



SVEUČILIŠTE U SPLITU FAKULTET
GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I
GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

**Promjenjivost režima zasljenosti podzemnih voda u obuhvatu Donja Neretva
pod vanjskim utjecajima**

Ivan Lovrinović

Split, prosinac 2021.

MATICE HRVATSKE 15 21000 SPLIT
- HRVATSKA / CROATIA

T: +385 (0)21 303 333
F: +385 (0)21 465 117

IBAN:
HR3724070001100579623



Sadržaj:

1. Motivacija.....	3
2. Opis problema	4
3. Metodologija	6
3.1 Sustav monitoringa.....	6
3.2 Hidrogeološka karakterizacija	9
3.3 Analiza vremenskih serija	10
3.3.1 Analiza vremenskih serija u vremenskoj domeni.....	10
3.3.2 Analiza vremenskih serija u frekvencijskoj domeni.....	10
4. Pregled istraživanja	11
5. Ciljevi istraživanja.....	13
6. Literatura	15

1. Motivacija

Obalna područja oduvijek predstavljaju atraktivna područja za život. Procjenjuje se da danas na obalnim područjima svijeta živi oko 80% svjetskog stanovništva [1]. U obalnim područjima gdje je količina površinske svježe vode nedovoljna, dobivanje svježe vode iz vodonosnika ključno je društveno i gospodarsko pitanje. Ovdje se pod pojmom svježe vode razmatra voda koja u pogledu fizikalno-kemijskih parametara zadovoljava ono čemu je namijenjena. Zalihe svježe vode kao i raspoloživost iste ograničene su djelovanjem mora, a kada se u obzir uzmu porast broja stanovnika nastanjenih u obalnom području, povećana potreba za navodnjavanjem i intenziviranjem turizma, privredne grane koju odlikuje izrazita sezonska periodičnost, onda ugroza osiguranja dovoljnih količina svježe vode drastično raste [2]. S druge strane, močvarna područja oko ušća rijeka koja su bogata svježom vodom često su i plodna tla, te su melioriranjem dovedena do stanja pogodnog za obradu i proizvodnju poljoprivrednih dobara. Održivost takvih područja zasniva se na uspješnom gospodarenju, primarno kroz poduzimanje mjera koje minimiziraju ili pospješuju stanje voda uzrokovano intruzijom morske vode u vodonosnik. S obzirom na projekcije klimatskih promjena kroz indikatore poput podizanja srednje razine mora i sve izraženijim nejednakostima u rasporedu oborina tokom godine, očekuju se izraženije negativne posljedice od intruzije morske vode [3,4].



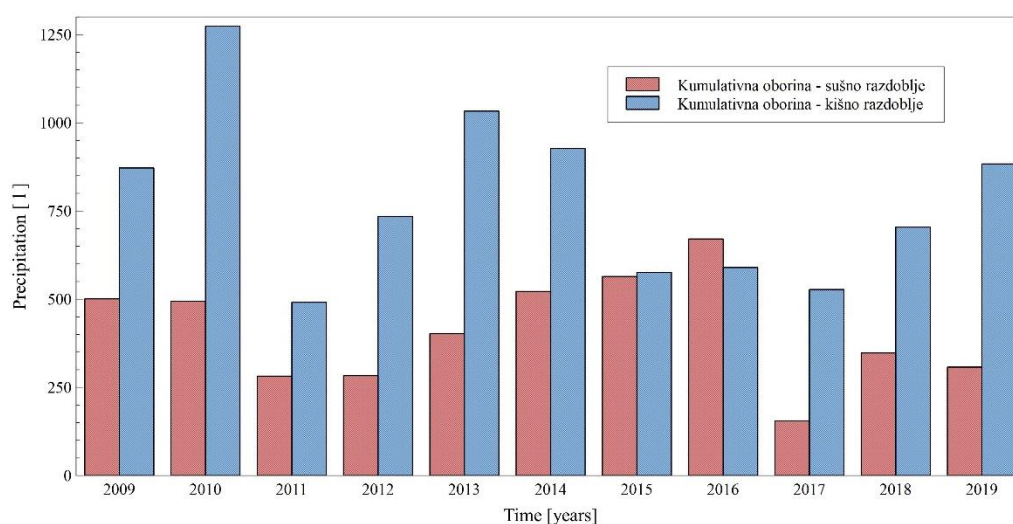
Slika 1. Panoramska fotografija doline Neretve, fotografirana s južnog dijela melioracijskog podsustava Vidrica

Dolina Neretve je u prošlosti bila močvarno područje s plodnim aluvijalnim nanosima

koje je rijeka Neretva nanosila s vremenom. Prvi pokušaji regulacije rijeke Neretve i melioracije močvarnih dijelova doline Neretve datiraju još iz 19. stoljeća, a najznačajniji radovi događaju se početkom 1960-tih kada započinje izgradnja nasipa Diga, a zatim i izgradnja melioracijskih kanala, te crpnih stanica. U sadašnjem stanju, dolina Neretve obuhvaća oko 5000 hektara obradivih površina čime predstavlja najveće poljoprivredno područje na hrvatskoj obali [5]. U dolini Neretve trenutno živi oko 30,000 ljudi [6] od čega veći postotak primarni izvor prihoda osigurava iz poljoprivrednih djelatnosti [7].

2. Opis problema

Dolina Neretve ima karakterističnu mediteransku klimu sa suhim i vrućim ljetima, te kišnom i blagom zimom. Generalna raspodjela vode koja u obliku oborine padne u ovom području može se podijeliti na dva perioda: i) kišni period od 1.11. do 1.4. i ii) sušni period od 1.4. do 1.11. Kišni period je okarakteriziran učestalim oborinama, dok su oborine u sušnom periodu većinom sporadične. Prosječna kumulativna oborina za sušni period u razdoblju od 2009. do 2019. godine iznosi 491.2 l, dok u kišnom periodu iznosi 1273.8 l (Slika 2.). S obzirom na neravnomjernu raspodjelu oborina (Slika 2.) i očekivan porast razine mora, dugoročno održivo upravljanje dolinom Neretve i osiguranje količine svježe vode koja zadovoljava u pogledu standarda kvalitete u sušnom razdoblju, predstavlja izazov.



