernejšo za izvedbo analiz. To kopulo smo izbrali tudi zaradi dejstva, ki smo ga upoštevali že pri bivariatnih analizah, in sicer da lahko nekatere kopule podcenijo ocenjene vrednosti spremenljivk, ki pripadajo izbrani skupni povratni dobi (Poulin et al., 2007). Predstavljena metodologija se je izkazala za uporabno, predvsem pa bi rezultati verjetnostnih analiz morali biti bolj zanesljivi, saj v analizah hkrati upoštevamo tri spremenljivke, medtem ko pri običajnih univariatnih verjetnostnih analizah upoštevamo le eno spremenljivko.

Ocenjene vrednosti koncentracij suspendiranih snovi, ki so rezultat kopula modela, bi lahko označili za bolj zanesljive od tistih, ki jih lahko izračunamo z regresijskimi modeli (slika 7), saj poleg vrednosti pretokov pri ocenjevanju upoštevamo tudi vrednosti padavin, kar predstavlja izboljšavo do sedaj v praksi največkrat uporabljenih metod. Postopek izvedbe analize je enak kot pri prvih treh problemih, ki smo jih obravnavali, s to razliko, da nas tukaj ne zanimajo povratne dobe, ampak želimo izvesti simulacije z uporabo enačbe 4. Teoretično bi lahko v model vpeljali še več spremenljivk in tako poskušali izboljšati končne rezultate modela, vendar bi v tem primeru postopek vseboval dodatne korake (Salvadori et al., 2007). Število uporabljenih parametrov pri kopula modelu je nekoliko večje od števila parametrov pri regresijskih modelih, saj moramo oceniti parameter kopule, ki opisuje odvisnost (vse uporabljene kopule imajo 1 parameter, obstajajo pa tudi kompleksnejše kopule z več parametri), poleg tega pa ocenjene vrednosti določa tudi pasovna širina (angl. *bandwidth*) izbrane neparametrične porazdelitvene funkcije. Določiti pa je potrebno še parametre porazdelitvenih funkcij, ki opisujejo modelirane spremenljivke.

Zaključki

V prispevku smo prikazali uporabo funkcij kopula na štirih praktičnih primerih. Obravnavali smo bivariatne ter trivariatne analize visokovodnih valov reke Save v Litiji, naredili smo trivariatne verjetnostne analize konic pretokov, volumnov valov ter koncentracij suspendiranih snovi, za kar smo uporabili podatke s postaje Gornja Radgona na reki Muri. Poleg tega smo definirali model, s katerim lahko na podlagi vrednosti pretokov ter padavin ocenimo vrednosti lebdečih plavin (SSC) in obenem tudi definiramo empirične intervale zaupanja. Za izgradnjo tega modela smo sicer uporabili mesečne vsote hidroloških spremenljivk, vendar bi bila aplikacija možna tudi na dnevni vrednostih, kar pa presega okvire tega prispevka.

Med izvajanjem analiz smo ugotovili, da je za hidrološke probleme v večini primerov najprimernejša kopula Gumbel-Hougaard, ki spada tako v Arhimedovo družino kot v družino kopul ekstremnih vrednosti. Za ocenjevanje parametrov kopul smo uporabili različne metode, kot so metoda momentov, metoda največjega verjetja ter pseudo metoda največjega verjetja. Pri verjetnostnih analizah smo izračunali skupne povratne dobe imenovane OR ter AND, pri ocenjevanju parametrov pa smo s simulacijami ocenili vrednosti koncentracij suspendiranih snovi. Ker smo model za ocenjevanje SSC vrednosti definirali sami, rezultatov analiz nismo mogli primerjati z rezultati iz literature, ampak le z rezultati regresijskih modelov, kjer smo ugotovili, da je predstavljena metodologija za ocenjevanje vrednosti koncentracij suspendiranih snovi primerna. Možna pa bi bila tudi razširitev modela, tako da bi upoštevali dnevne vrednosti spremenljivk.

Uporaba funkcij kopula na praktičnih primerih je pokazala, da so kopule uporabno matematično orodje, ki ga lahko uporabimo pri številnih praktičnih problemih v hidrologiji, kjer nastopa več medsebojno bolj ali manj odvisnih spremenljivk.

Zahvala

Zahvaljujemo se Agenciji RS za okolje za posredovane podatke, ki smo jih uporabili za izvedbo analiz. Del rezultatov raziskave je nastal v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2-4096, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Del rezultatov pa je prispevek dela UL FG na mednarodnem raziskovalnem

projektu SedAlp, ki ga financira Evropska unija v okviru programa Alpine Space. Zahvaljujemo se tudi obema recenzentoma za njune koristne komentarje.

Literatura

- ARSO. 2013. Podatki, Hidrološki arhiv, Arhiv površinskih voda. Dostopno na: http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php.
- Bardossy, A., Li, J. (2008). Geostatistical interpolation using copulas, *Water resources research* 44(7).
- Bezak, N., Brilly, M., Šraj, M. (2013a). Comparison between the peaks over threshold method and the annual maximum method for flood frequency analyses, *Hydrological Science Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.831174.
- Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M. (2013b). Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov, *Gradbeni vestnik* (v tisku).
- De Michele, C., Salvadori, G., Canossi, M., Petaccia, A., Rosso, R. (2005). Bivariate Statistical Approach to Check Adequacy of Dam Spillway, *Journal of Hydrological Engineering* 10(1), 50-57.
- Favre, A. C., Aldouni, E.L., Perreault L., Thiémonge, N., Bobee, B. (2004). Multivariate hydrological frequency analysis using copulas, *Water resources research* 40(1).
- Ganguli, P., Reddy, M. J. (2013). Probabilistic assessment of flood risks using trivariate copulas, *Theoretical and Applied Climatology* 111(1-2), 341-360.
- Genest, C., Favre, A. C. (2007). Everything you always wanted to know about copula modelling but were afraid to ask, *Journal of Hydrological Engineering* 12, 347-368.
- Genest, C., Remillard, B., Beaudoin, D. (2009). Goodness-of-fit tests for copulas: A review and a power study, *Insurance: Mathematics and Economics* 44, 199-213.
- Grimaldi, S., Serinaldi, F. (2006). Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis, *Advances in Water Resources* 29(8), 1155-1167.
- Graler, B., van den Berg, M. J., Vandenberghe, S., Petroselli, A., Grimaldi, S., De Baets, B., Verhoest, N. E. C. (2013). Multivariate return periods in hydrology: a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation, *Hydrology and Earth System Sciences* 17(4), 1281-1296.
- Hofert, M., Mächler, M. (2011). Nested Archimedean Copulas Meet R: The nacopula Package, *Journal of Statistical Software* 39(9).
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge, Cambridge University Press, 224 p.
- Joe, H. (1997). *Multivariate Models and Multivariate Dependence Concepts*. Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability, 424 p.
- Karmakar, S., Simonovic, S. P. (2009). Bivariate flood frequency analysis. Part 2: a copula based approach with mixed marginal distributions, *Journal of Flood Risk Management* 2, 32-44.
- Kojadinovic, I., Yan, J., Holmes, M. (2011). Fast large-sample goodness-of-fit for copulas, *Statistica Sinica* 21(2), 841-871.
- Ma, M., Song, S., Ren, L., Jiang, S., Song, J. (2011). Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and Student t copulas, *Hydrological Processes* 27(8), 1175-1190.
- Nelsen, R. B. (2006). *An Introduction to Copulas*. Springer Series in Statistics, 272 p.
- Poulin, A., Huard, D., Favre, A. C., Pugin, S. (2007). Importance of tail dependence in bivariate frequency analysis, *Journal of Hydrological Engineering* 12, 394-403.
- Salvadori, G., De Michele, C. (2004). Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events, *Water resources research* 40(12).
- Salvadori, G., De Michele, C., Durante, F. (2011). On the return period and design in a multivariate framework, *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 3293-3305.

- Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N., Rosso, R. (2007). *Estremes in nature: An Approach Using Copulas*. Water Science and Technology Library, 292 p.
- Shiau, J. T., Feng, S., Nadaraiah, S. (2007). Assessment of hydrological droughts for the Yellow River, China, using copulas, *Hydrological Processes* 21(16), 2157-2163.
- Sklar, A. (1959). Fonctions de repartition a n dimensions et leurs marges, *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris* 8, 229-231.
- Šraj, M., Bezak, N. (2013). Analiza visokovodnih valov Save v Litiji, *Ujma* 27, 228-235.
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. (2013a). Bivariate flood frequency analyses using copula function, *European Geosciences Union* 2013.
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. (2013b). Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji, *Acta Hydrotechnica* (v tisku).
- Wong, G., Lambert, M. F., Leonard, M., Metcalfe, A. V. (2010). Drought Analysis Using Trivariate Copulas Conditional on Climate States, *Journal of Hydrological Engineering* 15, 129-141.
- Zhang, L., Singh, V. P. (2007). Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas, *Journal of Hydrology* 332(1-2), 93-109.

Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic za primer vodomernih postaj v Sloveniji

Katarina Kavčič, Mitja Brilly, Mojca Šraj*

Povzetek

Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic je neke vrste nadgradnja klasične verjetnostne analize, ki temelji na hidroloških regijah, ki jih sestavljajo vodomerne postaje s podobnimi lastnostmi. Za njeno izvedbo so potrebni štirje glavni koraki. Najprej se pripravi in preveri podatke, temu sledi oblikovanje hidroloških regij, izbira verjetnostne porazdelitve posameznih regij in ocena parametrov teh porazdelitev. V analizo smo vključili 112 vodomernih postaj iz cele Slovenije, za glavno kontrolo podatkov pa smo uporabili test neskladnosti. Ta je kot kritične izpostavil tri postaje, ki pa smo jih v nadaljevanju kljub temu upoštevali brez težav. Pri oblikovanju hidroloških regij smo uporabili dve metodi razvrščanja, Wardovo metodo in metodo voditeljev, končne regije pa smo določili na podlagi rezultatov slednje. Oblikovali smo devet regij, ki so združevale med 3 in 19 postaj, mera heterogenosti pa se je gibala med -1,21 in 0,8. Tudi izbiro verjetnostne porazdelitve posameznih regij smo izvedli na dva načina in sicer najprej za skupne podatke regij nato pa še za podatke posameznih vodomernih postaj v regiji. V obeh primerih smo uporabili več testov ustreznosti. Ugotovili smo, da je verjetnostno porazdelitev najbolje izbirati z dvema do največ tremi različnimi metodami. Zadnji korak pa je dal podobne vrednosti ocenjenih kvantilov ne glede na način izbire verjetnostne porazdelitve.

Ključne besede: hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic, momenti L, metode razvrščanja, testi ustreznosti porazdelitve, mera heterogenosti

Key words: regional flood frequency analysis, L-moments, cluster analysis, goodness-of-fit tests, heterogeneity measure

Uvod

Po podatkih Inštituta za vode Republike Slovenije (2013) imamo v Sloveniji več kot 26.000 km vodotokov, več kot polovica jih ima stalno tekočo vodo. Vsakoletne poplave zalijejo okrog 23 km² površin, za poplavno ogrožene pa jih je označenih kar 3.000 km², kar predstavlja skoraj 15 % površine celotne države. Več kot polovica vsega poplavnega sveta je v porečju Save, ki mu pripada 58 % ozemlja države. V porečju Drave je 42 % poplavnih površin, v porečju Soče in pritokov pa 4 % (Uprava RS za zaščito in reševanje, 2013). Ukrepe, ki jih izvajamo z namenom preprečiti ali čim bolj zmanjšati posledice poplav, glede na vrsto posega delimo na vodogradbene (gradnja hidrotehničnih objektov – nasipi, pregrade, obtoki) in alternativne ukrepe (upravno-zakonski ukrepi, prostorsko načrtovanje, omejevanje dejavnosti, nezgodno zavarovanje) (Brilly et al., 1999). Ne glede na to, za kakšen ukrep gre, pa je za njegovo kakovostno načrtovanje potrebno poznati podatke o projektnih pretokih. Osnovna metoda za določevanje projektnih pretokov s predpisano povratno dobo je verjetnostna analiza. Verjetnostna analiza je postopek, ki povezuje različno obsežne hidrološke pojave s pogostostjo njihovega pojavljanja, njena nadgradnja pa je hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz.

Pogosto se zgodi, da je za verjetnostno analizo na voljo več med seboj povezanih podatkov, kot na primer meritve pretokov ob nekem ekstremnem dogodku na različnih

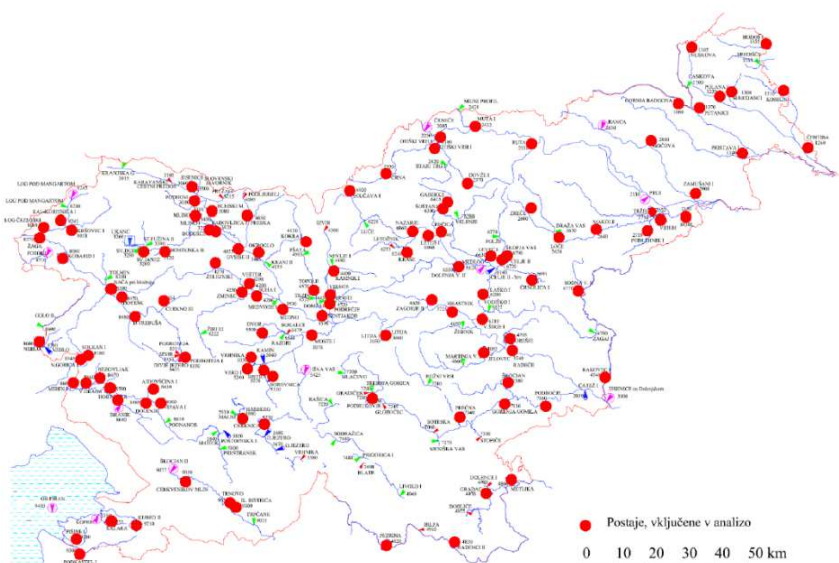
* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

vodomernih postajah. Če je pogostost dogodka podobna za različne opazovane količine, so z analizo vseh vzorcev podatkov skupaj lahko doseženi boljši rezultati. Ob uporabi tega pristopa govorimo o hidrološki regionalizaciji verjetnostnih analiz (ang. *regional frequency analysis*), saj so analizirani vzorci po navadi rezultati opazovanj iste spremenljivke na več merilnih mestih na območju ustrezno definirane "hidrološke regije". Metoda ima štiri glavne korake: pregled in pripravo podatkov, določanje homogenih hidroloških regij, izbiro verjetnostne porazdelitve za posamezne hidrološke regije in oceno parametrov izbrane verjetnostne porazdelitve hidrološke regije. Ta postopek se največkrat uporablja takrat, ko so na voljo raznovrstni vzorci enakih podatkov (Hosking in Wallis, 1997). Prednost regionalizacije je tudi v tem, da lahko dobimo ocene projektnih pretokov tudi za lokacije s pomanjkljivimi podatki oziroma kratkimi nizi meritev (nove postaje).

Glavni namen študije je predstavitev metodologije in prikaz njene praktične uporabe za naš prostor. Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz se že nekaj desetletij intenzivno uporablja po vsem svetu, v Sloveniji pa je še dokaj neznana, saj ob pregledu domače literature njene uporabe v slovenskem prostoru nismo zasledili. Tako smo v prispevku predstavili potrebne korake za izvedbo regionalne verjetnostne analize visokovodnih konic in predstavili osnovne metode, ki se pri posameznem koraku lahko uporabljajo. Ker je primernih metod več, smo izbrali nekaj najbolj pogosto uporabljenih in med seboj primerjali z njimi dobljene rezultate. Analizirali smo prednosti in slabosti različnih metod ter ugotavljali, katera je najbolj primerna za uporabo.

Podatki

V študiji smo želeli zajeti čim večje število vodomernih postaj v Sloveniji. Po podatkih ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2013) je v Sloveniji v okviru državnega hidrološkega monitoringa na površinskih vodah trenutno delujočih 192 vodomernih postaj. Izmed njih smo izločili tiste, ki so postavljene na izvirih, jezerih ali morju, tiste, na katerih se meritve opravlja le z vodomernimi letvami, tiste, katerih obdobje meritev je krajše od 15 let in tiste, pri katerih v nizih podatkov o najvišjih izmerjenih letnih pretokih manjka več kot 10 % vrednosti. Na postajah, kjer so bili podatki dostopni že pred letom 1950, izmerjenih vrednosti pred tem letom nismo upoštevali, saj je njihova točnost vprašljiva. Tako je bilo na koncu v analizo vključenih 112 vodomernih postaj (slika 1).



Slika 1: Karta vodomernih postaj vključenih v analizo (povzeto po ARSO, 2013)

Pregled in priprava podatkov

Prvi korak pri verjetnostni analizi je preverjanje in urejanje podatkov. To, da so ti pravilni, je zelo pomembno pri vsaki statistični analizi, saj vse nadaljnje delo izhaja iz njih. Ne glede na tip podatkov v statistiki običajno preverjamo manjkajoče podatke, izstopajoče podatke, normalnost in linearnost (Important issues in data screening, 2013).

Poleg osnovnega preverjanja pa je dobro biti pozoren še na dve najpogostejši napaki, napačno vrednost podatkov in neupoštevanje spremembe razmer, v katerih se meritve izvajajo. Glede na to Hosking in Wallis (1997) za hidrološko regionalizacijo verjetnostnih analiz priporočata vsaj tri načine preverjanja podatkov:

- pregled posameznih vrednosti podatkov, ki razkrije velike napake,
- pregled podatkov za vsako lokacijo, ki razkrije izstopajoče in ponavljajoče se podatke,
- primerjavo podatkov med posameznimi lokacijami, ki razkrije neskladnost podatkov.

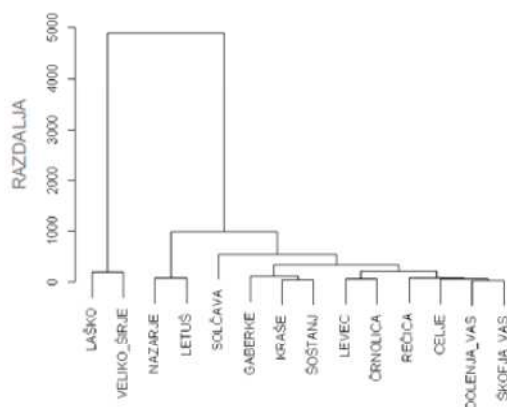
Za primerjavo podatkov posameznih lokacij je na voljo več različnih metod, kot na primer QQ diagram ali graf dvojne masne krivulje (ang. *double-mass plot*). Hosking in Wallis (1997) pa priporočata, da se v primeru regionalne verjetnostne analize z momenti L uporabi tako imenovan test neskladnosti (ang. *discordancy measure*), ki temelji na primerjavi razmerij momentov L različnih lokacij. Mejna vrednost, pri kateri neka postaja ni več skladna s skupino, je podana kot D_i (mera neskladnosti) in za primer 15 ali več postaj znaša 1. Test se lahko uporabi za veliko število enot na nekem geografskem območju, saj tiste z velikimi napakami v podatkih ne bodo skladne z drugimi (Chavoshi Borujeni in Azmin Sulaiman 2009); s tem preverimo podatke med posameznimi lokacijami in njihovo skladnost za vse postaje, zajete v analizi.

Določanje homogenih hidroloških regij

Drugi korak hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz visokovodnih konic, ki je po navadi najtežji in zahteva največ subjektivne presoje, je delitev postaj v homogene hidrološke regije. Hidrološko regijo si lahko razlagamo tudi kot skupino vodomernih postaj, za katere lahko s kombiniranjem podatkov o ekstremnih pretokih izboljšamo napovedi za katerokoli postajo v regiji (Burn in Goel, 2000).

Za razvrščanje vodomernih postaj v hidrološke regije lahko uporabimo več različnih postopkov. Katerega uporabimo, je odvisno od podatkov, ki jih imamo na voljo, in lastne presoje. Poznamo več možnih načinov razvrščanja: glede na geografsko ustreznost, subjektivno delitev, objektivno delitev, metode razvrščanja in druge multivariatne analize (Hosking in Wallis, 1997). Najpogostejše se uporablja različne metode razvrščanja, saj so najbolj primerne za delo z velikim številom podatkov. Delitev postaj v regije po tej metodi temelji na principu podobnosti. Gre namreč za to, da so znotraj ene skupine združene vse tiste postaje, ki so si glede na predhodno določene kriterije med seboj podobne. Vsaka postaja pripada samo eni skupini, te pa se med seboj ne prekrivajo (Košmelj in Breskvar Žaucer, 2006). Najpogostejše uporabljeni metodi razvrščanja v primeru hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz sta Wardova metoda in metoda voditeljev (ang. *K-means*).

Wardova metoda je ena izmed hierarhičnih metod razvrščanja, ki se začne s tolikšnim številom skupin kot je posameznih enot. Glede na podobnosti med njimi se te med seboj združujejo, dokler ne dobimo ene same velike skupine, kar lahko pregledno prikažemo z dendrogramom (slika 2). Združevanje lahko kadarkoli prekinemo.



Slika 2: Primer dendrograma za vodomerne postaje v porečju Savinje

Metoda voditeljev spada v skupino nehierarhičnih metod razvrščanja. Še pred začetkom delitve je potrebno podati želeno število končnih skupin. Glede na to definiramo enako število voditeljev – enot, ki so predstavniki svojih skupin. Začetna množica voditeljev je po navadi določena naključno (Ferligoj, 1997).

Skupine, dobljene z metodo razvrščanja, po navadi še niso končni rezultat, saj je naš cilj oblikovati homogene hidrološke regije, kar zelo redko dosežemo po prvem razvrščanju. Z namenom izboljšati homogenost regije lahko uporabimo različne ukrepe, kot so na primer premeščanje postaj med skupinami, združevanje in razčlenjevanje skupin. Če je hidrološka regija povsem homogena velja, da so razmerja L-momentov za vsako postajo enaka. Ker pa to v praksi seveda ni mogoče, so regije, ki jih sicer imenujemo homogene, teoretično le "sprejemljivo homogene" (Hussain in Pasha, 2009). Potrebno je preveriti, ali je nihanje vrednosti razmerij momentov L znotraj regije še sprejemljivo za tako definicijo.

Za preverjanje homogenosti oziroma heterogenosti regije obstaja več različnih načinov, najpogosteje pa je uporabljen test heterogenosti, ki sta ga prva predstavila Hosking in Wallis (1997), uporabili pa so ga na primer še Norbiato in drugi (2007), Shu in Burn (2003) ter Hassan in drugi (2012). Rezultat tega testa je mera heterogenosti H . Regija je sprejemljivo homogena, če je vrednost $H < 1$ in mogoče heterogena, če je vrednost $1 \leq H < 2$, če pa je vrednost $H \geq 2$, je regija zagotovo heterogena.

Izbira verjetnostne porazdelitve za posamezne hidrološke regije

Pri hidrološki regionalizaciji verjetnostnih analiz se, po oblikovanju homogenih regij, v vseh nadaljnjih korakih dela le še s hidrološko regijo in njenimi lastnostmi, posameznih postaj se ne upošteva več. Tako se tudi najbolj primerno verjetnostno porazdelitev išče za celo skupino in ne le za eno postajo. Naš cilj je, da najdemo tako porazdelitev, ki bo z dovolj veliko točnostjo omogočala oceno kvantilov za vsako postajo, ki bo uvrščena v to hidrološko regijo (Hosking in Wallis, 1997).

Za preverjanje najustreznije porazdelitve obstaja veliko različnih testov (ang. *goodness-of-fit*). Nekatere izmed njih lahko uporabljamo neposredno za preverjanje celotnih regij, druge pa uporabljamo za vsako postajo v regiji posebej, potem pa rezultate za celo regijo združimo (Kavčič, 2013). Za uporabo s podatki celih regij sta primerna testa regionalna mera ustreznosti porazdelitve Z in diagram razmerij momentov L , poleg teh dveh pa smo izmed množice ostalih testov, primernih za podatke posameznih vodomernih postaj, uporabili še QQ diagrame, test PPCC, Kolmogorov-Smirnov test in test RMSE.

Mera ustreznosti porazdelitve Z je posebej prilagojena hidrološki regionalizaciji verjetnostnih analiz. Izhaja iz predpostavke, da je regija homogena in določa, kako dobro

sovpadajo razmerja momentov L, predvsem koeficienta asimetrije in sploščenosti izbrane verjetnostne porazdelitve ter merjenih podatkov, kar v tem primeru pomeni regijska povprečja (Hosking in Wallis, 1997). Prav tako je za to metodo prilagojen tudi diagram razmerij momentov L (ang. *L-moment ratio diagram*). To je graf, na katerem sta prikazani razmerji koeficienta asimetrije in sploščenosti izbranega niza podatkov. Kot najboljše porazdelitev izberemo tisto, ob krivulji katere je največ točk vodomernih postaj.

Za preverjanje ustreznosti izbrane porazdelitve za podatke posameznih vodomernih postaj, je primerna grafična metoda QQ diagrami, ki prikazujejo ujemanje podatkov obravnavanega vzorca z generiranimi podatki izbrane teoretične porazdelitve (NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 2013). Zelo podobno je tudi testiranje s korelacijskim koeficientom PPCC (ang. *probability plot correlation coefficient*), pri katerem pa gre namesto vizualne presoje za oceno na podlagi izračunane vrednosti. Še dva izmed uporabljenih testov, ki temeljita na številčnih vrednostih, pa sta Kolmogorov-Smirnov test, ki je osnovan na največji vertikalni razdalji med empirično in teoretično zbirno funkcijo (Millington et al., 2011) in test RMSE (ang. *root mean square error*), ki temelji na korenu srednjih vrednosti kvadratov napak (Šraj et al., 2012).

Ocena parametrov izbrane verjetnostne porazdelitve hidrološke regije

Pri analizah verjetnosti pojava poplav se za ocenjevanje parametrov porazdelitve pogosto uporabljajo momenti L (Bezak et al., 2013; Hussain in Pasha, 2009; Šraj et al., 2012). Postopek je zelo podoben metodi momentov, vendar ocene temeljijo na linearni kombinaciji reda statistike, zato so v primerjavi z navadnimi momenti veliko manj občutljivi na osamelce med podatki, omogočajo boljše ugotavljanje osnovne porazdelitve posameznega niza podatkov in imajo na splošno boljše statistične lastnosti. Določeni so kot linearna kombinacija verjetnostno uteženih momentov (ang. *probability weighted moments* – PWM) (Hussain in Pasha, 2009).

Za primer regionalizacije, pri kateri parametre in kvantile ocenjujemo glede na porazdelitev, ki je bila izbrana za regijo, torej za večje število vodomernih postaj, je najbolj ustrezen postopek za ocenjevanje regionalni algoritem momentov L. Postopek temelji na tako imenovani metodologiji indeksa poplav, pri kateri gre za povzemanje statističnih vrednosti iz različnih skupin podatkov. Glavna predpostavka metode indeksa poplav je ta, da postaje tvorijo homogeno regijo, kar pomeni, da je verjetnostna porazdelitev N postaj enaka, razen v primeru faktorja spremembe podatkov lokacije, ki ga imenujemo tudi indeks poplav (Hosking in Wallis, 1997).

Da bi vse skupaj poenostavili, privzamemo, da je indeks poplav kar srednja vrednost verjetnostne porazdelitve za vsako vodomerno postajo. Po tem je srednja vrednost spremenjenih podatkov za vsako postajo enaka 1, posledično pa toliko znaša tudi srednja vrednost za regijo. Prav tako pa so razmerja momentov L za vsako postajo enaka, ne glede na to, ali so izračunana iz spremenjenih ali začetnih vrednosti podatkov, zato poseben izračun spremenjenih podatkov ni potreben.

Izbrano verjetnostno porazdelitev prilagodimo podatkom tako, da njena razmerja momentov L izenačimo z regionalnimi povprečji, pri čemer pa upoštevamo, da je srednja vrednost enaka 1.

Ocena kvantilov brez prekoračitve verjetnosti F je:

$$\tilde{Q}_i(F) = I_1^{(i)} \hat{q}(F), \quad (1)$$

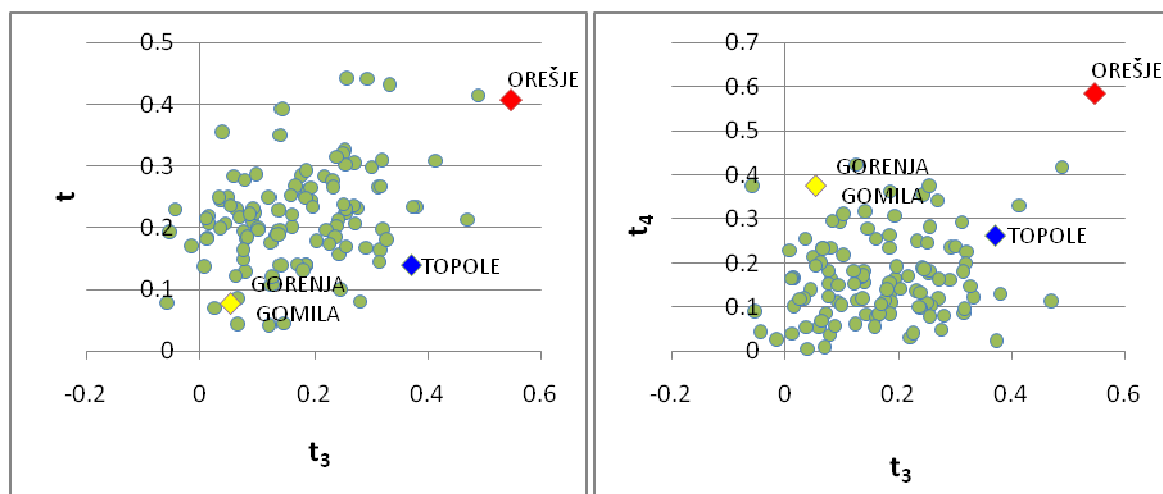
kjer sta $I_1^{(i)}$ srednja vrednost podatkov postaje in $\hat{q}(F)$ verjetnostna porazdelitev za regijo.

Rezultati in analiza

Na več načinov smo preverili pravilnost zbranih podatkov 112 vodomernih postaj, ki smo jih vključili v analizo. Uporabili smo tudi test neskladnosti, s katerim smo preverili več različnih možnosti. Najprej smo upoštevali delitev, ki je že bila narejena, to je po porečjih, nato smo postaje združili v šest skupin glede na velikost površine hidrometričnega zaledja, na koncu pa smo skupaj testirali še vse postaje. Mera neskladnosti D_i je bila presežena v 6 primerih. Največja je bila 7,86, in sicer za postajo Orešje v skupini vseh postaj. Glede na rezultate se je kot najbolj neskladna izkazala prav vodomerna postaja Orešje, saj je njena vrednost D_i v prav vsaki skupini presegala zgornjo mejo. Prav tako pa smo pozornost namenili še postajama Gorenja Gomila in Topole, ki sta bili neskladni v dveh izmed treh preverjenih skupin. Podrobnejša analiza je pokazala, da ima postaja Orešje zmerno velik koeficient variacije (t) ter zelo velika koeficienta asimetrije (t_3) in sploščenosti (t_4) (slika 3). Hidrogram izmerjenih pretokov na tej postaji kaže, da je bila leta 2005 izmerjena zelo visoka visokovodna konica, ki je znašala kar $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (povprečne visokovodne konice znašajo $14,6 \text{ m}^3/\text{s}$), kar je razlog za veliki vrednosti koeficientov asimetrije (t_3) in sploščenosti (t_4).

Po preverjanju se je izkazalo, da je omenjena izmerjena visokovodna konica na postaji Orešje verjetno pravilna. Neskladnost drugih dveh postaj pa ni posledica zelo velikih izmerjenih pretokov, ampak kombinacije vrednosti vseh koeficientov.

Podatki vseh 112 vodomernih postaj so se med preverjanjem izkazali za ustrezne, zato smo nadaljevali analizo z razvrščanjem postaj v hidrološke regije. Pri tem smo uporabili dve izmed metod razvrščanja, to sta Wardova metoda in metoda voditeljev.

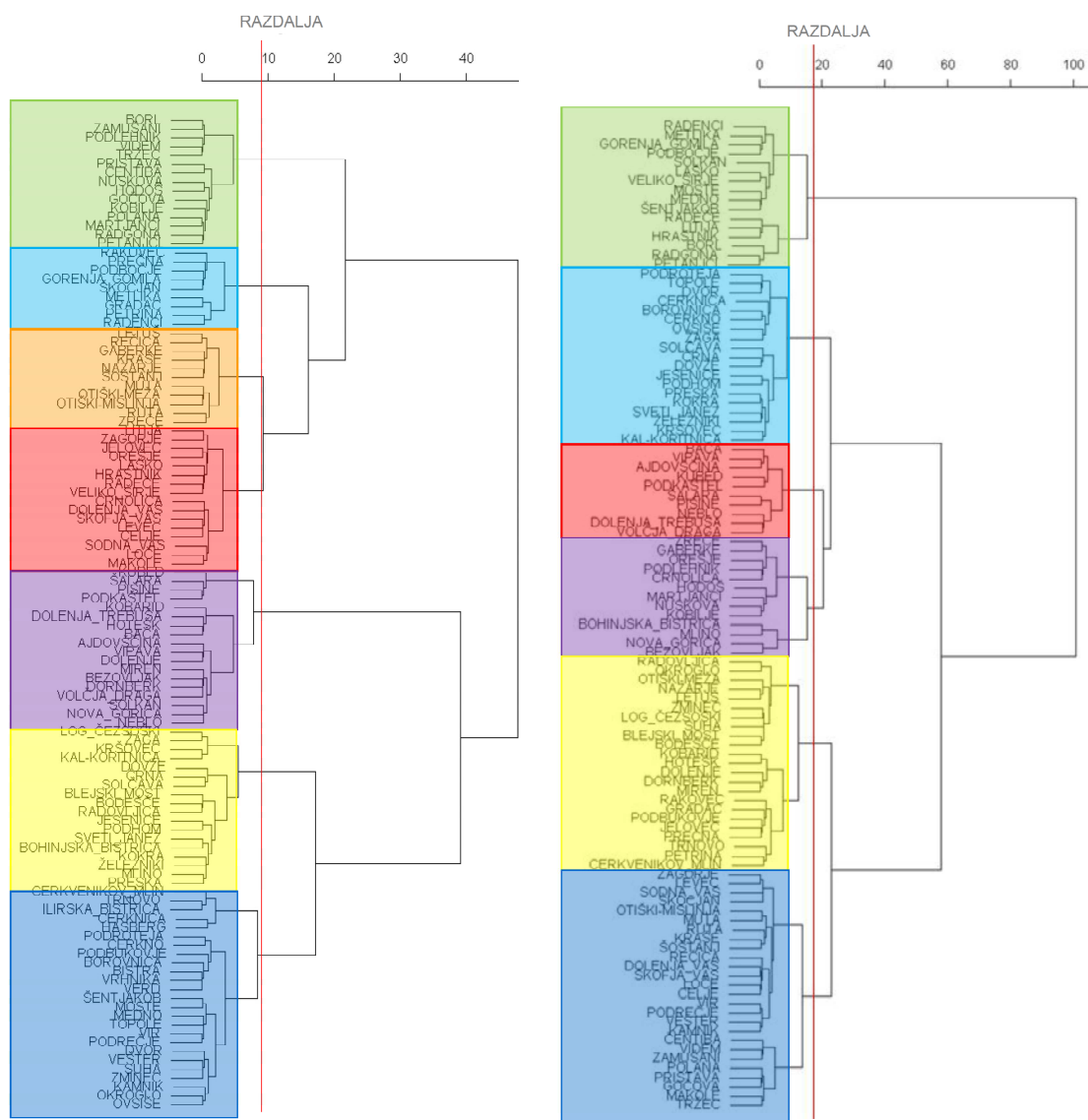


Slika 3: Diagram razmerij L-momentov za vse vodomerne postaje

Pri razvrščanju imamo več možnosti. Izhajamo lahko iz statističnih lastnosti postaj (kot so na primer razmerja momentov L) ali iz njihovih fizičnih lastnosti (zemljepisna širina in dolžina, padec struge, sestava tal, koeficient infiltracije). Pri tej metodi se običajno razvršča z upoštevanjem fizičnih lastnosti, saj preverjanje homogenosti oblikovanih regij temelji na statističnih lastnostih. Če bi torej razvrščali in preverjali z uporabo istih podatkov, uporabljen test ne bi bil merodajen.

Ker gre v tem primeru za osnoven prikaz poteka analize, smo upoštevali osnovne lastnosti postaj, to so zemljepisna širina in dolžina, kota 0 (nadmorska višina nulte točke vodomera), površina hidrometričnega zaledja in letna količina padavin na prispevnem območju postaje. Izbrane attribute smo standardizirali, površini zaledja pa smo povečali faktor vpliva na 3.

