

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

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

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2008

zbornik predavanj

13. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 22. januar 2009

ORGANIZACIJSKI ODBOR

Miran Kuhar
Bojan Stegenšek
Janez Goršič

UREDNIK

Miran Kuhar

LEKTORIRANJE

mag. Brigita Lipovšek

ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

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

550.3(082)
528(082)

SLOVENSKO združenje za geodezijo in geofiziko. Strokovno
srečanje
(14 ; 2009 ; Ljubljana)

Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008 : zbornik
predavanj / 14. strokovno srečanje Slovenskega združenja za
geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 22. januar 2009 ; [organizator
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran
Kuhar]. - V Ljubljani : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
2009

ISBN 978-961-6167-87-1

1. Gl. stv. nasl. 2. Kuhar, Miran 3. Fakulteta za gradbeništvo in
geodezijo (Ljubljana)
243170560

Predgovor

Pred nami je zbornik letošnjega srečanja Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Prispevki so aktualni ter vsebinsko in podatkovno bogati, tako da je njihova tematika zanimiva za ožjo in širšo strokovno javnost. Predvsem pa kažejo zavezanost slovenskih raziskovalcev kakovostnemu in mednarodno vpetemu načinu strokovnega in znanstvenega delovanja. To je hkrati tudi dobra osnova za trajnostni razvoj naše stroke in s tem celotne slovenske družbe.

Naše društvo je včlanjeno v Mednarodno zvezo za geodezijo in geofiziko od leta 1994. Tako kot krovna organizacija sestoji iz sedmih sekcij – Geodezija, Geomagnetizem in aeronomija, Hidrologija, Meteorologija, Fizikalna oceanografija, Seizmologija in fizika Zemljine notranjosti ter Vulkanologija in kemizem Zemljine notranjosti. Te sekcije obsegajo samostojna in zelo široka polja znanosti, zato je marsikdaj težko zagovarjati celostno zamisel delovanja društva, kot je bila prisotna v času nastanka Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko leta 1919. Po drugi strani pa se danes vse bolj uveljavlja težnja po interdisciplinarnosti raziskovalnega dela, zato vidim v delovanju našega društva nove možnosti in izzive, še posebej v geografsko in demografsko majhni državi, kot je Slovenija.

Obdobje 2007-2009 je posvečeno planetu Zemlji, njeni preteklosti, sedanjosti in prihodnosti. V 4,5 milijardah let, kolikor je stara Zemlja, je današnji človek s sodobno civilizacijo prvič znatno posegel v globalne naravne procese. Kdaj, kako in če sploh še je mogoče zajezi podnebne spremembe, ki bodo po vrhuncu segrevanja najverjetneje prinesle novo ledeno dobo. Za iskanje rešitev je ostalo zelo malo časa, pogosto pa žal pa tudi zelo malo interesa v celotni družbeni lestvici – od posameznikov do odločujočih v majhnih in velikih, nerazvitih in razvitih državah sveta. Ko sem svetnika ene od slovenskih občin prijazno opozorila, da je kurjenje ivernih plošč v dotrajanem kurišču okolju in ljudem škodljivo, mi je odvrnil, da mu tako narekujejo ekonomski razlogi. Videti je, da je denar zares sveta vladar, pot od besed in študij do uresničitve pa je dolga in težavna. Pri varovanju okolja mora biti stroka enotna, trdna in vztrajna, zato upam, da bo tudi naše društvo s svojim znanjem, ugledom in dejavnostjo prispevalo svoj del odgovornosti k osveščanju strokovne in laične javnosti in uresničevanju globalnih ciljev.

Naša srečanja ob letni skupščini so že postala tradicionalna. Ob strokovnem srečanju bomo imeli veliko možnosti tudi za sproščen, neuraden razgovor z dolgoletnimi člani, novimi znanci in študenti. Veselim se ponovnega snidenja z Vami in dovolite mi, da Vam zaželim veliko uspehov, zdravlja in osebne sreče v novem letu 2009.

dr. Polona Kralj
Predsednica SZGG

Vsebina

Predgovor	3
P. Vreča, M. Brenčič - Izotopska sestava padavin v Sloveniji in njen pomen za raziskave kroženja vode	7
J. Rakovec, R. Bertalanič, J. Cedilnik, G. Gregorič, G. Skok, M. Žagar, N. Žagar - Vetrovnost v Sloveniji	19
J. Rakovec, D. Kastelec, K. Zakšek - Sončna energija v Sloveniji	27
A. Horvat, A. Vidmar, S. Petan, M. Brilly - Uporabnost daljinskega zaznavanja snega v Sloveniji	35
K. Medved, B. Koler, M. Kuhar - Izračun osnovne gravimetrične mreže Slovenije	49
P. Sinčič, R. Vidrih - Delovanje državne mreže potresnih opazovalnic	59
R. Čop, J. Kocen - Geomagnetne meritve na geomagnetni referenčni točki na Predmeji	69
T. Žagar, S. Berk - Primerjava podatkov SRTM z DMV Slovenije	77
R. Stegel - Zgodovinski pregled geomagnetnih meritev in raziskav *	87

* lektorirala Marija Stegel

Izotopska sestava padavin v Sloveniji in njen pomen za raziskave kroženja vode

Polona Vreča^{*}, Mihael Brenčič^{**}

Povzetek

Znanje o kroženju vode ter interakcijah med padavinami, površinskimi in podzemnimi vodami je izjemno pomembno. Za sledenje kroženja vode so se izkazali kot izjemno uporabni stabilni izotopi vodika in kisika, ki sestavljajo vodne molekule. Tako se uporabljajo danes stabilni izotopi vodika in kisika rutinsko na področju hidroloških in hidrogeoloških raziskav predvsem za ugotavljanje izvorov in dinamike površinskih in podzemnih vod, vedno več pa tudi v klimatskih in paleoklimatskih raziskavah. V prispevku bomo prikazali osnove izotopske hidrologije ter podrobneje predstavili rezultate raziskav izotopske sestave padavin, ki so pomemben del vodnega kroga in katerih količinska, prostorska in časovna porazdelitev se v Sloveniji zaradi geografske lege med Alpami, Sredozemskim morjem in Panonsko nižino znatno spreminja.

Uvod

Voda v naravi neprestano kroži. Padavine padejo na površje, od koder odtečejo bodisi kot površinska voda bodisi se infiltrirajo in napajajo podzemno vodo, ali pa se del teh padavin v obliki evapotranspiracije ponovno vrne v ozračje. To kroženje vode v naravi opišemo kot hidrološki krog, ki ga s svojo energijo poganja sonce. Podrobnejši vpogled v vodni krog nam odkrije, da so procesi kroženja vode, ki nastopajo v naravi, mnogo bolj zapleteni. Voda prehaja iz enega okolja v drugega v različnih agregatnih stanjih in v različnih smereh.

V hidrološki znanosti poizkušamo razumeti kroženje vode. Vodi pri njeni poti v naravi sledimo z večjim ali manjšim uspehom. Pri tem sledenju uporabljamo različna sledila, katerih izvor znotraj vodnega kroga poznamo ali pa ga predpostavljamo. Idealnega sledila žal ne poznamo, čeprav bi v hidrologiji prišlo še kako prav. Najboljše sledilo je prav sama molekula vode, sestavljena iz dveh atomov vodika in enega atoma kisika in njena izotopska sestava, ki se med njeno potjo skozi vodni krog neprestano spreminja. Če poznamo povezavo med izotopsko sestavo molekule vode in fizikalnimi procesi v hidrološkem krogu, ki vplivajo nanjo, lahko interpretiramo pot molekule vode skozi vodni krog.

Z izotopsko sestavo vode v vodnem krogu se ukvarja izotopska hidrologija, veda, ki se je pričela razvijati vzporedno z razvojem jedrske fizike in kemije. Prve aplikacije meritev izotopske sestave v vodnem krogu je zaslediti že pred drugo svetovno vojno s pojavom prvih masnih spektrometrov, intenziven razvoj pa so doživele v šestdesetih letih dvajsetega stoletja, ko so bile določene prve globalne zakonitosti v izotopski sestavi padavin (Craig, 1961; Dansgard, 1964). Kmalu se je izkazalo, da je s pomočjo poznavanja izotopske sestave padavin po posameznih porečjih možno slediti izvoru površinskih in podzemnih vod. In ne samo to, sklepati je možno tudi na nekatere dinamske karakteristike vode znotraj posameznih vodnih teles. Tako lahko s pomočjo mešalnih modelov izračunavamo

^{*} Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Jamova cesta 39, SI-1000 Ljubljana;

^{**} Katedra za geologijo krasi in hidrogeologijo, Oddelek za geologijo, Naravoslovnotehniška fakulteta, UL, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana; in Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana

zadrževalne čase, višino napajalnega zaledja, določamo mešanje med vodami različnega izvora in izvajamo še številne druge interpretacije.

Slovenija je območje, ki je bogato z vodami. Njena vodna bilanca je v primerjavi z globalno vodno bilanco na kontinentih ugodnejša. Poleg zelo ugodne celotne vodne bilance je za Slovenijo značilno tudi bogastvo podzemnih vod, zaradi česar skoraj vso pitno vodo pridobivamo iz podzemnih vodnih virov. Pri izkoriščanju vodonosnikov moramo poskrbeti tudi za njihovo zaščito, pri zaščiti pa je pomembno tudi poznavanje narave infiltracije in zadrževalnih časov vode v vodonosnikih. Tako imamo v Sloveniji s prvimi aplikacijami izotopske hidrologije opraviti prav na področju raziskav podzemnih vod. V sredini sedemdesetih let dvajsetega stoletja so pričeli z določanjem starosti podzemnih vod s pomočjo v vodi raztopljenega radioaktivnega ogljika, kmalu za tem pa tudi z meritvami stabilnih izotopov vode na območju vodonosnikov v severovzhodnem območju Slovenije (Pezdič, 1999). Ker pa je izotopsko sestavo podzemnih vod zelo težko interpretirati brez poznavanja izotopske sestave padavin, je kmalu za tem sledila tudi vzpostavitev rednih in sistematičnih meritev njihove izotopske sestave.

Namen članka je predstaviti osnovna teoretična izhodišča izotopske hidrologije in jih ilustrirati s pomočjo sistematičnih meritev izotopske sestave stabilnih izotopov vodika in kisika v padavinah, ki se jih izvaja v Sloveniji.

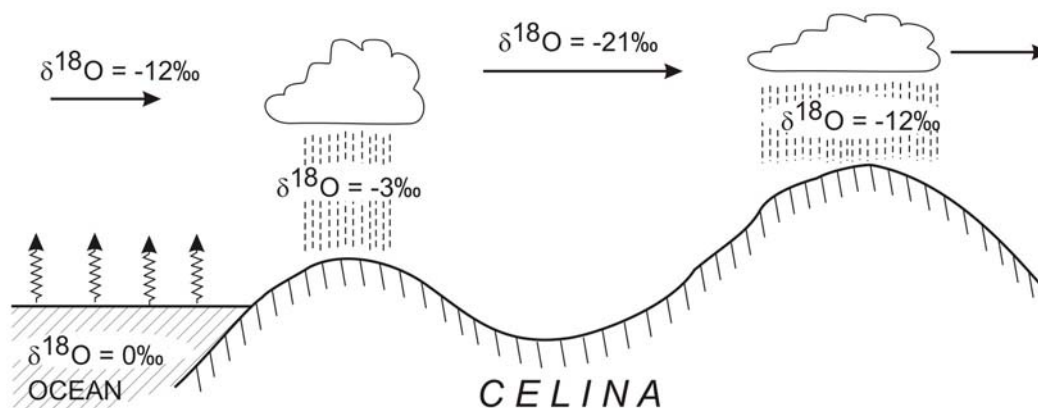
Teoretična izhodišča

Molekula vode je sestavljena iz dveh atomov vodika in enega atoma kisika. Vsakega od atomov pa lahko tvorijo različni izotopi. Tako poznamo tri izotope vodika (^1H – protium, ^2H – devterij in ^3H – tricij) in tri izotope kisika (^{16}O , ^{17}O in ^{18}O). Med omenjenimi izotopi je radioaktiven le ^3H tricij z razpolovno dobo 12,32 let (Lucas in Unterweger, 2000), vsi drugi izotopi so stabilni. Tako imamo v molekuli vode možne vse kombinacije izotopov (npr. $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ itd.). V izotopski hidrologiji merimo koncentracije posameznih karakterističnih izotopov. Ker pa gre za zapletene masnospektrometrične meritve, koncentracije podajamo v relativnih vrednostih.

Izotopsko sestavo oziroma razmerje med težjim in lažjim stabilnim izotopom podajamo v obliki vrednosti δ (delta), ki jih izrazimo v tisočinkah (‰), relativno glede na mednarodni standard V-SMOW (Vienna - Standard Mean Ocean Water). Vrednosti δ izračunamo s pomočjo enačbe:

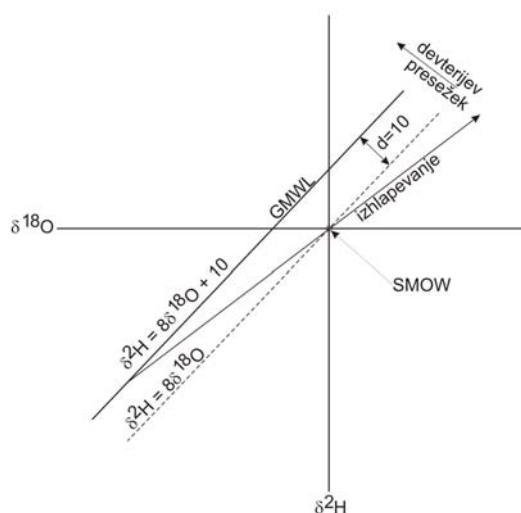
$$\delta^Y Z [\text{v ‰}] = (R_x / R_s - 1) \cdot 1000$$

kjer $^Y Z$ predstavlja ^{18}O ali ^2H , R razmerje med težkim (manj pogostim) in lažjim (bolj pogostim) izotopom (npr. $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), simboli R_x in R_s pa predstavljajo razmerja v vzorcu (x) in standardu (s). Pozitivna vrednost δ pomeni, da je izotopsko razmerje R v vzorcu višje od razmerja v standardu, iz česar sledi, da je vzorec "težji" ali obogaten glede na standard. Negativna vrednost δ pomeni, da je izotopsko razmerje vzorca nižje od izotopskega razmerja v standardu, vzorec je "lažji" ali osiromašen.



Slika 1 – Prikaz spreminjanja izotopske sestave zračne vlage in padavin vzdolž poti v notranjost kontinenta (prirejeno po Craig in Gordon, 1965)

Molekule vode z različno izotopsko sestavo se med seboj razlikujejo po številnih fizikalnih lastnostih, zaradi česar se med potjo vode skozi vodni krog molekule z različno izotopsko sestavo razdelijo na različna območja vodnega kroga. Temu procesu pravimo izotopska frakcionacija. Do te prihaja predvsem med izhlapevanjem in kondenzacijo vode, ko težje molekule vode pretežno ostajajo ali prehajajo v tekočo ali trdno fazo, lažje pa prehajajo v plinsko fazo (Araguas-Araguas et al., 2000). Ko voda s površine oceana izhlapeva v ozračje, se zaradi višjega parnega tlaka molekule $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, kot molekule vode, ki vsebujejo ^2H ali ^{18}O , vodna para obogati s ^1H in ^{16}O . Ko vodna para zapusti površino oceana, se počasi ohlaja vse do takrat, ko je dosežena točka rosišča (Slika 1). Posledično se med nastajanjem padavin iz vlažnih zračnih mas preostala vodna para glede na težke izotope osiromaši. Voda, ki zapuša sistem, pa je obogatena z ^2H in ^{18}O (Craig in Gordon, 1965, Schotterer et al., 1996). Teoretične razlage spreminjanja izotopske sestave padavin temeljijo na modelih Rayleighove kondenzacije, pri kateri padavine iz sistema izstopijo v trenutku ali pa na način, ko del kondenzirane vodne pare med padavinami ostane v oblaku (Rozanski et al., 1993).



Slika 2 – Globalna padavinska premica GMWL in prikaz posameznih procesov, ki vplivajo na izotopsko sestavo padavin (prirejeno po Ingraham, 1998 in Gat, 1996)

V procesih izhlapevanja in kondenzacije padavin poteka frakcionacija vodikovih izotopov proporcionalno kisikovim izotopom, zaradi česar je v padavinah izotopska sestava kisika in vodika med seboj povezana in korelira. Na podlagi tega je Craig (1961) prvi definiral tako imenovano *globalno padavinsko premico* (Global Meteoric Water Line - GMWL):

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Craigova (1961) GMWL predstavlja svetovno povprečje (Slika 2), ki je bilo v času objave izračunano na podlagi relativno nizkega števila podatkov, predvsem meritev izotopske sestave v vodi površinskih vodotokov. Sodobne, mnogo bolj številne opazovalne postaje in daljši nizi meritev so podali natančnejši izračun razmerja med izotopsko sestavo vodika in kisika. Regresijska premica za obdobje od 1961 do 2002, ki temelji na 410 postajah v opazovalni mreži Mednarodne agencije za atomsko energijo – IAEA in Svetovne meteorološke organizacije – WMO (Gourcy et al., 2005), se le nekoliko razlikuje od originalne Craigove enačbe:

$$\delta^2\text{H} = (8,07 \pm 0,02) \delta^{18}\text{O} + (9,9 \pm 0,01)$$

Opazovanja kažejo, da se razmerje med izotopsko sestavo vodika in kisika lokalno spreminja zaradi razlik v klimi in geografskih karakteristikah, kot so gorske pregrade ali bližina velikih površinskih vodnih teles. Zaradi tega govorimo o *lokalnih padavinskih premicah* (Local Meteoric Water Line - LMWL). Interpretacija padavinskih premic je izredno pomembna, saj lahko z njeno pomočjo ugotavljamo izvor vlažnih zračnih mas. Pri tem si pogosto pomagamo z *devterijevim presežkom d*, ki ga je v izotopsko hidrologijo vpeljal Dansgaard (1964):

$$d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$$

Namen tega parametra je opredeliti, v kakšni meri lokalne padavine odstopajo od globalnega povprečja, tudi porazdelitev tega parametra pa je pogojena lokalno. Če opazujemo GMWL lahko ugotovimo, da so izotopsko osiromašene vode povezane s hladnimi območji, izotopsko obogatene vode pa s toplimi območji. Pri tem ne gre le za izvor vode v padavinah (npr. za izvor vode iz severnega Atlantika ali za izvor iz območja Sredozemlja), ampak tudi njihovo višinsko porazdelitev znotraj posameznih geografskih enot (npr. znotraj posameznih pogorij). Prav ta razmerja so osnova za študij izvora površinskih, predvsem pa podzemnih vod (Clark in Fritz, 1997).

Poleg devterijevega presežka *d* je Dansgaard (1964) opredelil še nekatere druge zakonitosti padavin, ki so vezane na geografski položaj in na lokalne pogoje v okolju, kjer opazujemo izotopsko sestavo padavin. Tako je ugotovil, da so padavine odvisne od geografske širine (t. i. geografski efekt), nadmorske višine (t. i. višinski efekt), oddaljenosti od obale (t. i. kontinentalni efekt), količine padavin (t. i. količinski efekt) in temperature zraka (t. i. temperaturni efekt). Glavna faktorja, ki vplivata na izotopsko sestavo padavin na določeni lokaciji, sta temperatura, pri kateri je prišlo do kondenzacije, in stopnja izločanja padavin. Slednja je razmerje med vodno paro, ki je že kondenzirala v padavine, in celotno količino vodne pare v zračni masi. Večina vodne pare v atmosferi izvira iz oceanov z nizko geografsko širino. Padavine, ki nastanejo iz te vodne pare, so v primerjavi z vodno paro obogatene z ^2H in ^{18}O , kar je posledica izotopske frakcionacije med padavinami in vodno paro pri določeni kondenzacijski temperaturi. Z napredovanjem mokrih zračnih mas v notranjost kontinenta izotopska sestava padavin, ki vzdolž te poti

izpadajo in padajo na Zemljino površino, postaja vedno lažja (Slika 1). Kot primer lahko navedemo neravnotežno izhlapevanje s površine oceana z izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O} = 0 \text{ ‰}$. V takšnem primeru ima vodna para izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O} = -12 \text{ ‰}$, kasneje pa imajo padavine, ki izpadejo iz takšne zračne vlage, izotopsko sestavo $\delta^{18}\text{O} = -3 \text{ ‰}$, preostala vodna para pa $\delta^{18}\text{O} = -21 \text{ ‰}$ (Ingraham, 1998).

Korelacija med temperaturo zraka na površini in izotopsko sestavo padavin ima velik pomen pri paleoklimatskih študijah. Z meritvami izotopske sestave vode, ki je ohranjena v starejših sedimentih in kamninah, ali pa snovi, ki so bile v času svojega nastanka v ravnotežju z vodo, lahko na podlagi njihove izotopske sestave sklepamo na takratne temperaturne razmere. Tega razmerja pa ne moremo uporabljati univerzalno. Razmerje je značilno za območja srednjih in visokih geografskih širin, kjer imamo opravka s sezonskim spreminjanjem temperature in količine padavin, medtem ko za območja v okolici ekvatorja to ne velja (Schotterer et al., 1996).

Nihanja izotopske sestave $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ v padavinah se iz leta v leto le malo spreminjajo. To je posledica tega, da se klimatski parametri, kot so temperatura, vir vlage, smer gibanja zračnih mas in podobno, iz leta v leto spreminjajo le v manjši meri. V splošnem velja, da so poletne padavine izotopsko težje kot zimske padavine, te sezonske spremembe pa so vezane na spremembe temperature in na sezonske spremembe v cirkulaciji zračnih mas.

Vzorčenje izotopske sestave padavin

Vzorčenje padavin v svetovnem merilu

Kmalu po odkritju razlik v izotopski sestavi vode v dvajsetih in tridesetih letih prejšnjega stoletja je bilo ugotovljeno, da obstajajo razlike tudi v izotopski sestavi posameznih komponent vodnega kroga. V letu 1959 je bila na IAEA sprejeta odločitev, da se na globalni ravni prične z opazovanjem izotopske sestave padavin v mesečnih kompozitnih vzorcih. V letu 1961 je bila na globalni ravni vzpostavljena mreža 151 padavinskih postaj, imenovana globalna mreža za opazovanje izotopov v padavinah (Global Network of Isotopes in Precipitation – GNIP). Mreža deluje še danes in vključuje 183 aktivnih postaj iz 53 držav (Gourcy et al., 2005). Del te mreže je tudi postaja Ljubljana in občasno tudi nekatere druge postaje v Sloveniji.

Meritve izotopske sestave padavin na globalni ravni, podane v bazi GNIP, so pomembne s številnih praktičnih in teoretičnih vidikov. Te meritve so osnova za številne lokalne hidrološke in hidrogeološke študije, za paleoklimatske študije, v zadnjem času pa so tudi osnova za umerjanje globalnih klimatskih modelov in analize vplivov klimatskih sprememb na vodni krog.

Vzorčenje padavin v Sloveniji

V Sloveniji je v preteklosti vzorčenje za potrebe določitve izotopske sestave padavin potekalo na območju Ljubljane, na letališču v Portorožu, v Kozini, občasno pa tudi na nekaterih drugih lokacijah, a žal so podatki o teh vzorčenjih in rezultatih javno skorajda nedostopni.

Vzorčenje za določitev izotopske sestave padavin se je v Ljubljani pričelo leta 1981 (Pezdič, 1999). Vzorci so se zbirali na lokaciji meteorološke postaje Bežigrad (lega postaje $46^{\circ}03'\text{N}$, $14^{\circ}31'\text{E}$; 299 m n. m. viš.), takratnega Hidrometeorološkega zavoda, današnje Agencije za okolje Republike Slovenije. V letu 1993 se je zbiranje padavin za potrebe

določevanja izotopske sestave preselilo na lokacijo Instituta "Jožef Stefan" (lega postaje 46°03'N, 14°29'E; 292 m n. m. viš.). Septembra leta 2000 pa je bila postaja ponovno preseljena, tokrat na lokacijo Reaktorskega centra Instituta "Jožef Stefan" (lega postaje 46°06'N, 14°36'E; 282 m n. m. viš.) pri Podgorici severno od Ljubljane. Meteorološki podatki, ki so potrebni za interpretacijo rezultatov izotopskih meritev, so podatki, ki izhajajo iz meteorološke postaje Bežigrad, od oktobra 2002 pa se podatek o količini padavin spremlja tudi na Reaktorskem centru. Podatki o izotopski sestavi padavin na območju Ljubljane so bili v obdobju 1986-1994 redno objavljani v tehničnih poročilih IAEA (IAEA Technical Reports Series), v sedanjem času pa so podatki do vključno leta 2003 na voljo v internetni bazi podatkov IAEA (2008a). Aktualni niz podatkov od začetka meritev leta 1981 do konca leta 2006 je podan v Vreča et al., 2008.

Daljši niz opazovanj izotopske sestave padavin je na voljo tudi za padavinsko postajo na letališču Portorož (lega postaje 45°28'N, 13°37'E; 2 m n. m. viš.). Krajši niz podatkov o izotopski sestavi padavin je na voljo tudi za padavinsko postajo Kozina (lega postaje 45°36'N, 13°56'E; 497 m n. m. viš.). Z obema postajama upravlja Agencija Republike Slovenije za okolje, z vzorčenjem mesečnih kompozitov padavin pa smo pričeli oktobra 2000. V Kozini je bilo vzorčenje zaustavljeno v decembru 2003, vzorčenje v Portorožu pa se še nadaljuje tako kot v Ljubljani. Na vseh treh padavinskih postajah je bilo izvedeno tudi vzorčenje dnevnih padavin in sicer v obdobjih od 1.10.2000 do 31.12.2000, 1.10.2001 do 31.12.2001 ter 1.10.2002 do 31.3.2003. Podatki o izotopski sestavi padavin v Portorožu in Kozini so do leta 2003 objavljeni v Vreča et al. (2005) in v bazi podatkov IAEA (2008a). Delne obdelave podatkov pa so predstavljene v Vreča et al. (2006, 2007).

Metodologija vzorčenja

Navodila za vzočenje padavin za določanje izotopske sestave so podana na internetnih straneh IAEA (2008b). Ključno pri tem je, da preprečimo izhlapevanje, ki lahko znatno vpliva na končni rezultat. Vzorčenje padavin za mesečne vzorce je potekalo v Ljubljani, Portorožu in Kozini na dežemerih s premerom odprtine 16 cm, dnevni vzorci pa so se zbirali v dežemerih s premerom odprtine 54 cm. Do oktobra 2002 se je v Portorožu uporabljal vzorčevalnik z odprtino premera 25 cm.

Med raziskavami se je pokazalo, da je uporaba parafinskega olja, ki ga priporoča IAEA, za vzorčenje mesečnega kompozita zelo neracionalna, saj se v zbiralniku nabirajo tudi prah, rastlinski ter živalski ostanki, kar prepreči enostavno ločevanje vode od parafina ob koncu meseca. Hkrati nastane pri tem odpadki, ki ga je potrebno ustrezno uničiti. Ugotovili smo, da je najbolj ekonomično in enostavno, da vzorec padavin iz zbiralnika odvezujemo čim prej po padavinskem dogodku.

Analitika

Izotopska sestava padavin je bila do konca leta 2003 merjena na Institutu Jožef Stefan na masnem spektrometru Varian MAT 250 z dvojnem uvajalnim sistemom. Izotopska sestava kisika ($\delta^{18}\text{O}$) je bila merjena z uravnoveženjem sistema voda- CO_2 (Epstein in Mayeda, 1953). Izotopska sestava vodika ($\delta^2\text{H}$) pa je bila merjena v plinu H_2 , ki nastane z redukcijo vode na vročem cinku. Do leta 1988 se je za meritve uporabljala dinamična metoda, po tem pa statična metoda (Pezdič, 1999). V letu 1998 je bila uvedena metoda redukcije preko vročega kroma, v skladu s predlogom po Gehre et al. (1996). Od leta 2004 se izotopska sestava vzorcev meri na inštitutu Joanneum Research v Gradcu - Avstrija.

Meritve izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) potekajo na masnem spektrometru z dvojnimi uvajalnimi sistemom Finnigan DELTA^{plus} z uravnoteženjem sistema voda-CO₂. Določitev izotopske sestave vodika ($\delta^2\text{H}$) poteka na masnem spektrometru Finnigan DELTA^{plus} XP z zveznim tokom in visokotemperaturnim grelcem HEKAtech in redukcijo preko vročega kroma (Morrison et al., 2001). Pri meritvah se uporabljajo laboratorijski standardi, ki so periodično kalibrirani z mednarodnimi standardi priporočenimi s strani IAEA. Točnost je pri vseh meritvah $\delta^{18}\text{O}$ boljša kot $\pm 0,1$ ‰ in pri meritvah $\delta^2\text{H}$ boljša kot ± 1 ‰.

Prikaz in obdelava podatkov

Pri obdelavi podatkov o izotopski sestavi padavin praviloma izhajamo iz osnovnih opisnih statistik (povprečje, minimum in maksimum). Ker pa je izotopska sestava padavin v veliki meri povezana s količino padavin, pri prikazu vrednosti uporabljamo tudi tehtana povprečja.

$$X = \frac{\sum_i P_i X_i}{\sum_i P_i}$$

kjer X označuje $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ali d , oznaka P pa višino padavin in i posamezen mesečni vzorec. Seštevanje praviloma izvedemo preko celotnega niza vzorcev ali pa preko posameznega časovnega obdobja (npr. koledarskega leta). Pri obdelavi podatkov s tehtanimi povprečji velja načelo, da upoštevamo le tiste vzorce, pri katerih je bilo odvzetih vsaj 70 % padavin, ki so padle v mesecu i .

Iz predhodno podane teorije izhaja, da so vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ med seboj povezane, ker pa sta oba podatka podvržena merski napaki, pri izračunu padavinskih premic uporabimo ortogonalno regresijo in ne metode najmanjših kvadratov, pri kateri regresijsko premico računamo le na podlagi vsote najmanjših kvadratov odvisne spremenljivke. (IAEA, 2002) Tako izračunamo naklon premice:

$$a = \frac{s(\delta^2\text{H})}{s(\delta^{18}\text{O})}$$

kjer je s standardna deviacija statističnega vzorca $\delta^{18}\text{O}$ ali $\delta^2\text{H}$.

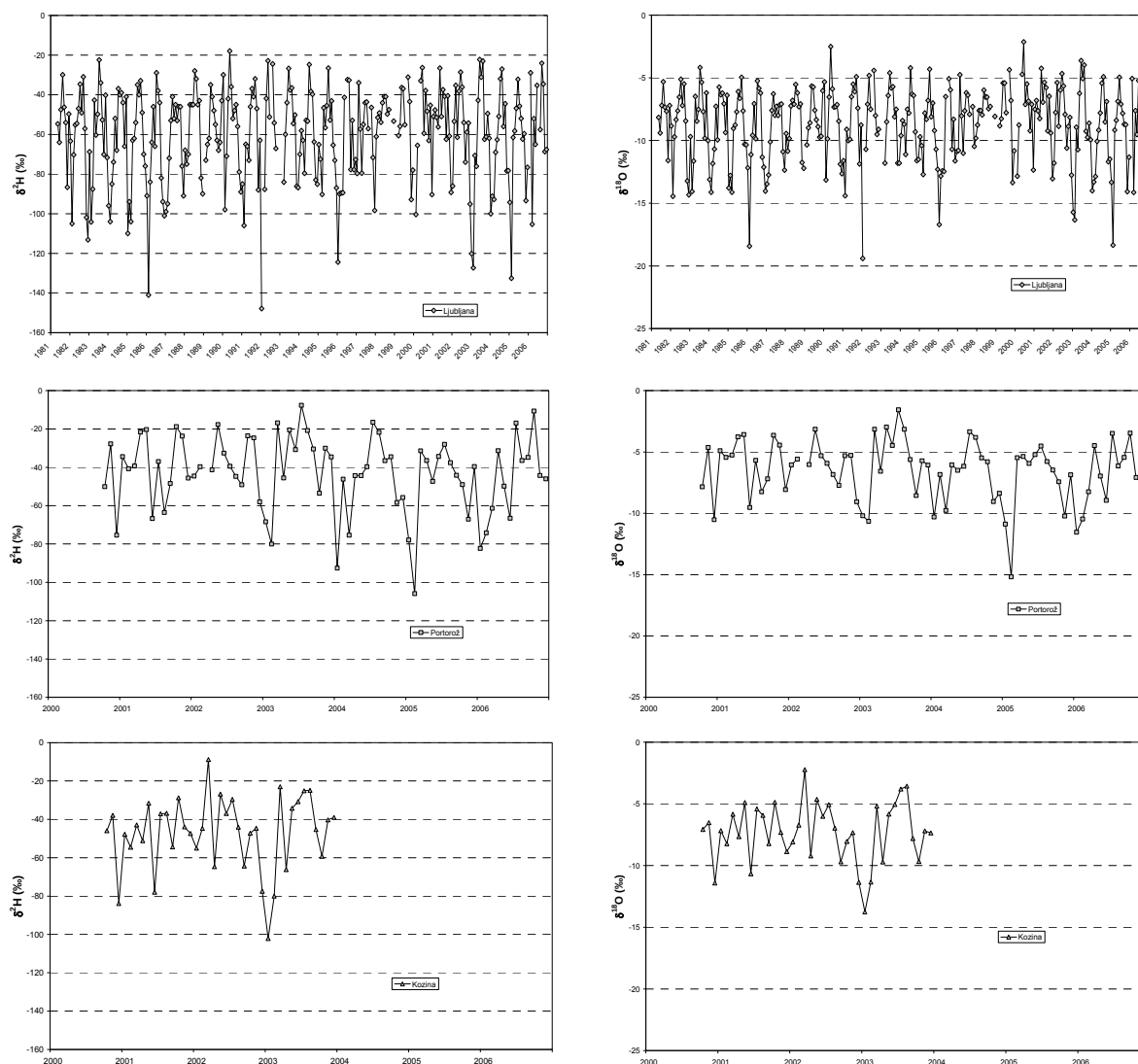
Rezultati

Ljubljana

Spreminjanje vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ v celotnem opazovanem obdobju je prikazano na Sliki 3. Opažene sezonske spremembe $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ so značilne za kontinentalne postaje severne poloble. Srednje tehtane vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ znašajo -59 ‰ in -8,6 ‰. Lokalno padavinsko premico (LMWL), ki je zelo blizu GMWL, lahko zapišemo kot:

$$\delta^2\text{H} = (8,1 \pm 0,1)\delta^{18}\text{O} + (9,8 \pm 0,7)$$

Devterijev presežek d se praviloma giblje na intervalu med 5 ‰ in 15 ‰, srednja tehtana vrednost pa znaša 9,5 ‰. Te vrednosti nakazujejo prevladujoči vpliv zračnih mas iz Atlantika (Gat in Dansgaard, 1972; Rozanski et al., 1993). Nekatere nižje vrednosti d , ki so prisotne v nizu, verjetno nakazujejo vpliv sekundarnih procesov izhlapevanja, kot je na primer izhlapevanje vode med padanjem dežnih kapljic skozi suho atmosfero (Araguas-Araguas et al., 2000; Peng et al., 2004), do takšnih vrednosti pa lahko pride tudi pri negativnem vzorčenju. Višje vrednosti d so značilne za jesensko obdobje in jih lahko pripišemo vplivu Sredozemske ciklogeneze, ki ima v tem času prevladujoč vpliv v jugozahodni Sloveniji (Vreča et al., 2007), vpliva pa tudi na Ljubljano.



Slika 3 – Prikaz nihanja izotopske sestave padavin v Ljubljani, Portorožu in Kozini

Interpretacija izotopskih meritev, ki je bila podana na podlagi mešalnih modelov med različnimi izvornimi območji padavin, je pokazala, da sredozemske zračne mase prispevajo v Ljubljani do 26 % letnih padavin (Vreča et al., 2006). Povprečni koeficient naklona regresijske premice med povprečno mesečno temperaturo in izotopsko sestavo kisika $\delta^{18}\text{O}$ znaša 0,29 ‰/°C. Enako vrednost zasledimo tudi pri drugih padavinskih postajah na severni polobli.

Portorož in Kozina

Spreminjanje vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ v celotnem opazovanem obdobju je prikazano na Sliki 3. Srednje tehtane vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ znašajo za Portorož -40 ‰ in -6,3 ‰, za Kozino pa -50 ‰ in -7,8 ‰ (Vreča et al, 2006). Lokalno padavinsko premico (LMWL) lahko zapišemo kot:

$$\delta^2\text{H} = (7,7 \pm 0,4)\delta^{18}\text{O} + (7,3 \pm 2,2) \text{ za Portorož}$$

$$\delta^2\text{H} = (7,7 \pm 0,3)\delta^{18}\text{O} + (9,6 \pm 2,2) \text{ za Kozino}$$

Obe lokalni padavinski premici sta blizu globalne premice, vendar naklon padavinske premice za Portorož nakazuje vpliv izhlapevanja. To izhlapevanje je lahko tako kot v Ljubljani posledica izhlapevanja dežnih kapljic med padanjem v suhem ozračju ali pa izhlapevanja vzorčevanih padavin na vzorčevalniku (Vreča et al., 2007). Tudi na obeh opazovanih postajah se tako kot v Ljubljani vrednost d večinoma giblje med 5 ‰ in 15 ‰, srednja tehtana vrednost pa znaša 10,3 ‰ za Portorož in 12,3 ‰ za Kozino. Višje vrednosti d so značilne za jesensko obdobje in so povezane z vplivom Sredozemske ciklogeneze na tem območju ter so izrazitejšje v Kozini (Vreča et al., 2007).