Slika 2. Kumulativna oborina s mjerne postaje Ploče raspoređena na sušni i kišni period za razdoblje od 2009. - 2019. godine

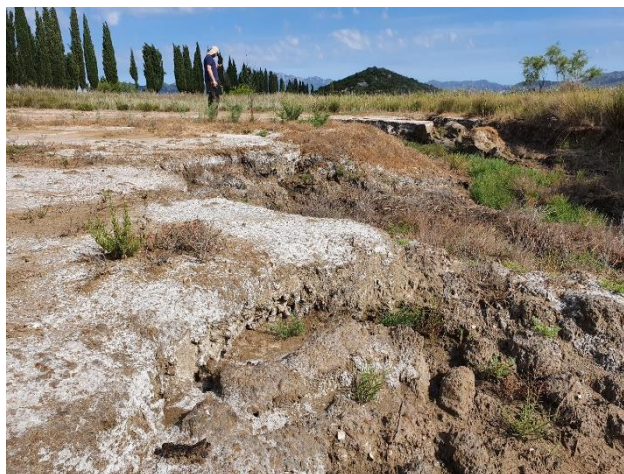
Dolina Neretve je odvojena od mora nasipom Diga, te je okružena rijekom Neretvom i ogrankom rijeke Neretve zvanom rijeka Mala Neretva. Mala Neretva je pak odijeljena od rijeke Neretve ustavom Opuzen ustava (OU) i od mora ustavom Ustava ušće (UU) (Slika 3.).

Inicijalna svrha Male Neretve je bila zaštita od poplava tj. prihvata viška vode kada je protok u rijeci Neretvi veći od kapaciteta korita rijeka. Antropološkim djelovanjem oko korita Male Neretve inicijalna svrha nije u potpunosti ispunjena te je spontano izmijenjena. Danas Mala Neretva uglavnom služi za dovod svježe vode u dolinu. Ustave na rijeci Mala Neretva su većim dijelom godine zatvorene. UU se otvara zbog ispuštanja viška vode iz Male Neretve kada je razina u Maloj Neretvi veća od razine mora, a OU se otvara na recesijskom dijelu nivograma rijeke Neretve, nakon prolaska vodnog vala zbog osvježanja Male Neretve. Kako bi se osigurala kontinuirana opskrba svježom vodom u Maloj Neretvi u periodima kada su ustave zatvorene izrađen je kanal Maksimilijan, kojim se voda zahvaća 8 km uzvodno od početka Male Neretve kako bi se spriječio ulazak klina morske vode u kanal, a ulijeva se u Malu Neretvu neposredno nizvodno od ustave OU.

U bazen crpne stanice (CS) Modrič koja se nalazi u blizini ušća Male Neretve dotječu vode iz melioracijskih kanala iz centralnog dijela doline zvanom Jasenska, te dijelova Opuzen ušće, Diga i Crepina, a bazen CS Prag prikuplja vode iz melioracijskih kanala na području Vidrice. CS Modrič ima kapacitet od $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$, dok CS Prag ima kapacitet od $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Obje crpne stanice rade u sličnom režimu, ulaze u pogon tokom večeri između 21h i 22h, te se gase tokom jutra obično oko 7h ili 8h, a po potrebi, kada se očekuju ili ostvare veće oborine, rad crpnih stanica se produžava. Važno je naglasiti kako rad crpnih stanica nije automatiziran, nego se zasebno svaki dan definira s obzirom na zatečeno stanje razine vode i prognoziranu količinu oborina.

Melioracijskim kanalima i radom crpnih stanica razina podzemne vode u dolini Neretve je spuštena ispod razine mora i razine vode u Neretvi [8] čime su se stvorili pogodni uvjeti za poljoprivredne djelatnosti, ali sekundarno su stvoreni preduvjeti za aktivnu intruziju morske vode [9]. Aktivna intruzija se u sušnom periodu ostvaruje iz dva smjera: i) iz mora prema dolini i ii) iz rijeke Neretve prema dolini. U sušnom periodu klin morske vode je detektiran kod Opuzena na dubini od 2.5 m, a u kišnom periodu razina električne vodljivosti ne prelazi 0.5 mS/cm [8]. Aktivna intruzija morske vode je popraćena značajnijim pronosom morske vode prema unutrašnjosti vodonosnika u odnosu na pasivnu intruziju [10]. U odnosu na pasivnu intruziju u kojoj se klin morske vode podvlači ispod svježe vode, ostvarenjem aktivne intruzije cijeli vodni stupac, uključivo i vodno lice, biva zaslanjen [9]. Takvim nestankom sloja svježe vode, biljke se kapilarnim izdizanjem opskrbljuju zaslanjenom vodom što smanjuje prinose i ugrožava proizvodnju. Uvidom u stanje na terenu uočava se da je područje Dige dominantno pod utjecajem aktivne intruzije (Slika 3.) te je na tom području najslabije razvijena

poljoprivreda.