Z Wardovo metodo razvrščanja smo postopek ponovili trikrat. Najprej smo upoštevali le tri attribute in sicer zemljepisno širino in dolžino ter nadmorsko višino, nato pa smo dodali še površino hidrometričnega zaledja in na koncu še letno količino padavin (preglednica 1). Rezultat razvrščanja so trije dendrogrami, iz katerih smo skupine oblikovali s predhodno prekinitvijo (slika 4). Hosking in Wallis (1997) priporočata, da v hidrološki regiji ni več kot 20 postaj, zato smo se odločili, da bomo v prvem koraku upoštevali delitev na 6 ali 7 regij, kar v povprečju pomeni 17 postaj na regijo.



Slika 4: Dendrograma delitve z upoštevanjem treh atributov (zemljepisna širina in dolžina, kota 0) - levo in štirih atributov (zemljepisna širina in dolžina, kota 0, površina hidrometričnega zaledja) – desno

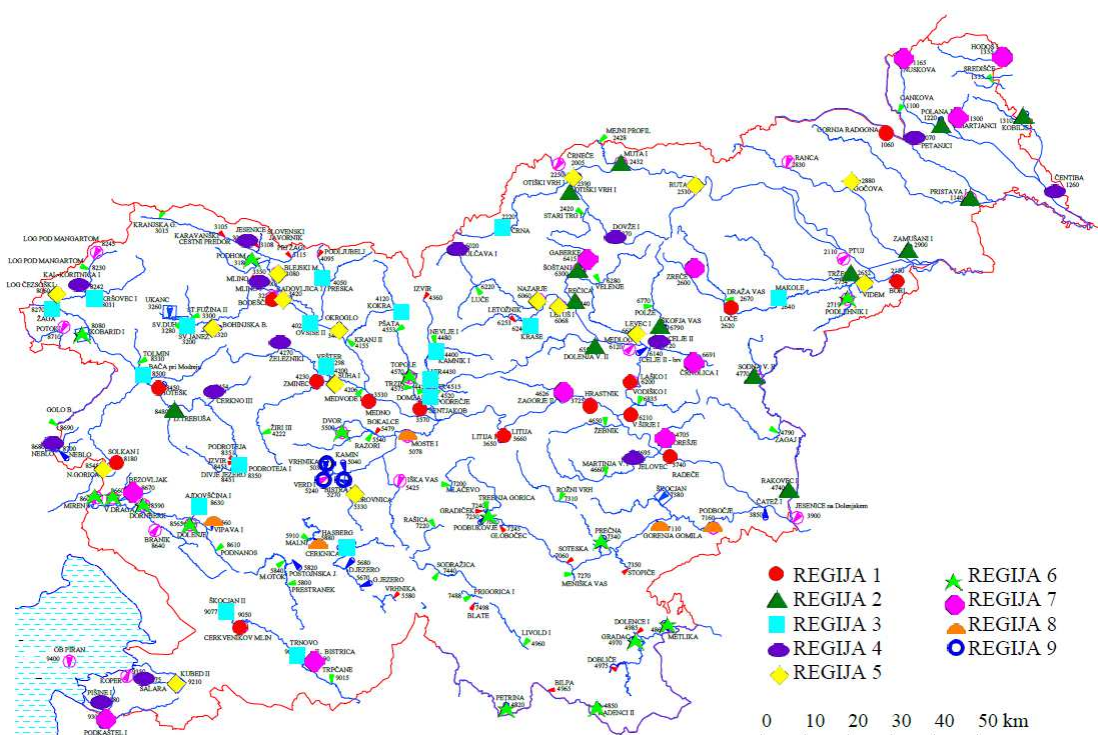
Postaje v hidroloških regijah, ki so dobljene z upoštevanjem različnega števila atributov, se seveda razlikujejo. Največje razlike v razporeditvi postaj so med skupinami, ki so dobljene z upoštevanjem prvih treh oziroma štirih atributov, skupine delitve s štirimi in petimi atributi pa so si med seboj dokaj podobne, kar kaže na to, da ima velik vpliv na razvrščanje četrti dodani atribut, površina zaledja.

Preglednica 1: Rezultati razvrščanja z različnim številom upoštevanih atributov

Upoštevano število atributov	Wardova metoda razvrščanja		Razvrščanje z metodo voditeljev	
	Povprečno število postaj	Povprečna mera heterogenosti H	Povprečno število postaj	Povprečna mera heterogenosti H
3	16	9,63	18,67	10,06
4	17,83	7,03	17,33	7,18
5	14	6,31	16,33	6,10

Tudi pri razvrščanju z metodo voditeljev smo postopek ponovili trikrat, vsakič za 6 končnih skupin, ob vsaki ponovitvi pa smo dobili drugačne rezultate (preglednica 1). Tudi v tem primeru se je izkazalo, da ima površina zaledja velik vpliv. Postaje, ki so bile pri razvrščanju s tremi upoštevanimi lastnostmi najprej združene v skupine, so bile po delitvi s štirimi povsem pomešane po novonastalih regijah. V nadaljevanju, z upoštevanjem petih lastnosti, pa so bile razlike dosti manjše. Pet novonastalih skupin je imelo skoraj vse elemente enake kot regije, dobljene z upoštevanjem štirih atributov, ena pa je bila sestavljena iz vodomernih postaj, ki so prvotno pripadale dvema regijama.

Skupine, dobljene po prvem koraku razvrščanja, še niso homogene. Odločili smo se za skupine dobljene z metodo voditeljev, saj je ta metoda iterativna in ne da enakega končnega rezultata ob vsaki ponovitvi. Pri končnem določanju homogenih regij smo upoštevali štiri lastnosti vodomernih postaj (zemljepisna širina in dolžina, kota 0 in površina zaledja), saj ima, kot se je izkazalo pri razvrščanju, površina zaledja velik vpliv na delitev, upoštevanje padavin pa regij ne spremeni več veliko. S premikanjem postaj med skupinami smo tako dobili devet končnih, homogenih hidroloških regij (slika 5).



Slika 5: Karta razporeditve postaj glede na končne homogene hidrološke regije
(Podloga – osnovna karta povzeta po ARSO, 2013)

Regije so zelo razpršene, vendar so vse sprejemljivo homogene, poleg tega pa imajo tudi manj kot dvajset elementov (preglednica 2). Le osma in deveta regija se morda zdita

nesmiselni, saj vsako sestavljajo le trije oziroma pet elementov. Za tako sestavo smo se odločili zato, ker imajo vse tri vodomerne postaje (Verd, Bistra in Vrhnika) v deveti regiji zelo specifične lastnosti, ki v primeru priključitve postaje k drugi regiji močno povečajo njeno mero heterogenosti. Povprečno število elementov v homogenih hidroloških regijah je 12,44, njihova povprečna mera heterogenosti H pa znaša 0,25. Za vsako končno regijo smo preverili tudi vrednosti mere neskladnosti postaj. Vse so bile nižje od mejnih vrednosti, tudi za postajo Orešje, ki je bila pri prvem preverjanju najbolj kritična.

Preglednica 2: Končne homogene hidrološke regije

Regija	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Število elementov	15	14	19	14	16	15	11	5	3
Mera heterogenosti H	0,45	0,66	0,8	0,1	0,05	0,13	0,51	0,79	-1,21

Za vsako homogeno hidrološko regijo smo nato izbrali ustrezno verjetnostno porazdelitev. Upoštevali smo normalno (NORM), logaritemsko normalno dvo- (LN) in troparametrsko (LN3), Pearson III (PE3), logaritemsko Pearson III (LPE3), Gumbelovo (Gumbel), generalizirano logistično (GLO) in generalizirano Pareto porazdelitev (Pareto) ter generalizirano porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV). Izmed teh porazdelitev smo najbolj ustrezno izbrali s pomočjo prej predstavljenih testov ustreznosti.

Za izbiro najbolj ustrezne verjetnostne porazdelitve smo za splošne podatke homogenih hidroloških regij uporabili regionalno mero ustreznosti Z in diagram razmerij momentov L . Drugi testi, s katerimi smo preverili ustreznost izbranih porazdelitev, omogočajo testiranje posameznega niza podatkov za vsako vodomerno postajo posebej. Glede na to smo za vsako vodomerno postajo izračunali testne statistike za teste Kolmogorov-Smirnov (KS), test PPCC in test RMSE. Na koncu smo s primerjavo dobljenih rezultatov izbrali najbolj ustrezno porazdelitev (preglednica 3).

Iz preglednice 3 je razvidno, da se izbrane verjetnostne porazdelitve za podatke celotnih regij in podatke posameznih vodomernih postaj med seboj razlikujejo.

Preglednica 3: Izbrane najbolj ustrezne verjetnostne porazdelitve

Regija	Porazdelitev za podatke cele regije	Porazdelitev za podatke vodomernih postaj
Regija 1	PE3	GEV
Regija 2	PE3	GEV
Regija3	LN3	PE3
Regija4	GLO	LPE3
Regija5	GEV	LPE3
Regija6	GLO	GEV
Regija7	PE3	GEV
Regija 8	GLO	GLO
Regija 9	GLO	GLO

Razlaga kratic, uporabljenih v tabeli: logaritemska normalna troparametrsko porazdelitev (LN3), Pearson III porazdelitev (PE3), logaritemsko Pearson III porazdelitev (LPE3), generalizirana logistična porazdelitev (GLO), generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV)

Zadnji korak hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz je ocena parametrov in kvantilov. Ocenjujejo se za cele regije in so pravzaprav standardizirani kvantili

visokovodnih konic na vodomernih postajah (Parida et al., 1998). Glede na to, da smo najbolj ustrezne verjetnostne porazdelitve izbirali na dva načina in da smo pri tem dobili različne rezultate, smo tudi oceno parametrov in kvantilov naredili dvakrat, za vsak primer posebej. Le za regiji osem in devet postopka nismo ponavljali, saj sta izbrani porazdelitvi v obeh primerih enaki. Vrednosti ocenjenih kvantilov na podlagi verjetnostnih porazdelitev podatkov celih regij in podatkov posameznih vodomernih postaj so v večini primerov skoraj enake. Povprečna vrednost odstopanja med vrednostmi kvantilov za eno regijo se giblje med 0,004 in 0,7, v primeru tretje regije pa so vrednosti celo enake.

Zaključki

Osnova hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz visokovodnih konic so homogene hidrološke regije. Za delitev vodomernih postaj po regijah lahko uporabimo več različnih metod, izmed katerih smo izbrali dve metodi razvrščanja, Wardovo metodo in metodo voditeljev. Obe metodi sta dali zelo podobne rezultate. Povprečno število postaj v regiji je v obeh primerih 17,83, povprečna mera heterogenosti H pa je za Wardovo metodo (7,09) malenkost nižja kot v primeru metode voditeljev (7,19). Primerjava obeh metod je pokazala, da je glede na hierarhično delitev v istih skupinah metode voditeljev ostalo 86 % postaj.

Končne homogene regije se oblikuje iz le ene predhodne delitve. Izbrali smo metodo voditeljev, ta pa je odvisna od števila iteracij in da ob vsaki ponovitvi drugačen rezultat. Različne rezultate smo dobili tudi pri 100.000 ponovitvah. Čeprav smo pri končni delitvi regij izhajali iz skupin, oblikovanih z metodo voditeljev, bi za splošno uporabo kot bolj primerno predlagali Wardovo metodo. Rezultati pri Wardovi metodi so končni in se ne spreminjajo. Poleg tega pa iz dendrograma z razrezom na določeni višini lahko brez ponavljanja dobimo toliko skupin, kot želimo (Kumar Kar et al., 2012).

Pri razvrščanju je pri obeh metodah mogoče opaziti vpliv izbire atributov. Razlike v sestavi skupin so bile največje pri dodatnem upoštevanju površine hidrometričnih zaledij. Padavine niso imele tako velikega dodatnega vpliva, saj so odvisne od nadmorske višine oziroma kote 0 in zemljepisne dolžine, ki sta pri delitvi že upoštevani (Kavčič, 2013). Pri nadaljnjih analizah pa bi bilo verjetno smiselno upoštevati še kakšne druge lastnosti vodomernih postaj. Tako bi na primer lahko upoštevali še kamninsko sestavo tal, splošen naklon rečne struge ali zaledja postaje in poraščenost z gozdom, kot so to storili Acreman in Sinclair (1986) ter Malekinezhad s sodelavci (2011, cit. po Kumar Kar et al., 2012).

Pri izbiri najustreznejše verjetnostne porazdelitve posameznih regij smo upoštevali dva pristopa. Najprej smo izhajali iz splošnih regionalnih podatkov nato pa še iz podatkov posameznih vodomernih postaj v regiji. Veliko bolj preprost in hiter je prvi način, za izbiro ustrezne porazdelitve glede na podatke vodomernih postaj pa se je izkazalo, da ni najboljše, saj je zaradi večjega števila testov preveč možnosti in postopek se hitro zaplete. Kot najboljši način bi po dosedanjih izkušnjah priporočali kombinacijo obeh možnosti, najprej izbire z regionalno mero ustreznosti Z ter kontrolo ali dopolnitev z diagramom razmerij momentov L , nato upoštevanje enega izmed testov za vsako vodomerno postajo posebej, na koncu pa še kontrolo z upoštevanjem QQ diagramov. Različne teste so med sabo kombinirali tudi Cunnane (1989, cit. po Karim in Chowdhury, 1995), Haile (2011), Millington in drugi (2011) ter Chavoshi Borujeni in Azmin Sulaiman (2009).

Pri hidrološki regionalizaciji pa smo ustvarili tudi dve homogeni regiji, s katerima je bilo težko nadaljevati; osma in deveta regija sta imeli le pet oz. tri elemente. Čeprav sta bili homogeni, je bilo zaradi majhnega števila podatkov zelo težko določiti najustreznejšo porazdelitev. Pri tem smo si morali pomagati na več različnih načinov. Ta primer kaže na

to, da homogenost regije ni najpomembnejša. Potrebno je upoštevati tudi priporočila o številu elementov v njej, ki naj bi se gibalo med deset in dvajset (Hosking in Wallis, 1997).

Ker je to prvi poskus hidrološke regionalizacije verjetnostnih analiz visokovodnih konic v Sloveniji, nismo imeli nobenih izhodišč, na katera bi se lahko oprli. Število vodomernih postaj, ki so bile vključene v analizo, je bilo zelo veliko, njihove lastnosti pa se močno razlikujejo, poleg tega pa za vsakega izmed štirih potrebnih korakov analize obstaja več različnih možnosti izvedbe. V prikazanem primeru smo uporabili tiste, katerih uporabo smo največkrat zasledili v tuji literaturi. Čeprav je metoda razvrščanja dala dobre in pregledne rezultate, bi bilo smiselno pri razvrščanju uporabiti še subjektivno ali objektivno metodo delitve postaj. Odlično izhodišče za objektivno delitev pa bi bilo začetno ločevanje postaj na tiste, ki so postavljene v urbano okolje in tiste v neurbanem okolju.

Literatura

- Acreman, M. C., Sinclair, C. D. (1986). Classification of Drainage Basins According to Their Physical Characteristics; an Application for Flood Frequency Analysis in Scotland, *Journal of Hydrology* 84, 34: 365–380.
- Agencije republike Slovenije za okolje (ARSO). 2013. http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (4. 3. 2013)
- Bezak, N. Brilly, M. Šraj, M. (2013). Comparison between the peaks over threshold method and the annual maximum method for flood frequency analyses. *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.831174.
- Brilly, M., Mikoš M., Šraj, M. (1999). *Vodne ujme. Varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.
- Burn, D. H., Goel, N. K. (2000). The formation of groups for regional flood frequency analysis, *Hydrological Sciences Journal* 45, 1: 97–112.
- Chavoshi Borujeni, S., Azmin Sulaiman, W. N. (2009). Development of L-moment Based Models for Extreme Flood Events, *Malaysian Journal of Mathematical Sciences* 3, 2: 281–296.
- Ferligoj, A. (1989). *Ravzrščanje v skupine. Teorija in uporaba v družboslovju*. Ljubljana, Jugoslovansko združenje za sociologijo, Sekcija za metodologijo in statistiko: 182 str.
- http://dk.fdv.uni-lj.si/metodoloskizvezki/Pdfs/Mz_4Ferligoj.pdf (3. 3. 2013.)
- Haile, A. T. (2011). *Regional Flood Frequency Analysis in Southern Africa*. Magistrsko delo. Oslo, University of Oslo, Faculty of Mathematics and Natural Sciences: 113 str.
- https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/12530/Alem_FINALTHESIES%5B1%5D.pdf?sequence=1 (22. 4. 2013.)
- Hassan, B. G. H., Atiem, I. A., Jianzhu, L., Ping, F. 2012. At Site and Regional Frequency Analysis for Sudan Annual Rainfall by Using the L-Moments and Nonlinear Regression Techniques. *International Journal of Engineering Research and Development* 3, 6: 13–19.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge, Cambridge University Press: 224 str.
- Hussain, Z., Pasha, G. R. (2009). Regional Flood Frequency Analysis of the Seven Sites of Punjab, Pakistan, Using L-Moments, *Water Resources Management* 23, 10: 1917–1933.
- Important Issues in Data Screening. 2013. www.geography.unt.edu/.../week2handout-datascreening.doc (Pridobljeno 5. 3. 2013.)
- Inštitut za vode republike Slovenije. (2013). <http://www.izvrs.si/> (21. 4. 2013.)
- Karim, A., Chowdhury, J. U. (1995). A comparison of four distributions used in flood frequency analysis in Bangladesh, *Hydrological Sciences Journal* 40, 1: 55–66.
- Kavčič, K. (2013): *Hidrološka regionalizacija verjetnostnih analiz visokovodnih konic v Sloveniji (Regionalisation of flood frequency analyses in slovenia)*. Diplomsko naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 113 p. (in Slovenian).
- Košmelj, K., Breskvar Žaucer L. (2006). Metode za razvrščanje enot v skupine; osnove in primer, *Acta agriculturae Slovenica* 87, 2: 299–310. <http://aas.bf.uni-lj.si/september2006/11kosmelj.pdf> (3. 3. 2013.)

- Kumar Kar, A., Goel, N. K., Lohani, A. K., Roy, G.P. (2012). Application of Clustering Techniques Using Prioritized Variables in Regional Flood Frequency Analysis – Case Study of Mahanadi Basin, *Journal of Hydrologic Engineering* 17, 1: 213–223.
- Millington, N., Das, S., Simonovic, S. P. (2011). The Comparison of GEV, Log-Pearson Type 3 and Gumbel Distributions in the Upper Thames River Watershed under Global Climate Models. *Raziskovalno poročilo o vodnih sredstvih*. London, Ontario, Canada, The University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering: 52 str.
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. 2013.
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> (Pridobljeno 22. 4. 2013.)
- Norbiato, D., Borga, M., Sangati, M., Zanon, F. 2007. Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood. *Journal of Hydrology* 345, 3-4: 149–166.
- Parida, B. P., Kachroo, R. K., Shrestha, D. B. (1998). Regional Flood Frequency Analysis of Mahi-Sabarmati Basin (Subzone 3-a) using Index Flood Procedure with L-Moments, *Water Resources Management* 12, 1: 1–12.
- Shu, C., Burn, D. H. 2003. Spatial patterns of homogeneous pooling groups for flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal* 48, 4: 601–618.
- Šraj, M., Bezak, N., Brilly, M. (2012). Vpliv izbire metode na rezultate verjetnostnih analiz konic, volumnov in trajanj visokovodnih valov Save v Litiji, *Acta hydrotechnica* 25 (v tisku).
- Uprava republike Slovenije za zaščito in reševanje. (2013).
<http://www.sos112.si/slo/page.php?src=og12.htm> (Pridobljeno 23. 4. 2013.)

Odziv jamske mikroklimе na izjemne dogodke in dolgotrajnejše spremembe vremena

Stanka Šebela *

Povzetek

V Postojnskem in Predjamskem jamskem sistemu se sistematične zvezne meritve jamske mikroklimе opravljajo od leta 2009. Pri tem spremljamo vpliv zunanje klime kot tudi vpliv obiskovalcev na jamsko mikroklimo. Za razumevanje določenih dogodkov je potrebno večletno merjenje določenih klimatskih parametrov. Le tako lahko ocenimo vpliv izredno toplega poletja na temperature zraka v jami, kot tudi večdnevne zimske nizke temperature in prodor hladnega zraka daleč v notranjost jame. Izjemni vremenski dogodki (npr. suša, poplave, zelo mrzle zime) vplivajo tudi na razmere v jamah.

Ključne besede: jamska mikroklima, izjemni vremenski dogodki, Postojnski jamski sistem, Predjamski jamski sistem, Slovenija.

Keywords: Cave micro-climate, exceptional meteorological events, Postojna, Cave System, Predjama Cave System, Slovenia.

Uvod

Sistematične in zvezne meritve jamske mikroklimе se v Postojnskem in Predjamskem jamskem sistemu izvajajo v okviru projektov *Strokovni nadzor in svetovanje pri upravljanju z janskimi sistemi* ter *Klimatski in biološki monitoring janskih sistemov* (financer Postojnska jama d.d.). V okviru projektov smo pridobili urne podatke temperature zraka za obdobje 2009–2013 za več merilnih mest. Določili smo splošne značilnosti letne dinamike gibanja temperature kot tudi izjemne vremenske dogodke ter vpliv obiskovalcev na jamske klimatske razmere.

Jamsko mikroklimo so v Postojnskem in Predjamskem jamskem sistemu proučevali Schmidl (1854), Crestani & Anelli (1939), Anelli (1941–44), Habe (1970), Gams (1974). Novejše raziskave pa so predstavljene z avtorji: Gabrovšek & Mihevc (2009), Šebela & Turk (2011 a, b; 2013; 2014), Šebela et al. (2013), Gregorič et al. (2013 a, b).

Čeprav je letno nihanje temperature zraka na Veliki gori v Postojnskem jamskem sistemu le 0,56°C (Šebela & Turk, 2011 a), pa je večina janskih sistemov zelo dinamičnih v smislu razumevanja jamske mikroklimе. Jamski sistemi niso izolirana ozemlja, čeprav predstavljajo zelo stabilne sisteme. Zunanje spremembe (klimatske, okoljske idr.) z določenim zamikom prodirajo tudi v kraško podzemlje.

Hkrati pa je glede na razumevanje naravnih vplivov potrebno ovrednotiti tudi antropogeni vpliv na kraško podzemlje, kar je posledica turistične rabe jam. Glede na podatke iz omenjenih projektov želim predstaviti nekaj izjemnih vremenskih dogodkov, katerih vpliv smo zaznali v jamah. Hkrati želim poudariti pomen večletnih zveznih meritev jamske mikroklimе, kot osnovo za razumevanje naravnih in antropogenih vplivov na stanje jamskega okolja ter osnovo za načrtovanje rabe naravnih vrednot.

* ZRC SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, SI-6230 Postojna, Slovenija

Metodologija

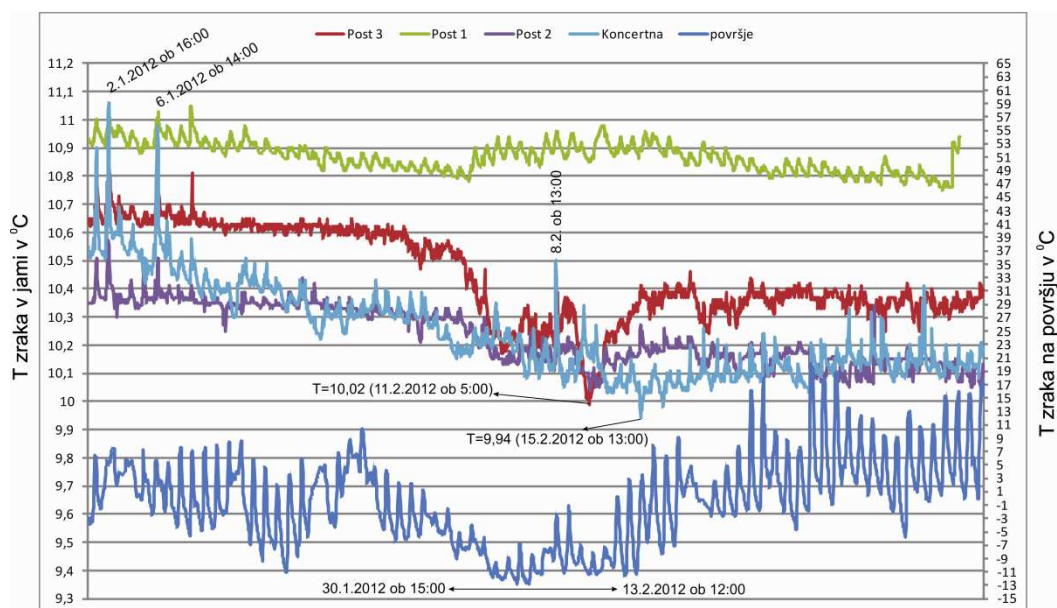
Temperaturo zraka smo v urnih intervalih merili z avtomatskimi merilniki proizvajalcev Van Essen (t.i. *diver*) ter Tinytag (Gemini data loggers, UK). Poleg merilnih mest v jami smo vzpostavili tudi merilno mesto izven jame, in sicer na površju v gozdu nad Otroško jamo. Temperaturna točnost znaša $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Podatke jamske temperature zraka smo primerjali s podatki iz površja nad jamo.

Rezultati in razprava

Postojnski jamski sistem

Pozimi 2012 (Slika 1) so bile v obdobju 30.1.2012 do 13.2.2012 nizke zunanje temperature zraka, to je od -9 do -13°C . Ker je pihala tudi močna burja, je mrzel zrak prodrl globoko v notranjost jame ter ohladil jamski zrak za $0,3$ do $0,4^\circ\text{C}$ (Postojna 3, Lepe jame). Letno nihanje temperature zraka je $0,6$ do $0,7^\circ\text{C}$ na Postojna 3.

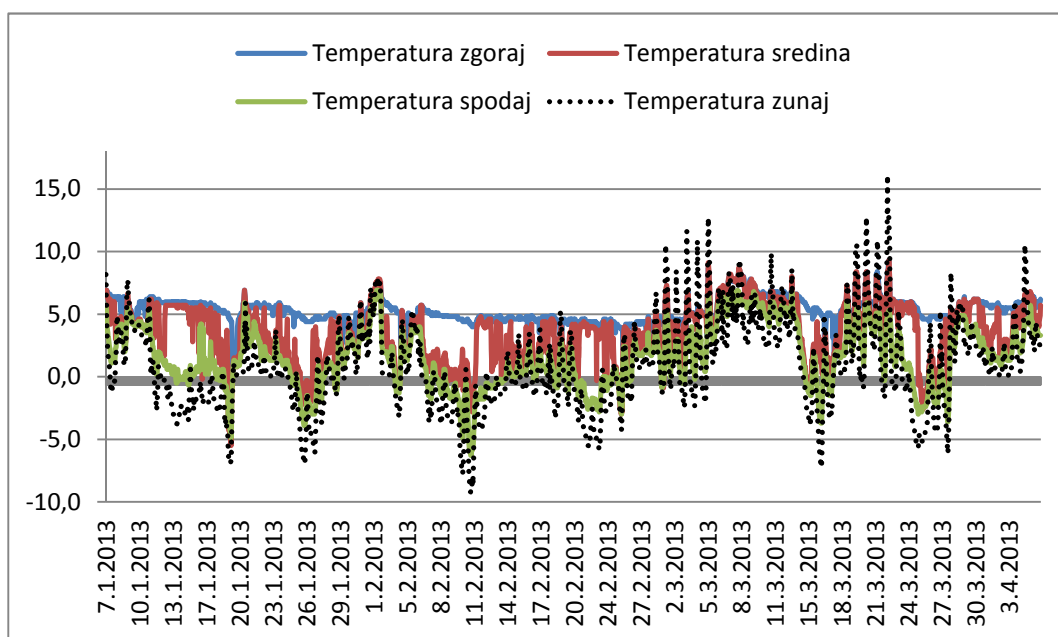
Daljše mrzlo zunanje obdobje (15 dni) je ob burji močno znižalo jamsko temperaturo zraka v Lepih jamah (Postojna 3). V tem obdobju pa so bili tudi dnevi, ko se je število obiskovalcev precej povečalo: ob prireditvah Jaslice v Postojnski jami (2.1. in 6.1.) in Kulturni praznik (8.2.). Ob tem drugem primeru je npr. v Koncertni dvorani temperatura zraka narasla za $0,3^\circ\text{C}$. Šlo pa je le za enodnevni dvig, kar kaže, da je vpliv zunanjih razmer na mikroklimo močnejši kot je vpliv povišanega turističnega obiska.



Slika 1 – Temperatura zraka ($^\circ\text{C}$), Postojnski jamski sistem v obdobju januar – marec 2012. Postojna 1 (Velika gora), Postojna 2 (Lepe jame-stranski rov), Postojna 3 (Lepe jame), Koncertna dvorana, površje nad jamo.

Obdobje nizkih temperatur v začetku leta 2013 smo beležili tudi ob vhodnih kovinskih vratih v Postojnski jamski sistem (Slika 2). Na vratih smo namestili 3 merilnike temperature, ki merijo vsako uro. Spodnji merilec je nameščen $0,20$ m nad janskimi tlemi, srednji je $3,60$ m nad tlemi in zgornji, ki je tik pod janskim stropom, je $6,20$ m nad tlemi. Temperaturna razlika med zgornjim in spodnjim merilcem je dne 11.2.2013 znašala

10,3°C. Hladen zimski zrak namreč vstopa v Postojnski jamski sistem pri tleh vhodnega rova, medtem ko iz jame izstopa toplejši jamski zrak pod stropom rova. Temperatura zraka ima nižja nihanja tik pod stropom vhodnega rova kot pri dnu.



Slika 2 – Temperatura zraka (°C) merjena ob kovinskih vhodnih vratih (zgoraj, sredina in spodaj) v Postojnski jamski sistem ter primerjava z zunanjo T v začetku leta 2013.



Slika 3 – Struga reke Pivke na ponoru v Postojnski jamski sistem dne 27.8.2012, pogled proti JV (foto S. Šebela).

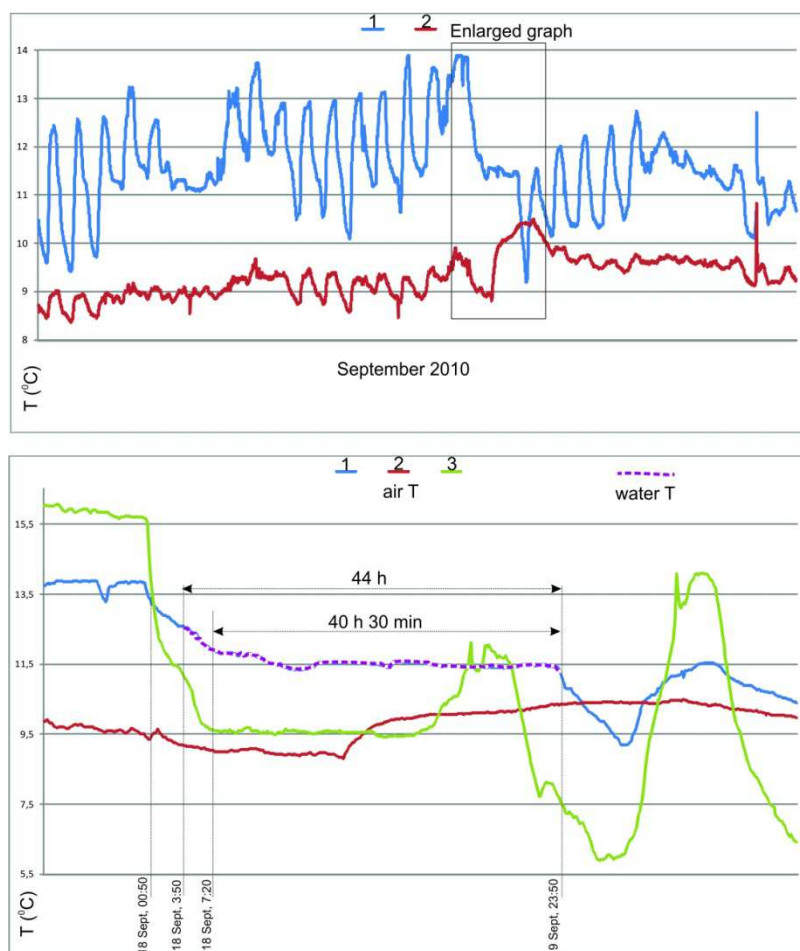
Po mrzli zimi 2012 smo doživeli izredno toplo in suho poletje 2012. Struga reke Pivke, ki ponika v jamski sistem je bila skoraj povsem suha, kar je redek pojav (Slika 3). Tudi v prvi jamski dvorani Veliki dom je bilo možno hoditi »po suhem«. To so bile odlične razmere za odstranitev naplavljenega materiala in sedimentov (970 m³), ki so se za jezom nabirali od leta 1983.

Predjamski jamski sistem

Visoke poplave septembra 2010, ki so zajele obsežen del Slovenije, so pečat pustile tudi v Predjamskem jamskem sistemu, kjer je zaradi narasle rečice Lokve pred ponorom v jamo, nastalo jezero (Šebela 2013).

Merilnik za merjenje temperature zraka v Konjskem hlevu je bil poplavljen z vodo, tako so v obdobju 40,50 ur oziroma v obdobju 44,00 ur med 18. in 19. septembrom 2010 prikazani podatki temperature vode ob poplavi (Slika 4). To nam je omogočilo, da smo lahko določili trajanje poplave v Konjskem hlevu. Umik vode pozno zvečer 19.9.2010 pa je povzročil nenadni udor (globine 0,3 m in širine 2 m) jamskih tal v Konjskem hlevu in morfološko spremenil vhodni rov.

Redno spremljanje temperature zraka od leta 2009 je v Predjami pokazalo, da se poletna temperatura zraka v Veliki dvorani ustali približno na 9,5°C (Šebela & Turk 2013). Četudi se zunanja temperatura zraka povečuje, je jamska temperatura izredno stabilna. V poletnih mesecih so obiski v Predjami najbolj intenzivni, vendar posamezna skupina ne šteje več kot 60 obiskovalcev. Tudi enkratni dogodek dne 12.6.2013 med 15:00 in 16:30, ko je skupina 70 udeležencev 21. mednarodne krasoslovne šole obiskala jamo in se zadrževala tudi ob merilnih inštrumentih, ni vplival na naravno stanje temperature zraka v Veliki dvorani.



Slika 4 – Predjamski jamski sistem, merjenje temperature zraka (in vode) v °C, september 2010. 1 – Konjski hlev, 2 – Velika dvorana, 3- zunanja temperatura.

Sklep

Redno večletno spremljanje osnovnih klimatskih parametrov v Postojnskem in Predjamskem jamskem sistemu je osnova za razumevanje naravnih in antropogenih vplivov na stanje jamskega okolja ter osnova za dolgoročno načrtovanje rabe naravnih vrednot v smislu trajnostnega razvoja jamskega turizma.

Razumevanje določenih kratkotrajnih dogodkov je možno na podlagi večletnega merjenja določenih klimatskih parametrov, kjer iz te slike lahko izločimo izjemne vremenske dogodke. V Postojnskem jamskem sistemu je večdnevno obdobje nizkih zimskih temperatur ob pihanju burje v začetku leta 2012 za več dni znižalo temperaturo zraka v Lepih jamah za 0,3 do 0,4 °C, medtem ko je letno nihanje 0,6 do 0,7 °C. Ob določenih vremenskih pogojih hladen zunanji zrak ohladi jamski zrak daleč v notranjost jame. Izjemni vremenski dogodki (npr. suša, poplave, zelo nizke temperature pozimi) vplivajo tudi na razmere v jamah. Raziskave kažejo, da imajo zunanje klimatske spremembe močnejši vpliv na jamsko mikroklimo (primer Postojnskega in Predjamskega jamskega sistema) kot pa trenutno število obiskovalcev.

