

Slovenska mreža opazovanj izotopske sestave padavin (SLONIP) – predstavitev spletne strani <https://slonip.ijs.si>

Polona Vreča¹, Aljaž Pavšek²

Povzetek

Padavine so pomemben del hidrološkega kroga, saj predstavljajo ključni vir vode na kopnem. Poznavanje njihove izotopske sestave v posameznih porečjih nam omogoča sledenje izvora površinskih in podzemnih vod ter določitev dinamičnih značilnosti znotraj posameznih vodnih teles. V prispevku predstavljamo spletno stran Slovenske mreže opazovanj izotopske sestave padavin (v angleščini: SLOvenian Network of Isotopes of Precipitation – SLONIP), ki smo jo na medmrežju vzpostavili aprila 2020 in jo tekom leta 2021 izboljšali in dopolnili z novimi podatki. SLONIP zajema trenutno podatke o izotopski sestavi padavin, ki so bili pridobljeni v okviru različnih raziskav, pretežno v okviru kratkotrajnih raziskovalnih projektov, ki so potekali od leta 1981 na Institutu "Jožef Stefan" v sodelovanju z različnimi organizacijami. Ker so podatki o izotopski sestavi padavin uporabni tako za upravljanje z vodnimi viri, v klimatskih raziskavah in ugotavljanju geografskega porekla hrane, je smiselno po vzoru razvitih držav (npr. Švice) osnovati tudi v Sloveniji nacionalno mrežo opazovanj, ki bi obsegala sistematično spremljanje tako izotopske sestave padavin kot tudi površinskih in podzemnih vod na izbranih lokacijah.

Ključne besede: Izotopska sestava, kisik, vodik, padavine, vodni viri, podatkovna baza

Key words: Isotope composition, oxygen, hydrogen, precipitation, water resources, database

Uvod

Voda je ključnega pomena za vse znane oblike življenja in stalno potuje skozi različne sfere Zemlje v obliki vodnega kroga, ki zajema izhlapevanje, transpiracijo, kondenzacijo, padavine, odtok itd. Poti vodnih molekul v vodnem krogu od padavin do površinskih in podzemnih vod ter naprej do oskrbe s pitno vodo lahko sledimo s pomočjo stabilnih (¹⁶O, ¹⁷O, ¹⁸O, ¹H, ²H) in radioaktivnih (³H) izotopov, ki sestavljajo vodno molekulo. Osnovna teoretična izhodišča smo podrobneje predstavili na 13. strokovnem srečanju Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (Vreča in Brenčič, 2009 in tam navedene reference).

Padavine predstavljajo začetek vodnega kroga in napajajo tako površinske kot podzemne vode, ki so vir pitne vode. Izotopsko sestavo padavin, ki zajema spremljanje razmerij stabilnih izotopov vodika (izraženo kot $\delta^2\text{H}$ v ‰) in kisika (izraženo kot $\delta^{18}\text{O}$ v ‰) ter koncentracije aktivnosti radioaktivnega izotopa vodika (tritija – ³H v T.U.), ter njihovo časovno in prostorsko porazdelitev, določajo geografske značilnosti področja (geografska širina, oddaljenost od oceanov, nadmorska višina), izvor in mešanje zračnih mas, temperatura, količina padavin, zračna vlaga, evaporacija in sezonske spremembe, in so značilne za posamezno področje (Craig, 1961; Dansgard, 1964, Rozanski et al., 1993, Schotterer et al., 1996, Ingraham, 1998). Ker imajo padavine določeno izotopsko sestavo, nam omogoča spremljanje njihove izotopske sestave in izotopske sestave površinskih in podzemnih vod določiti izvor vode, dinamiko površinskih vod, čas napajanja vodonosnikov in njihovo napajalno zaledje, sezonsko odvisnost napajanja, srednji zadrževalni čas, velikost

¹ Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana; polona.vreca@ijs.si

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana

vodonosnika, hitrost mešanja in cirkulacijo vode kot tudi starost vod (Clark in Fritz, 1997). Zato so podatki o izotopski sestavi komponent vodnega kroga pomembni za raziskave kroženja vode v najširšem pomenu. Ti podatki prispevajo tudi k boljšemu razumevanju izmenjave vode znotraj kritičnega območja, tj. dinamične »kože« Zemlje (v angleščini: »Critical Zone«), ki sega od vegetacijskega pokrova do podzemne vode v vodonosnikih in je ključnega pomena za reševanje okoljskih problemov, povezanih z upravljanjem vodnih virov.