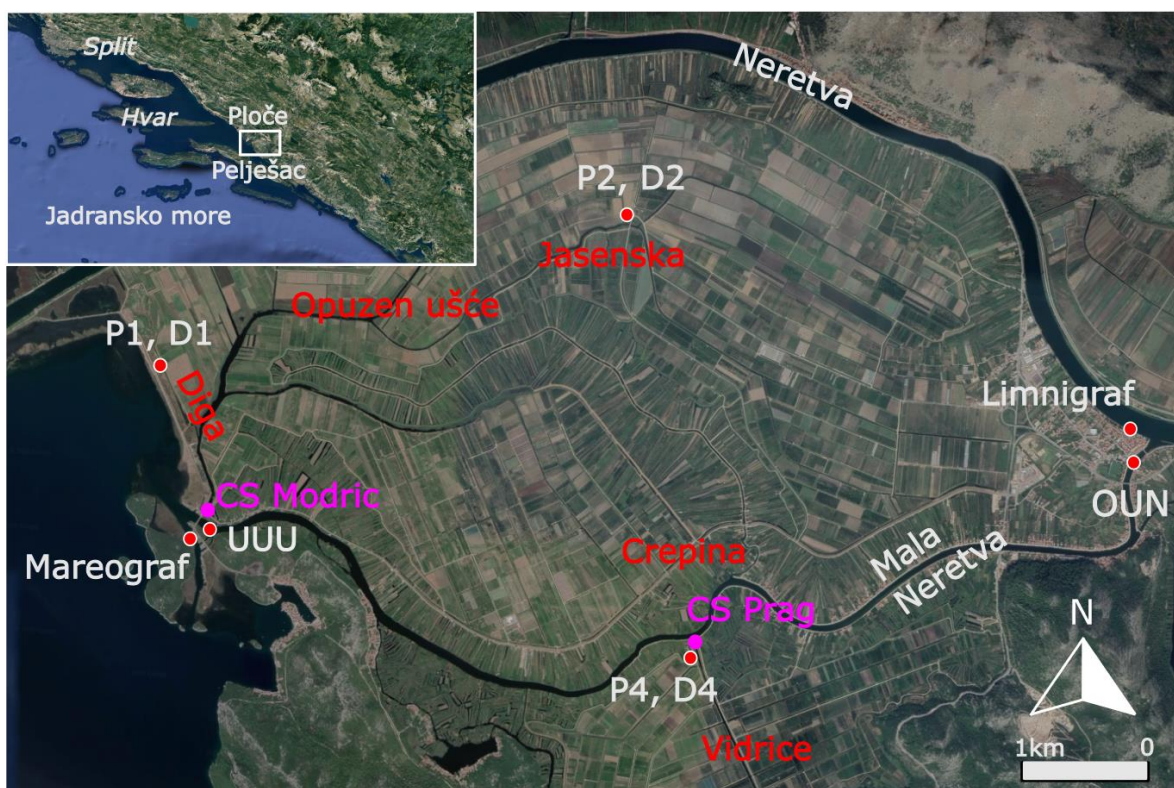


Slika 3. Fotografija kristalizirane soli na području Dige

3. Metodologija

3.1 Sustav monitoringa

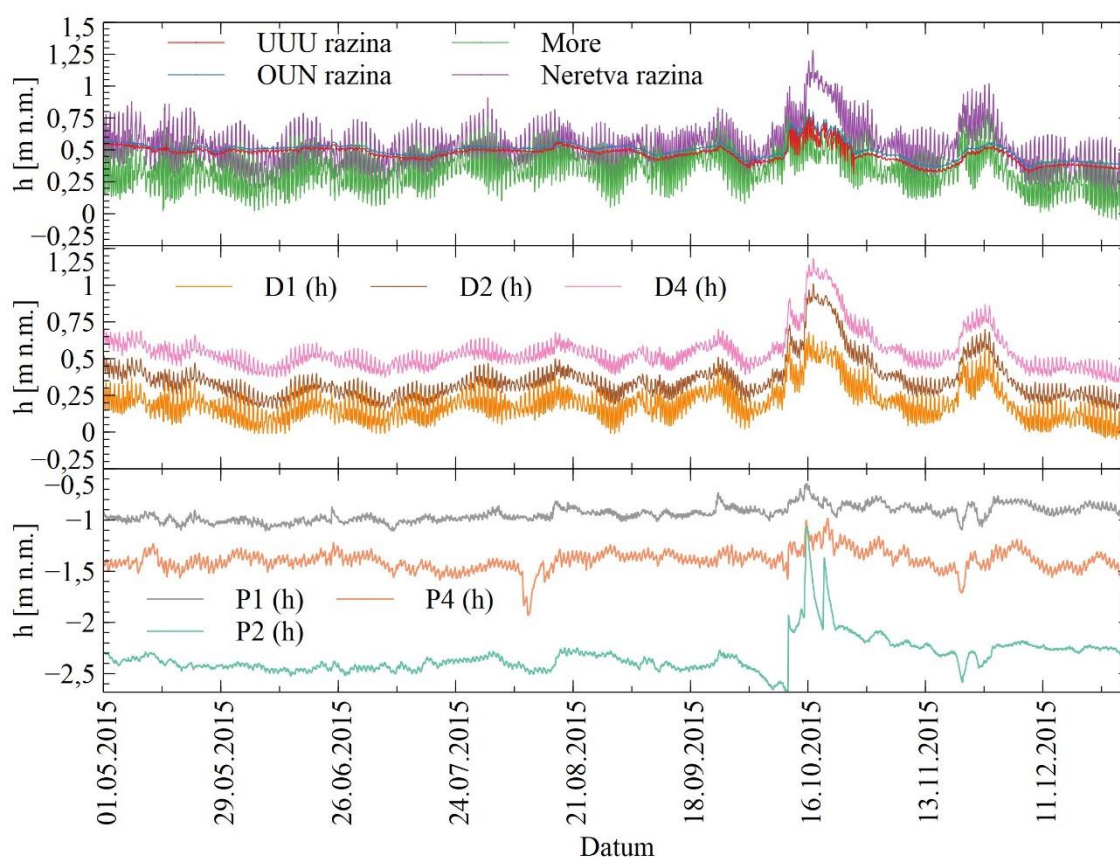
Za potrebe praćenja stanja voda uvjetovanih intruzijom mora u vodonosnik u dolini Neretve uspostavljen je sustav monitoringa stanja površinskih i podzemnih voda (Slika 4.).



Slika 4. Situacijski pregled lokacija infrastrukture sustava monitoringa u dolini Neretve

Na tri lokacije je izvedeno ukupno šest piezometara, te su u njih ugrađene sonde s