Seznam literature

- Anelli, F. 1941–44. Osservazioni di meteorologia ipogea nelle Grotte di Castel Lueghi presso Postumia. *Le Grotte d'Italia* serie 2a vol. V, 5-34, Trieste.
- Crestani, G. in Anelli, F. 1939. Ricerche di meteorologia ipogea delle grotte di Postumia. Istituto poligrafico dello stato Libreria, 1-162, Roma.
- Gabrovšek, F., in Mihevc, A. 2009. Cave climate. 17th International karstological school "Classical Karst", 15-20th June 2009, Guide book & Abstracts, 1-92, Postojna.
- Gams, I. 1974. Concentration of CO₂ in the caves in relation to the air circulation (in the case of the Postojna Cave). *Acta carsologica*, 6/12, 183-192.
- Gregorič, A., Vaupotič, J. in Šebela, S. 2013a. The role of cave ventilation in governing cave air temperature and radon levels (Postojna Cave, Slovenia). *International Journal of climatology*, doi: 10.1002/joc.3778.
- Gregorič, A., Vaupotič, J. in Gabrovšek, F. 2013b. Reasons for large fluctuation of radon and CO₂ levels in a dead-end passage of a karst cave (Postojna Cave, Slovenia). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 287-297.
- Habe, F. 1970. Predjamski podzemeljski svet. *Acta Carsologica* 5/1, 7-94, Ljubljana.
- Schmidl, A. 1854. Die Grotten un Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas, 1-316, Wien.
- Šebela, S. in Turk, J. 2011a. Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring. *Theor. appl. climatol.* 105/3-4, 371-386, Wien, New York. doi: [10.1007/s00704-011-0397-9](https://doi.org/10.1007/s00704-011-0397-9).
- Šebela, S. in Turk, J. 2011b. Air temperature characteristics of the Postojna and Predjama cave systems. *Acta geogr. Slov.* 51/1, 43-64, Ljubljana. doi: [10.3986/AGS51102](https://doi.org/10.3986/AGS51102).
- Šebela, S., Prelovšek, M. in Turk, J. 2013. Impact of peak period visits on the Postojna Cave (Slovenia) microclimate. *Theor. appl. climatol.*, 111, 51-64. doi: [10.1007/s00704-012-0644-8](https://doi.org/10.1007/s00704-012-0644-8).
- Šebela, S. 2013. Historic inscriptions in Predjama Cave System and high floods in 2010. *Acta Carsologica* 42/2-3, Ljubljana.
- Šebela, S. in Turk, J. 2013. Značilnosti temperature zraka v Predjamskem jamskem sistemu. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012, zbornik predavanj, 18. Strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, 29. januar 2013, 67-74.
- Šebela, S. in Turk, J. 2014. Natural and anthropogenic influences on the year-round temperature dynamics of air and water in Postojna show cave, Slovenia. *Tourism Management*, 40, 233-243.

Skladiščenje vode v vadozni coni kraških vodonosnikov - primer izvira Malenščica

Janja Kogovšek*

Povzetek

Pogosto so kraški vodonosniki zelo kompleksni sistemi, ki se napajajo tako z infiltracijo padavin in s površinskimi vodnimi tokovi. Pri pretakanju infiltriranih padavin skozi vadozno cono vodonosnika prihaja tudi do pomembnega skladiščenja vode in iztekanja z večjimi zakasnitvami. Prav ti procesi omogočajo, da imajo kraški izviri vodo tudi v daljših sušnih obdobjih z minimalnimi padavinami. Prispevek podaja dinamiko pretakanja in skladiščenja padavin v 100 m debeli vadozni coni Postojnske jame na osnovi večletnih zveznih meritev pretokov. Te procese primerja z dinamiko iztekanja vode skozi kraški izvir Malenščice, ki se napaja z infiltracijo padavin in s površinskimi tokovi. Poudarek je na sušnih obdobjih, ko reke ponikalnice presušijo ali pa imajo minimalen pretok in se izvir Malenščice napaja predvsem z infiltrirano, uskladiščeno vodo.

Ključne besede: Kras, vodonosnik, vadozna cona, dinamika pretakanja, skladiščenje

Key words: Karst, aquifer, vadose zone, hydrodynamics, storage

Uvod

V Evropi 35 % in v Sloveniji okoli 44 % površja gradijo karbonatne kamnine. Ocenjujejo, da 20 do 25 % svetovne populacije pije vodo iz kraških vodonosnikov (Ford in Williams 2007) in za prihodnost napovedujejo, da se bo ta delež še povečeval (Forti 2007).

Kraški vodonosniki so pogosto obsežni in zelo heterogeni, kompleksni vodni sistemi, ki se napajajo ne le z infiltracijo padavin, ampak tudi z rekami ponikalnicami in vodnimi tokovi, ki vanje zatekajo tudi z nekraškega sveta. Vsi ti viri napajanja pa pomenijo tudi možnost vnosa onesnaženja v vodonosnik. Vodni tokovi pomenijo hiter prenos onesnaženja, pomemben pa je tudi neposreden prenos onesnaženja s površja skozi vadozno cono vodonosnika, ki je vezan na dinamiko pretakanja.

Kraški vodonosniki so v Sloveniji pomemben vir pitne vode. Zato je zelo pomembna kakovost njihove vode. V sušnih obdobjih, posebno ko prihaja do dalj časa trajajočih suš v zaporednih letih, pa se na določenih območjih postavlja tudi vprašanje zadostnih količin. Le dobro poznavanje dinamike pretakanja v kraških vodonosnikih je dobra osnova za njihovo načrtno izrabo.

Raziskave vadozne cone v preteklosti so nakazovale, da se padavine lahko v vadozni coni vodonosnikov zadržijo tudi daljši čas (Mangin, 1973, Bakalowicz in ostali, 1974, Kogovšek in Habič, 1981, Williams, 1983, Kogovšek, 1982, 1983, 2000, 2010, Pezdič et al., 1984, Smart in Friedrich 1986, Klimchouk 1995, Stichler in ostali, 1997, Jeannin in Grasso 1995, Maloszewski in ostali, 2002, Perrin in ostali, 2003a, Trček, 2003).

* Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija

Zvezne in sočasne raziskave kraškega izvira Malenščica in curkov prenikle vode z bistveno različno prepustnostjo zaledja v vadozni coni Postojnske jame, 100 m pod površjem, so podale dinamiko pretakanja vode skozi vadozno cono in skozi kraški izvir.

Območje raziskav in metode dela

Malenščica je kraški izvir na Planinskem polju, ki mu je pretok v obdobju 1981-2011 nihajal med 1,1 in 11,2 m³/s (Pretoki Malenščice. Medmrežje: <http://vode.arso.gov.si>), in je zajet za oskrbo prebivalstva s pitno vodo. Raziskave pretakanja padavin skozi kraško vadozno cono so potekale na območju Postojnske jame z debelino vadozne cone 100, kjer smo merili curke prenikle vode I, J in L. Curek I v Postojnski jami doteka vrh kope, kjer smo naredili manjšo zajezev z vgrajenim prelivom. Ob njem smo pritrdili sondo za merjenje nivoja (časovni interval 30 minut) za izračun pretokov ter sondo za meritve temperature in specifične električne prevodnosti (EC). Vodo curka J smo speljali v posodo z majhnim iztokom, v kateri smo s sondo merili višino vode in EC. Z občasnimi vzporednimi ročnimi meritvami pretokov smo izdelali umeritveni krivulji za izračun pretokov obeh curkov. Na površju nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami smo zvezno merili količino padavin.



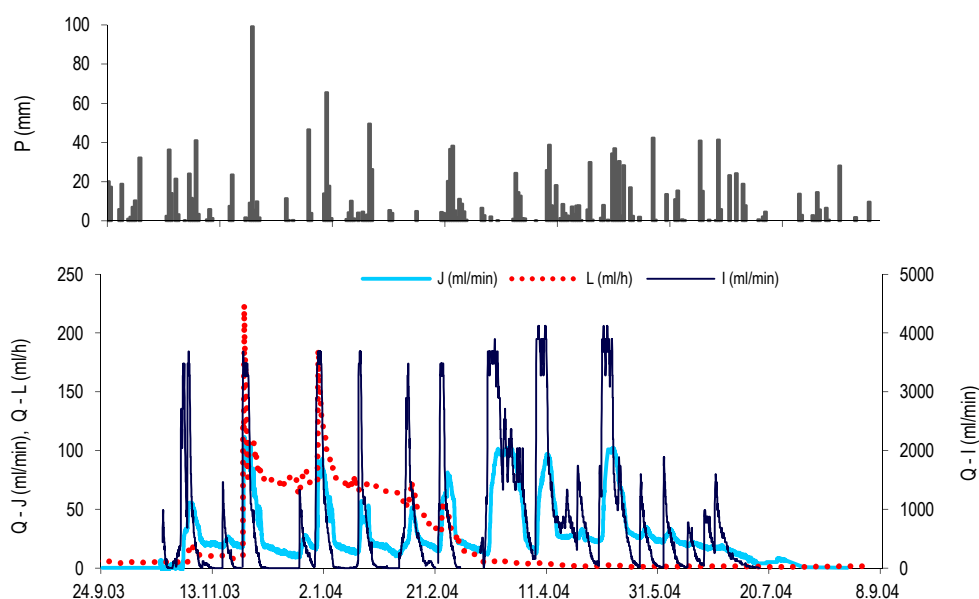
Slika 1: Območje raziskav je bil kraški izvir Malenščica na Planinskem polju in pretakanje padavin na raziskovalnem poligonu v Postojnski jami.

Meritve nivoja, temperature in električne prevodnosti Malenščice so potekale na črpališču s kombinirano sondo YSI in pretoka z 750 Area-Velocity Module v povezavi z

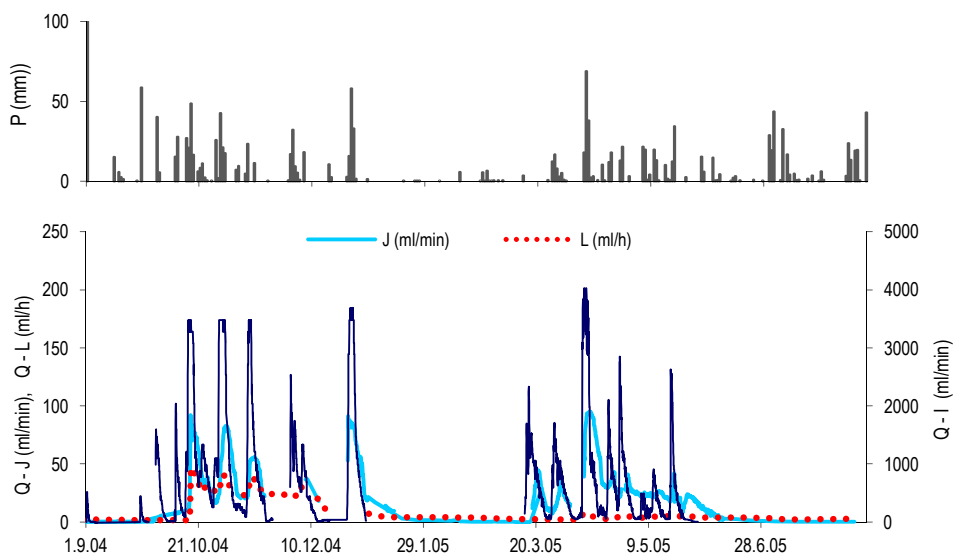
avtomatskim zajemalnikom ISCO 6700. Meritve padavin smo opravljali z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M, podjetja ONSET, ki zabeleži vsakih 0,2 mm padavin. Sočasno so v jamskem rovu potekale zvezne meritve pretoka, temperature in električne prevodnosti (Gealog S podjetja Logotronic) treh reprezentativnih curkov: večjega nestalnega curka I s pretokom do 4000 ml/min, stalnega curka J s pretokom do 130 ml/min in stalnega curka L s pretokom do 10 ml/min. Pretok curka L so potekale najprej s prirejenim evaporimetrom z mehansko uro, kasneje pa z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M.

Rezultati

Meritve padavin na površju nad Postojnsko jamo in pretokov izbranih curkov I, J in L 100 m pod površjem so v hidrološkem letu 2003-04 (1618,3 mm) z zvezno razporeditvijo padavin pokazale oblikovanje zaporednih poplavnih valov v curkih I in J (slika 2).



Slika 2: Padavine na površju in hidrogrami curkov I, J in L v hidrološkem letu 2003-04.

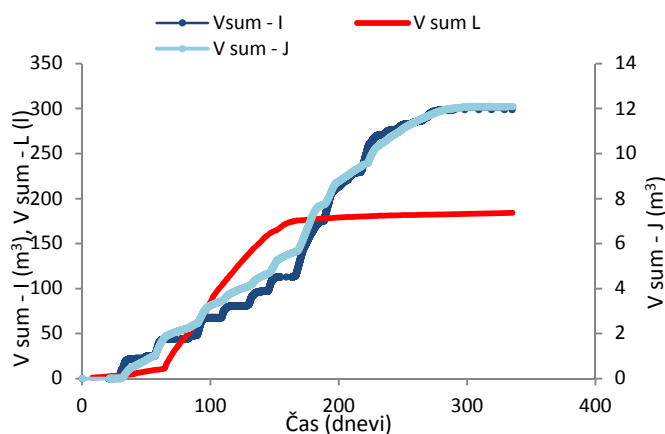


Slika 3: Padavine na površju in hidrogrami curkov I, J in L v hidrološkem letu 2004-05.

Pretok najmanjšega curka L pa je nihal bistveno drugače. Hidrološko leto omejujeta letna minimalna pretoka curka I v dveh zaporednih letih.

V hidrološkem letu 2004-05, ki je sledilo, je bila količina padavin manjša (1560,7 mm), bistveno drugačna pa je bila njihova razporeditev. Od Januarja do marca 2005 so padle le minimalne padavine, še te kot sneg ob nizkih temperaturah, zato je curek I tedaj presušil, curka J in L pa sta dosegala minimalne pretoke (slika 3).

V manjšem stalnem curku J s pretokom do 130 ml/min, kjer je letna iztekla količina več kot 20-krat manjša od curka I, prihaja do izrazitejšega dušenja infiltriranih padavin in curek prek leta nikoli ne presahne (tabela 1). Stalen je tudi najmanjši opazovani curek L, a je dinamika iztekanja vode skozi ta curek bistveno drugačna kot skozi curka J in I, kar je razvidno tudi iz slike 4. Ko se njegovo zaledje napolni do določene mere, prihaja do povečanega iztoka, ko pa se sprazni do neke mere, se začne stalno skromno iztekanje (sliki 2 in 3). Tedaj minimalni pretoki curkov J in L dosegajo vrednosti pod 1 ml/min. Oba tipa curkov v vadozni coni (J in L) sta zelo pogosta in se kažeta kot pomembna v napajanju kraških izvirov v daljših sušnih obdobjih, ko pretakanje po prepustnejših razpokah izostane.

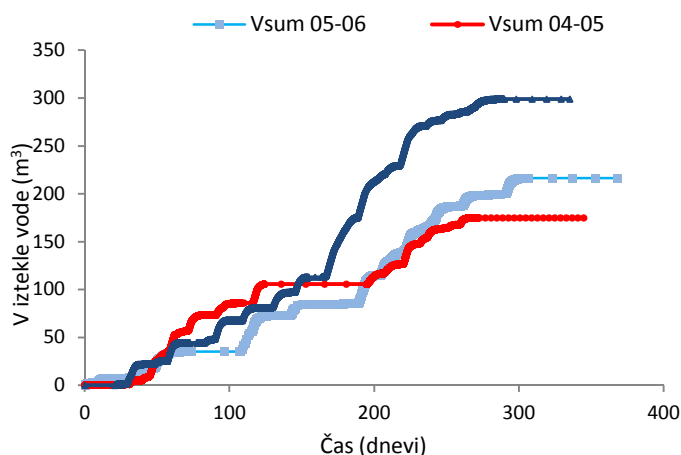


Slika 4: Dinamika iztekanja vode skozi curke I, J in L (kumulativno - V sum) v hidrološkem letu 2003-04.

Dinamika in izdatnost iztekanja vode skozi curek I v treh zaporednih hidroloških letih, ko je postopno upadala količina letnih padavin, je razvidna iz slike 5. Na iztekanje vplivata količina in razporeditev padavin, vendar po sušnih obdobjih prihaja do skromnejšega iztekanja oz. do povečanega skladiščenja infiltriranih padavin v vadozni coni. V hidrološkem letu 2003-04 je bilo iztekanje dokaj zvezno in le s krajšimi presušitvami curka. Do sredine marca 2004 je padlo 53 % padavin v hidrološkem letu 2003-04, skozi curek I pa je izteklo le 39 % letne količine vode (tabela 1), kar pripisujemo povečanem skladiščenju infiltriranih padavin. V nadaljnjih mesecih do konca hidrološkega leta je bilo iztekanje izdatnejše kot v prvem obdobju (47 % padavin in 61 % iztekle vode v hidrološkem letu). Na padavine julija in avgusta (okoli 140 mm) Curek I ni reagiral, ker so se infiltrirale in shranile v zaledju (slika 2). Ta vzorec skladiščenja ob koncu hidrološkega leta se ponavlja tudi v sledečih hidroloških letih (Kogovšek 2010), in se odvisno od razmer in padavin lahko pričena že maja.

V naslednjem hidrološkem letu 2004-05 je iztekla v prvih mesecih enaka količina vode in s približno enako dinamiko kot v predhodnem letu (slika 5). V daljšem zimskem sušnem obdobju (od januarja do sredine marca) s snežnimi padavinami in nizkimi temperaturami na površju (konec februarja in v začetku marca) curek I skoraj tri mesece ni bil aktiven. V

obdobju od marca 2005 do konca hidrološkega leta je nato padla približno polovica letnih padavin, prišteti pa bi morali še del snega, ki se je talil s časovnim zamikom, je bila iztekla količina vode le 40 % letne količine (tabela 1). To nakazuje pomembne procese s vode v vadozni coni po daljših sušnih obdobjih. Kar izdatne padavine julija in avgusta (270 mm, $I_{ef}=170$ mm) niso aktivirale curka I in so se shranile v zaledju (slika 3), podobno kot predhodno hidrološko leto.



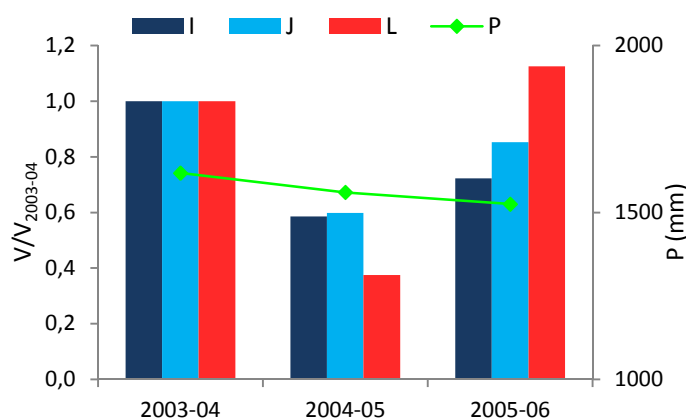
Slika 5: Dinamika iztekanja vode skozi curek I v treh zaporednih letih.

Tabela 1: Iztekanje infiltriranih padavin skozi curke I, J in L v zaporednih hidroloških letih: količina celoletnih padavin, količina in delež padavin ter delež iztekle vode v prvi polovici hidrološkega leta.

Hidrološko leto	Obdobje	P (mm)	P (%)	V iztekle vode (%)		
				Curek I	Curek J	Curek L
2003-04	celo leto	1618,3	100	100	100	100
	do 15.3.2004	857	53	39	47	97
2004-05	celo leto	1560,7	100	100	100	100
	do 15.3.2005	797	51	60	47	96
2005-06	celo leto	1525,5	100	100	100	100
	do 15.2.2006	706,6	43	39	45	13

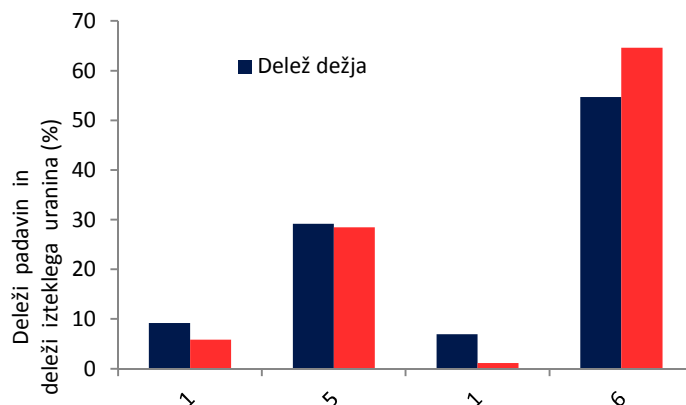
Sledilo je hidrološko leto 2005-06, s še nekoliko manjšo količino padavin (tabela 1), ki so bile razporejene prek celega leta, podobno kot v hidrološkem letu 2003-04, kar se je odrazilo tudi v iztekanju iz vadozne cone (slika 5). V prvih mesecih, ko je padlo 43 % letnih padavin (tabela 1) je iztekel nekoliko manjši del vode (39 %) v primerjavi s preostalimi meseci v letu (tabela 1), vendar pa je bila količina iztekle vode v hidrološkem letu 2005-06 kar za četrtno manjša kot v hidrološkem letu 2003-04, medtem ko je bila količina padavin le dobrih 5 % manjša.

Dogajanje v zaledju curka J je bolj dušeno in delež iztekle vode v hidroloških letih 2004-05 in 2005-06 je bil v primerjavi s curkom I vse večji (slika 6, tabela 1). Sklepamo, da je iztekanje iz vadozne cone po različno prepustnih razpokah odvisno od razmer na površju in v vadozni coni prek hidrološkega leta (daljša sušna obdobja) in ne le od količine padavin. V hidrološkem letu 2004-05 se je večji del infiltriranih padavin shranil v vadozni coni v primerjavi s sledečim hidrološkim letom, ko je sledilo sorazmerno večje iztekanje predvsem iz slabo prepustnega dela (curka J in L).



Slika 6: Deleži iztekle vode skozi curke I, J in L v zaporednih hidroloških letih glede na hidrološko leto 2003-04 ter količina padavin.

Izvir Malenščice na Planinskem polju se napaja z infiltracijo padavin na širšem območju Javornikov in s površinskimi vodami s Cerniškega polja. V dalj časa trajajočih sušnih obdobjih, poleti in jeseni, dotok s Cerkniškega polja celo presuši. Z izračunom povrnjenega sledila v Malenščici (sledenje z injiciranjem na površju na območju Javornikov) v posameznih časovnih obdobjih in količino padavin v istih obdobjih, smo ugotavljali dinamiko pretakanja oz. skladiščenja padavin in sledila v vadozni coni (Kogovšek 1999). Intenzivnejšemu prenosu uranina od 5.7. do 12.9.1997 je sledilo sušno obdobje s skladiščenjem padavin in minimalnim iztekanjem iz vadozne cone (slika 7). Glede na to, da se je tedaj napajal izvir pretežno iz vadozne cone, sklepamo na veliko zaledje na območju Javornikov, ki še ni v celoti raziskano.

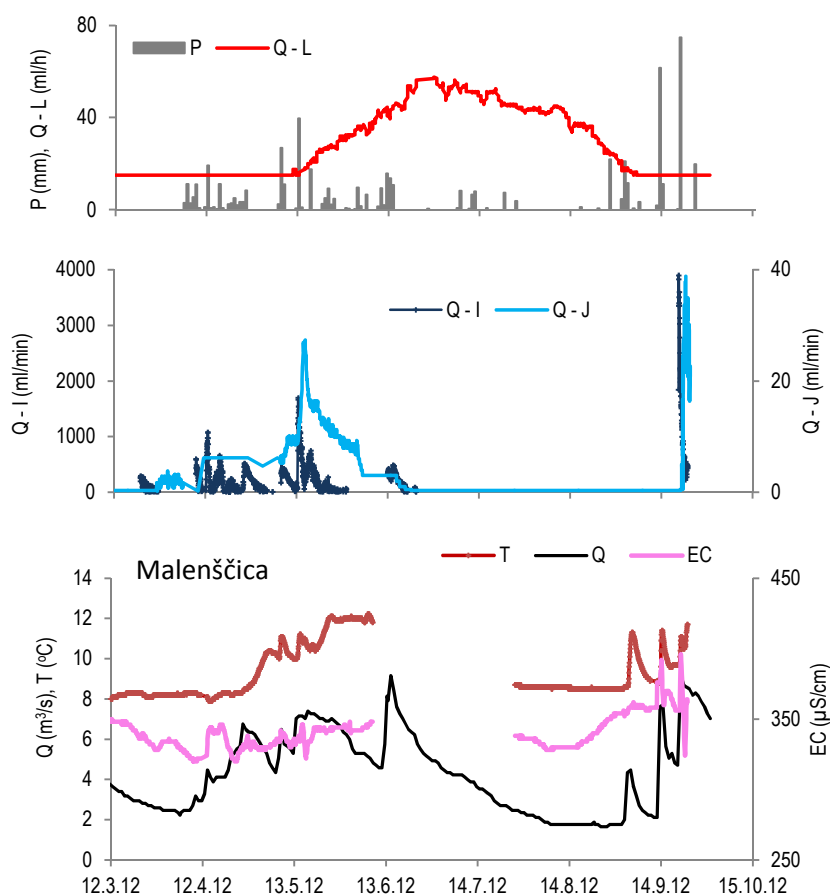


Slika 7: Deleži padavin in deleži povrnjenega sledila glede na vse padavine v opazovanem obdobju od 10.6.1997 do 18.2.1998 oz. na glede na celotno povrnjeno sledilo.

V s padavinami zelo skromnem letu 2012 smo v spomladanskem in poletnem obdobju vzporedno spremljali pretakanje vode skozi vadozno cono in iztekanje skozi izvir (slika 8). Konec julija 2012, ko je pretok Malenščice upadel pod $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, je njena temperatura dosegla vrednost $8,6 \text{ }^\circ\text{C}$, od 13. avgusta do konca meseca pa vrednost $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pri pretoku $1,76 \text{ m}^3/\text{s}$. Sklepamo, da se je v tem obdobju Malenščica napajala predvsem s shranjeno vodo z območja Javornikov, saj je bil Rak v Rakovem Škocjanu na izviru suh, Kotlički pa

so imeli komaj zaznaven pretok. V omenjenem obdobju je padlo le 28,2 mm dežja, skoraj ves v zadnjih dneh avgusta. Sočasne meritve v vadozni coni so pokazale, da so bili tedaj v vadozni coni aktivni le curki oz. kapljanja kot sta bila opazovana curka J in L s pretokom pod 1 ml/min. V takih obdobjih je kakovost Malenščice glede na kemijske parametre sorazmerno dobra, podobno smo ugotavljali tudi glede bakteriološkega stanja (skupne koliformne bakterije in *E. Coli*) (Kogovšek, 2013).

Padavine v začetku septembra so pogojevale oblikovanje manjšega poplavnega vala s povišanjem temperature do 11,3 °C, kar je pokazalo na dotok vode tudi iz smeri Cerkniškega polja (Kogovšek in Petrič, 2010). Vendar je sprememba temperature zaostajala za porastom pretoka kar za 32 ur, kar nakazuje najprej iztekanje shranjene vode s temperaturo 8,6 °C. Nadaljnje padavine so čez 10 dni oblikovale večji poplavni val, s časovnim zamikom je sledilo povečanje temperature, zanihala pa je tudi električna prevodnost (EC). Na osnovi tega sklepamo na dotok vode s Cerkniškega polja, predvsem Cerkniščice. Šele ob nadaljnjih padavinah se je povečal prispevek iz vadozne cone (slika 8), najprej po prepustnejših razpokah (kot je curek I), z dve-dnevnim zamikom pa še po slabše prepustnih razpokah (curek J).



Slika 8: Sočasne meritve pretakanja vode skozi vadozno cono (curki I, J in L) in skozi izvir Malenščice.

Sklepi

Večletno zvezno opazovanje pretakanja padavin skozi 100 m debelo vadozno cono je pokazalo na pomembno skladiščenje infiltriranih padavin v daljših sušnih obdobjih. Tudi večja količina manj intenzivnih padavin v poletno-jesenskem obdobju (do 390 mm padavin

oz. 180 mm infiltriranih padavin) se pretežno shranjuje in prihaja le do minimalnega iztoka iz vadozne cone ali pa ta celo izostane (Kogovšek, 2010). Večji nestalni curki, kot je opazovani curek I, po padavinah hitro odvajajo shranjeno vodo globlje v vodonosnik, ki se meša s sveže infiltriranimi padavinami. Manjši stalni curki in kapljanja (kot sta opazovana curka J in L), ki so vezani na slabše prepustne razpoke, kar omogoča dobro homogenizacijo infiltriranih padavin, pa reagirajo na padavine z določenim časovnim zamikom. Ti curki pomembno napajajo kraške izvire v sušnih obdobjih, ko curki kot je curek I, niso aktivni in ko izostane tudi napajanje prek rek ponikalnic. Vzporedno spremljanje kraškega izvira Malenščica nakazuje v sušnih obdobjih ob minimalnih pretokih napajanje izvira s shranjeno vodo iz vadozne cone. Prve izdatnejše padavine (kot je bilo septembra 2012), ki sprožijo povečanje njenega pretoka, potiskajo skozi izvir najprej shranjeno vodo. Nadaljnje padavine, ki povečajo pretok Cerkniščice na Cerkniškem polju, sprožijo dotok njene vode, šele dodatne, dovolj izdatne padavine pa aktivirajo intenzivno iztekanje iz vadozne cone po hierarhiji različno prepustnih razpok. Na dinamiko pretakanja pa je vezan prenos onesnaženja iz različnih delov vodonosnika.

Zahvala

Raziskave so potekale v okviru programa Raziskovanje krasa (ARRS) in ob podpori Slovenske nacionalne komisije za UNESCO - IHP program.

Literatura

- Bakalowicz, M., Blavoux, B., Mangin, A. 1974. Apport du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique – teneurs en oxygène-18 de trois systèmes des Pyrénées, France. *Journal of Hydrology*, 23, 1-2: 141-158.
- Forti, P. 2002. Speleology in the Third Millennium: Achievements and Challenges. *Theoretical and Applied Karstology*, 15: 7-26.
- Ford, D., Williams, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons: 562 p, Chichester.
- Jeannin, P.-Y., Grasso, A.D. 1995. Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst. *Bulletin d'Hydrologie*, 14, 95-111.
- Klimchouk, A. 1995. Karst Morphogenesis in the epikarstic zone. *Inter. Symp. on changing karst environments*, Oxford and Huddersfield. *Cave and karst science*, 21, 2: 45-50.
- Kogovšek, J. 1982. Vertikalno prenikanje v Planinski jami v obdobju 1980/81. *Acta carsologica*, 10: 110-125.
- Kogovšek, J. 1983. Prenikanje vode in izločanje sige v Pisanem rovu Postojnske jame. *Acta carsologica*, 11: 63-76.
- Kogovšek, J. 1999. Nova spoznanja o podzemnem pretakanju vode v severnem delu Javornikov (Visoki kras). *Acta carsol.* 28, 1: 161-200.
- Kogovšek, J. 2000. Ugotavljanje načina pretakanja in prenosa snovi s sledilnim poskusom v naravnih razmerah. *Annales*, 10, 1-19: 133-142.
- Kogovšek, J. 2010. *Characteristics of percolation through the karst vadose zone*, (*Carsologica*, 10). Ljubljana: Založba ZRC. 168 str.
- Kogovšek, J. 2013. Vpliv sušnih razmer na kakovost kraških vodnih virov (primer izvira Malenščice). *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012*. Ljubljana, 111-120.
- Kogovšek, J., Habič, P. 1981. Preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. *Acta carsologica*. 9: 129-148.
- Kogovšek, J., Petrič, M. 2010. Water temperature as a natural tracer - a case study of the Malenščica karst spring (SW Slovenia). *Geologia Croatica*, 63, 2: 171-177.

- Maloszewski, P., Stichler, W., Zuber, A., Rank, D. 2002. Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, Schneealpe, Austria, by modelling of environmental ^{18}O and ^3H isotopes. *Journal of Hydrology*, 256, 1-2: 48-59.
- Mangin, A., 1973: Sur la dynamique des transferts en aquifère karstique. *Proc. of the 6th Inter. Cong. of Speleology*, Olomuc, 4: 157-162.
- Perrin, J., Jeannin, P.-Y., Zwahlen, F. 2003a: Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology*, 279, 1: 106-124.
- Pezdič, J., Leskovšek-Šefman, H., Dolenec, T., Urbanc, J. 1984. Isotopic study of karst water. Final Report on IAEA Research Contract No.2845/RB. J.Stefan Institute, 47p, Ljubljana.
- Pretoki Malenščice. Medmrežje: <http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/> (5.11.2013).
- Smart, P.L., Friedrich, H. 1986: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England, In: *Proceedings of the Conference on environmental problems of karst terranes and their solutions*, National Water Well Association, 59-87, Dublin.
- Stichler, W., Trimborn, P., Maloszewski, P., Rank, D., Papesch, W., Reichert, B. 1997. Isotopic investigations. *Acta carsologica* 26,1. In: Kranjc A.(Ed) *Karst Hydrogeological Investigations in South-Western Slovenia*, 213-235, Ljubljana.
- Trček, B. 2003. Epikarst zone and the karst aquifer behaviour. A case study of the Hubelj catchment, Slovenia. *Geološki zavod Slovenije*, 100 p, Ljubljana.
- Williams, P.W. 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61: 45-67.

Napovedovanje kakovosti zraka z modelom WRF/Chem

Rahela Žabkar^{1,2}, Luka Honzak²

Povzetek

V prispevku je predstavljen opis in verifikacija eksperimentalnega sistema za operativno napovedovanje kakovosti zraka v realnem času, ki uporablja sklopljen način modeliranja meteoroloških in kemijsko transportnih procesov v ozračju. Rezultati vrednotenja za obdobje dveh poletnih mesecev so pokazali razmeroma dobro kvalitativno ujemanje napovedi z meritvami. Napovedane koncentracije delcev PM₁₀ v zraku v obravnavanem obdobju dveh mesecev v povprečju zelo malo odstopajo od izmerjenih vrednosti, kar omogoča realistično analizo vpliva aerosolov na sevalno bilanco in s tem na napoved meteoroloških spremenljivk.

Ključne besede: ozon, trdni delci, kakovost zraka, model WRF/Chem, napovedovanje, sklopljeno modeliranje

Keywords: ozone, particulate matter, air quality, WRF/Chem, forecasting, coupled modelling

Uvod

Napovedovanje kakovosti zraka je razmeroma novo področje med atmosferskimi znanostmi. Prvi modeli za napovedovanje kakovosti zraka so se pojavili v sedemdesetih letih. To so bili razmeroma preprosti statistični in empirični modeli, ki za izračun napovedi na posameznih merilnih mestih uporabljajo pretekle meteorološke meritve, meritve koncentracij onesnaževal ter napovedi meteorološkega modela. Od devetdesetih let dalje se za napovedovanje kakovosti zraka uporabljajo tudi 3D numerični deterministični modeli, ki vsebujejo matematični opis vseh pomembnih meteoroloških, fizikalnih in kemijskih procesov, ki povezujejo emisije in končne koncentracije različnih onesnaževal v ozračju. V primerjavi s statističnimi in empiričnimi modeli so numerični modeli bistveno kompleksnejši, seveda tudi računsko mnogo bolj zahtevni in za izračune potrebujejo veliko količino podatkov o začetnem stanju atmosfere in o dogajanju na robovih računskega območja. V primeru, da so atmosferski procesi v teh modelih dovolj dobro predstavljeni, oziroma, da so ustrezno obravnavani vsi odločilni vplivi, dajejo numerični modeli za napovedovanje kakovosti zraka srednje do zelo dobre rezultate. Kljub temu, da so statistični in empirični modeli preprostejši in hitrejši, ter za posamezna merilna mesta pogosto dajejo boljše rezultate v primerjavi z numeričnimi, je velika prednost determinističnih modelov v tem, da omogočajo napovedovanje kakovosti zraka tudi v netipičnih vremenskih ali emisijskih razmerah, da je z njimi mogoče določati vzroke ter oceniti posledice onesnaženja, preučevati različne scenarije in predvideti učinkovitost ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka.

Zadnja leta se med determinističnimi modeli vse bolj uveljavlja pristop, ki omogoča sklopljeno modeliranje atmosferskih procesov, kot alternativa običajnega pristopa, ki za napovedovanje kakovosti zraka uporablja dva ločena modela, meteorološkega in kemijsko-transportnega (CT). V sklopljenih meteorološko-kemijsko-transportnih modelih se meteorološki in kemijsko-transportni procesi računajo v vsakem računskem koraku hkrati,

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ul. 19, Ljubljana

² Center odličnosti Vesolje-SI

obenem pa ti modeli omogočajo tudi upoštevanje povratnih učinkov onesnaževal na fizikalne procese v ozračju, ki so sicer tradicionalno v meteoroloških modelih prezrti. Sklopljeni modeli tako predstavljajo bolj realističen pristop k opisovanju atmosferskih pojavov, še posebej v razmerah, ko so koncentracije onesnaževal v ozračju visoke in je s tem potencialno visok tudi njihov učinek na fizikalne procese.

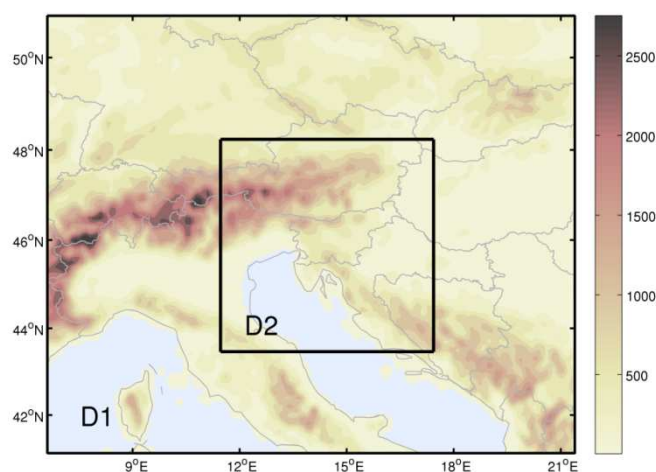
V prispevku predstavljamo primer uporabe sklopljenega meteorološko-kemijsko-transportnega modela WRF/Chem za namen operativnega napovedovanja kakovosti zraka na območju Slovenije. Poleg verifikacije modelskih rezultatov za obdobje dveh poletnih mesecev je predstavljen tudi vpliv, ki ga ima sklopljen način modeliranja na napovedana polja meteoroloških spremenljivk.