Iz mešalnih modelov izhaja, da je v Kozini delež padavin, ki izvirajo iz Sredozemlja 62 %. Podoben izračun je bil izveden tudi za Portorož, vendar model ni podal konsistentnih rezultatov (Vreča et al., 2006), vzroke za neustreznost modela pa je potrebno še raziskati.

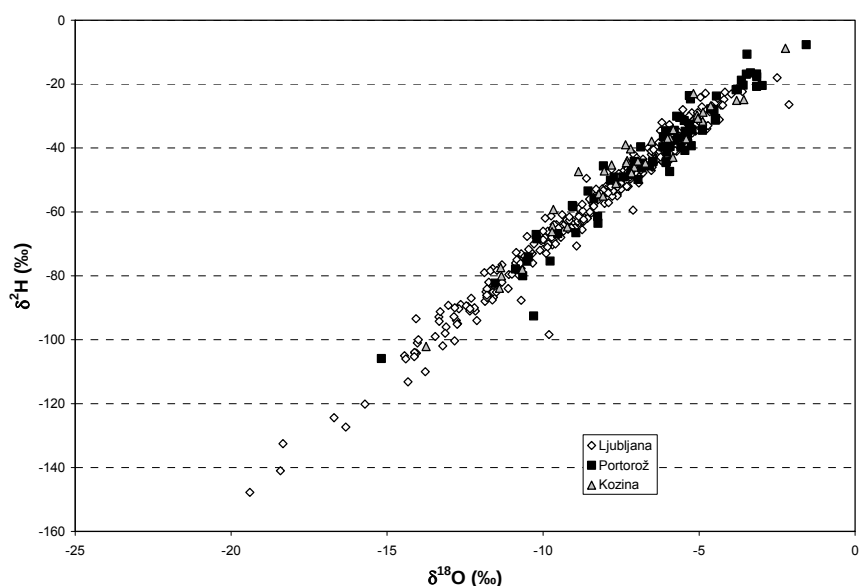
Zaradi omejene razpoložljivosti podatkov je bil temperaturni koeficient za vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ določen le za Portorož in znaša 0,11 ‰/°C (Vreča et al., 2006). Takšen koeficient je praviloma značilen za padavine v obmorskem pasu.

Primerjava med postajami

Najvišje vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ so značilne za obalno postajo Portorož in najnižje za postajo Ljubljana, kar je posledica spreminjanja izotopske sestave padavin zaradi kontinentalnega efekta v smeri jugozahod-severovzhod (Slika 4). Povprečna razlika v izotopski sestavi med obalo in centralno Slovenijo znaša 19 ‰ za $\delta^2\text{H}$ in 2,3 ‰ za $\delta^{18}\text{O}$. Poleg tega so za Ljubljano značilna večja nihanja v izotopski sestavi kot za Portorož, kar je posledica večjih temperaturnih nihanj v centralni Sloveniji.

Primerjava med padavinskima postajama Portorož in Kozina, ki sta si relativno blizu, pokaže velike razlike v izotopski sestavi padavin, kar kaže na njihov različen izvor. Padavinska postaja Portorož kaže predvsem na padavine, ki izvirajo iz južnih zračnih mas, te pa prevladujejo v obdobju jesen-zima. Za padavinsko postajo Kozina je bilo sprva pričakovano, da je izotopksa sestava padavin podobna tistim v Portorožu in da je razlika vezana predvsem na višinski efekt, toda meritve so pokazale, da temu ni tako in da gre za mnogo bolj kompleksne procese, saj zaradi lokalnega reliefa prihaja do mešanja kontinentalnih zračnih mas z masami, ki izvirajo iz Sredozemlja. Dodatno interpretacijo zaplete še burja. Meritve izotopske sestave padavin v Kozini nakazujejo, da se znotraj enega obdobja padavin izvor vode v padavinah s časom spreminja (Vreča et al., 2007).

Na osnovi podatkov pridobljenih v Portorožu in Kozini smo določili tudi višinski efekt, ki znaša za obravnavano območje približno 0,30 ‰ na 100 m višinske razlike (Vreča et al., 2006). Podatek je zelo pomemben v hidroloških aplikacijah, kjer služi za izračun višine srednjega napajalnega zaledja vodonosnikov (npr. Brenčič, 2008), ki je višje od višinskega efekta 0,20 ‰ na 100 m v notranjosti Slovenije (Brenčič in Poltnig, 2008).



Slika 4 – Spreminjanje izotopske sestave vodika v odvisnosti od izotopske sestave kisika

Sklep

Uporaba stabilnih izotopov kisika in vodika ima v hidrologiji in hidrogeologiji že dolgo tradicijo. Uporablja se jih pri študijah številnih procesov, od ugotavljanja izvora vode v površinskih vodnih telesih do ugotavljanja nekaterih hidrodinamskih parametrov v vodonosnikih. Pomembna informacija, ki jo potrebujemo pri ugotavljanju teh zakonitosti, je tudi izotopska sestava padavin. Poleg tega pa se izkaže, da je izotopska sestava padavin prav tako pomemben parameter, s pomočjo katerega lahko ugotavljamo izvor posameznih zračnih mas in njihovega mešanja.

V članku smo predstavili nekatere meritve izotopske sestave padavin v Ljubljani, kjer že od leta 1981 poteka sistematično vzorčenje mesečnih kompozitov, in meritve izotopske sestave padavin v Portorožu in Kozini. Te meritve so pokazale kompleksen izvor vlažnih zračnih mas in prisotnost nekaterih sekundarnih procesov, kot je na primer izhlapevanje dežnih kapljic med njihovim padanjem skozi suho ozračje.

Odprtih je še veliko vprašanj, ki terjajo nadaljnje raziskave. Pridobljeni podatki pa so tudi pomembne informacije pri študiji dinamike podzemne vode. Z raziskavami izotopske sestave padavin je potrebno nadaljevati, prav tako pa bi bilo zelo smiselno, če bi mrežo opazovanj razširili na večje število padavinskih postaj po celi Sloveniji.

Zahvala

Predstavljeni rezultati so plod dolgoletnih raziskav na področju izotopske sestave padavin v Sloveniji, ki so potekale tekom zadnjih 27 let v okviru različnih domačih in mednarodnih projektov. Avtorja se zahvalujeta vsem sodelavcem, ki so v preteklosti pri raziskavah sodelovali. Prispevek je bil pripravljen v okviru programov "Kroženje snovi v okolju, snovna bilanca in modeliranje okoljskih procesov ter ocena tveganja" in "Podzemne vode in geokemija", ki ju financira ARRS.

Literatura

- Araguas-Araguas, L., Fröhlich, K. & Rozanski, K. 2000: Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrol. Process.* 14: 1341-1355.
- Brenčič, M., 2008: Hydrogeochemistry of coastal carbonate aquifer in Lucija - Portorož (Gulf of Trieste, N Adriatic Sea, Slovenia). *Acta Carsologica* – v pripravi.
- Brenčič, M. & Poltnig, W., 2008: Podzemne vode Karavank – skrito bogastvo. Geološki zavod Slovenije & Joanneum Research, 143 str., Ljubljana, Graz.
- Clark, I. & Fritz, P. 1997: *Environmental isotopes in hydrology*, CRC Press, 328p.
- Craig, H. 1961: Isotope variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702-1703.
- Craig, H. & Gordon, L. 1965: Deuterium and oxygen-18 in the ocean and the marine atmosphere. In *Stable isotopes in Oceanographic studies and paleotemperatures*. Tongiorgi E. (Ed.), Spoleto, 9-130.
- Dansgaard, W. 1964: Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-468.
- Epstein, S. & Mayeda, T.K. 1953: Variations of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* 4: 213-224.
- Gat J.R. 1996: Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24: 225-262.
- Gat, J.R. & Dansgaard, W. 1972: Stable isotope survey of the freshwater occurrences in Israel and the Jordan Rift Valley. *J. Hydrol.* 16: 177-211.
- Gehre, M., Hoefling, R., Kowski, P., Strauch, G. 1996: Sample preparation device for quantitative hydrogen isotope analysis using chromium metal. *Anal. Chem.* 68: 4414-4417.
- Gourcy, L.L., Groening, P.K. & Aggarwal, P.K. 2005: Stable oxygen and hydrogen isotopes in precipitation. In: Aggarwal, P.K., Gat, J.R., Froehlich, K. (Eds.) *Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science*. Dordrecht: Springer, 39-51.
- IAEA 2002: *Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitations*. IAEA, Vienna.
- IAEA, 2008a: *Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database*. <http://nds121.iaea.org/wiser/>, zadnji dostop 30.11.2008.
- IAEA, 2008b: <http://www.naweb.iaea.org/NAALHL/publications1.shtml>, zadnji dostop 30.11.2008.
- Ingraham, N.L. 1998: Isotopic variations in precipitation. In *Isotope tracers in catchment hydrology*. Kendall C., McDonnell J.J. (Eds.), Elsevier, 87-118.
- Lucas, L.L. & Unterwieser, M.P. 2000: Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *J. Res. Natl. Stand. Technol.* 105: 541-549.
- Morrison, J., Brockwell, T., Merren, T., Fourel, F. & Phillips A.M. 2001: On-line high-precision stable hydrogen isotopic analyses on nanoliter water samples. *Analytical Chemistry* 73: 3570-3575.
- Peng, H., Mayer, B., Harris, S. & Krouse, H. R. 2004: A 10-yr record of stable isotope ratios of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada. *Tellus* 56B: 147-159.
- Pezdič, J., 1999: *Izotopi in geokemijski procesi*. Univerza v Ljubljani, 270 str.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. & Gonfiantini, R. 1993: Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophys. Monogr.* 78: 1-36.
- Schotterer, U., Oldfield, U. & Froehlich, K. 1996: *GNIP – Global Network for Isotopes in Precipitation*, IAEA, 48p.
- Vreča, P., Kanduč, T., Žigon, S. & Trkov, Z. 2005: Isotopic composition of precipitation in Slovenia. In *Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean basin in relation to air circulation patterns and climate*, L. Gourcy (Ed.), pp. 157-172, IAEA-TECDOC-1453, IAEA, Vienna.
- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Horvatinčić, N. & Barešić, J. 2006: Isotopic characteristics of precipitation in Slovenia and Croatia: comparison of continental and maritime stations. *J. Hydrol.* 330: 457-469.

- Vreča, P., Brenčič, M. & Leis, A. 2007: Comparison of monthly and daily isotopic composition of precipitation in the coastal area of Slovenia. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 43: 307-321.
- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Leis, A., Brenčič, M., 2008: Isotopic composition of precipitation in Ljubljana (Slovenia). *Geologija* 51/2: 169-180.

Vetrovnost v Sloveniji

Jože Rakovec¹, Renato Bertalanič², Jure Cedilnik², Gregor Gregorič^{1,2},
Gregor Skok¹, Mark Žagar^{1,2}, Nedjeljka Žagar¹

Povzetek

Predstavljeni so podatki o izmerjenem vetru na nekaterih izbranih meteoroloških postajah ter mesečne in letne geografsko referencirane karte izračunane povprečne hitrosti in izračunane gostote moči vetra 10 m in 50 m nad tlemi. Na koncu prikazujemo tudi kritično primerjavo med modelskimi vrednostmi ter nekaterimi meritvami po nižinah, z nekaterimi drugimi študijami vetrovnosti pri nas in v naši širši okolici, ter nam dostopnimi (izrazito redkimi) meritvami vetra na gorskih grebenih. Monografija z istim naslovom je v tisku pri ZRC SAZU.

Uvod

Precej uporabnikov se za vetrovnost zanima zaradi morebitne izrabe vetrne energije. V tem prispevku žal ne moremo postreči neposredno s podatki meritev vetra na najbolj prevetrenih gorskih grebenih. Podatki meteoroloških postaj, ki so javni in torej uporabljeni tudi v tej študiji, so namreč merjeni predvsem po nižinah, javnih in uradnih podatkov o meritvah vetra na bolj prevetrenih višjih legah pa je prav malo: javno so dostopni pravzaprav samo merjeni podatki po publikaciji Wep 1 (ENH, 2003), saj so v okviru projekta Wep 1 ocenili tako vetrovnost kot ustreznost lokacij za izrabo vetrne energije za pet evropskih regij – med njimi tudi za našo Primorsko. Vse druge meritve, ki jih dalj časa izvajajo potencialni graditelji vetrnih elektrarn na gorskih grebenih Alpsko-Dinarske pregrade v Sloveniji, pa so njihova poslovna skrivnost in niso splošno dostopni. Tako smo se pri naši študiji znašli v zagati glede tega, kako pravilno oceniti vetrovnost na takih izpostavljenih lokacijah. Zato smo se v tej študiji lotili ocene vetrovnosti na alternativni način – nismo jih pridobili neposredno iz podatkov, ampak smo jih določili z meteorološkimi modeli, takimi, ki se sicer uporabljajo za napovedovanje vremena. Za izračun smo vzeli časovno obdobje osmih let 1994–2001. Kratek povzetek metode je podan v nadaljevanju.

Vetrovi v Sloveniji so glede na razmere drugod po Evropi večinoma šibki, kadar pa so močni, so časovno in prostorsko omejeni (Troen & Petersen 1989). Nanje bistveno vplivajo Alpe, saj je Slovenija v njihovem zavetrju, kadar pihajo zahodni, severozahodni ali severni vetrovi. Splošni vetrovi iz vzhodnih kvadrantov pa so pri nas redkejši. Od močnejših vetrov naj posebej omenimo dokaj enakomeren jugozahodnik, precej bolj sunkovito burjo in viharji, a k sreči le občasno se pojavljajoči karavanški fen. Poleg teh se močan in kratkotrajen, le nekaj minut trajajoč piš pojavlja tudi ob nevihtah. Hitrosti jugozahodnika nad morjem, kjer piha kot jugo, so pri tleh do 15 m/s (54 km/h), izjemoma

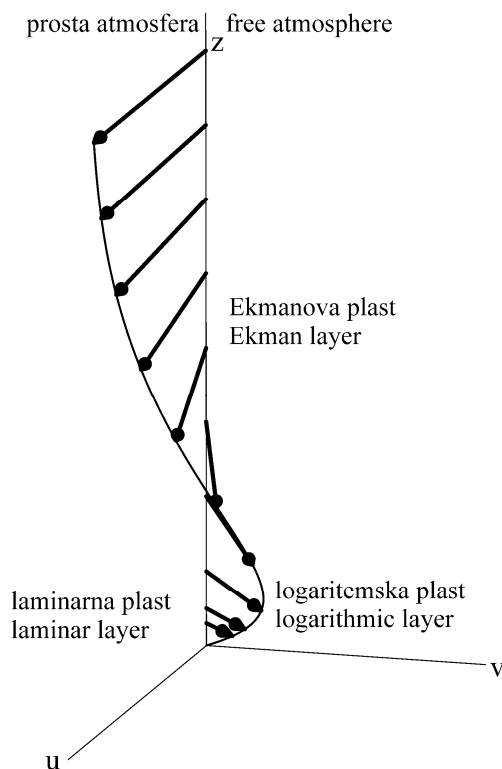
¹ Jože Rakovec, Gregor Skok in Nedjeljka Žagar, UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Katedra za meteorologijo

^{1,2} Mark Žagar in Gregor Gregorič, Agencija RS za okolje – ARSO in UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Katedra za meteorologijo

² Renato Bertalanič in Jure Cedilnik, Agencija RS za okolje – ARSO

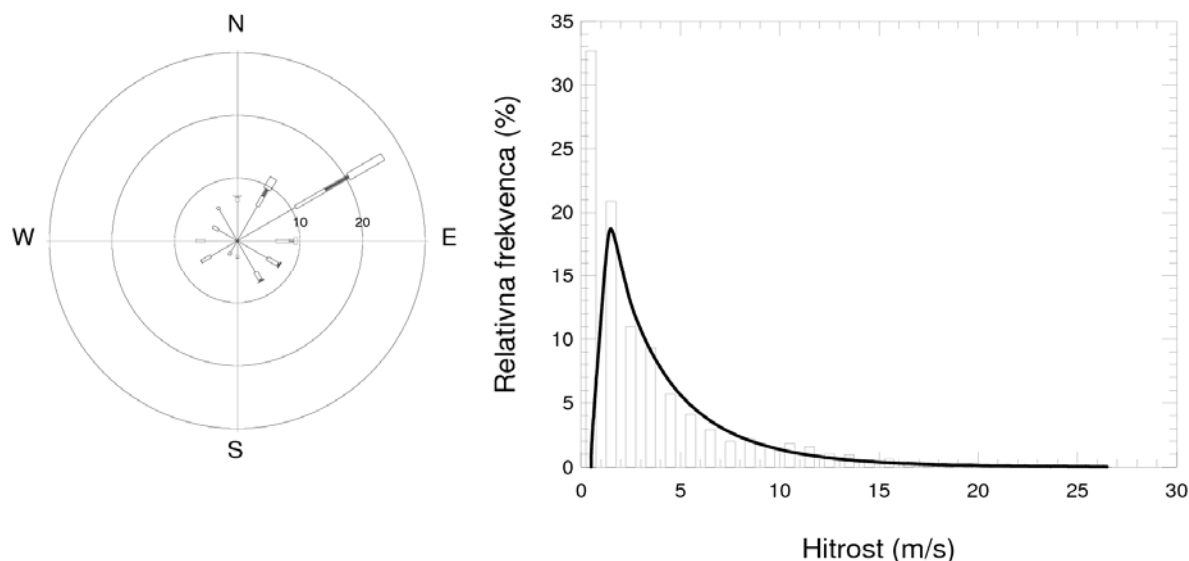
do 25 m/s (90 km/h). Jugo ne seže dlje kot do kraškega roba. Ko nad morjem in ob obali piha jugo, je tudi v notranjosti Slovenije vetrovno, vendar je prizemni veter nad kopnim zaradi večjega trenja ob tla šibkejši. Največje hitrosti doseže na grebenih, ki ležijo pravokotno na južno in jugozahodno smer. Trajanje juga je omejeno in večinoma ni daljše od dveh dni. Na leto je takšnih situacij okoli 20. Burja, sunkovit veter iz severovzhodne smeri, je najizrazitejši in najmočnejši veter na Slovenskem. Po prehodu hladne fronte sredozemskega ciklona se okoli vzhodnega roba Alp v panonski bazen in ob tem tudi nad osrednjo Slovenijo zgrne hladen zrak, ki se prek dinarskih gorskih planot (Trnovski gozd, Nanos, Javorniki, Snežnik, Kras) po njihovih zahodnih in južnih pobočjih pospešuje navzdol proti Jadranu. Burja se začne nenadoma s prvimi sunki in je tudi sicer sunkovita: njena hitrost se v kratkem času lahko poveča ali zmanjša za desetkrat. Burja je v zahodnem delu Slovenije (Primorska, Obala in Notranjska) reden pojav (nekaj deset dni na leto) in občasno je zelo močna. Burja je tako pogost veter, da se v naravi kaže npr. s trajnimi deformacijami drevja, pa tudi v klimatskih prikazih. Karavanški fen je v primerjavi z burjo dosti redkejši pojav, zgodi se morda enkrat ali dvakrat na leto, večinoma v hladni polovici leta, izrazito vetrovno neurje te vrste pa le vsakih nekaj let. Veter je enakomeren, razmeroma topel in suh. Tako kot burja je tudi karavanški fen padajoč veter. Največje hitrosti se pojavijo v dolinah, ki so pravokotne na greben Karavank, saj tam prihaja tudi do stekanja (Mošenik in Tržiška Bistrica, Kokra, Kamniška Bistrica). Karavanški fen seže tudi v Julijske Alpe in Ljubljansko kotlino.

Veter blizu tal se z višino močno spreminja: nad homogeno pokrajino je prav blizu tal – na višini parametra hrapavosti z_0 je hitrost enaka nič, potem se do višine okrog 100 ali 150 povečuje samo hitrost – približno logaritmčno, od tam navzgor pa se spreminja tudi smer. V goratem svetu so razmere še mnogo bolj zapletene, saj se veter prilagaja reliefu: piha okrog hribov in skozi doline, preko sedel gorskih grebenov itd.

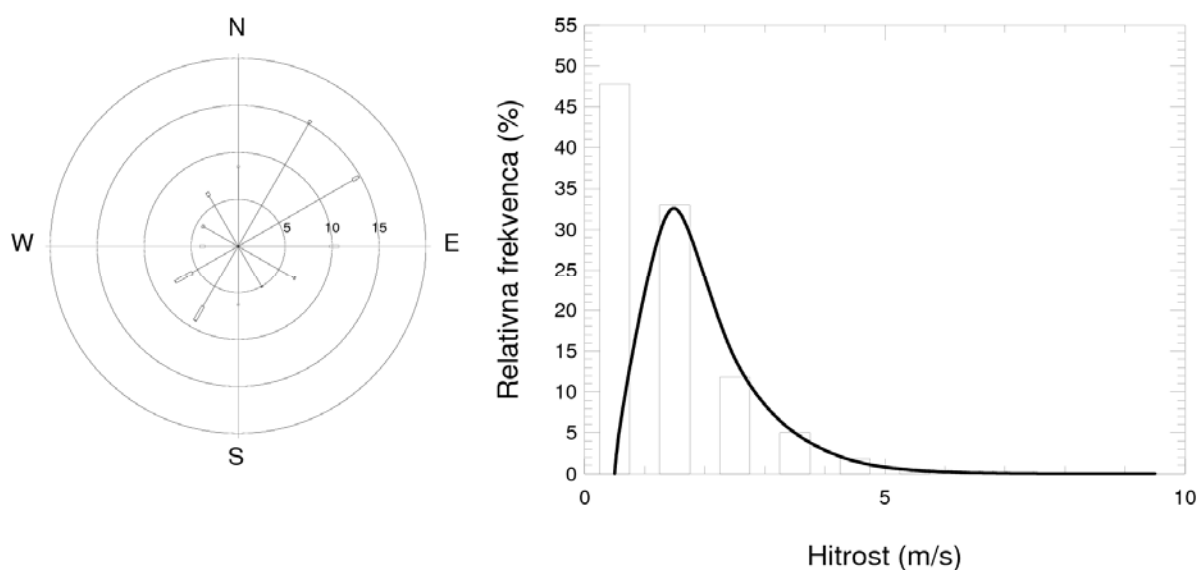


Slika 1: Potek vetra z višino nad homogenim terenom

Neprekinjenih meritev vetra, ki bi tudi trajale daljše obdobje, je v Sloveniji le malo. Zato se glede meritev naslonimo na petnajstletno obdobje od začetka 1990 do konca 2004, ko je v Sloveniji delovalo 43 meteoroloških postaj z registriranimi (večinoma elektronskimi) anemometri. Tako kot pri drugih meteoroloških meritvah lahko tudi pri meritvah vetra ugotovimo, da so meritve po višinah reliefa Slovenije porazdeljene neenakomerno: Slovenija je z meritvami vetra razmeroma enakomerno pokrita do nadmorske višine okoli 500 metrov (to ustreza približno povprečni višini reliefa Slovenije, ki je 557 m), nad to višino pa je pokritost z merjenji razmeroma slaba. Statistično obdelane podatke za dve izbrani merilni postaji – Ajdovščino in Ljubljano – podajamo tukaj samo v grafični obliki: z rožo vetrov in s porazdelitvijo po razredih hitrosti.

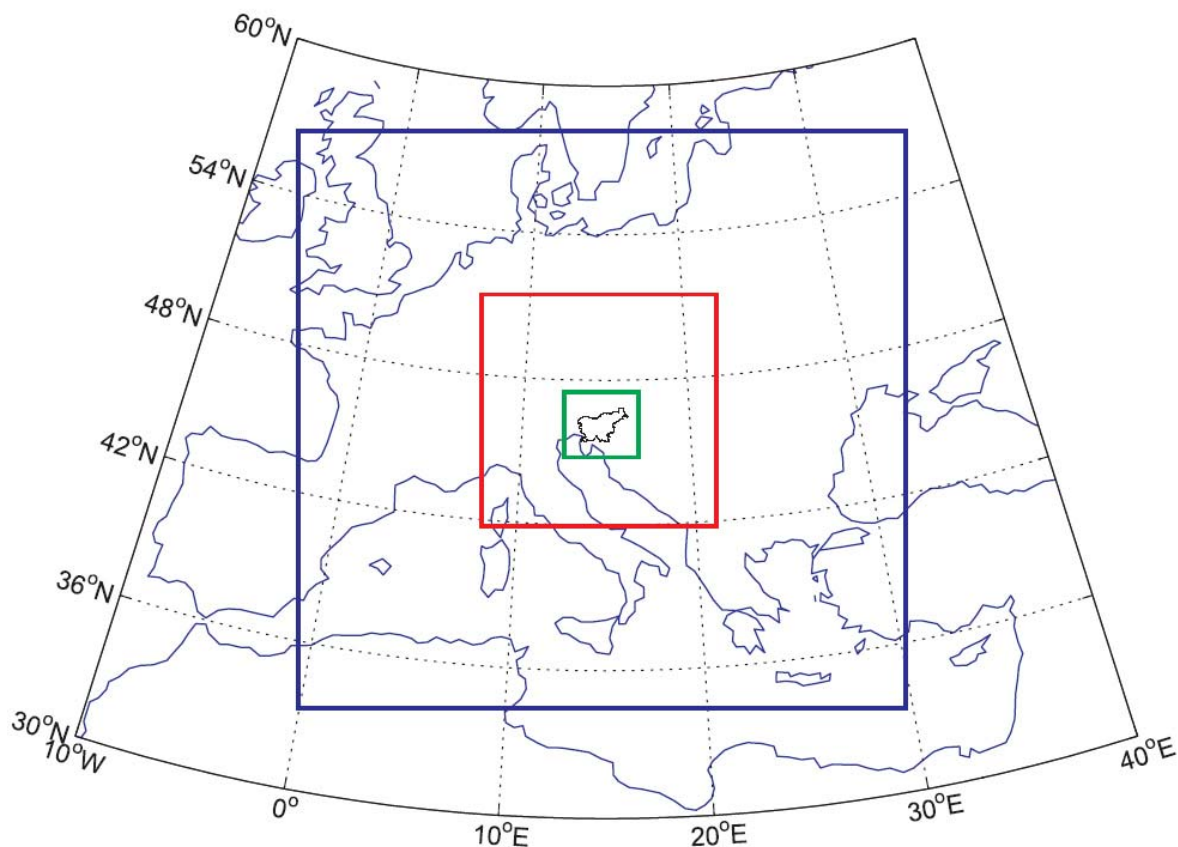


Slika 2: Izmerjeni podatki o vetru v Ajdovščini: roža vetrov (levo) in porazdelitev po hitrosti (desno)



Slika 3: Kot Slika 2, le za Ljubljano

Za izpostavljene lege neposrednih podatkov o vetru nimamo, pa tudi sicer jih ni dovolj za npr. statistični pristop k izdelavi kart s geostatističnimi metodami s podatki iz točkovnih meritev vetra. Zato smo uporabili dinamični numerični modelski pristop, ki je na meritve vezan le posredno: preko vhodnih podatkov vseh meteoroloških količin (ne le vetra) v veliki prostorski skali celotnega ozračja in ob koncu, ko izračunane vrednosti primerjamo z izmerjenimi v nekaterih točkah. Ko poznamo razmere v veliki prostorski skali, se lotimo podrobnejšega modeliranja na območju celotne Evrope, potem pa še čedalje podrobnejšega nad vse manjšimi območji nad Slovenijo in njeno okolico. Prilagoditve polja vetra na manjšo prostorsko skalo izračunamo s pomočjo dinamičnih meteoroloških modelov, ki se v današnjem času v meteoroloških službah uporabljajo za kratkoročno napovedovanje vremena in ki lahko služijo tudi za klimatske študije – če z njimi simuliramo dogajanja skozi več let ali celo desetletij – v našem primeru smo računali za osem let: 1994–2001. Osnovni vir objektivnih meteoroloških podatkov je bil v našem primeru arhiv reanaliz ozračja Evropskega centra za srednjeročne prognoze (ECMWF) – ERA-40. To je arhiv meteoroloških polj, ki so ga ustvarili s pomočjo bogate 40-letne zbirke podatkov in najsodobnejših računalniških meteoroloških orodij. Žal pa je njihova prostorska ločljivost precej slaba – nad Evropo znaša razdalja med mrežnimi točkami približno 120 km. Zato smo nad omejenim območjem izračune v nekem smislu ponovili – polja ERA-40 so služila kot začetni in stranski robni pogoji za modeliranje v boljši ločljivosti. Začeli smo z modelom ALADIN s 30-kilometrsko ločljivostjo po horizontali. Izračuni, izvedeni z ALADIN-30 so služili kot ponovni vhod v model ALADIN – tokrat nad manjšim območjem (Slovenija in sosednje dežele – rdeč rob na Sliki 2) in z manjšo razdaljo med računskimi točkami (približno 10 km). Sledila je še dinamična adaptacija vetra z modelom ALADIN z ločljivostjo 2,5 km, adiabatno modelsko fiziko in manj računskimi nivoji po vertikali. To metodo smo poimenovali DADA. Veter na višini 10 m nad tlemi dobimo v tem modelu iz vetra na 50 m po logaritemskem profilu vetra s hrapavostjo $z_0 = 1$ cm. Za višino 50 m smo se odločili zato, ker je to višina, na kateri prav tako rišemo karte klimatologije vetra v Sloveniji ter na kateri predpostavimo, da je modelski veter najboljši, s čimer ta hip razpolagamo. Dodatno smo izračunali tudi polja vetra s kinematičnim masnokonsistentnim modelom Aiolos v ločljivosti 1 km. Opozoriti moramo, da so glede na meritve vrednosti v Vipavski dolini podcenjene, saj niti DADA niti Aiolos ne zmoreta popolnoma realistično simulirati pospeševanja toka burje po pobočjih navzdol.

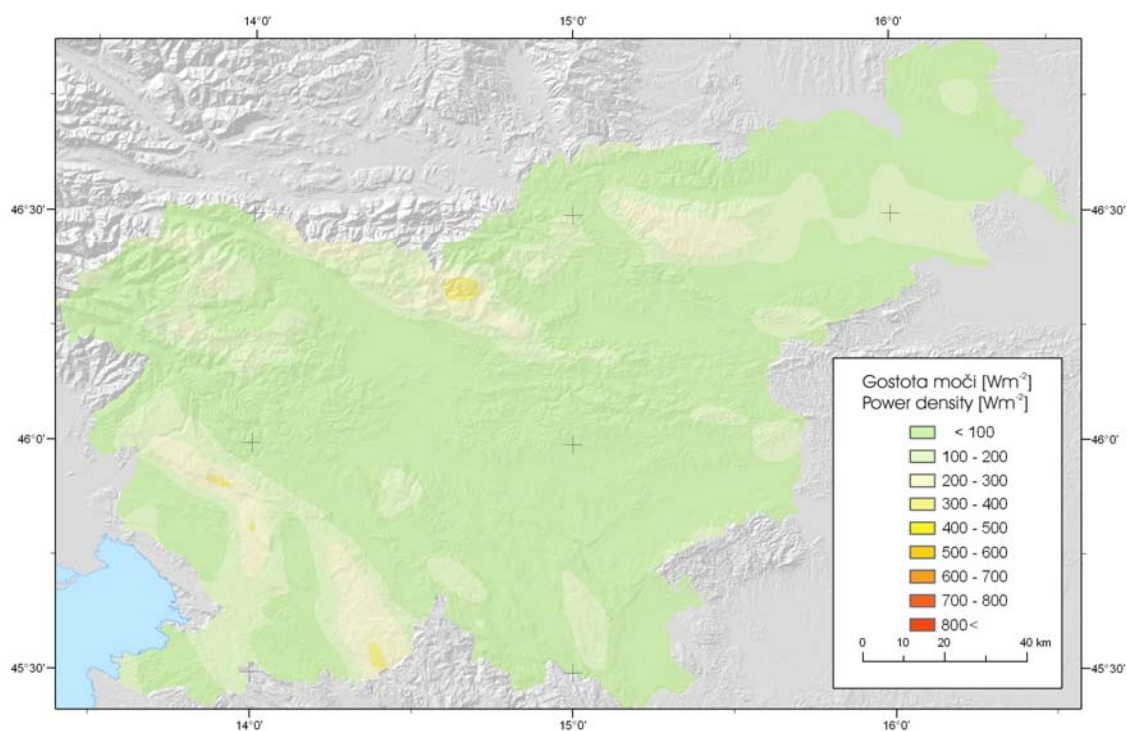


Slika 4: Območja, nad katerimi smo z meteorološkimi modeli računali polje vetra v celotnem ozračju od tal do višine okrog 30 km nad tlemi, v vse bolj in bolj podrobni prostorski ločljivosti.

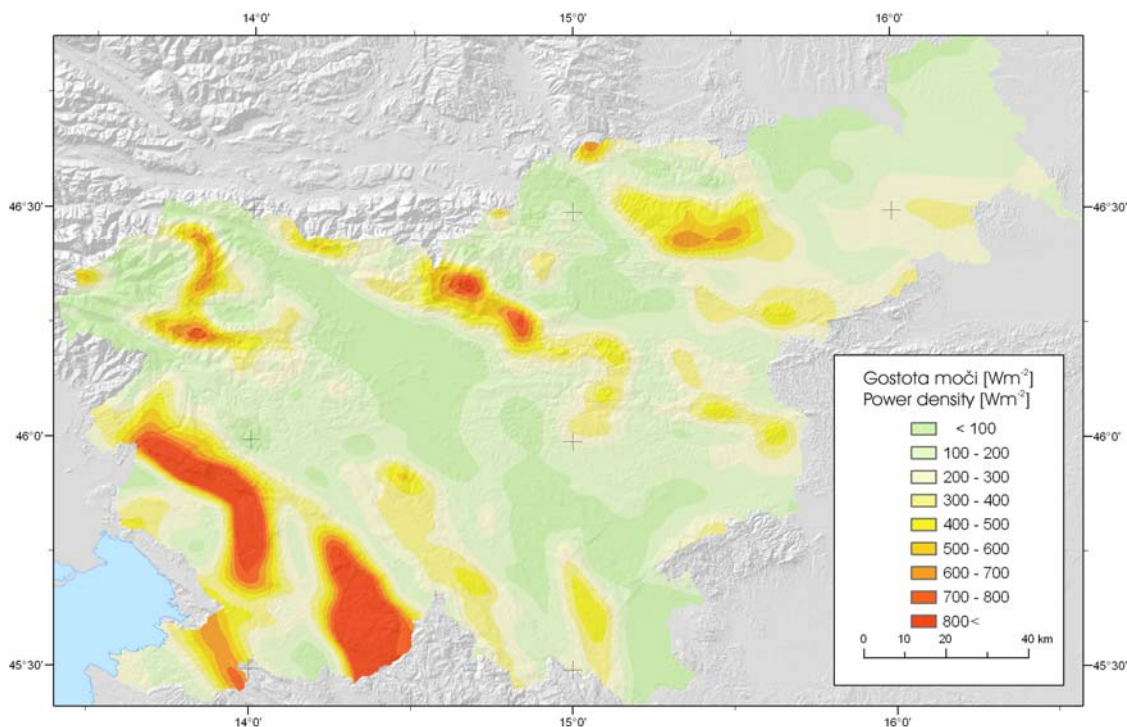
Višje hitrosti se višje nad tlemi seveda pojavljajo veliko pogosteje kot npr. na višini 10 m, kar je sicer standardna višina za meritve vetra na meteoroloških postajah. Vedno so hitrosti višje na najbolj izpostavljenih legah in večkrat se to zgodi pri jesenskih in zimskih mesečnih povprečjih (npr. od novembra do marca). Model DADA, ki je model z dinamičnim odzivom na delovanje sil, daje na splošno precej višje hitrosti, kot model Aiolos, ki samo kinematično preusmerja vetrove okrog in preko reliefnih ovir. Npr. na višini 10 m nad tlemi so v modelu DADA na najbolj izpostavljenih lokacijah – na grebenih Alpsko-Dinarske gorske pregrade ter Julijskih in Kamniško-Savinjskih Alp – v zimskih mesecih (od novembra do marca) hitrosti 6–7 m/s, sicer pa do 4–5 m/s. Po nižinah je pogosto hitrost vetra le 1–2 m/s. Model Aiolos pa daje predvsem boljšo predstavbo o regionalizaciji vetrovnosti, območja najvišjih hitrosti so zato bistveno manjša, pa tudi sama hitrost je za en razred nižja. Na višini 50 m nad tlemi pa je po modelu DADA hitrost vetra na izpostavljenih grebenih npr. v zimskem času v povprečju 7–8 m/s: za en razred hitrosti večja kot na manj izpostavljenih grebenih.