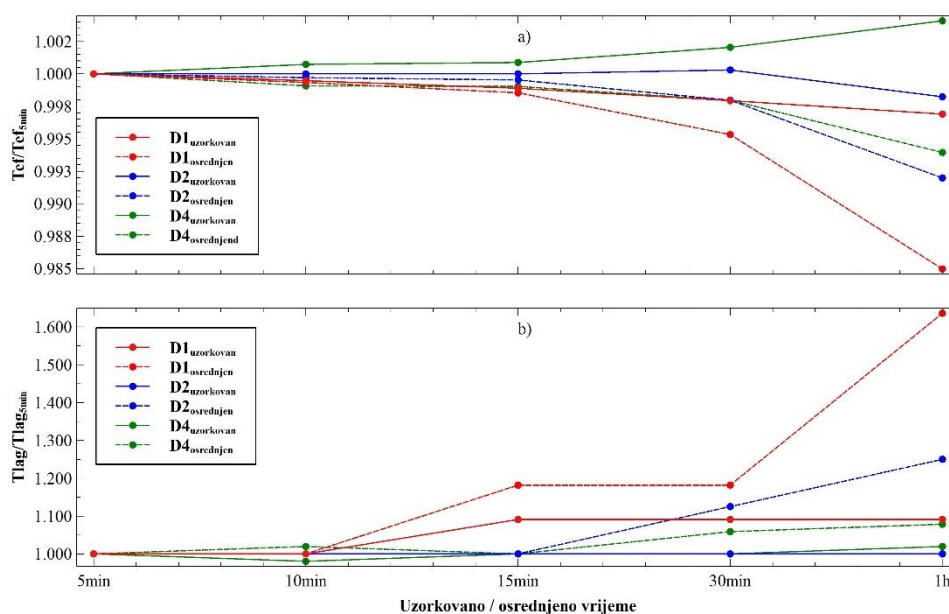
kapacitetom mjerenja razine podzemnih voda s frekvencijom zapisa koja odgovara vremenu uzorkovanja od 1 h. Tri piezometra (P1, P2 i P4) su izbušena u plitkom vodonosniku sa slobodnim vodnim licem s perforacijama po cijeloj dubini piezometra, a druga tri (D1, D2 i D4) su izbušena u dubokom vodonosniku pod tlakom s perforacijama samo na dijelu cijevi koji se nalazi u dubokom vodonosniku (Slika 4.). Ugrađene su „vented“ sonde u sve piezometre, te su zabilježene razine već korigirane s obzirom na utjecaj atmosferskog tlaka. Površinske vode se mjere na mareografu pored ušća rijeke Mala Neretva, na limnigrafu u Opuzenu na rijeci Neretva te na dva limnigrafa Opuzen usta nizvodni (OUN) i Ustava ušće uzvodni (UUU) koji se nalaze pored ustava OU i UU. Sve mjerne postaje za površinske vode također imaju satni zapis razine vode.



Slika 5. Vremenske serije iz sustava monitoringa za period od 1.5.2015. do 31.12.2015.

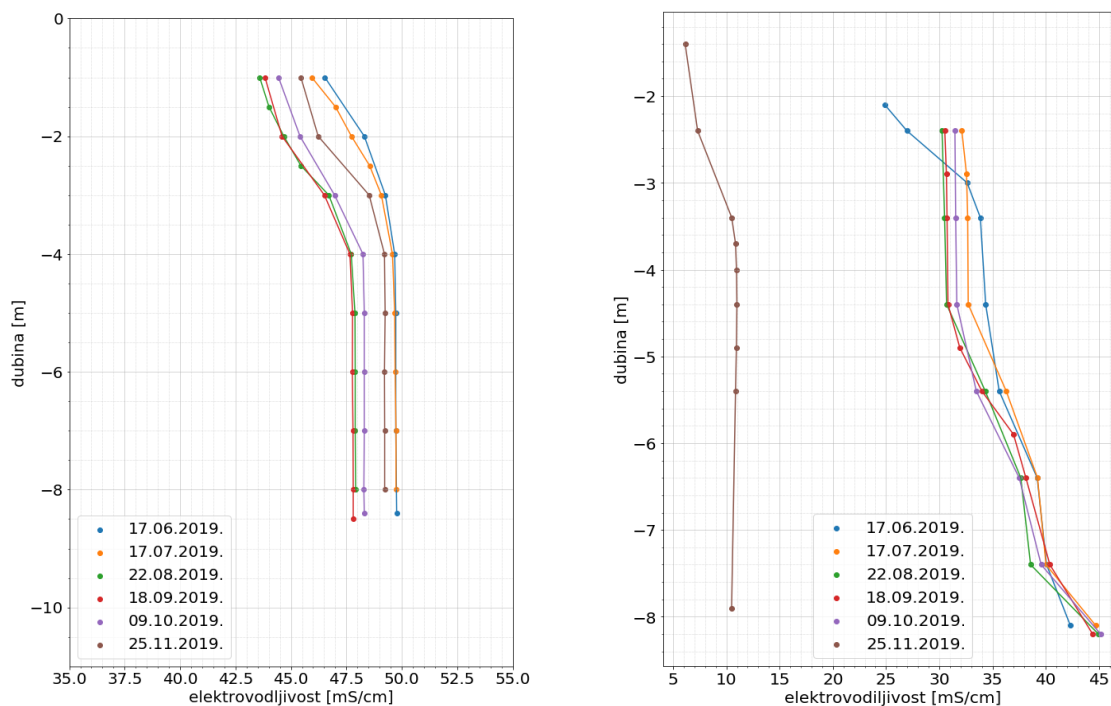
Vremenske serije razina podzemne i površinske vode daju uvid u raspodjelu piezometarskih stanja po podpodručjima doline i njihov relativni odnos s površinskim vodama (Slika 5.). Također, daju uvid i u odnos piezometarskih stanja između različitih hidrogeoloških cjelina. S obzirom kako promjena mjerenih parametara iskazanih na skali manjoj od jednog sata nije moguća, postavlja se pitanje je li frekvencija uzorkovanja postojećeg sustava monitoringa dovoljna? Napravljen je test s petominutnim uzorkovanjem na mareografu i dubokim

piezometrima, te su ispitane vrijednosti atenuacije amplitude mora (T_{ef}) i kašnjenje između signala mora i piezometarskih stanja (T_{lag}) (Slika 6.). Pokazalo se da je potrebna maksimalna periodičnost mjerenja od 15 min kako bi kapacitet sustava osigurao vjerodostojan uvid u promjene u sustavu.



Slika 6. Usporedba T_{ef} i T_{lag} u piezometrima D1, D2 i D4 za različita vremena uzorkovanja i osrednjavanja

Kako bi se dobio uvid u prisutnost i raspodjelu slanosti u dolini, tijekom godine vrše se profiliranja piezometara i površinskih voda s multiparametarskim sondama (Slika 7.). Vertikalna raspodjela parametara električne vodljivosti i temperature po vodonosniku su od posebne važnosti. Vrijednost električne vodljivosti se obično koristi za opis količine soli u vodi. Vrijednost od oko 50 mS/cm odgovara električnoj vodljivosti mora, a vrijednost električne vodljivosti koja je manja od 1.5 mS/sm odgovara svježoj vodi. Izgled temperaturnih profila, kao i promjena temperature po vremenu mogu poslužiti u identifikaciji dominantnih procesa u području mjerenja [11].