Sočasno z razvojem analiznih tehnik in prvimi spoznanji o zakonitostih v izotopski sestavi padavin je Mednarodna agencija za atomsko energijo (International Atomic Energy Agency – IAEA) v sodelovanju s Svetovno meteorološko organizacijo (World Meteorological Organization – WMO) začela leta 1958 z zbiranjem podatkov o izotopski sestavi padavin po celem svetu. V letu 1961 je nato nastala svetovna mreža postaj (Schotterer et al., 1996), ki so posredovale meteorološke (količina padavin, temperatura zraka in zračna vlaga) in izotopske podatke v bazo podatkov GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation), ki jo vzdržuje IAEA. V številnih primerih so opazovalci na postajah zbirali le meteorološke podatke in vzorce padavin, ki so jih nato poslali na IAEA, kjer so opravili analize izotopske sestave vode in rezultate vključili v bazo podatkov GNIP. V nekaterih primerih raziskovalci skrbijo tako za vzorčenje kot tudi za analize vzorcev in nato posredujejo v GNIP le končne rezultate. Sodelovanje v GNIP je prostovoljno (http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), zato so podatki za daljše časovno obdobje (t.j. več kot 40 let) redki, število postaj s podatki pa se s časom spreminja. Od pričetka delovanja GNIP je bilo v mrežo vključenih 1296 različnih postaj, od tega jih je leta 1961 poročalo rezultate 260, za leto 2020 pa do sedaj le 20 (S. Terzer-Wassmuth, osebna komunikacija). Glavni problem GNIP, ki deluje že več kot 60 let, je zato v preteklosti predstavljala počasnost zbiranja in objavljanja podatkov, pomanjkanje podatkov za specifično območje raziskav ter sklicevanje na IAEA tudi v primerih, kjer se zagotavljajo meteorološki in izotopski podatki v celoti na nivoju posamezne države. V preteklosti so bili podatki objavljeni v IAEA publikacijah (http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), danes pa so zbrani na medmrežju na portalu WISER (Water Isotope System for Data Analysis, Visualization and Electronic Retrieval, <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>).

Geografska lega Slovenije in razgiban relief na meji med Sredozemskim morjem, Alpami in Panonsko nižino pogojuje pestre meteorološke značilnosti, ki se časovno in prostorsko pod vplivom celinskega, subalpskega oziroma alpskega in submediteranskega podnebja zelo spreminjajo od zahoda proti vzhodu in od severa proti jugu (Dolinar et al., 2008). Geomorfološke danosti in geološka sestava ozemlja pa vplivajo na hidrološke in hidrogeološke značilnosti, zaradi katerih so podatki o izotopski sestavi padavin s tega področja še posebej zanimivi, saj se tako kot podnebje časovno in prostorsko spreminjajo.

Zato ne preseneča, da so prve raziskave izotopske sestave kisika in vodika v padavinah na območju Slovenije potekale v okviru sledilnih poskusov na krasu, ki so se v obdobju 1972-1975 izvajali na območju reke Ljubljanice (Gospodarič in Habič, 1976). Prvo redno in sistematično spremljanje izotopske sestave padavin pa se je pričelo leta 1981 v Ljubljani (Pezdič, 1999; arhiv IJS) in poteka še danes. Raziskave izotopske sestave padavin v Sloveniji so v zadnjih štirih desetletjih potekale na številnih lokacijah v okviru različnih raziskav, (Vreča in Malenšek, 2016; Vreča et al., 2017, Hatvani et al., 2021). Glavna pomanjkljivost preteklih raziskav je, da so potekale pretežno v okviru kratkotrajnih raziskovalnih projektov, ki so jih izvajale različne skupine raziskovalcev iz različnih institucij, mreža opazovanj pa ni organizirana na nacionalnem nivoju kot npr. v Švici (Schürch in sod., 2003), zato je dostopnost podatkov zelo omejena. Identificirali smo tudi številne druge pomanjkljivosti in ugotovili, da v dostopni literaturi ponekod manjkajo podatki o lokacijah (koordinate), o

