

## PRILOZI ZA EKOHIĐROLOGIJU KARSTA

Ognjen BONACCI

Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu  
21000 Split, Matice hrvatske 15, Hrvatska, e-mail: obonacci@gradst.hr

Tanja PIPAN

Inštitut za raziskovanje krasa, ZRC-SAZU

SI-6230 Postojna, Titov trg 2, Slovenija, e-mail: pipan@zrc-sazu.si

David C. CULVER

Department of Biology, American University

4400 Massachusetts Ave. NW, Washington, DC 20016, USA, e-mail: dculver@american.edu

### SAŽETAK

Ekohidrologiju je moguće definisati kao nauku koja integriše hidrološke procese s biološkim, vršeći to u različitim merilima prostora i vremena. Karst predstavlja specifičnu sredinu u kojoj postoji neposredna i čvrsta interakcija između cirkulacije i skladištenja podzemne i površinske vode. Ovi procesi snažno utiču na prostornu i vremensku raspodelu organizama i njihovih staništa u karstu. Kao posledica činjenice da se pojava, skladištenje i cirkulacija vode u karstificiranim sredinama značajno razlikuje od istih procesa u ostalim mnogo homogenijim i izotropnijim terenima, ekohidrologija karsta ima zadatak da razvije originalne metode i pristupe. Istovremeno treba naglasiti da korištenje i razvoj tradicionalnih pristupa u analizi i rešavanju hidroloških i ekoloških problema i dalje ništa ne gubi na značenju. Veliki podzemni karstni geomorfološki oblici se javljaju u najrazličitijim dimenzijama. Raspon im se kreće od nekoliko metara dužine i dubine do onih dubljih od kilometra i dužih od desetak kilometara. U članku je posebna pažnja posvećena izučavanju ekohidroloških funkcija podzemnih karstnih oblika (pećina, jama, karstnih provodnika itd.) i epikarstne zone, koji igraju sledeće dve ključne uloge: 1) hidrološku i hidrogeološku u smislu provođenja i skladištenja vode; 2) ekološku kao staništa za brojne retke i ugrožene vrste. Razlike u morfologiji, hidrologiji, hidrogeologiji i svojstvima klime rezultiraju postojanjem velikog broja različitih ekološkog okruženja koji pružaju mogućnost za razvoj i koegzistenciju različitih biljnih i životinjskih vrsta. Posebno detaljno je raspravljena uloga epikarstne i vadozne zone kao i pećina za ekohidrološke procese. U

radu je, takođe, razmatrana uloga poplava u karstu. Osnovni cilj ovog članka je podsticanje diskusije i saradnje među različitim naučnim granama s namjerom promoviranja i razvoja konceptualnog okvira ekohidrologije karsta

**Ključne reči:** Ekohidrologija karsta, epikarst, pećine, podzemno stanište, injektiranje

### 1. UVOD

Dramatična degradacija svih prirodnih resursa, a naročiti onih vodnih tokom 20. i 21. stoleća, podstakla je naučnike koji se bave problemima ekološkog okruženja i geonauka da usmere svoje naučne napore na objašnjavanje odnosa među biološkim i hidrološkim procesima. Svojstva i intenzitet hidroloških promena u prostoru i vremenu značajno utiču na biološku strukturu i aktivnosti u životnoj sredini. S druge strane utvrđeno je da biološka struktura ekološkog okruženja može da reguliše abiotičke aktivnosti. Kao posledica tog složenog interaktivnog odnosa pojavio se koncept nazvan ekohidrologija (Eagleson 2002.; Bonacci 2003.; Wood i sur. 2007.). Tokom zadnje dve decenije koncept ekohidrologije tretiran je u brojnim knjigama, naučnim časopisima, radionicama i konferencijama koje se bave problematikom hidrologije, geologije, hidrogeologije, upravljanja vodnim resursima, itd.

Nauka na kraju dvadesetog stoleća bespovratno se zaputila u prostorno područje multi- i interdiciplinarnosti. Na takav novi i obećavajući pristup podstakli su je složeni problemi koje nije bilo moguće ni shvatiti, a kamo li razrešiti primenom klasičnih

jednodisciplinarnih naučnih pristupa. Ovaj proces posebno je važan kada se izučava voda i njena interakcija sa životnom sredinom. Pri tome se pod pojmom ekološkog okruženja ne misli samo na floru, faunu, krajolik i/ili ekologiju - nego i na socijalne, kulturne, civilizacijske, ekonomske, pa i političke procese koji se u vremenu i prostoru zbivaju vrlo dinamično, a na koje voda ima direktan i sve značajniji utjecaj.

Uloga hidrologije kao bazične, ali i vrlo dinamične naučne grane koja se bavi pojavama voda u prirodi - tako postaje sve značajnija. Njeno prilagođavanje novim kompleksnim potrebama sadašnjosti i budućnosti prisiljavaju hidrologiju na stalno preispitivanje i povezivanje s drugim naukama kojima ona pomaže pri rešavanju praktičnih i teorijskih problema, ali koji ujedno interaktivno utiču na njenu transformaciju i razvoj.

Brzi razvoj hidrologije posledica je činjenice da složena naučna pitanja vezana s problemima ekološkog okruženja mogu delotvorno biti rešena samo ako nekoliko naučnih disciplina (u konkretnom slučaju najmanje Ekologija i Hidrologija) budu simultano uključena u razmatranje.