Slika 7. Rezultati profiliranja električne vodljivosti za piezometar P1 (lijevo) i P2 (desno) u 2019. godini

Iz Slike 7. može se zaključiti kako se intruzija morske vode ne odvija u svim dijelovima doline podjednako, te da su profili električne vodljivosti promjenjivi po vremenu, ali i kako je prisutna vertikalna stratifikacija slanosti u dolini. Prethodno navedenim je jasno ukazana potreba za uspostavljanje novog monitoringa površinskih voda i unaprjeđenje postojećeg monitoringa podzemnih voda kako bi se mogao pratiti dinamički režim slanosti u dolini kako po područjima, tako i po dubini vodonosnika.

3.2 Hidrogeološka karakterizacija

Iako su razna geofizička ispitivanja provedena u dolini od 1960.-te do danas cjelokupna hidrogeološka identifikacija doline Neretve nije napravljena. Metode poput geoelektrične tomografije i seizmičke refleksije i refrakcije se uobičajeno koriste za dobivanje geoloških i stratigrafskih parametara vodonosnika. Visoki troškovi provedbe i primjene takvih metoda doveli su do razvoja novih, učinkovitih i financijski isplativijih metoda poput *Tidal Methods* [12]. Ova metoda zasniva se na prepoznavanju i utvrđivanju konceptualnog modela vodonosnog sustava i odnosa istog s morem. Kapacitet metode u pogledu primjene već je dokazan, a temeljem svojstava vremenskih serija dugoperiodičnih oscilacija morske razine i stanja podzemnih voda u piezometru osigurava se identifikacija stanja vodonosnog sloja kao i utvrđivanje vrijednosti parametara poput transmisivnosti, poroznosti i koeficijenta zapremine.

[13]. Prednost metode leži u činjenici kako je pogodna za primjenu na različitim konceptualnim modelima vodonosnog sustava kao i na različitim tipovima vodonosnika [14].

3.3 Analiza vremenskih serija

3.3.1 Analiza vremenskih serija u vremenskoj domeni

Analizu vremenskih serija mjerenih sustavom monitoringa potrebno je provesti kako bi se identificirali procesi koji utječu na intruziju morske vode po pojedinim područjima unutar obuhvata. Uzročno posljedične veze između dvaju signala se najčešće ispituju u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. U vremenskoj domeni korištenjem cross-korelacijskog modela dobiva se informacija u funkcionalnoj zavisnosti jedne vremenske serije o drugoj vremenskoj seriji, kao i podatak o kašnjenju jedne vremenske serije za drugom. Uobičajeno se koristi normalizirani oblik cross-korelacije tzv. Pearson-ov koeficijent korelacije i računa se kao:

$$c(\tau) = \frac{Cov_{XY}}{\sigma_{XX}\sigma_{YY}} = \frac{E[(X_t - \mu_X)(Y_{t-\tau} - \mu_Y)]}{\sqrt{E[(X_t - \mu_X)^2]E[(Y_t - \mu_Y)^2]}} \quad (1)$$

pri čemu je $c(\tau)$ Pearson-ov koeficijent korelacije, Cov_{XY} je kovarijanca varijabli, E je matematičko očekivanje, a μ srednja vrijednost, t predstavlja vrijeme, a τ označava vremenski pomak. X i Y označavaju promatrane varijable, a σ predstavlja standardnu devijaciju varijable.. Prednost cross-korelacije je relativno jednostavna primjena i prikladnost za korištenje kada je promatrani signal dominantno pod utjecajem jednog signala ili ako se želi samo ispitati kolika je funkcionalna veza između dva signala. Ukoliko je promatrani signal pod utjecajem više vanjskih signala kao što je čest slučaj u hidrogeologiji onda, je potrebno signale od interesa opisati u frekvencijskoj domeni.

3.3.2 Analiza vremenskih serija u frekvencijskoj domeni

Mjerene vremenske serije predstavljaju diskretne signale pa se za prebacivanje signala iz vremenske u frekvencijsku domenu koristi diskretna Fourier-ova transformacija (DFT):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

gdje X_k označava vrijednost k -tog harmonika, k je indeks harmonika, N je ukupni broj podataka u vremenskoj seriji, a n broj podatka, a x_n vrijednost n -tog podatka u vremenskoj seriji. Primjenom Eulor-ove formule na (2), jednadžba se može napisati u obliku:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left[\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - i \times \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

ili samo

$$X_k = A_k + iB_k \quad (4)$$

Rezultat DFT-a je kompleksni broj za svaku k-ti harmonik. Prikazivanjem rezultata u kompleksnom koordinatnom sustavu mogu se iščitati dvije informacije: magnituda i faza pojedinog harmonika.

$$M_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}; \quad \varphi_k = \tan^{-1} \frac{B_k}{A_k} \quad (5)(6)$$

gdje M_k označava magnitudu k-tog harmonika, φ_k fazu k-tog harmonika. Dijeljenjem magnitude sa brojem podataka N dobiva se amplituda svakog harmonika (Slika 5). Analogno cross-korelaciji u vremenskoj domeni, u frekvencijskoj domeni se mogu primijeniti koherencijski modeli koji označavaju funkcionalnu ovisnost pojedinih harmonika u dva promatrana signala.

$$r(k)^2 = \frac{|G_{XY}(k)|^2}{G_{XX}(k)G_{YY}(k)} \quad (7)$$

gdje $r(k)^2$ označava kvadratnu koherenciju, a G_{XY} cross-spektar dvaju signala, a G_{XX} i G_{YY} spektar snage (M_k^2) varijabli X i Y. Vremenske serije se u frekvencijskoj domeni osim opisa sa trigonometrijskim funkcijama *sin* i *cos* mogu se opisati i sa funkcijama ograničenog trajanja tzv. Waveletima. Hidrološki i hidrogeološki procesi se najčešće opisuju s Morlet-ovim waveletima [15]. Prednost ovakvog opisa signala u frekvencijskoj domeni je bolji opis neperiodičnih signala i signala promjenjive periodičnosti. [16].