Karte povprečne modelske hitrosti vetra in gostote njegove moči so glavni rezultat študije. Moč vetra je sorazmerna s tretjo potenco hitrosti vetra – njeno povprečje izračunamo tako, da vsako vrednost potenciramo in potem povprečimo te tretje potence. V publikaciji v pripravi (Rakovec et al., 2009) bodo podane karte na višini 10 m in 50 m nad tlemi po modelu DADA in po masno konsistentnem modelu Aiolos, in to za hitrost in za gostoto moči vetra. Tukaj podajamo samo tri karte za gostoto moči na višini 50 m nad

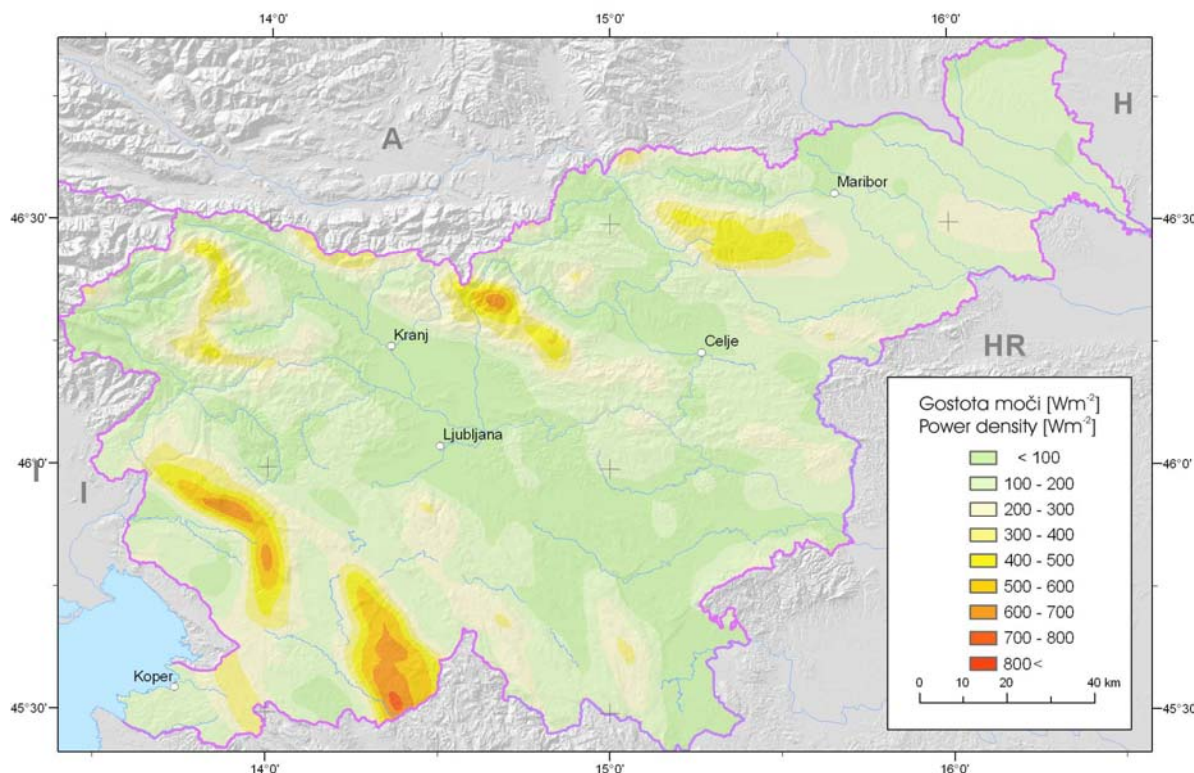
tlemi po modelu DADA – na tej višini zato, ker so sodobne vetrnice za izrabo vetrne energije vsaj tako visoke ali pa še višje.



Slika 5: Gostota moči vetra 50 m nad tlemi po modelu DADA junija, ki je eden najmanj vetrovnih mesecev.



Slika 6: Gostota moči vetra 50 m nad tlemi po modelu DADA decembra, ki je eden najbolj vetrovnih mesecev.



Slika 7: Letno povprečje gostote moči vetra 50 m nad tlemi po modelu DADA

Komentar je k tem kartam po tem, kar smo že povedali o hitrosti vetra, in zaradi grafične predstavitve lahko prav kratak: po modelu DADA vrednosti segajo pozimi od manj kot 100 Wm^{-2} do preko 800 Wm^{-2} , poleti pa ne sežejo preko 400 Wm^{-2} .

Ker pa žal nimamo kaj dosti podatkov za primerjavo z neposrednimi meritvami v višjih legah, ne moremo s popolno gotovostjo trditi, ali dajejo naši modeli na teh vetrovnih območjih rezultate, ki so primerljivi s tistim v naravi. Vseeno lahko na podlagi primerjave z mesečnimi povprečji po meritvah Elektro Primorske (manjši niz podatkov za interne primerjave) in na podlagi primerjave s povprečji po meritvah v okviru projekta Wep 1 (ENH, 2003) sklepamo, da rezultati po modelu DADA (ločljivost $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$) dajejo dokaj dobro informacijo o prostorski porazdelitvi območij z bolj ali manj močnim vetrom – same vrednosti pa so najverjetneje podcenjene. Naše karte vetrovnosti je torej treba obravnavati v skladu s temi omejitvami. Ujemanje z razmerami v naravi ni povsod enako dobro. Posamezne napake, ki se pojavljajo pri hitrosti vetra in so pri tej kar sprejemljivo majhne, so pri moči vetra lahko seveda sorazmerno večje – zaradi potenciranja na tretjo potenco. Zato kart vetrovnosti ni smiselno jemati povsem kvantitativno (točno tolikšna ali tolikšna hitrost oz. moč vetra), temveč bolj kvalitativno – v smislu regionalizacije bolj ali manj vetrovnih območij v Sloveniji.

Zahvala

Raziskavo o sončni energiji v Sloveniji je financirala Agencija Republike Slovenija za okolje po pogodbi 2523-04-300351.

Literatura

- Jože Rakovec, Renato Bertalanič, Jure Cedilnik, Gregor Gregorič, Gregor Skok, Mark Žagar, Nedjeljka Žagar. Vetrovnost v Sloveniji (v pripravi za natis pri ZRC SAZU v začetku 2009, cca 166 str.).
- ENH, 2003: Wep 1 – Study of wind potential in five European regions. EHN Navarra in sod. (med njimi tudi Občina Vipava), 129 str.
- Troen I., Petersen E. L., 1989: European wind atlas. Risoe, National Laboratory, Roskilde, for the Commission of the European communities, 656 pp.

Sončna energija v Sloveniji

Jože Rakovec^{*}, Damijana Kastelec^{**} in Klemen Zakšek^{***}

Povzetek

Prispevek prinaša rezultate raziskave o sončni energiji v Sloveniji, katere izsledki so objavljeni v knjigi z istim naslovom, kot je naslov tega prispevka. V tej raziskavi smo opredelili globalni in kvaziglobalni sončni obsev (gostoto sončne energije, vpadle v določenem času na horizontalno oz. nagnjeno sprejemno površino) ter podatke o optimalnih naklonih in orientacijah sprejemnikov sončne energije za Slovenijo v obliki diagramov – vse to za desetletno obdobje 1994–2003. Obsevi so podani tudi kartografsko na georeferenciranih kartah globalnega obseva vodoravne površine in kvaziglobalnega obseva nagnjenih tal v Sloveniji.

Uvod

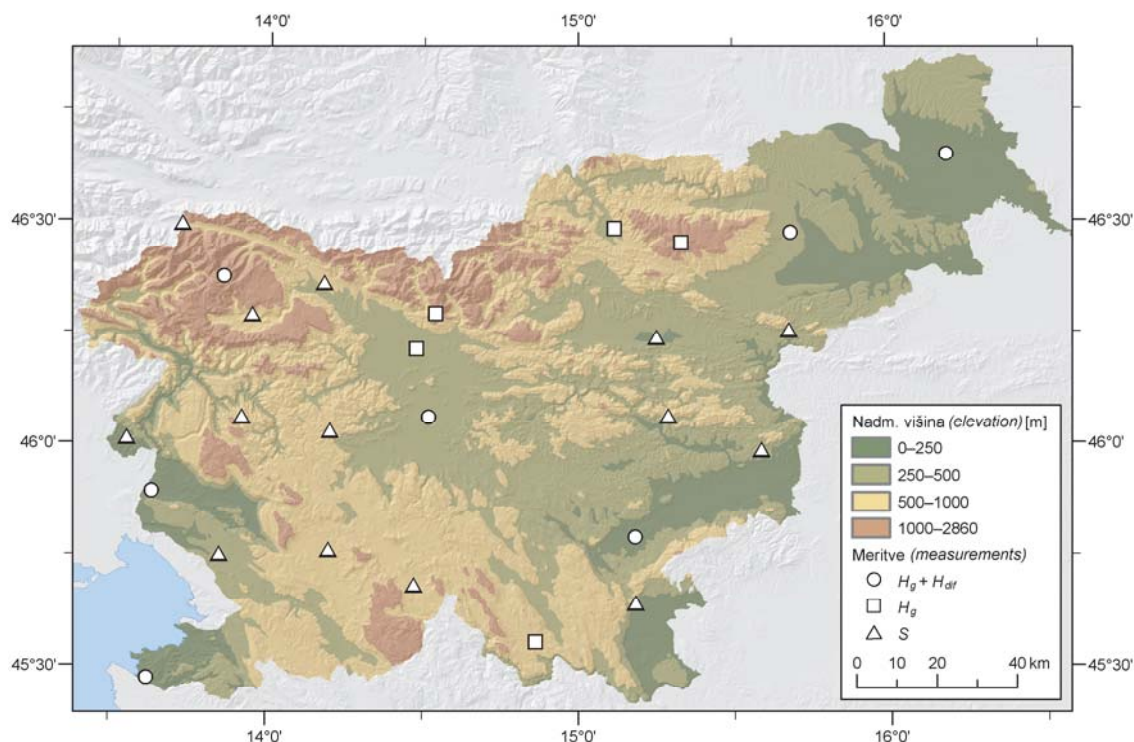
Ker je meritev sončne energije na meteoroloških postajah v Sloveniji le malo (Slika 1) in ker so rezultati teh meritev na več lokacijah na razpolago šele za zadnjih deset ali petnajst let, dobljeni rezultati žal niso v skladu s klimatološkim standardom o tridesetletnih obdobjih, ki naj bi zagotavljala reprezentativnost. Toda tudi v desetletnem obdobju 1994–2003 so dalj časa (sedem let ali dlje) merili globalni sončni obsev samo na 14 meteoroloških postajah (in na 8 od teh tudi posebej difuzni del sončnega obseva).

Za postaje, na katerih sončne energije niso merili vseh deset let, smo manjkajoče podatke časovno interpolirali iz meritev najbolj podobnih merilnih postaj in tako dobili tudi zanje desetletne nize izmerjenih vrednosti. Izmerjene in interpolirane vrednosti smo vsestransko logično in kritično pregledali, a ko smo na njihovi osnovi naredili preliminarne prostorske interpolacije za vso Slovenijo, so se še vedno ponekod pokazala nekatera nelogična odstopanja navzgor ali navzdol. Kjer je bilo mogoče, smo podatke še enkrat popravili, podatke iz nekaterih postaj pa smo morali iz nadaljnje obdelave izločiti. Tako nam je na koncu ostalo 12 lokacij z desetletnimi nizi izmerjenih vrednosti globalnega sončnega obseva (to je gostote sončne energije, ki v nekem časovnem obdobju - npr. uri, dnevu, mesecu - vpade na horizontalno sprejemno ploskev).

^{*} Jože Rakovec, UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Katedra za meteorologijo

^{**} Damijana Kastelec, UL, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

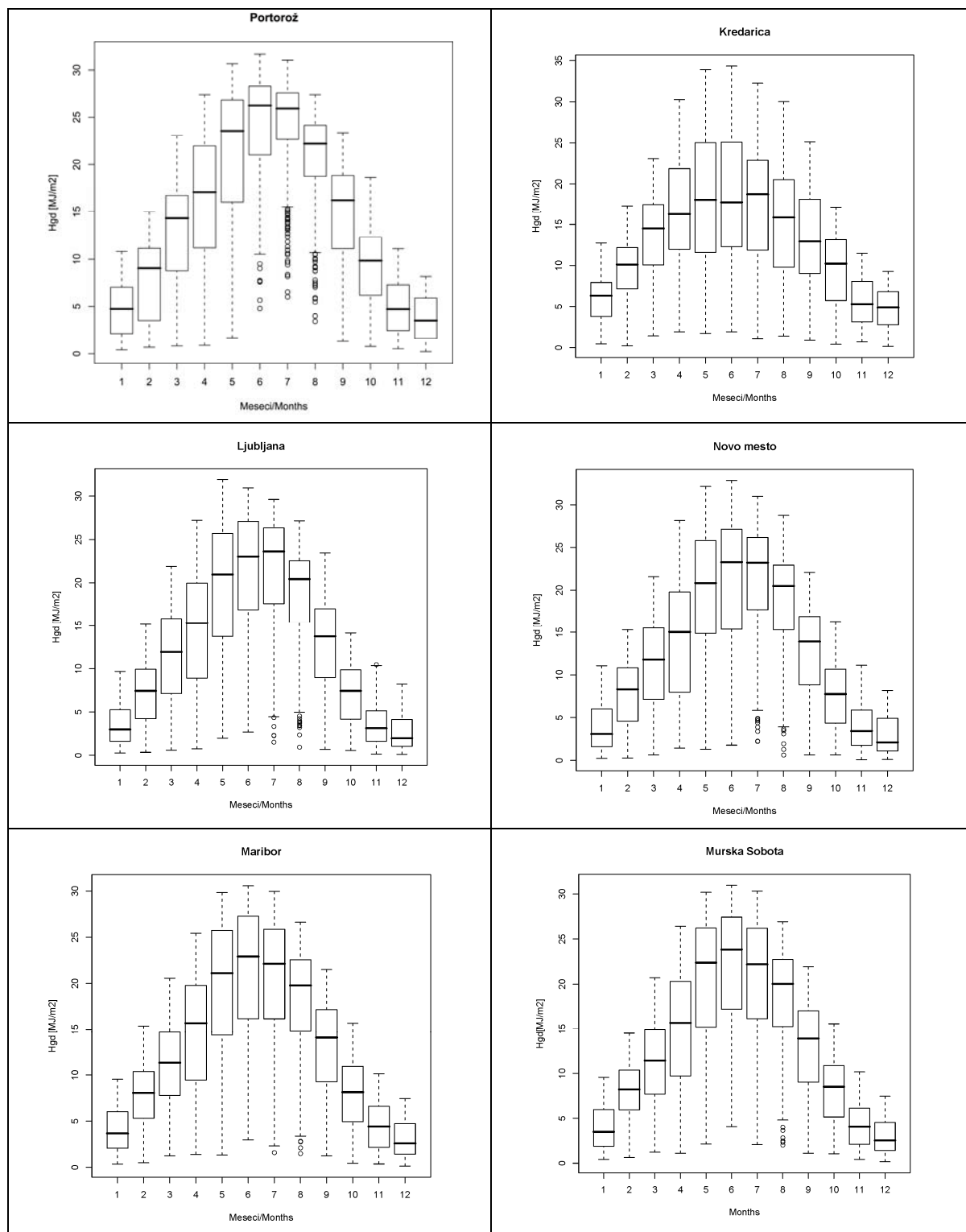
^{***} Klemen Zakšek, ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije



Slika 1: Lokacije meritev in grobi relief Slovenije; s krogi so označene lokacije z meritvami globalnega in difuznega obseva, s kvadrati lokacije z meritvami globalnega obseva in s trikotniki lokacije z meritvami trajanja sončnega obsevanja. (Vir višinskih podatkov: DMV 100, november 2005, © Geodetska uprava Republike Slovenije).

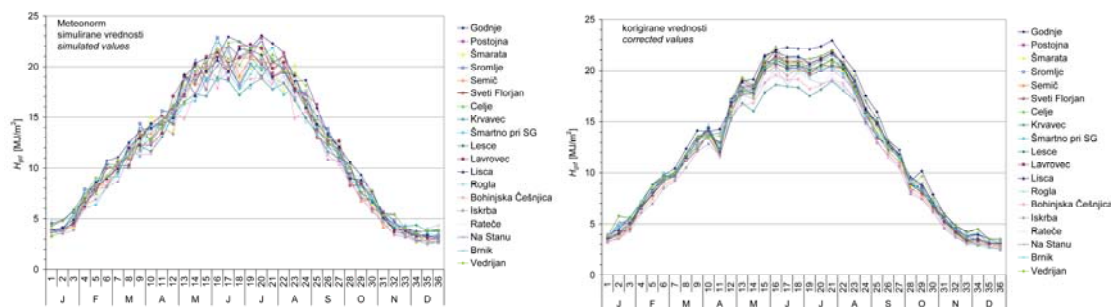
Neposredno iz meritev (12 lokacij) in posredno iz trajanja sončnega obsevanja (dodatnih 14 lokacij) smo dobili podatke o urnih vrednostih direktnega in difuznega sončnega obseva po 36 dekadah v letu za 26 postaj po Sloveniji ob predpostavki o idealnem obzorju. Za šest krajev v Sloveniji podatke o izmerjenih sončnih obsevih podajamo na Sliki 2.

Statistično sta energija in trajanje sončnega obsevanja povezana – dlje kot sije sonce, več je sončne energije. Zato lahko za oceno energije poleg izmerjenih vrednosti uporabljamo tudi podatke o trajanju sončnega obsevanja, ki ga pri nas merijo na večini postaj, kjer merijo energijo, in še na 15 drugih meteoroloških postajah - uporabni so podatki s 14 postaj. Za oceno urnih vrednosti difuznega in direktnega obseva na teh postajah uporabimo računalniški model Meteonorm ver. 5.0 (© Meteotest, 2003), ki vključuje tudi obsežno klimatološko bazo meteoroloških podatkov za ves svet (7400 opazovalnih postaj), pa tudi programe za izračun različnih komponent sončnega obseva na poljubno nagnjenih površinah in na poljubno izbranih lokacijah po svetu.



Slika 2: Porazdelitev dnevnega globalnega obseva (MJ/m^2) po mesecih za obdobje 1994-2003 za postaje Portorož, Kredarica, Ljubljana, Novo mesto, Maribor in Murska Sobota. Vsak okvir z ročaji je narejen na osnovi 300, 310 ali 280 vrednosti, odvisno od meseca. Debelo je označena mediana, okvir sega od 25. do 75. percentila, črtkane črte od minimuma do maksimuma oz. od pogojnega minimuma do pogojnega maksimuma, če so prisotni s krogi označeni osamelci.

Rezultate z lokacij, na katerih se meritve globalne in difuzne energije ter trajanja prekrivajo, smo uporabili za ovrednotenje z Meteonormom izračunanih vrednosti direktnih in difuznih obsevov. Pri tem se je pokazalo, da model Meteonorm za naše kraje sistematično precej precenjuje difuzni del sončnega obseva in s tem podcenjuje direktni obsev. Izjema je Kredarica, kjer je difuzni del sončnega obseva spomladi tudi podcenjen. Zato smo s tem programom dobljene vrednosti globalnega sončnega obseva ustrezno statistično prilagodili glede na ugotovljene razmere (Slika 3).



Slika 3: Z Meteonormom (© Meteotest, 2003) dobljeni (levo) in na osnovi primerjave s podatki popravljeni globalni sončni obsevi za postaje, kjer difuzni del obseva ni merjen.

Za določanje količine sončne energije za vso Slovenijo smo uporabili prostorsko interpolacijo. Dekadna povprečja direktnega in difuznega globalnega obseva na 26 lokacijah smo interpolirali v pravilno mrežo s prostorsko ločljivostjo 1 km x 1 km za vso Slovenijo, torej v približno dvajset tisoč točk.

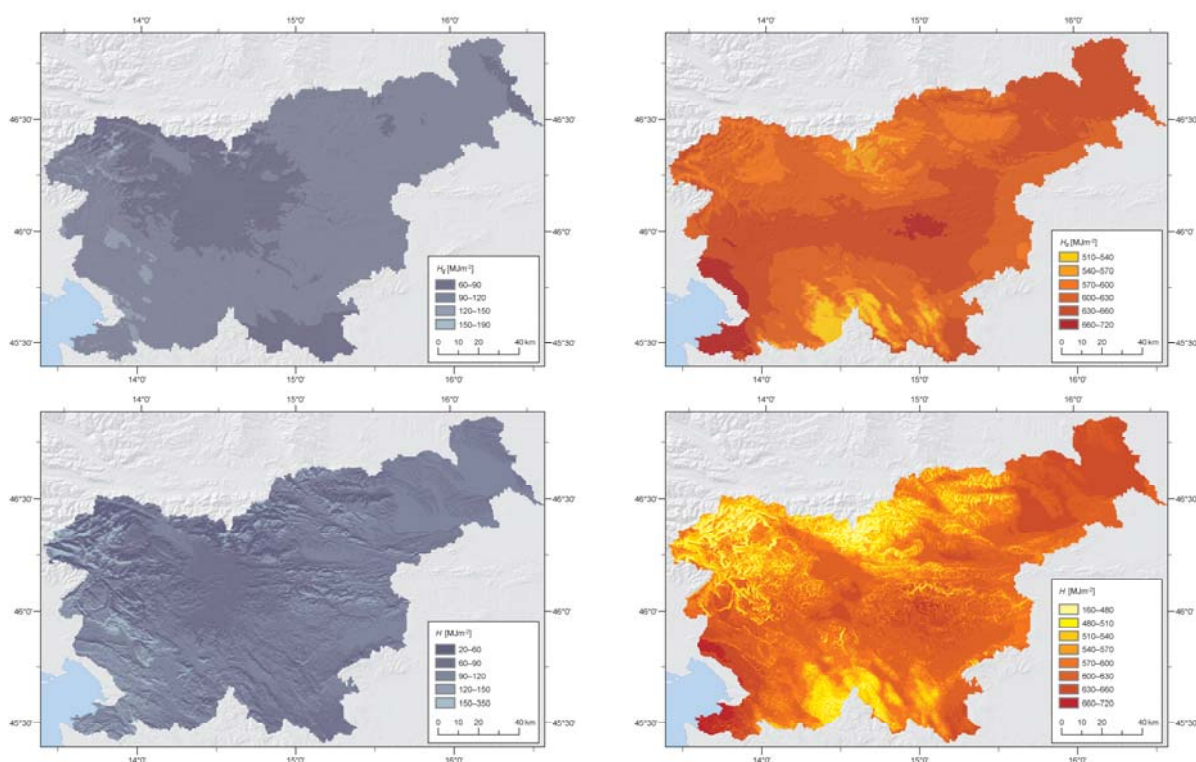
Slovenija je precej gorata in hribovita in v vsej pokrajini so bodisi bolj bodisi manj prisojne ali osojne lege. Zato je poleg globalnega obseva (torej obseva horizontalnih tal) pri nas precej pomemben tudi kvaziglobalni obsev različno nagnjenih tal. Za določitev kvaziglobalnih obsevov je treba upoštevati vpadni kot sončnih žarkov direktne osončenosti na različno nagnjene in orientirane površine tal. Poleg tega relief omejuje obzorje in marsikje sonce vzide pozno ali pa prej zaide, pa tudi čez dan je lahko marsikatera lega dolgo v senci. Glede difuznega obseva pa je pomembno, da se iz različnih lokacij vidi le manjši delež neba, druge dele pa zakrivajo okolišnja pobočja, ki so seveda temnejša kot nebo in iz njih prihaja le malo difuzne svetlobe. Vse te vplive smo zajeli z lastnim modelom in z njim v pravilni mreži 100 m x 100 m (iz digitalnega modela reliefa Slovenije, © Geodetska uprava Republike Slovenije) izračunali kvaziglobalne obseve za vso Slovenijo.

Mesečna povprečja dnevni obsevov so v objavljeni knjigi (Kastelec et al., 2007) prikazana na geografsko referenciranih kartah; tu na Sliki 4 prikazujemo globalni in kvaziglobalni obsev za december in januar. Na Slikah 5 in 6 pa so prikazane letne vsote.

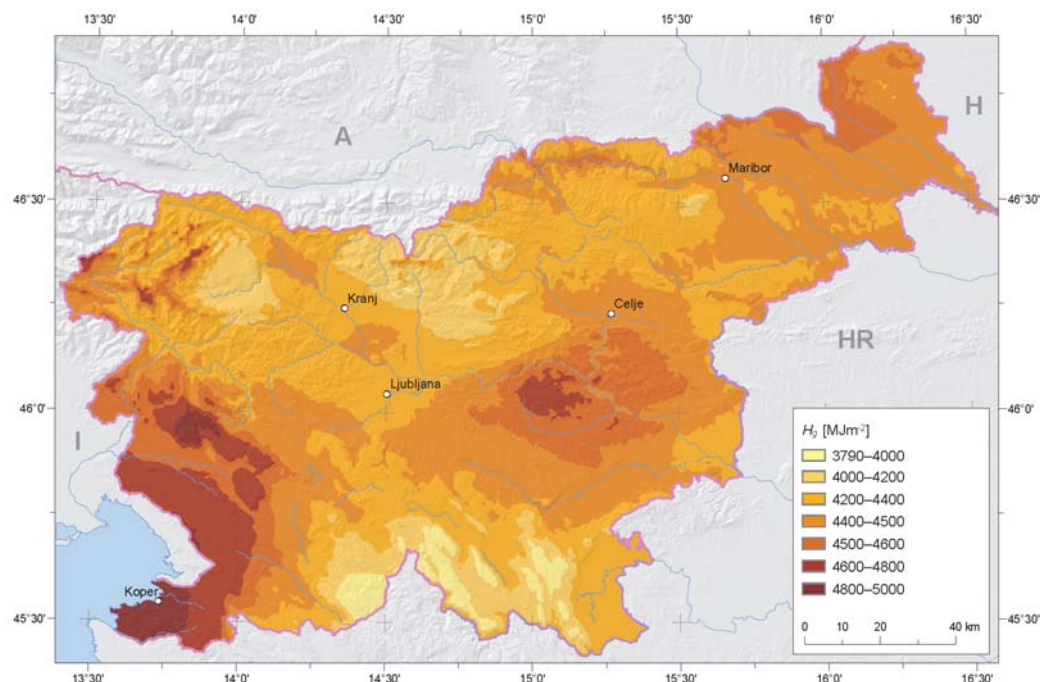
Dnevne vrednosti globalnega obseva so seveda precej večje poleti (na splošno okrog 20 MJ/m^2 dnevno oz. okrog 700 MJ/m^2 mesečno) kot pozimi (tudi manj kot 5 MJ/m^2 dnevno in manj kot 100 MJ/m^2 mesečno). Geografsko so razlike lahko precejšnje: izstopajo posamezni predeli z več energije, kot npr. v topli polovici leta Primorska, od koder se v ozkem pasu območje z več sončne energije razteza tudi na širše območje Dolenjske in Posavja, ter ravninski del Podravja in Pomurja (zanimivo: to se pokriva s prevladujočimi vinogradniškimi območji Slovenije). Poleti pa je sistematično manj sončne energije v

hribovitih predelih, saj se tedaj tam pogosto pojavlja konvektivna oblačnost. Kot smo pričakovali, imajo nižine relativno manj sonca pozimi (predvsem zaradi pogostnejše megle in nizke oblačnosti).

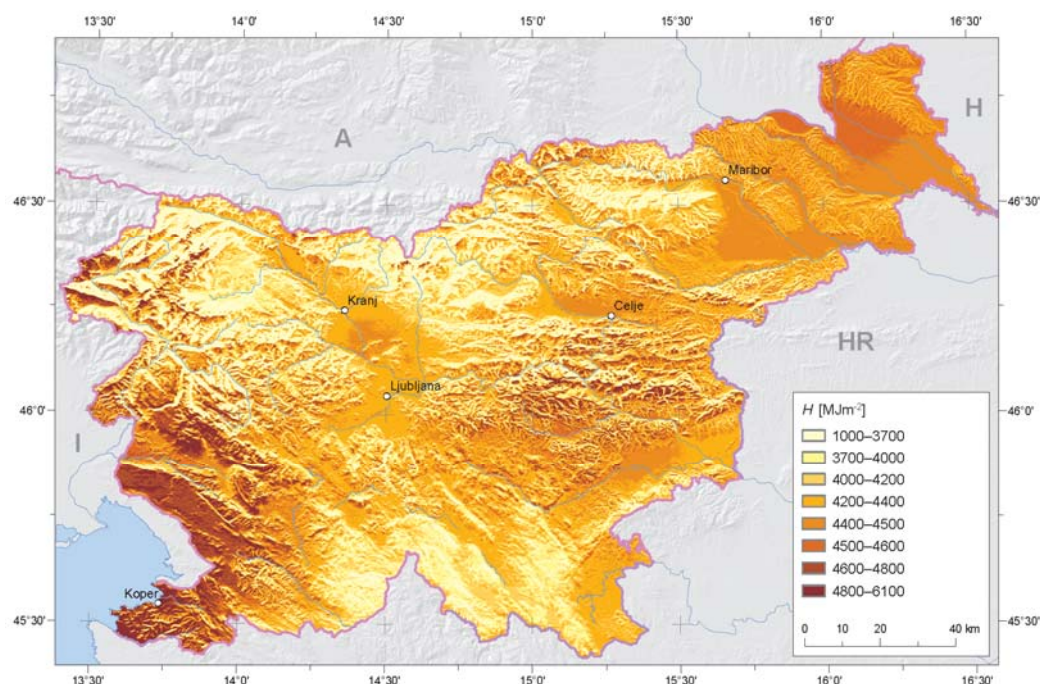
Tudi obseve različno nagnjenih tal v Sloveniji prikazujemo na geografsko referenciranih kartah – kot kvaziglobalni obsev. Na teh kartah se osojne lege izrazito ločijo od prisojnih. Vrednosti kvaziglobalnega obseva nagnjenih tal so v tej prostorski ločljivosti v celoletnem obdobju na izrazitih prisojah lahko tudi za 20 % višje glede na vodoravna tla, na izrazitih osojah pa skoraj za 70 % nižje - seveda pa se najde tu in tam tudi kako manjše območje, kamor sonce morda sploh nikoli ne posije, a tega v ločljivosti 100 m ne moremo določiti. V povprečju za vso Slovenijo na sever gledajoča pobočja prejmejo za dobrih 9 % manj, na južno stran padajoča pobočja pa v povprečju za skoraj 4 % več obseva kot odprte vodoravne lege.



Slika 4: Globalni obsev horizontalne površine (zgoraj) in kvaziglobalni obsev nagnjenih tal v Sloveniji (spodaj) za dva meseca z najmanjšimi in največjimi obsevi: december (levo) in junij (desno)

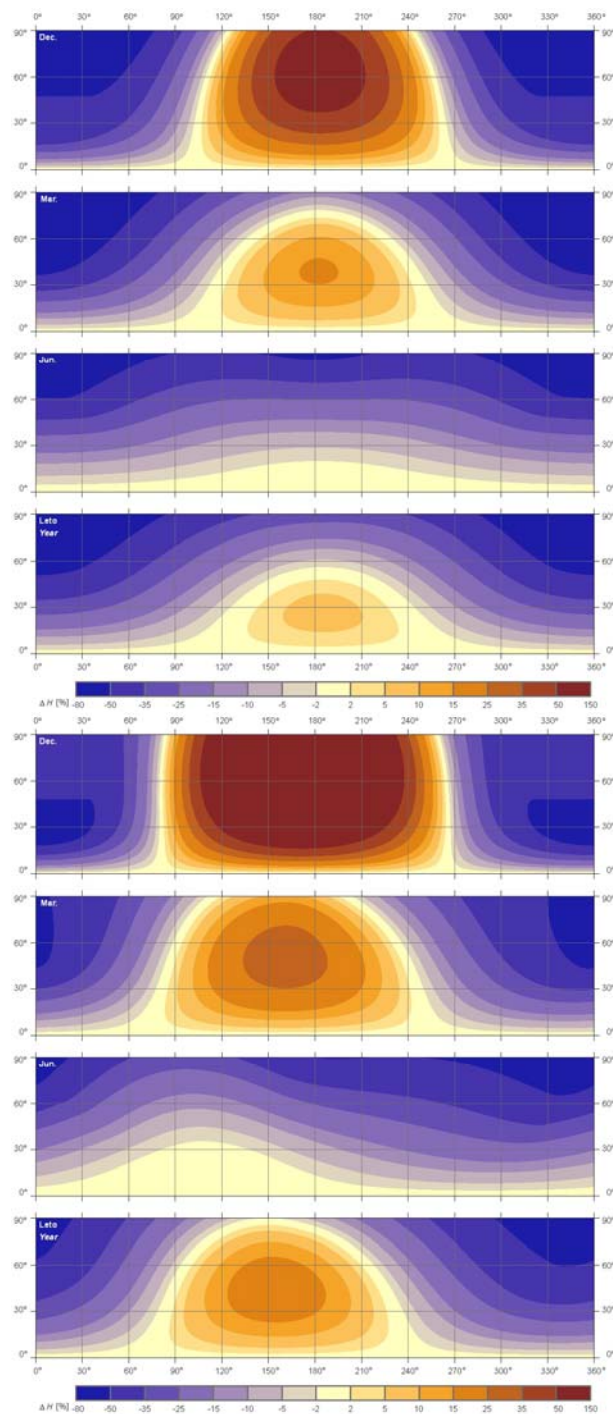


Slika 5: Letni globalni obsev horizontalnih površin po Sloveniji



Slika 6: Letni kvaziglobalni obsev ralično nagnjenih in orientiranih tal po Sloveniji

Pri izrabi sončne energije je pomembno, kam je obrnjen sprejemnik sončne energije, da nanj vpade čim več energije. Seveda morajo morebitni uporabniki postaviti svoje naprave na mesto, ki je dovolj visoko in odprto, tako da ga vsaj na južni strani ne omejujejo ovire. Zdi se, da je najboljša orientacija na jug, kar res velja za december (Slika 7).



Slika 7: Nagibi in orientacije ploskev, na katere vpade največ sončne energije za Ljubljano (levo) in Kredarico (desno). Razmere se iz meseca v mesec močno spreminjajo, lahko pa so tudi nenavadne, če je na lokaciji kaka posebnost, kot npr. na Kredarici, kjer masiv Triglava popoldne pogosto meče precej sence.

Vendar se tudi glede tega pokažejo posamezni zanimivi in tudi nepričakovani rezultati (Kastelec et al., 2007, Rakovec & Zakšek, 2008a, 2008b). Npr. po nižinah je predvsem v hladnejšem delu leta zjutraj pogosto megla, ki izgine šele dopoldne. V takih primerih je bolje, da sprejemnik ni obrnjen točno na jug, temveč nekoliko na zahod, zato da popoldansko sonce, ki ga je več kot dopoldanskega, nanj vpada čim bolj pravokotno. Tako

so npr. marca ugodnejši azimuti okoli 183° . Pozimi, ko je sonce nizko, so boljši večji nakloni (60°), poleti pa manjši. Da bi določili najugodnejšo postavitev sprejemnikov sončne energije, smo simulirali mesečni sončni obsev pri različni kombinaciji azimutov in naklonov za več krajev v Sloveniji (Rakovec & Zakšek 2008a, 2008b).

Zanimiva je ugotovitev, da poleti nagnjene sprejemne ploskve zelo hitro »pridelajo izgubo«. Dan je namreč dolg in sonce vzhaja bolj na severovzhodu in zahaja bolj proti severozahodu. Z naklonom proti jugu sredi dneva sicer pridobimo za nekaj odstotkov večji obsev, a je ta po drugi strani močno zmanjšan v zgodnjih dopoldanskih in poznih popoldanskih urah, ko je sonce nizko. Zato so poleti najboljši le zelo majhni nakloni do 15° ali 20° (junija v Ljubljani samo 4°). Sončni kolektor, ki je obrnjen na jug in nagnjen, je z direktnimi sončnimi žarki le malo obsevan, dokler sonce dopoldne ne pride na južni del neba in potem zopet popoldne, ko se pomakne proti severozahodu. Zato se pokaže nekoliko presenetljiv rezultat, da je za poletno obdobje nagnjene sprejemnike celo bolje usmeriti precej proč od juga — a za prakso so razlike glede orientacij zaradi majhnih nagibov praktično nepomembne in je v tem obdobju v praksi bolje položiti sprejemne ploskve kar skoraj horizontalno. Glede na zelo različne optimalne naklone in azimute pozimi in poleti seveda sledi, da lahko prejme največ energije sprejemnik s spremenljivim naklonom, azimutom ali obojim.

Zahvala

Raziskavo o sončni energiji v Sloveniji je finansirala Agencija Republike Slovenije za okolje po pogodbi 2523-04-300351.