Opis modelskega pristopa

Model WRF/Chem (Grell idr., 2005) je s kemijskim modulom sklopljena razširitev mezo-meteorološkega modela WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock idr., 2008), ki omogoča hkratno sklopljeno modeliranje meteoroloških procesov, kemijskih pretvorb in transporta onesnaževal v ozračju. Sklopljeno modeliranje predstavlja trenutno najbolj izpopolnjen pristop k opisovanju kompleksnega med-delovanja fizikalnih in kemijskih procesov v ozračju. Poleg vplivov fizikalnih parametrov ozračja na disperzijo in kemijske pretvorbe onesnaževal, se v tovrstnem modelskem pristopu lahko upošteva tudi vplive, ki jih ima prisotnost onesnaževal v ozračju na meteorološke oziroma na fizikalne procese v ozračju, kot so sevalna bilanca, tvorba oblakov in nastanek padavin. Sklopljen način računanja tako po eni strani omogoča, da se pri računanju transporta in kemijskih pretvorb onesnaževal v vsakem računskem koraku upošteva maksimalna količina informacije o meteorološkem stanju atmosfere, istočasno pa se v izračunih meteorološke napovedi lahko upošteva tudi vpliv prisotnosti onesnaževal v ozračju na fizikalne procese v atmosferi.

V napovedi kakovosti zraka za območje Slovenije, predstavljeni v tem prispevku, z modelom WRF/Chem (različica 3.4.1) računamo tako meteorološko napoved kot napoved koncentracij onesnažil v ozračju. Območje numeričnega modeliranja je sestavljeno iz dveh gnezdenih računskih območij (slika 1), od katerih ima zunanje območje ločljivost 11,1 km in 151x100 mrežnih točk, notranje računsko območje pa ločljivost 3,7 km in 181x145 mrežnih točk. Naše območje zanimanja je notranje računsko območje (D2 na sliki 1) z višjo prostorsko ločljivostjo, medtem ko izračune v zunanjih računskih območjih potrebujemo za zagotavljanje dobrih kemijskih in meteoroloških robnih pogojev na robovih notranjega računskega območja. Po vertikali imamo atmosfero razdeljeno na 42 modelskih nivojev, pri čemer so nivoji bistveno gostejši blizu tal na območju planetarne mejne plasti (15 nivojev v spodnjih 2 km atmosfere), vertikalna ločljivost modela neposredno nad tlemi pa je 25 m. Za začetne in stranske meteorološke robne pogoje uporabljamo napovedi globalnega modela GFS (Global Forecast System). Napovedi kakovosti zraka globalnega kemijskega transportnega modela MOZART-4/ GEOS-5 (Model for OZone And Related chemical Tracers) uporabljamo kot vir podatkov o koncentracijah onesnažil na stranskih robovih modeliranja, medtem ko koncentracije onesnažil ob začetnem času modeliranja preberemo iz rezultatov predhodne simulacije. Antropogene emisije (7 primarnih onesnaževal, 5 podskupin delcev ter 48 podskupin hlapnih organskih spojin) računamo za območje Slovenije iz podrobnih letnih podatkov o emisijskih virih za leto 2009 (vir: ARSO), medtem ko za območja izven Slovenije uporabljamo emisije TNO/MACC-II, prav tako za leto 2009. Za izračun biogenih emisij je z modelom WRF/Chem sklopljen model MEGAN (Model of Emissions of Gases and

Aerosols from Nature), ki v izračunih upošteva rabo tal ter trenutne lokalne meteorološke pogoje. Za ocenjevanje morskega aerosola ter dvigovanja prahu uporabljamo module v modelu WRF/Chem, ki prav tako omogočajo ocenjevanje teh emisij v odvisnosti od rabe tal in trenutnih lokalnih meteoroloških pogojev. Kemijske pretvorbe med plinastimi onesnaževali se računajo z uporabo mehanizma RADM2, za delce pa imamo vklopljen kemijski mehanizem MADE/SORGAM. Parametrizacijske sheme v modelu za mikrofizikalne procese, za oceno pretokov med tlemi in atmosfero, za turbulenco v planetarni mejni plasti, za fotolizo in parametrizacijo konvektivne oblačnosti smo izbrali kot je prikazano v Tabeli 1. Za potrebe operativnega napovedovanja je model konfiguriran tako, da se od povratnih učinkov, ki jih ima prisotnost onesnažil na meteorološke procese, upoštevajo vplivi aerosola na sevalno bilanco, oziroma t.i. direktni povratni učinki.



Slika 1: Območji modeliranja, uporabljeni pri operativnem napovedovanju kakovosti zraka z modelom WRF/Chem. Prikazana je topografija (v metrih) v ločljivosti zunanjšega računskega območja (11,1 km).

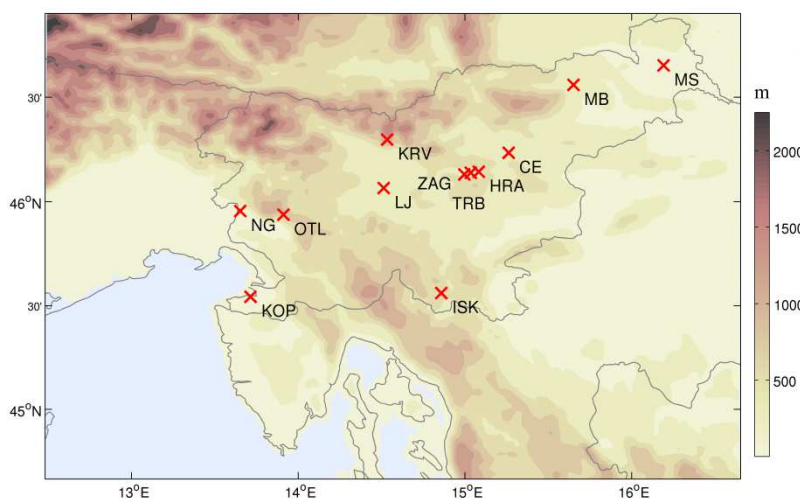
Tabela 1: Parametrizacijske sheme, uporabljene v konfiguraciji modela WRF/Chem (podrobnosti: http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/Users_guide.pdf).

Proces	Izbrana shema
Planetarna mejna plast	YSU
Površinska plast	Monin-Obukhov
Procesi na površju tal	Noah
Kratkovalovno sevanje	RRTMG
Dolgovalovno sevanje	RRTMG
Mikrofizikalni procesi	Morrison
Konvekcija	G3
Fotoliza	Fast-J

Vrednotenje rezultatov napovedovanja kakovosti zraka

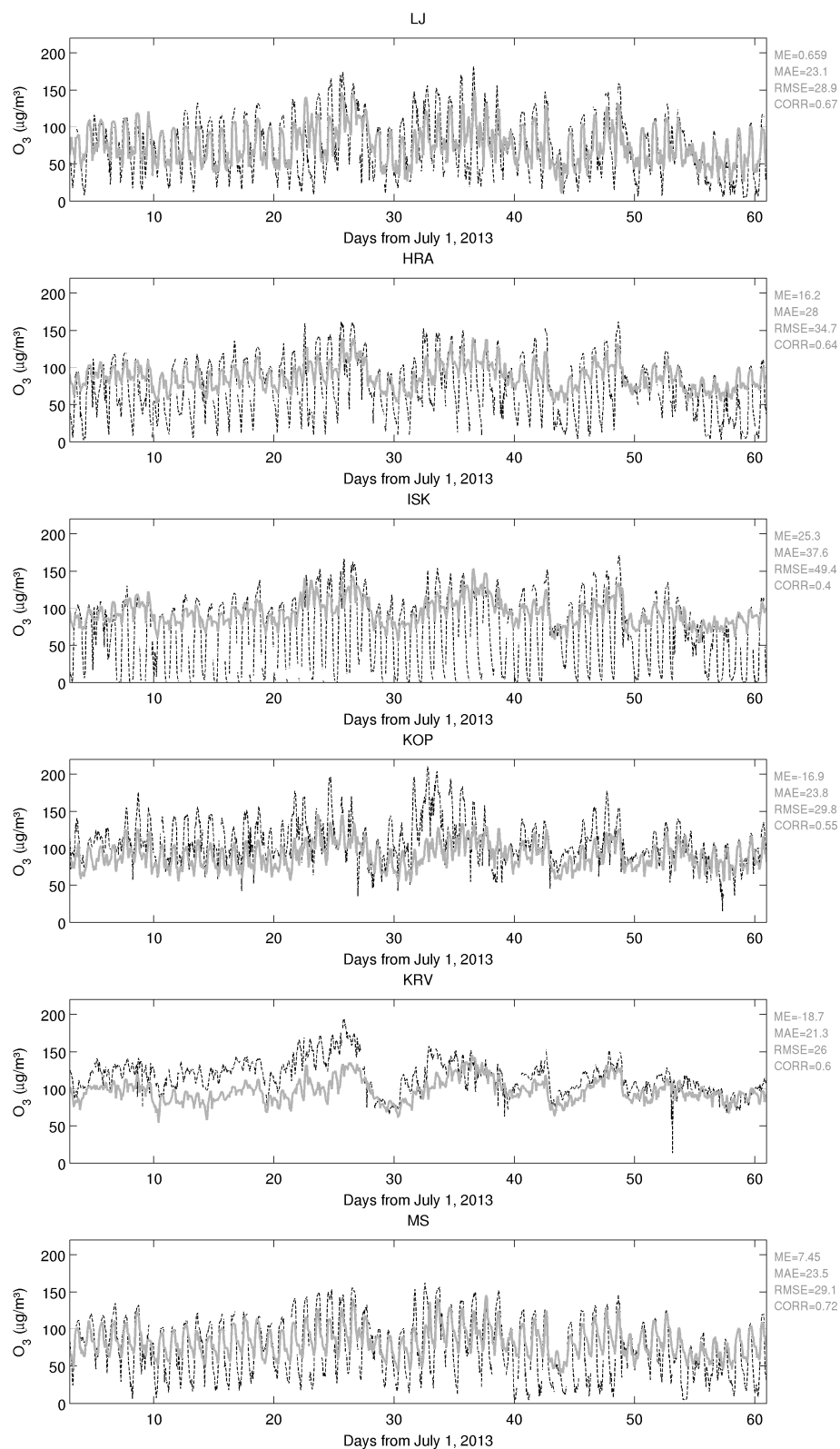
Vrednotenje rezultatov napovedi kakovosti zraka je bilo narejeno za obdobje dveh poletnih mesecev (julij in avgust 2013). Za primerjavo modelskih napovedi z dejansko izmerjenimi koncentracijami so bile uporabljene meritve 12 postaj državne merilne mreže,

prikazane na sliki 2. V poletnem obdobju so koncentracije večine onesnaževal v Sloveniji običajno nizke, izjema je le ozon, za katerega je v primeru zelo visokih temperatur zraka velika verjetnost, da bo na območju Slovenije prišlo do epizod prekomernih koncentracij ozona. V verifikaciji modelske napovedi za obdobje poletnih mesecev nas tako zanima predvsem napoved ozona, čeprav smo v postopkih vrednotenja modelskih rezultatov pregledali tudi napovedi ostalih onesnaževal. V obdobju obravnavanih dveh mesecev sta bili v Sloveniji izmerjeni dve epizodi prekomerne onesnaženosti zraka z ozonom, prva med 23. in 28. julijem 2013 ter druga med 2. in 7. avgustom 2013.

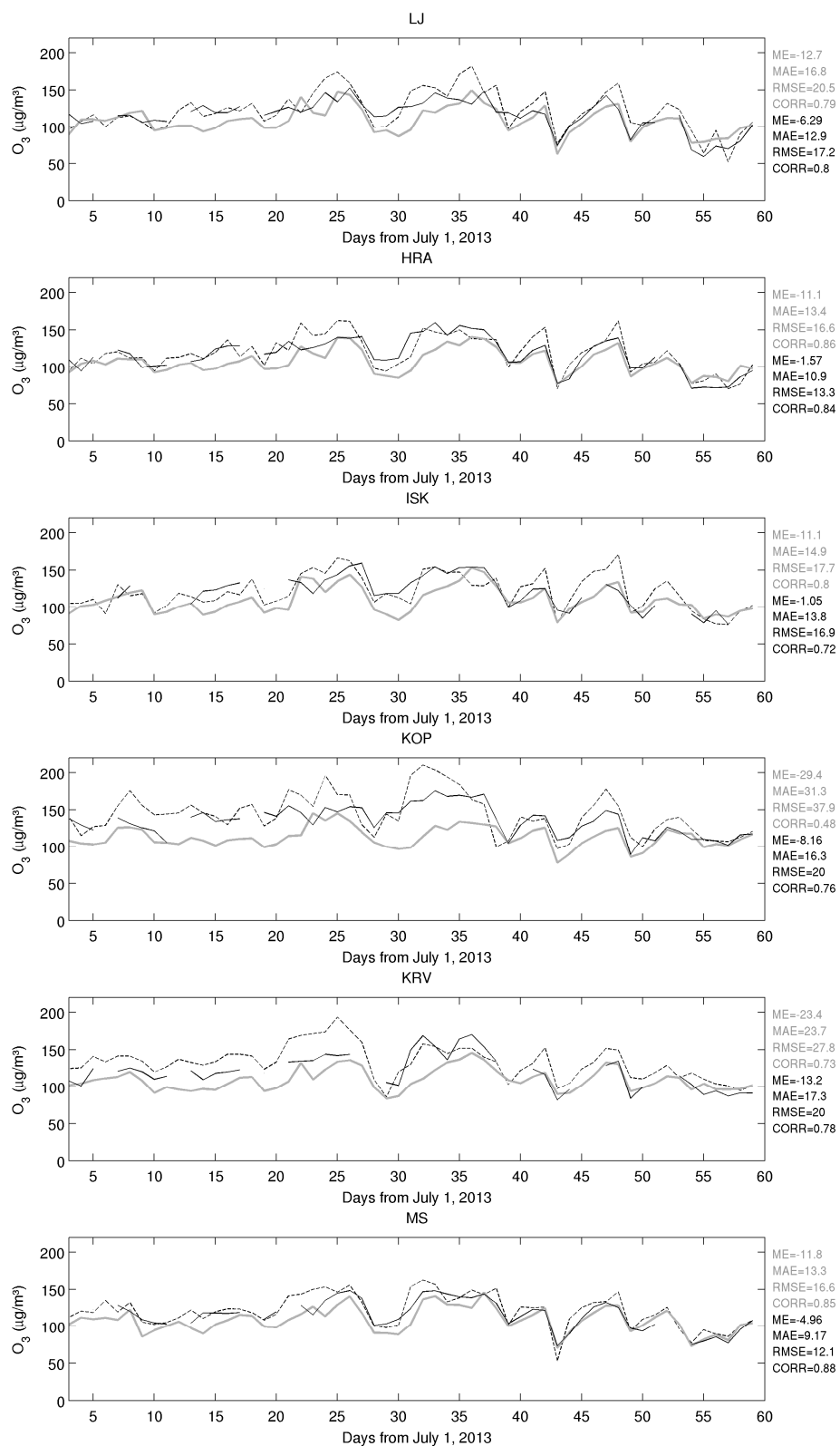


Slika 2: Lokacije postaj državne merilne mreže (ARSO), uporabljene v verifikaciji modelske napovedi kakovosti zraka. KOP – Koper, NG – Nova Gorica, OTL – Otlica, LJ – Ljubljana, ISK – Iskrba, KRV – Krvavec, ZAG – Zagorje, TRB – Trbovlje, HRA – Hrastnik, CE – Celje, MB – Maribor, MS – Murska Sobota.

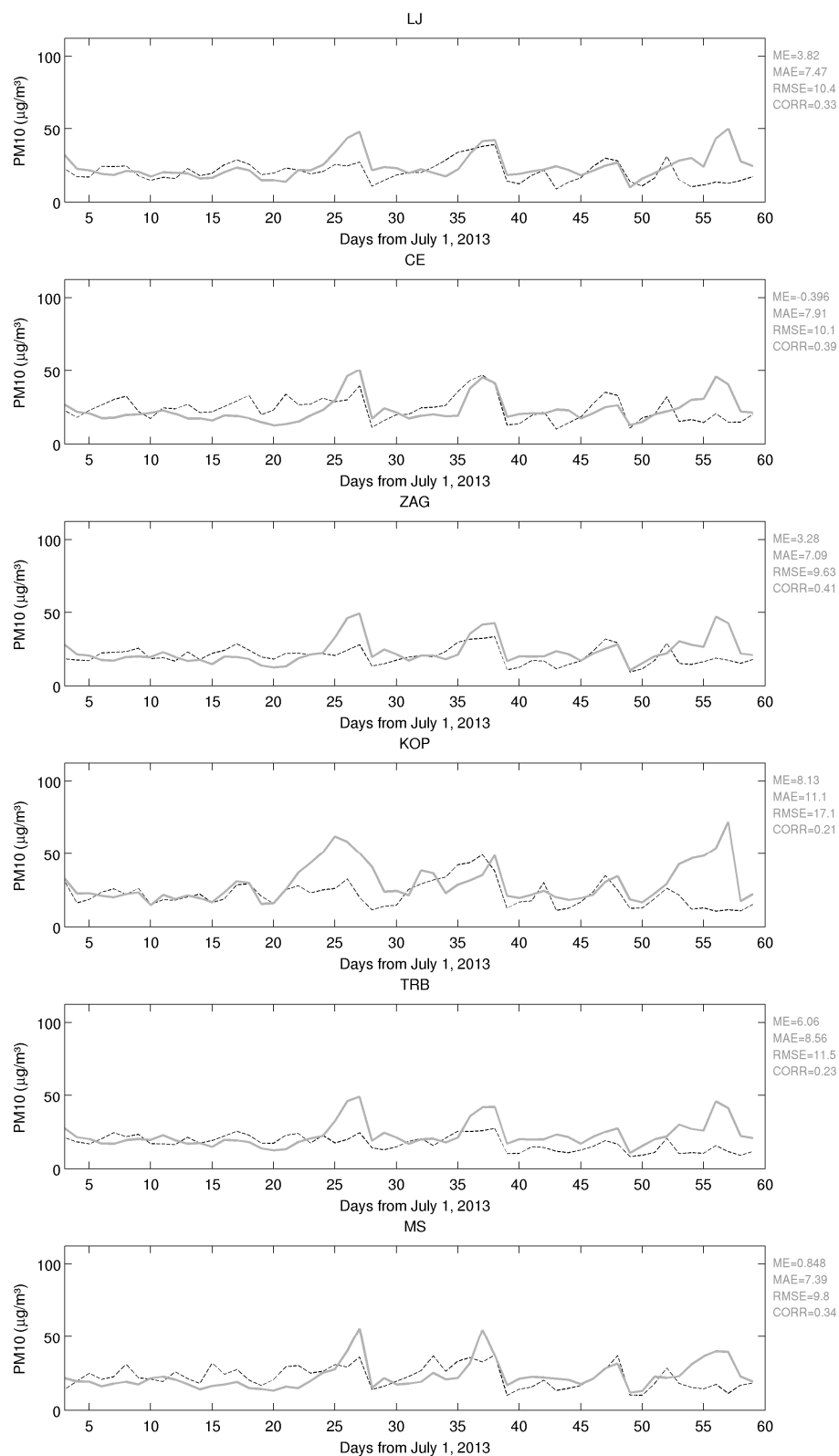
Primerjava enodnevne napovedi urnih vrednosti ozona z meritvami je prikazana na sliki 3. Čeprav model kvalitativno lepo sledi meritvam, ima za večino merilnih mest manjši dnevni hod, običajno značilno podceni dnevne maksimume ozona in preceni nočne minimume, kar je v skladu z rezultati predhodnih testiranj modela na izbrani epizodi (Žabkar idr., 2013). V povprečju za obravnavano obdobje model preceni ali podceni urne vrednosti ozona med -22 in $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, odvisno od merilne postaje. Na primer, na višje ležečem merilnem mestu Krvavec opazimo značilno sistematično podcenitev vseh urnih vrednosti (povprečni odklon $-22,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), v Ljubljani so v povprečju izmerjene urne koncentracije enako visoke kot napovedane, v Iskrbi so zaradi precenitve nočnih koncentracij v povprečju napovedane urne koncentracije ozona previsoke (povprečni odklon $24,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), medtem ko so v Kopru zaradi podcenitve dnevnih maksimumov povprečne urne koncentracije ozona prenizke (povprečni odklon $-19,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Posledica sistematičnih podcenitev ali precenitev urnih vrednosti ozona, povezanih med drugim z lego merilnega mesta in ločljivostjo modela, so tudi ustrezno visoke vrednosti ostalih statističnih mer napake modela, na primer korena povprečne kvadratne napake (RMSE; med 24 in $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Koeficient korelacije, izračunan iz urnih vrednosti ozona, zavzema vrednosti med $0,48$ in $0,71$.



Slika 3: Primerjava enodnevne napovedi urnih vrednosti ozona z meritvami za nekaj postaj državne merilne mreže. S črno črtkano črto so prikazane meritve, s sivo pa napovedi modela WRF/Chem. ME – povprečna napaka, MAE – povprečna absolutna napaka, RMSE – koren povprečne kvadratne napake, CORR – koeficient korelacije.



Slika 4: Primerjava enodnevne napovedi dnevnega maksimuma ozona z izmerjenimi vrednostmi za nekaj postaj državne merilne mreže. S črno črtkano črto so prikazane meritve, s sivo napovedi modela WRF/Chem, s polno črno črto pa napovedi statističnega modela. ME – povprečna napaka, MAE – povprečna absolutna napaka, RMSE – koren povprečne kvadratne napake, CORR – koeficient korelacije.



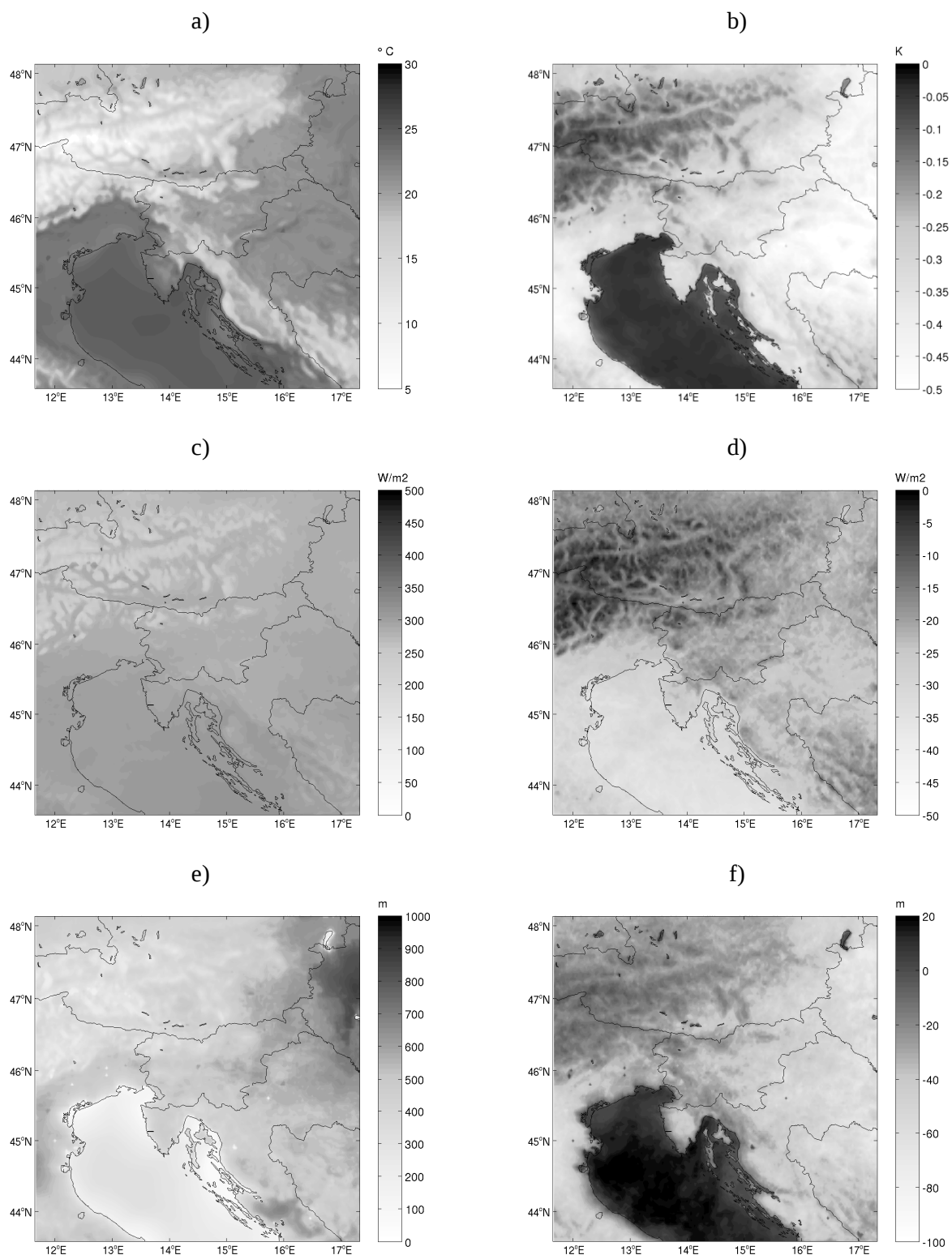
Slika 5: Primerjava enodnevne napovedi povprečnih dnevni koncentracij delcev PM10 z meritvami za nekaj postaj državne merilne mreže. S črno črtkano črto so prikazane meritve, s sivo pa napovedi modela WRF/Chem. ME – povprečna napaka, MAE – povprečna absolutna napaka, RMSE – koren povprečne kvadratne napake, CORR – koeficient korelacije.

V praksi nas bolj kot ujemanje urnih vrednosti zanimajo najvišje dnevne koncentracije ozona. V ta namen je na sliki 4 prikazana primerjava napovedanih in izmerjenih dnevnih maksimumov ozona, pri čemer je poleg napovedi modela WRF/Chem, prikazana tudi enodnevna napoved statističnega modela, ki se uporablja na Agenciji RS za okolje (ARSO) za napovedovanje dnevnih maksimumov ozona na 8 merilnih mestih po Sloveniji. Sistematične podcenitve dnevnih maksimumov, opažene pri primerjavi urnih vrednosti sicer ostajajo (povprečni odklon med -28 in $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), vendar pa se izkaže, da so vrednosti koeficienta korelacije sedaj visoke, med $0,54$ in $0,87$. Zanimivo je, da so praktično za vse postaje korelacije med modelsko napovedjo in meritvami višje za model WRF/Chem kot za statistični model, čeprav so statistične napovedi vezane na posamezno merilno mesto in torej upoštevajo lokalne značilnosti merilne postaje. To potrjuje na pomembnost modeliranja procesov, ki vplivajo na koncentracije onesnaževal, ki v statističnih modelih ni vključeno. Primerjava uspešnosti modela med merilnimi mesti pokaže, da so modelske napovedi najslabše za merilna mesta na Primorskem (Nova Gorica, Koper), kjer niso bile opažene le največje podcenitve dnevnih maksimumov, pač pa so tudi koeficienti korelacije najnižji. Ker se obenem najvišje koncentracije ozona pojavljajo ravno na Primorskem, bi bilo potrebno za namen natančnejšega napovedovanja koncentracij na tem območju dodatno raziskati razloge za izrazito večja neujemanja na Primorskem. Pri tem je potrebno poudariti, da model pravilno napove višje koncentracije nad območjem severnega Jadrana, medtem ko na samih lokacijah merilnih mest na Primorskem daje prenizke vrednosti, ki so razmeroma slabo korelirane z dejansko izmerjenimi dnevnimi maksimumi.

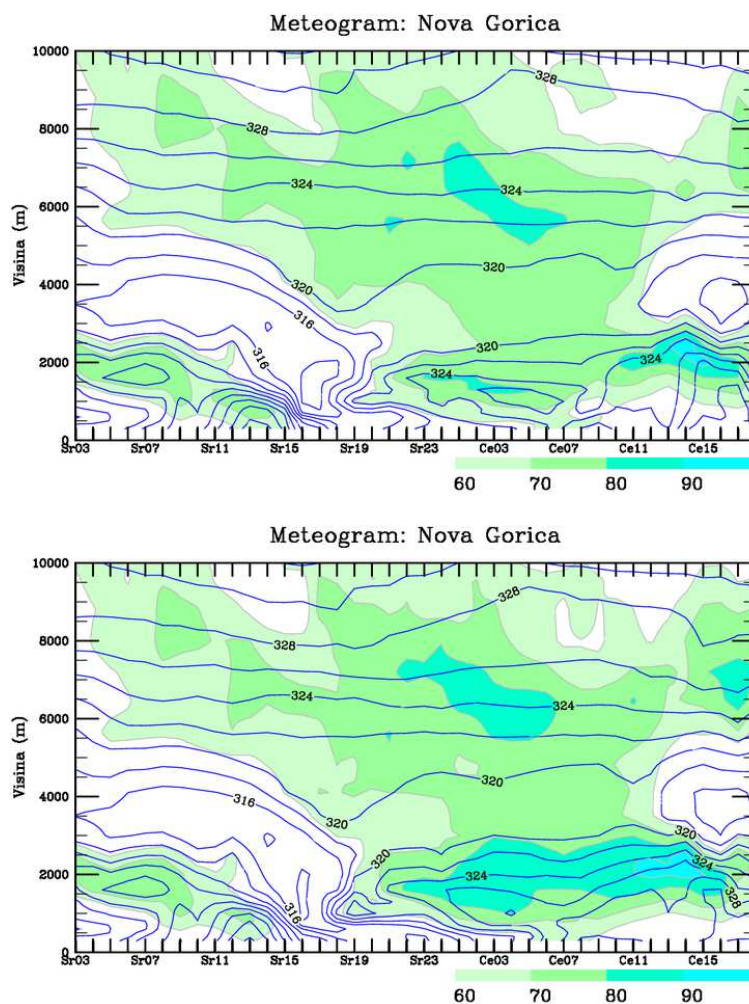
Primerjava napovedanih in izmerjenih dnevnih koncentracij delcev PM₁₀ je prikazana na sliki 5. Ker v obravnavanem obdobju poletnih mesecev v Sloveniji ni bilo izmerjenih visokih koncentracij delcev in je bilo nihanje v dnevnih koncentracijah delcev razmeroma malo, primerjava koeficientov korelacije med modelom in meritvami nima večje teže. Zelo zanimiva pa je ugotovitev, da je praktično na vseh merilnih mestih po Sloveniji sistematično odstopanje modelske napovedi od izmerjenih vrednosti zelo majhno (med $-1,6$ in $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, odvisno od merilne postaje). To je presenetljivo zaradi dejstva, da imajo numerični modeli za modeliranje koncentracij delcev v zraku v splošnem težave z visokimi podcenitvami koncentracij delcev, običajno za faktor 2 ali celo več. Koncentracije delcev v zraku, ki se po velikostnem redu v povprečju dobro ujemajo z izmerjenimi koncentracijami delcev, nam tako omogočajo realistično študijo vplivov, ki jih ima prisotnost aerosolov na fizikalne procese v ozračju, oziroma na meteorološko napoved.

Vpliv sklopljenega modeliranja na meteorološko napoved

S sedanjo konfiguracijo modela WRF/Chem je v numeričnih izračunih upoštevan vpliv prisotnosti aerosolov na sevalne procese v atmosferi. Da bi lahko preučili vpliv zaradi aerosolov spremenjene sevalne bilance na meteorološko napoved, smo za zgoraj obravnavano obdobje dveh mesecev (julij in avgust 2013) operativno napoved računali vzporedno še z modelom WRF/Chem, z izklopljenim kemijskim modulom. Tako smo dobili dve napovedi za obdobje dveh mesecev, s primerjavo katerih lahko preučujemo vpliv prisotnosti onesnažil na meteorološko napoved. Povzetek primerjave obeh napovedi na celotnem računskem območju za obdobje dveh mesecev je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Dvomesечna povprečja spremenljivk (levi stolpec, rezultati simulacije z modelom WRF) in povprečne razlike zaradi vpliva aerosolov (desni stolpec, razlika WRF/Chem - WRF). Prikazani so rezultati za temperaturo zraka 2m nad tlemi (a,b), sončno sevanje pri tleh (c,d) in višino planetarne mejne plasti zraka (e,f).



Slika 7: Časovni razvoj vertikalnega preseka relativne vlage in potencialne temperature nad Novo Gorico za napoved dne 3.7.2013. Zgoraj: WRF/Chem, vključen vpliv aerosolov. Spodaj: WRF, brez prisotnosti aerosolov.

V primeru jasnega neba prisotnost aerosolov v ozračju zmanjša količino globalnega sončnega sevanja, ki doseže tla, kar ima za posledico znižanje temperature zraka pri tleh. V primerih, ko je prisotna oblačnost, pa se temu direktnemu vplivu aerosolov na sevalno bilanco pridruži še vpliv sprememb v vodnatosti oblakov, do katerega pride zaradi sprememb v termodinamiki atmosfere. Majhne spremembe v sevalnem ravnovesju in zaradi tega v prizemni temperaturi zraka in termalni stratifikaciji nad tlemi, namreč vplivajo na razvoj oblakov, kar pa ima večji vpliv na sevalno bilanco kot sam prvotni vpliv aerosolov na sevalne tokove. Povprečni vpliv aerosolov na temperaturo, količino sončnega sevanja in na višino planetarne mejne plasti, prikazan na sliki 6, je razmeroma enostavno razložiti. Zaradi vpliva aerosolov se več sevanja v spodnji troposferi siplje nazaj, kar povzroči v povprečju nekoliko nižje temperature povsod na območju modeliranja in nižjo višino planetarne mejne plasti nad kopnim. V povprečju nekoliko višja višina premešane plasti zraka nad morjem je težje razumljiva in je posledica kompleksnega meddelovanja procesov, še posebej v situacijah, ko je prisotna oblačnost. Podrobnejša analiza rezultatov po dnevih namreč pokaže, da se lahko količina sončnega sevanja lokalno v modelskih rezultatih v prisotnosti aerosolov tudi poveča, enako velja posledično npr. za temperaturo zraka pri tleh, pri čemer se to običajno dogaja ob prisotnosti oblakov. Zaradi spremenjenih

sevalnih razmer se namreč spremeni tudi temperaturna stratifikacija pri tleh in s tem termodinamika atmosfere, kar vpliva na nastanek in trajanje oblačnosti. Povprečna oblačnost se v primeru vključitve vpliva aerosolov v model v povprečju v obdobju analiziranih dveh mesecev nekoliko zmanjša.

Kot primer vpliva aerosolov na relativno vlago in s tem posledično tudi na oblačnost, je na sliki 7 prikazan časovni razvoj vertikalnega preseka relativne vlage in potencialne temperature za izbrano dvodnevno napoved za 3.7.2013 za eno od merilnih mest. Izbran je dan, ko so bile simulirane koncentracije aerosolov v zraku sicer precej visoke (pri tleh precej prevelike v primerjavi s prizemnimi meritvami), vendar je zato vpliv aerosolov na rezultate toliko bolj razločen. V simulaciji brez prisotnosti aerosolov je predvsem tekom drugega simuliranega dne potencialna temperatura zraka v plasti pri tleh nekoliko višja, v višinah med približno 1000 m in 3000 m pa imamo v tem primeru tudi precej večjo relativno vlago.

Zaključki

V prispevku obravnavamo eksperimentalno operativno napoved kakovosti zraka s sklopljenim meteorološko-kemijsko-transportnim modelom WRF/Chem. Pri vrednotenju modelskih rezultatov nam je poleg kvantitativnega ujemanja modelskih izračunov z meritvami enako pomembno tudi kvalitativno ujemanje, ki pove kako dobro modelski izračuni sledijo dejanski dinamiki obravnavanih epizod. Zavedati se je namreč potrebno, da v numeričnih modelih ni mogoče s poljubno natančnostjo opisati vseh procesov, ki potekajo v naravi. Vzrok je v včasih pomanjkljivem poznavanju kompleksnih procesov in mehanizmov, v nepopolnih informacijah o začetnem stanju atmosfere in na robovih modelskega območja ter v omejenih računalniških zmogljivostih.