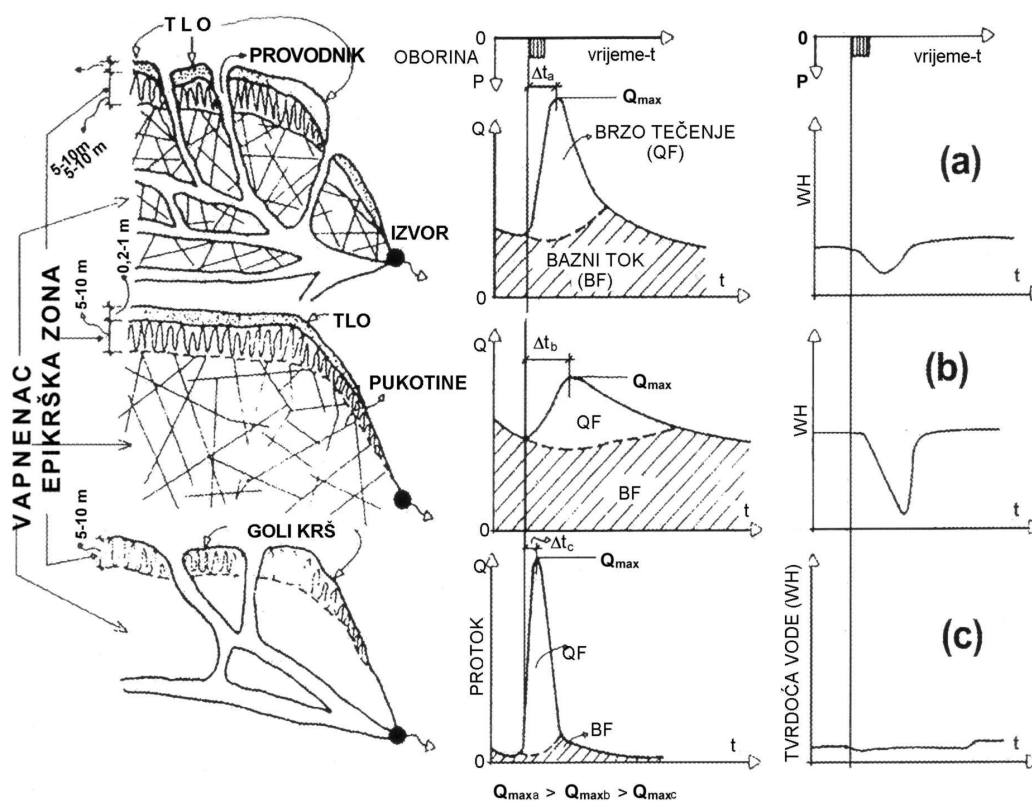
Bonell (2002.) smatra da ekohidrologija povezuje procese ekološkog okruženja sa hidrobiologijom. Zbog specifičnosti cirkulacije vode u karstnim regijama interdisciplinarni pristup analizi procesa površinskih voda s procesima podzemnih voda bitna je pretpostavka za razumevanje ograničenja koji se javljaju u ostvarivanju ciljeva održivog razvoja. Ekohidrologija karsta ima intenciju da integriše ne samo celokupna svojstva karstnog ekološkog okruženja s hidrologijom podzemnih i površinskih voda, već i s biologijom slatkih voda.

Ekologija je naučna disciplina koja se bavi izučavanjem odnosa između organizama i njihove životne sredine. Hidrologija predstavlja naučnu disciplinu koja spada u skupinu nauka o Zemlji (geonauke). Težište njenog izučavanja usredsređeno je na kopneni deo hidrološkog ciklusa. Hidrologija se bavi pojavom, kretanjem i sastavom vode ispod i na površini Zemlje. Hidrološka nauka snažno je povezana, u širokom rasponu prostora i vremena, sa naukama koje izučavaju problematiku okeana, atmosfere i kopna, ali sve neposrednije i intenzivnije i sa biološkim naukama.

Hidrogeologija se bavi pojavom podzemne vode i njenom cirkulacijom u podzemnim vodonosnicima. Vodonosnici su geološke jedinice uključene u prenos količina vode pod uticajem prosečnih hidrauličkih gradijenata. Istovremeno, hidrologija je pretežno usredsređena na izučavanje bilansa voda, zasnovanog na analizi ulaza u, izlaza iz i skladištenju vode unutar određenih jedinica prostora kao što su sliv ili vodonosnik tokom definisanog vremena. Sinteza hidroloških i hidrogeoloških pristupa može pomoći poboljšanju razumevanja odnosa u sistemu površinskih i podzemnih voda. Odvojeno tretiranje samo površinskih voda metodama hidrologije ili isključivo podzemnih voda hidrogeološkim pristupima pokazalo se u brojnim slučajevima nedovoljnim za celovito razumevanje interaktivnih procesa. Ova se konstatacija prvenstveno odnosi na izučavanje problematike pojave i cirkulacije vode u karstnim regijama. U tim prostorima pokazalo se vrlo nedelotvornim pa i nemogućim strogo odvajati hidrološke od hidrogeoloških pristupa. Što više, javlja se potreba njihove sve dublje interaktivne saradnje i prožimanja.

U najrazličitijem životnom okruženju cele planete Zemlje, a naročito u području karsta postoji fundamentalna zavisnost svih živih bića o vodi. Voda je glavni sastavni deo doslovno svih organizama. Životni ciklus kopnenih i vodenih organizama vezan je uz njihov pristup vodi i sezonske termalne cikluse te uz istovremeno odvijanje hemijskih promena vode koje bitno utiču na spomenuti ciklus života. Hidrološki ciklus, tj. raspodela vode i njoj pridruženih hranjiva na celoj planeti Zemlji, kao i godišnje, sezonske i dnevno-noćne varijabilnosti - fundamentalni su fizički obrasci za biološke procese. Postoji duboka i još uvijek nedovoljno shvaćena povratna sprega hidrološkog ciklusa i bioloških procesa.