Literatura

- Kastelec D., Rakovec J., Zakšek K. *Sončna energija v Sloveniji*. Ljubljana: Založba ZRC, ZRC SAZU, 2007. 136 str.
- Rakovec J., Zakšek K. Sončni obsevi različno nagnjenih in različno orientiranih sprejemnih površin. 1. del. *EGES, Energ. gospod. ekol. Slov.*, 2008, letn. 12, št. 2, str. 93-101.
- Rakovec J., Zakšek K. Sončni obsevi različno nagnjenih in različno orientiranih sprejemnih površin. 2. del. *EGES, Energ. gospod. ekol. Slov.*, 2008, letn. 12, št. 3, str. 65-69.

Uporabnost daljinskega zaznavanja snega v Sloveniji

Anja Horvat, Andrej Vidmar, Sašo Petan, Mitja Brilly*

Povzetek

V današnjem svetu je vedno bolj pogosta uporaba satelitskih posnetkov za različne namene, med katerimi je tudi daljinsko zaznavanje snega. Izdelava preglednih kart snežne pokritosti površja je namreč precej bolj preprosta, kadar imamo na razpolago satelitski posnetek, kot pa če moramo na terenu izvajati meritve in jih kasneje interpolirati po površini. Pri izdelavi kart na osnovi satelitskih podatkov pa vseeno potrebujemo tudi terenske meritve, in sicer za verifikacijo posnetkov. Pri obdelavi satelitskih posnetkov sistema MODIS smo za verifikacijo uporabili razpoložljive podatke o prisotnosti snežne odeje v Sloveniji. Te podatke smo primerjali s satelitskimi posnetki in zaznано snežno pokritostjo na te-teh. Analizirali smo tudi podatke klimatološke postaje Ljubljana in prišli do zaključka, da satelitski posnetki za zaznavanje snežne pokritosti v Sloveniji niso uporabni in sicer zaradi neustreznih klimatskih značilnosti Slovenije, nizkih nadmorskih višin ter pokrovnosti tal.

Uvod

Pregledne karte površinske pokritosti s snežno odejo so pomembna izhodišča za nadaljnje hidrološke raziskave. Lahko so izdelane na podlagi satelitskih posnetkov ali pa s pomočjo terenskih meritev in interpolacije le-teh po površini (Foppa et al., 2006). Satelitski ponetki površinske pokritosti s snežno odejo organizacije NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) so na voljo že od leta 1966, danes pa je njihova uporaba razširjena po vsem svetu, predvsem pa v državah z veliko snežnimi padavinami (Hall & Riggs et al., 2002, str. 181). Karte površinske pokritosti s snežno odejo lahko uporabimo v kombinaciji s hidrološkimi modeli in tako določimo vpliv tajanja snega na dinamiko podtalnice, količino vode, ki jo snežna odeja prispeva k površinskim vodotokom v gorah ali pa določimo vpliv tajanja snega na površinski odtok in obliko hidrograma. Kljub vsem možnostim, ki nam jih dajejo satelitski posnetki, pa moramo karte, narejene na podlagi posnetkov, tudi validirati. Validacije kart v posameznih primerih kažejo obetajoče rezultate, npr. v Turčiji se izdelane karte na podlagi satelitskih posnetkov sistema MODIS za namen določanja vpliva tajanja snega v hribovitih regijah ujemajo s terenskimi meritvami kar 82 - odstotno (Tekelia et al., 2005, str. 216).

Po svetu je razvitih več programov za modeliranje snežne odeje, večinoma v hribovitih deželah, v Evropi Alpah. Za švicarske Alpe je razvit model, ki kombinira simulacijo snežne odeje, GIS-a in satelitskih posnetkov in je razvit z namenom, da bi z njim napovedovali naravne nesreče, kot so snežni plazovi in poplave, ugotavljali možno proizvodnjo hidroenergije ali ga uporabljali za namene turizma (Weibel et al., 2002, str. 179).

Satelitsko zaznavanje prinaša mnoge prednosti hidrološki znanosti. V večji meri olajšuje delo, saj terenske meritve in analize podatkov nadomeščajo satelitski posnetki, ki so že površinski prikaz (Suzuki in Ohta, 2003, str. 1181). Kljub vsemu bomo za splošno uporabo satelitskih posnetkov z zadovoljivimi rezultati potrebovali še več

* UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

študij verifikacije satelitskih posnetkov s terenskimi meritvami (Grayson et al., 2002, str. 1313).

O sistemu MODIS

MODIS je kratica za Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, kar pomeni sprektoradiometersko slikanje s spreminjajočo se resolucijo in je del opreme na satelitu Terra. Namen posnetkov MODIS-a je globalno preučevanje vegetacije, pokrovnosti, globalne spremenljivosti površja, površinskega albeda, temperature ter snežne odeje in ledu. MODIS ima dnevno oziroma skoraj dnevno časovno resolucijo in 500-metrsko krajevno resolucijo posnetkov snežne pokritosti (Hall, Riggs et al., 2002, str. 181).

Največja pomanjkljivost MODIS-a pri kartografitanju snežne odeje na podlagi posnetkov je vizualno ločevanje pokritosti s snežno odejo in oblačnosti. Sneg in oblaki imajo namreč podoben spekter odboja žarkov, kar zahteva spremembe v algoritmu zaznavanja snežne odeje (Riggs in Hall, 2002 in 2004). V tej smeri se razvijajo metode, ki bi omogočale senzorju ločevanje različnih površin s podobnimi odbojnostimi (Vikhamar in Solberg, 2003, str. 309). To bi omogočilo senzorju, da razlikuje na posnetkih snež in oblake.

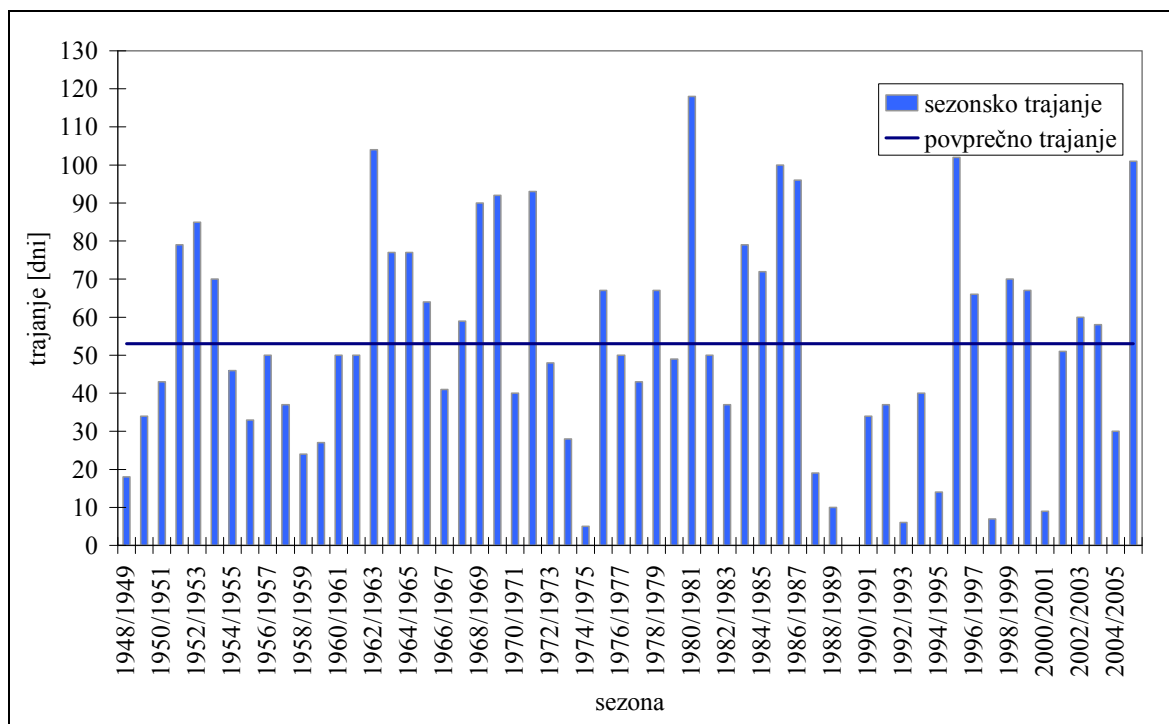
Merilna mesta snežne odeje

Snežna odeja v gorskem svetu je zelo spremenljiva zaradi prisotnosti močnejših vetrov in osončenosti oziroma osenčenosti (Ogrin, 2005, str. 63). Zato je potrebno pred izbiro merilnih mest snežne odeje skrbno premisliti o vseh možnih vplivih. Za validacijske namene smo uporabili meritve snežne odeje upravljalca klimatoloških postaj ARSO (Agencija za okolje RS). Glede na to, da je območje validacije relativno majhno (okoli 12000 km²) smo lahko uporabili meritve samo ene postaje, in sicer klimatološke postaje v Ljubljani.

Podatki in metodologija

Karte pokritosti s snežno odejo so podlaga za številne hidrološke modele, ki kombinirajo daljinsko zaznavanje, modeliranje površinskega odtoka, GIS, DEM in drugo (Haefner et al., 1997, str. 275). V uporabi je vedno več kart pokritosti s snežno odejo, narejenih s pomočjo različnih računalniških tehnik, ki pa morajo še vedno biti validirane na podlagi terenskih meritev pred nadaljnjo uporabo. Primerjava in-situ meritev in satelitskih posnetkov sistema MODIS je bila tako narejena tudi za primer Avstrije (Parajka in Bloeschl, 2006, str. 679).

Izhodišče naše študije je, da je trajanje prisotnosti snežne odeje v Sloveniji v povprečju več kot 50 dni na leto (Slika 1), kar pomeni, da tajanje snega prispeva neko količino vode k površinskemu odtoku. To lahko sklepamo tudi iz dejstva, da Ljubljana leži na največjem vodonosniku v Sloveniji, ki se napaja s površinskimi vodotoki, predvsem Savo, ki izvira v hribovitem svetu. Zaradi tega je pomembno, da poznamo vpliv tajanja snežne odeje na površinski odtok in v nekaterih primerih tudi posredno na podtalnico, za kar kot osnovo potrebujemo pregledno karto pokritosti s snežno odejo. Glede na vedno bolj razširjeno uporabo satelitskih posnetkov v snežni hidrologiji smo se odločili, da preverimo uporabnost le-teh na primeru Slovenije.



Slika 1 – Sezonsko trajanje pokritosti površja s snežno odejo v Ljubljani za sezone od 1948/1949 do 2005/2006

Razpoložljivi satelitski posnetki sistema MODIS

Produkti snežne pokritosti območja so bili dobljeni z uporabo informacij MOD-pasov 02, 04, 06 in iz satelita Landsat TM iz projekta Corine 2000 (Preglednica 1, Slika 2):

- projekcija: UTM33 (Universal Transverse Mercator, cona 33 sever);
- geo. datum: WGS84 (World Global System 1984); rasterski format: GEOTIFF (Geo - Tagged Image File Format), 4-bit globina pikslov.

Preglednica 1 - Seznam razpoložljivih satelitskih posnetkov

Št.	Ime rastrske datoteke	Čas	Ura	Datum	Kvaliteta
1	mod02hkm_2002299.1050_fuso33_sca3.tif	2002299_1050	10:50	26.10.02	slaba
2	mod02hkm_2002324.1045_fuso33_sca3.tif	2002324_1045	10:45	20.11.02	slaba
3	mod02hkm_2002363.1050_fuso33_sca3.tif	2002363_1050	10:50	29.12.02	dobra
4	mod02hkm_2003014.1050_fuso33_sca3.tif	2003014_1050	10:50	14.1.03	slaba
5	mod02hkm_2003055.1045_fuso33_sca3.tif	2003055_1045	10:45	24.2.03	odlična
6	mod02hkm_2003078.1050_fuso33_sca3.tif	2003078_1050	10:50	19.3.03	dobra
7	mod02hkm_2003103.1045_fuso33_sca3.tif	2003103_1045	10:45	13.4.03	dobra
8	mod02hkm_2003126.1050_fuso33_sca3.tif	2003126_1050	10:50	6.5.03	nezadostna
9	mod02hkm_2003162.1025_fuso33_sca3.tif	2003162_1025	10:25	11.6.03	nična
10	mod02hkm_2003201.1030_fuso33_sca3.tif	2003201_1030	10:30	20.7.03	nična
11	mod02hkm_2003229.1055_fuso33_sca3.tif	2003229_1055	10:55	17.8.03	nična
12	mod02hkm_2003261.1055_fuso33_sca3.tif	2003261_1055	10:55	18.9.03	nična

1	805867	nedoločeno	
2	19502	jezero	
3	131900	morje	
4	65796	sneg	
5	239114	oblaki	

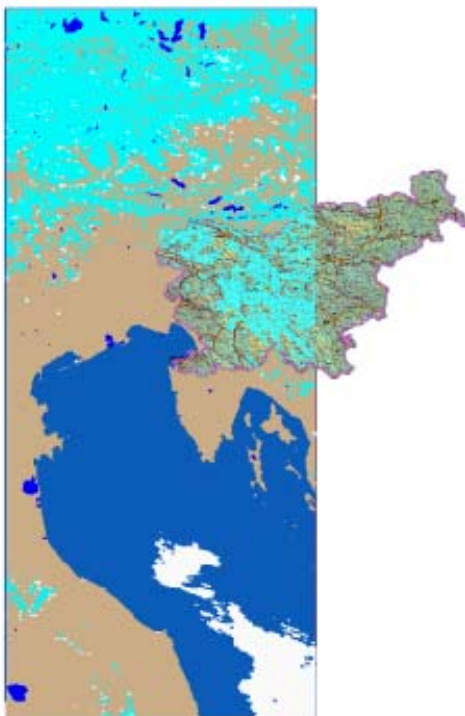
Slika 2 - Klasifikacijska shema posnetkov

Pregled in preračun posnetkov območij pokritih s snegom z vektorskim GIS

Zaradi vektorske obdelave podatkov GIS, ki jo uporabljamo za doseganje večje natančnosti preračunov pri večjih merilih (1 : 5.000 in 1 : 25.000) in kompatibilnosti z razpoložljivimi obstoječimi vektorskimi podatki, je bilo potrebno rastrske vsebine SCA3 (posnetki območij pokritih s snegom) predhodno vektorizirati.

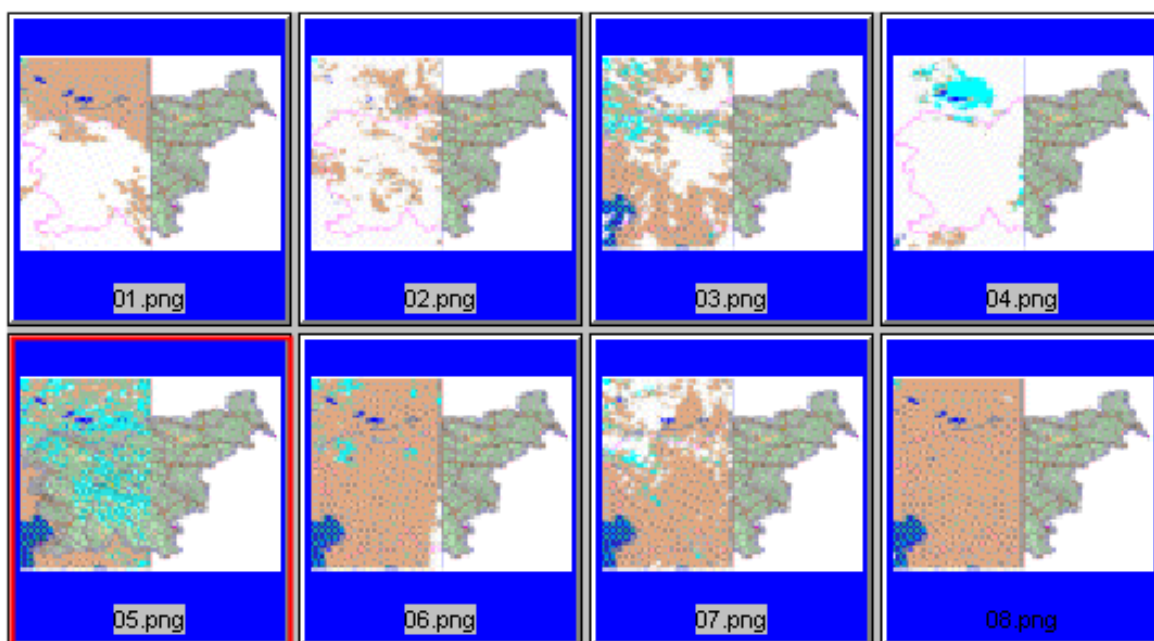
Vektorizacijo se je izvršilo s programskim orodjem "Vextractor" za avtomatsko vektorizacijo. Program med drugim omogoča paketno (»batch«) obdelavo geopozicioniranih rastrskih slik GeoTIFF, tako da vektorsko naknadno geopozicioniranje in/ali transformacija nista potrebna. Torej dobljena vektorska topologija prevzame vsebine projekcije in razmerja avtomatsko iz rastra in hkrati za vse datume. Vektorizirale so se samo vsebine obarvane svetlo modro (razred 4), torej vsebine, ki predstavljajo snežno odejo (sneg; Slika 2). Po vektorizaciji so se tako dobili vektorski obrisi - konture snežne odeje.

Nato se je te vsebine prekrilo z mejo R Slovenije in dobljeni so bili vektorski poligoni posnetkov območij pokritih s snegom na območju bloka UTM33 in WGS48, ki pokriva pol Slovenije - zahodni del (Slika 3).



Slika 3 - Posnetek območja pokritega s snegom (SCA) na dan 24. 2. 2003 (UTM33-WGS84 - celotni posnetek)

Dobljenih je bilo 8 datumsko različnih poligonov posnetkov pokritosti s snegom (SCA3) (Slika 4). 4 posnetki niso vsebovali pokritosti s snegom na območju Slovenije (Slika 4). Torej za junij, julij, avgust in september v letu 2003 na posnetkih ni bilo zaznane snežne odeje. Več snega je bilo samo meseca februarja 2003.



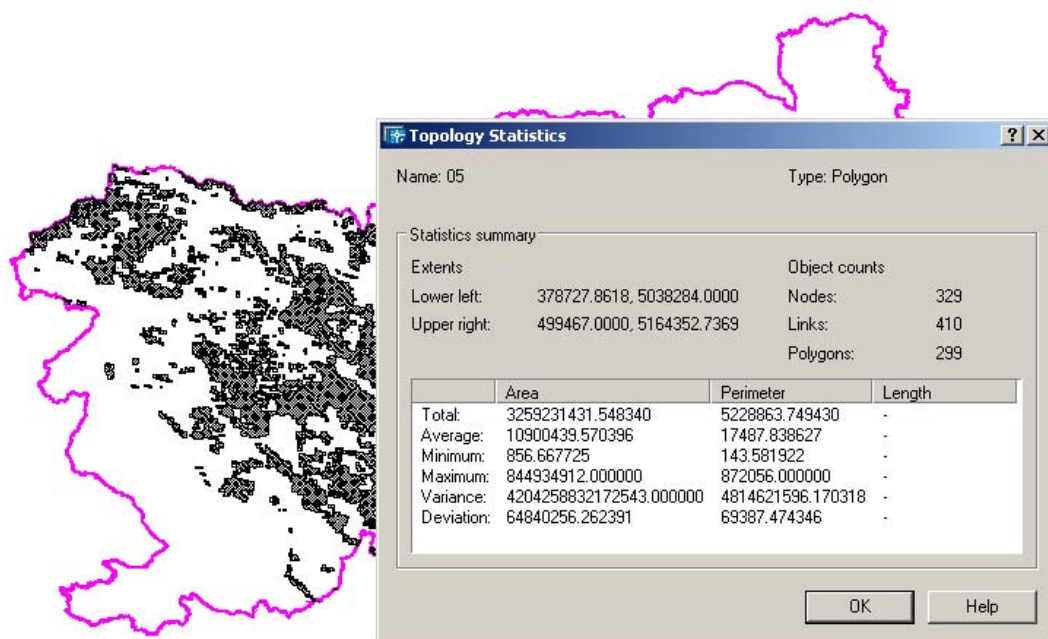
Slika 4 - Pokritost s snegom zahodnega dela R Slovenije od oktobra 2002 do maja 2003

Dobljeni vektorski poligoni so vsebovali otoke, ki jih je bilo potrebno izločiti za nadaljnjo obdelavo. Izdelati je bilo potrebno bolj kompleksno topologijo ("topology with islands"). Gnezdene otoke (enojno in večkratno - otok v otoku) smo izločili posebej. Določili so se na osnovi topoloških atributov in izdelanega algoritma glede na levo in desno stran vektorjev, s katerim je možno ugotoviti, ali je poligon otok ali ne (Slika 5, Slika 6).

Field Name	Data Type
ID	Number
START_NODE	Number
END_NODE	Number
DIRECTION	Number
DIRECT_RESISTANCE	Number
REVERSE_RESISTANCE	Number
LEFT_POLYGON	Number
RIGHT_POLYGON	Number

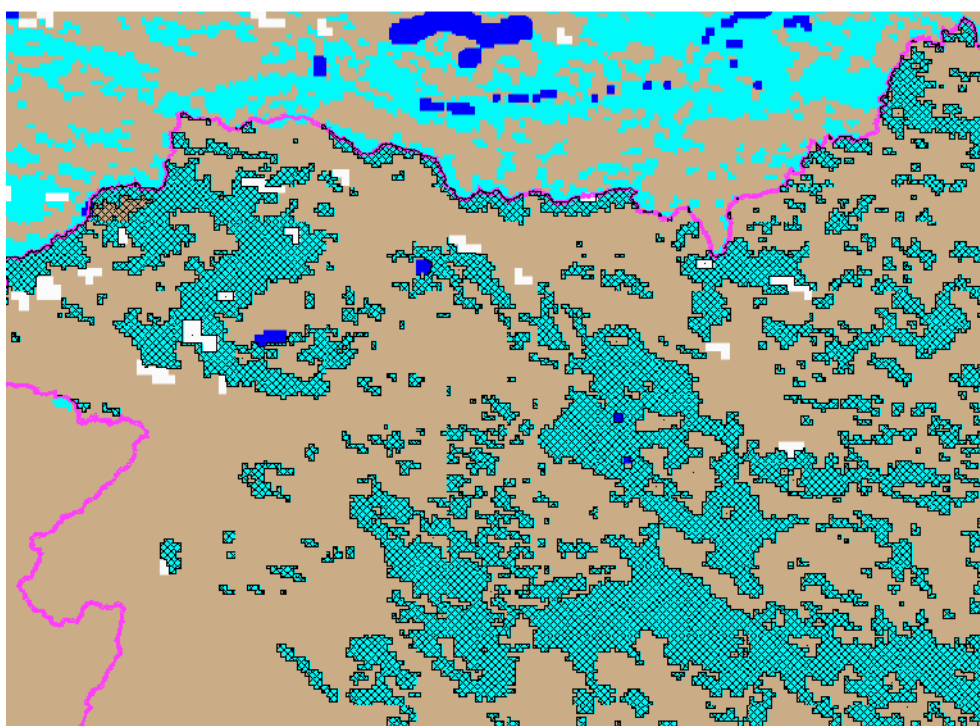
Field Name	Data Type
ID	Number
AREA	Number
PERIMETER	Number
LINKS_QTY	Number
Island	Number

Slika 5 - Atributi vektorske topologije

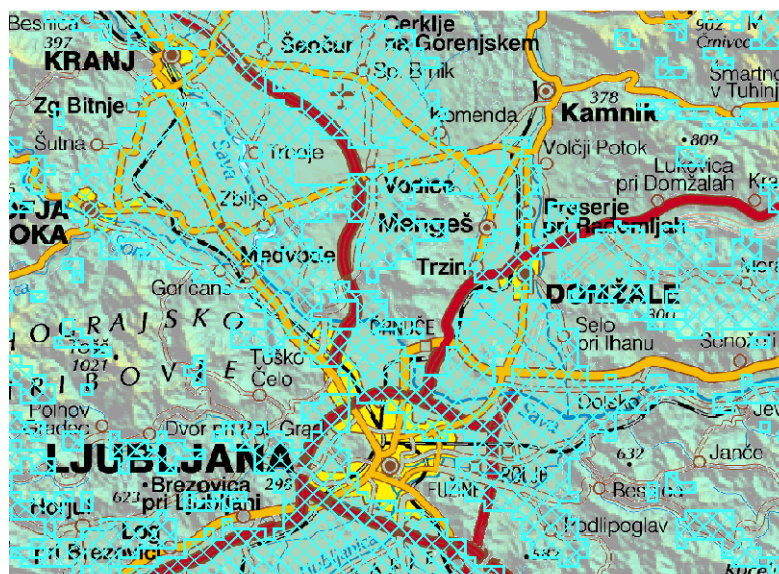


Slika 6 - Statistika topologije posnetkov pokritosti s snegom (SCA3) na dan 24. 2. 2003 (3.259,2 km²)

Nato smo zgradili novo topologijo (Slika 7). Otoke smo odšteli, da smo dobili poligone z luknjo ("Poligone with Islands"), ki so natančno prekrili rastrsko vsebino posnetkov (SCA) (Slika 8).



Slika 7 - Vektorizirane površine pod snegom 24. februarja 2003 v R Sloveniji



Slika 8 – Posnetek pokritosti s snegom (SCA) na območju Ljubljane

Vektorske poligone posnetkov (SCA) je tako možno uporabljati za nadaljnjo analizo prekrivanja z vektorskimi poligoni drugih vsebin, kot so vektorski poligoni višinskih pasov, hidrografska območja - povodja, administrativna območja, vektorski CLC (Corine Land Cover) ipd.

Rezultati in razprava

Analiza uporabnosti satelitskih posnetkov

Analiza uporabnosti satelitskih posnetkov na primeru Ljubljanskega polja je bila narejena na podlagi podatkov pokritosti neba z oblaki v obdobju od leta 2000/2001 do 2004/2005 (Preglednica 2). V Preglednici 2 so predstavljeni rezultati oblačnosti za dneve, ko je bila prisotna tudi snežna odeja.

Preglednica 2 - Število dni s snežno odejo in delež oblačnosti

sezona	število dni s snežno odejo	število dni s snežno odejo in ...		
		jasnim nebom	delno jasnim nebom	oblačnim nebom
2000/2001	11	0	0	11
2001/2002	51	14	2	35
2002/2003	61	19	1	41
2003/2004	59	8	3	48
2004/2005	31	10	1	20
vsota	213	51	7	155
	33%	8%	1%	24%

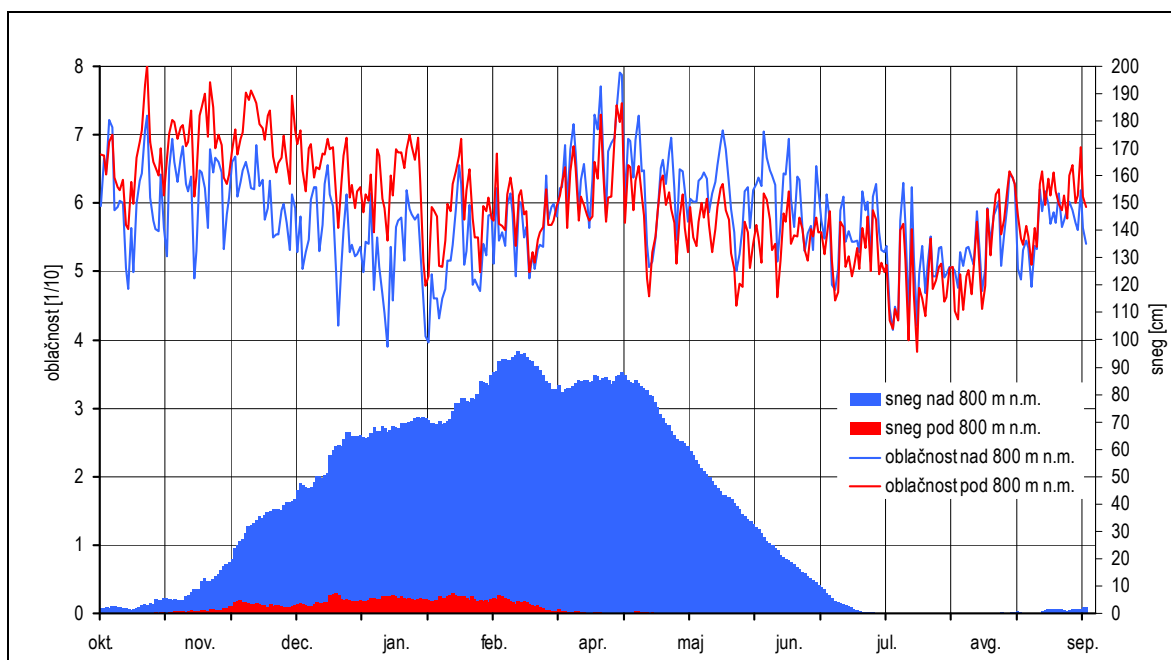
Jasno nebo: pokritost neba z oblaki je manj kot 10 % (uporabni satelitski posnetki)

Delno jasno nebo: pokritost neba z oblaki je med 10 % in 20 % (delno uporabni satelitski posnetki)

Oblačno nebo: pokritost neba z oblaki je več kot 20 % (neuporabni satelitski posnetki)

Na Sliki 9 je prikazana prisotnost oblačnosti nad in pod 800 m n. v., ko je prisotna snežna odeja. Glede na prikazane podatke lahko vidimo, da je pod 800 m n.m. več

oblačnosti, kar pomeni, da so satelitski posnetki na nadmorski višini pod 800 m manj uporabni.



Slika 9 - Primerjava povprečne oblačnosti in višine snežne odeje med nižje ležečimi in višje ležečimi meteorološkimi postajami za obdobje zim 1996 do 2006

Za primerjavo oblačnosti med postajami je bilo potrebno primerjati podatke o odstotkih jasnih dni glede na število dni s snežno odejo. Daleč največ jasnih dni imajo v dvajsetletnem povprečju Rateče 18 %, najmanj pa, pričakovano, Ljubljana 7 %. Presenetljiv je podatek za Kredarico, ki ima kljub visokemu številu jasnih dni le 11 % jasnih dni.



Slika 10 - Običajen panoramski pogled s hribov pozimi v Sloveniji

Pregledna analiza dobljenih podatkov posnetkov pokritosti s snegom (SCA verzije 3)

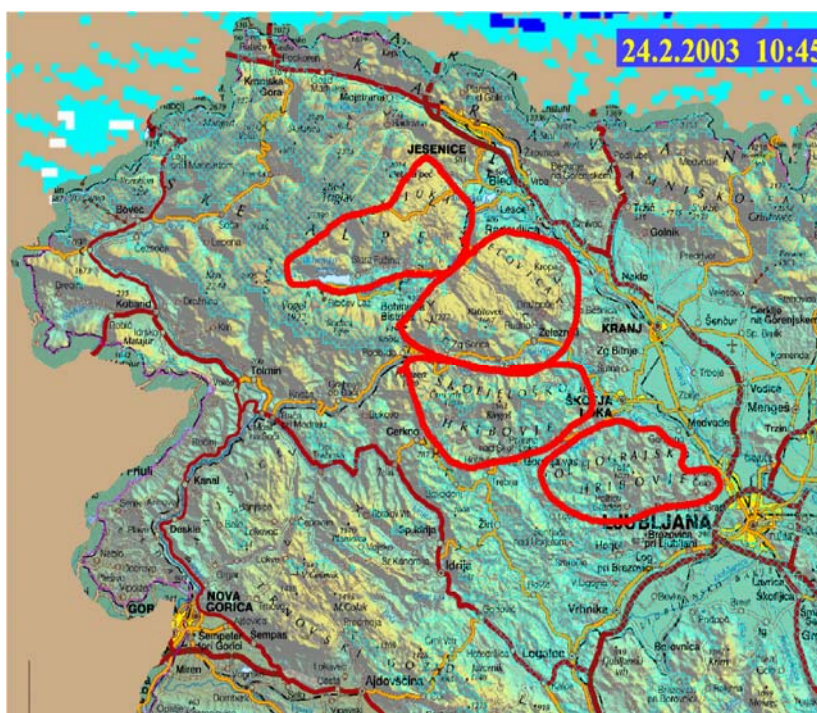
Pri procesu validacije smo primerjali obdelane satelitske posnetke in terenske meritve v istem časovnem intervalu (Hall, Solberg et al., 2002, str. 55) – satelitski posnetek mod02hkm_2003055.1045_fuso33_sca3 ter meritve na dan 24. 2. 2003.

Nad Evropo je bil ta dan močan anticiklon, zato nad Slovenijo ni bilo oblačnosti. Po podatkih meteoroloških postaj iz Preglednice 3 lahko sklepamo, da je bila snežna odeja, čeprav nizka, prisotna po vsej državi, razen na Primorskem.

Preglednica 3 - Pregled višine snežne odeje meteoroloških postaj dne 24. 2. 2003

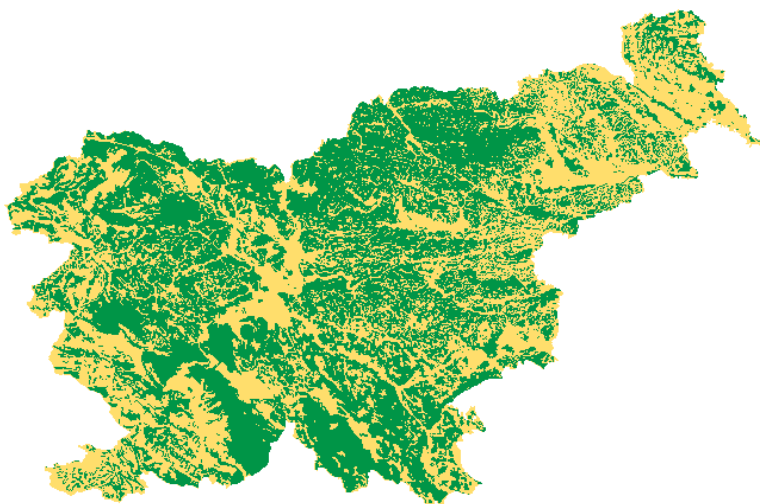
Ime postaje	Nadmorska višina [m]	Sneg [cm]	Ime postaje	Nadmorska višina [m]	Sneg [cm]
Letališče Brnik	364	8	Novo mesto	220	19
Kredarica	2514	195	Celje	244	10
Rateče Planica	864	18	Šmartno pri Slov.Gradcu	455	18
Vojsko	1067	60	Murska Sobota Rakičani	188	5
Bilje	46	0	Lesce	515	8
Postojna	533	6	Metlika	210	12
Kočevje	467	28	Vogel	1535	90
Ljubljana Bežigrad	299	15	Lisca	943	52
Črnomelj	157	12	Letališče Portorož	2	0

Vizualni pregled (Slika 11) pokaže, da veliko obravnavanega območja ni prekrito s snegom oziroma je v nedoločljivem območju ("undetermined"). Po vedenju in izkušnjah pa bi na teh območjih sneg dejansko moral biti. Ugotovljeno je, da so ta območja pokrita z gozdom in snežna odeja leži pod krošnjami dreves. To pa po vsej verjetnosti sateliti ne zaznajo. Gre za velika gozdna področja Polhograjskega in Škofjeloškega hribovja ter predvsem planot Pokljuke in Jelovice. Na Pokljuki je v tem času sigurno bilo veliko snega saj, se na tem območju prireja svetovni pokal v smučarskih tekih. Prav tako je na tem območju več smučarskih centrov in snežnih rekreacijskih centrov.



Slika 11 - Vektorizirano območje z označenimi večjimi gozdnimi površinami

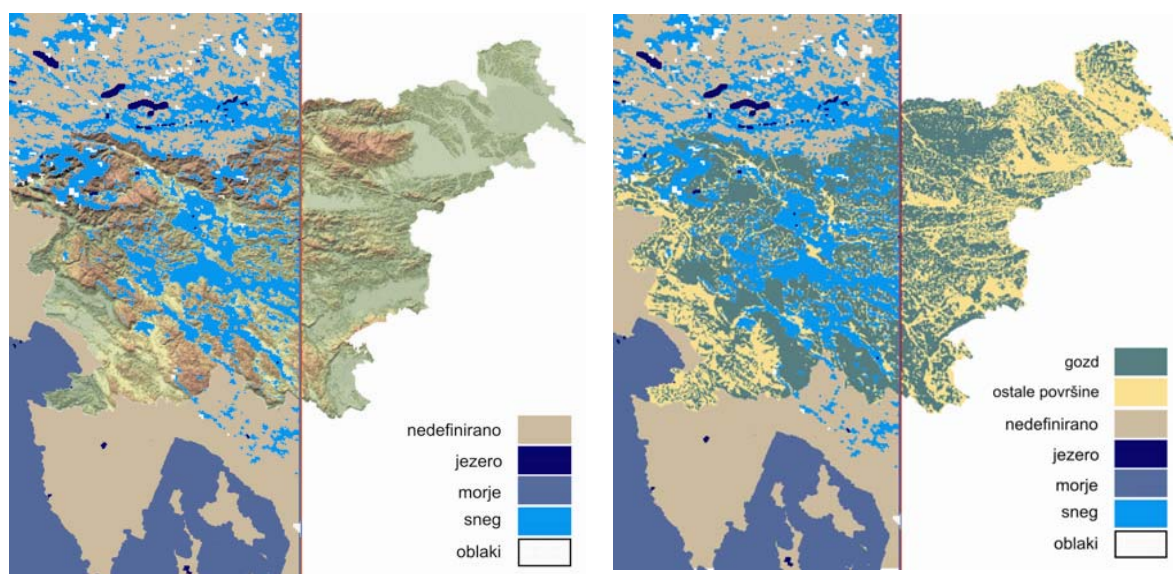
Vektoriziran satelitski posnetek smo položili na podlago, kjer je prikazana pokritost z vegetacijo (Slika 12).