Rezultati vrednotenja so pokazali razmeroma dobro kvalitativno ujemanje napovedi z meritvami. Na nekaterih merilnih mestih je bilo ujemanje v primeru dnevnih maksimumov ozona zelo dobro, medtem ko so bile najslabše napovedi dosežene na merilnih postajah na Primorskem, kjer so običajno izmerjene najvišje dnevne koncentracije ozona. Ugotovili smo, da je korelacija med napovedanimi in zmerjenimi dnevnimi maksimumi ozona višja v primeru uporabe modela WRF/Chem, kot v primeru statističnega modela, čeprav je le ta vezan na posamezno merilno mesto. Ta ugotovitev kaže na pomembnost vključitve procesov v model za napovedovanje kakovosti zraka. Napovedane koncentracije delcev PM₁₀ v zraku na obravnavanem obdobju dveh mesecev so zelo malo odstopale od izmerjenih vrednosti, zaradi česar rezultati napovedi predstavljajo dobro osnovo za študijo vpliva aerosolov na napoved meteoroloških spremenljivk, katere prve rezultate predstavljamo v prispevku. Za namen boljšega razumevanja medsebojne povezanosti različnih procesov v ozračju, še posebej v razmerah, ki vključujejo prisotnost oblakov, pa v prihodnosti načrtujemo nadaljnje podrobne analize.

Zahvala

Prispevek je bil pripravljen v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI, ki je financiran s sredstvi Evropskih strukturnih skladov in Ministrstva za izobraževanje, znanost, kulturo in šport. V prispevku smo za verifikacijo modelske napovedi uporabili meritve državne merilne mreže Agencije RS za okolje.

Literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO): statistična napoved dnevnih maksimumov ozona, podatki o emisijah za Slovenijo, meritve postaj državne merilne mreže.
- Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B., 2005. Fully coupled online chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39, 6957-6975.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 113 p.
- Žabkar, R., Koračin, D., Rakovec, J., 2013. A WRF/Chem sensitivity study using ensemble modelling for a high ozone episode in Slovenia and the Northern Adriatic area. *Atmos. environ.* vol. 77, str. 990-1004.

Od meteoroloških meritev do klimatoloških produktov

Gregor Vertačnik^{*}, Mojca Dolinar^{*}, Mateja Nadbath^{*}

Povzetek

V zadnjih letih postaja povpraševanje po podnebnih podatkih zaradi podnebnih sprememb vse večje. Proces od merjenja meteoroloških spremenljivk do izdelave klimatoloških produktov za končne uporabnike zahteva veliko dela in časa. V zadnjih letih je zaradi spremljanja podnebnih sprememb vse več poudarka na homogenizaciji časovnih nizov. Ker kakovostna analiza preteklega podnebja predstavlja enega od stebrov vedenja o podnebnih spremembah je na Agenciji za RS okolje (ARSO) leta 2008 pričel teči projekt Podnebna spremenljivost Slovenije (PSS). S kontrolo izmerkov, shranjenih v računalniško bazo, homogenizacijo časovnih nizov meritev in obdelavo homogeniziranih vrednosti omogočamo končnim uporabnikom kakovostne podatke o podnebnju v preteklih desetletjih.

Ključne besede: podnebje, meteorološke meritve, homogenizacija, kontrola podatkov, metapodatki

Keywords: climate, meteorological measurements, homogenisation, quality control, metadata

Uvod

Od industrijske revolucije dalje je človek s svojo dejavnostjo spremenil sestavo ozračja, kar je privedlo do podnebnih sprememb, ki se najbolj jasno kažejo v obliki globalnega segrevanja. Na svetovni ravni se je ozračje pri tleh v obdobju 1880–2012 segrelo za približno 0,8 °C (IPCC, 2013). Segrevanje je bilo prostorsko in časovno neenakomerno. V splošnem je bilo na zmernih in visokih severnih geografskih širinah in nad kopnim močnejše kakor na svetovni ravni. Analize meritev so že pred leti kazale, da je bilo v Sloveniji segrevanje nadpovprečno izrazito (Kajfež-Bogataj, 2004; Kajfež-Bogataj in sod., 2010), a do nedavnega nismo imeli zanesljive prostorske in časovne slike o tem segrevanju. Zaradi tega je ARSO jeseni 2008 pričela s projektom Podnebna spremenljivost Slovenije. Glavni cilj projekta je širši javnosti posredovati čim bolj točne podatke o podnebnih spremembah in spremenljivosti pri nas od leta 1961. Z uporabo modernih metod kontrole in homogenizacije podatkov ter izčrpnega arhiva metapodatkov smo izboljšali kakovost, s tem pa zanesljivost podatkov za analizo podnebja v preteklih desetletjih. Vedenje o preteklih podnebnih spremembah pa je eden od temeljev razumevanja podnebnega sistema in napovedovanja bodočih podnebnih sprememb. Informacija o bodočem podnebnju je ena od ključnih pri prilagajanju in blaženju podnebnih sprememb in sega na številna področja, od gospodarstva do turizma.

V članku je na primeru projekta in tekočih, operativnih delovnih procesov na ARSO predstavljen celotni proces od pridobitve meteoroloških podatkov do klimatoloških produktov za končne uporabnike. Posamezne točke procesa – meritve, digitalni arhiv meritev, kontrola meritev, zbiranje metapodatkov, homogenizacija in obdelava končnih podatkov – so v tem vrstnem predstavljene v tem članku.

^{*} Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje, Vojkova cesta 1b, 1000 Ljubljana

Klasične meteorološke meritve

Prve sistematične meteorološke meritve na ozemlju današnje Slovenije segajo v konec 18. stoletja (Zupančič, 2004). V Ljubljani so z meritvami pričeli okoli leta 1820, a pred letom 1850 nimamo ohranjenih posameznih meritev, temveč zgolj mesečne vrednosti (Drnovšek, 2003). Ob koncu 19. stoletja je bilo postaj že nekaj deset, med obema svetovnima vojna je število naraslo na današnji nivo. V drugi polovici 20. stoletja se je mreža še nekoliko zgostila in dosegla vrhunec v 70. letih 20. stoletja. Kasneje se je število postaj in opazovalcev začelo zmanjševati in tudi nameščanje samodejnih postaj od začetka 90. let 20. stoletja je redčenje mreže zgolj ublažilo.

Raziskave podnebnih sprememb v zadnjih desetletjih zaradi večje razpoložljivosti klasičnih meritev običajno temeljijo na ročnih oziroma klasičnih meteoroloških meritvah. V Sloveniji klasične meritve, ki jih izvaja Državna meteorološka služba, sledijo smernicam Svetovne meteorološke organizacije (WMO, 2008). Temperaturo zraka v naši meteorološki mreži merimo dva metra nad travnatimi tlemi v angleški meteorološki hišici, ki ščiti termometer pred padavinami in neposrednim sončnim sevanjem. Opazovalci na podnebnih postajah odčitajo temperaturo trikrat dnevno, ob 7., 14. in 21. uri po sončnem času. V večernem terminu odčitajo tudi najvišjo in najnižjo temperaturo preteklih 24 ur. Višino padavin merimo s preprostim, a zanesljivim Hellmannovim dežemerom. Na padavinskih in podnebnih postajah opazovalci vsako jutro ob 7. uri po srednjeevropskem času izmerijo 24-urno višino padavin. Ob istem času potekajo tudi meritve višine skupnega in novega snega. Za spremljanje trajanja sončnega obsevanja uporabljamo Campbell-Stokesov heliograf. To je naprava s kroglasto lečo, ki zbira sončne žarke na lepenki in vanjo vžge sled. Dolžina sledi ustreza trajanju sončnega obsevanja.



Slika 1: Podnebna postaja Šmartno pri Slovenj Gradcu (foto: Gregor Vertačnik)

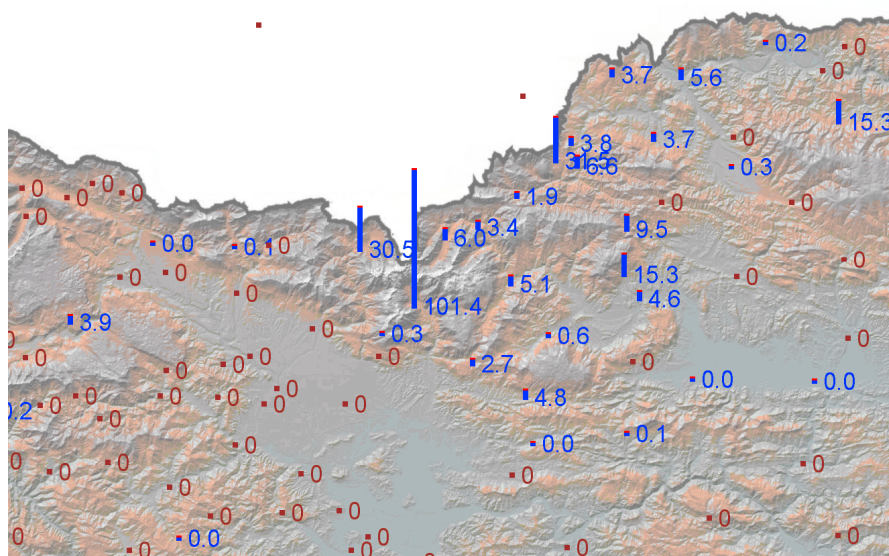
Digitalni arhiv meritev

Prostovoljni in profesionalni opazovalci na klasičnih meteoroloških postajah vrednosti meritev in opazovanj meteoroloških spremenljivk sproti vpisujejo v padavinska poročila ali sinoptične ali klimatološke dnevnik. Ob koncu meseca jih skupaj s trakovi, na katerih je časovni potek vrednosti meteoroloških spremenljivk (termogrami, heliogrami, pluviogrami ipd.), pošljejo na sedež Agencije RS za okolje, kjer jih digitaliziramo. Z večine klasičnih meteoroloških postaj so podatki minulega meseca digitalizirani do sredine tekočega meseca. Izjema so glavne meteorološke postaje (postaje I. reda) in samodejne postaje – s teh so meteorološki podatki v digitalnem arhivu meritev na voljo sproti. Digitalizirani meteorološki podatki so shranjeni v relacijski bazi Postgres. Zapisani so v preglednicah, ki so medsebojno povezane. Do podatkov dostopamo hitro in enostavno z ukazi v programskem jeziku SQL (ang. Structured Query Language).

Digitalizirani so vsi izmerjeni meteorološki podatki od leta 1961 do danes. Mnogo izmerkov iz let pred omenjenim je že v bazi, vendar še ne vsi. Podatke z izbranih postaj z dolgim nizom opazovanj in meritev smo digitalizirali v celoti.

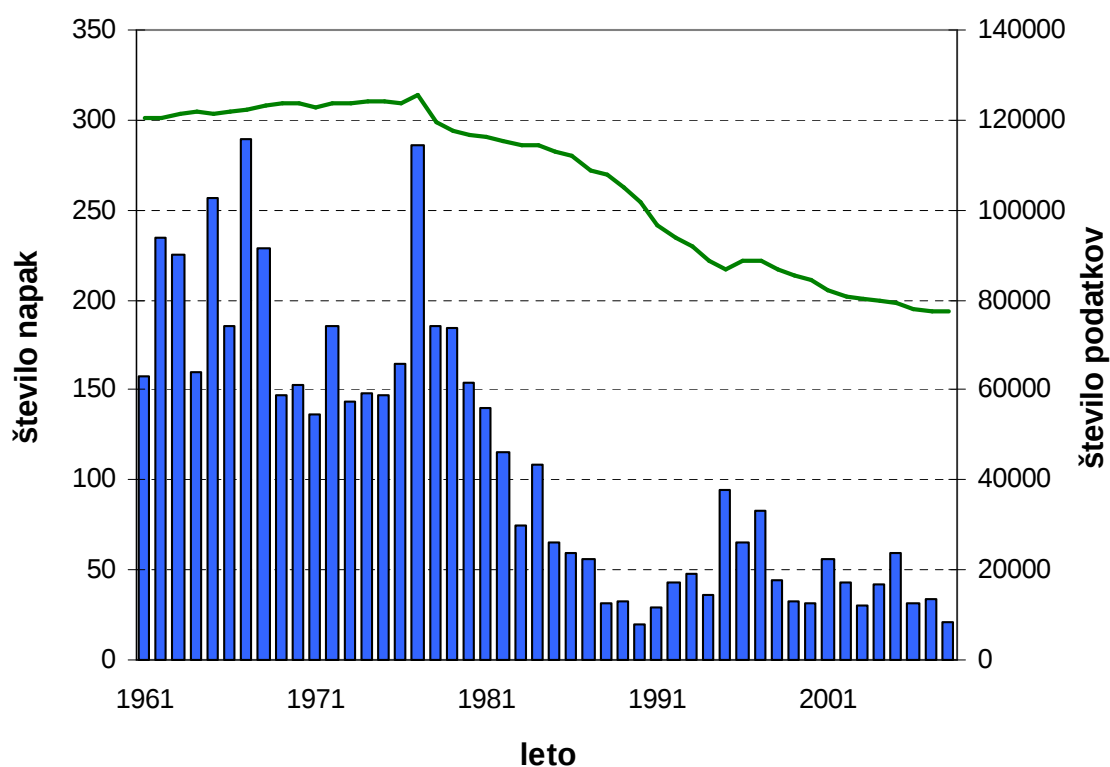
Kontrola meritev

Pred analizo meritev je potrebno preveriti verodostojnost posameznih izmerkov. Tekoča oziroma operativna kontrola klasičnih meteoroloških meritev se je izvajala že pred desetletji na bivšem Hidrometeorološkem zavodu SRS in se nadaljuje tudi na ARSO. Zaradi razvoja računalniških zmogljivosti in metod kontrole smo se odločili, da v projektu PSS preverimo že kontrolirane izmerke za izbrane postaje od leta 1961. Osredotočili smo se na logično in prostorsko primerjavo izmerkov. Pri prvi preverimo skladnost izmerkov o izbrani meteorološki spremenljivki z drugimi spremenljivkami. Podatki so lahko neskladni po definiciji (recimo najnižja temperatura višja od najvišje temperature) in ali pa določen izmerek zelo izstopa glede na ostale izmerke na izbrani meteorološki postaji (slika 2). S prostorsko kontrolo preverimo še skladnost izmerkov izbrane postaje z izmerki okoliških postaj.



Slika 2: Primer izstopajočega izmerka pri dnevni višini padavin – 101,4 mm v Kamniški Bistrici 15. julija 1995. Na podlagi zapisa časovnega poteka padavin in zapisa o intenziteti dežja smo ugotovili, da je izmerek pravilen.

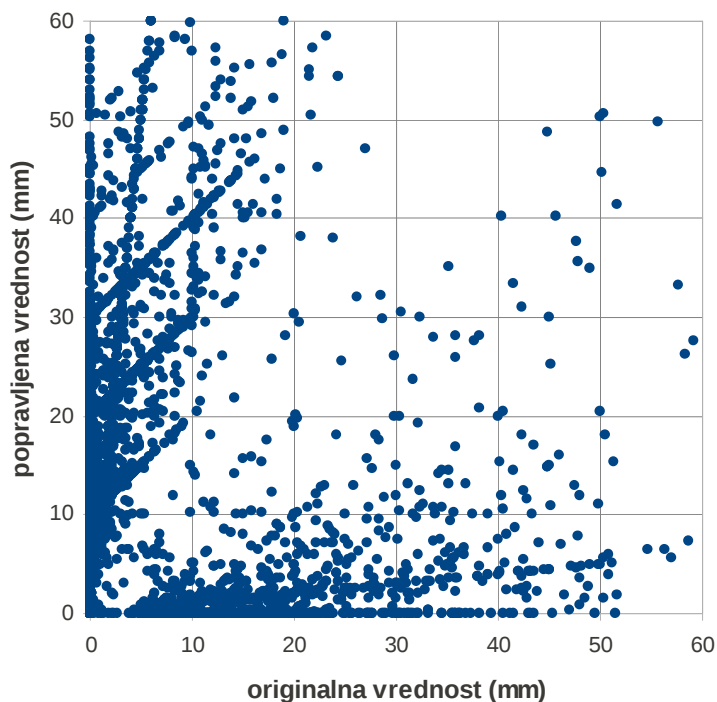
Na osnovi zgoraj zapisanih kriterijev smo s pomočjo računalniških ukazov in programov iz digitalne baze sestavili seznam najbolj izstopajočih, sumljivih izmerkov. Te smo ročno preverili s pomočjo dnevniških zapisov, trakov s časovnim potekom temperature (termogram), meritvami samodejnih meteoroloških postaj in z izmerki sosednjih in podnebno sorodnih postaj. Pri temperaturi zraka smo v kontrolo zajeli 88 postaj s skupno 5,5 milijona izmerkov. Ročno smo preverili okoli 50.000 sumljivih izmerkov in jih več kakor 20.000 popravili ter skoraj 600 izbrisali iz podatkovne baze. Pri dnevni višini padavin je bil poudarek na prostorski primerjavi in pri višini snega na medsebojni skladnosti meritev novega in skupnega snega ter višine padavin. Pri višini padavin smo zajeli 442 postaj, izmed pet milijonov vrednosti smo pregledali 20 tisoč sumljivih vrednosti. Četrtno sumljivih vrednosti smo popravili. Pri višini snega smo popravili skoraj 6000 vrednosti za novi in nekaj manj za skupni sneg. Meritve dnevnega trajanja sončnega obsevanja smo primerjali z oblačnostjo in meritvami globalnega obseva. Poleg tega smo preverili še skladnost urnih in dnevnih vrednosti ter zaporedja enakih dnevnih vrednosti. Nabor meritev trajanja, najdenih sumljivih in popravljenih vrednosti je bil približno en velikostni red manjši kakor pri prej omenjenih spremenljivkah. Število najdenih napak je imelo pri vseh spremenljivkah neenakomeren časovni potek, deloma zaradi splošne kakovosti meritev in učinkovitosti operativne kontrole ter deloma zaradi spreminjajočega števila postaj (slika 3).



Slika 3: Časovni potek letnega števila podatkov o dnevni višini padavin (črta) in odkritih napak (stolpci) v kontroli višine padavine

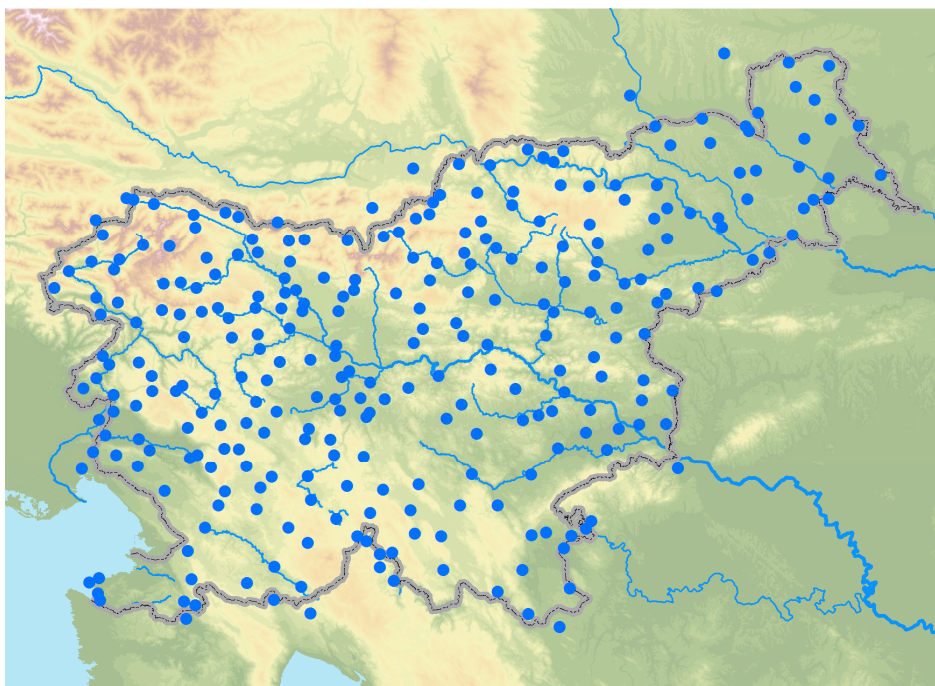
Popravki temperaturnih in padavinskih izmerkov so odsevali zgradbo merilnih inštrumentov in način zapisa izmerjenih vrednosti. Pri temperaturi je bilo največ odkritih napak velikosti 5 °C. To sovпада z razdelitvijo merilne skale na večje odseke dolžine 5 °C,

torej so opazovalci pogosto zamenjali sosednje odseke. Pri višini padavin je bila pogosta napaka manjkajoča vodilna številka ali napačno postavljena decimalna vejica (slika 4).



Slika 4: Razsewni grafikon originalnih in popravljenih vrednosti dnevne višine padavin. Prikazane so le vrednosti do 60 mm.

Po končani kontroli smo na podlagi števila najdenih napak, metapodatkov in medsebojne primerjave spremeljivk preverili kakovost posameznih časovnih nizov. Najslabše nize ali dele nizov smo izločili iz nadaljnje obdelave. Pri temperaturi zraka smo zaradi verjetno pomembnega vpliva spremembe okolice izločili postaje Ljubljana, Maribor, Velenje in Nova vas na Blokah. Podatke nekaterih sosednjih postaj smo zaradi zelo podobnih podnebnih razmer združili v enoten niz. Pri povprečni in najvišji temperaturi zraka smo tako razpolagali z 49 postajami, pri najnižji temperaturi s 36, pri višini padavin z 266 (slika 5), pri višini skupnega snega z 268, pri višini novega snega z 206 in pri trajanju sončnega obsevanja z 28 postajami. Dnevne podatke smo združili v mesečne in pripravili datoteke za homogenizacijo časovnih nizov.



Slika 5: Karta slovenskih padavinskih postaj, zajetih v homogenizaciji

Metapodatki

Meteorološke meritve in opazovanja ne potekajo kontrolirano v laboratoriju, zato na izmerjeno ali opazovano vrednost posamezne meteorološke spremenljivke, poleg trenutnega vremena, pomembno vplivajo tudi okolica merilnega prostora, način meritve, opazovalec, instrument itn. Zaradi tega za pravilno uporabo in interpretacijo meteoroloških podatkov v klimatoloških analizah potrebujemo tudi podatke, ki povedo, kje, kdaj, na kakšen način in s čim je bil nek meteorološki podatek pridobljen – to so metapodatki.

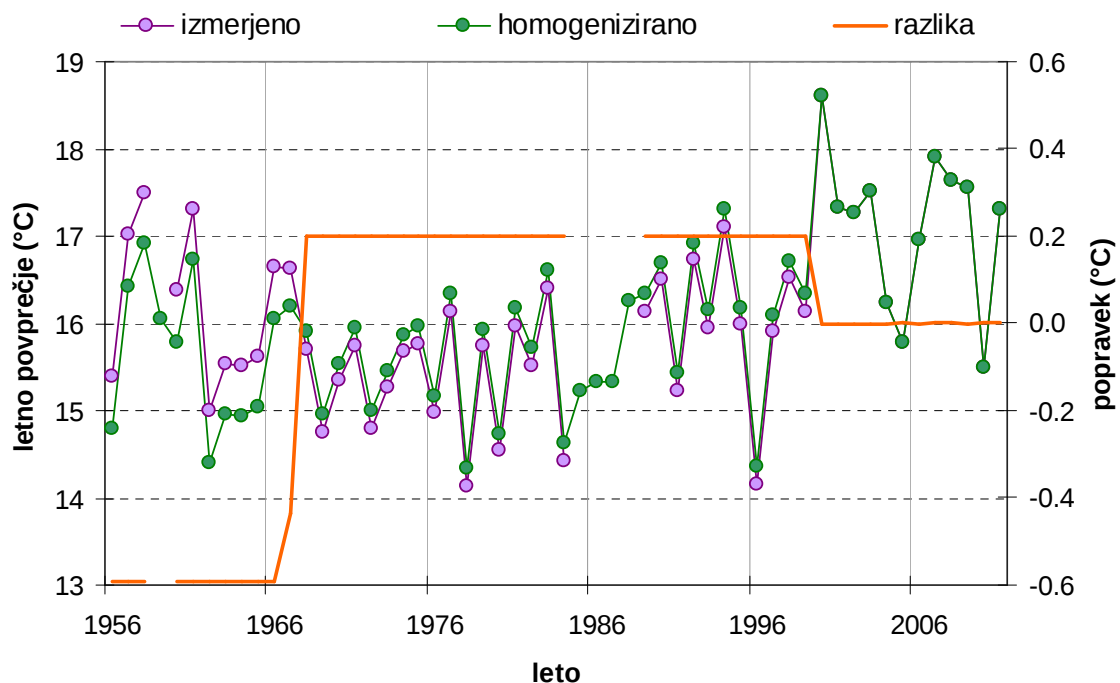
Metapodatki v klimatologiji so podatki o:

- lokaciji meteorološke postaje (koordinate in nadmorska višina postaje, opis lokacije opazovalnega prostora, skice, fotografije, načrti, ortofotografije in zemljevidi meteorološke postaje, datume selitve – spremembe opazovalnega prostora, morebitne opombe vezane na lokacijo meteorološke postaje);
- meteoroloških opazovalcev (ime in priimek ter naslov opazovalca, datum menjave opazovalcev, datum usposabljanja opazovalca, morebitne opombe glede merjenja ali opazovanja);
- meteoroloških merjenjih in opazovanjih ter instrumentih (način merjenja ali opazovanja meteorološkega parametra, termini opazovanj, vrsta in tip instrumenta, datum umerjanja ali menjave instrumenta ...)

Velika večina metapodatkov je bila do nedavnega zgolj v papirnatem arhivu, zato smo se z začetkom projekta Podnebna spremenljivost v Sloveniji lotili sistematičnega popisa vseh virov metapodatkov in njihove digitalizacije. Za izbrane meteorološke postaje smo zbrali čimbolj podroben nabor metapodatkov za obdobje meritev 1948–2012. Oblikovali smo preprosto digitalno bazo metapodatkov.

Homogenizacija časovnih nizov

Pred nekaj desetletji so se klimatologi pri analizi meritev večinoma osredotočali na kontrolo posameznih izmerkov in prikaz podnebnih podatkov za končne uporabnike. V zadnjih 20 letih je vse večjo vlogo pri obdelavi meteoroloških meritev v klimatologiji dobila homogenizacija. Daljši časovni nizi meritev pogosto ne odražajo zgolj podnebne spremenljivosti, temveč tudi umetne vplive na meritve. Mednje sodijo menjava merilnega mesta, opazovalca, merilne naprave in načina meritev ter spreminjanje okolice merilnega mesta. Za spremljanje podnebnih sprememb je nujno, da iz časovnih nizov v čim večji meri odstranimo neželene umetne vplive – homogeniziramo časovne nize (slika 6). Popravljeni, homogenizirani časovni nizi, bolje odražajo podnebno spremenljivost in vodijo h kakovostnejšim analizam podnebnih sprememb. S homogenizacijo običajno odpravimo večje skoke oziroma prelome. Vse vrednosti določenega obdobja popravimo za enako vrednost glede na mesec, letni čas ali za celotno leto. Odpravljanje časovno odvisnih nehomogenosti (trendov), ki so pogosto posledica postopne spremembe okolice merilnega mesta, je težavnejše.



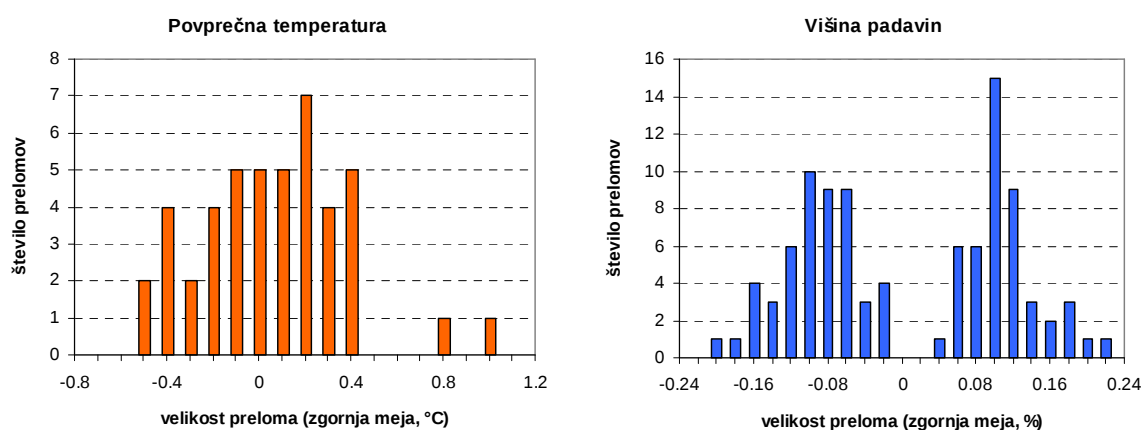
Slika 6: Primer homogenizacije niza letnega povprečja dnevne najvišje temperature zraka (Dobličje pri Črnomlju, 1956–2011)

Z razvojem metod homogenizacije se je močno povečalo njihovo število in pestrost, a vedenje o njihovi učinkovitosti je bilo sprva precej pomanjkljivo. Šele v zadnjih letih so primerjalne analize razkrile uspešnost metod na časovnih nizih z lastnostmi izmerjenih podatkov (Venema in sod., 2012; Williams in sod., 2012). Na podlagi rezultatov evropskega projekta COST HOME so bile podane smernice in izdelano programsko orodje za homogenizacijo mesečnih podatkov.

Programsko orodje HOMER združuje lastnosti nekaterih najboljših metod homogenizacije podnebnih nizov ter avtomatski in ročni pristop k homogenizaciji (Mestre in sod., 2013). Z ročnim pregledom statističnih rezultatov se strokovnjak na podlagi metapodatkov odloči za sprejetje ali zavrnitev predlaganih popravkov. V projektu PSS smo

HOMER uporabili pri homogenizaciji temperature zraka, višine padavin, povprečne višine skupne snežne odeje, vsote dnevnih višin novega snega in trajanja sončnega obsevanja, preračunanega na matematično obzorje. Pri povprečni temperaturi zraka smo poleg slovenskih homogenizirali tudi časovne nize 11 obmejnih postaj iz Hrvaške in Avstrije in pri višini padavin nize 22 obmejnih postaj iz Hrvaške, Avstrije in Italije.

Učinek homogenizacije časovnih nizov lahko ovrednotimo na več načinov. Eden od teh je statistika odkritih prelomov (Reeves in sod., 2007; Domonkos, 2013). Zaradi različnih lastnosti meteoroloških spremenljivk in kakovosti meritev je bila pogostost odkritih skokov precej odvisna od spremenljivke. Pri temperaturi smo povprečno odkrili en prelom na časovni niz, pri višini padavin en prelom na dva niza, pri višini snega en prelom na pet nizov in pri trajanju sončnega obsevanja dva do tri prelome na štiri nize. Pri povprečni temperaturi je bila velika večina prelomov na letni ravni manjša od 0,5 °C in pri višini padavin okoli 10 % povprečne letne vrednosti (slika 7).



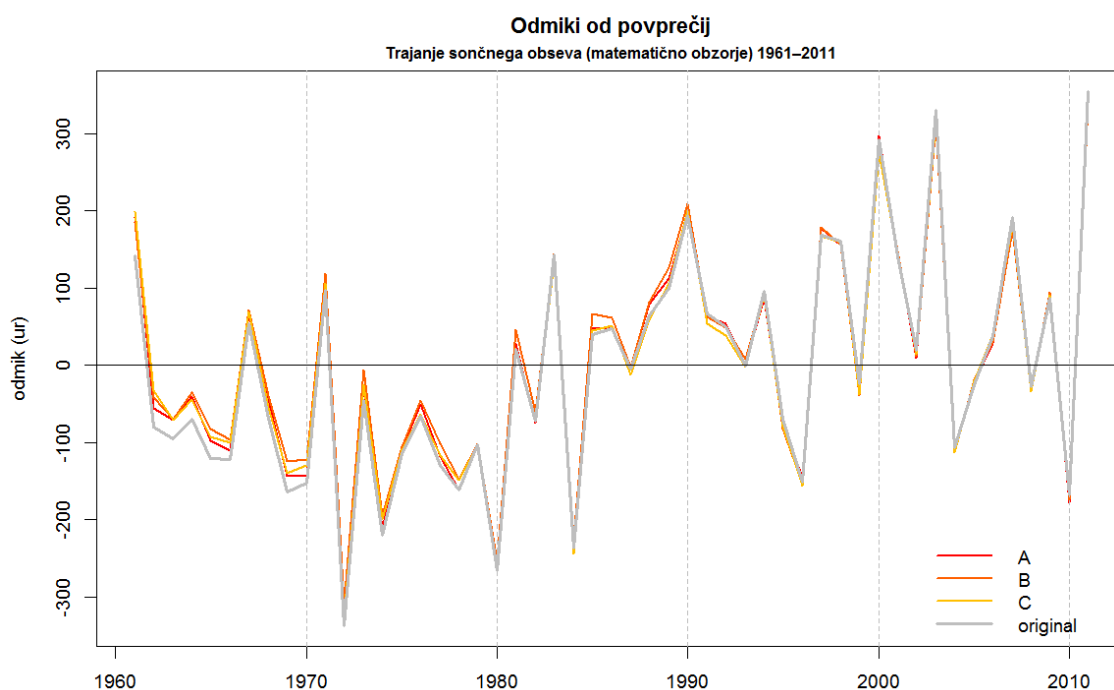
Slika 7: Porazdelitev izračunane velikosti prelomov enega od strokovnjakov na letni ravni za povprečno temperaturo (levo) in višino padavin (desno). Upoštevano je obdobje 1961–2011 in slovenske postaje.

Doslej smo podrobneje analizirali le homogenizirane časovne nize temperature zraka (Vertačnik in sod., 2013). Ugotovili smo dvig povprečne temperature zraka v Sloveniji v obdobju 1961–2011, ki po linearni regresiji znaša okoli 1,7 °C. Na podobno stopnjo ogrevanja kažejo tudi homogenizirani podatki o dnevni najvišji in najnižji temperaturi zraka. Razen jeseni je bilo ogrevanje izrazito v vseh letnih časih in v splošnem močnejše na vzhodu države. Izrazitih sprememb v spremenljivosti mesečnih vrednosti iz leta v leto nismo opazili.

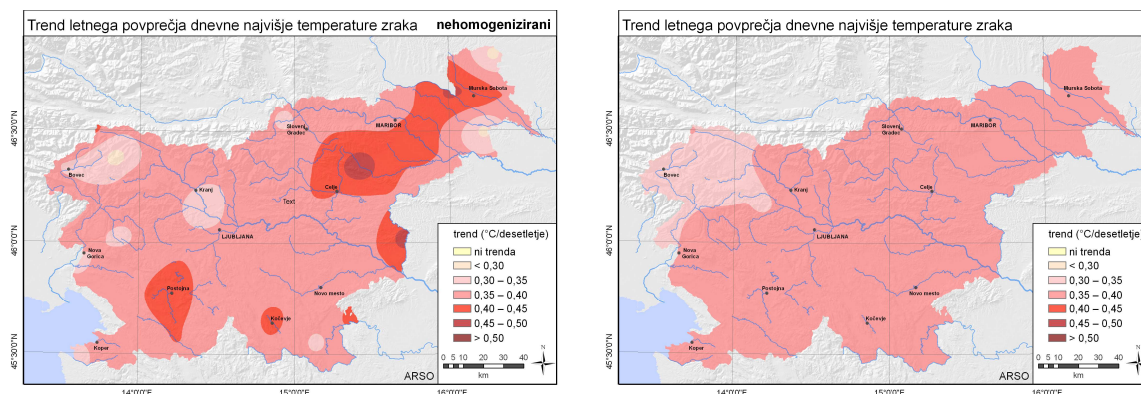
Homogenizirani časovni nizi višine padavin in snežne odeje večinoma ne kažejo enotnih in statistično značilnih trendov. Na državni ravni se je letna višina padavin v obravnavanem obdobju zmanjševala za okoli 30 mm oziroma 2 % na desetletje. Polovico tega upada lahko pripišemo pomladi (marec–maj). Zaradi velike medletne spremenljivosti je trend na letni ravni in spomladi le v manjšem delu Slovenije statistično značilen pri stopnji značilnosti 5 %. V ostalih letnih časih je izračunan trend skoraj brez izjeme statistično neznačilen in prostorsko neenoten, s pozitivnimi in negativnimi vrednostmi. Povprečna višina snežne odeje je v obdobju 1961–2011 upadala s trendom okoli 15 % na desetletje. Velikost trenda je precej različna med posameznimi postajami in le pri polovici postaj je trend statistično značilen pri stopnji zaupanja 5 %. Vsota novega snega je imela v obravnavnem obdobju prav tako negativen, a manjši trend (okoli 10 % na desetletje). Trajanje sončnega obsevanja v obravnavnem obdobju kaže statistično značilen trend

naraščanja približno 40 ur oziroma 2 % na desetletje. K temu so najbolj pripomogla pomladi in poletja. Prostorski vzorec trenda sončnega obsevanja je na letni in sezonski ravni dokaj enoten.