4. Pregled istraživanja

S vremenom su se u svijetu uspostavili i razvili različiti sustavi monitoringa parametara podzemnih i površinskih voda, a koji su kasnije bili podloga za razna istraživanja. Levanon i ostali [17] su istražili važnost praćenja električne vodljivosti na više razina u piezometrima kod vodonosnika koji su dominantno pod utjecajem plime i oseke, kao i razliku dobivenih rezultata ovisno o načinu instaliranja sonde u piezometrima. Pogreške u mjerenjima iz sustava monitoringa su bili predmet istraživanja u radu Rau i ostali [18], pri čemu su ukazane greške koje nastaju pri pogrešnoj izvedbi piezometara kao i greške koje se mogu javiti na instrumentima. Rau i ostali [19] su također predložili smjernice kako unaprijediti sustave monitoringa kroz propisanu minimalnu točnost sonde od 1 mm za praćenje piezometarskih stanja, te maksimalne frekvencije koje odgovaraju vremenu uzorkovanja od 1 h. Dubinski

položaj sonde za mjerenje električne vodljivosti pokazao se ključnim u praćenju kretanja tranzicijske zone [20]. Isto istraživanje je pokazalo kako je tranzicijska zona tokom oseke dosta uža nego tokom plime. Kumar i ostali [21] je pokazao kako i vremenske serije kemijskih spojeva koincidiraju s plimom i osekom, te mogu poslužiti u identifikaciji procesa i hidrogeološkoj karakterizaciji vodonosnika.

Vremenske serije razina podzemne vode i razina mora uslijed plime i oseke su se pokazale kao efikasan ulaz u hidrogeološku karakterizaciju vodonosnika u sferi *Tidal Methods* [22]. Jiao i Tang [23] su na konceptualnom modelu koju se sastoji od tri sloja, točnije od vodonosnika sa slobodnim vodnim licem na vrhu, vodonosnika pod tlakom na dnu te slabopropusnim vodonosnikom između njih, ispitali postojanje vertikalne komponente procjeđivanja između vodonosnika sa slobodnim vodnim lice i vodonosnika pod tlakom. Guo i ostali [24] su istražili povezanost oscilacija razine podzemne vode u vodonosniku pod tlakom s oscilacijama plime i oseke kada vodonosnik pod tlakom nije u direktnom kontaktu s morem nego je odijeljen slabije propusnim materijalom. U istraživanjima [14, 25] predložen je konceptualni model koji obuhvaća varijabilnu udaljenost konekcije mora s vodonosnikom pod tlakom i pokazana je važnost „loading efficiency“ koeficijenta na pronos oscilacija plime i oseke u vodonosniku pod tlakom. Bakker [26] je predložio analitičko rješenje koje vrijedi za višeslojne obalne vodonosnike. Trefry i Bekele [27] ukazali su na pogreške procjene parametra difuzivnosti korištenjem *Tidal Methods* analiziranjem vremenskih serija razina podzemne vode u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Obalni vodonosnici se također mogu okarakterizirati s obzirom na odnos poludnevni i dnevni konstituenti plime i oseke u vremenskim serijama razine podzemne vode [28].

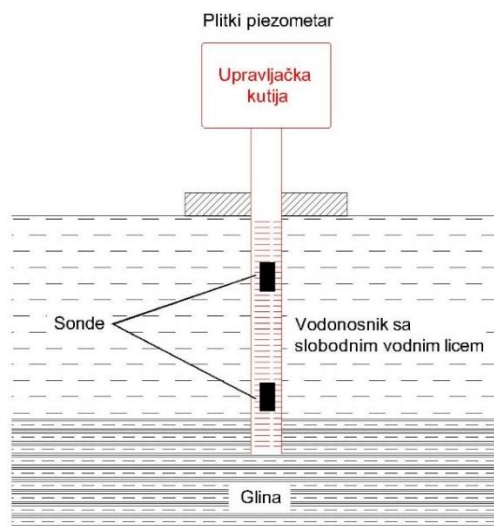
Na području Kimje u Južnoj Koreji [29], korištenjem vremenskih serija iz sustava monitoringa podzemnih voda te dugoperiodičkih oscilacija morske razine, utvrđen je značajan utjecaj plime i oseke na kvalitetu vode, točnije na razinu električne vodljivosti s kojom se mijenja i kvaliteta vode. S obzirom na dobivene vremenske serije istraživanje je provedeno koristeći autokorelacijske i cross-korelacijske modele kao i analize u frekvencijskoj domeni, što je rezultiralo razvojem konceptualnog modela obalnog vodonosnika. Razina podzemne vode također koincidira s mehanizmima plime i oseke, ali sa smanjenom amplitudom i kašnjenjem u ovisnosti o transmisivnosti vodonosnika [30]. Vallejos i ostali [31] su koristeći cross-korelacijske modele uočio kako oborina ima najveći utjecaj na razinu podzemne vode, a samim time i na intruziju morske vode. Analizom vremenskih serija razine vode i električne vodljivosti u frekvencijskoj domeni, Zhang i ostali [32] su identificirali procese i mehanizme

koji dominantno utječu na intruziju morske vode primjenom kontinuirane wavelet transformacije, cross-wavelet analize i koherencijskih modela. Wavelet analiza se pokazala efikasnom i u detektiranju dugoperiodičnih oscilacija razina podzemne vode [33].