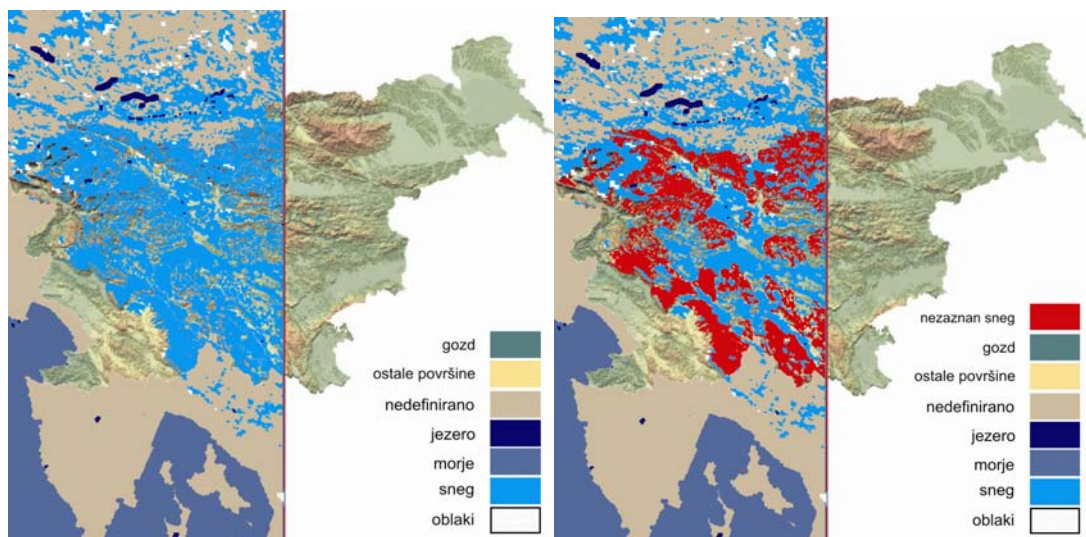
Slika 12 - Gozdna pokritost Slovenije

Rezultat je prikazan na Sliki 13, kjer se vidi, da je območje razlike med zaznanim snegom in območji brez zaznanega snega večinoma pokrito z gozdom. V tem primeru sitem MODIS ni bil zanesljiv za zaznavanje snežne odeje višine pod 25 cm v gozdu. Snežna odeja je bila zanesljivo zaznana le nad gozdno mejo oziroma v nižinah.

Na satelitskem posnetku na Sliki 14 vidimo tudi območje brez zaznane snežne odeje med Kranjem in Jesenicami. To območje ima nizko nadmorsko višino in višino snežne odeje med 5 in 10 cm. Višina snežne odeje je bila izmerjena ob 7. uri zjutraj in se je do 11:45, ko je bil narejen posnetek, že stalila.



Slika 13 - Posnetek mod02hkm_2003055.1045_fuso33_sca3 sistema MODIS dne 24. 2. 2003 združen z reliefom Slovenije in posnetkom območij poraslih z gozdnimi površinami

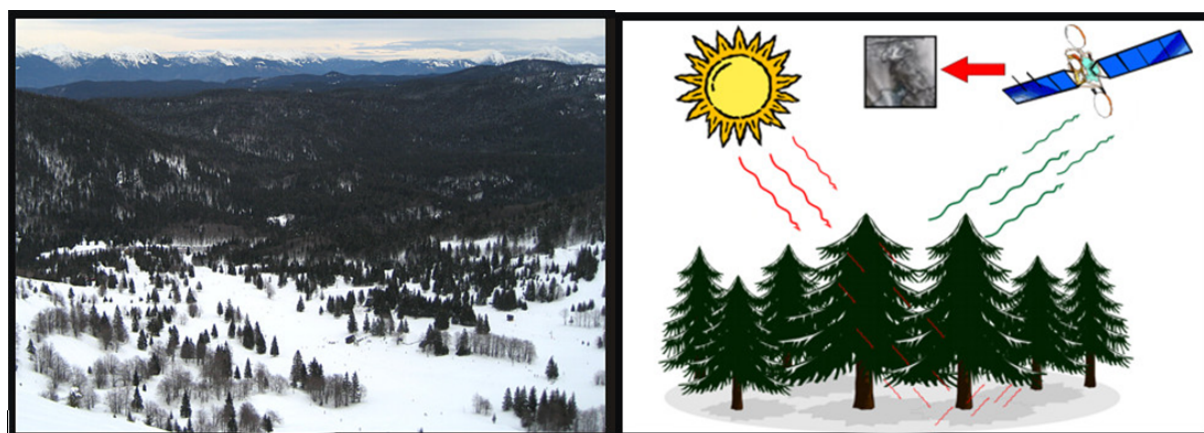


Slika 14 - Prikaz dejanske površine snežne odeje glede na podatke postaj dne 24. 2. 2003 in rdeče obarvana območja, kjer sistem MODIS zaradi gozda ni zaznal snežne odeje



Slika 15 - Prikaz obdelave posnetkov: a) območja snega glede na podatke s postaj, b) območja satelitsko zaznanega snega, c) razlika snežnih površin obeh posnetkov

Slovenija je dežela gozdov, saj le-ti pokrivajo 57,9 % naše domovine (1.173.847 hektarjev). Po gozdnatosti smo na tretjem mestu v Evropski uniji, za Švedsko in Finsko. Ne le da sneg pod drevesnimi krošnjami na satelitskih posnetkih ni viden, temveč se sneg pod drevesnimi krošnjami drugače tali (Suzuki in Ohta, 2003, str. 1181) (Slika 16). Iz tega razloga je daljinsko zaznavanje snega na poraščenih površinah zelo negotovo.



Slika 16 - Snežna odeja v gozdu

Zaključek

Opazovanje in spremljanje snežne odeje z daljinskim zaznavanjem oziroma satelitskimi posnetki, postaja po svetu kljub nekaterim pomanjkljivostim glavna metoda spremljanja površine snežne odeje (Schmugge et al., 2002, str. 1367). Za ostale podatke o snežni odeji se še vedno uporablja podatke avtomatskih in meteoroloških postaj ter terenskih meritev.

V Sloveniji znaša povprečna letna stopnja oblačnosti 52 %, v času s snežno odejo pa 66 %. Z vidika zaznavanja snežne odeje ni ta podatek prav nič vzpodbuden, saj pogostost pojavljanja oblačnosti močno vpliva na zaznavanje v vidnem in bližnjem IR-spektru. V povprečju je v času s snežno odejo verjetnost jasnega dneva le 10 %, kar pri povprečnem trajanju snežne odeje (81 dni) pomeni 8 do 9 popolnoma jasnih dni. Za uporaben satelitski posnetek potrebujemo jasnino le v času preleta, za satelita sistema MODIS je to čas med 11:45-12:00 in 13:00-13:15, ko satelita preletita Evropo. Izračunano z linearno korelacijo ocen oblačnosti ob 7. in 14. uri znaša število jasnih popoldnevov 18,59 dni, kar v povprečju predstavlja 23 % dni v času snežne odeje.

Največji dejavnik pri napakah v zaznavanju snega so gozdne površine in površine, kjer je snežna odeja zelo tanka. Upoštevati moramo tudi, da se meritve snežne odeje opravljajo ob 7:00, satelit pa posname območje ob 11:45. Pri tanki snežni odeji se lahko zgodi, da se ta stali v času med jutranjo meritvijo in popoldanskim posnetkom satelita, kar bi ocenili kot napako v zaznavanju satelita. Ker je odstotek pokrovnosti gozda v Sloveniji zelo visok (66 % za leto 2007) in narašča, je podatek o natančnosti zaznavanja snežne odeje zelo pomemben. Na podlagi analize posnetka in ocene stanja snežne odeje dne 24. 2. 2003 smo dobili grobo oceno napake, ki znaša na našem posnetku 52 % (Slika 14). Ta rezultat ne predstavlja dejanske napake, nakazuje pa velik odstotek nezaznanih površin snežne odeje, predvsem na račun gozdnih površin.

Ugotovljeno je, da kjer je velika gozdnatost, metoda za zaznavanje površin pokritih s snegom EO (Earth Observation) ne daje zadovoljivega rezultata oziroma je dejanska pokritost s snegom težko določljiva (Foppa et al., 2006). Predstavljena metoda daljinskega zaznavanja snežne odeje je primerna za določanje dnevne snežne odeje v hribovitih območjih nad gozdno mejo, nikakor pa ne za nižjeležeča območja pokrita z gozdom (Brilly et al., 2008).

Zahvala

Raziskava je bila izvedena kot del projekta AWARE financiranega iz 6. okvirnega programa EU.

Literatura

- Brilly M., Vidmar A., Petan S., Horvat A., 2008. AWARE project: Final Report on the Study the Groundwater Impact on Runoff Formation.
- Foppa N., Stoffel A., Meister R., 2006. Synergy of in situ and space borne observation for snow depth mapping in the Swiss Alps. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v tisku.
- Grayson R. B., Bloeschl G., Western A. W., McMahon T. M.. Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response, *Advances in Water Resources* 25 (2002) 1313–1334.
- Haefner H., Seidel K., Ehrler H., 1997. Applications of Snow Cover Mapping in High Mountain Regions. *Phys. Chem. Earth*, Vol. 22, No. 3--4, pp. 275-278, 1997.
- Hall D.K., Solberg R., Riggs G. A., 2002. Validation of Satellite Snow Cover Maps in North America and Norway. 59th EASTERN SNOW CONFERENCE Stowe, Vermont USA, 2002.

- Hall D.K., Riggs G. A., Salomonson V.V., 2002. MODIS snow cover products. *Remote Sensing of Environment*, No. 82, p. 181-194.
- Parajka J., Bloeschl G., 2006. Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, No. 10, p. 679–689.
- Ogrin M., 2005. Measuring Winter Precipitation With Snow Cover Water Accumulation In Mountainous Areas. *Acta geographica Slovenica*, 45-2, 2005, p. 63–92.
- Riggs G. A., Hall D. K., 2004. Snow and Cloud Discrimination Factors in the MODIS Snow Algorithm. IGARSS, Anchorage, Alaska, 2004.
- Riggs G. A., Hall D. K., 2002. Reduction of Cloud Obscuration in the MODIS Snow Data Product. 59th EASTERN SNOW CONFERENCE, Stowe, Vermont USA, 2003.
- Schmugge T.J., Kustas W.P., Ritchie J.C., Jackson T.J., Rango A., 2002. Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, No. 25, p. 1367–1385.
- Suzuki K., Ohta T., 2003. Effect of Larch Forest Density on Snow Surface Energy Balance. *Journal of Hydrometeorology*, volume 4.
- Tekelia A.E., Akyurekb Z., S,ormanc A.A., S,ensoyc A., S,ormana A.U., 2005. Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sensing of Environment*, No. 97, p. 216 – 230.
- Vikhamar D., Solberg R., 2003. Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, No. 88, p. 309–323.
- Weibel D., Wunderle S., Kleindienst H., 2002. Snow Pack Simulation In The Swiss Alps – Combining Gis And Re-Mote Sensing To Model Snow Cover In Switzerland. *Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space*, Bern, March 11 – 13, 2002.

Izračun osnovne gravimetrične mreže Slovenije

K. Medved^{*}, B. Koler^{**}, M. Kuhar

Povzetek

V prispevku je predstavljen izračun nove osnovne gravimetrične mreže Slovenije, ki je bila izmerjena leta 2006. Prikazani so popravki, ki so bili upoštevani pri obdelavi merjenih vrednosti. Izravnava mreže je izvedena v dveh fazah. V prvi fazi je kot prosta mreža izravnana mreža 0. reda, v drugi fazi pa je izravnana mreža 1. reda. Podane so vrednosti težnih pospeškov na posameznih točkah gravimetrične mreže. Izvedena je tudi primerjava s starim Potsdamskim datumom, v katerem so bile opravljene vse predhodne gravimetrične meritve v Sloveniji. Nova gravimetrična mreža predstavlja kvalitetno osnovo za vse nadaljne gravimetrične meritve.

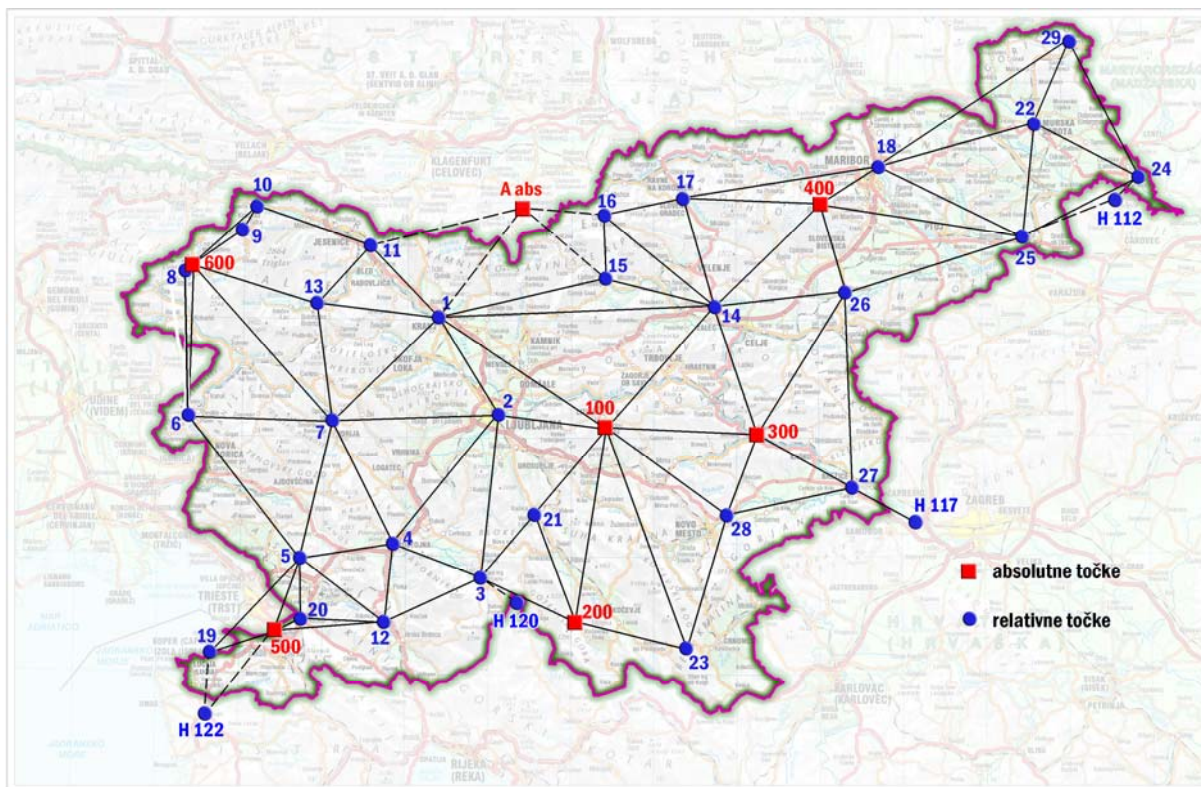
Uvod

Nov gravimetrični sistem Slovenije temelji na mednarodnem referenčnem gravimetričnem sistemu IGSN 71 (International Gravity Standardization Network 1971). Realizacijo gravimetričnega sistema – gravimetrični datum Republike Slovenije predstavljajo vrednosti težnosti na 6 absolutnih točkah gravimetrične mreže 0. reda in 29 točkah gravimetrične mreže 1. reda. Absolutne gravimetrične točke so bile stabilizirane leta 1995, izmere težnosti z absolutnimi gravimetričnimi meritvami pa so bile opravljene od leta 1996 do 2000.

Gravimetrična mreža 1. reda je sestavljena iz 29 relativnih točk. Vključenih je 17 ohranjenih gravimetričnih točk osnovne gravimetrične mreže Jugoslavije, dodatno pa je bilo stabiliziranih 12 novih točk. Mrežo sestavlja 39 gravimetričnih likov. Na sliki 1 je prikazana izmerjena gravimetrična mreža. V izmero so bile vključene tudi točke onstran meja Slovenije: ekscenter avstrijske absolutne točke in štiri hrvaške relativne točke. S tem je bila dosežena večja homogenost naše gravimetrične mreže ter je bila izvedena navezava na gravimetrične mreže sosednjih držav (Avstrija in Hrvaška).

^{*} mag. Klemen Medved, Geodetska uprava RS, Zemljemerska 12, 1000 Ljubljana

^{**} doc.dr. Božo Koler, doc.dr. Miran Kuhar, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana



Slika 1: Osnovna gravimetrična mreža Republike Slovenije z navezavami na sosednje države

Mreža je bila izmerjena konec leta 2006. Meritve so se izvajale z dvema relativnima gravimetroma SCINTREX CG-3M. Uporabljena je bila metoda izmere zvezda in metoda profilov z vsakodnevnim zapiranjem likov. Vsaka stranica mreže je bila izmerjena vsaj dvakrat.

Obdelava merjenih količin

Obdelava podatkov opazovanj pomeni izračun ustreznih popravkov in redukcij, ki jih izračunamo za vsako točko in za vsak dan opazovanj. Relativni gravimeter Scintrex CG-3M omogoča uporabo nekaterih redukcij v realnem času, kot so: popravek za nehorizontalnost gravimetra, popravek zaradi temperaturne spremembe senzorja in redukcija za spremembo merila čitanja gravimetra glede na kalibracijsko konstanto (Scintrex Limited, 1995). Naknadno pa smo upoštevali naslednje popravke oz. redukcije opazovanj (Torge, 1989): popravek zaradi plimovanja trdne Zemlje, popravek zaradi gibanja Zemljinih polov, redukcija izmerjene vrednosti težnega pospeška z nivoja senzorja instrumenta na nivo točke oz. redukcija za višino instrumenta, popravek zaradi vpliva atmosferskega tlaka in redukcija opazovanj za dnevni hod instrumenta.

Popravek zaradi plimovanja trdne Zemlje

Za izračun popravkov plimovanja trde Zemlje smo uporabili Bergerjeve popravke (Micro-g 1995). Bergerjevi popravki se določijo na podlagi ne-harmonične metode izračuna plimnega potenciala. Izhajajo iz enačb, ki jih je leta 1969 izpeljal Jonathan Berger

(Micro-g, 1995), kasneje pa so jih večkrat izboljšali različni avtorji[•], predvsem z uporabo novejšega astronomskega almanaha. Plimni potencial se izračuna glede na koordinate točke v odvisnosti od časa, pri čemer se odštejeta vpliva Sonca in Lune. Pri izračunu se ne upošteva vpliv gibanja oceanov.

Popravek zaradi gibanja Zemljinih polov

Popravek vpliva gibanja pola kompenzira dolgoročne vplive zaradi spremembe trenutnega položaja pola glede na srednji pol CIO (Conventional International Origin) (Torge, 2001):

$$\Delta g_{\text{pol}}(t) = -1,16 \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \sin 2\phi \cdot (x(t) \cdot \cos \lambda - y(t) \cdot \sin \lambda) \quad [\text{ms}^{-2}] \quad (1)$$

kjer je ω kotna hitrost Zemlje ($2\pi/\text{dan}$), R radij Zemlje, ϕ , λ geografski koordinati opazovališča, $x(t)$, $y(t)$ koordinati trenutnega položaja pola glede na CIO – podatki so dostopni v elektronskem biltenu International Earth Rotation Service (IERS) oziroma na medmrežju na URL naslovu: <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulb/>

Redukcija za višino instrumenta

Redukcijo odčitka instrumenta na nivo točke izračunamo z enačbo:

$$r_i'(t) = r_i(t) + \left(\frac{\partial g}{\partial H} \right)_P h_i \quad (2)$$

kjer so $r_i(t)$ – odčitek gravimetra v trenutku t ,

$\left(\frac{\partial g}{\partial H} \right)_P$ – vertikalni gradient sile teže v opazovališču P in h_i izmerjena višina

instrumenta. Dejanski vertikalni gradient težnega pospeška poznamo samo na točkah, kjer je neposredno določen z meritvami. Na točkah, kjer ni določen, se uporabi vertikalni gradient normalnega težnega pospeška, ki znaša: 0,3086 mGal/m.

Popravek zaradi vpliva atmosferskega tlaka

Sprememba zračnega tlaka povzroči spremembo mase zračnega stolpa nad merjeno gravimetrično točko. Vpliv zračnega tlaka na spremembo težnosti v μGal se računa glede na tlak normalne atmosfere DIN 5450 po enačbi, ki jo priporoča *International Association of Geodesy* (IAG) v resoluciji št. 9, ki je bila sprejeta na zasedanju IAG leta 1983 (Schüler, 2000):

$$\Delta g_p = 0,30 \cdot (p - p_n) \quad (3)$$

$$p_n = 1013,25 \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \cdot H}{288,15} \right)^{5,2559} \quad (4)$$

kjer je:

[•] J.C. Harrison, J. Levine, K. Young, D. Agnew, G. Sasagawa in J. Gschwind

p . . . merjeni zračni tlak na stojšču v hPa,
 p_n . . . izračunani normalni zračni tlak na stojšču v hPa,
 H . . . nadmorska višina gravimetrične točke v metrih.

Redukcija opazovanj za dnevni hod instrumenta

Vplivi na elastičnost in dolžino vzmeti, kot so spreminjanje temperature in pritiska v notranjosti instrumenta, staranje vzmeti ter razni tresljaji, povzročajo, da gravimeter tekom časa spremeni ničelni odčitek. Ta pojav imenujemo hod (angl. *drift*) instrumenta. Izračunan s polinomom čim manjše stopnje, ki se najbolje prilega določenim vrednostim hoda na posameznih točkah. Iz polinoma lahko izračunamo popravek hoda Δg_D v času t_i po enačbi (Torge, 1989) :

$$\Delta g_D = d_1(t_i - t_0) + d_2(t_i - t_0)^2 + d_3(t_i - t_0)^3 \dots \quad (5)$$

pri čemer so:

t_0 . . . referenčni (začetni) čas merjenja,
 d_1, d_2, d_3 . . . koeficienti polinoma.

Na osnovi izkušenj, ki smo jih pridobili s testnimim meritvami izvedenimi leta 2005 (Koler in sod., 2006b) in izkušenj drugih uporabnikov gravimetrov Scintrex kažejo, da linearna funkcija hoda zadošča v večini primerov.

Kalibracija gravimetra

Rezultati merjenja z gravimetrom se izražajo v različnih enotah njegove merilne naprave (čutila). Da bi te enote lahko pretvorili v enote težnega pospeška, je potrebno opraviti kalibracijo gravimetra. Kalibracija je torej postopek določevanja t. i. kalibracijske funkcije, ki omogoča omenjeno pretvorbo merskih enot.

Pred izvedbo meritev gravimetrične mreže 1. reda je bila izvedena kalibracija obeh uporabljenih instrumentov. Kalibracija je bila izvedena za oba instrumenta hkrati, in sicer na hrvaški kalibracijski bazi med točkama Zagreb–Maksimir in Zagreb–Puntijarka (Bašić, Markovinović, 2002). Kalibracija obeh instrumentov je bila izvedena tudi po končanih meritvah gravimetrične mreže 1. reda. Različne vrednosti kalibracijskih faktorjev pridobljenih pred in po izmeri gravimetrične mreže, smo upoštevali pri končni obdelavi podatkov izmere.

Izravnava gravimetrične mreže

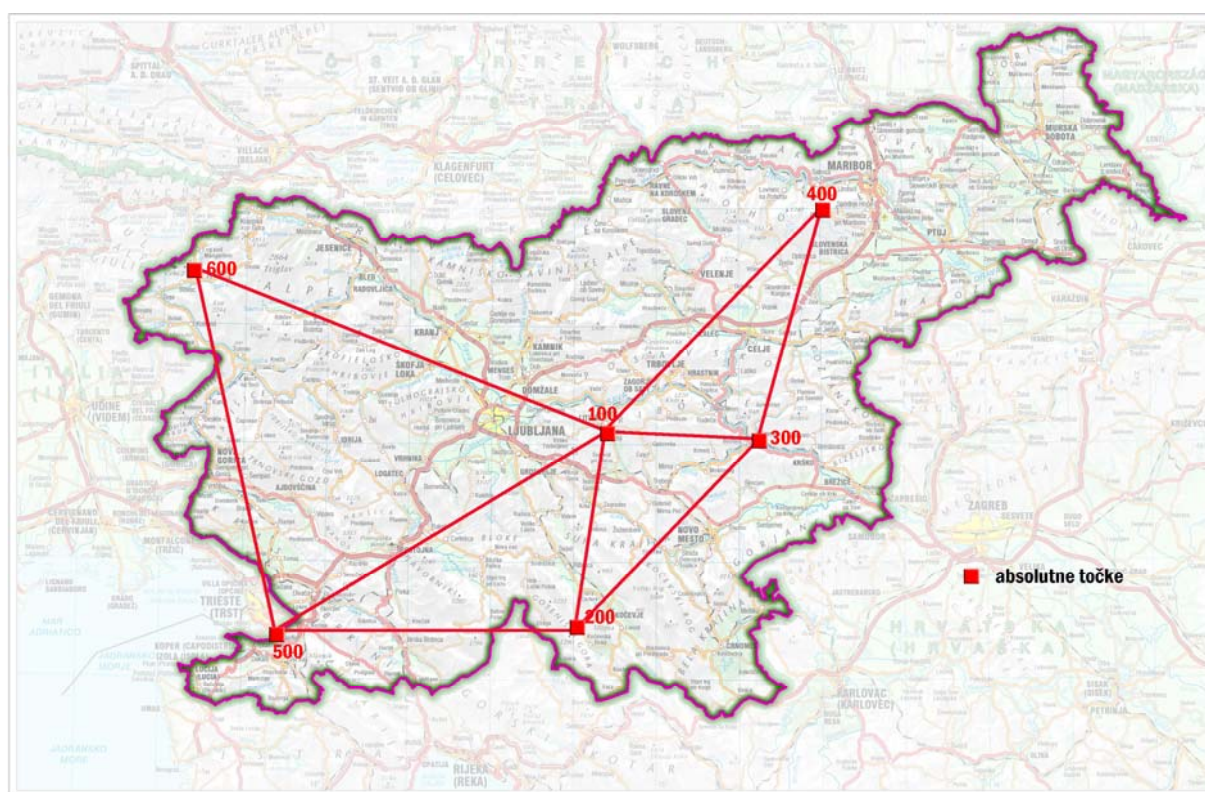
Pri izravnavi gravimetrične mreže smo uporabili metodo posredne izravnave, ki je identična izravnavi meritev v 1D mreži (npr. višinska mreža). Vsa opazovanja smo pred izravnavo ustrezno "popravili". Samo izravnavo mreže smo izvedli v dveh korakih:

1. izravnava opazovanj v mreži 0. reda
2. izravnava opazovanj v mreži 1. reda

Izravnava opazovanj v mreži 0. reda

Pri obdelavi podatkov gravimetričnih opazovanj je običaj, da se v izravnavi absolutne točke privzamejo kot dane. Znano je dejstvo, da je po opravljeni stabilizaciji v letu 1995 na točkah AGT 300 (Sevnica) in AGT 500 (Kluže) prišlo do sprememb v njihovi neposredni okolici. Na obeh točkah so oskrbovalci objektov, v katerih ležijo točke, dvignili nivo tlaka. V Sevnici je dodatna plast debela približno 15 cm, v Klužah pa okoli 10 cm. S tem se je dejansko spremenila tudi vrednost težnega pospeška na točki. Poleg tega je med meritvami na absolutnih gravimetričnih točkah in meritvami, opravljenih v gravimetrični mreži 1. reda minilo, 10 let.

Zato smo pri izmeri gravimetrične mreže 1. reda Slovenije z relativnimi gravimetričnimi meritvami direktno povezali tudi posamezne absolutne gravimetrične točke (Slika 2). Izmerjenih je bilo 9 direktnih povezav med točkami. S tem smo pridobili možnost analize gravimetričnega datuma in kontrole določitve absolutnih vrednosti težnostnih pospeškov. Prav tako je s temi povezavami omogočena analiza sprememb oziroma možnost primerjave danih vrednosti z merjenimi vrednostmi težnega pospeška.



Slika 2: Merjene povezave med absolutnimi točkami

Na podlagi navedenega smo se odločili, da relativne meritve med absolutnimi točkami izravnamo kot opazovanja v prosti mreži. Izravnane vrednosti težnosti absolutnih točk potem uvedemo v izravnavo opazovanj v celotni mreži (mreža 1. reda) kot dane količine.

Izravnavo opazovanj v mreži smo opravili s posredno izravnavo s pogoji med neznankami. V model imamo poleg opazovanj vključene tudi neznanke in numerične konstante. V model uvedemo t. i. psevdopazovanja, ki predstavljajo vezi med neznankami. Vrednosti neznank ali funkcije med neznankami, ki jih v izravnavi predstavimo kot opazovanja, lahko določimo na podlagi približnih vrednosti neznank, ki jih moramo poznati v obdelavi, ali na podlagi predhodno izvedene izravnave, ki je potekala

na podlagi istega matematičnega modela z drugimi opazovanji (Vaniček in Krakiwsky, 1986 cit. po Sterle, 2007).

Torej pri izravnavi opazovanj v mreži absolutnih točk uvedemo merjene vrednosti težnih pospeškov vseh točk kot opazovanja. Te vrednosti so sedaj t. i. "psevdoopazovanja". Za vsako uvedeno vrednost težnega pospeška - opazovanja, uvedemo ustrezno enačbo popravkov (Niemeier, 2002).

Glede na dejstvo, da je na točki AGT 100 izvedenih največ absolutnih meritev (4 meritve) ji pripišemo najmanjšo a priori oceno natančnosti (3 μGal). Točkam AGT 300 in AGT 600, glede na spremenjeni nivo tlaka pripišemo največjo oceno natančnosti (8 μGal), ostalim točkam AGT 200, AGT 400 in AGT 500 pa vmesno vrednost (5 μGal). Za a priori natančnost opazovanj prevzamemo 15 μGal (a posteriori ocena vrednosti standardnega odklona izravnave proste mreže 0. reda z obema instrumentoma). Opravili smo tudi analizo vplivov različnih utežnih sistemov na rezultate izravnave (uteži so bile določene na podlagi časa potovanja med točkami, razdalje med točkami, natančnosti posamezne meritve, temperaturne spremembe med meritvami, na podlagi razlik izmerjene težnosti med instrumentoma, opravili pa smo tudi izravnavo z enakimi utežmi opazovanj...). Iz opravljene analize rezultatov smo ugotovili, da izbira uteži ne vpliva bistveno na končne rezultate izravnave. Razlike so minimalne. Za končno izravnavo smo izbrali model, kjer so uteži vseh opazovanj enake. Izbira temelji na dejstvu, da so bile vse meritve opravljene z istima instrumentoma, v približno enakih pogojih, postopki izmere so bili vedno enaki, operaterji pa so bili enako usposobljeni in izkušeni. Rezultati izravnave so zbrani v Preglednici 1.

Preglednica 1: Merjene vrednosti težnosti, popravki izravnave, izravnane vrednosti težnosti in ocena natančnosti na absolutnih točkah

Točka	Merjen g [μGal]	Popravki [μGal]	Izravnani g [μGal]	σ_i [μGal]
AGT 100	980593537,5	-3,2	980593534,3	2,6
AGT 200	980506829,5	-9,9	980506819,6	4,0
AGT 300	980641076,5	22,7	980641099,2	5,1
AGT 400	980483762,9	-1,8	980483761,1	4,3
AGT 500	980558575,1	2,9	980558578,0	4,0
AGT 600	980545846,5	22,7	980545869,2	5,6

Iz Preglednice 1 vidimo, da so največji popravki merjenih absolutnih vrednosti na točkah AGT 300 (22,7 μGal) in AGT 600 (22,7 μGal), kjer je bil dodan nov tlak.

Izravnavo opazovanj v mreži 1. reda

Pred izravnavo mreže 1. reda definiramo a priori datum, ki ga predstavljajo izravnane vrednosti težnih pospeškov mreže 0. reda. Prevzete vrednosti absolutnih točk tako predstavljajo rezultati izravnave s psevdoopazovanji (prosta mreža 0. reda).

Pri izravnavi mreže 1. reda smo uporabili pristop upoštevanja razlik merjenih vrednosti težnega pospeška med dvema sosednjima točkama kot opazovanja. Ker sta bila med meritvami uporabljena dva instrumenta (oznaka SGU1 in HGI1) nam to omogoča izvedbo treh neodvisnih izravnav. V prvih dveh so vhodne podatke predstavljale razlike težnih pospeškov med dvema točkama dobljenih z vsakim instrumentom posebej, v tretji izravnavi pa so podatki meritev obeh instrumentov skupaj. Za uteži merjenih razlik težnega pospeška smo prevzeli vrednost 1.

Za primerjavo natančnosti meritev obeh instrumentov smo izvedli prosto izravnavo mreže (vključenih 36 točk, danih 0 točk) z upoštevanjem minimalnega števila vezi. Tako pridobimo a posteriori oceno natančnosti (referenčni standardni odklon) za posamezni instrument. Za instrument SGU1 znaša $\hat{\sigma}_{o(SGU1)} = 7,7 \mu\text{Gal}$ in za instrument HGI1 je $\hat{\sigma}_{o(HGI1)} = 7,2 \mu\text{Gal}$. Ocenjena natančnost prosto izravnane mreže za oba instrumenta skupaj je $\hat{\sigma}_{o(SGU1+HGI1)} = 9,5 \mu\text{Gal}$.

Izvedli smo še izravnavo s fiksnimi absolutnimi točkami. V izravnavo smo vključili 36 točk, od tega je 6 danih (dane točke so izravnane vrednosti absolutnih točk v mreži 0. reda). V tem primeru je a posteriori ocena natančnosti izravnave za instrument SGU1 $\hat{\sigma}_{o(SGU1)} = 10,5 \mu\text{Gal}$ in za instrument HGI1 $\hat{\sigma}_{o(HGI1)} = 9,2 \mu\text{Gal}$. V primeru izravnave z obema instrumentoma skupaj je a-posteriori ocena natančnosti izravnave $\hat{\sigma}_{o(SGU1+HGI1)} = 10,05 \mu\text{Gal}$.

Končne vrednosti težnosti na relativnih gravimetričnih točkah smo pridobili z izravnavo opazovanj v celotni mreži. Upoštevali smo opazovanja z obema gravimetroma, brez navezav na gravimetrične točke v Republiki Hrvaški. Točko v Avstriji (1-212-10) smo vključili v izravnavo zaradi večje homogenosti mreže. Za a priori oceno natančnosti meritev smo prevzeli $\sigma_0 = 9,5 \mu\text{Gal}$ (a posteriori ocena vrednosti standardnega odklona izravnave proste mreže 1. reda z obema instrumentoma). Končne izravnane vrednosti težnosti (g) na relativnih točkah z ustreznimi standardnimi odkloni (σ) so podane v Preglednici 2. Podatki o pospešku sile teže so definirani v gravimetričnem referenčnem sistemu IGSN71 (International Gravity Standardization Network 1971).

Preglednica 2: Izravnane vrednosti težnega pospeška na gravimetričnih točkah 1. reda

Točka	g [μGal]	σ [μGal]	Točka	g [μGal]	σ [μGal]
GT 1	980592041,9	3,3	GT 16	980588023,2	4,6
GT 2	980593070,2	3,7	GT 17	980629788,8	4,1
GT 3	980532983,9	3,8	GT 18	980670802,7	4,4
GT 4	980535512,4	3,9	GT 19	980661903,8	5,3
GT 5	980573175,3	3,4	GT 20	980547740,3	4,6
GT 6	980630947,7	4,1	GT 21	980551034,7	4,3
GT 7	980594108,2	3,3	GT 22	980716218,7	5,6
GT 8	980567041,4	5,4	GT 23	980545389,6	4,3
GT 9	980355043,5	5,6	GT 24	980716163,0	6,2
GT 10	980515974,8	4,8	GT 25	980695159,1	4,4
GT 11	980560125,2	4,5	GT 26	980658581,2	3,5
GT 12	980554333,4	3,8	GT 27	980662145,0	4,5
GT 13	980566860,7	4,1	GT 28	980647775,8	3,9
GT 14	980625540,3	3,0	GT 29	980711506,8	6,2
GT 15	980614196,0	4,6	1-212-10	980514966,4	4,7

V Preglednici 3 so zbrane globalne ocene natančnosti gravimetrične mreže 1. reda.