Međutim, ne sme se zanemariti da hidrološki ciklus i voda imaju duboku vezu sa svim društvenim procesima. Voda je tokom cele ljudske istorije bila, a u budućnosti će biti još više pokretač i uzrok mnogih i značajnih civilizacijskih promjena, kako onih pozitivnih, tako još više onih negativnih (diCastrì 1995.). U ovom članku o društveno-socijalnom aspektu vode neće biti govora, barem ne direktno. Rad je pisan sa željom da se objasni nova uloga voda u interaktivnom djelovanju sa životnom sredinom i ekologijom, prvenstveno u karstnim terenima koji pokrivaju četvrtinu planete Zemlje.



Slika 1

Slika 1: Hidrološke odlike tečenja u karstu

Karstna životna sredina razlikuje se značajno od svih ostalih životnih sredina. Cirkulacija vode u karstu različita je od one u nekarstnim područjima što predstavlja glavni razlog manje ili više različitih svojstava i metoda hidrologije karsta u odnosu na klasičnu nekarstnu hidrologiju. Isti razlog dominantan je za razlikovanje klasične ekohidrologije od karstne ekohidrologije ili ekohidrologije karsta. Zbog činjenice što je pojava, skladištenje i cirkulacija vode u karstu značajno različita nego u ostalim homogenijim i izotropnijim terenima, ekohidrologija karsta mora razviti originalne metode i pristupe.

S malim izuzecima u nekim pećinama unutar podzemnog ekološkog okruženja ne postoji primarna produkcija. Zbog toga su podzemne akvatične zajednice zasnovane na alohtonim izvorima ugljika. Mnoga duboka krška podzemna akvatična staništa siromašna su energijom, ali istovremeno mnoga podzemna staništa neposredno ispod površine raspoložu

značajnim količinama ugljika (Simon i sur. 2007.). Znanja o bazičnim konceptima površinskih i podzemnih karstnih oblika i ekologiji karstnih terena bitna su za ostvarivanje ciljeva održivog razvoja vrednih i ranjivih bioloških i vodnih resursa karsta.

Nekontrolisani porast broja stanovnika na Zemlji uzrokovao je proporcionalno povećanje potreba za ograničenim vodnim resursima na planeti. Uz to se ne sme zanemariti potencijalni uticaj promena ili varijacija klime na karstne ekosisteme. Prethodno napomenuto predstavlja osnovni razlog za neophodnost interdisciplinarnu naučnu suradnju u zaštiti i upravljanju vodnih resursa uopšte, a posebno onih karstnih - koji su zbog niza razloga posebno ranjivi i ugroženi.

U članku su opisani bazični ekološki i hidrološki koncepti karstnih terena sa svrhom da se omogući razumevanje procesa koji određuju specifično ponašanje cirkulacije vode u karstu i njen uticaj na pridružene

ekosisteme. Ekosistem je dinamički sistem koji tvore biljke, životinje i zajednice mikroorganizama (biocenoze) sa njihovim neživim životnom sredinom, biotopom - delujući interaktivno kao funkcionalna jedinica. Namera ovog rada je da baci više svetlosti na integralne analize hidroloških i ekoloških aspekata karstnih terena. Bilo bi dobro kad bi ovaj članak, kao jedan od prvih u ovoj problematici, potaknuo javnu naučnu i profesionalnu diskusiju koja bi trebalo da rezultira potpunijim objašnjavanjem i razvojem konceptualnih okvira ekohidrologije karsta.

## 2. DEFINICIJA EKOHIKROLOGIJE

Naučnici se do sada nisu usuglasili o detaljima vezanim s definicijom, značajem, budućim razvojem i ulogom, pa čak i samim nazivom ekohidrologije ili hidroekologije. Međutim, postignut je apsolutni konsenzus o tome da bliska saradnja između hidrologije i ekologije može biti od pomoći u rešavanju brojnih, konkretnih i kritičnih problema vezanih s održivim razvojem i upravljanjem ekosistemima. Ekohidrologija pokušava da razume, objasni i koristi veze između ekologije i hidrologije. Ona ujedinjuje hidrologiju ekološkog okruženja sa biologijom slatkih voda.

Štoviše, prepoznata je potencijalna opasnost od toga da bi jedna čvrsta definicija u početnoj fazi stvaranja nove naučne discipline mogla postati ograničenje za razvoj te multidisciplinarnе nauke. S druge strane, jasna definicija je neophodna jer ona znači i jasan identitet. Očigledno je da je za to ekohidrologiji potrebno dati određeno vreme pazeći na to da ona mora postati konstruktivna disciplina, a ne destruktivna verzija postojećih paradigmi i/ili akademskih disciplina (Wood i sur. 2007.). Da bi se postigao takav razvoj Hannah i sur. (2004.) navode sledećih pet osnovnih ciljeva kojima ekohidrologija treba težiti: 1) usredotočiti se na izučavanje prirode hidrološko-ekoloških interakcija s posebnim naglaskom na analize povratnih sprega; 2) raditi na razumevanju bazičnih procesa radije nego na jednostavnom objašnjavanju funkcionalnih (statističkih) veza unutar verovatnog lanca uzroka i posledica; 3) istraživanja moraju biti usredsređena na: a) kompletni raspon prirodnih i antropogenih sa vodom vezanih zavisnosti staništa i okruženja; b) izučavanje flore, faune i celovitih ekosistema; 4) potrebno je razmatrati interaktivne procese koji se javljaju u celovitom rasponu prostora i vremena ne zanemarujući paleohidrološka te paleoekološka stanovišta; 5) koristiti interdisciplinarnu prirodu filozofije istraživanja.