načinu vzorčenja (vrsta uporabljenega dežemera, obdobje in frekvenca vzorčenja), o odstranjevanju nečistoč iz vzorcev (filtriranje, ločevanje parafinskega olja), o uporabljeni embalaži za hranjenje vzorcev (npr. polietilenska, steklena), o uporabi analiznih metod, zagotavljanju kakovosti meritev in merilni negotovosti rezultatov. Pogosto tudi niso na voljo numerične vrednosti, nadaljnje obdelave podatkov pa so pomanjkljivo opisane (Vreča in Malenšek, 2016).

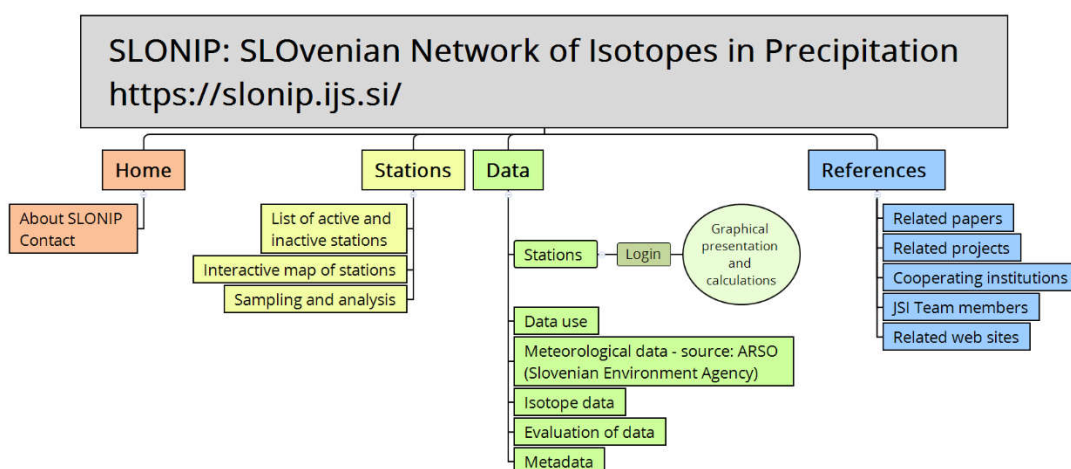
Podatki o izotopski sestavi padavin v Sloveniji so na voljo v GNIP le v manjši meri. Od leta 1984 dalje jih je posredoval Institut "Jožef Stefan" (IJS) v sodelovanju z Institutom Rudjer Bošković (IRB) iz Zagreba in sicer do 2004, za Ljubljano in Zagreb. Za krajše obdobje opazovanj so dostopni tudi podatki za Portorož in Kozino. Ideja, da bi po vzoru GNIP vzpostavili Slovensko mrežo opazovanj izotopske sestave padavin (v angleščini: SLOvenian Network of Isotopes of Precipitation – SLONIP), je bila prvič predstavljena leta 2006 na 2. Slovenskem geološkem kongresu. Sledilo je dolgo prehodno obdobje, ko so potekale različne aktivnosti, ki pa žal niso bile poenotene niti na nacionalnem niti na med inštitutskim nivoju (Vreča in Malenšek, 2016, Vreča et al. 2017). V tem času so potekale tudi programske posodobitve GNIP.

Da bi premostili vrzel med GNIP in opazovanji v Sloveniji in izboljšali dostopnost podatkov, smo zato pričeli leta 2016 na Odseku za znanosti o okolju Instituta "Jožef Stefan" s pripravo gradiva za spletno stran SLONIP (<https://slonip.ijs.si/>), ki je začela 1. 4. 2020 in jo sedaj vzdržujemo in postopno dopolnjujemo. Glavni namen spletne strani je zbiranje obstoječih, dostopnih podatkov o izotopski sestavi padavin v Sloveniji, ki so bili pridobljeni v okviru raziskav na IJS ter s tem izboljšati dostopnost do podatkov znanstveno-raziskovalnim skupinam ter ostalim zainteresiranim uporabnikom. V nadaljevanju je predstavljena struktura spletne strani in njene glavne vsebine.