Preglednica 3: A priori in a posteriori ocene natančnosti gravimetrične mreže 1. reda

	Instrument SGU1 [μGal]	Instrument HGI1 [μGal]	Oba Instrumenta [μGal]	Opomba
a priori			$\sigma_{\delta} = 9,2$	Iz razlik dvojnih meritev
	$\sigma_{f(SLO)} = 7,4$	$\sigma_{f(HR)} = 7,7$		Iz zapiranja gravimetričnih likov
a posteriori	$\hat{\sigma}_{0(SLO)} = 7,7$	$\hat{\sigma}_{0(HR)} = 7,2$	$\hat{\sigma}_{0(SLO+HR)} = 9,5$	Prosta izravnava
	$\hat{\sigma}_{p(SLO)} = 10,5$	$\hat{\sigma}_{p(HR)} = 9,2$	$\hat{\sigma}_{p(SLO+HR)} = 10,3$	Izravnava s fiksnimi danimi točkami

Primerjava s Potsdamskim datumom

Ko so se leta 1967 izvajale meritve na točkah Osnovne gravimetrične mreže Jugoslavije, je bil v veljavi Potsdamski težnostni sistem. Meritve v gravimetrični mreži Slovenije so bile izvedene v sistemu IGSN71. Če so bila merjenja in obdelava meritev v obeh sistemih izvedena korektno, naj bi med vrednostmi med obema sistemoma prihajalo do konstantne razlike. Razlika je lahko posledica napak v izračunih, različnega merskega postopka, natančnosti instrumentarija in morebitnih sprememb težnostnega polja ali višin točk. V Preglednici 4 so podani težnostni pospeški na merjenih točkah iz leta 2006 v sistemu IGSN71, težnostni pospeški na ohranjenih gravimetričnih točkah iz leta 1967 v Potsdamskem sistemu ter razlika med njimi. Gravimetrični podatki iz leta 1967 so v viru (topografije točk) podani v enoti mGal, na 2 decimalki natančno.

Preglednica 4: Primerjava vrednosti g med sistemom IGSN71 in Potsdamskim sistemom

Točka	Stara oznaka	IGSN 71 [mGal]	POTSDAM [mGal]	Razlika [mGal]
GT 1	1	980592,0445	980607,01	14,97
GT 2	2	980593,0719	980608,13	15,06
GT 4	4	980535,5147	980550,70	15,19
GT 5	348	980573,1785	980588,19	15,01
GT 6	6	980630,9538	980645,65	14,70
GT 8	8	980567,0491	980581,89	14,84
GT 9	9	980355,0518	980370,54	15,49
GT 10	10	980515,9822	980531,08	15,10
GT 11	11	980560,1297	980575,16	15,03
GT 12	12	980554,3356	980569,43	15,09
GT 15	35	980614,1982	980629,09	14,89
GT 16	37	980588,025	980602,92	14,89
GT 19	19	980661,9066	980676,85	14,94
GT 20	20	980547,7429	980562,84	15,10
GT 22	44	980716,2192	980730,86	14,64
GT 23	23	980545,3884	980560,74	15,35
				povp. = 15,02

Vidimo, da je povprečna razlika med sistemoma + 15,02 mGal. V splošnem velja, da je bil med sistemom IGSN71 in Potsdamskim sistemom izmerjen zamik + 14 mGal. Naknadne meritve na območju bivše Jugoslavije, ki so bile izvedene v Beogradu in Zagrebu, so pokazale zamik v velikosti 15,13 mGal do 15,10 mGal (Zbornik instituta za geodezijo, 1984). S testnimi meritvami na območju Slovenije (meritve so bile izvedene na reperjih nivelmana visoke natančnosti (II. NVN) II in nekaterih točkah osnovne gravimetrične mreže), izvedenimi v letu 2005, je bil določen zamik v velikosti 15,1 mGal (Urek, 2005). Naše meritve navedene razlike potrjujejo.

Zaključek

Osnovno gravimetrično mrežo Slovenije tvori 35 točk, 6 absolutnih točk mreže 0. reda in 29 relativnih točk 1. reda. Določitev vrednosti težnega pospeška na točkah 1. reda smo opravili z gravimetričnimi meritvami, ki smo jih izvedli v 42 delovnih dneh konec leta 2006. Meritve smo izvajali z dvema relativnima gravimetroma tipa Scintrex CG-3M.

Obdelavo podatkov opazovanj smo opravili z izračunom ustreznih popravkov in redukcij merjenih vrednosti težnega pospeška. Iz popravljenih vrednosti težnosti na posameznih točkah smo izračunali razlike težnih pospeškov, ki smo jih obravnavali kot opazovanja. Ta smo izravnali v mreži po metodi posrednih opazovanj. Da bi upoštevali vse prostorske in časovne spremembe na absolutnih točkah, ki so se zgodile od njihove stabilizacije in izmere v letih 1995 in 1996, smo najprej izravnali opazovanja med samimi absolutnimi točkami. Izravnavo smo opravili po metodi posrednih opazovanj in to kot prosto mrežo. Na ta način smo pridobili nove vrednosti težnega pospeška na absolutnih točkah, ki smo jih potem obravnavali kot dane vrednosti v izravnavi opazovanj v celotni mreži.

Menimo, da so sama opazovanja opravljena z natančnostjo, ki ustreza meritvam za določitev gravimetričnih mrež. Na to kažejo referenčni standardni odkloni v izravnavi celotne mreže z upoštevanjem minimalnega števila vezi (v primeru skupne izravnavе meritev obeh instrumentov smo dobili vrednost: $\hat{\sigma}_{o(SGU1+HGI1)} = 9,5 \mu\text{Gal}$). To je hkrati tudi ocenjena natančnost opravljenih meritev.

Končne vrednosti težnosti na relativnih točkah gravimetrične mreže 1. reda smo pridobili z izravnavo opazovanj v celotni mreži. Upoštevali smo opazovanja z obema gravimetroma. Ocenjena natančnost določitve posameznih točk se giblje med 3,0 μGal in 6,2 μGal . Doseženo natančnost ocenjujemo kot zelo dobro, saj so bile to prve relativne gravimetrične meritve v Sloveniji, izvedene po več desetletjih.

V splošnem so meritve v osnovni gravimetrični mreži Republike Slovenije opravljene kvalitetno in vrednosti težnega pospeška so določene z ustrezno natančnostjo. Priporočljivo bi bilo gravimetrična opazovanja v mreži po nekaj letih ponoviti, saj bi tako pridobili tudi vpogled v morebitne časovne spremembe težnega pospeška. Pred tem pa bi bilo vsekakor potrebno ponovno izvesti absolutne meritve na vseh točkah mreže 0. reda, saj so meritve stare že več kot 10 let. Poleg tega je na nekaterih točkah prišlo tudi do sprememb, ki vplivajo na težnostni pospešek. Na osnovi rezultatov izmere in dosežene natančnosti lahko zaključimo, da smo z novo osnovno gravimetrično mrežo Republike Slovenije pridobili kvalitetno osnovo za vse nadaljne gravimetrične meritve na območju Slovenije.

Literatura

- Hećimović, Ž., Markovinović, D., 2003b. Kalibracija relativnih Scintrex CG-3M gravimetara HGI-1 i HGI-2. Geodetski list 3: 161-166, Zagreb.
- Koler, B., Medved, K., Kuhar, M., 2006b. Project of the new gravimetric network and test survey in Slovenia. Contributions to Geophysics and Geodesy 2006. Special issue, 36: 31-41.
- Micro-g Solutions, 1995. FG5 Software Manual OLIVIA/RERPLAY Version 2.2, Erie, Colorado. , <http://www.microglacoste.com/software.htm>
- Niemeier, W., 2002. Ausgleichungsrechnung. Učbenik. Berlin, New York.
- Scintrex Limited, 1995. CG-3/3M Autograv Automated Gravity meter. Operation manual. Scintrex Limited, Ontario, Canada.
- Schüler, T., 2000. Conducting and Processing Relative Gravity Surveys. University FAF Munich, Institute of Geodesy and Navigation, Germany.
- Sterle O., 2007. Združevanje klasičnih geodetskih in GNSS-opazovanj v geodinamičnih raziskavah. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Podiplomski študij geodezije: 118 str.
- Torge, W., 1989. Gravimetry. Učbenik. Berlin - New York, Walter de Gruyten.
- Torge W., 2001. Geodesy. Učbenik. Berlin - New York, Walter de Gruyten.
- Urek, D., 2005. Avtomatska obdelava in analiza testnih meritev z relativnim gravimetrom SCINTREX CG-3M. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer: 106 str.
- Zbornik instituta za geodeziju, 1984. Studija o stanju dosadašnjih radova na astro-geodetskoj mreži SFRJ sa predlogom mera za dalje radove. Beograd, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet: 97 str.

Delovanje državne mreže potresnih opazovalnic

Peter Sinčič, Renato Vidrih*

Povzetek

S svečano otvoritvijo jeseni leta 2006 je bila končana modernizacija državne mreže potresnih opazovalnic. Sestavlja jo 26 potresnih opazovalnic z rezervnim središčem za obdelavo podatkov na Golovcu v Ljubljani. Z vseh opazovalnic teče neprekinjen prenos treh podatkovnih nizov s frekvencami vzorčenja 200, 20 in 1 vzorec na sekundo v središče za obdelavo v Uradu za seizmologijo in geologijo, kjer potekajo takojšnja obdelava, začasno shranjevanje in samodejno obveščanje seizmologov o mogočih dogodkih. Programski paket Antelope skrbi za zajem in prenos podatkov, samodejno obdelavo in arhiviranje, interaktivni nadzor opreme na opazovalnicah, nadzor delovanja sistema, detekcijo dogodkov, interaktivno analizo, lociranje potresov in distribucijo seizmoloških podatkov. Razvoj računalniških komunikacij je omogočil tudi nastanek virtualnih mrež potresnih opazovalnic. Samo opazovalnico in na njej nameščeno opremo vzdržuje lokalna institucija, vendar so podatki dosegljivi vsem zainteresiranim. Tako v Sloveniji v središču za zbiranje in obdelavo podatkov podatke slovenske državne mreže integriramo s podatki nekaterih opazovalnic iz sosednjih držav (Avstrije, Hrvaške, Italije in Madžarske). Na ta način povečamo območje bolj natančnega določanja žariščnih parametrov ter se lažje izognemo izpadu in nasičenosti zapisov v primeru močnega potresa. Poleg mnogo kakovostnejšega spremljanja potresne dejavnosti in omogočanja natančnejših izračunov potresnih parametrov, je za pristojne inštitucije in prebivalce Slovenije najpomembnejše mnogo hitrejšo obveščanje in alarmiranje v primeru močnejših potresov. Vsak posameznik lahko v nekaj minutah po potresu na spletnih straneh Agencije RS za okolje najde osnovne podatke avtomatskega izračuna potresnih parametrov potresov, katerih žarišča so nastala na območju Slovenije in njene neposredne bližine. Kakovostnejši podatki omogočajo izdelavo novih kart potresne nevarnosti, ogrožanja in tveganja, ki so osnova predpisov potresno odporne gradnje in jih je mogoče vključiti v geoinformacijske sisteme.

Uvod

Po potresu leta 1998 v zg. Posočju smo začeli z gradnjo oz. modernizacijo državne mreže potresnih opazovalnic. Delo, ki je bilo zastavljeno že na Upravi RS za geofiziko, smo nadaljevali na Uradu za seizmologijo in geologijo ARSO.

Istočasno z nakupom seizmološke opreme v letih 1999-2000 smo začeli po vsej Sloveniji iskati primerne lokacije. Pri tem je bilo treba upoštevati številna merila, od geometrije mreže, naravnih danosti (seizmogeološke značilnosti, seizmični nemir, relief, klimatske razmere) do izvedbenih pogojev (možnost odkupa ali uporabe zemljišča, zagotovitev vira energije in komunikacij za prenos podatkov, izvedljivost gradbenih del, dostopnost in zaščita pred vandalizmom). Sledila so pripravljala dela (izdelava tipskega projekta, informacije o premoženjsko-pravnih zadevah ...), tem pa pozneje iskanje lokacijskih in gradbenih dovoljenj. Kljub številnim zapletom smo začeli graditi in danes se lahko pohvalimo s končano državno mrežo potresnih opazovalnic.

Karakteristike mreže potresnih opazovalnic opisujeta dva glavna parametra, in sicer natančnost lociranja žarišč oz. nadžarišč potresov in občutljivost mreže za zaznavanje šibkih potresov. Natančnost lociranja žarišč potresov je neposredno odvisna od števila in oddaljenosti potresnih opazovalnic. Občutljivost mreže opazovalnic je odvisna od lastnosti

* Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana

seizmološke opreme, seizmičnega nemira in geoloških pogojev na lokaciji opazovanja ter oddaljenosti potresov. Pri natančnem opazovanju je za seizmotektonske analize treba zaznati in locirati tudi zelo šibke potrese, ki sicer ne povzročajo škode, vendar veliko povedo o seizmičnih značilnostih opazovanih prelomov.

opaz.	ozn.	zem. šir.	zem. dol.	n. viš. [m]	geološka podlaga	seizmometer	zajemalna naprava
		°N	°E				
Ljubljana	LJU	46,04381	14,52776	396	karbonski peščenjaki	širokopasovni CMG-40T	RD3-1639
						širokopasovni STS-2 akcelerator EpiSensor	Q 730
Bojanci	BOJS	45,50435	15,25178	252	kredni apnenec	širokopasovni STS-2 akcelerator EpiSensor	Q 730
Dobrina	DOBS	46,14942	15,46943	427	spodnjetriasni laporji	širokopasovni CMG-40T	RD3-1639
						širokopasovni CMG-40T	Q 730
Cerknica	CEY	45,73814	14,42214	579	apnenec	širokopasovni CMG-40T	RD3-1639
						širokopasovni CMG-40T	Q 730
Goliše	GOLS	46,01074	15,62451	559	masiven dolomit	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Črešnjevce	CRES	45,97325	15,46317	372	dolomit dolomite	širokopasovni CMG-40T	Q730
Legarje	LEGS	45,94880	15,31771	390	sivi dolomit dolomite	širokopasovni CMG-40T BH	Q 730
Podkum	PDKS	46,06120	14,99777	679	dolomit dolomite	širokopasovni CMG-40T BH	Q 730
Robič	ROBS	46,24448	13,50944	265	apnenec	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Pernice	PERS	46,63595	15,11666	795	blestnik	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Grobnik	GROS	46,46100	15,50177	930	tonalit	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Čadrg	CADS	46,22804	13,73685	700	kredni apnenci	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Gornji Cirknik	GCIS	45,86720	15,62750	320	dolomit	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Višnje	VISS	45,80329	14,83929	403	siv apnenec	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Javornik	JAVS	45,89342	14,06433	1100	zgornje triasni dolomit	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Knežji dol	KNDS	45,52791	14,38056	1024	zgornje jurski apnenec	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Kog	KOGS	46,44816	16,25028	240	glina	širokopasovni CMG-40T akcelerator EpiSensor	Q 730
Gorjuše	GORS	46,31741	13,99991	1048	ploščasti apnenec z roženci	širokopasovni CMG-40T akcelerator EpiSensor	Q 730
Vojsko	VOJS	46,03217	13,88774	1073	zgornjetriasni dolomit	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Zavodnje	ZAVS	46,43393	15,02421	750	granodiorit	širokopasovni CMG-40T BH	Q 730
Možjanca	MOZS	46,29410	14,44334	660	ploščasti apnenec	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Črni Vrh	CRNS	46,08060	14,26135	689	sp. triasni sivi dolomit	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Vrh pri Dolskem	VNDS	46,10169	14,70143	531	kremenov peščenjak	širokopasovni CMG-40T	Q 730
Skadanščina	SKDS	45,54647	14,01317	558	ploščati apnenci	širokopasovni STS-2 akcelerator EpiSensor	Q730
Gornja Briga	GBRS	45,53110	14,81007	610	zgornjetriasni dolomit	širokopasovni CMG-40T	Q730
Gorenja Brezovica	GBAS	45,93473	14,44229	538	dolomit	širokopasovni CMG-40T	Q730

Preglednica 1: Potresne opazovalnice državne mreže z osnovnimi podatki.

Glede na pomembnost potresnega opazovanja na območjih z veliko potresno nevarnostjo in ogroženostjo so bile na ozemlju Republike Slovenije potrebne vsaj tri

lokalne mreže na potresno najbolj ogroženih območjih, ki so del državne mreže, in sicer ena na območju Ljubljane, druga v zgornjem Posočju ter tretja na območju jedrske elektrarne Krško tudi zaradi zahteve Evropske skupnosti. Državna mreža potresnih opazovalnic, ki združuje vse tri lokalne mreže in obsega 25 opazovalnic, prištejemo pa lahko tudi observatorij na Golovcu v Ljubljani, kjer je rezervno središče za obdelavo podatkov, je bila dokončana konec leta 2006.

Prenos podatkov

Da bi zadostili zahtevi po čim hitrejšem obveščanju javnosti in ustreznih služb, je bil izbran tak način delovanja mreže, ki zahteva kontinuiran prenos podatkov z vseh opazovalnic brez zakasnitve v središče za obdelavo podatkov. Izbrani prenosni sistem mora delovati zanesljivo in pri prenosu ne sme prihajati do izgube podatkov. Slaba stran prenosnega sistema je visoka cena.

Zajemalna naprava Quanterra Q730 omogoča več preskušanih načinov prenosa podatkov. Uporabnik določi vrstni red prenosa različnih vrst podatkov, kot so na primer posamezni dogodki ali kontinuirano zajemanje nihanja zemlje po enem kanalu z običajnim serijskim protokolom. Vgrajena kartica Ethernet omogoča uporabo računalniškega mrežnega protokola TCP/IP za prenos podatkovnih paketov, ki ima že vgrajen modul za odpravo napak med prenosom, omogoča pa tudi nadzor delovanja merilnega sistema in nastavitve parametrov iz središča. Za trikanalni sistem je zahtevana maksimalna prenosna hitrost 20,7 kb/s, za šestkanalni pa 39,5 kb/s. V praksi sta ti dve hitrosti zaradi kompresije podatkov pri prenosu nižji.

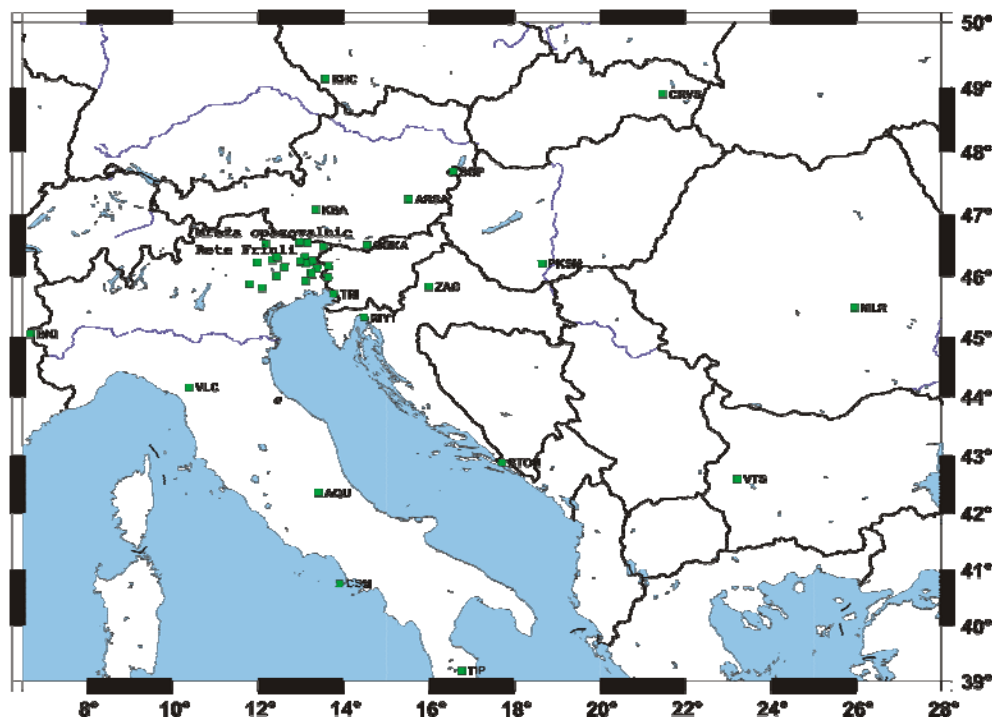
Ker smo kot državni organ vključeni v hitro komunikacijsko omrežje državnih organov (HKOM), ki je razvejeno po celotni državi, smo ga uporabili tudi za prenos podatkov s potresnih opazovalnic.

Odločili smo se za prenos podatkov po fizičnih vodih (najete linije) do najbližje vstopne točke v HKOM. Tako so v HKOM vključene potresne opazovalnice Kog (KOGS), Grobnik (GROS), Pernice (PERS), Dobrina (DOBS), Legarje (LEGS), Goliše (GOLS), Črešnjevec (CRES), Podkum (PDKS), Bojanci (BOJS), Možjanca (MOZS), Gorjuše (GORS), Cerknica (CEY), Čadrg (CADS), Črni Vrh (CRNS), Gorenja Brezovica (GBAS), Ljubljana (LJU), Skadanščina (SKDS), Višnje (VISS), Vojsko (VOJS), Vrh pri Dolskem (VNDS) in Robič (ROBS). Zajemalna enota Q730 je vključena v usmerjevalnik in prek modema na linijo. V zadnjem času se prenos podatkov z najetih linij preklapa na omrežje ADSL.

Potresne opazovalnice so zaradi zahteve po čim manjšem seizmičnem nemiru, ki ga povzročajo urbana okolja, industrija in promet, umaknjene od naselij in zato tudi od komunikacijskih poti. Zaradi prevelikih stroškov napeljave telefonskih vodov smo za pet potresnih opazovalnic (Gornja Briga - GBRS, Gornji Cirk - GCIS, Javornik - JAVS, Knežji dol - KNDS in Zavodnje - ZAVS) za brezžični prenos podatkov uporabili satelitsko internetno povezavo.

Razvoj računalniških komunikacij je v zadnjem času omogočil tudi nastanek tako imenovanih virtualnih mrež potresnih opazovalnic. Samo opazovalnico in na njej nameščeno opremo vzdržuje lokalna institucija, vendar so podatki dosegljivi vsem zainteresiranim, tudi iz drugih delov sveta. Tako v Sloveniji v središču za zbiranje in obdelavo podatkov podatke slovenske državne mreže integriramo s podatki nekaterih opazovalnic iz sosednjih držav (Avstrije, Hrvaške, Italije in Madžarske) (Slika 1). Na ta način povečamo območje bolj natančnega določanja žariščnih parametrov ter se lažje izognemo izpadu in nasičenosti zapisov v primeru močnega potresa. Za spremljanje

potresne aktivnost v širši regiji v realnem času pridobivamo podatke iz še nekaterih držav osrednje in jugovzhodne Evrope. Seveda so tudi naši podatki na voljo vsem zainteresiranim institucijam v tujini. Prednosti virtualnih mrež so predvsem v tem, da so opazovalnice in oprema vzdrževane lokalno, podatki pa dostopni globalno. Upravljalcem virtualnih mrež je na voljo možnost, da za določen namen od vseh ponujenih zapisov v svojo konfiguracijo vključijo le tiste najbolj primerne (Živčić et al., 2005, Živčić, 2006).



Slika 1: Virtualna mreža tujih potresnih opazovalnic, iz katerih dobivamo podatke v realnem času. Podatke prenašamo iz opazovalnic iz Italije, Avstrije, Hrvaške, Madžarske, Slovaške, Češke, Romunije in Bolgarije (Kolar).

Središče za obdelavo podatkov

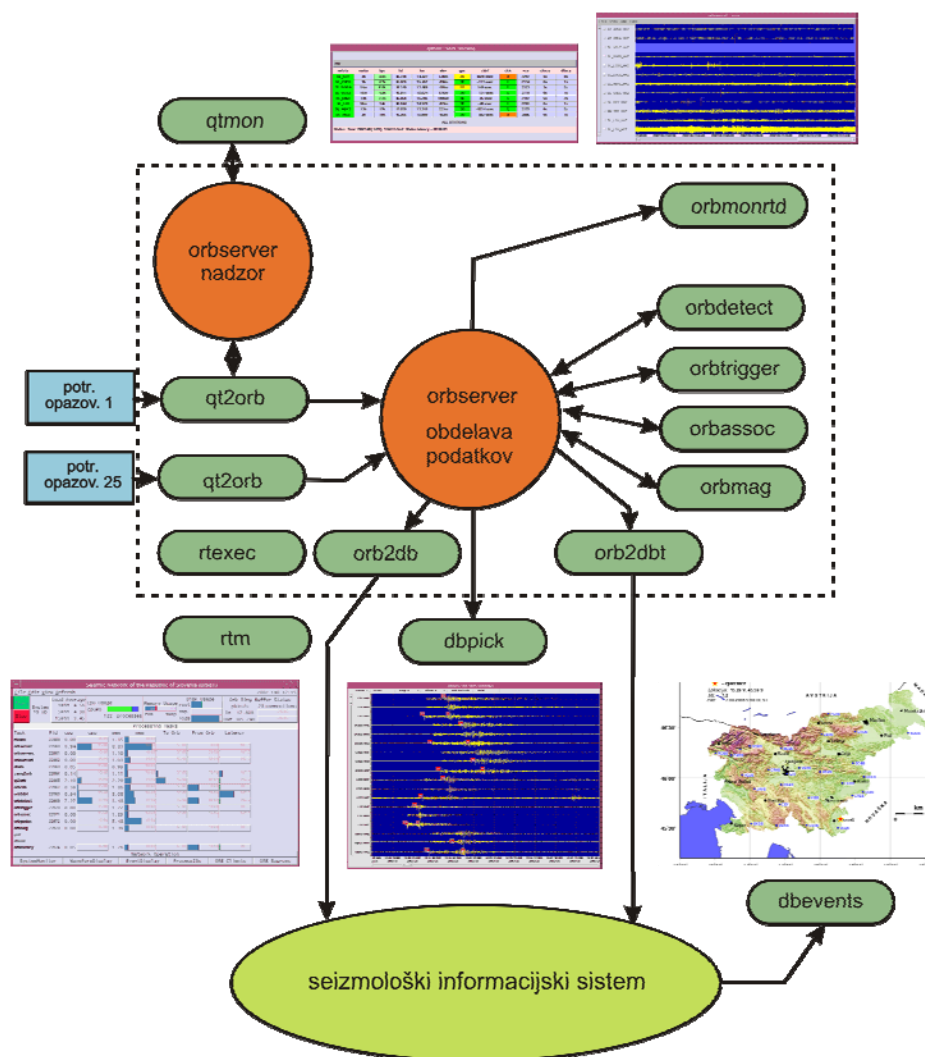
Vsi podatki, ki jih zajamejo instrumenti na potresnih opazovalnicah, se neprekinjeno prenašajo po računalniškem omrežju v središče za obdelavo podatkov (SOP) v Uradu za seizmologijo in geologijo na Agenciji RS za okolje. Sistem, potreben za zajem podatkov z opazovalnic, sestavljajo dva strežnika SunFire V250 z operacijskim sistemom Solaris 9 in programsko opremo Antelope, delovna postaja SunBlade 100 za pregled zapisov in ročno analizo podatkov, tiskalnik HP 4050 za takojšnje tiskanje avtomatskih analiz potresov in tračna enota DLT Tape VS80 za arhiviranje podatkov.

Podatki iz potresnih opazovalnic in tujih seizmoloških centrov neprekinjeno prihajajo v SOP v stvarnem času, kjer potekajo takojšnja obdelava, začasno shranjevanje in samodejno obveščanje seizmologov o mogočih dogodkih. Programski paket Antelope skrbi za zajem in prenos podatkov, samodejno obdelavo in arhiviranje, interaktivni nadzor opreme na opazovalnicah, nadzor delovanja sistema, detekcijo dogodkov, interaktivno analizo, lociranje potresov in distribucijo seizmoloških podatkov.

Programski paket Antelope sestavlja več kot 450 modulov, ki jih je mogoče zložiti v sistem, prilagojen vsakemu uporabniku. Ker so posamezni moduli dobro dokumentirani, lahko uporabniki sami upravljajo sistem in ga tudi nadgrajujejo. Vsak modul ima datoteko

s parametri, kar omogoča popolno kontrolo nad sistemom. Medtem ko je podlaga osnovnih modulov binarna koda in so torej nespremenljivi, pa je številne module mogoče spreminjati. Pisanje dodatnih modulov je močno olajšano z vmesniki za programske jezike C, PERL in TCL/TK (Slika 2).

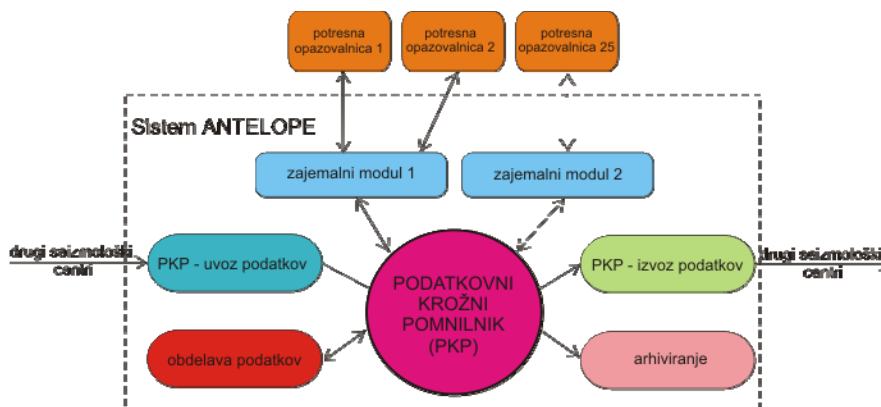
Sistem Antelope se pogovarja z zajemalnimi enotami prek zajemalnih modulov. Za vsako vrsto zajemalnih enot potrebujemo ustrezeni modul. V paketu obstajajo moduli za celo vrsto zajemalnih enot, lahko pa napišemo tudi svoje. Namen zajemalnih modulov je sprejem podatkov s senzorja in podatkov o stanju zajemalne enote ter njihovo posredovanje v podatkovni krožni pomnilnik (PKP). Zajemalne enote pošiljajo podatke v podatkovnih nizih s frekvencami vzorčevanja 1 Hz, 20 Hz in 200 Hz, kar nanese okoli 2 Gb podatkov na dan. Analiza lokalnih potresov poteka na podatkovnih nizih s frekvenco vzorčenja 200 Hz. Ostali nizi se uporabljajo pri analizi oddaljenih potresov, služijo pa tudi kot rezerva ob izpadu komunikacije med postajo in informacijskim omrežjem HKOM (Kobal, 2006).



Slika 2: Upravljalni sistem Antelope v središču za obdelavo v Ljubljani (Sinčič).

Znotraj sistema Antelope se podatki pretakajo skozi mehanizem, imenovan podatkovni krožni pomnilnik (PKP), ki je srce sistema. Vsak PKP je upravljan s programom Orbserver. Vmesniški moduli vpisujejo podatke, zajete na opazovalnicah, v eno ali več

enot PKP, ki jih uporabimo tudi za pošiljanje ukazov na opazovalnice. Podatke lahko uvozimo v PKP tudi iz enot PKP drugih seizmoloških centrov. V enoti PKP se shranjujejo zajeti podatki opazovalnic in rezultati obdelav teh podatkov (Slika 3). Antelope vsebuje programske module, ki omogočajo avtomatsko detekcijo, določanje vstopnih časov, združevanje dogodkov, lociranje, oceno magnitude in arhiviranje v stvarnem času. Vsak modul deluje kontinuirano kot samostojen program, pobira vhodne podatke in odlaga izhodne v enoto PKP. Izhodni podatki iz enote PKP lahko potujejo na drugo enoto PKP ali na arhivske module, ki arhivirajo vhodne podatke iz opazovalnic in rezultate analiz v seizmični informacijski sistem, v podatkovno zbirko. Naknadno lahko podatke obdelujemo s programskimi moduli podatkovne zbirke. Vse vrste programskih modulov sistema Antelope upravljajo in nadzirajo administratorski programski moduli. Paket Antelope vsebuje tudi številne module za kontrolo delovanja sistema. Nekateri med njimi so grafični, tako da lahko uporabnik enostavno spremlja dotok surovih podatkov v PKP in nadzira hitrost prenosa podatkov ter zamude podatkov s posameznih opazovalnih mest. Nadzirati je mogoče tudi delovanje posameznih modulov s spremljanjem obremenitve procesorja in uporabe diskov.



Slika 3: Shematski prikaz delovanja sistema Antelope (Kobal)

Da bi se izognili izpadu sistema zaradi računalniške okvare, sta v sistem zajemanja vključena dva identična računalnika. Ob okvari primarnega računalnika zajemalne enote prenehajo pošiljati podatke, opozorilni sistem pa obvesti ustrezne osebe s sporočilom SMS. Kar najhitreje se potem ročno ustavi še sekundarni sistem, ki na disk zapiše, katere podatke je že prejel, tako da ne pride do izgube ali podvajanja podatkov pri vnovičnem zagonu. Po ustavitvi, ki traja nekaj minut, sekundarnemu računalniku dodelimo IP-številko primarnega računalnika in sistem znova zaženemo. Ko je sistem zagnan, začnejo zajemalne enote spet pošiljati podatke. Najprej se z največjo možno prenosno hitrostjo prenesejo zakasnjeni podatki, potem pa se zajemanje nadaljuje v realnem času.

Programska oprema Antelope omogoča tudi samodejno obdelavo podatkov in pošiljanje obvestil. Potekata dve vrsti samodejne obdelave podatkov. Za obveščanje o potresih poteka obdelava močnejših dogodkov, rezultat so točno določeni parametri potresa. Za dnevno analizo dogodkov pa zahtevamo samodejno zaznavo čim več dogodkov, za katere ni potrebno, da so vsi potresi, niti ni potrebna natančna analiza, saj vsak tak dogodek naknadno analizira seizmolog (Slika 4). Podatki samodejnih analiz močnejših potresov in podatki analiz vseh dogodkov se shranjujejo v ločene podatkovne krožne pomnilnike.

Ko se v `ursg1:snrs` ali v `ursg1:cors` pojavi paket s parametri potresa, se sprožijo procesi obveščanja. Postopki so v obeh primerih podobni, razlika je le v vstopnih podatkih. Podatki o potresu se zapišejo v datoteko, natisnejo na tiskalnik v kontrolni sobi, razpošljejo

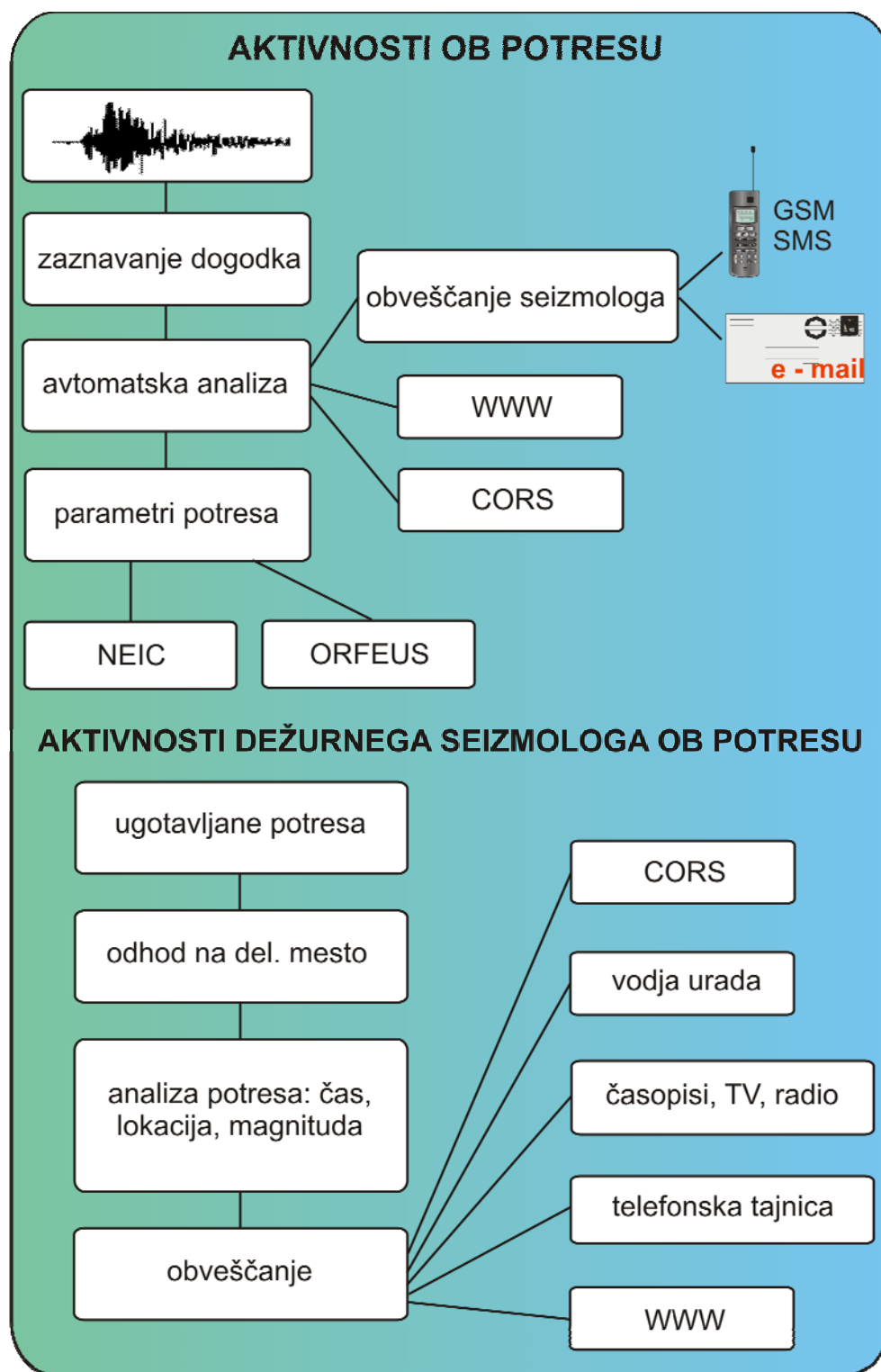
po elektronski pošti in s sporočili SMS ter se postavijo na spletno stran (Slika 5). Na spletni strani je poleg podatkov o potresu možno videti tudi zapise potresa in grafično predstavljeno lokacijo s podatki o postajah, ki so potres zaznale. S podatki z domače strani lahko dežurni seizmolog v večini primerov v nekaj minutah potrdi, ali gre za potres, v katerem delu Slovenije je bilo nadžarišče in oceni magnitudo. Če je potrebno, lahko dežurni seizmolog potres analizira iz seizmogramov, ki so prav tako dostopni prek domače strani.