Bond (2003.) naglašava da je razvoj istraživačkih spojeva i veza između hidrologije i ekologije prepoznat kao ključni zadatak geonauka. Činjenica je da je u istoriji istraživanja koja pokušavaju integrisati dve ili više naučnih disciplina napredak dosta spor. Bez obzira na brojne i iskrene napore pojedine naučne discipline nastavljaju delovati samostalno. Razlog za to su njihove različite filozofije, konceptualni okviri, terminologije i eksperimentalni postupci (Hannah i sur. 2004.).

Harte (2002.) se zalaže za sintezu Newtonovih i Darwinovih naučnih pristupa. On je uveren da će takva sinteza ponuditi mogućnost progressa na dodirnom području između ekologije i fizike na kojem se sve intenzivnije javljaju kritični kako teoretski tako i praktični problemi u sistemu nauka o Zemlji. Harte (2002.) objašnjava svoje stavove na sledeći način: "Fizičari teže definisanju jednostavnih univerzalnih zakona. Ekolozi inzistiraju na složenim međuzavisnostima. Održiva budućnost naše planete vrlo verovatno će zahtevati pristup sa obe strane. Fizičari i ekolozi zasnivaju svoje koncepte na različitim intelektualnim tradicijama što je posledica različitih sistema vrednosti koje istovremeno pokušavaju ostvariti pojednostavljenja i univerzalnost. Kao teoretičar neposredno angažiran u studije ekologije i globalnih promena bio sam često svjedokom neučinkovitosti rješenja kao posledice postojanja takove dvostruke tradicije."

Rodriguez-Iturbe (2000.) je definisao ekohidrologiju kao nauka koja nastoji objasniti hidrološke mehanizme koji predstavljaju osnovicu ekoloških zakonitosti i procesa. Po njemu ekohidrologija povezuje područje hidrologije i ekologije i kreira nove jedinstvene principe izvedene iz koncepta prirodne selekcije. Eagleson (2002.) smatra da je veza između funkcionisanja i razvoja vegetacije i bilansa voda ključni problem kojim bi se trebalo da bavi ekohidrologija.

U hidrološke procese uključen je tok materije i energije (vode, rastvoreni nutrijenti, sedimenti, toplota, itd.) između različitih komponenti životne sredine. Prostorna struktura i vremenska dinamika putova i veza uvek je i neposredno uslovljena klimatskim činiocima te je prilagođena svojstvima sliva (Soulsby i sur. 2006.). Ova se veza odvija u različitim prostornim i vremenskim mjerilima. Činjenica da je ekstremno varijabilna uslovljena je da do danas njena uloga u razvoju ekosistem nije dovoljno shvaćena. Ove veze je posebno teško shvatiti u karstnim područjima zbog njihove ekstremne

površinske i podzemne kompleksnosti i međusobne povezanosti.

Interdisciplinarni istraživački naponi na objedinjavanju ekoloških aspekata vode s njenom fizičkom i socijalnom ulogom imaju dugu istoriju, a u zadnje su vreme intenzivirani i tretirani na nov način, upravo zahvaljujući pojavi koncepta ekohidrologije. Ključni interes ekohidrologije je da istraži kako procesi vezani s vodom, uključujući sve vrste, količine, njihovo vreme pojavljivanja i trajanja te putove vode - utiču na ekološke procese.

Zalewski (2002.) smatra da će ekohidrologija koristiti hidrološke i ekološke procese za održivo upravljanje vodnim resursima. Nuttle (2002.) ekohidrologiju smatra naučnom poddisciplinom koju dele ekološka i hidrološka nauka. Po njemu se ona bavi učincima hidroloških procesa na raspodelu, strukturu i funkciju ekosistema, ali i na učinke biotičkih procesa na elemente vodnog ciklusa.

Ekohidrologiju je moguće shvatiti i kao "neinženjersku" hidrologiju razvijenu iz hidrologije šuma, životnog okruženja, vlažnih prostora, krajolika, jezera, priobalnih područja itd. Njena kompromisna definicija, koja bi mogla biti prihvaćena od brojnih delova naučne zajednice, mogla bi biti sledeća: "Ekohidrologija je nauka koja integriše hidrološke procese sa dinamikom živih organizama u raznim prostornim i vremenskim merilima".

Ekohidrologija je u ranoj fazi formiranja. Upravo stoga ona pruža brojne naučne izazove i mogućnosti za uzbudljiv, teško predvidljiv i dinamičan razvoj. Ona ima potencijal koji omogućava naučnicima pronalaženje održivih i sa "prirodom prijateljskih" rešenja za brojne probleme vezane s kvalitetom vode, sušama, poplavama i zagađenjima. Karst kao specifični krajolik i životna sredina postavlja za potrebe svog razvoja i zaštite nove izazove pred ekohidrologiju. On zahtijeva specifične ekohidrološke pristupe, može se slobodno reći da on imperativno traži razvoj ekohidrologije karsta (Bonacci i sur. 2008.).