Zanesljivost homogeniziranih nizov smo preverili s primerjavo rezultatov različnih strokovnjakov in dopolnjenih (interpoliranih) vhodnih oziroma originalnih nizov. Nize povprečne temperature je homogeniziralo šest strokovnjakov, trije na večjem in trije na manjšem naboru postaj. Hkrati so bile nekoliko različne tudi programske nastavitve v HOMER-ju, predznanje in izkušnost strokovnjakov s homogenizacijo. Nize najvišje in najnižje temperature zraka so homogenizirali trije strokovnjaki. Podrobnosti skupinske homogenizacije temperaturnih nizov so navedene v Vertačnik in sod. (2013). Podobno smo postopali pri homogenizaciji ostalih spremenljivk, kjer so sodelovali trije strokovnjaki. Homogenizirani nizi se med strokovnjaki večinoma dobro ujemajo, popravki glede na originalne vrednosti bolj ali manj kažejo v isto smer (slika 8). Dodaten dokaz k zanesljivosti homogeniziranih nizov je, razen pri sončnem obsevanju, dobro ujemanje v velikosti trenda na državni ravni med homogeniziranimi in dopolnjenimi originalnimi nizi. Najbolj očiten rezultat homogenizacije je tako prostorsko usklajena slika podnebnih sprememb, saj smo uspeli iz posameznih nizov odstraniti največje neželene umetne vplive (slika 9). Najbolj pomemben rezultat celotnega postopka od ponovne kontrole podatkov do homogenizacije pa je zanesljivost izračunanih trendov. Brez da bi se spraševali, kolikšen del trenda je posledica umetnih vplivov in kolikšen del je v resnici posledica podnebne spremenljivosti, sedaj lahko zanesljivo trdimo, da se podnebje v Sloveniji ogreva.



Slika 8: Časovni potek odklona letnega trajanja sončnega obsevanja v Sloveniji v obdobju 1961–2011 glede na povprečje omenjenega obdobja. Prikazani so rezultati homogenizacije treh strokovnjakov (A, B, C) in originalne dopolnjene vrednosti

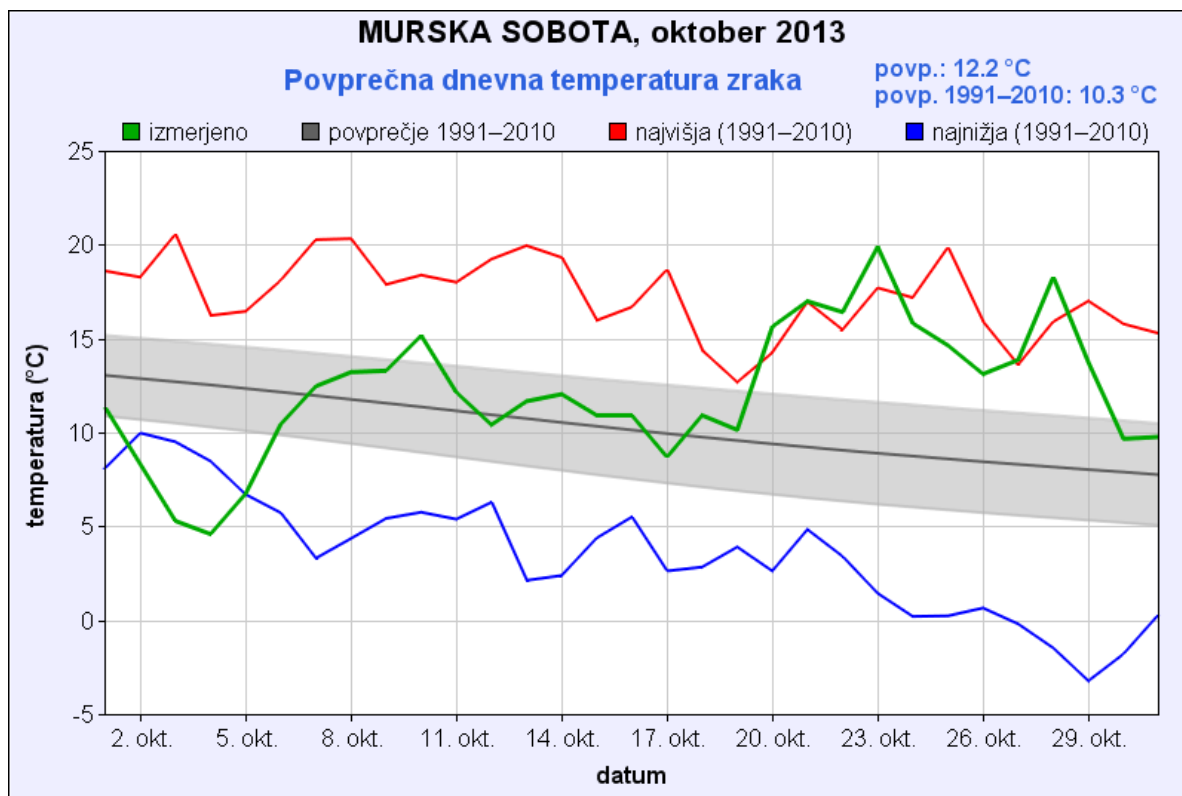


Slika 9: Karta trenda dnevne najvišje temperature temperature (°C/desetletje) za originalne dopolnjene podatke (levo) in homogenizirane podatke, povprečje rezultatov treh strokovnjakov (desno)

Klimatološki produkti

Običajno sami časovni nizi podnebnih podatkov niso neposredno koristni končnemu uporabniku ampak ta potrebuje izluščeno informacijo. Najbolj grobo lahko podnebne produkte razdelimo v dve skupini: splošne informacije in posebni produkti za posamezne uporabnike.

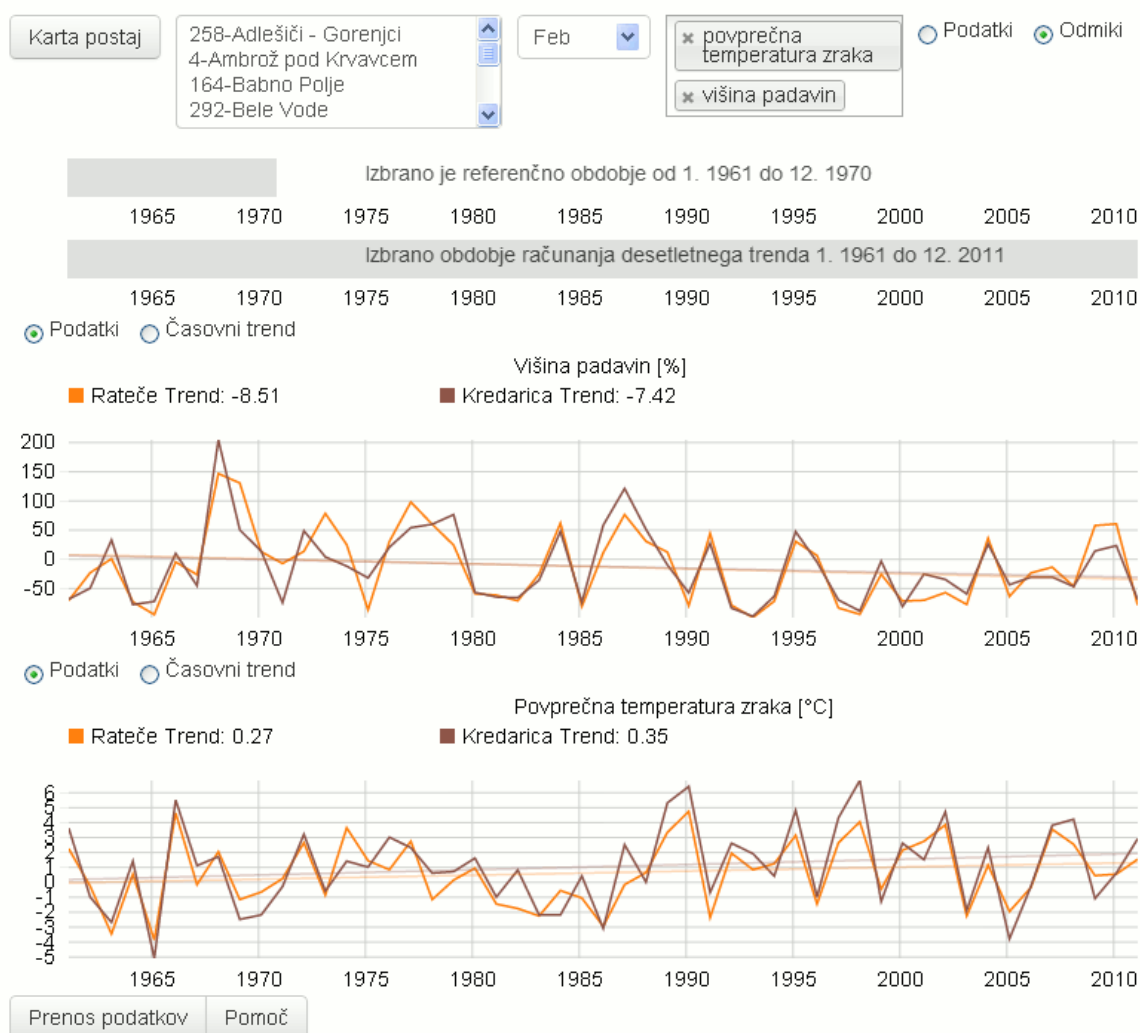
Splošne informacije so tiste, ki zanimajo vso javnost. Z njimi predstavljamo značilnosti slovenskega podnebja, značilnosti posameznih podnebnih spremenljivk in njihovo časovno ter prostorsko spremenljivost. Te informacije podajamo s tabelaričnimi pregledi, na grafikonih in na tematskih kartah. V preteklosti smo te informacije posredovali javnosti v tiskani obliki, v klimatografijah posameznih spremenljivk in v letopisih. Z razmahom uporabe spleta pa skušamo čim več podnebnih informacij posredovati javnosti preko tega medija. Preko spleta lahko javnosti posredujemo bistveno več produktov, hkrati pa nam ta medij omogoča, da informacije hitreje posodabljam. Tako zainteresirani uporabniki lahko sproti spremljajo, kaj se dogaja z našim podnebjem. Primer takšnega prikaza je na sliki 9, kjer uporabnik lahko primerja gibanje temperature zraka v določenem mesecu v primerjavi z dolgoletnim povprečjem.



Slika 10: Grafični prikaz gibanja dnevne povprečne temperature oktobra 2013 v Murski Soboti (zelena krivulja) v primerjavi s povprečjem referenčnega obdobja 1991–2010 (siva krivulja, sivo senčeno je območje med 25. in 75. percentilom). Prikazani sta tudi najvišja (rdeča krivulja) in najnižja (modra krivulja) dnevna temperatura v referenčnem obdobju za izbran dan v mesecu. (<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/>)

Splet uporabniku daje tudi več možnosti, da sam izbere, katere informacije želi pregledovati. V okviru projekta Podnebna spremenljivost Slovenije smo razvili spletno aplikacijo, ki uporabnikom omogoča pregled, primerjavo in izpis homogeniziranih časovnih nizov, pri tem pa lahko sami izberejo postajo, podnebno spremenljivko, obdobje prikaza in primerjalno obdobje (slika 11). Ta spletna aplikacija že delno meji na drugo skupino, specializirane klimatološke produkte.

Pregled klimatoloških nizov

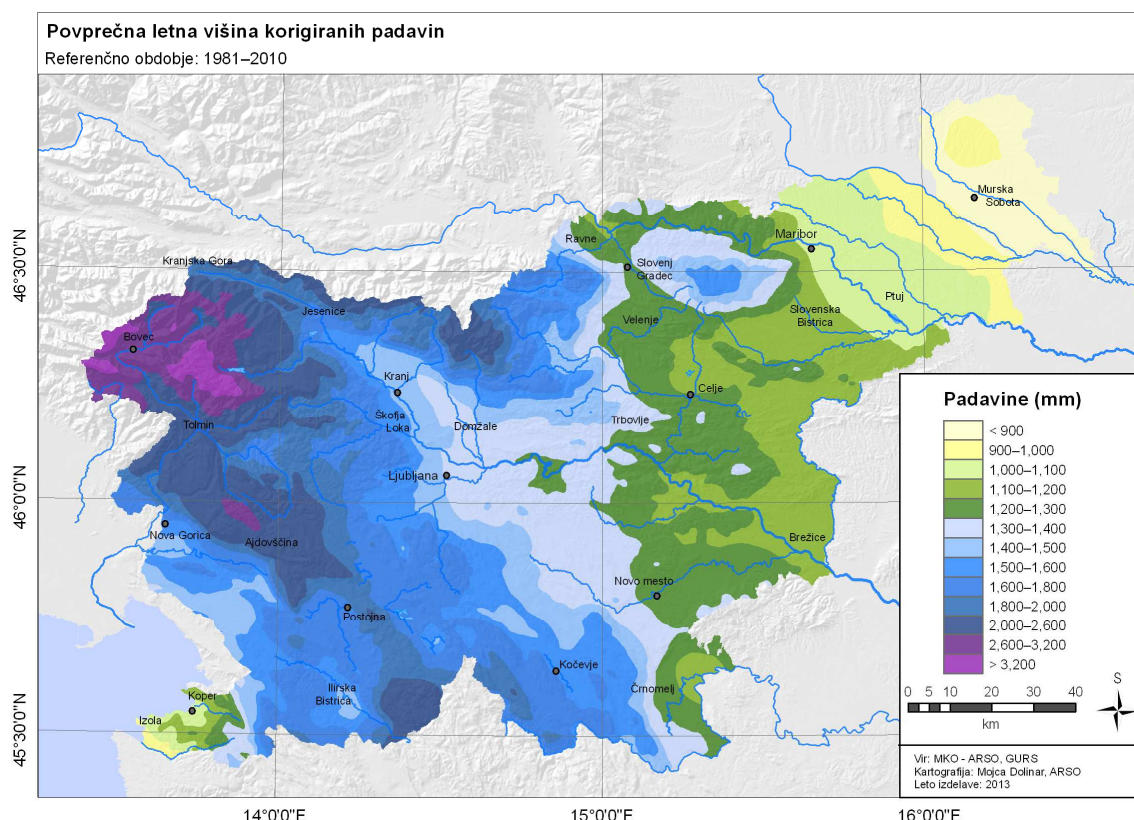


Slika 11: Primer prikaza homogeniziranih časovnih nizov na spletnem portalu meteo.si (<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/diagrams/time-series/>)

Zelo obsežni skupini uporabnikov splošne podnebne informacije niso dovolj. Želijo imeti bolj podrobne, predvsem pa njihovim zahtevam prirejene in ustrezno oblikovane informacije. Pri pripravi teh informacij moramo zato upoštevati specifične zahteve uporabnika. Dejstvo je, da z ustrezno uporabljen podnebno informacijo lahko prihranimo mnogo sredstev, se obvarujemo pred gmotno škodo ali celo preprečimo človeške žrtve. Tega potenciala podnebnih informacij se zaveda vse več uporabnikov. Medtem ko so bili v preteklosti glavni uporabniki klimatoloških produktov agronomi (načrtovanje setve in žetve ...) in gradbeniki (dimenzioniranje konstrukcij, drenažnih sistemov ...), se jim danes pridružujejo tudi ostale gospodarske in druge panoge (energetika, turizem, ekologija, zdravstvo, znanost ...).

Zahteve uporabnikov so tudi zaradi razvoja zmogljive računalniške opreme, ki omogoča procesiranje velike količine podatkov, v zadnjih 15 letih močno narasle. Kakovostni homogenizirani nizi podnebnih spremenljivk v točkah meritev ne zadostujejo več. Uporabniki želijo imeti informacijo tudi za območja brez meritev ali zvezno za celotno območje Slovenije v čim boljši časovni skali. Seveda je tudi tu zaželen časovna homogenost, v primeru, da gre za območje cele Slovenije, pa tudi prostorska homogenost

podatkov. S pomočjo rezultatov projekta PSS smo zato pripravili bazo mesečnih povprečij dnevne, dnevne najvišje in dnevne najnižje temperature ter mesečne vsote padavin v pravilni mreži z ločljivostjo 1 km za obdobje od leta 1961 pa do danes. Časovno in prostorsko homogenost smo zagotovili z uporabo enotne metode prostorske interpolacije in enakega nabora homogeniziranih točkovnih nizov skozi celotno obdobje. Za zagotovitev dobre prostorske ločljivosti pa smo za prvi približek interpolacije uporabili vse meritve, tudi tiste, ki niso bile homogenizirane. Na enak način bomo pripravili bazo mesečnih vrednosti tudi za ostale spremenljivke: vsoto potencialne evapotranspiracije, skupno višino novozapadlega snega, trajanje snežne odeje in trajanje sončnega obsevanja. Na osnovi mesečnih vrednosti pa pripravljamo tudi izvedene dolgoletne vrednosti spremenljivk (desetletna ali tridesetletna povprečja in odstopanja od dolgoletnega povprečja) v pravilni mreži ter tematske podnebne karte (slika 12).



Slika 12: Podnebna tematska karta, ki prikazuje tridesetletno povprečje korigiranih padavin v obdobju 1981–2010. Karta je izračunana iz mesečnih vsot padavin v pravilni mreži 1 km.

Zaključki

Potencial klimatoloških produktov je izjemno velik in z vedno večjim zavedanjem pretečih podnebnih sprememb raste tudi zavedanje uporabnikov o vrednostnem potencialu ustrezno uporabljenih podnebnih informacij. Tu gre predvsem za prilagajanje dejavnosti posameznih sektorjev lokalnim podnebnim pogojem, ki pa je mnogokrat povezano z večjimi stroški in drugimi vlaganji. Zato je še kako pomembno, da je podnebna informacija točna, predvsem pa zanesljiva. Kot smo pokazali v članku, je pot od meritve do zanesljive informacije o podnebjju zelo dolga. Terja veliko znanja, časa pa tudi vztrajnosti. Na ARSO

smo s projektom Podnebna spremenljivost Slovenije naredili velik korak k večji kakovosti podnebnih informacij. Ne le, da smo na podlagi kakovostnih homogeniziranih nizov posameznih spremenljivk ocenili njihovo spremenljivost in trende, temveč smo hkrati ugotovili, da je signal ogrevanja precej večji od ostalih umetnih vplivov na meritve. Torej lahko z gotovostjo trdimo, da se tudi v Sloveniji podnebje ogreva in posledično spreminja. To pa seveda nosi posledice za vse gospodarske sektorje, ki se bodo spremenjenim podnebnim razmeram morali prilagajati. Za prilagajanje uporabniki potrebujejo nov klimatološki produkt – scenarije prihodnjega podnebja. Priprava teh je samo naslednji korak v zgoraj opisanem nizu procesov. Za zanesljive scenarije lokalnega podnebja namreč potrebujemo zelo dobro poznavanje vseh značilnosti podnebja, ki pa jih lahko ocenimo le s kvalitetnimi nizi homogeniziranih podatkov.

Literatura

- Domonkos, P. (2013). Measuring performances of homogenization methods, *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 117, 91–112.
- Drnovšek, M. (2003). Fran Vilijem Lipič: Topografija c.-kr. deželnega glavnega mesta Ljubljane z vidika naravoslovja in medicine, zdravstvene ureditve in biostatike (ur. Zvonka Zupanič Slavec). Ljubljana: Znanstveno društvo za zgodovino zdravstvene kulture Slovenije, 2003, 630 p.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the IPCC Fifth Assessment Report*.
- Kajfež-Bogataj, L. (2004). »Živeti s klimatskimi spremembami« in T. Cegnar, Eds., *Pol stoletja Slovenskega meteorološkega društva, Slovensko meteorološko društvo*, Ljubljana, 150–154.
- Kajfež-Bogataj, L., Pogačar, T., Ceglar, A., Črepinšek, Z. (2010). Spremembe agro-klimatskih spremenljivk v Sloveniji v zadnjih desetletjih, *Acta agriculturae Slovenica*, 95 - 1, 97–109
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., Böhm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Dubuisson, B., Stepanek, P. (2013). HOMER : a homogenization software – methods and applications, *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 117, 47-67.
- Reeves, J., Chen, J., Wang, X.L., Lund, R., Lu, Q. (2007). A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46: 900–915
- Venema, V. K.C., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J. A., Domonkos, P., Vertacnik, G., Szentimrey, T., Stepanek, P., Zahradnick, P., Viarre, J., Müller-Westermeier, G., Lakatos, M., Williams, C. N., Menne, M. J., Lindau, R., Rasol, D., Rustemeier, E., Kolokythas, K., Marinova, T., Andresen, L., Acquafredda, F., Fratianni, S., Cheval, S., Klancar, M., Brunetti, M., Gruber, C., Prohom Duran, M., Likso, T., Esteban, P., Brandsma, T. (2012). Benchmarking homogenization algorithms for monthly data, *Climate of the Past* 8, 89-115.
- Vertačnik, G., Dolinar, M., Bertalančič, R., Klančar, M., Dvoršek, D., Nadbath, M. (2013). Podnebna spremenljivost Slovenije : glavne značilnosti gibanja temperature zraka v obdobju 1961–2011. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija RS za okolje, Ljubljana, 23 p.
- Williams, C. N., Menne, M. J., Thorne, P. W. (2012). Benchmarking the performance of pairwise homogenization of surface temperatures in the United States, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D5.
- WMO (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, WMO-No. 8, Geneva, 716 p.
- Zupančič, B. (2004). »Razvoj meteorološke mreže na Slovenskem« in T. Cegnar, Eds., *Pol stoletja Slovenskega meteorološkega društva, Slovensko meteorološko društvo*, Ljubljana, 55–62.

Lokalne spremembe zemeljskega magnetnega polja zaradi prehoda vremenske fronte

Rudi Čop¹, Damir Deželjin

Povzetek

Geomagnetni observatorij Sinji vrh je postavljen na Gori nad Ajdovščino, na visokogorski kraški planoti. Zaradi svoje lege deluje v izjemnih geoloških in meteoroloških pogojih. Že prve meritve na njem so pokazale, da na spremembo lokalnega geomagnetnega polja vplivajo tudi vremenske fronte. Prve take namenske meritve za določitev velikosti tega vpliva so bile narejene konec poletja 2011. V snežni nevihti 15. januarja 2013 so bile opravljene prve take meritve v zimskem času. V članku je predstavljen vpliv te snežne nevihte na lokalno zemeljsko magnetno polje.

Ključne besede: geomagnetno polje, snežna nevihta

Key words: geomagnetic field, snow storm

Geomagnetni observatorij Sinji vrh

Gora nad Ajdovščino je visokogorska kraška planota. Na njenem robu, obrnjenem proti jugozahodu, je postavljen Geomagnetni observatorij Sinji vrh [Paliska et al, 2010; Čop, 2011 a]. Nad Ajdovščino, ki leži ob vznožju Gore na nadmorski višini 106 m, se v zračni razdalji 2,8 km v smeri proti severovzhodu dvigne rob Gore na nadmorsko višino 867 m, kjer je postavljen merilni steber observatorija (45.8990939N, 13.9400468E). Observatorij je zaradi svoje lege in pogojev naravovarstvenikov posebne gradnje in tudi deluje v izjemnih geoloških in meteoroloških pogojih [Čop & Deželjin, 2012]. Že prve meritve na njem so pokazale, da na spremembo lokalnega geomagnetnega polja vplivajo tudi atmosferske razelektritve, prehodi vremenskih front in kraško podzemlje.

Prve namenske meritve vpliva prehoda vremenske fronte na lokalno geomagnetno polje so bile opravljene 4. septembra 2011. Po daljšem sušnem obdobju je na ta dan v popoldanskih urah tega dne prešla Goro vremenska fronta, ki je povzročila poletno nevihto. Nekaj ur prej je v skupini sončnih peg na Sonca nastal močnejši izbruh. S svojo radiacijo ionizirajočih žarkov je v naslednjih urah vplival na magnetno polje Zemlje. Samo iz meritev na observatoriju je bilo zato nemogoče določiti vpliv prehoda vremenske fronte na lokalno geomagnetno polje.

Magnetno polje Zemlje

Magnetno polje Zemlje je funkcija prostora in časa. Sestavlja ga več magnetnih polj iz različnih izvorov [Maus et al, 2010]. Ta se med seboj vektorsko seštevajo (superponirajo) in preko električne indukcije med seboj delujejo. Najpomembnejši izvori zemeljskega magnetnega polja so:

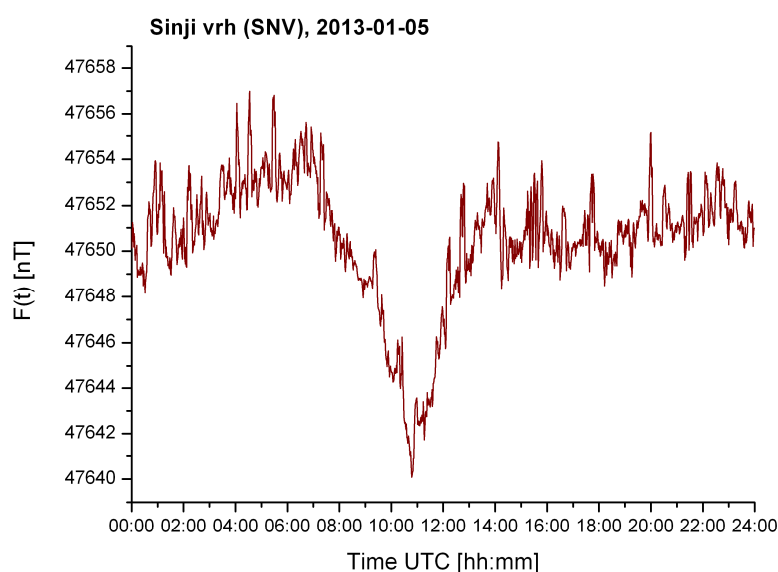
Glavno magnetno polje Zemlje za katerega se predpostavlja, da se ustvarja v njenem zunanjem tekočem jedru. Glavno magnetno polje predstavlja več kot 95% vsega

¹ Visokošolsko središče Sežana, Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, Kraška ulica 2, 6210 Sežana

magnetnega polja našega planeta. Procesi, ki potekajo v notranjosti Zemlje, imajo veliko vztrajnost in so zato njihove spremembe zelo počasne (sekularne spremembe). Na osnovi večletnega opazovanja so predvidljive za nekaj let v naprej.

Magnetno polje zemeljske skorje je manjše magnitude in izhaja iz lokalno namagnetnih kamenin. Zunanja skorja [Herlec & Jeršek, 2009], za katero so značilni tektonski premiki, je na kontinentih iz različnih magmatskih, sedimentnih in metamorfnih kamenin povprečne debeline od 35 do 40 km in na dnu oceanov predvsem iz bazalta debeline od 3 do 15 km. Njeno namagnetnost povzroča ali glavno magnetno polje ali magnetna remanenca ali pa istočasna kombinacija obeh vzrokov. Magnetno polje zemeljske skorje se s časom zelo malo spreminja, krajevno pa se menja na razdaljo od enega metra do nekaj tisoč kilometrov.

Motilno ali zunanje magnetno polje povzročajo predvsem električni toki v zgornjih plasteh atmosfere in magnetosfere. Je stalno prisotno in se stalno krajevno in časovno spreminja ter dodatno inducira električne toke v zemeljski skorji.



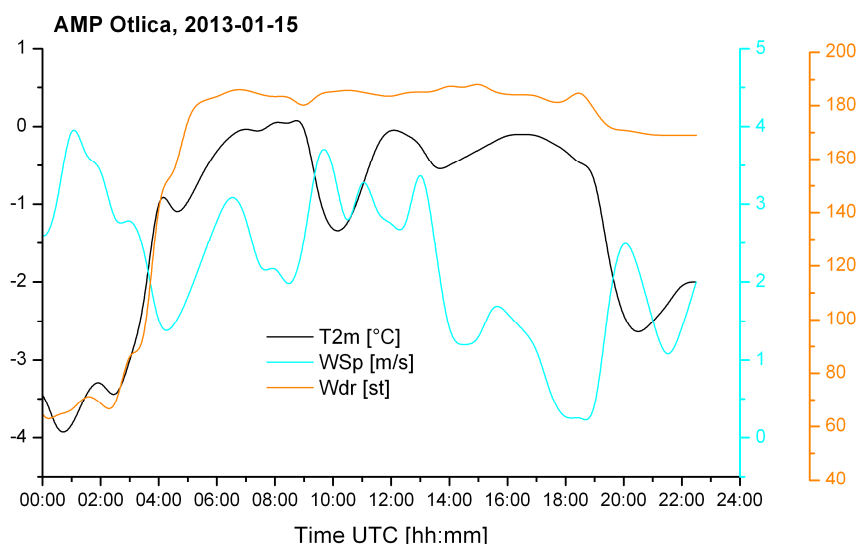
Slika 1 - Magnetogram dnevne spremembe absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja $F(t)$ na Sinjem vrhu v geomagnetno mirnem dnevu 5. 1.2013

Spremembe zemeljskega magnetnega polja zaradi motilnega polja so lahko periodične ali občasne. Tako ene kot druge so modulirane z vrtenjem Zemlje, njenim potovanjem okoli Sonca, vrtenjem Sonca in s sončnimi cikli. Trajajo lahko do 10 minut kot pulzi ali pa so daljšega trajanja kot variacije [Maus et al, 2010; Jankowsky & Sucksdorff, 1996].

Dnevne (diurnalne) spremembe zemeljskega magnetnega polja so periodične narave (slika 1). Nastajajo zaradi ionizacije ionosfere, ki jo povzroča ionizirajoče sevanje Sonca. Dnevno segrevanje in ohlajanje ter vrtenje Zemlje povzroča raztezanje in krčenje njene atmosfere. Aktivnost Sonca povzroča tudi spremembo jakosti in smeri vetrov v ionosferi. Vse to povzroča gibanje ioniziranih delcev v zemeljskem magnetnem polju. Na višini okoli 100 km tečejo negativni elektroni v eno smer, pozitivni ioni pa v drugo smer. Električni tok na teh višinah povzroča elektrone, ki so manjši od ionov in imajo zato manjšo možnost trka z zračnimi molekulami. Na srednjih zemljepisnih širinah v magnetno mirnih dneh dosega stalno motilno magnetno polje S_q (solar quiet-day variations), zaradi električnih tokov v ionosferi, od 10 do 30 nT. V višjih plasteh ionosfere, kjer je gostota zraka manjša in zato tudi možnost trka za ione manjša, se obe gibanji naelektrenih delcev

izenačuje in zato tam električni tok ne obstaja. Da električni tok ne teče tudi v nižjih plasteh atmosfere pa je razlog v preveliki gostoti zraka. Glede na letni čas se spreminja prevodnost ionosfere, smeri vetrov v njej ter obseg njenega širjenja in krčenja, kar povzroča sezonsko spremembo Sq. Na ionosfero vpliva tudi Luna, ki ne povzroča le valovanje v zgornjih plasteh atmosfere in v oceanih, temveč tudi spremembe v prevodnih plasteh Zemlje. Električni toki v ionosferi, ki nastajajo zaradi gravitacije Lune (lunar quiet-day inosferic current), povzročajo motilno magnetno polje, ki ne presega 10% vrednosti stalnega motilnega magnetnega polje Sq [Chapman, 1940].

Manjše prehodne spremembe v zgornjih plasteh atmosfere in s tem tudi motilno magnetno polje nastaja zaradi sončnih mrkov, ki povzročajo kratkotrajno ohlajanje atmosfere, in zaradi izbruhov na Soncu, ki povečujejo ionizirajoče sevanja elektromagnetnih valov iz nam najbližje zvezde [Cambell, 1989]. Občasne spremembe v ionosferi povzročajo tudi prehodna valovanja zaradi izbruhov vulkanov, eksplozij atomskih bomb v atmosferi ali nenadna ogrevanja zaradi električnih tokov v ionosferi, ki sicer povzročajo tudi polarne sije.



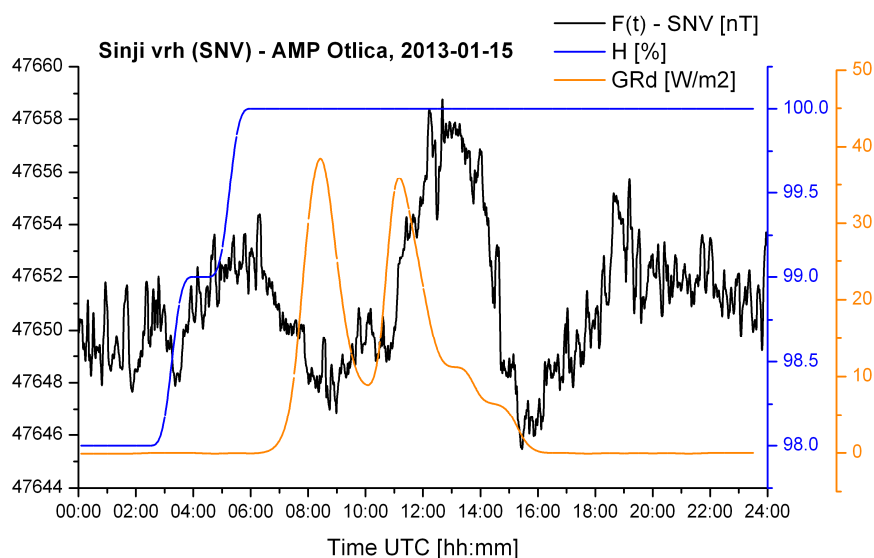
Slika 2 - Sprememba temperature (T2m), hitrosti vetra (WSp) in njegove smeri (Wdr) izmerjene na AMP Otlica v snežni nevihti 15.1.2013

Občasne spremembe zemeljskega magnetnega polja večjih amplitud nastajajo zaradi magnetnih neviht (magnetic storms), ki jih povzroča sončni veter velikih hitrosti [Jankowsky & Sucksdorff, 1996; Handbook of Geophysics, 1985]. Magnetne nevihte spremlja polarni sij, ki se ob močnejših magnetnih nevihtah vidi tudi na nižjih geografskih širinah.

Snežna nevihta na Gori

Meteorološke meritve se za območje Gore opravljajo na avtomatski meteorološki postaji AMP Otlica (45.9380556N, 13.9161111E). Je ekološka vremenoslovna postaja, ki omogoča spremljanje okoljskih sprememb na Gori. Postavljena je na južnem pobočju hriba Sibirija nad vasjo Otlica na nadmorski višini 965 m. Od observatorija je oddaljena 4,8 km v smeri severozahod.

Večmesečno obdobje izjemnih snežnih padavin, ki so zaznamovale zimo 2012/2013, se je začelo z nevihto na Gori v torek 15. januarja 2013. V noči iz 14. na 15. januar 2013 je sprememba smeri vetra iz severovzhodne v južno smer napovedala prihod vremenske fronte (slika 2). Okoli 03,00 ure se je s spremembo smeri vetra istočasno otoplilo in uro kasneje že začelo snežiti. Prvi val snežnega meteža je pojenjal po štirih urah, ko je postalo tudi malo svetleje (slika 3). Po vmesni umiritvi je Goro ob 10,20 uri dosegel drugi val, ko so se istočasno začele tudi atmosferske razelektritve z eno samo registrirano strelo med oblakom in zemljo [Poročilo, 2013]. Drugi val snežne nevihte je Goro prešel ob 13,30 uri. Takrat je hitrost vetra padla iz predhodne povprečne $2,77 \text{ ms}^{-1}$ na $1,29 \text{ ms}^{-1}$ v preostalem delu dneva (slika 2).



Slika 3 - Lokalna sprememba zemeljskega magnetnega polja na Sinjem vrhu 15. januarja 2013 ter sprememba vlage (H) in sevalnosti Sonca (GRd) istega dne izmerjene na AMP Otlica

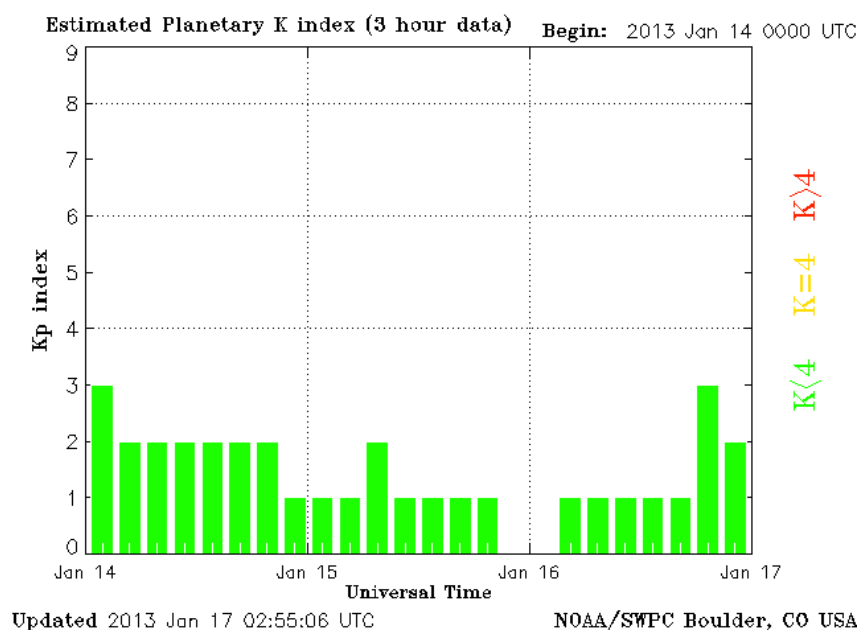
Lokalne spremembe zemeljskega magnetnega polja

V torek 15. januar 2013 je bil na našem planetu geomagnetno miren dan. To dokazuje diagram ocenjenega planetarnega geomagnetnega indeksa K_p za ta dan [Estimated Planetary K Index, 2013], ki je svojo največjo vrednost $K_p = 2$ dosegel v triurnem obdobju od 06:00 do 09:00 UTC (slika 4). Ostali del tega dneva je bil $K_p = 1$ ali celo manjši. Tudi 5.1.2013 je bil geomagnetno miren dan (slika 1), ko je v polovico vseh njegovih triurnih obdobj dosegel planetarni geomagnetni indeks vrednost $K_p = 1$, v ostalih pa $K_p = 0$.