Slika 4: Seizmologinja pri vsakodnevem opravi v središču za obdelavo podatkov (Sinčič)

Seizmogrami in rezultati procesiranja se zaradi varnosti shranjujejo na več mestih. Na obeh računalnikih imamo petdnevne zbirke neprekinjenih podatkov na diskih RAID 1 in dvajsetdnevne neprekinjene podatke na navadnih diskih. Na navadnih diskih imamo tudi za leto dni surovih podatkov v časovnih intervalih okrog dogodkov. Časovni interval se določi glede na lokacijo potresa. Za lokalne potrese shranimo 4-minutni časovni interval, ki se začne 1 minuto pred prvim vstopom. Pri regionalnih potresih shranimo praviloma 10 minut podatkov, pri oddaljenih pa je časovni interval odvisen od magnitude in je lahko dolg tudi 3 ure. Kontinuirani podatki se dnevno shranjujejo na DLT-trakove, podatki v časovnih intervalih okrog dogodkov pa se mesečno zapisujejo na nosilce CD oziroma DVD.

Podatki so dostopni v realnem času zunanjim organizacijam prek Antelope in podatkovnih krožnih pomnilnikov SeisComP na zunanjem računalniku. Podatke iz 20-dnevne neprekinjene zbirke pa je možno dobiti prek zahtev AutoDRM. To pomeni, da je treba poslati elektronsko pošto z ustrezno vsebino na naslov autodrm.lju@gov.si, strežnik pa potem pošlje podatke pošiljatelju tudi prek elektronske pošte.

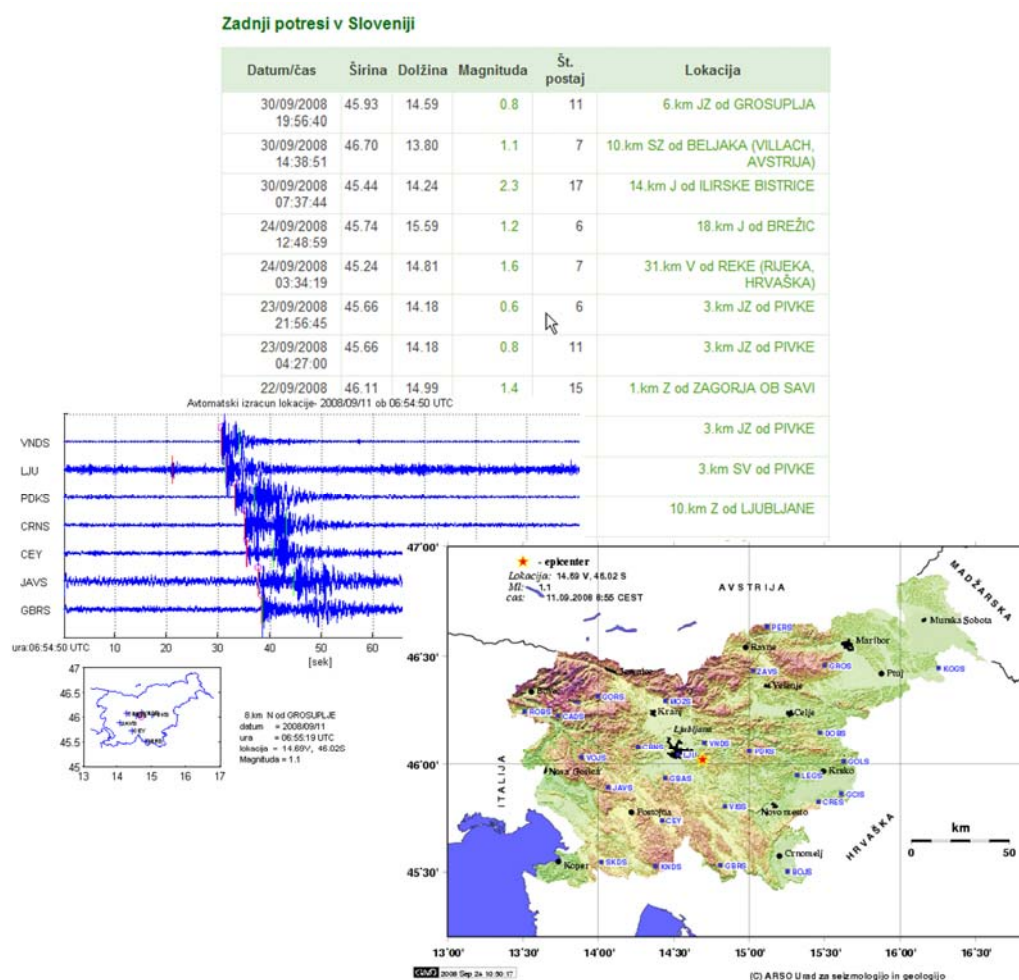


Slika 5: Shema avtomatskih aktivnosti in ukrepanje dežurnega seizmologa ob močnejšem potresu (Sinčič)

Sklep

Izgradnja državne mreže potresnih opazovalnic je iz različnih razlogov trajala dlje, kot je bilo prvotno zasnovano, v letu 2006 pa je bila vendarle dokončana. Poleg mnogo

kakovostnejšega spremljanja potresne dejavnosti in omogočanja natančnejših izračunov potresnih parametrov, je za pristojne institucije in prebivalce Slovenije najpomembnejše mnogo hitrejšo obveščanje in alarmiranje v primeru močnejših potresov. Vsak posameznik lahko v nekaj minutah po potresu na spletnih straneh Agencije RS za okolje najde osnovne podatke avtomatskega izračuna potresnih parametrov potresov, katerih žarišča so nastala na območju Slovenije in njene neposredne bližine (Slika 6). Naslov spletne strani je <http://www.arso.gov.si>. Ob kliku na “Zadnji potresi” v rubriki “Bližnjice” se pokaže preglednica potresov zadnjih dni. Ob kliku na magnitudo, se pokažejo zapisi potresa na potresnih opazovalnicah državne mreže, ob kliku na lokacijo pa se pokaže lega nadžarišča potresa na karti Slovenije.



Slika 6: Ob potresu na območju Slovenije se nekaj minut po dogodku prikažejo osnovni podatki o potresu, zemljevid z lokacijo nadžarišča (rdeča zvezda) in zapisi potresa na opazovalnicah državne mreže (<http://www.arso.gov.si/> povezava »Zadnji potresi«) (Sinčič)

Literatura

Kobal, M., Čarman, M., Kolar, J., Pahor, J., Živčič, M., 2006. Zajem in procesiranje seizmoloških podatkov s programskim paketom Antelope, Potresi v letu 2004. Publikacija ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, 142-150. Ljubljana

- Sinčič, P., Vidrih, R., 2005: Seismic Observation In Urban Area (Seismic Network Around Ljubljana, Slovenia). International conference 250th anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, 1-4 november 2005, Lisbon. Proceedings. str.222-228. Lizbona.
- Vidrih, R., Godec, M., Gosar, A., Sinčič, P., Tasič, I., Živčič, M., 2007: Državna mreža potresnih opazovalnic. Potresi v letu 2006. Publikacija ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, 34-73. Ljubljana
- Vidrih, R. (urednik), 2007. Državna mreža potresnih opazovalnic. Seismic Network of Slovenia, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, 288 str.
- Živčič, M., Kobal, M., Kolar, J., Pahor, J., 2005: Performance of the New Seismic Network of the Republic of Slovenia – First Results, NATO Advanced Research Workshop: Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries, 11-17 September 2005. Borovetz.
- Živčič, M., 2006: Seismic Network of the Republic of Slovenia, 30 anni dal Terremoto del Friuli 30 anni di Protezione Civile, Udine, Italy, 4-6 May 2006. Udine.

Geomagnetne meritve na geomagnetni referenčni točki na Predmeji

Rudi Čop, Jernej Kocen^{*}

Povzetek

Na ozemlju Republike Slovenije so bila za organizacijo in izvedbo prvih meritev vseh komponent zemeljskega magnetnega polja predhodno izbrana področja na osnovi analize GIS (geographic information system) in geološke sestave tal. Primernost izbranih lokacij se je nato še dodatno preverjalo na osnovi njihove oddaljenosti od umetnih virov motenj naravnega zemeljskega magnetnega polja. Na robu vasi Predmeja, v zahodnem delu Slovenije, je bilo narejenih več vrst predhodnih testov in več vrst meritev zemeljskega magnetnega polja: testiranje gradienta homogenosti skalarne vrednosti zemeljskega magnetnega polja, določevanje pozicij z uporabo omrežja SIGNAL (SlovenIja-Geodezija-NAvigacija-Lokacija), orientacija v prostoru s pomočjo opazovanja Sonca ter merjenje absolutnih vrednosti in registracija sprememb zemeljskega magnetnega polja komponent: X, Y, Z in F.

Uvod

Za izvajanje geomagnetnih meritev so bile na področju Slovenije v prvi fazi izbrane tri lokacije. Izbor je bil narejen na osnovi tehnologij GIS (geografski informacijski sistem) z upoštevanjem značilnosti geologije. Lokacije so bile določene glede na vpliv posameznih umetnih virov, ki lahko vplivajo na meritve magnetnega polja, kot so: električne železnice, avtoceste, ceste, električni daljnovodi, televizijski oddajniki, oddajniki operaterjev mobilne telefonije, letališča, radarji in drugo. Visokošolsko središče Sežana – Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo je v sodelovanju z dvema raziskovalcema iz geomagnetnega observatorija Grocka v Srbiji izvedlo geomagnetne meritve na referenčni točki na Predmeji. Skupina raziskovalcev je opravila naslednje meritve: merjenje homogenosti gradienta totalne intenzitete magnetnega polja, merjenje azimuta na osnovi opazovanja sonca, absolutna, bazna in trokomponentna geomagnetna merjenja. Izvedena so bila snemanja dnevnih variacij komponent geomagnetnega polja.

Geomagnetna merjenja in snemanja

Lokacija na Predmeji je izpolnjevala pogoje, ki so bili postavljeni za izbor lokacije za geomagnetno referenčno točko, na kateri so izvedena trokomponentna merjenja in snemanje dnevnih variacij komponent geomagnetnega polja. Poleg tega, dostopnost bližina poti in potrebne infrastrukture, omogoča enostaven dostop in delo na geomagnetni referenčni točki.

Na geomagnetni referenčni točki na Predmeji smo naredili geomagnetna merjenja z variometrično metodo. Pri navedeni metodi potekajo konstantna merjenja in snemanje posameznih komponent geomagnetnega polja od tri do pet dni. Za snemanje variacij smo na magnetno homogenem področju na lokaciji geomagnetne referenčne točke postavili

^{*} Visokošolsko središče Sežana, Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, Kraška ulica 2, 6210 Sežana,

digitalni trokomponentni magnetometer. Snemanje smo izvedli z intervalom zajema podatkov 1 podatek/sek. Poleg trokomponentnega magnetometra smo na geomagnetno referenčno točko postavili tudi protonski magnetometer za opazovanje dnevnih variacij totalne intenzitete geomagnetnega polja z intervalom snemanja 1 sek/podatek. V tabeli 1 je predstavljena oprema, ki smo jo uporabljali za izvedbo geomagnetnih meritev na geomagnetni referenčni točki na Predmeji od 24. do 30. septembra 2008.

Med potekom meritev dnevnih variacij geomagnetnega polja na geomagnetni referenčni točki, smo na bazni točki izvedli merjenja absolutnih vrednosti komponent geomagnetnega polja. Za izvedbo teh meritev smo uporabljali standardni DI magnetometer za merjenje magnetne deklinacije D in inklinacije I ter protonski magnetometer.

Tabela 1: Pregled instrumentov in opreme

Magnetometer	GMF-komponente	Način zapisa	Hitrost zapisovanj	Merilna občutljivost	Vrednosti
magnetometer Flux-gate MAGSON 11 (variometer)	X,Y,Z	digitalen, neprekinjen in avtomatski	1 sec.; 1 min.	0.1 nT	relativne in/ali absolutne
GSM-19.fg and/or GSM-19.gw (scalar)	F	digitalen, neprekinjen in avtomatski	1 sec.; 1 min.	0.01 nT	bazne in/ali gradiometer
DIM Bartington Mag - 01H	D,I	absolutne meritve	1 min.	0.1 nT	

Postavljanje magnetometra

Na osnovi merjenja gradienta totalne intenzitete geomagnetnega polja na mikrolokaciji referenčne točke smo postavili trokomponentni magnetometer MAGSON 11 (variometer) in Overhauserjev protonski magnetometer GSM-19. Položaj variometra je bil $Y = 413591.73$; $X = 89204.81$; $H = 879.74$ m (Slika 1), protonskega magnetometra pa $Y = 413580.79$; $X = 89203.95$; $H = 877.15$ m (Slika 2). Koordinate opisanih položajev so navedene v Gauss-Krügerjevem koordinatnem sistemu.



Slika 1: Položaj postavljanja trokomponentnega magnetometra MAGSON 11 (senzor)

Območje položaja geomagnetne referenčne točke na Predmeji leži na kraškem terenu. Na mikrolokaciji geomagnetne referenčne točke je sloj zemlje debel le 10-15 cm, zato je bilo postavljanje senzorja magnetometra, ki mora biti vkopan 35-40 cm oteženo. Podstavek smo postavili na skalo in ga utrdili s peskom in zemljo, nanj pa postavili senzor trokomponentnega magnetometra flux-gate MAGSON 11. Na razdalji 10 m od senzorja MAGSON 11, smo na lesen steber pritrdili Overhauserjev protonski magnetometer GSM-19 (Tabela 1; Slika 2). Do šotora, ki je bil od senzorja variometra in protonskega magnetometra oddaljen 20-25 m, smo postavili kable, preko katerih sta bila magnetometer flux-gate MAGSON 11 in Overhauserjev protonski magnetometer GSM-19 priklopljena na sprejemnika s spominsko enoto in preko akumulatorja na neprekinjeno napajanje.

Postopek postavljanja instrumentov je bil zaključen okrog 11 : 45 UTC, 25. septembra 2008 okrog 12 : 00 UTC, pa smo pričeli prva merjenja in snemanje dnevni variacij komponent X, Y, Z in F geomagnetnega polja na geomagnetni referenčni točki na Predmeji.

Snemanje dnevni variacij komponent geomagnetnega polja

Snemanje dnevni variacij komponent geomagnetnega polja smo izvedli v intervalu 1 podatek/sek. Na Sliki 3 so prikazana snemanja dnevni variacij komponent geomagnetnega polja (dX/dt ; dY/dt ; dZ/dt ; dF/dt) v razdobju od 25. do 30. septembra 2008 na geomagnetni referenčni točki na Predmeji.

Prvih 10 do 15 ur snemanja variacij je potrebnih, da se senzor popolnoma mehansko in temperaturno stabilizira na razmere, ki vladajo v okolici. Potrebno je zmanjšati senzorski in magnetometrski hod (angl. drift) v snemanju dnevni variacij. Temperatura v sprejemniku magnetometra MAGSON 11 se mora stabilizirati glede na temperaturo v okolici.

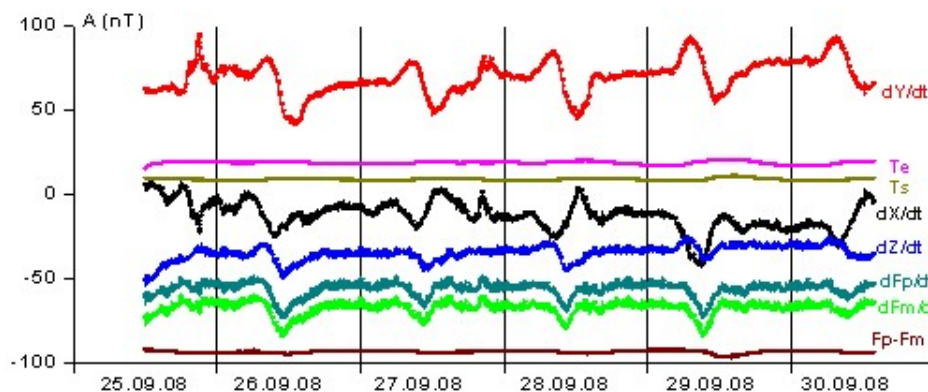


Slika 2: Postavljen in zaščitjen Overhauserjev protonski magnetometer GSM-19 (senzor)

Po intervalu mehanske in temperaturne stabilizacije variometra v obdobju od 26. do 30. septembra 2008 na geomagnetni referenčni točki na Predmeji so prikazani rezultati snemanja in skupina dnevnih variacij geomagnetnega polja (Slika 3). Morfologija dnevnih variacij komponent geomagnetnega polja, snemanih na referenčni točki na Predmeji, se lahko primerja z dnevnimi variacijami, snemanimi na observatorijih srednjih geomagnetnih širin.

Komponente, prikazane v Sliki 3, so:

- dY/dt ; dX/dt ; dZ/dt : snemanje variacij geomagnetnega polja s trokomponentnim magnetometrom flux-gate (variometrom) MAGSON 11 (relativne vrednosti) ;
- dF_p/dt : podatki totalne intenzitete magnetnega polja merjene, z Overhauserjevim protonskim magnetometrom (absolutne vrednosti);
- dF_M/dt : spremembe totalne intenzitete geomagnetnega polja, izračunane iz snemanih podatkov magnetometra MAGSON 11;
- $F_p - F_M$: razlika med vrednostmi variacije totalne intenzitete magnetnega polja;
- T_e , T_s : temperature sprejemnika in senzorja trokomponentnega magnetometra MAGSON 11.



Slika 3: Variacije komponent geomagnetnega polja v terminu od 25. do 30. septembra 2008 na geomagnetni referenčni točki na Predmeji

Absolutna merjenja geomagnetnega polja

Na osnovi merjenja homogenosti gradienta totalne intenzitete geomagnetnega polja, na mikrolokaciji geomagnetne referenčne točke na Predmeji smo v magnetno homogenem delu izbrali mesto za točko absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki, na kateri smo izvedli merjenja absolutnih vrednosti komponent geomagnetnega polja. Položaj točke absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki je $Y = 413558.37$; $X = 89285.44$; $H = 895.11$ m podan v Gauss–Krügerjevem koordinatnem sistemu.

Točka absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki je stabilizirana z granitnim kamnom dimenzij $20 \times 20 \times 60$ s podzemnim centrom. Na točki so izpolnjeni vsi pogoji za izvajanje geodetskih in geomagnetnih meritev ter opazovanj, kot so določanje azimuta z opazovanjem sonca, opazovanje smeri na določene referenčne oznake (fiksne točke) in izvajanje absolutnih geomagnetnih merjenj.

Določanje azimuta na osnovi opazovanja sonca

Na točki absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki na Predmeji smo uporabili astronomske metode za določanje azimutov referenčnih oznak (fiksni točk). Izvedli smo opazovanje sonca in na tej osnovi določili azimute na referenčne oznake.

Pri opazovanju sonca smo uporabili metodo čas – kot. Ta metoda pomeni odčitavanje vrednosti horizontalnih kotov DI-magnetometra in svetovnega časa UT. Koti na horizontalnem krogu se odčitavajo, ko ena stran sonca koincidira z vertikalno nitjo. Pri merjenju je potrebno zelo natančno določiti trenutek odčitavanja časa UT. Trenutek odčitavanja mora biti natančnejši od ene sekunde, natančnost odčitavanja kotov pa je pogojena z natančnostjo DI-magnetometra. Določanje azimuta na osnovi opazovanja sonca se izvaja zjutraj, ko je sonce na vzhodnem delu horizonta in popoldan, ko je na zahodnem delu.



Slika 4: Absolutne meritve komponent D, I in F geomagnetnega polja na točki absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki, na Predmeji

Na bazni točki na Predmeji smo za astronomska opazovanja sonca v prvi seriji uporabljali teodolit THEO 10B (magnetometer DI 810), v drugih serijah merjenja pa teodolit Wild T1 (Bartington DI-magnetometer Mag-01H) s filtri za opazovanje sonca. Merjenje časa smo izvedli s pomočjo signala GPS s protonskim magnetometrom GSM-19.

Absolutna merjenja vrednosti komponent geomagnetnega polja

V obdobju od 26. do 29. septembra 2008 smo izvedli absolutna merjenja komponent geomagnetnega polja na točki absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki na Predmeji. Uporabljena metoda zajema merjenje komponente D, I in F geomagnetnega polja, z uporabo DI-magnetometra in protonskega preciznega magnetometra.

Za absolutna merjenja kotnih elementov geomagnetnega polja, deklinacije D, inklinacije I in za merjenje totalne intenzitete vektorja geomagnetnega polja je uporabljen naslednji protokol:

- snemanje totalne intenzitete vektorja geomagnetnega polja na točki absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki v časovnem intervalu 10 minut (pred absolutnimi merjenji),
- če vremenske razmere dopuščajo, se izvede astronomsko opazovanje sonca,
- opazovanje kotov referenčnih oznak / fiksnih točk v prvi krožni legi (pred absolutnimi merjenji),
- merjenje kotov deklinacije v štirih položajih; koti deklinacije se odčitavajo v trenutku (hh : mm), ko na teodolitu DI-magnetometru flux-gate nastavimo amplitudo v totalni intenziteti $\Delta F = \pm 0.00$ nT (zero read method) v trenutku (hh : mm),
- opazovanje kotov referenčnih oznak / fiksnih točk v drugi krožni legi (po absolutnih merjenjih),
- izračunavanje srednje vrednosti kota deklinacije D s štirih položajev,
- nastavljanje teodolita DI magnetometra v položaj magnetnega meridiana tako, da se na horizontalnem krogu nastavi srednja vrednost kota deklinacije,
- opazovanje kota inklinacije I na vertikalnem krogu v štirih položajih: koti inklinacije se odčitavajo v trenutku (hh : mm), ko na DI-magnetometru flux-gate nastavimo amplitudo v totalni intenziteti $\Delta F = \pm 0.00$ nT (angl. zero read method) v trenutku (hh : mm),
- izračun srednje vrednosti kota inklinacije štirih opazovanj.

Serije absolutnih opazovanj se izvedejo v jutranjih in popoldanskih urah, ko je najmanjši vpliv korekcije na dnevno variacijo na absolutna in bazna merjenja. Na točki absolutnih merjenj na geomagnetni referenčni točki na Predmeji sta bili vsak dan, dokler so trajale kontinuirane meritve dnevnih variacij, izvedeni dve seriji absolutnega merjenja. Protokol merjenja kotov deklinacije D in inklinacije I se je v drugi seriji ponovil. Po opravljenih meritvah deklinacije in inklinacije se je izvedla še meritev vektorja totalne intenzitete magnetnega polja v časovnem intervalu 10 minut.

Zaključek

Geomagnetna referenčna točka na Predmeji je odmaknjena od vseh večjih izvorov motenj v magnetnem polju. Za enostaven dostop do točke se lahko uporabi mreža regionalnih in lokalnih poti. Leži v magnetno mirnem in homogenem območju, kar so

pokazala merjenja gradienta totalne intenzitete magnetnega polja na mikrolokaciji referenčne točke.

Prve meritve dnevnih variacij komponent geomagnetnega polja (X, Y, Z in F) na geomagnetni referenčni točki na Predmeji so pokazale glavne karakteristike vektorja geomagnetnega polja. V podlagi terena so prisotni sloji apnenca. Ti povzročajo kratkoperiodične šume v periodi mirne geomagnetne aktivnosti, ki jih v signalu dnevnih variacij lahko opredelimo tudi kot lokalne karakteristike signala. Vektor geomagnetnega polja na geomagnetni referenčni točki na Predmeji ni kontaminiran z variacijami, ki so posledica nehomogenosti geofizičnih parametrov geoloških formacij, niti ni kontaminiran z magnetnimi šumi umetnih izvorov.

Predmeja je izpolnjevala osnovne pogoje, ki so bili postavljeni za izbor lokacije za geomagnetno referenčno točko, na kateri so bila izvedena trokomponentna merjenja in snemanja dnevnih variacij geomagnetnega polja. Dnevne variacije, registrirane na geomagnetni referenčni točki pri dani morfologiji in strukturi, se lahko primerjajo s spreminjanjem dnevnih variacij komponent geomagnetnega polja na geomagnetnih observatorijih srednjih geomagnetnih širin.

Literatura:

- WIENERT, K.A. *Notes on geomagnetic observatory and survey practice*. Earth sciences. Brussels: UNESCO, 1970.
- JANKOWSKI, J. SUCKSDORFF, C. *IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1996. ISBN: 0965068625.
- NEWITT, L.R. BARTON, C.E. BITTERLY, J. *IAGA Guide for Magnetic Repeat Station Surveys*. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1997. ISBN: 0965068617.
- Intermagnet Technical Reference Manual*. Version 4.2. Edited by: Benoît St-Louis. Denver (CO, US): U.S. Geological Survey; Denver Federal Center, 2004. Available also from Internet in PDF format: <http://www.intermagnet.org/im_manual.pdf>.
- Geomagnetics for Aeronautical Safety: A Case Study in and around the Balkans*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. 1 edition. Editors Jean L. Rasson and Todor Delipetrov. Dordrecht (NL): Springer, 2006. ISBN: 1402050240.
- MIHAJLOVIĆ, J. Spomenko. *Morfologija varijacija geomagnetskog polja registrovanih na Geomagnetskoj opservatoriji Grocka u periodu 1958 - 1990 godine*. Monograph in Serb language. Beograd: Geomagnetski institut Grocka, 1996. ISBN: 8682725010.
- RIKITAKE, Tsuneji. *Developments in solid earth geophysics 2: Electromagnetism and the earth's interior*. Chapter 19. Conductivity anomaly in the crust mantle. Amsterdam; London; New York: Elsevier Publishing, 1966. ASIN: B0006BMSSA.

Primerjava podatkov SRTM z DMV Slovenije

Tomaž Žagar in Sandi Berk*

Povzetek

Preverili smo kakovost podatkov SRTM za območje Slovenije. Prednosti podatkov SRTM so, da so na voljo skoraj za ves svet, da so pridobljeni z enotno tehnologijo in po enotni metodologiji ter ne nazadnje, da so brezplačni. Pomanjkljivosti SRTM so slabša resolucija in pojav lukenj (območij brez višin), predvsem v visokogorju. Primerjava je bila izvedena v novem slovenskem ravninskem koordinatnem sistemu (D96/TM). Za vsako točko SRTM (dana višina) je bila določena še višina iz DMV (interpolirana višina). Primerjavo smo izvedli na osmih testnih območjih, ki so bila izbrana po kriterijih različnih reliefnih in geomorfoloških značilnosti ter vegetacije in urbanizacije. Rezultat primerjave so razlike višin po posameznih karakterističnih območjih, ki lahko morebitnemu uporabniku podatkov SRTM pomagajo pri odločitvi za uporabo SRTM.

Uvod

Pomembna skupina topografskih podatkov so podatki o oblikovanosti zemeljskega površja oziroma podatki o reliefu. V Sloveniji imamo za njihovo predstavitev zbirke digitalnih modelov višin – DMV. Zbirke pokrivajo območje Slovenije in bližnje okolice neposredno ob državni meji. Podatki so primerni za izvajanje prostorskih analiz, za uporabo pri vizualizaciji oziroma upodabljanju prostora, za izdelavo topografskih in tematskih kart ter za druge namene.

Problem se pojavi, če bi želeli podatke o reliefu tudi za širše območje. Podatke za obmejna območja sosednjih držav potrebujemo že pri izdelavi državne pregledne karte, ki zajema območje Slovenije očrtanega pravokotnika. Ti podatki so v različnih horizontalnih in višinskih sistemih, različnih formatih, naročati bi jih bilo treba za vsako državo posebej.

Rešitev je v uporabi enotnega svetovnega modela višin – takšen model je nastal v okviru projekta Shuttle Radar Topography Mission – SRTM. V nadaljevanju so predstavljeni rezultati primerjave, katere namen je bil ugotoviti stopnjo ujemanja podatkov SRTM in zbirke DMV Slovenije. Glede kakovosti samih višin je bila doslej na voljo zgolj ocena 90-odstotnega intervala zaupanja v višine, ki za območje Evrazije znaša $\pm 6,2$ m (Rodriguez idr., 2006).

Digitalni modeli višin Slovenije – DMV

Geodetska uprava Republike Slovenije zagotavlja podatke o reliefu v različnih ločljivostih, in sicer DMV 5, DMV 12,5, DMV 25 in DMV 100 (ločljivosti 5 m, 12,5 m, 25 m in 100 m). Viri za izdelavo so bili različni geodetski podatki. Horizontalne koordinate se nanašajo na stari državni ravninski koordinatni sistem D48/GK. Višine so v državnem višinskem koordinatnem sistemu, torej normalne ortometrične višine, datum Trst.

Za primerjavo s podatki SRTM smo uporabili DMV 12,5 – model, ki je bil leta 2005 izdelan z integracijo obstoječih podatkov Geodetske uprave Republike Slovenije in drugih

* dr. Tomaž Žagar, univ. dipl. inž. el., in Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod., Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana

institucij. Uporabljena je bila metoda utežnega seštevanja z geomorfološkimi popravki (Podobnikar in Mlinar, 2006; Podobnikar, 2008).

Podatki DMV, ki so bili uporabljeni za primerjavo, so organizirani v datotekah s pripono xyz – vsaka datoteka pokriva območje velikosti enega lista temeljnega topografskega načrta v merilu 1 : 5.000 (TTN 5); velikost območja je 2.250 m × 3.000 m. Vsaka xyz-datoteka ima tako podatke za $181 \times 241 = 43.621$ točk, torej prav toliko vrstic (y, x, H). Ime posamezne datoteke določa nomenklaturu lista TTN 5, torej oznako trigonometrične sekcije ter številko lista znotraj sekcije. Višine na robovih listov se prekrivajo (podvajajo) z datotekami sosednjih listov.

Podatki SRTM-1 in SRTM-3

Podatki digitalnega modela višin so bili pridobljeni z radarsko interferometrijo v okviru 11-dnevne misije raketoplana Endeavour, ki se je pričela 11. februarja leta 2000 (Farr idr., 2007). Višinski model je prosto dostopen na spletnih straneh¹ ameriške vesoljske agencije NASA², in sicer za območje Združenih držav Amerike z ločljivostjo 1" × 1" (SRTM-1), za vsa zajeta območja pa z ločljivostjo 3" × 3" (SRTM-3). Posamezne višine SRTM-3 so bile dobljene s povprečenjem višin SRTM-1 območja velikosti 3" × 3", kot je to opisano v spremljevalnem dokumentu k podatkom SRTM na ftp-strežniku³. Na ekvatorju je tako ločljivost modela približno 30 m za SRTM-1 in 90 m za SRTM-3; drugod je ločljivost še boljša. Podatki pokrivajo območje od 56° južne do 60° severne zemljepisne širine. Horizontalne koordinate SRTM so v WGS 84⁴, višine pa se nanašajo na EGM 96⁵.

Podatki SRTM so organizirani v datotekah s pripono hgt – vsaka datoteka pokriva območje velikosti 1° × 1°. Vsaka SRTM-3 hgt-datoteka ima tako 1201 vrstico in 1201 stolpec. Ime posamezne datoteke določa zemljepisno širino in dolžino spodnjega levega (jugozahodnega) vogala območja. Vrstica na severnem in stolpec na vzhodnem robu posameznega območja se prekrivata (podvajata) z vrstico na južnem in stolpcem na zahodnem robu naslednjega območja.

Podatki so zapisani v binarni datoteki kot 16-bitna predznačena cela števila, tako da je na prvem mestu najpomembnejši zlog (byte; zapis »big endian«). Uporabniki računalnikov z x86 in podobno procesorsko arhitekturo morajo torej pri branju datoteke zamenjati vrstni red zlogov. Manjkajočim višinam je pripisana vrednost -32768.

Podatki SRTM V1 in V2

NASA je izdala dve različici SRTM-podatkov, označeni kot SRTM V1 in SRTM V2. Prva različica (V1) so surovi podatki višin brez vsakršne nadaljnje obdelave (z izjemo povprečenja za SRTM-3). Druga (V2) je končna različica in ima v nasprotju z V1 dobro določene obalne linije in meje drugih vodnih površin ter odpravljene grobe odklone v podatkih. Še vedno pa ostanejo nekatera območja z manjkajočimi višinami. To so naj-

¹ Dostop do podatkov je možen preko: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov>

² NASA (National Aeronautics and Space Administration) je vladna agencija, ki je odgovorna za izvajanje državnega vesoljskega programa ZDA.

³ SRTM Topography: ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/Documentation/SRTM_Topo.pdf.

⁴ WGS 84 (World Geodetic System 1984) je svetovni geodetski sistem, ki ga od januarja 1987 uporablja ameriški GPS (Global Positioning System); ima svoj lasten referenčni elipsoid.

⁵ EGM 96 (Earth Gravitational Model 1996) je model geoida, ki je nastal kot produkt sodelovanja med NIMA (National Imagery and Mapping Agency, danes NGA – National Geospatial-Intelligence Agency), NASA in Ohio State University.

večkrat površine jezer ali velikih rek in območja z zelo razgibanim in strmim reliefom, kot so npr. izrazito strme ali prepadne stene in ozke soteske.

V nadaljevanju je predstavljena analiza podatkov SRTM V2, velja pa omeniti, da so bili na osnovi podatkov SRTM narejeni tudi modeli brez manjkajočih vrednosti, npr. modeli konzorcija CGIAR-CSI¹ ali pa model HydroSHEDS².

Testna območja

Testna območja obsegajo po šest sosednjih datotek DMV 12,5, torej po šest sosednjih območij listov temeljnih topografskih načrtov v merilu 1 : 5.000 (TTN 5). Izbrani so po trije sosednji listi v isti vrstici in po dva lista v istem stolpcu, tako da je dobljeno območje pravokotno. Velikost vsakega testnega območja je 6.000 m v smeri vzhod–zahod in 6.750 m v smeri sever–jug, kar pomeni, da je površina posameznega testnega območja 40,5 km². Na posameznem testnem območju je $481 \times 541 = 260.221$ točk DMV 12,5.

Glede na raznolikost površja Slovenije, predvsem z vidika reliefnih in geomorfoloških značilnosti ter vegetacije in urbanizacije, je bilo izbranih osem testnih območij; glej Sliko 1. Testna območja skupaj pokrivajo 324 km² (48 listov TTN 5), kar je 1,6 % državnega ozemlja. Vsa testna območja skupaj vsebujejo preko 2.000.000 točk DMV 12,5.



Slika 1: Razporeditev in velikost testnih območij

Testno območje Beltinci (Slika 2) pokriva območje listov K2832, K2833, K2834, K2842, K2843 in K2844. Gre za izrazito ravninski del države – Prekmurje. Večji del območja je namenjen za intenzivno kmetijsko rabo. Največje naselje so Beltinci.

¹ CGIAR-CSI SRTM 90 m DEM Digital Elevation Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.

² WWF – Freshwater Science – HydroSHEDS: <http://www.worldwildlife.org/hydrosheds>.