### **3. KARST, HIDROLOGIJA I/ILI HIDROGEOLOGIJA KARSTA**

Bonacci (2006.) naglašava da je prilikom izučavanja vodnih fenomena u karstu vrlo teško, a može biti i kontraproduktivno, striktno odvajati hidrologiju od hidrogeologije. Karst je vrsta terena izgrađena na

karbonatnim stenama i evaporitima. Snažno, u prostoru i vremenu promenjiva interakcija između hemijskih, fizičkih i bioloških procesa ima brojne geološke i geomorfološke posledice uključujući otapanje, taloženja, stabilizacije terena, itd.

Field (2002.) definiše karst kao teren generalno sastavljen od krečnjaka i dolomita u kojima je topografija pretežno formirana od rastvorljivih stena koje karakterišu ponori, ponornice, zatvorene i otvorene površinske depresije, podzemni drenažni sistemi i pećine. Široki raspon zatvorenih površinskih depresija, snažno razvijeni i dobro povezani podzemni drenažni sistem te neposrednanterakcija između cirkulacije podzemnih i površinskih voda tipični su za karstne terene. Zbog toga karst predstavlja prostor sa specifičnom hidrogeologijom i hidrologijom kao i krajolikom koji je nastao kao posledica visoke rastvorljivosti i snažno razvijene sekundarne poroznosti. Zbog velikog kapaciteta infiltracije tečenje po površini terena kao i stalni otvoreni vodotoci u karstnim terenima se javljaju retko i na samo određenim prostorima gde za površinsko tečenje postoje odgovarajući uvjeti.

Karbonatne stene su mnogo brže rastvorljive od ostalih vrsta stijena. Zbog toga su češće i neposrednije podložne brojnim geomorfološkim procesima. Različiti vidovi raspadanja i erozije na karbonatnim stenama utiču na brzo formiranje i preoblikovanje krajolika koji one formiraju. Bitni činilac koji kontroliše razvoj karstnih oblika predstavljaju mesta kroz koja voda može proći u unutrašnjost karstifikovane stenske mase. U tom procesu značajnu ulogu igraju gustina i brojnost pukotina i prslina, a naročito je važna uloga međuslojnih pukotina. Radi se o prostorima kroz koje voda najbrže i najčešće prodire sa površine u podzemlje karsta. Otapanje i vlaženje karbonatnih stena povećava mogućnost ostvarivanja povezanosti unutrašnjih i spoljašnjih prostora karstnog masiva čime se ujedno ostvaruju mogućnosti za intenziviranje bioloških kontakata. Pojave kontinuiteta i diskontinuiteta unutar karstnog podzemlja značajno utiču na njegov biološki sastav.

Različiti i često spektakularni površinski karstni oblici predstavljaju samo naznaku postojanja nepredvidivog bogatstva podzemnih karstnih oblika u koje spadaju karstni provodnici najrazličitijih dimenzija, jame, pećine, kao i pukotine i mikronske prslina. Međutim, treba naglasiti da se karstni oblici ispod površine terena javljaju i tamo gde površinski karstni oblici uopšte ne postoje ili su pokriveni slojem plodnog tla na kojem

raste bujna vegetacija. Atkinson (1986.) navodi da se u terenima izgrađenim od rastvorljivih stena neočekivane morfološke pojave mnogo češće javljaju nego u svim ostalim vrstama terena.

Karstifikacija (ili - okršavanje) predstavlja geološku karakteristiku bitnu za cirkulaciju i skladištenje vode. Ona može biti kvantitativno izražena gustoćom, učestalošću, dimenzijama i brojem svih vrsta karstnih pukotina (šupljine među česticama, pore, prsline, primarne, sekundarne i tercijarne pukotine, karstni provodnici, jame i pećine). Generalno je karstifikacija veća na površini te se smanjuje s dubinom (Milanović, P., 1981.). Međutim, neretko se različite vrste karstnih pukotina javljaju u različitim dubinama karstnog masiva. Uz to treba naglasiti da se unutar karstnog masiva neretko javljaju i blokovi krečnjaka i dolomita, a ponekad i drugih vrsta stena, različitih dimenzija u kojima nema pojave karstifikacije, tj. stena koje su nepropusne za vodu. U takvim strukturama voda se ne može ni akumulirati. Cirkulacija vode kroz njih potpuno je onemogućena ili je ekstremno usporena. Sva navedena svojstva i oblici karstifikacije značajno utiču i na razvoj i širenje karstnih podzemnih ekosistema, prvenstveno stoga jer takve strukture utiču na transport hraniva (nutrijenata) i bioloških organizama kroz karstno podzemlje. Pri tome se ne sme zanemariti činjenica da karstifikacija predstavlja vremenski kontinuiran i nezaustavljiv proces. Na brzinu njenog odvijanja utiču uobičajeni prirodni činioci, ali sve više i sve teže predvidivo, sve intenzivnije i sa sve težim posljedicama i intervencije koje čovjek vrši u karstnom okruženju.

Karstne površinske i podzemne oblike moguće je razmatrati i u kontekstu sistema cirkulacije vode po njegovoj površini i u njegovoj unutrašnjosti. Uspravno usmjereni karstni oblici sakupljaju i transportiraju vodu vrlo brzo sa površine u podzemlje gde ona može dospeti u podzemni karstni vodonosnik ili u podzemni karstni vodotok u kojem tečenje može biti pod pritiskom i sa slobodnim vodnim ogledalom. Cirkulacija vode po karstnom masivu i kroz njega značajno varira u različitim vrstama terena, prvenstveno zbog velikih vrednosti kapaciteta infiltracije i specifičnosti karstnih vodonosnika čija su svojstva bitno različita od svojstava vodonosnika formiranih u zrnatim sredinama ili drugim vrstama pukotinskih vodonosnika (Bonacci 2004.).