Predstavitev spletne strani SLONIP

Struktura spletne strani

Spletna stran SLONIP je na voljo le v angleškem jeziku. Struktura spletne strani je preprosta in zajema 4 podstrani kot je prikazano na Sliki 1: Home, Stations, Data in References.



Slika 1. Shematski prikaz strukture spletne strani <https://slonip.ijs.si/>

Spletna stran SLONIP ponuja uporabnikom:

- osnovne informacije o SLONIP vključno s pogoji uporabe (podstran Home, <https://slonip.ijs.si/>);
- informacije o postajah, kjer poteka ali je potekal monitoring izotopske sestave padavin (podstran Stations, <https://slonip.ijs.si/stations/>, Slika 2) in so bili rezultati objavljeni v dostopnih virih;
- podatke v grafični obliki in izračune povprečnih mesečnih, sezonskih in letnih vrednosti ter lokalnih meteoroloških premic vključno s pogoji uporabe podatkov, virom meteoroloških podatkov, pojasnili o uporabljenih metodah za obdelavo podatkov in seznamom metapodatkov (podstran Data, <https://slonip.ijs.si/data/> – vsebina je dostopna po registraciji uporabnika);
- sezname referenčnih dokumentov, projektov, sodelujočih institucij in sorodnih spletnih strani (podstran References, <https://slonip.ijs.si/references/>).

The screenshot shows the SLONIP website interface. At the top, there are navigation tabs for Home, Stations, Data, and References. The main heading is "SLONIP SLOvenian Network of Isotopes in Precipitation". Below this, there is a "Stations" section with a table listing eight stations. To the right of the table is a map of Slovenia with green markers indicating the locations of the stations. A callout box for Ljubljana provides the following data: R: 1565 [m], T: 10.73 [°C], δ¹⁸O: -8.71 [‰], δ²H: -61.1 [‰], d: 9.6 [‰], and h: 15.2 [m]. Below the map, there is a link to "Data upon logging in." and a "Sampling and analysis" section. The "Sampling and analysis" section contains detailed text about the monitoring process, including the use of ARSO synoptic meteorological stations, the collection of precipitation samples, and the analysis of stable isotopes of hydrogen and oxygen using isotope ratio mass spectrometry (IRMS).

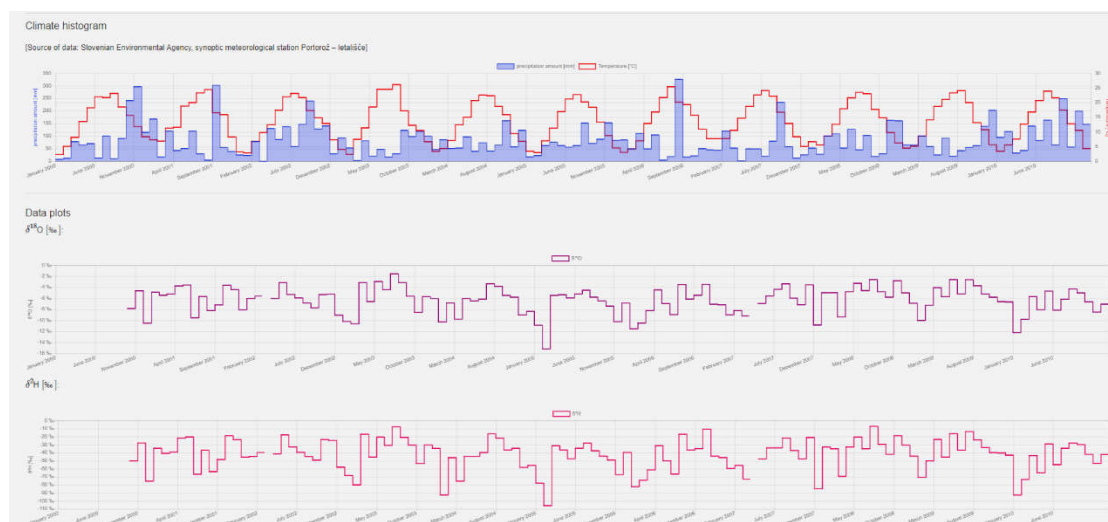
Station	Latitude	Longitude	Altitude [m]
1. Ljubljana	46.054612	14.597046	282
2. Portorož	45.475314	13.015985	2
3. Kozina	45.664249	13.931941	484
4. Kredarica	46.378794	13.948828	2514
5. Sv. Urban	46.163364	15.595748	283
6. Murska Sobota	46.452078	16.161278	196
7. Zg. Radovna	46.428176	13.942715	750
8. Rateče	46.487090	13.712891	954