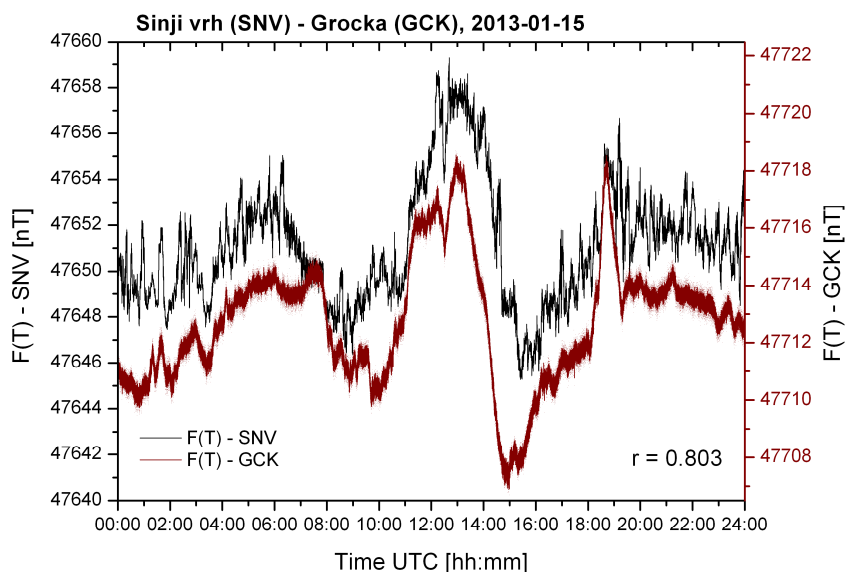
Tabela 2 - Primerjava statističnih vrednosti in korelacija merilnih podatkov iz Sinjega vrha (SNV) in Grocke (GCK, Srbija) za 15. januar 2013

Geomagnetni observatorij	Srednja vrednost μ [nT]	Standardna deviacija σ [nT]	Koeficient variacije CV [%]	Korelacijski Koeficient r
Sinji vrh (SNV)	47651,12	2,62	0,0055	1,00000
Grocka (GCK)	47712,76	2,19	0,0046	0,803

Na magnetogramu spremembe absolutne vrednosti zemeljskega magnetnega polja 15. januarja 2013 (slika 5) iz Sinjega vrha je opazna značilna sprememba zemeljskega magnetnega polja, ki se začne po 3,00 uri s periodo ~ 6 ur. Tej spremembi takoj sledi naslednja z isto periodo vendar s približno dvakrat večjo amplitudo. Glede na vrednosti planetarnega geomagnetnega indeksa tega dne, so te spremembe geomagnetnega polja na Sinjem vrhu lokalnega značaja.



Slika 4 - Ocenjeni planetarni geomagnetni indeks Kp centra SWPC, Boulder (ZDA), za tridnevno obdobje od 14. do 16. januarja 2013 [Estimated Planetary K Index, 2013]



Slika 5 - Spremembe absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja $F(t)$ na Sinjem vrh in v Grocki (Srbija) 15. januarja 2013

Primerjava vzporednih meritev spremembe zemeljskega magnetnega polja na geomagnetnem observatoriju Grocka 15. januarja 2013 (slika 5) kaže na precejšnjo podobnost magnetogramov. Lokalna geomagnetna motnja je torej bila prisotna na širšem geografskem področju, ki je zajemal tudi velik del Balkana. Na Sinjem vrhu se je začela z dvigom relativne vlažnosti na 100 % pri zunanji temperaturi zraka -3 °C in se je spreminjala s stopnjo radiacije Sonca (slika 3).

Koeficient korelacije vzporednih meritev 15. januarja 2013 (slika 5) je $r = 0,803$, ki je le malo pod srednjo vrednostjo tega koeficienta $r = 0.854$ za oba geomagnetna observatorija [Čop et al, 2011 b]. To dokazuje, da je bil vpliv prehoda vremenske fronte na zemeljsko magnetno polje na obeh lokacijah le v podrobnostih različen.

Zaključki

Šele sistematično spremljanje prehodov vremenskih front v obdobju nekaj let in v različnih letnih časih bi omogočilo popolno razumevanje njihovega vpliva na lokalno geomagnetno polje. Primerjava vzporednih meritev na sosednjih geomagnetnih observatorijih pa bi podala geografsko obsežnost vpliva posamezne vremenske fronte. Iz meritev pa bi se morali izločiti vsi ostali vplivi, predvsem vplivi iz vesolja.

Za določitev vpliva prehoda nevihtnih front na biosfero bi bilo potrebno proučiti razmere tudi dva dni pred in dva dni po njihovem prehodu. Vzporedne meritve parametrov zdravstvenega stanja ljudi bi pokazale vpliv tako prehoda nevihtnih front kot tudi spremembe zemeljskega magnetnega polja [Deželjin & Čop, 2013]. S proučevanjem elektromagnetnih impulzov zelo nizkih frekvenc pa bi se lahko še dodatno določil vpliv Schumannovih resonančnih frekvenc na naše zdravje in počutje [Cherry, 2001].

Zahvala

Avtorja se zahvaljujeta vsem ustanovam, ki so jima posredovale podatke uporabljene v tem članku:

- Agencija Republike Slovenije za okolje ARSO, Urad za meteorologijo, za merilne podatke avtomatske vremenoslovne postaje AMP Otlica;
- Elektointitut Milan Vidamar EiMV, Ljubljana, za poročilo o udaru strele;
- GMO Grocka, Srbija, za merilne podatke o spremembi geomagnetnega polja.

Literatura

- Cambell, H. W. (1989). "The Regular Geomagnetic-Field Variations During Quiet Solar Conditions" in J. A. Jacobs, Geomagnetism - Volume3. Academic, San Diego.
- Chapman, S. Bartels, J. (1940). Geomagnetism. Oxford University, London.
- Cherry, N. (2001). Schumann Resonances, a plausible biophysical mechanism for the human health effects of Solar/Geomagnetic Activity. Lincoln University, Canterbury (New Zealand).
- Čop, R. (2011 a). Gradnje geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino. Zbornik predavanj "Raziskave s področja geodezije in geofizike 2010". Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, p.59-64.
- Čop, R. Deželjin, D. (2012). Transmission of Measuring Data from the Sinji vrh Geomagnetic Observatory. Proceeding of the XVth IAGA Workshop on "Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing", San Fernando; Catiz (Spain), p.160-164.

- Čop, R. et al. (2011 b). Preliminary Measurements of Geomagnetic-field Variations in Slovenia, *Elektrotehniški vestnik*, vol.78, no.3, p.96-101.
- Deželjin, D. Čop, R. (2013). IT System for Alarming of Possible Health Risks Caused by Geomagnetic Storms. *Global Telemedicine and eHealth Updates: Knowledge Resorces*, vol. 6, p.512-515.
- Estimated Planetary K index (3 hour data); Begin: 2013 Jan 14 0000 UTC. Boulder (CO, US): NOAA; Space Weather Prediction Center; SWPC Anonymous FTP Server; Historical SWP Products from 1996. http://www.swpc.noaa.gov/ftplib/warehouse/2013/2013_plots/kp/20130116_kp.gif (16-09-2013).
- Handbook of geophysics and the space environment. (1985). Scientific editor Adolph S. Jursa. Air Force Geophysics Laboratory, Springfield (US).
- Herlec, U. Jeršek, M. (2009). "Nastanek in značilnosti planeta Zemlje" v *Evolucija Zemlje in geološke značilnosti Slovenije*. Urednik Miha Jeršek. Prirodoslovni muzej Slovenije, Ljubljana, p.9-63.
- Jankowsky, J. Sucksdorff, C. (1996). Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Boulder (US).
- Maus, S, et al. (2010). US/UK World Magnetic Model for 2010-2015. NOAA National Geophysical, Boulder (US); British Geological Survey, Edinburgh (UK).
- Paliska, D. Čop, R. Fabjan, D. (2010). The Use of GIS-based Spatial Multi criteria Evaluation in the Selection Process for the New Slovenian Geomagnetic Observatory Site. *Annales Series Historia Naturalis*, vol. 20, no. 1, p.1-8.
- Poročilo o atmosferskih razelektritvah št. 30/1/1/2013. (2013). Rezultati poizvedbe v sistemu SCALAR za lokacijo Kovk 41(Y: 5418129 m; X: 5084715 m), Občina Ajdovščina, od 14.01.2013 00:00:00 do 16.01.2013 23:59:59. Elektro-inštitut Milan Vidmar (EiMV), Ljubljana.

Spletni portal akademskih nalog s prikazom položaja

Klemen Kozmus Trajkovski*, Marjan Čeh*, Matevž Domajnko*, Nejc Krašovec*

Povzetek

Portal GeoPoLo omogoča grafični prikaz zaključnih akademskih del s položajem obravnavane tematike. Poleg podatkov repozitorija fakultete vsebuje portal še prostorski podatek. Prikaz lokacije temelji na prostorskem portalu Geopedia. Uporabniški vmesnik je v slovenskem in angleškem jeziku. Portal omogoča iskanje del preko grafičnega vmesnika in iskalnih filtrov. Vnos podatkov in posodobitev podatkovne baze poteka preko spletnega obrazca in interaktivnega določanja položaja ter Excelove preglednice. Portal GeoPoLo je možno prilagoditi za različne prikaze, ne samo akademskih del, uporabniški vmesnik pa se lahko enostavno vgradi v spletne strani.

Ključne besede: spletni portal, akademska dela, položaj, repozitorij, podatkovna baza
Key words: web portal, academic thesis, position, repository, database

Uvod

Spletni prostorski portali, kot so Google Zemljevidi in Geopedia, omogočajo uporabnikom povsem prilagojen prikaz lastnih vsebin. Svetovno najbolj znano tovrstno orodje je Google Maps API (angl. API: application programming interface), podobne storitve za območje Slovenije pa omogoča Geopedia, ki domuje na spletnem naslovu <http://geopedia.si>.

Zmožnosti prostorskih portalov smo izkoristili za grafični prikaz zaključnih del študija geodezije na Fakulteti za gradbeništvo in geodezije Univerze v Ljubljani (UL FGG), ki vsebujejo podatek o položaju obravnavane tematike. Večina zaključnih del na dodiplomskem in podiplomskem študiju geodezije namreč obravnava določeno območje v državi. Lahko je to posamezen objekt, lahko je naselje, katastrska občina, občina, pokrajina ali podobno. Na digitalnem repozitoriju (<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>) UL FGG so objavljena vsa zaključna dela od leta 2006 naprej. Iskanje po repozitoriju poteka preko iskalnih filtrov, ni pa možno iskanje po položaju. Iskanje del za neko določeno območje zato lahko postane zelo zamudno. Rešitev predstavlja prostorski portal, kjer so akademske naloge prikazane grafično glede na položaj obravnavanega območja.

Geopolo

GeoPoLo je skovanka besed GEO, POrtal in LOkacija. Portal omogoča iskanje del na digitalnih podlagah (topografski podatki, ortofoto ali relief) ali preko iskalnih filtrov po naslovu, avtorju, mentorju, ključnih besedah ali strokovnem področju. Za vsak prikazani zadetek se pojavi možnost grafičnega približanja lokaciji, ki jo naloga obravnava, in bližnjica do zaključnega dela v PDF obliki na digitalnem repozitoriju UL FGG.

* Univerza v Ljubljani, FGG – Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

Baza podatkov

Osnovni vir podatkov za GeoPoLo je podatkovna baza repozitorija UL FGG. Ta za vsako zaključno delo poleg ostalih podatkov vsebuje naslednje t.i. metapodatke: naslov dela v slovenskem jeziku, naslov dela v angleškem jeziku, zaporedna številka naloge, ime avtorja, imena mentorjev in somentorjev, ključne besede v slovenskem jeziku, ključne besede v angleškem jeziku, ime študijskega programa in ime katedre. Samo delo je hranjeno v obliki PDF, priloženi pa so lahko dodatki v digitalni obliki (slike, video in zvočni zapisi).

Poleg podatkov iz repozitorija je v podatkovni bazi še prostorski podatek, t.j. položaj obravnavanega območja. Položaj določajo koordinate, in sicer so to koordinate v državnem koordinatnem sistemu D48/GK. Položaj je lahko določen z enim parom koordinat (y,x) ali z nizom parov koordinat, če naloga obravnava zaključeno območje ali več območij. V podatkovni bazi so samo dela, ki imajo prostorski podatek, kar pomeni, da so obravnavala konkretno območje v Sloveniji.

Od 520 akademskih del na Oddelku za geodezijo, ki so v repozitoriju UL FGG, smo lahko lokacijo na območju Slovenije opredelili 332 delom. V bazi GeoPoLa je z dnem 20. 10. 2013 278 predbolonjskih diplomskih del, 17 predbolonjskih magistrskih del, 23 bolonjskih diplomskih del, 0 bolonjskih magistrskih del in 14 doktorskih disertacij. Najstarejše delo ima datum zagovora 25.11.2005, najnovejše diplomske naloge so študenti zagovarjali septembra 2013.

V podatkovni bazi ima vsako delo tudi oznako strokovnega področja po klasifikaciji ARRS (Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije), kot so objavljena na spletnem naslovu <http://www.arrs.gov.si/sl/gradivo/sifranti/sif-vpp.asp>. Dela so kategorizirana glede na klasifikacijo ARRS, ki jo ima mentor kot raziskovalec.

Zaradi lažje manipulacije, organizacije, preglednosti in manjše količine podatkov je podatkovna baza sestavljena iz več relacijskih tabel. Glavna tabela vsebuje osnovne podatke dela. Ta tabela se združuje s tabelo mentorjev, ki trenutno vključuje slabih 15.000 raziskovalcev. ARRS klasifikacija posameznega raziskovalca se povezuje s tabelo, ki ima vključene vse primarne klasifikacije. Poleg omenjenih dveh tabel se glavna tabela navezuje tudi na tabelo s tipi akademskih del in na tabelo s članicami Univerze v Ljubljani. Podatkovna baza podatkov o akademskih delih je zapisana v bazi MySQL.

Uporabniški vmesnik

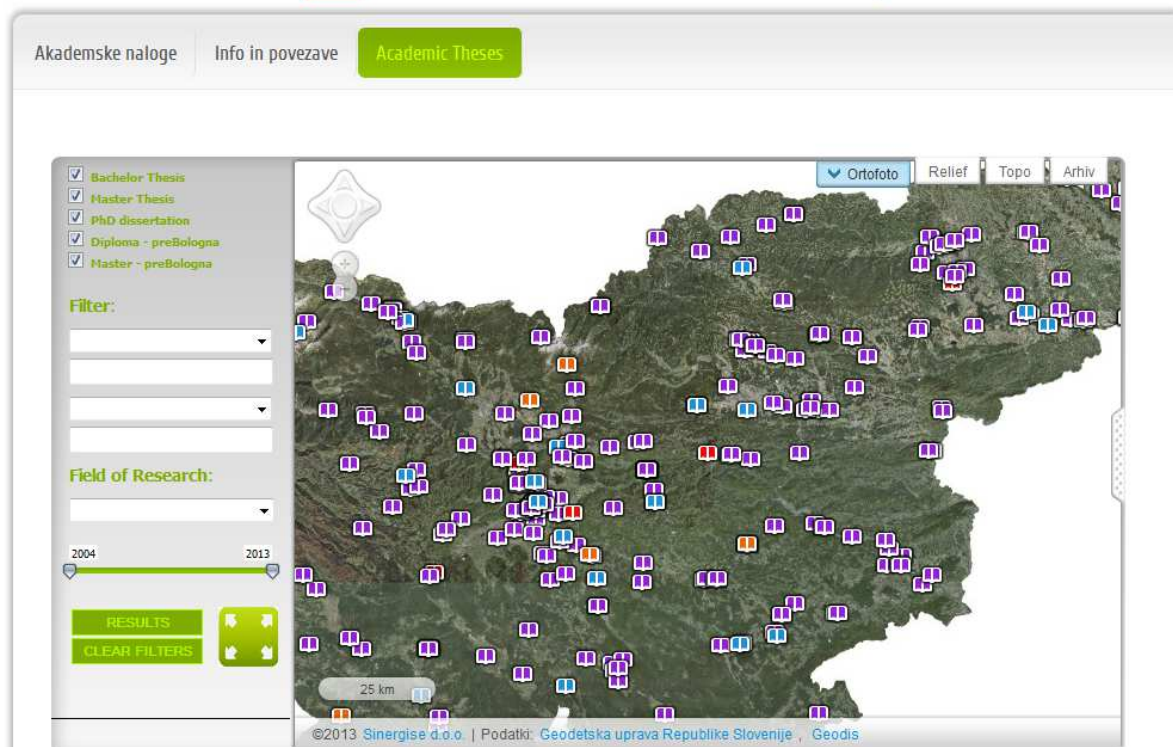
Spletni portal GeoPoLo deluje v okolju Joomla, ki je odprtokodni sistem za upravljanje spletnih vsebin CMS (angl. Content Management System). Podatki spletne strani se hranijo v obliki podatkovne baze MySQL (povzeto iz Wikipedie).

Uporabniški vmesnik spletnega portala je napisan v prosto dostopnem programskem jeziku PHP (angl. PHP Hypertext Preprocessor), ki se uporablja za razvoj dinamičnih spletnih vsebin (povzeto iz Wikipedie).

GeoPoLo domuje na spletnem naslovu <http://geopolo.fgg.uni-lj.si/>. Uporabniški vmesnik je na voljo v slovenskem in angleškem jeziku. Oba vmesnika sta prikazana na slikah 1 in 2. Ob odprtju strani v spletnem brskalniku se v grafičnem prikazovalniku prikažejo vsa akademska dela v bazi. Iskanje po bazi deluje v brskalnikih Mozilla Firefox in Google Chrome, medtem ko npr. v zadnjih različicah Internet Explorerja iskanje ne deluje.



Slika 1 – Slovenski uporabniški vmesnik s podlago topografskih podatkov



Slika 2 – Angleški uporabniški vmesnik s podlago ortofoto

Načela delovanja portala

Podatkovna baza podatkov akademskih nalog je naložena na spletnem strežniku, skupaj s podatkovno bazo spletne strani in vsebinami spletne strani portala. Obenem je na Geopedii naložen prostorski sloj, ki vsebuje nekatere osnovne podatke vsakega akademskega dela in prostorske podatke. Poizvedbe po podatkovni bazi potekajo preko vmesnika PHP, ki se izvaja na strežniku. Da se izognemo ponovnemu nalaganju strani ob vsaki poizvedbi, uporabimo razvojno tehniko Ajax, ki delo opravi v ozadju in vrne rezultat brez ponovnega nalaganja strani. Rezultate poizvedbe najprej obdelamo s pomočjo skriptnega jezika JavaScript, preko URL-ja pošljemo izdelane filtre na Geopedio, da se na portalu prikažejo le rezultati, ki ustrezajo iskalnemu nizu. Na koncu, prav tako s pomočjo JavaScript-a, izdelamo še tabelo z rezultati. Tabela vsebuje tudi povezavo do akademskega dela in možnost prikaza prostorsko umeščenega akademskega dela.

Uporabnik lahko v sklopu iskanja izbira med vsemi tipi nalog. Na voljo sta dve polji za iskanje po filtrih, in sicer se lahko išče po avtorju, naslovu, ključnih besedah in mentorju. V spustnem meniju lahko uporabnik izbere strokovno področje, če želi pridobiti rezultate zgolj za posamezno področje, ali pusti privzeto za vsa strokovna področja po klasifikaciji ARRS. Časovni okvir zaključnih del se lahko enostavno določa z drsnikom.

Ko uporabnik klikne na gumb REZULTATI, se na strežniku izvede poizvedba, ki glede na postavljene pogoje vzpostavi povezave med tabelami, ki ustrezajo iskalni zahtevi. Rezultate poizvedbe pridobi portal in po obdelavi podatkov se izvede filter prostorskih podatkov ter izriše se tabela zadetkov. Portal zaradi preglednosti izpiše največ 20

rezultatov. Če je dejanskih zadetkov več, izpiše prvih 20 zadetkov v bazi. Primer izpisa rezultatov je na sliki 3. Klik na ikono »PRIKAŽI« približa grafični pogled na točko, ki označuje položaj obravnavanega območja, oz. vse točke, ki označujejo območje. Klik na gumb »PDF+info« odpre spletno stran naloge v repozitoriju.

Seznam diplomskih nalog: 2 / 2

ID	NASLOV	AVTOR	MENTOR	LETO	PRIKAŽI	PDF+info
1	Ureditev poselitvenega območja	Janez Krajnski	Novak Janez	2013		
2	Predlog prostorskega razvoja	Meta Kos	Novak Janez	2012		

Slika 3 – Primer izpisa rezultatov v slovenščini

Angleški vmesnik glede na iskalne kriterije vrne rezultate v angleškem jeziku, tudi naslov in ključne besede, kar je delno razvidno na sliki 4.

List of Academic Thesis: 2 / 2

ID	TITLE	AUTHOR	MENTOR	YEAR	ZOOM	PDF+info
1	Spatial arrangement proposal	Janez Krajnski	Novak Janez	2013		
2	Proposal for spatial development	Meta Kos	Novak Janez	2012		

Slika 4 – Primer izpisa rezultatov v angleščini

Če v grafičnem prikazovalniku kliknemo na oznako položaja, se na desni strani prikaže polje z osnovnimi podatki akademskega dela in povezavo na repozitorij, kot je na primer na sliki 5.

GeoPoLo akademski vnosi - multipoint

 Meta Kos

Visokošolski zavod ▶ UL FGG

Št. akademskega dela ▶ 999

Vrsta dela ▶ [Diplomska naloga](#)

Avtor ▶ Meta Kos

Naslov ▶ Predlog prostorskega razvoja

Ključne besede ▶ prostorsko načrtovanje, občinski prostorski načrt, predlog ureditve

Mentor ▶ Novak Janez

Leto zagovora ▶ 2012

URL PDF ▶ <http://www3.fgg.uni-lj.si/>

Slika 5 – Izpis osnovnega povzetka podatkov o nalogi

Možnosti vnašanja podatkov v podatkovno bazo

Portal omogoča vnašanje podatkov in posodabljanje podatkovne baze na dva načina. Najbolj enostaven način je vnos podatkov preko spletnega obrazca, ki je prikazan na sliki 6. Trenutno je vmesnik prilagojen vnosu akademskih del na Univerzi v Ljubljani. Uporabnik šifro mentorja poišče na seznamu raziskovalcev na spletni strani

<http://sicris.izum.si>. Seznam raziskovalcev lahko odpre s klikom na ikono z vprašajem. Z vnosom šifre raziskovalca, ki je v vlogi mentorja, se v bazo samodejno zapiše tudi ime mentorja in strokovno področje. Vnos podatkov o mentorju s šifro raziskovalca namesto z mentorjevim imenom je predvideno zato, da se izognemo nejasnostim glede morebitnega podvajanja imen mentorjev.

Vnos prostorskega podatka je interaktiven. Uporabnik na grafičnem vmesniku izbere ustrezno podlago in približa območje obravnave. Nato izbere način določanja točke, le-to določi s klikom na karti in potrdi izbiro. Točke se beležijo v seznam. Napačno vnesene točke lahko tudi pobriše. Zapis vseh podatkov iz obrazca potrdi s klikom na gumb SHRANI.

Institucija	UL
ID	
Tip	Diplomska naloga
Leto	2013
Avtor	
Šifra mentorja	
Naslov [SLO]	
Title [ENG]	
Ključne besede [SLO]	
Key Words [ENG]	
URL	

Lokacija		
Točka 1 -> (X = 419712 / Y = 125896)		
Točka 2 -> (X = 414336 / Y = 126216)		

SHRANI

Slika 6 – Spletni obrazec za vnos podatkov o delu

Vnesene podatke je pred vnosom v podatkovno bazo treba preveriti glede njihove pravilnosti. Podatki iz zgornjega obrazca se zato zapišejo v začasno bazo, ki jih potem preveri in potrdi pooblaščen oseba. To stori preko t.i. nadzorne plošče, ki je prikazana na sliki 7. Pooblaščenec najprej prenese podatke začasne baze v obliki datoteke Excel na svoj računalnik, jih tam pregleda in po potrebi popravi. Nato preko vmesnika naloži urejeno datoteko in s potrditvijo posodobi podatkovno bazo s preverjenimi podatki. V primeru, če želi posodobiti podatke za dela, ki že obstajajo v bazi, se obstoječi enostavno prepisujejo z novimi, zato ni nevarnosti podvajanja podatkov.

NADZORNA PLOŠČA: GeoPolo

BAZA PODATKOV: Izvoz

Izvoz

BAZA PODATKOV: Posodobitev

Prebrskaj... Datoteka ni izbrana.

Nadaljuj

BAZA PODATKOV: Pocisti zacasno bazo zapisov

Pocisti

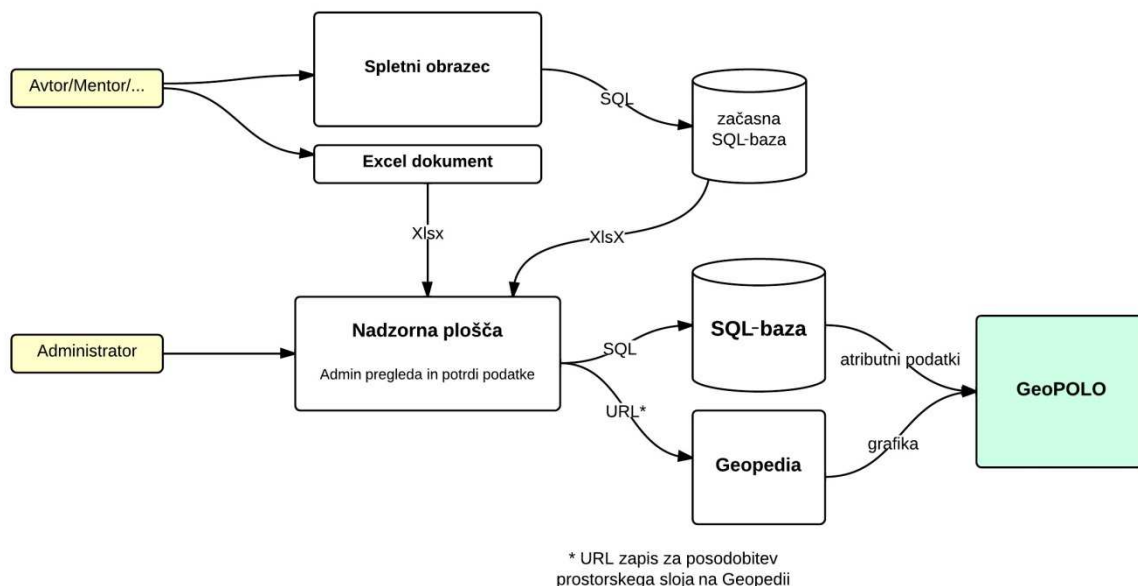
POSODOBITEV: Mentorji

Prebrskaj... Datoteka ni izbrana.

Nadaljuj

Slika 7 – Nadzorna plošča za posodobitev baze

Shema posodobitve podatkovne baze je prikazana na sliki 8. Več del hkrati lahko vnesemo kar neposredno preko Excelove preglednice tako, da za vsako delo vnesemo ustrezne podatke v svojo vrstico. Ko pooblaščenec naloži Excelovo datoteko in jo potrdi, se obnovita podatkovna baza SQL na strežniku GeoPoLo in podatkovna baza na portalu Geopedia.



Slika 8 – Shema posodobitve podatkovne baze

Dodatne možnosti

Portal GeoPoLo trenutno sicer vsebuje samo akademska dela s področja geodezije, je pa popolnoma pripravljen za vnos in objavo del z vseh fakultet Univerze v Ljubljani. Seveda pa uporaba portala ni omejena samo na Univerzo v Ljubljani, z nekaj prilagoditvami lahko portal postane uporaben tudi za druge univerze in druge izobraževalne ustanove, ki bi želele prikazovati svoje objave tudi na grafičen način s prostorsko informacijo.

Podobno kot je razvita podatkovna baza za zaključna študijska dela, se lahko razvije baza za znanstvene in strokovne članke ali podobne objave in prispevke. Polja za vnos podatkov, kot so na sliki 6, se bi v tem primeru prilagodila objavi člankom, podobno kot je ob vpisu v sistem Cobiss. Taki bazi bi bil prilagojen tudi uporabniški vmesnik pregledovalnika z ustreznimi filtri in izpisi.

Uporabniški vmesnik, ki je napisan v jeziku PHP, je možno enostavno vgraditi v različne spletne strani, podobno se lahko prilagodi tudi grafična podoba.

Bistvo portala GeoPoLo je prostorski podatek za vsako delo, ki je zapisan v podatkovni bazi poleg ostalih podatkov, ki so zapisani v repozitorijih, Cobissu ali drugih bazah. Prostorski podatek za pretekla dela lahko iščemo ročno, kar je lahko pri večjem številu del zelo zamudno. Lahko pa se uporabi tudi druge metode, npr. podatkovno rudarjenje (angl. Data mining).

Na tak način zbrani podatki lahko služijo tudi kot podatkovna osnova za prostorske analize vnesenih del.

Literatura

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

Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije - <http://www.arrs.gov.si/>

Informacijski sistem o raziskovalni dejavnosti v Sloveniji SICRIS - <http://sicris.izum.si>

Diagnoza in prognoza onesnaženja ozračja nad Slovenijo

Marija Zlata Božnar^{*}, Boštjan Grašič^{*}, Primož Mlakar^{*}

Povzetek

Predstavili bomo operativne in raziskovalne modelirne sisteme, ki omogočajo modeliranje onesnaženja ozračja nad zahtevnim kompleksnim terenom Slovenije. Meteorološko dogajanje nad kompleksnim terenom Slovenije spada med najzahtevnejše primere za modeliranje širjenja onesnaženja v ozračju. Na primeru aplikativnega raziskovalnega projekta KOoreg (Kontrola onesnaženja ozračja v regiji) bomo najprej predstavili kako poteka operativna diagnoza in prognoza onesnaženja ozračja predvsem zaradi lokalnih virov v regiji Zasavje. Zatem pa bomo predstavili še operativno modeliranje onesnaženja ozračja širše čez celo Slovenijo in sosednje države v sistemu Qualearia. Uporabljeni modeli so WRF, RAMS ter Swift in Surfpro za ponazoritev vremena ter Lagrangeeve model Spray in Eulerjev fotokemijski model Farm za ponazoritev širjenja onesnaženja v ozračju. Zaključili pa bomo za validacijami, ki so nujne pred operativno rabo modelov.

Ključne besede: prognoza in diagnoza vremena in onesnaženja ozračja, onesnaževala, numerični Lagrangeev model delcev in fotokemijski Eulerjev model za razširjanje onesnaženja v ozračju,

Keywords: forecast and diagnosis of weather and air pollution, pollutants, numerical Lagrangian particle and Eulerian photochemical air pollution dispersion model

Projekt KOoreg

Onesnaženje ozračja nad Slovenijo je bilo v preteklosti in je še sedaj eden od ključnih okoljskih problemov, ki terja tako poglobljene raziskave kot tudi operativne sisteme za nadzor in pomoč pri zmanjševanju onesnaženja (Mlakar et al., 2012b, Mlakar et al., 2011).

MEIS je v okviru ARRS projekta KOoreg (<http://kvalitetazraka.si/zasavje/index.php>) razvil na primeru Zasavja celostni pristop za reševanje naštetih nalog. Operativni modelirni sistem in testirno okolje za raziskave smo zasnovali tako, da je prenosljivo na katerokoli drugo področje Slovenije. Zasavje smo izbrali predvsem iz treh razlogov. Najprej je to ena od regij v Sloveniji, ki ima zelo velike probleme z onesnaženjem ozračja predvsem z delci PM₁₀, pa tudi z drugimi onesnaževali. Še bolj pa je bil izziv zelo kompleksno meteorološko dogajanje nad kompleksnim terenom doline reke Save in sosednjih dolin in hribov. Zadnji razlog pa je ta, da je na področju na voljo veliko število avtomatskih merilnih postaj, ki merijo glavna onesnaževala in meteorološke parametre in tako omogočajo validacijo modelov. Validacija je ključen korak, ki kvalificira znanstveno ustreznost modelov.

Naš cilj je bil postaviti modelirni sistem v dovolj fini krajevni in časovni resoluciji, ki bo omogočala verodostojno oceno vpliva velikih industrijskih objektov in prometa ter lokalnih kurišč. Kompromis je bila krajevna ločljivost celic 200 m x 200 m. Za ponazoritev vetrovnega dogajanja v tej resoluciji smo morali uporabiti številne talne meteorološke meritve, za navpični profil pa smo uporabili rezultate našega operativnega sistema za napoved vremena čez Slovenijo v resoluciji 4 km ter pol ure baziranega na WRF in ameriških GFS globalnih podatkih. Vse podatke pa smo »pripeljali« do vetrovnih polj v željeni resoluciji z masnokonsistentnim modelom Swift. WRF ima nad terenom take

^{*} MEIS storitve za okolje, d.o.o., Mali Vrh pri Šmarju 78, 1293 Šmarje -Sap

kompleksnosti kot je v Zasavju namreč še številne nerešene probleme, če se podamo v bolj podrobne resolucije.

V sistemu (Mlakar et al., 2012b) ponazarjamo diagnozo in prognozo onesnaženja ozračja kot posledice glavnih industrijskih virov (modeliramo nazivne emisije, ker za merjene ni političnega pristanka onesnaževalcev), lokalnih porazdeljenih privatnih kurišč (Grašič et al., 2011) na trdo gorivo (emisijo ocenjujemo lokacijsko preko GIS in števila prebivalcev na skupine hiš ali malih zaselkov natančno) ter cestnega omrežja. Vse našete vire modeliramo z numeričnim Lagrangeevim modelom delcev, ki omogoča lokacijsko natančnost. Eulerjev pristop modeliranja bi v navedeni resoluciji že pri samih virih (tako točkastih kot linijskih v prometu ali ploskovnih pri malih kuriščih) zabilisal visoke koncentracije onesnaževal in takoj bistveno izkrivil sliko.

Transport onesnaževal iz drugih predelov Slovenije in čezmejno pa ocenjujemo na podlagi rezultatov sistema Qualearia.

Sistem Qualearia

Sistem Qualearia (http://kvalitetazraka.si/zasavje/QualeAria_help.htm) je modelirni sistem, kjer raziskovalci Arianet, ki z MEISovimi raziskovalci sodelujejo že od 1991, modelirajo meddržavni transport onesnaževal z Eulerjevim fotokemijskim modelom FARM. Modelirajo področje Italije in sosednjih držav v regiji. V MEISu pa uporabljamo rezultate tega modelirnega sistema za oceno transporta onesnaževal čez Slovenijo. Sistem smo verodostojno validirali za PM10 in ozon (Božnar et al., 2014, Mlakar et al., 2013).

Javno dostopni operativni rezultati na www.kvalitetazraka.si

Že več let deluje MEISova internetna stran z operativnimi rezultati tega modelirnega sistema:

- Operativna napoved vremena čez Slovenijo (4 km, pol ure, 2 dni) ter soseščino (do sedem dni), s prikazom meteogramov za glavne kraje in pokrajine in video dogajanjem.
- Operativna napoved onesnaževal čez Slovenijo iz sistema QualeAria (za 2 dni, urni podatki in 12 km resolucija)
- Diagnoza in prognoza onesnaževal po posameznih industrijskih virih in skupno v Zasavju (200m, pol ure, 1 dan zgodovine in 1 dan napovedi).