5. Ciljevi istraživanja

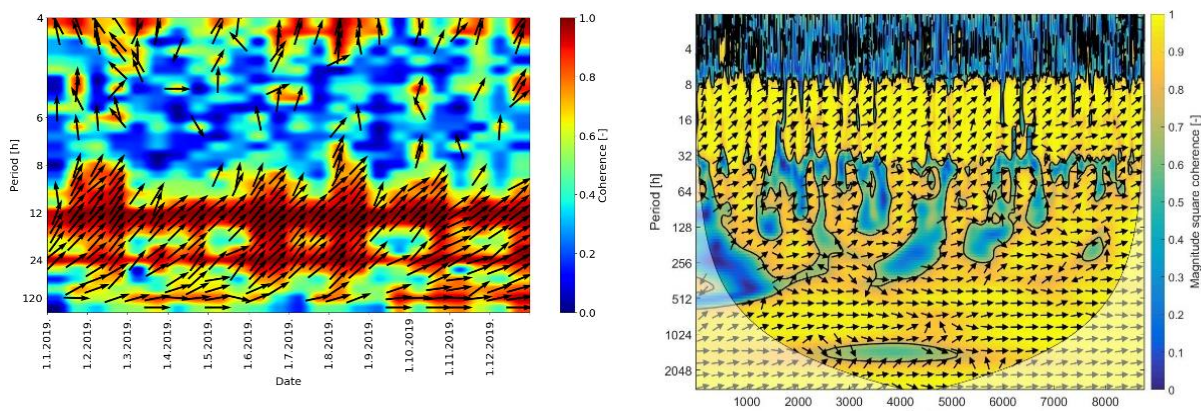
Iz svega prethodno prikazanog proizlaze planirani ciljevi istraživanja na doktorskom studiju:

- Istražiti hidrogeološke režime u dolini Neretve odabirom odgovarajućeg konceptualnog modela te primjenom i nadogradnjom postojećih metoda iz domene *Tidal Methods*. Ovdje se polazi od postojećih rezultata in-situ istražnih radova i mjerenja te se definira inicijalna hidrogeološka definicija vodonosnog sustava. U idućem koraku primjenjuju se i verificiraju postupci koji se oslanjaju na inicijalni konceptualni model. Kalibracijom modela istraživanje im za cilj utvrditi: i) stratigrafsku i geološki definiciju vodonosnog sustava Donje Neretve, ii) utvrditi hidrogeološke uvjete zasebnih geo-stratigrafskih cjelina i iii) determinirati globalne karakteristike sustava (hidraulička vodljivost, transmisivnost, hidraulička difuzivnosti i koeficijent zapremine).
- Uspostaviti sustav monitoringa stanja slanosti površinskih i podzemnih voda u obuhvatu Donje Neretve. Ovo se planira izvesti kroz dvije aktivnosti: i) unaprijeđenje postojećeg sustava monitoringa slanosti podzemnih voda i ii) uspostavu sustava monitoringa površinskih voda, a sve s ciljem uvida u promjenjiva svojstva voda u obuhvatu. Unaprijeđenje postojećeg sustava monitoringa podzemnih i površinskih voda planira se kroz ugradnju multiparametarskih sonde koje imaju kapacitet kontinuiranog zapisa barem piezometarskih stanja, električne vodljivosti i temperature s vremenskim zapisom koje odgovara uzorkovanju od 15 min. Postojeći monitoring sustav stanja podzemnih voda unaprijedit će se u skladu sa rezultatima analiza provedenih na raspoloživim podacima iz prošlosti. U pogledu praćenja stanja površinskih voda, odabrat će se prikladne lokacije i definirati odgovarajuću tehnologiju za praćenje. S ciljem identifikacije procesa i promjena u piezometrima po stupcu vode postavljanje sonde je potrebno postaviti u sve piezometre, a u plitkim piezometrima je potrebno postaviti po dvije sonde na različitim dubinama s obzirom na prikazanu stratifikaciju električne vodljivosti iz Slike 7.



Slika 8. Shematski prikaz položaja sonde u plitkim piezometrima

- Ispitati i analizirati svojstva vremenskih serija prikupljenih sustavom monitoringa s ciljem identifikacije relevantnosti utjecaja vanjskih utjecaja, poput plimotvornih oscilacija, režima rijeka Neretve i Male Neretve, rada crpnih stanica i melioracijsko-irigacijskih kanala u obuhvatu te klimatoloških parametara.
- Provesti istraživanje u vremenskoj i frekvencijskoj domeni i utvrditi porijeklo i dinamička svojstva koncentracije soli u podzemnim vodama vodonosnog sustava Donje Neretve. U ovom dijelu, istraživanje će se zasnivati na primjeni i korištenju koherencijskih modela kojima će se omogućiti uvid u: i) identifikaciju izvora soli u obuhvatu te način i intenzitet intruzije morske vode u vodonosni sustav, ii) svojstva slanosti po podpodručjima unutar područja od interesa (Jasenska, Opuzen Ušće, Diga, Crepina, Vidrice) kao i promjenjivost iste uvjetima vanjskih utjecaja,



Slika 9. Primjer koherencijskih modela baziranih na trigonometrijskim funkcijama (lijevo), na Morlet-ovim waveletima (desno)

6. Literatura

1. Mancuso, M.; Carol, E.; Kruse, E.; Mendes Rodrigues, F. Coastal aquifer hydrodynamics and salinity in response to the tide: case study in Lisbon, Portugal. *Hydrol. Res.* **2016**, *48*, 240–252, doi:10.2166/nh.2016.203.
2. Custodio, E. Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeol. J.* **2010**, *18*, 269–280, doi:10.1007/s10040-009-0496-1.
3. Werner, A.D.; Bakker, M.; Post, V.E.A.; Vandenbohede, A.; Lu, C.; Ataie-Ashtiani, B.; Simmons, C.T.; Barry, D.A. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Adv. Water Resour.* **2013**, *51*, 3–26, doi:10.1016/j.advwatres.2012.03.004.
4. Oude Essink, G.H.P.; van Baaren, E.S.; de Louw, P.G.B. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resour. Res.* **2010**, *46*, doi:https://doi.org/10.1029/2009WR008719.
5. Geografija Dostupno online: <https://geografija.hr/delta-neretve-od-mocvare-do-intenzivne-poljoprivrede/> (pristupljeno 18.12.2021).
6. Nasa Neretva Dostupno online: <http://www.nasaneretva.net/lokalno-stanovnistvo.html> (pristupljeno 19.12.2021).
7. Nasa Neretva Dostupno online: <http://www.nasaneretva.net/poljoprivreda.html> (pristupljeno 19.12.2021).
8. Sveučilište u Splitu; Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije *Monitoring zaslanjivanja tla i vode u dolini Neretve, izvještaj za 2015. godinu*; 2015;
9. Badaruddin, S.; Werner, A.D.; Morgan, L.K. Water table salinization due to seawater intrusion. *Water Resour. Res.* **2015**, *51*, 8397–8408, doi:10.1002/2015WR017098.
10. Badaruddin, S.; Werner, A.D.; Morgan, L.K. Characteristics of active seawater intrusion. *J. Hydrol.* **2017**, *551*, 632–647, doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.031.
11. Anderson, M.P. Heat as a ground water tracer. *Ground Water* **2005**, *43*, 951–968, doi:10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x.
12. Carr, P.A.; Van Der Kamp, G.S. Determining aquifer characteristics by the tidal method. *Water Resour. Res.* **1969**, *5*, 1023–1031,