Slika 2. Prikaz postaj, kjer poteka ali je potekal monitoring izotopske sestave padavin s kratkim opisom vzorčenja in analiz

Raziskave v Sloveniji tekom zadnjih desetletij so pokazale, da je za uspešno izvajanje opazovanj najbolj primerno vzorčenje na glavnih meteoroloških, klimatoloških ali padavinskih postajah, ki jih vzdržuje za potrebe meteorologije Agencija RS za okolje (ARSO). Na postajah, ki so del državne meteorološke mreže, izvaja vzorčenje padavin za potrebe izotopskih raziskav osebje postaj dnevno. Zbrani vzorci predstavljajo mesečni kompozit. V nekaterih primerih skrbimo za vzorčenje sodelavci IJS (npr. v Ljubljani na Rektorskem centru IJS) oziroma nam pomagajo prostovoljci (npr. Sv. Urban). Za pridobitev kakovostnih podatkov je potrebna stalna dobra komunikacija z osebjem postaj, kar je v Sloveniji zaradi majhnosti države lahko izvedljivo in so pretekle izkušnje zelo pozitivne. Natančnejša navodila za vzorčenje padavin so na voljo na IAEA GNIP spletni strani (http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), nekatera dodatna priporočila pa so podana v pregledu raziskav, ki sta ga opravili Vreča in Malenšek (2016).

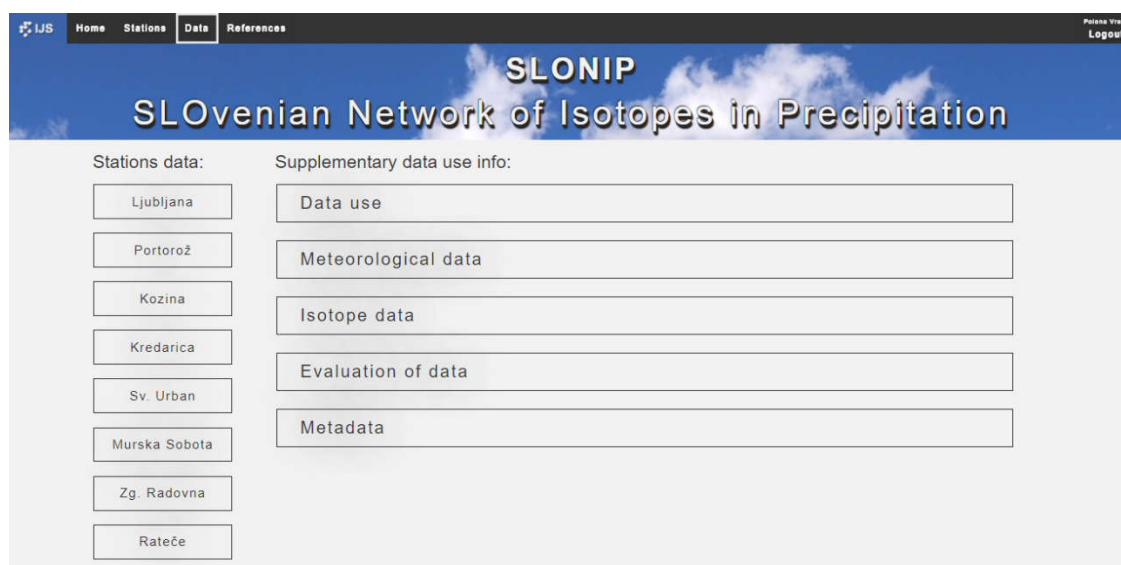
Grafični prikaz in obdelava podatkov

Na spletni strani so grafično predstavljeni podatki za izotopsko sestavo kisika ($\delta^{18}\text{O}$), vodika ($\delta^2\text{H}$ v ‰) in tritija (^3H) ter devterijevega presežka d , ki ga je v izotopsko hidrologijo vpeljal Dansgaard (1964; $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$). Numerični podatki o izotopski sestavi padavin, ki so vidni s pomikom po grafu, trenutno še niso v celoti prosto dostopni, posredujemo pa jih na zahtevo zainteresiranega uporabnika. Za vsako postajo je prikazan tudi klimatološki histogram (Slika 3), za katere uporabljamo podatke iz meteorološkega portala ARSO (<https://meteo.arso.gov.si/>).