Cirkulacija podzemnih voda u karstnim vodonosnicima bitno se razlikuje od cirkulacije u nekarstnim vrstama vodonosnika. U karstu se voda neposredno ispod

površine, u epikarstnoj zoni, akumulira u mreži međusobno povezanih prostora nastalih rastvaranjem stenske mase. Iz ovih neretko povremenih i nevelikih vodonosnika voda prodire dublje u karstni masiv do karstnih kanala i podzemnih vodotoka. Odatle uspravnom i/ili vodoravnom cirkulacijom dopire do nivoa podzemne vode, tj. do stvarnih dubokih karstnih vodonosnika. Pri tome treba naglasiti da nivo voda u dubokim karstnim vodonosnicima može varirati vrlo naglo i u velikom rasponu do sto i više metara (Bonacci 1987.; 1995.). Hidraulička provodljivost karstnih vodonosnika formirana je pod neposrednim uticajem vode koja teče kroz njih. Rezultat toga su njena izrazito anizotropna svojstva. Karstni vodonosnici zbog svojih jedinstvenih hidroloških i hidrogeoloških svojstava izrazito su osjetljivi na zagađenja, pa su stoga vrlo ranjivi i ugroženi. Prethodnoj konstataciji treba dodati činjenica da unutar i oko njih obitavaju uglavnom retke i ugrožene vrste.

Karstni vodonosnici predstavljaju vrlo kompleksne sisteme koje je teško, a ponekad i nemoguće definisati, pa stoga i modelirati. Visoka heterogenost karstnih vodonosnika je razlog velikih poteškoća, često i nemogućnosti predviđanja smerova i vremena putovanja podzemne vode u njima, a sa njom i transporta zagađenja. Za različite nauke (hidrologiju, hidrogeologiju, geohemiju, geomorfologiju, hidrauliku, geografiju, geofiziku, speleologiju, biologiju, ekologiju itd.) karstni vodonosnici predstavljaju izazov nametnut stalnim i različitim međusobnim interakcijama (u prostoru i vremenu) tečenja, akumulisanja vode, formiranja krajolika, uticaja na životnu sredinu, itd. Svi procesi se odvijaju istovremeno kako u velikim provodnicima i pećinama, tako i u mikronskim pukotinama i porama.

Interakcija svih procesa na površini i ispod površine terena u karstu neposredna je i međusobno uslovljena. U karstnim ekohidrološkim istraživanjima osnovni problem predstavlja činjenica da je kretanje vode ispod površine izrazito heterogeno zbog različitih položaja, dimenzija, oblika i hrapavosti najrazličitijih vrsta karstnih provodnika. Prethodno navedeno utiče na brzine i količine tečenja vode kao i na procese akumulisanja vode u podzemlju, ali i na odvijanje bioloških procesa.

Površinska, a naročito podzemna ekološka sredina karsta obiluju velikim brojem staništa u kojima se odvijaju različiti hemijski i biološki procesi. Za biologe i ekologe karst predstavlja osjetljiv ekosistem koji pruža

utočište retkim i ugroženim vrstama. Za geohemičare njegova osnovna karakteristika je brzi transport zagađivača. Pri tome transport zagađivača uvek značajno (ali nažalost nedovoljno poznato) utiče na karstne podzemne i površinske ekosisteme.

Karstni vodonosnik predstavlja sistem trostruke poroznosti koji se sastoji od propusnosti: 1) matrice; 2) pukotina; i 3) provodnika (White, 2002.). Propusnost karstne matrice je formirana od kompleksa sitnih šupljina u malim fragmentima stene. Tvore je šupljine među česticama, kao i karstne pukotine mikronskih dimenzija. Pukotinska propusnost je formirana od mehanički stvorenih šupljina i šupljina između međuslojnih pukotina proširenih rastvaranjem stene. Propusnost provodnika predstavljena je velikim otvorima sličnim cevima. Njihove dimenzije variraju od 1 cm do nekoliko desetaka metara. U ovako kompleksnom sistemu pukotina postoje brojna i vrlo različita mikro, mezo i makro staništa i niše pogodne za život podzemnih akvatičnih i terestrijalnih vrsta. Ovome treba dodati da su oni u neposrednoj vezi s oscilacijama podzemne vode kao i prodiranjem vode s površine u karstno podzemlje.

Odnos između učestalosti, dimenzija i međusobne povezanosti karstnih pukotina bitna je za transport vode, hraniva i vrsta unutar karstnog podzemlja. Velike dimenzije sa visokom mogućnosti propuštanja vode imaju za posledicu ujednačenije tečenje kroz karstni masiv. U tom slučaju postojanje sitnih karstnih pukotina igra manje važnu ulogu u transportu vode. Provodnici predstavljaju karakteristične oblike koji se javljaju u karstnom vodonosniku. Oni predstavljaju privilegirane putove za transport podzemne vode. Tečenje u podzemnim karstnim provodnicima sličnije je tečenju vode po površini terena nego tečenju podzemne vode. To predstavlja jedan od osnovnih razloga zbog kojeg hidrologija karsta zahteva integrisanje koncepta površinskih i podzemnih voda.