- doi:<https://doi.org/10.1029/WR005i005p01023>.
13. Li, H.; Li, G.; Cheng, J.; Boufadel, M.C. Tide-induced head fluctuations in a confined aquifer with sediment covering its outlet at the sea floor. *Water Resour. Res.* **2007**, *43*, 1–12, doi:10.1029/2005WR004724.
 14. Xia, Y.; Li, H.; Boufadel, M.C.; Guo, Q.; Li, G. Tidal wave propagation in a coastal aquifer: Effects of leakages through its submarine outlet-capping and offshore roof. *J. Hydrol.* **2007**, *337*, 249–257, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.036.
 15. Grinsted, A.; Moore, J.C.; Jevrejeva, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Process. Geophys.* **2004**, *11*, 561–566, doi:10.5194/npg-11-561-2004.
 16. Torrence, C.; Compo, G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **1998**, *79*, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.
 17. Levanon, E.; Yechieli, Y.; Shalev, E.; Friedman, V.; Gvirtzman, H. Reliable monitoring of the transition zone between fresh and saline waters in coastal aquifers. *Groundw. Monit. Remediat.* **2013**, *33*, 101–110, doi:10.1111/gwmmr.12020.
 18. Rau, G.C.; Post, V.E.A.; Shanafield, M.; Krekeler, T.; Banks, E.W.; Blum, P. Error in hydraulic head and gradient time-series measurements: A quantitative appraisal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2019**, *23*, 3603–3629, doi:10.5194/hess-23-3603-2019.
 19. Rau, G.C.; Cuthbert, M.O.; Post, V.E.A.; Schweizer, D.; Acworth, R.I.; Andersen, M.S.; Blum, P.; Carrara, E.; Rasmussen, T.C.; Ge, S. Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice. *Hydrogeol. J.* **2020**, *28*, 2963–2969, doi:10.1007/s10040-020-02242-7.
 20. Kue-Young, K.; Chul-Min, C.; Ki-Hwa, P.; Yun-Seok, P.; Nam-Chil, W. Multi-depth monitoring of electrical conductivity and temperature of groundwater at a multilayered coastal aquifer: Jeju Island, Korea. *Hydrol. Process.* **2008**, *22*, 3724–3733, doi:10.1002/hyp.6976.
 21. Kumar, P.; Tsujimura, M.; Nakano, T.; Minoru, T. The effect of tidal fluctuation on ground water quality in coastal aquifer of Saijo plain, Ehime prefecture, Japan. *Desalination* **2012**, *286*, 166–175, doi:10.1016/j.desal.2011.11.017.
 22. Dong, L.; Shimada, J.; Kagabu, M.; Yang, H. Barometric and tidal-induced aquifer water level fluctuation near the Ariake Sea. *Environ. Monit. Assess.* **2015**, *187*,

- doi:10.1007/s10661-014-4187-6.
23. Jiao, J.J.; Tang, Z. An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer. *Water Resour. Res.* **1999**, *35*, 747–751, doi:10.1029/1998WR900075.
 24. Guo, Q.; Li, H.; Boufadel, M.C.; Xia, Y.; Li, G. Tide-induced groundwater head fluctuation in coastal multi-layered aquifer systems with a submarine outlet-capping. *Adv. Water Resour.* **2007**, *30*, 1746–1755, doi:10.1016/j.advwatres.2007.01.003.
 25. Guarracino, L.; Carrera, J.; Vázquez-Suñé, E. Analytical study of hydraulic and mechanical effects on tide-induced head fluctuation in a coastal aquifer system that extends under the sea. *J. Hydrol.* **2012**, *450–451*, 150–158, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.015.
 26. Bakker, M. Analytic Solutions for Tidal Propagation in Multilayer Coastal Aquifers. *Water Resour. Res.* **2019**, *55*, 3452–3464, doi:10.1029/2019WR024757.
 27. Trefry, M.G.; Bekele, E. Structural characterization of an island aquifer via tidal methods. *Water Resour. Res.* **2004**, *40*, 1–21, doi:10.1029/2003WR002003.
 28. Rahi, K.A.; Halihan, T. Identifying aquifer type in fractured rock aquifers using harmonic analysis. *GroundWater* **2013**, *51*, 76–82, doi:10.1111/j.1745-6584.2012.00925.x.
 29. Kim, J.H.; Lee, J.; Cheong, T.J.; Kim, R.H.; Koh, D.C.; Ryu, J.S.; Chang, H.W. Use of time series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimje, Korea. *J. Hydrol.* **2005**, *300*, 188–198, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.004.
 30. Yang, H.; Shimada, J.; Shibata, T.; Okumura, A.; Pinti, D.L. Freshwater lens oscillation induced by sea tides and variable rainfall at the uplifted atoll island of Minami-Daito, Japan. *Hydrogeol. J.* **2020**, *28*, 2105–2114, doi:10.1007/s10040-020-02185-z.
 31. Vallejos, A.; Sola, F.; Pulido-Bosch, A. Processes Influencing Groundwater Level and the Freshwater-Saltwater Interface in a Coastal Aquifer. *Water Resour. Manag.* **2014**, *29*, 679–697, doi:10.1007/s11269-014-0621-3.
 32. Zhang, X.; Dong, F.; Dai, H.; Hu, B.X.; Qin, G.; Li, D.; Lv, X.; Dai, Z.; Soltanian, M.R. Influence of lunar semidiurnal tides on groundwater dynamics in estuarine

- aquifers. *Hydrogeol. J.* **2020**, 28, 1419–1429, doi:10.1007/s10040-020-02136-8.
33. Yang, T.; Wang, G. Periodic variations of rainfall, groundwater level and dissolved radon from the perspective of wavelet analysis: a case study in Tengchong, southwest China. *Environ. Earth Sci.* **2021**, 80, 492, doi:10.1007/s12665-021-09785-2.