Slika 3. Primer prikaza klimatskega histograma za postajo Portorož in grafični prikaz spreminjanja izotopske sestave padavin v obdobju 2000-2010.

Ker je za primerjavo podatkov iz različnih postaj pomembno, da leto ovrednotimo na enak način, je na SLONIP podrobno opisano kako so izvedeni izračuni, ki služijo nadalje za numerični in grafični prikaz mesečnih, sezonskih in letnih povprečij ter lokalnih meteornih premic (podstran Data; zavihki Stations data in pojasnilo v Evaluation of data).



Slika 4. Prikaz zavihka Data

Pri obdelavi podatkov o izotopski sestavi padavin praviloma izhajamo iz osnovnih opisnih statistik (poprečje, minimum in maksimum). Ker pa je izotopska sestava padavin povezana s količino padavin, pri prikazu vrednosti uporabljamo tudi utežena poprečja:

$$\bar{x}_{weighted} = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

in je:

$$w_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2)$$

V enačbah (1) in (2) x označuje izotopsko sestavo (npr. $\delta^{18}\text{O}$), oznaka p pa višino padavin (v mm) in i posamezen mesečni vzorec. Seštevanje praviloma izvedemo preko celotnega niza vzorcev ali pa preko posameznega časovnega obdobja (npr. koledarskega leta, posamezne sezone ali izbranega meseca).

Pomemben del obdelave podatkov v izotopski hidrologiji predstavlja izračun meteornih premic. 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 in je modelna premica s katero primerjamo naše lokalne podatke. Lokalno spreminjanje izotopske sestave vodika in kisika, ki je posledica različnih klimatskih pogojev, opišemo zato z lokalnimi padavinskimi premicami (Local Meteoric Water Line - LMWL), za katere pa lahko uporabimo različne regresijske metode (Crawford et al., 2014).

Ker je poleg tega, da so podatki o izotopski sestavi padavin v Sloveniji dostopni, naš namen tudi, da so pravilno obdelani za nadaljnjo uporabo v različnih študijah, so na spletni strani metode, ki jih SLONIP uporablja za procesiranje podatkov, podrobneje opisane. Informacije o uporabljenih regresijskih metodah in formule, ki jih v ozadju uporablja SLONIP so navedene na podstrani Data, pod zavihkom Evaluation of data.

Podatki, ki jih uporabimo za izračun letnih povprečij in regresijskih premic so uporabni le, če sta izpolnjena dva pogoja. Prvi pogoj je, da imamo na voljo v posameznem letu vsaj 8 ali več mesečnih podatkov o izotopski sestavi padavin. Drugi pogoj je, da predstavlja skupna količina analiziranih padavin vsaj 70 % letnih padavin.

Za izračun lokalnih padavinskih premic smo izbrali dve različni regresijski metodi, Reduced Major Axis Regression (RMA) in Major Axis Regression (MA), za kateri smo se odločili zaradi dejstva, da moramo vrednosti $\delta^2\text{H}$ in $\delta^{18}\text{O}$ upoštevati na enak način in ne smemo nobene tretirati kot neodvisno spremenljivko. Uporabljene regresijske metode so povzete po članku Crawford et al. (2014). Tako kot v omenjenem članku, tukaj navajamo le formule za izračun regresijskih koeficientov, ne pa tudi bolj podrobnih informacij o teh metodah, kot so numerična stabilnost itd.