Tečenje podzemnih voda u karstu generalno gledano je neprekinuto (Bonacci i Roje-Bonacci, 2000.). Međutim, brojni podzemni karstni oblici (pećine, jame, pukotine, provodnici, rasedi, a naročito pojava nepropusnih slojeva stena ili tla) snažno utiču na kontinuitet ponašanja karstnih vodonosnika. Često se dešava da se čini da one ne funkcioniše kao kontinuum unutar sliva. To je najočitije moguće zapaziti prilikom crpljenja velikih količina podzemne vode i nakon naglog padanja intenzivnih padavina. Tada pojedini dijelovi karstnog vodonosnika značajno različito reaguju na pobudu spolja.

Ključni razlozi jedinstvenosti karstnih vodonosnika, a istovremeno i njihove heterogenosti su brojni: 1) heterogeni i anizotropni površinski i podzemni morfološki karstni oblici; 2) postojanje dobro razvijenih, složenih, međusobno povezanih, dubokih podzemnih karstnih pukotina s različitim i promjenjivim dimenzijama čiji je položaj najčešće nepoznat; njihovu složenost dopunjuje postojanje nepropusnih slojeva; 3) snažna interakcija i međusobna uslovljenost između cirkulacije površinskih i podzemnih voda; 4) veliki raspon i brza oscilacija podzemnih voda (Bonacci, 1987; 1995); 5) snažna i neposredna veza između mesta ulaza (ponora) i izlaza (izvora) vode u karstu; 6) brzi, turbulentni transport podzemne vode kroz karstne provodnike i sporo, laminarno tečenje kroz sitne karstne pukotine i karstnu matricu; 7) prirodni endogenetski i egzogenetski procesi; 8) uticaj čovekom izrađenih građevina i delatnosti (brane, akumulacije, izgradnja autoputova, masovno crpljenje vode, rudarske aktivnosti, injektiranja, itd.) koje uzrokuju spore, ali i nagle promjene vodnog režima u karstu.

Ford i Williams (2007) su definirali sledeće tri zone cirkulacije vode u karstu: 1) nezasićena ili vadozna zona u kojoj dominira uspravna cirkulacija vode; 2) povremeno zasićena ili epifreatična zona; 3) freatična zona ili područje zasićeno vodom, tj. područje karstnog vodonosnika u kojem postoji tečenje u smjeru pada vodnog lica. S ekološke tačke gledišta uloga vadozne zone u koju je uključen i epikarstni sloj od ključnog je značenja. Vadozna zona tvori s karstnim vodonosnikom dvokomponentni sistem u kome se voda glavninom akumulira u uskim pukotinama unutar kojih prevladava difuzno i laminarno tečenje vode. S druge strane, glavina vode se prenosi kroz karstno podzemlje brzim, turbulentnim tečenjem kroz hemijskim rastvaranjem ili fizičkom erozijom proširene karstne provodnike koji najvećim delom leže u epifreatičnoj zoni.

Hemijski sastav vode u karstu igra ključnu ulogu u procesima otapanja i taloženja, a bitno utiče i na odvijanje bioloških procesa. Praćenje promena hemijskih parametara vode tokom vremena neophodno je upoređivati s hidrogramima izvora i nivoima podzemne vode. Na taj način moguće je definisati tačno vreme putovanja pojedinog hemijskog elementa ili spoja kroz podzemlje. Voda koja se kroz podzemlje kreće difuzno sporim, laminarnim tečenjem dugo boravi u podzemlju, a na izvorima pokazuje relativno malu varijaciju hemijskog sastava tokom vremena. Nasuprot tome, voda koja se kreće kroz velike karstne provodnike

kratkotrajno boravi u karstnom podzemlju (tek nekoliko sati ili dana) te naglo menja svoj hemijski sastav. Langmuir (1971.) to objašnjava činjenicom da u drugom navedenom slučaju voda prekratko boravi u podzemlju da bi imala dovoljno vremena da uspostavi hemijsku ravnotežu s podzemnim karstnim okruženjem. Kao posledica toga voda koja na izvoru izbija iz sistema podzemnih karstnih provodnika pokazuje velike varijacije u svom hemijskom sastavu (Raesi i sur. 2007.). U zavisnosti od razvoja pukotinskog sistema na slici 1 su prikazani izlazni hidrogrami protoka i tvrdoće vode kod tri različite vrste karstnih izvora (Bonacci, 1993). Već ovaj relativno jednostavan grafički prikaz jasno ukazuje na složenost i promjenjivost interaktivnih odnosa karstnog okruženja, svojstava vode i mogućih staništa u različitim uvjetima karstnih terena. Kad bi se tome dodali podaci o promjenjivosti nivoa i kvaliteta podzemnih voda u prostoru i vremenu - dobila bi se još složenija, ali realnosti bliža slika o međuzavisnosti hidroloških i ekoloških procesa u karstu. Pred ekohidrologijom karsta stoje doista veliki izazovi.

Sami procesi tečenja vode u karstu jednostavni su i pokoravaju se opšte poznatim i relativno jednostavnim principima hidraulike. Međutim, nepoznata struktura te promjenjive dimenzije i varijabilna hrapavost mreže karstnih pukotina, prslina, kaverni, kanala, pećina i jama, kao i njihovo isprepletanje sa za vodu nepropusnim blokovima stena otežavaju, a najčešće u celosti onemogućavaju pouzdano određivanje podzemnih putova vode kao i svojstava karstnih vodonosnika.