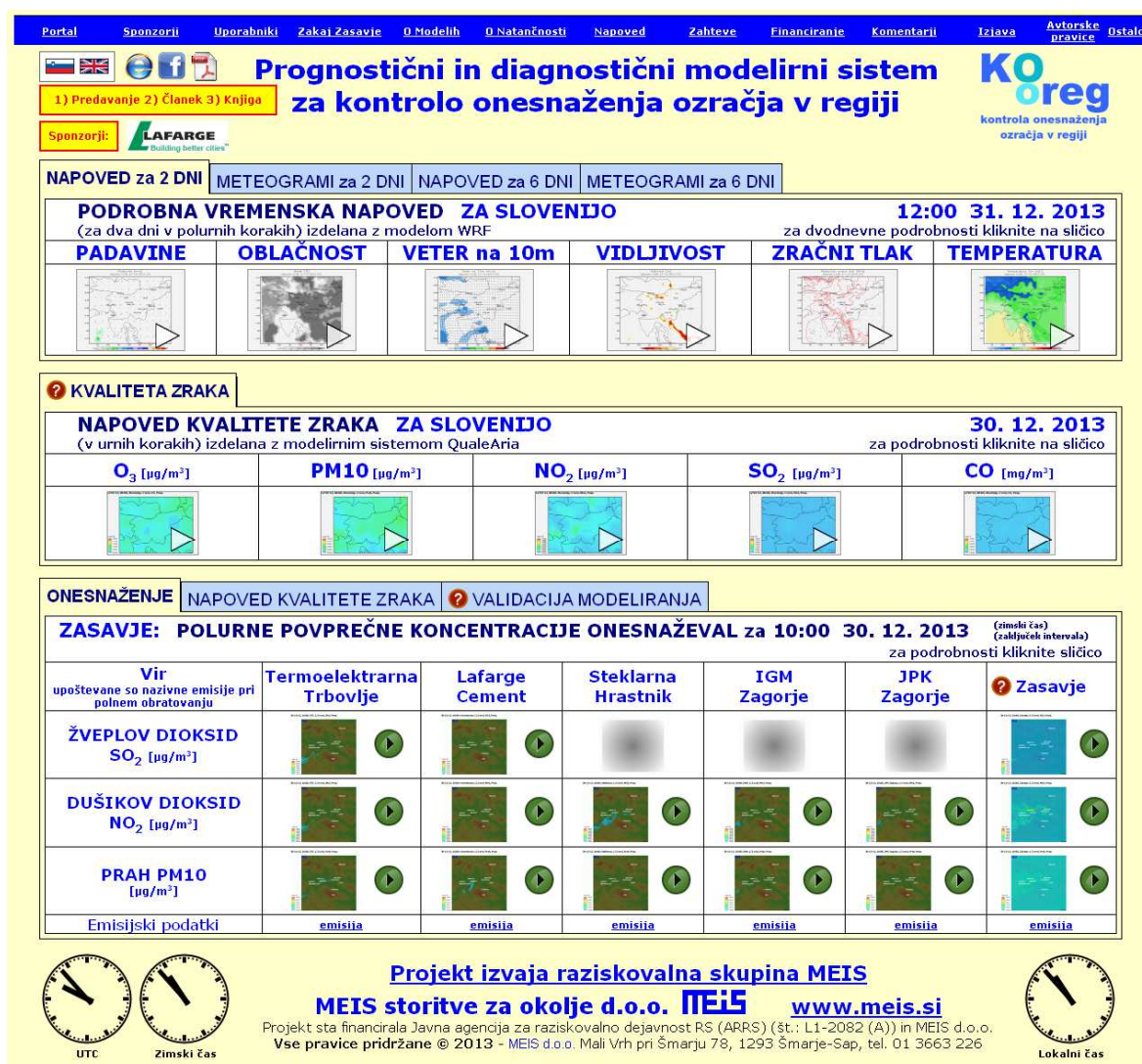
Validacije sistema

Tako za sistem modeliranja Zasavja v fini resoluciji kot tudi za sistem napovedovanja vremena čez Slovenijo in onesnaženja čez Slovenijo (Qualearia) smo izvedli številne validacije in dokazali ujemanje v kraju in v času na reprezentativnih merilnih lokacijah. Podrobnosti lahko bralec najde v številnih objavah v člankih in na konferencah (Božnar et al., 2014, Mlakar et al., 2013, Božnar et al., 2012, Grašič et al., 2011a, Grašič et al., 2011c).

Dodatno pa smo se ukvarjali tudi z modeliranjem ognjemetov (Mlakar et al., 2012a) in določevanjem emisij iz privatnih kurišč v vasi Prapretno nad Hrastnikom kjer je postavljena okoljska avtomatska merilna postaja (Grašič et al., 2011b).

Zahvala

Raziskavo je delno financirala ARRS – Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, projekta št. L1-2082 in L1-4154 (A).



Slika 1 – Primer rezultatov na »KOoreg« spletni strani, vreme in onesnaženje

Literatura

- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Grašič, B. (2012). Short-term fine resolution WRF forecast data validation in complex terrain in Slovenia. V: Special issue on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes : 26 October 2011, Kos Island, Greece, International journal of environment and pollution, ISSN 0957-4352, Vol. 50, no. 1/4, 2012. Genova: Interscience Enterprises, 2012, vol. 50, no. 1/4, str. 12-21, doi: 10.1504/IJEP.2012.051176.
- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Grašič, B., Calori, G., D'Allura, A., Finardi, S. (2014). Operational background air pollution prediction over Slovenia by QualeAria modelling system – validation.

- V: Special issue on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes 6-9 May 2013, Madrid, Spain, International journal of environment and pollution, sprejeto v objavo.
- Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P. (2011a). Validation of local scale prognostic and diagnostic air pollution modeling system in extremely complex terrain. V: Bartzis, John G. (ur.), Syrakos, Alexandros (ur.), Andronopoulos, Spyros (ur.). HARMO 14 : Proceedings of the 14th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2-6 October 2011, Kos Island, Greece. [S. l.]: University of Environmental Technology Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of West Macedonia, Greece, 2011, str. 120-124.
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z., Urbinc, S. (2011b). Domestic heating sources identification in complex terrain rural area by local scale diagnostic modeling system. V: Bartzis, John G. (ur.), Syrakos, Alexandros (ur.), Andronopoulos, Spyros (ur.). HARMO 14 : Proceedings of the 14th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2-6 October 2011, Kos Island, Greece. [S. l.]: University of Environmental Technology Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of West Macedonia, Greece, 2011, str. 647-651.
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z. (2011c). Method for validation of Lagrangian particle air pollution dispersion model based on experimental field data set from complex terrain. V: Nejadkoorki, Farhad (ur.). Advanced air pollution. Rijeka: InTech, cop. 2011, str. 535-556.
- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Grašič, B., Calori, G. (2013). Background air pollution prediction over Slovenia by qualearia modelling system : preliminary validation. V: San José, Roberto (ur.), Pérez, Juan Luis (ur.). Proceedings of the 15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Madrid, Spain, 6-9 May 2013. Madrid: Environmental Software and Modelling Group, Computer Science School, 2013, str. 75-79. https://docs.google.com/file/d/0B4NKvAPbVkv_X3EY2xoTFJJdHc/edit?usp=sharing.
- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Grašič, B., Popović, D., Grašič, B. (2012a). Fireworks air pollution in Slovenia. V: Special issue on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes : 26 October 2011, Kos Island, Greece, (International journal of environment and pollution, ISSN 0957-4352, Vol. 50, no. 1/4, 2012). Genova: Interscience Enterprises, 2012, vol. 50, no. 1/4, str. 31-40, doi: 10.1504/IJEP.2012.051178.
- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Grašič, B., Tinarelli, G., Grašič, B. (2012b). Zasavje canyon regional online air pollution modelling system in highly complex terrain - description and validation. V: Special issue on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes : 26 October 2011, Kos Island, Greece, (International journal of environment and pollution, ISSN 0957-4352, Vol. 50, no. 1/4, 2012). Genova: Interscience Enterprises, 2012, vol. 50, no. 1/4, str. 22-30, doi: 10.1504/IJEP.2012.051177.
- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Grašič, B., Tinarelli, G. (2011). Zasavje canyon regional on-line air pollution modeling system in highly complex terrain as a support to EU directives. V: Bartzis, John G. (ur.), Syrakos, Alexandros (ur.), Andronopoulos, Spyros (ur.). HARMO 14 : Proceedings of the 14th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 2-6 October 2011, Kos Island, Greece. [S. l.]: University of Environmental Technology Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of West Macedonia, Greece, 2011, str. 187-191.

Refleksijske seizmične raziskave v slovenskem morju SLOMARTEC 2013

M. Vrabec¹, M. Busetti², F. Zgur², L. Facchin², C. Pelos², R. Romeo², L. Sormani²,
P. Slavec³, I. Tomini², G. Visnovich², A. Žerjal³

Ključne besede: refleksijska seizmika, Tržaški zaliv, Dinaridi, tektonika

Key words: reflection seismics, Gulf of Trieste, Dinarides, tectonics

Uvod

V letih 2005 in 2009 je bil italijanski del Tržaškega zaliva raziskan z večkanalnim refleksijskim seizmičnim profiliranjem, ki je razkrilo globinsko strukturo in stratigrafijo območja in pokazalo znake recentne tektonske aktivnosti (Busetti et al., 2010a, b). V marcu 2013 smo v slovensko-italijanskem sodelovanju v kampanji SLOMARTEC 2013 refleksijske seizmične profile posneli še v slovenskih ozemeljskih vodah. Združeni nabor podatkov vseh snemalnih kampanj omogoča korelacijo geoloških struktur iz podpovršja Tržaškega zaliva s strukturami, ki izdanjajo na kopnem vzdolž slovenske Obale.

Geološka zgradba

Tržaški zaliv in njegovo kopno zaledje pripada severnemu delu Jadranskega predgorja Alpsko-Dinarskega orogena. Do paleogena, ko je bilo območje del Jadranske karbonatne platforme, se je tu odložilo debelo zaporedje pretežno mezozojskih karbonatnih kamnin. Med narivanjem Dinaridov proti jugozahodu v eocenu je bila karbonatna platforma fleksurno upognjena in prekrita z debelimi nanosi sinorogenih turbiditnih sedimentov. V drugem sunku terciarne kompresijske tektonike v Alpah, med narivanjem Južnih Alp proti jugu, so se v zahodnem delu območja odložili še zgornjemiocenski kontinentalni in priobalni sedimenti molasnega tipa. Med Mesinijsko regresijsko fazo je s subaersko erozijo v morskem dnu nastala kompleksna topografija. V zahodnem delu Tržaškega zaliva nanjo nalegajo pliocenski morski sedimenti, ki jim sledi še ena regresija v zgornjem pliocenu. Povsem na vrhu stratigrafskega zaporedja se menjavajo morski, prehodni in kontinentalni sedimenti, ki so se odložili v transgresijsko –regresijskih ciklih, povzročenih z menjavanjem hladnih in toplih obdobj v pleistocenu (npr. Busetti et al., 2010a, b).

Izrazito NW-SE usmerjena strukturiranost območja je pogojena s kompresijskimi strukturami Dinarskega narivnega sistema. Vodilna struktura je topografsko izrazit nariv Kraškega roba ("Dinaric frontal ramp" v italijanski terminologiji), v katerem so vzdolž NE obale zaliva platformni karbonati narinjeni preko eocenskega fliša (npr. Placer 2007). Nariv se na NW v Furlaniji nadaljuje v Palmanovski nariv (Busetti et al., 2010a, b; Placer et al., 2010; Carulli, 2011). Fleksurno upognjeno predgorje nariva sekajo podrejeni narivi, npr. Buzetski in Bujski nariv, ki so bili kartirani na kopnem (Placer, 2007; Placer et al.,

¹ 1 UL - Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana

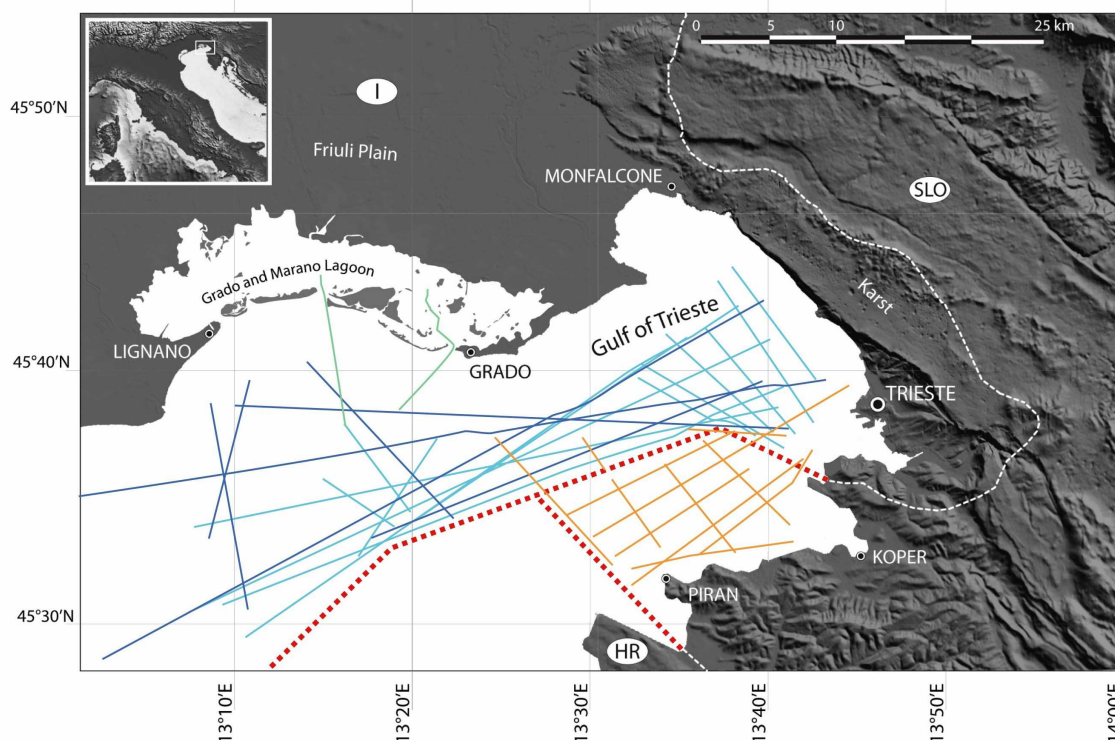
² OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Borgo Grotta Gigante 42/c, 34010 Sgonico, Trst, Italija

³ Harpha Sea d.o.o., Čevljarska 8, 6000 Koper

2010), glavna ločilna ploskev tega čelnega narivnega sistema pa poteka po kontaktu med flišem in spodaj ležečimi karbonati (Buseti et al., 2010a, b).

Seizmične raziskave

Podmorska zgradba Tržaškega zaliva je bila raziskana v večih geofizikalnih raziskovalnih kampanjah. Z raziskavami v italijanskem delu zaliva v letih 2005 in 2009 je bilo posnetih 524 km večkanalnih refleksijskih seizmičnih profilov in plitvih visokoločljivih Chirp profilov (Slika 1).



Slika 2: Položaj večkanalnih seizmičnih in Chirp profilov, posnetih z raziskovalno ladjo R/V OGS Explora v Tržaškem zalivu v letih 2005 (modre linije), 2009 (svetlomodre linije) in 2013 v kampanji SLOMARTEC (oranžne linije) v skupni dolžini 656 km.

Snemalna kampanja v slovenskem morju SLOMARTEC 2013 je potekala med 18. in 21. marcem 2013 v organizaciji Univerze v Ljubljani, inštituta OGS in podjetja Harpha Sea. Snemanje je bilo izvedeno z raziskovalno ladjo R/V OGS Explora. Seizmični vir je bila zračna puška (Generated Injection Air Gun) s štirimi viri, urejenimi v polje dimenzij 2 x 2 m. Globina streljanja je bila 4 m, razdalja med strelnimi točkami pa 12,5 m. V tej konfiguraciji znaša pričakovana vertikalna ločljivost podatkov med 2 m in 4 m. Odbiti seizmični valovi so bili zajemani s 96 kanalnim digitalnim podmorskim snemalnim kablom dolžine 1200 m z medsebojno razdaljo hidrofonov 12,5 m in horizontalno ločljivostjo profilov 6,25 m. Tudi snemalni kabel je bil vlečen na globini 4 m pod površjem. Hkrati s snemanjem večkanalne refleksijske seizmike so bili snemani visokoločljivi plitvi Chirp profili, topografija morskega dna z večsnopnim sonarjem, ter gravimetrični podatki.

V kampanji SLOMARTEC je bilo posnetih skupno 132 km večkanalnih refleksijskih seizmičnih profilov in 150 km Chirp profilov (Slika 1). Obdelava profilov je še v teku, zato

v prispevku predstavljamo prve, preliminarne interpretacije na podlagi nemigriranih profilov.

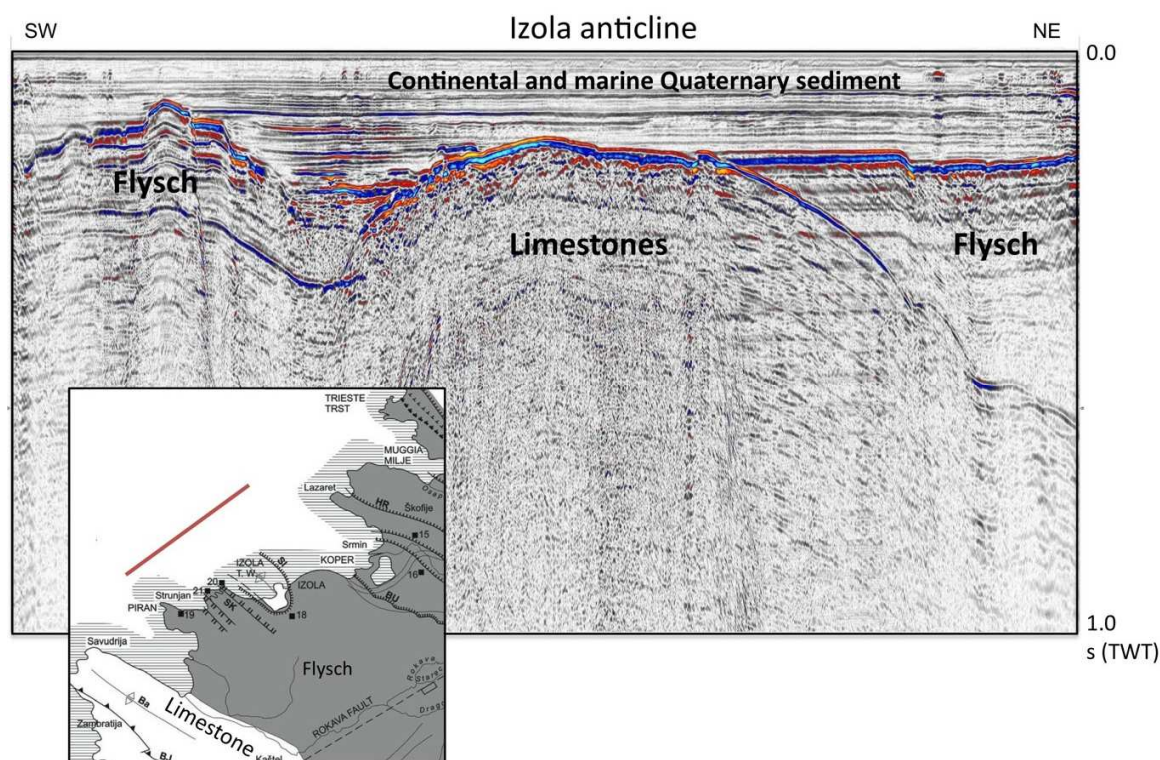
Rezultati

Na pridobljenih profilih so dobro razvidne tri značilne stratigrafske enote, poznane že iz raziskav v italijanskem delu zaliva (Slika 2). Na vrhu ležijo do nekaj 100 m debeli subhorizontalni, izrazito plastnati kvartarni sedimenti morskega in kontinentalnega izvora, katerih debelina se povečuje proti sredini Tržaškega zaliva. Pod erozijsko diskordanco, ki je na profilih vidna kot izrazit reflektor, se nahajajo eocenski turbiditni sedimenti. Erozijska mejna ploskev med flišem in pleistocenskimi sedimenti ima značilno terasasto morfologijo, ki je vsaj deloma pogojena s prelomi. Že na nemigriranih profilih je ponekod šibko razvidna plastnatost znotraj flišne formacije. Najnižje ležijo platformni karbonati, ki so od eocenskega fliša ločeni z naslednjo stratigrafsko diskordanco ki je tudi močan seizmični reflektor. Ponekod so eocenske plasti popolnoma erodirane, tako da pleistocenski sedimenti nalegajo neposredno na karbonate (Slika 2). Notranja struktura v karbonatnem paketu je le slabo razvidna, kamnine izgledajo nagubane ali nagnjene proti NE.

Struktura območja jasno kaže na večfazen razvoj. Med Dinarskim narivanjem je nastala serija narivov in gub v NW-SE orientaciji. Na seizmičnih profilih je denimo lepo vidna nekaj km široka Izolska antiklinala, v katere temenu pri Izoli na površju izdajajo karbonati izpod flišnih plasti (Slika 2). Na zaporednih profilih je vidno, da os te antiklinale tone polagoma proti NW. Severno od Izolske antiklinale profile sekajo manjši položni narivi, ki se po legi ujemajo s strukturami ki so bile kartirane na kopnem, kot so npr. Buzetski in Hrastoveljski nariv (Placer, 2007). Premiki ob teh narivih niso veliki in ne sekajo pleistocenske diskordance. Na profilih v italijanskem delu Tržaškega zaliva je ponekod vidno gubanje fliša tik nad diskordantno mejo s spodaj ležečimi karbonati, zaradi česar je bila diskordanca interpretirana kot ločilna ploskev narivnega sistema (Buseti et al., 2010a, b).

Narivno strukturo sekajo mlajši subvertikalni prelomi, ob katerih so ponekod jasno vidni večji zamiki stratigrafskih horizontov. Na podlagi opažanj gubanja, lokalnega dviganja in pozitivnih palmastih struktur ob teh prelomih, ki so vidne ponekod v italijanskem delu zaliva, je bil značaj prelomov interpretiran kot transpresiven (Buseti et al., 2010a, b). Aktivnost teh prelomov povezujemo z najmlajšo fazo konvergence med Jadransko mikroploščo in Evrazijo, ki jo dokazujejo GPS meritve (Bechtold et al., 2009; Weber et al., 2010). Izrazit, s prelomi omejen hrbet s strukturo horsta poteka od Pirana proti NW (Slika 2). Ti prelomi bi vsaj deloma lahko bili reaktivirani mezozojski robni normalni prelomi karbonatne platforme, ki so zelo lepo vidni na seizmičnih profilih osrednjega dela Tržaškega zaliva (Buseti et al., 2010a, b). Subvertikalni prelomi večinoma jasno sekajo in do nekaj 10 m zamikajo erozijsko diskordanco na bazi pleistocenskih plasti. Vsaj na nekaterih mestih moremo iz nemigriranih profilov sklepati tudi na šibke obprelomne deformacije kvartarnih plasti. Ta opažanja nakazujejo možnost aktivnih tektonskih deformacij v območju Tržaškega zaliva, ki bi v tem gosto naseljenem in industrializiranem območju lahko pomenile določeno stopnjo potresne ogroženosti. Iz širšega območja Tržaškega zaliva sicer nimamo podatkov o pomembnejših zgodovinskih potresih, šibka je tudi instrumentalno registrirana seizmičnost v modernem obdobju, kar pa je lahko pogojeno z majhnimi hitrostmi deformiranja in zelo dolgimi povratnimi dobami med potresi.

Tako na večkanalnih seizmičnih profilih kot na visokoločljivih Chirp profilih so v kvartarnih sedimentih jasno vidni pojavi fluidov, ki se napajajo iz prelomov v predkvartarni podlagi. Prisotnost fluidov se kaže v obliki ozko lokaliziranih visokofrekvenčnih območji na profilih, ki so jasno vezana na subvertikalne prelome (Slika 2). Pojavi izhajanja termalne vode in plinov (večinoma metana) na morskem dnu so dobro znani na celotnem območju Tržaškega zaliva. Pri nas so najbolj znani podvodni nizkoentalpijski termalni izviri pri Izoli (Žumer, 2004), ki ležijo v temenu Izolske antiklinale. V kvartarnih sedimentih se pojavljajo tudi širši, do nekaj 100 m široki pasovi izrazito nizkoamplitudnih signalov, ki kažejo na akumulacije fluidov, ki se bodisi napajajo iz prelomov, ali pa gre za akumulacije biogenega plina (Slika 2).



Slika 2: Nemigriran večkanalni seizmični refleksijski profil vzdolž slovenske obale preko Izolske antiklinale iz kampanje SLOMARTEC 2013. Jasno so razvidne glavne stratigrafske enote (kvartarni morski in kontinentalni sedimenti, eocenski fliš, platformni karbonati) ter erozijsko-diskordantne meje med njimi, ki predstavljajo močne seizmične reflektorje. Lepo je vidna Izolska antiklinala v sredini slike, ter s prelomi omejen topografsko dvignjen hrbet pri Piranu. Močni odboji v kvartarnih plasteh ob desnem robu profila predstavljajo akumulacije fluidov v sedimentih. Položajna karta (iz Placer et al., 2010) prikazuje lego profila (rdeča linija) in geološke strukture, ki so bile kartirane na kopnem.

Zaključki

Visokokvalitetni večkanalni seizmični profili, ki smo jih v slovenskem morju posneli v kampanji SLOMARTEC 2013 predstavljajo pomemben prispevek k razumevanju strukture in geneze Tržaškega zaliva in širšega območja čelnega dela Dinarskega naravnega sistema. S snemanjem smo pokrili doslej neraziskano območje med italijanskim delom zaliva in

istrsko obalo, kamor se strukture iz podmorja nadaljujejo na površje. Naša študija predstavlja dokaj redek primer, ko je mogoče podpovršinsko strukturo iz seizmičnega snemanja na morju neposredno korelirati s podatki geološkega kartiranja na kopnem. Strukturna interpretacija pridobljenih profilov je pomembna tudi za eventuelno izkoriščanje nizkoentalpijskih termalnih vod, katerih prisotnost se kaže na posnetih profilih. Opazili smo tudi znake kvartarnih prelomnih deformacij v sedimentih morskega dna, ki bi lahko kazali na potresno ogroženost zaledja Tržaškega zaliva, kar pa bomo podrobneje raziskali z nadaljnjimi raziskavami.

Zahvale

Snemanje je bilo financirano s strani OGS v okviru poziva za uporabo raziskovalne ladje R/V OGS Explora v letu 2013, ki ga finančno pokriva italijansko ministrstvo za izobraževanje, univerze in znanost, ter iz raziskovalnega projekta L1-5452 "Uporaba sonarja v raziskavah aktivne tektonike in paleoseizmologije na ozemljih z nizko intenzivnostjo deformacij", ki ga sofinancirata Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in podjetje Harpha Sea d.o.o. Zahvaljujemo se kapitanu Francu Sedmaku in posadki ladje R/V OGS Explora za opravljeno trdo delo med snemanjem, ter podjetju Harpha Sea d.o.o. in posadki spremljevalnega plovila Lyra za logistično podporo snemanju. Vladi Republike Slovenije, posebej pa ge. Nataliji Kokalj iz Uprave RS za pomorstvo pri Ministrstvu za infrastrukturo in prostor se zahvaljujemo za izjemno hitro izdajo potrebnih dovoljenj za izvedbo snemanja, brez česar izvedba kampanje ne bi bila mogoča.

Literatura

- Bechtold, M., M. Battaglia, D. C. Tanner, and D. Zuliani, 2009. Constraints on the active tectonics of the Friuli/NW Slovenia area from CGPS measurements and three-dimensional kinematic modelling. *J. Geophys. Res.*, 114, B03408, doi:10.1029/2008JB005638.
- Busetti M., Volpi V., Barison E., Giustiniani M., Marchi M., Ramella R., Wardell N. and Zanolla C., 2010a: Meso-Cenozoic seismic stratigraphy and the tectonic setting of the Gulf of Trieste (northern Adriatic). *GeoActa*, SP3, 1-14.
- Busetti M., Volpi V., Nicolich R., Barison E., R. Romeo, L. Baradello, Brancatelli G., Giustiniani M., Marchi M., Zanolla C., Wardell N., D. Nieto, and Ramella R.; 2010b: Dinaric tectonic features in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic). *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 51(2-3), 117-128.
- Carulli G.B., 2011: Structural model of the Trieste Gulf: a proposal. *Journal of Geodynamics*, 51, 156-165.
- Placer L., 2007. Kraški rob. Geološki prerez vzdolž AC Kozina – Koper. *Geologija* 50, 29-44, doi:10.5474/geologija.2007.003
- Placer L., Vrabec M., and Celarc B., 2010. The base for understanding of the NW Dinarides and Istria Peninsula Tectonics. *Geologija* 53/1, 55-86, doi:10.5474/geologija.2010.005
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčič-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B., 2010: GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics* 483, 214-222, doi:10.1016/j.tecto.2009.09.001
- Žumer J., 2004: Odkritje podmorskih termalnih izvirov. *Geografski Obzornik*, 51(2), 11-17.

Paleomagnetizem jamskih sedimentov v Sloveniji – implikacije za neotektoniko ozemlja

M. Vrabec¹, N. Zupan Hajna², A. Mihevc², P. Pruner³, Bosák P.^{2,3}

Ključne besede: paleomagnetizem, magnetostratigrafija, jamski sedimenti, Jadranska mikroplošča, Dinaridi, neotektonika

Keywords: paleomagnetism, magnetostratigraphy, cave sediments, Adriatic microplate, Dinarides, neotectonics

Ozemlje slovenskih Dinaridov je večinoma zgrajeno iz mezozojskih karbonatnih kamnin in paleogenskega fliša. Zaradi manjkajočega kamninskega zapisa zato zelo težko časovno opredelimo tektonske, paleoklimatske in druge procese za obdobje zadnjih 30 milijonov let, ki pa je zelo pomembno z vidika intenzivnosti dogajanj in relevantnosti za razumevanje današnjega stanja.

Dragocen dodaten vir podatkov predstavljajo sedimenti v kraških jamah. Ti so lahko alohtoni, to so večinoma klastični sedimenti, ki so jih v podzemlju odložile reke ponikalnice, ali avtohtoni, npr. siga. Sistematične raziskave jamskih sedimentov v slovenskih jamah v zadnjih 15 letih z različnimi absolutnimi in relativnimi metodami datacij so pokazale, da so sedimenti mnogo starejši, kot se je prvotno domnevalo, saj ugotovljene starosti pokrivajo ne le celotno obdobje pleistocena (do pred 2,5 Ma), temveč tudi pliocena (do pred 5,3 Ma) in segajo celo v miocen. Ker pa so procesi sedimentacije v jamah zelo kompleksni in pod močnim vplivom lokalnih dejavnikov, sedimentni profili pa običajno debeli le do nekaj m in prekinjeni z večimi diskordancami, je interpretacija jamskih sedimentov in iz njih izhajajočih podatkov o površinskih in podpovršinskih procesih zelo kompleksna.

Pomebno orodje pri datiranju so bile paleomagnetne raziskave jamskih sedimentov. Paleomagnetizem je pojav, ko se v kamninah, ki vsebujejo magnetne, navadno železove minerale, ohrani zapis usmerjenosti in intenzitete Zemljinega magnetnega polja iz časa nastanka kamnine. Orientirani vzorci nekonsolidiranih jamskih sedimentov so bili vzorčevani z nemagnetno plastično škatlico s stranico 2 cm, orientirani vzorci konsolidiranih kamnin in sige pa so bili na to velikost razžagani v laboratoriju. Komponente remanentne magnetizacije in njihov geološki izvor so bile ugotovljene z demagnetizacijo vzorcev v izmeničnem polju 100 mT v 12 – 16 korakih in s termično demagnetizacijo v MAVACS sistemu magnetnega vakuma. Določene so bile vrednosti magnetne susceptibilnosti, naravne remanentne magnetizacije, magnetne deklinacije in magnetne inklinacije.

Datacija s pomočjo paleomagnetnih podatkov je relativna geokronološka metoda, ki temelji na dejstvu, da se je skozi geološko zgodovino polarnost Zemljinega magnetnega polja občasno zamenjala; tako poznamo obdobja normalne (enake današnji) in inverzne polarnosti. Ugotovljeno zaporedje normalnih in reverznih polarnosti v danem sedimentnem profilu poskušamo korelirati z globalno paleomagnetno časovno lestvico, ki je bila sestavljena s kompilacijo paleomagnetnih podatkov, ki so bili datirani z drugimi, predvsem

¹ UL - Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana

² Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna

³ Institute of Geology AS CR v.v.i., Research centre Puškinovo náměstí, Rozvojová 135/1, CZ-165 00 Praha

radiokronometričnimi metodami. Metoda je spremenljivo natančna in je pri jamskih sedimentih lahko problematična zaradi nezveznosti sedimentacije, zato je bilo za izboljšanje zanesljivosti datacij potrebno uporabiti tudi ostale ugotovljene magnetne lastnosti in kombiniranje z drugimi metodami (biostratigrafija, absolutne datacije) in s posrednimi, npr. geomorfološkimi kriteriji.

Pridobljeni podatki o paleomagnetizmu jamskih sedimentov pa so uporabni tudi za raziskave v tektoniki. Paleomagnetna inklinacija nam pove zemljepisno širino, na kateri so se kamnine nahajale ob nastanku in zato predstavlja pomemben podatek v rekonstrukcijah premikanja litosferskih plošč, vendar pa za obdobje zadnjih 10 – 20 Ma, ki ga pokrivajo podatki iz slovenskih jamskih sedimentov, ti podatki ne povedo nič novega. Veliko zanimivejši so podatki o paleomagnetni deklinaciji, ki nam pove, za koliko so bile kamnine od nastanka do danes okoli vertikalne osi zarotirane od smeri severa. Ta rotacija je spet lahko posledica premikanja litosferskih plošč, lahko pa jo povzročijo tudi čisto lokalni tektonski dejavniki, npr. rotacije tektonskih blokov ob zmičnih prelomih, ali translacije in rotacije naravnih enot pri narivanju. Seveda so paleomagnetno ugotovljene rotacije lahko posledica kombiniranega učinkovanja globalnih in lokalnih tektonskih premikanj, zato njihova interpretacija ni vedno enostavna.

Ozemlje Slovenije paleogeografsko pripada Jadranski mikroplošči, katere kolizija z Evrazijo je v terciarju povzročila nastanek Alp in Dinaridov. Tektonske kinematske rekonstrukcije, paleomagnetne raziskave in moderne meritve premikanja litosferskih plošč z GNSS tehnologijo so pokazale, da je Jadranska mikroplošča glede na Evrazijo rotirala v protiurni smeri in da ta rotacija poteka še danes. Paleomagnetne raziskave zgornjekrednih in paleogenskih kamnin Istre in Kvarnerskih otokov, ki so najmlajše dosegljive kamnine na nedeformirani Jadranski plošči, kažejo na zelo konsistentno zarotiranost za okoli 30° v protiurni smeri. Paradoksalno kažejo zelo podobno zarotiranost tudi miocenske sedimentne kamnine ponekod v Panonskem območju Slovenije, Hrvaške in Madžarske, iz Dinarskega območja pa podatkov o neogenskih in mlajših rotacijah doslej nismo imeli.

Podatki paleomagnetne deklinacije iz jamskih sedimentov v jamah na dinarskem krasu in v Julijskih in Kamniško-Savinjskih Alpah dokaj enotno kažejo rotacije v protiurni smeri, ki znašajo do 20°, večinoma pa med 10° in 0°. Precej konsistentno se kaže časovni trend, še posebej na daljših profilih sedimentov, kjer je bilo mogoče določiti več različno starih deklinacij, po katerem najmanjši iznos rotacije kažejo najmlajši sedimenti, s starostjo pa deklinacija narašča. Tako imajo sedimenti starejši od 2 Ma deklinacijo nad 10°, mlajši od 500.000 let pa le nekaj stopinj ali sploh nič. Od tega trenda opazneje odstopajo predvsem nekateri več Ma stari sedimenti iz jam klasičnega Krasa, ki praktično ne kažejo deklinacije.

V grobem so torej paleomagnetne rotacije izmerjene v mladih jamskih sedimentih skladne z modelom mikroplošče, ki progresivno rotira v protiurni smeri. Vendar pa se pri tektonski interpretaciji rotacij pojavi več zanimivih odprtih vprašanj. Koliko so izmerjene rotacije v notranjosti Slovenije v resnici posledica premikanja Jadranske mikroplošče, katere strukturno mejo na površju ponavadi postavljamo na najjužnejše narive v slovenski Istri? Ali se namesto tega ozemlje deformira z “domino” rotacijami tektonskih blokov ob NW-SE usmerjenih dinarskih prelomih? Kako razložiti različne hitrosti rotacij v različnih časovnih merilih (30° v 60 Ma, 10-20° v zadnjih 1-3 Ma, ~0,3°/leto v modernem času po GNSS meritvah) in kako jih uskladiti s tektonskimi modeli, ki predvidevajo bolj ali manj stacionarne regionalne deformacije?