Posamezne mesečne vrednosti izotopske sestave kisika ($\delta^{18}\text{O}$) in vodika ($\delta^2\text{H}$) bomo označevali z x_i in y_i . Pri navadnih, neuteženih regresijskih metodah (v nadaljevanju označenih z RMA in MA), se naklona premic (a) izračunata po formulah:

$$a_{RMA} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}} \quad (3)$$

in

$$a_{MA} = \frac{(\sum_{i=1}^n V_i^2 - \sum_{i=1}^n U_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n V_i^2 - \sum_{i=1}^n U_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n U_i V_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n U_i V_i} \quad (4)$$

kjer sta:

$$U_i = (x_i - \bar{x}) \quad (5)$$

in

$$V_i = (y_i - \bar{y}) \quad (6)$$

odstopanji posamezne meritve od povprečja.

Presečišče z ordinato (b) je v obeh primerih podano z:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - a \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - a\bar{x} \quad (7)$$

Napaki (standardna deviacija) v koeficientih obeh metod se izračunata po formulah:

$$SE_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad , \quad SE_b = SE_a \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 / n} \quad (8-9)$$

kjer je:

$$\hat{y}_i = ax_i + b \quad (10)$$

izračunan s pomočjo dobljenih regresijskih koeficientov a in b .

Ker količina padavin v Sloveniji tekom leta ni enakomerno porazdeljena, je pomembno mesečno količino padavin v uporabljenih regresijskih metodah upoštevati. Zato so Crawford et al. (2014) predlagali uporabo regresijskih metod, v katerih rezultate $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$ utežimo s količino padavin in uporabimo t.i. PWRMA – Precipitation Weighted Reduced Major Axis Regression oziroma PWMA – Precipitation Weighted Major Axis Regression.

Za nadaljnji izračun je prikladno najprej definirati dodatni spremenljivki:

$$U_{wi} = x_i - \bar{x}_w \quad (11)$$

in

$$V_{wi} = y_i - \bar{y}_w \quad (12)$$

kjer sta:

$$\bar{x}_w = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (13)$$

in

$$\bar{y}_w = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (14)$$

s količino padavin uteženi povprečji $\delta^{18}\text{O}$ in $\delta^2\text{H}$.

Naklon premic pri PWRMA in PWMA se izračunata kot:

$$a_{PWRMA} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_w)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x}_w)^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2}{\sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2}} \quad (15)$$

in

$$a_{PWMA} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2 - \sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2 + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i V_{wi}^2 - \sum_{i=1}^n w_i U_{wi}^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n w_i U_{wi} V_{wi})^2}}{2 \sum_{i=1}^n w_i U_{wi} V_{wi}} \quad (16)$$

začetni vrednosti pa sta podani s formulo:

$$b_{PW} = \sum_{i=1}^n w_i y_i - a \sum_{i=1}^n w_i x_i = \bar{y}_w - a\bar{x}_w \quad (17)$$

Standardni deviaciji naklona in odseka izračunamo po formuli:

$$SE_{a,PW} = \sqrt{\frac{\frac{n \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}{n \sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (18)$$

in

$$SE_{b,PW} = SE_{a,PW} \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i x_i^2} \quad (19)$$

in je:

$$\hat{y}_i = ax_i + b \quad (20)$$

Navedene formule so implementirane v kodi SLONIP na tak način, da je edina naloga administratorja naložiti nove izotopske podatke v obliki Excelove datoteke, preostala obdelava podatkov se izvede avtomatsko. Tekom izdelave spletne strani je nastal tudi program za osebno uporabo, ki bazira na kodi, ki jo uporablja SLONIP. Program je odprtokoden in bo kmalu na voljo za javnost na portalu Github.

V izotopskih študijah se najbolj pogosto uporablja kot regresijski model za izračun premic metoda najmanjših kvadratov (Ordinary Least Squares Regression – OLSR), kar pa je, glede na naravo izotopskih podatkov, zmotno. Zato bomo verjetno v prihodnosti dodali za primerjavo z izračuni drugod po svetu na spletno stran SLONIP tudi izračun OLSR.