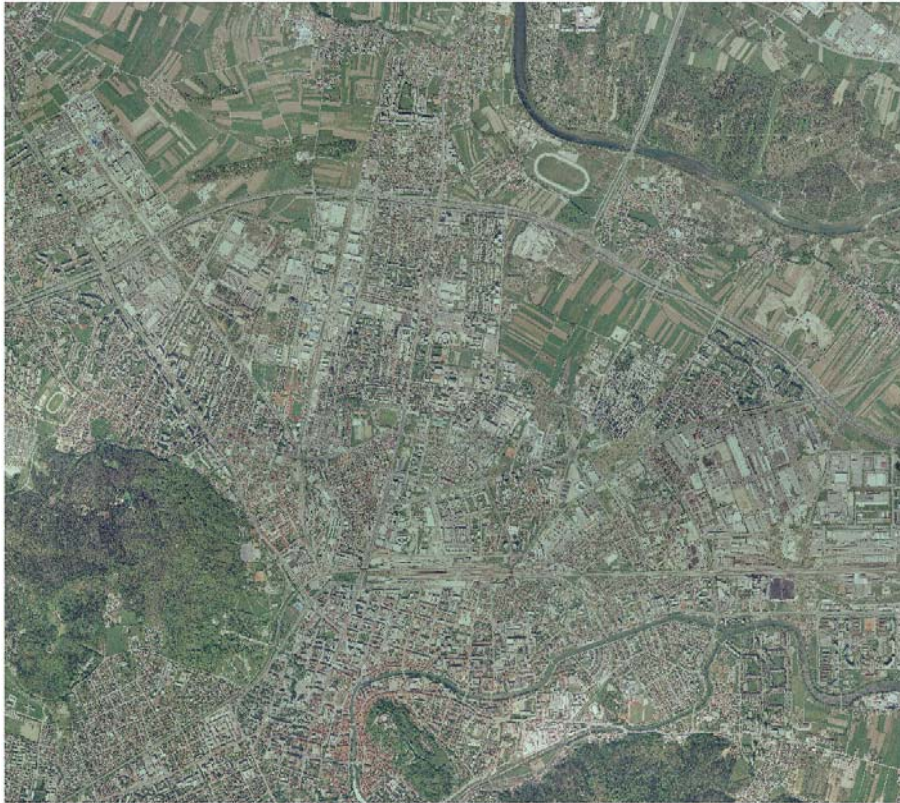


Slika 2: Testno območje Beltinci

Testno območje Črni Kal pokriva območje listov C2021, C2022, C2023, C2031, C2032 in C2033. Območje vključuje naselje Črni Kal in avtocestni odsek z viaduktom. Gre za kraški svet (kraški rob) z nizko vegetacijo ter izrazito kraško geomorfologijo (udornice, vrtače). Pod kraškim robom je manj razgiban relief s flišnim sedimentom.

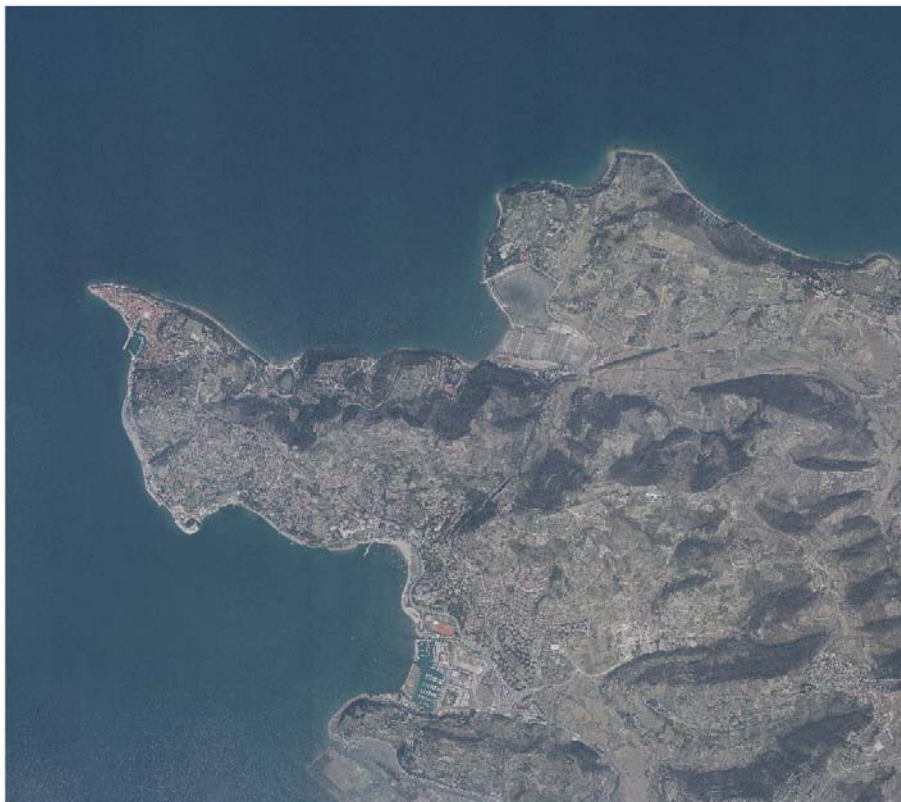
Testno območje Kočevski Rog pokriva območje listov F2139, F2140, F2149, F2150, G2131 in G2141. Gre za neposeljeno območje, skoraj v celoti poraslo z gozdom. Večinoma gre za kraški svet; relief je precej razgiban.

Testno območje Ljubljana (Slika 3) pokriva območje listov E2433, E2434, E2435, E2443, E2444 in E2445. Območje vključuje osrednji in severni del mesta Ljubljane. Večinoma gre urbano območje z nekaj nepozidanimi predeli – tam je nekaj gozda (Šišenski hrib, del Golovca) in območij, ki so namenjena za intenzivno kmetijsko rabo. Relief je večinoma ravninski.



Slika 3: Testno območje Ljubljana

Testno območje Piran (Slika 4) pokriva območje listov B2031, B2032, B2033, B2041, B2042 in B2043. Območje obsega del slovenske obale in zaledja z mestom Piran. Samo zaledje je reliefno precej razgibano z izjemo Strunjanskih in Sečoveljskih solin, katerih del je tudi vključen v testno območje.



Slika 4: Testno območje Piran

Testno območje Rogla pokriva območje listov H2731, H2732, H2733, H2741, H2742 in H2743. Območje obsega neposeljen del Pohorja s smučišči na Rogli. Večji del območja je poraščen z gozdom. Relief je precej razgiban.

Testno območje Triglav pokriva območje listov C2621, C2622, C2623, C2631, C2632 in C2633. Območje obsega neposeljen in izrazito visokogorski svet Julijskih Alp s Triglavom. Večji del območja je neporaščen – leži nad gozdno mejo. Relief je zelo razgiban z vrhovi in vmesnimi dolinami.

Testno območje Zidani Most pokriva območje listov G2425, G2426, G2427, G2435, G2436 in G2437. Območje obsega del Posavskega hribovja z reko Savo in njenim pritokom Savinjo, ki se vanjo izliva v Zidanem Mostu. Obe reki tečeta po ozkih in strmih soteskah. Večji del območja je poraščen z gozdom. Relief je precej razgiban.

Obdelava podatkov

Podatke SRTM (hgt-datoteke) smo najprej pretvorili v niz točk (λ , ϕ , H), kjer se horizontalni koordinati nanašata na elipsoid WGS 84. Sledila je transformacija v novi slovenski državni ravninski koordinatni sistem ETRS89/TM oziroma D96/TM. Glede na pričakovano natančnost podatkov SRTM smo si za ciljno natančnost transformacije horizontalnih koordinat postavili kriterij 0,5 m. Tako smo lahko predpostavili, da je elipsoid WGS 84 enak elipsoidu GRS 80¹ oziroma da so elipsoidne koordinate WGS 84

¹ Elipsoida WGS 84 in GRS 80 se razlikujeta v mali polosi, in sicer zgolj teoretično – razlika je 0,1 mm.

enake elipsoidnim koordinatam v ETRS 89¹. Elipsoidne koordinate smo tako le še pretvorili v ravninske koordinate, torej v koordinatni sistem D96/TM.

Za podatke DMV smo morali izvesti datumsko transformacijo horizontalnih koordinat, in sicer iz starega v novi državni ravninski koordinatni sistem (D48/GK → D96/TM). Glede na zgoraj postavljen kriterij smo uporabili afino transformacijo po trikotnikih z dolžino stranice 3 km ali več, ki zagotavlja natančnost pod 0,1 m oziroma njena koordinatna odstopanja tudi v najslabšem primeru ne presegajo 0,2 m (Berk in Duhovnik, 2007).

Višine točk smo pri opisani uskladitvi horizontalnih koordinat pustili nespremenjene. Po uskladitvi smo višine točk SRTM smo primerjali z višinami ustrezno interpoliranih točk slovenskega DMV 12,5. Ustrezne višine DMV na koordinatah SRTM-točk smo določili z linearno interpolacijo. Uporabili smo funkcijo *griddata* (v programskem paketu Matlab oz. Octave). Funkcija najprej izvede ravninsko triangulacijo mreže točk (Dalaunayjeva triangulacija). Poišče trikotnik, ki vsebuje dano točko, in določi višino glede na prebodišče trikotnika in normale skozi dano točko.

Zaradi hitrejšje izvedbe interpolacije smo za dano točko SRTM okolico točk DMV omejili na območje velikosti 200 m × 200 m, kar pa ne vpliva na rezultat interpolacije. Izbrana točka SRTM je bila tako obdana z 256-imi točkami DMV. Točke SRTM na robu posameznega testnega območja, ki jih je obdajalo manj kot 256 točk DMV, smo izločili iz obdelave.

Primerjava SRTM-podatkov na izbranih območjih

Primerjava SRTM in DMV temelji na naslednjih parametrih:

$\Delta H_{\max}$	...	največja vrednost absolutne razlike višin SRTM in DMV
ΔH_{avg}	...	povprečna vrednost absolutne razlike višin SRTM in DMV
ΔH_{std}	...	standardni odklon razlik višin SRTM in DMV
b. v.	...	delež točk brez vrednosti
N	...	število točk z določeno višino (brez točk b. v.)
< 2 m	...	delež točk z absolutno razliko višin manj kot 2 m
< 5 m	...	delež točk z absolutno razliko višin manj kot 5 m
< 10 m	...	delež točk z absolutno razliko višin manj kot 10 m
< 16 m	...	delež točk z absolutno razliko višin manj kot 16 m
< 30 m	...	delež točk z absolutno razliko višin manj kot 30 m

Delež točk brez vrednosti (b. v.) je podan glede na skupno število točk SRTM znotraj posameznega testnega območja. Točke brez vrednosti v nadaljnji obdelavi niso upoštevane.

Rezultati primerjave so navedeni v Preglednici 1. Primerjava je bila izvedena za podatke SRTM V1 in SRTM V2, vendar so se rezultati obeh modelov zanemarljivo malo

¹ Natančna realizacija WGS 84 je vsakokratni ITRF. Trenutno je to ITRF 05 – to je sestav, v katerem se računajo natančne tirnice satelitov sistema GPS – t. i. precizne efemeride. Med vsakokratnim ITRF in ETRS 89 je določena tudi uradna transformacija. Razlike v koordinatah se s časom povečujejo zaradi vplivov geodinamike, vendar trenutno na območju Slovenije znašajo do okoli 0,3 metra.

razlikovali, zato so navedeni le rezultati primerjave s SRTM V2. Izjema je območje Piran, za katerega navajamo tudi rezultate primerjave s SRTM V1; največjih popravkov so bili namreč podatki SRTM deležni ravno na območjih večjih vodnih površin.

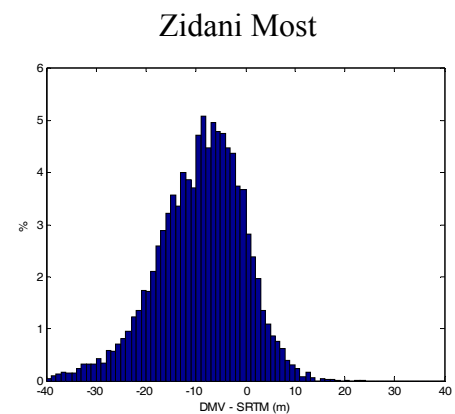
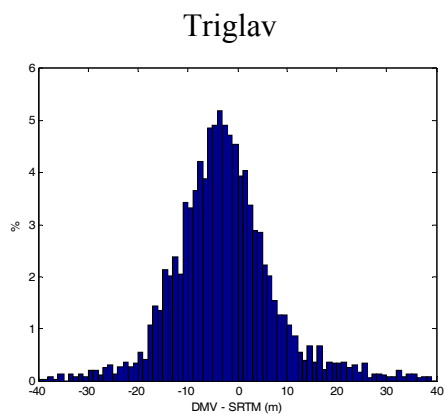
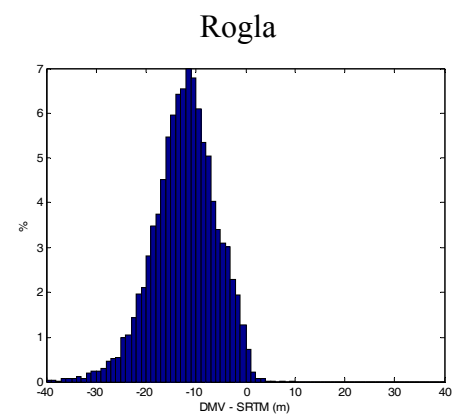
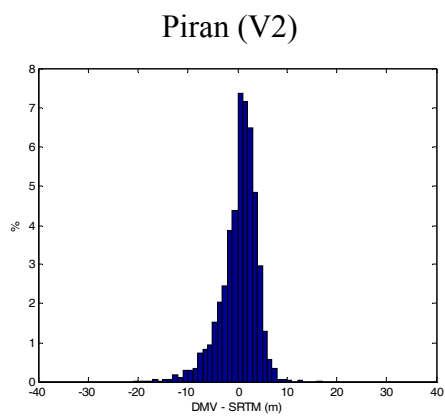
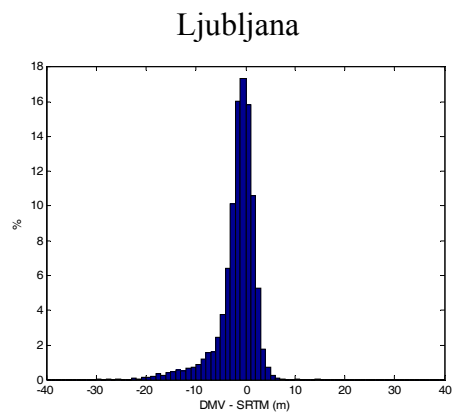
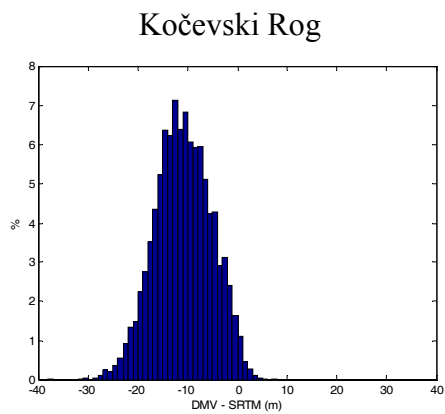
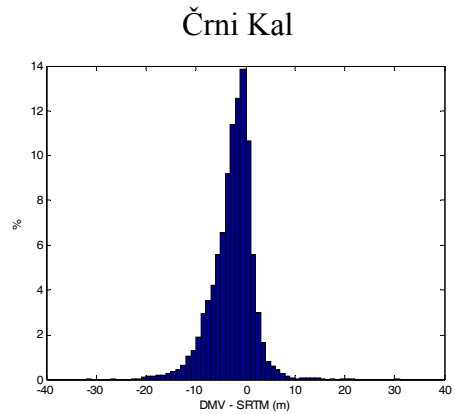
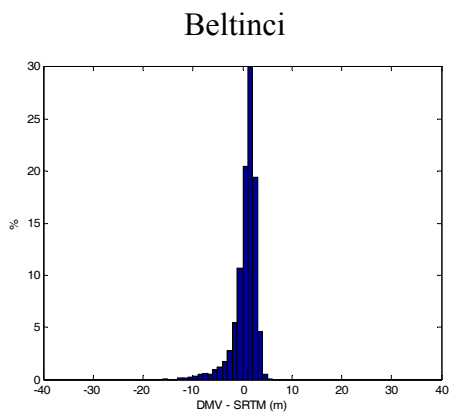
	Beltinci	Črni Kal	Kočevski Rog	Ljubljana	Piran		Rogla	Triglav	Zidani Most
					SRTM V1	SRTM V2			
$\Delta H_{\max}$ [m]	15,2	77,3	37,0	29,6	67,0	20,3	40,5	202,7	60,2
ΔH_{avg} [m]	1,8	3,5	10,9	2,6	4,1	1,4	12,3	9,2	10,1
ΔH_{std} [m]	1,5	3,5	5,5	3,2	4,6	2,2	6,3	11,9	7,7
N	6420	6332	6245	6394	4343	6340	6392	3572	6394
b. v. [%]	0	0	0	0	31	0	0	44	0
< 2 m [%]	66	43	6	60	36	73	4	17	13
< 5 m [%]	97	75	16	88	73	94	13	41	31
< 10 m [%]	100	95	44	95	91	99	37	69	57
< 16 m [%]	100	99	82	99	98	100	75	87	80
< 30 m [%]	100	100	100	100	100	100	99	96	98

Preglednica 1: Primerjava višin iz SRTM in DMV 12,5

Primerjava obeh različic SRTM (V1 in V2) za testno območje Piran pokaže, da so podatki v popravljeni različici SRTM V2 za vodne površine in območja ob vodnih površinah res precej boljši. Sicer je v Preglednici 1 lepo viden tudi vpliv reliefa in geomorfoloških značilnosti na dobljene razlike, pa tudi vpliv vegetacije in antropogenih danosti.

Porazdelitev razlik višin DMV in SRTM na intervalu –40 do 40 m je prikazana na Sliki 5. Predvsem na območjih, poraslih z gozdom, opazimo, da so višine SRTM večje kot višine DMV, kar lahko pojasnimo s tem, da je SRTM model ploskve zemeljskega površja, DMV pa model reliefa¹. Poleg tega so bili podatki SRTM zajeti sredi meseca februarja, ko so vrhovi naših gora še pokriti s snegom. Zato zgornji sistematični vpliv velja tudi na območju Triglava.

¹ Gre za razlike v definiciji ploskve: digitalni model ploskve – DMP (angl. Digital Surface Model – DSM) dobimo, če upoštevamo tudi strehe in stene stavb, krošnje dreves in podobno, medtem ko je digitalni model reliefa – DMR (angl. Digital Terrein Model – DTM) ploskev, ki upodablja golo zemeljsko površje; digitalni model višin – DMV (angl. Digital Elevation Model) je mreža točk z danimi višinami, torej niz parametrov ploskve zemeljskega površja [Podobnikar, 2002].



Slika 5: Histogrami razlik med SRTM in DMV po testnih območjih

Zaključek

Primerjava podatkov SRTM in slovenskega DMV 12,5 je bila izvedena z namenom preveriti ujemanje obeh modelov višin. Primerjava je bila izvedena za obe različici SRTM (osnovna V1 in popravljena V2). Izkazalo se je, da je razlika skoraj izključno v popravkih pri večjih vodnih površinah, za Slovenijo torej zgolj na Obali.

Omeniti je treba metodološko razliko v obeh modelih: glede na način izdelave je SRTM bližji digitalnemu modelu ploskve, DMV pa digitalnemu model reliefa.

Rezultati primerjave pokažejo, da je mogoče zaznati vplive vegetacije in snežne odeje v visokogorju, ki se kažejo kot sistematični, pa tudi antropogene vplive, ki se kažejo kot slučajni in povečajo razpršenost na območjih intenzivne urbanizacije. Standardni odkloni variirajo od $\pm 1,5$ m za idealno površje (Beltinci v Prekmurju) pa do $\pm 11,9$ m za najbolj razgibano površje (Triglav v Julijcih). Podobno je razmerje največjih zabeleženih absolutnih razlik: od 15,2 m (Beltinci) do 202,7 (Triglav).

Literatura

- Berk, S., in Duhovnik, M. (2007). Transformacija podatkov Geodetske uprave Republike Slovenije v novi državni koordinatni sistem, *Geodetski vestnik*, letn. 51, št. 4, str. 803–826.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., in Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics*, letn. 45, str. 1–33.
- Podobnikar, T. (2008). Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki, *Geodetski vestnik*, letn. 52, št. 4, str. 834–853.
- Podobnikar, T., in Mlinar, J. (2006). Izdelava in vzdrževanje digitalnega modela reliefa Slovenije z integracijo obstoječih virov, *Geodetski vestnik*, letn. 50, št. 3, str. 472–480.
- Podobnikar, T. (2002). Model zemeljskega površja – DMR ali DMV? *Geodetski vestnik*, letn. 46, št. 4, str. 347–356.
- Rodriguez, E., Morris, C. S., in Belz, J. E. (2006). A global assessment of the SRTM performance, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, letn. 72, str. 249–260.

Zgodovinski pregled geomagnetnih meritev in raziskav

Stegel Robert *

Povzetek

Sprva so geomagnetne meritve imele predvsem tehnični in s tem tudi ekonomski pomen, kajti omejene so bile na določanje smeri in položaja, ki je omogočal pomorščakom in popotnikom osvajanje novih dežel in kasneje tudi trgovanje. Ščasoma pa so geomagnetne meritve pridobivale tudi vse večji znanstveni pomen. Raziskovanje geomagnetizma se je pričelo leta 1600 z objavo Williama Gilberta, da je Zemlja magnet. Sledila sta postopen napredek v merilnih metodah in instrumentih ter razlagah zemeljskega magnetizma in ustanavljanje prvih geomagnetnih observatorijev. V 19. stoletju je Carl Friedrich Gauss s svojim sodelavcem Wilhelmom Webrom vpeljal absolutno metodo merjenja jakosti magnetnega polja, kasneje pa postavil še temelje matematične analize geomagnetnega polja, ki je omogočila, skupaj s teorijo elektromagnetnega polja Jamesa Clerka Maxwella, nagel razvoj geomagnetnih raziskav. Na začetku 20. stoletja je sir Joseph Larmor nakazal, da bi lahko bil samovzbudni dinamo mehanizem izvor geomagnetnega polja, ob koncu prejšnjega tisočletja pa je ta mehanizem oziroma model postal najširše sprejet, tudi s pomočjo raziskav na podlagi računalniških simulacij in satelitskih meritev.

Začetki geomagnetnih meritev

Leta 1600 izdana knjiga angleškega znanstvenika Williama Gilberta z naslovom *O magnetu, magnetnih telesih in o velikem magnetu Zemlji* (De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure) ali krajše *De Magnete* velja za začetek obdobja geomagnetnih raziskav. V njej je namreč objavljena prelomna trditev, da je Zemlja magnet, ki jo je Gilbert postavil z za tiste čase izjemnim eksperimentalnim raziskovanjem pojava magnetne inklinacije na modelu Zemlje – magnetni krogli, ki jo je poimenoval *Terrella* - Zemljica. S tem je tudi ovrgel tedaj veljavno prepričanje, da so vzrok sile, ki deluje na magnetno iglo, nebesne sile ali magnetna gora na polu.

Gilbertovo delo je temeljilo na predhodnih opazovanjih splošnega magnetizma, ki so se v Evropi začela že v antiki, nadaljevala pa konec 12. stoletja s prvimi zapisi o magnetnem kompasu in njegovi uporabi, predvsem pa z raziskavami in odkritji francoskega inženirja Pierra de Maricourta, bolj znanega kot Petrusa Peregrinusa. Ta je leta 1269 v Pismu o magnetu (*Epistola de magnete*), ki ga je pisal svojemu prijatelju Sigerumu de Foucaucourt, med drugim prvič omenil severni in južni magnetni pol, da se magnetnih polov magneta ne da ločiti in da je najmanjši delec magneta tudi sam magnet.

Pojav magnetne inklinacije je sicer že pred Gilbertom, leta 1544, opisal nemški fizik, jezuitski duhovnik Georg Hartmann, leta 1581 pa izmeril izdelovalec kompasov, Anglež Robert Norman. Da magnetna igla ne kaže proti geografskima poloma, je bilo že dolgo znano. Kotu med magnetnim polom, v katerega smeri kaže magnetna igla, in pravim – geografskim polom Zemlje danes pravimo magnetna deklinacija.

Krištof Kolumb je na svoji poti čez Atlantik leta 1492 prvi opisal, da je deklinacija na različnih mestih različna. Ugotovitev, da se ta spreminja tudi s časom, pa je nakazovala, da se zemeljska magnetna pola premikata, zaradi česar Zemlja ni permanenten magnet. Ta

* Robert Stegel, univ.dipl.inž.tehnol.prom., VSS Sežana, Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, Kraška ulica 2, 6210 Sežana.

pojav, ki ga danes imenujemo sekularna variacija, je opazil leta 1634 angleški astronom in matematik Henry Gellibrand na podlagi primerjave meritev, izmerjenih v časovnem obdobju nekaj desetletij. Poleg sekularnih pa obstajajo tudi dnevne variacije, ki jih je prvi opisal leta 1722 George Graham, angleški izdelovalec merilnih instrumentov. Danes vemo, da so sekularne variacije posledica dogajanja v zunanjem jedru Zemlje, dnevne pa vpliva Sonca na magnetosfero in ionosfero ter s tem na geomagnetno polje.

Napredek v merilni tehniki

V drugi polovici 18. stoletja je prišlo do napredka v merilnih instrumentih in metodah, razlagah zemeljskega magnetizma, ustanovljeni pa so bili tudi prvi geomagnetni observatoriji. Pomembno izboljšavo merilnega instrumenta je prispeval francoski inženir Charles Coulomb, ko je magnetno iglo obesil na nitko in tako odpravil trenje pri vrtenju na osi. Leta 1778 je francoski matematik Jean Charles de Borda vpeljal dodatno meritev poleg magnetne deklinacije in inklinacije, takrat imenovano jakost zemeljskega magnetizma. Da se tudi ta časovno in krajevno spreminja, je na začetku 19. stoletja odkril nemški raziskovalec Alexander von Humboldt, ki je s svojim tedanjim vplivom dosegel tudi ustanavljanje mnogih geomagnetnih observatorijev po svetu z namenom sistematičnega opazovanja geomagnetnega polja.

V tridesetih letih 19. stoletja je k raziskavam geomagnetizma pristopil eden največjih znanstvenikov tistega časa, nemški matematik, astronom in fizik Carl Friedrich Gauss. S sodelavcem Wilhelmom Webrom sta raziskovala geomagnetizem le šest let, kljub temu pa predstavlja njuno delo eno od prelomnic v raziskavah s tega področja. Izboljšala sta merilnik jakosti zemeljskega magnetnega polja, magnetometer, in vpeljala absolutno metodo merjenja jakosti magnetnega polja, kjer je bil merilni rezultat določen na podlagi dodatne meritve s pomožno magnetno iglo in ne s primerjavo z referenčno jakostjo, kot je bilo to pri relativni metodi, ki jo je vpeljal že omenjeni Borda. Prednost absolutne merilne metode je bila v tem, da so bili tako izmerjeni rezultati iz različnih observatorijev med seboj enakovredni in primerljivi. Poleg tega je Gauss postavil temelje matematične analize geomagnetnega polja. S svojim ugledom je veliko pripomogel tudi k ustanavljanju in predvsem povezovanju observatorijev z namenom izmenjave rezultatov geomagnetnih meritev. Leta 1841 je bilo delujočih že 53 observatorijev od Severne Amerike in južne Afrike do Sibirijske in Avstralije, največ pa jih je bilo v Evropi.

Ob koncu 19. stoletja, leta 1873, je bila postavljena še ena prelomnica, ne le na področju geomagnetnih raziskav, ampak tudi obče fizike. Takrat je škotski matematik in fizik James Clerk Maxwell postavil temelje teorije elektromagnetnega polja z objavo dela Razprava o elektriki in magnetizmu (*Treatise on Electricity and Magnetism*), v kateri je s tako imenovanimi Maxwellovimi enačbami opisal lastnosti in povezavo električnega in magnetnega polja.

Teorija samovzbudnega dinama

Na podlagi raziskav, povezanih z magnetnim poljem Sonca in sončnih peg, je leta 1919 irski fizik sir Joseph Larmor objavil, da bi lahko te nastale na osnovi samovzbudnega dinamo mehanizma. Teorija se je, glede na tedanja predvidevanja o zgradbi in dogajanju v notranjosti Zemlje, pokazala tudi kot možna razlaga izvora geomagnetnega polja. Do tedaj je bilo na podlagi Gaussovih matematičnih analiz znano le, da je večji del geomagnetnega

polja dipolne oblike z izvorom v Zemlji, še dlje pa je veljalo, da magnetni materiali v njeni notranjosti zaradi temperatur, ki so višje od Curiejeve, niso vzrok geomagnetnega polja.

Danes najširše sprejeto teorijo oziroma model o izvoru geomagnetnega polja, tako imenovan alfa - omega dinamo model, ki temelji na prej omenjeni Larmorjevi objavi z začetka prejšnjega stoletja, je leta 1946 razvil nemški fizik, delujoč v ZDA, Walter Elsasser, leta 1964 pa dopolnil ruski fizik Stanislav Braginsky. Alfa - omega dinamo model predpostavlja, da magnetno polje ustvarjajo električni toki, nastali zaradi lastnega magnetnega polja in gibanja tekočega ter električno prevodnega zunanega jedra Zemlje. Do tega pride zaradi vrtenja Zemlje in Coriolisovega učinka ter konvekcije in vzgona ob postopnem strjevanju zunanega jedra, s sproščanjem latentne toplote in ob izločanju lažjih spojin iz meje notranjega jedra.

Na potek raziskav in meritev geomagnetnega polja je v drugi polovici prejšnjega stoletja bistveno vplival hiter napredek na področju elektronike, predvsem računalniške in vesoljske tehnike. Tako je razvoj superračunalnikov omogočil izvajanje numeričnih simulacij zapletenih procesov, ki se dogajajo v tekočem zunanjem jedru in so povezani z izvorom glavnega magnetnega polja Zemlje. Eno takšnih tridimenzionalnih simulacij zemeljskega dinamo mehanizma sta izdelala leta 1997 ameriška znanstvenika Gary A. Glatzmaier in Paul H. Roberts.

Med potekom simulacije je prišlo do presenetljive, nevsiljene zamenjave geomagnetnih polov. Takšna zamenjava se je že večkrat zgodila tudi zemeljskima magnetnima poloma, nazadnje pred približno 780.000 leti. Obrati geomagnetnih polov so znani že sto let. Leta 1906 je pri meritvah magnetnih polj vulkanskih kamenin Francoz Bernard Brunhes opazil, da je magnetno polje na nekaterih delih usmerjeno celo nasprotno od sedanjega zemeljskega magnetnega polja in sklepal, da je bila med njihovim strjevanjem takratna smer zemeljskega magnetnega polja obratna kot danes. Na začetku petdesetih let prejšnjega stoletja je bila na podlagi meritev magnetnih anomalij kamnin na oceanskem dnu potrjena teorija nemškega znanstvenika Alfreda Wegenerja iz leta 1912 o nastanku oziroma premikanju celin.

Doba vesoljskih raziskav

Doba vesoljskih poletov se je začela 4. oktobra leta 1957 z izstrelitvijo satelita Sputnik 1. Satelitske meritve in opazovanja so med drugim potrdile domnevo angleškega fizika Eugena Parkerja, ki je leta 1958 na podlagi izračunov napovedal, da se tok plazme, imenovan sončni veter, nenehno širi iz sončne korone in ne le ob magnetnih nevihtah, kot sta pojav leta 1930 pojasnila angleški matematik in geofizik Sydney Chapman in Vincenzo C. A. Ferraro. Prav tako je bilo s satelitskimi meritvami ugotovljeno, da se magnetosfera oziroma prostor, kjer deluje geomagnetno polje, ne razprostira daleč v vesolje in je zaradi delovanja sončnega vetra na prisojni strani nekoliko sploščena, na osojni pa se zaključuje v obliki dolgega repa.

Satelitske meritve so omogočile vpogled v magnetna polja ostalih planetov našega sončnega sistema. Poleg Zemlje in Sonca imajo magnetno polje tudi vsi ostali planeti razen Venere. Štirje veliki planeti Jupiter, Saturn, Uran in Neptun imajo magnetna polja, katerih gostote so približno takšne, kakršna je gostota magnetnega polja Zemlje, le Jupitrova je približno 14-krat večja in je med vsemi planeti največja. Izvor magnetnega polja je najverjetneje tudi pri teh planetih dinamo mehanizem, ki bi pri največjima, Jupitru in Saturnu, lahko nastal v jedru stisnjenem kovinskem, električno prevodnem, vodiku. Ker velikost Urana in Neptuna ni takšna, da bi se v jedru lahko ustvaril kovinski vodik in ker je navidezno središče magnetnega polja zelo zamaknjeno od središča obeh planetov, se

predvideva, da bi lahko dinamo mehanizem potekal v tanjših plasteh plašča planeta. Magnetno polje Merkurja je glede izvora zelo podobno Zemeljskemu. Najverjetneje ga ustvarja dinamo mehanizem, ki nastaja v tekočem zunanem delu jedra, le gostota magnetnega polja je približno stokrat manjša kot na Zemlji. Mars, tako kot tudi Luna, nimata magnetnega polja, ki bi ga ustvarjal dinamo mehanizem. Imata pa področja z izvorom magnetnega polja v namagnetnih materialih pod njunim površjem, ki so najverjetneje ostali kot posledica nekoč obstoječega dinamo mehanizma.

Prav tako so sateliti omogočili natančne in predvsem celovitejše meritve geomagnetnega polja. Prve je opravil ameriški satelit Magsat leta 1980. Danes stalno merijo geomagnetno polje trije sateliti, danski Ørsted od leta 1999, nemški CHAMP in argentinski SAC-C od leta 2000, avstralski FedSat pa je meritve opravljal med letoma 2002 in 2007. Najstarejši med njimi, satelit Ørsted je bil izstreljen 23.2.1999 in kljub temu, da je bila predvidena doba njegovega delovanja 14 mesecev, bo letos desetletnica njegovega delovanja. Večina merilnih instrumentov na njem še vedno deluje, med njimi tudi oba magnetometra, vektorski CSC (Compact Spherical Coil) in Overhauserjev skalarni magnetometer. Da na njune meritve ne bi vplivala motilna magnetna polja zaradi delovanja drugih naprav in materialov na satelitu, sta magnetometra nameščena na posebno, 8 m dolgo roko. Leta 2010 pa je predviden pričetek delovanja nove generacije geomagnetnih satelitov v okviru projekta Evropske vesoljske agencije (ESA), imenovanega SWARM, ki ga bodo sestavljali trije sateliti, in sicer bosta dva letela eden ob drugem na nižji orbiti (450 km), tretji pa na nekoliko višji (550 km).

Pomen sodobnih geomagnetnih meritev

Meritve geomagnetnega polja, opravljene iz satelitov, letal, ladij ali observatorijev, imajo večplastni pomen. Tako se na podlagi meritev trenutnih vrednosti in sprememb v predhodnih obdobjih pripravlja geomagnetne modele, kot sta IGRF (International Geomagnetic Reference Field) in WMM (World Magnetic Model), s katerimi so predvidene vrednosti posameznih parametrov zemeljskega magnetnega polja za obdobje petih let. Ti podatki se uporabljajo za popravke posameznih parametrov izmerjenih rezultatov, kot je na primer magnetna deklinacija pri navigacijskih kompasih.

Geomagnetne meritve so ključnega pomena tudi za raziskovanje geomagnetizma, saj so laboratorijski poizkusi na tem področju skoraj nemogoči in zato redki. Tako se na primer lahko z meritvami na površini Zemlje dobi podatke za izračun sprememb gostote magnetnega polja na različnih razdaljah od njenega središča, vse do tako imenovane meje jedro – plašč, ali pa se, na podlagi izmerjenih sprememb gostote magnetnega polja, sklepa o hitrosti in načinu gibanja gmot v tekočem jedru, ki sta ena ključnih dejavnikov pri izvoru in sekularnih variacijah geomagnetnega polja...

Geomagnetne meritve pa so lahko sestavni del raziskav tudi na drugih področjih, kot so geologija, arheologija, magnetobiologija...

Literatura

- BROTHER, Arnold. The letter of Petrus Peregrinus on the magnet, A.D. 1269. McGraw Publishing Company, 1904, New York. Available also from Internet in PDF format: <http://ia331311.us.archive.org/1/items/letterofpetrusp00pieriala/letterofpetrusp00pieriala.pdf>
- GLATZMAIER, Gary A., OLSON, Peter. Probing the geodynamo. Scientific American, April 2005, 292, 51-57.

- JONKERS, R. T. JACKSON, Andrew. MURRAY, Anne. Four Centuries of Geomagnetic Data From Historical Records. Reviews of Geophysics, 2003, vol. 41, no.2 / 1006. http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earaj/pubs/rev_geophys.pdf.
- MULTHAUF, Robert P. GOOD, Gregory. A Brief History of Geomagnetism and a Catalog of the Collections of the National Museum of American History. Number 48. Washington (DC, US): Smithsonian Studies in History and Technology, 1987.: http://www.sil.si.edu/SmithsonianContributions/HistoryTechnology/SSHT_048.pdf.
- STERN, David P. A Millennium of Geomagnetism. Reviews of Geophysics, 40(3), p.1-1 to 1-30, Sept 2002. Available also from Internet: http://www.phy6.org/earthmag/mill_1.htm .