Zaključek

SLONIP (<https://slonip.ijs.si/>) je prva spletna stran, ki vsebuje podatke o izotopski sestavi padavin v Sloveniji skupaj z grafičnimi predstavitvami časovnega spreminjanja posameznih parametrov in numeričnimi izračuni povprečnih mesečnih, sezonskih in letnih vrednosti ter lokalnih meteoroloških premic padavinskih premic. Osnovana je bila po vzgledu mednarodne podatkovne baze GNIP in nekaterih drugih nacionalnih programov spremljanja izotopske sestave vod (npr. švicarskega modula ISOT) z dopolnitvami na osnovi dolgoletnih raziskav na področju izotopske hidrologije. Trenutno so na SLONIP predstavljeni podatki, ki so bili pridobljeni v okviru različnih raziskav, pretežno v okviru kratkotrajnih raziskovalnih projektov, ki so potekali od leta 1981 na Institutu "Jožef Stefan" v sodelovanju z različnimi organizacijami in so rezultati (numerični podatki) objavljeni v javno dostopnih publikacijah. V prihodnosti nameravamo SLONIP postopoma dopolniti z razpoložljivimi arhivskimi podatki.

V prihodnosti bi bilo smiselno, da bi SLONIP postala del nacionalnega programa pod okriljem ARSO in bi bila mreža sistematičnih opazovanj izotopske sestave vode razširjena tudi na ostale komponente vodnega kroga (npr. površinske in podzemne vode, snežno odejo, vodo iz pip).

Zahvala

Raziskave izotopske sestave padavin potekajo trenutno v okviru nacionalnega raziskovalnega programa (P1-0143) ter IAEA koordiniranih projektov F31006, F33024 in RER7013, v preteklosti pa so se izvajale v okviru številnih projektov navedenih na spletni strani SLONIP. Pomembno finančno podporo za nastanek spletne strani je predstavljal

projekt bilateralnega madžarsko-slovenskega sodelovanja N1-0054, ki ga je sofinancirala ARRS. Avtorja se zahvaljujeva vsem sodelavcem, ki so v preteklih 40 letih kakorkoli pripomogli k nastajanju predstavljene spletne strani, v obliki izvajanja vzorčenja, analiz ali pomoči pri obdelavi podatkov.

Literatura

- Clark, I., Fritz, P. 1997: Environmental isotopes in hydrology, CRC Press, 328p.
- Craig, H. 1961: Isotope variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702-1703.
- Crawford, J., Hughes, C. E., Lykoudis, S. 2014: Alternative least squares methods for determining the meteoric water line, demonstrating GNIP data. *Journal of Hydrology*: 519, 2331-2340.
- Dansgaard, W. 1964: Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-468.
- Dolinar, M., Frantar, P., Kurnik, B. (2008). Značilnosti vodne bilance Slovenije v obdobju 1971-2000. *Mišičev vodarski dan 2008*, 19-25.
- Gospodarič, R., Habič, P., 1976. Underground water tracing; investigations in Slovenia 1972–1975. ZRC SAZU, Postojna, 309 p.
- Hatvani, I. G., Szatmári, G., Kern, Z., Erdélyi, D., Vreča, P., Kanduč, T., Czuppon, G., Lojen, S., Kohán, B., 2021: Geostatistical evaluation of the design of the precipitation stable isotope monitoring network for Slovenia and Hungary. *Environment International*: 146, 106263-1-106263-14.
- IAEA, 2021: Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_isohis.html, zadnji dostop 26.11.2021.
- Ingraham, N.L. 1998: Isotopic variations in precipitation. In *Isotope tracers in catchment hydrology*. Kendall C., McDonnell J.J. (Eds.), Elsevier, 87-118.
- 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.
- Schürch, M., Kozel, R., Schotterer, U., Tripet, J. P. 2003: Observation of isotopes in the water cycle – the Swiss National Network (NISOT). *Environmental Geology*, 45, 1-11.
- Vreča, P., Brenčič, M., 2009: Izotopska sestava padavin v Sloveniji in njen pomen za raziskave kroženja vode. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008*, Ljubljana, 7-18.
- Vreča, P., Malenšek, N., 2016: Slovenian Network of Isotopes in Precipitation (SLONIP) - a review of activities in the period 1981-2015. *Geologija*: 59, 67-83.
- Vreča, P., Kanduč, T., Kocman, D., Lojen, S., Robinson, J. A., Štok, M., 2017: Slovenska mreža opazovanj izotopske sestave padavin (SLONIP): pregled in možnost uporabe pri upravljanju z vodnimi viri. *Drugi slovenski kongres o vodah*, Ljubljana, 225-234.