Gotovo da se može reći da u karstu nisu nemoguća bilo kakva iznenađenja u smislu komuniciranja voda u prostoru i vremenu. Ova činjenica bitno otežava donošenje pouzdanih odluka vezanih sa gradnjom bilo koje vrste objekata na karstu i sa zaštitom karstnih vodnih resursa, a ujedno zahteva obimnije i skuplje istražne radove. Najgore od svega je da ni tako skupi i dugotrajni radovi ne garantuju sigurno određivanje svih mogućih veza, kao i načina zaštite. One se često menjaju tokom vremena u zavisnosti od stanja vodnosti, prvenstveno od nivoa podzemnih voda. Dodatne probleme mogu stvoriti veliki radovi, pre svega masovni iskopi, kao i injektiranja, a posebno miniranja, koji mogu uzrokovati trenutnu promenu odnosa cirkulacije vode u karstu, a time i promenu položaja vododelnica i izmenu slivnih površina. Poznato je da potresi, dakle prirodne katastrofe, mogu uzrokovati nagle promjene u procesima cirkulacije vode u karstnim regijama (Bonacci 2004.).

#### 4. BIOLOŠKI ZNAČAJ I POSEBNOSTI KARSTA

Većina karstnih predela nastala je kao posledica zajedničkog, istovremenog, složenog i međuzavisnog delovanja biotičkih i abiotičkih procesa (Tabaroši, 2002.). Karstni oblici koji su neposredan produkt organskih procesa nazivaju se "fitokarst" i/ili "biokarst". Ovi su pojmovi prvi put u literaturi spomenuti vezano sa izučavanjem ekstremno nazubljenih krešnjačkih uzvisina na Kajmanskom ostrvlju (Folk i sar., 1973). Isti termin je kasnije korišten za različite manje ili više slične karstne oblike. Pojam biokarsta se odnosi na karstne oblike nastale erozijom i taloženjem producirane neposrednim biološkim aktivnostima (Viles, 1984.). Učinak živih organizama na geomorfologiju karsta duboko je vezan s ekosistemom. Kao takav on ima rasprostranjen, intenzivan, različit i fundamentalni značaj (Tabaroši, 2002.). Razvoj celokupnog krajolika čini se da je biološki kontrolisan preko međusobnih odnosa vegetacijskog pokrova, erozije i količina rastvaranja i taloženja (Hupp i sur. 1995.). Barrany-Kevei (1992.) sugerise da je proces karstifikacije u suštini biogenog karaktera.

Rouch (1977.) je bio prvi koji je formulisao da karstni sliv predstavlja jasno definisan ekosistem sa merljivim površinskim ulazima kroz ponore i putem infiltracije padavina, kao i sa izlazima kroz razne oblike stalnih i povremenih izvora. On je prvi započeo meriti i biološke parametre ulaza i izlaza karstnog ekosistema. Takav pristup se dokazao kao način pouzdane procene dinamike i raznolikosti lanca ishrane podzemnih akvatičnih zajednica karstnih ekosistema.

Zdrav i raznolik karstni ekosistem pruža važne pogodnosti i usluge koje omogućavaju kako njegov vlastiti održivi razvoj, tako i održivi razvoj šireg okruženja. Usluge koje svaki ekosistem pruža predstavljaju blagodat za ljude koji žive u njemu ili ga povremeno koriste. Funkcije karstnih ekosistema su brojne. One pružaju podršku ciklusu i transporta nutrijenata, formiranju tla, primarnoj produkciji, itd. Karstni ekosistemi sudeluju u snabdevanju hranom i zdravom slatkom vodom šireg okruženja. Utiču na reguliranje klime, ublažavanje poplava, pročišćavanje vode, reguliranje oboljenja (epidemija) itd. Osim prethodno navedenog karstni ekosistemi imaju značajnu kulturološku funkciju koju je moguće izraziti estetskim, duhovnim, obrazovnim i rekreacijskim funkcijama (WMO 2006.). Mnoge od tih funkcija i usluga međusobno su povezane, a posledica su bioloških



aktivnosti različitih skupina organizama koje čine taj ekosistem, pri čemu je uloga mikroorganizama naglašena (Herman i sar. 2001.).

Karstni ekosistemi su osjetljivi na promjene koje se zbivaju u okruženju. Značaj pružanja podrške njihovoj biološkoj raznolikosti nije samo u zaštiti retkih i ugroženih vrsta i prekrasnog okruženja. Neophodno je shvatiti kako akvatični i terestrijalni ekosistemi međusobno interaktivno funkcionišu unutar vrlo složenog, ranjivog te u prostoru i vremenu ekstremno dinamičnog karstnog sistema. Uloga ekohidrologije karsta u tom bi procesu trebalo da bude od posebnog značaja.

Analiza karstnih ekosistema trebalo bi da bude skoncentrisana na tok energije i ciklus ishrane kroz biotičke i abiotičke komponente sistema. Postoje značajne hidrološke, hemijske i biološke razlike pojedinim zonama - epikarstnoj s vadoznom, epifreatičnoj i freatičnoj, ali i unutar njih samih. Gibert i sar. (1994.) napominju da se svaki karstni ekosistem bitno diferencira prvenstveno po značajnim razlikama u njegovoj fauni. Međutim, treba istaknuti da fauna sama po sebi ne uzrokuje razlike. Bitan razlog razlika leži u bogatstvu, pojavi i kretanju vode unutar karstnog podzemlja. Karstno podzemlje snažno je heterogeno po svojim morfološkim oblicima (pećinama i karstnim provodnicima, pre svih), ali i položajima uspravnih pukotina kroz koje voda raznim brzinama, u raznim količinama i različitog hemijskog sastava prodire kroz nezasićenu zonu da nivoa podzemne vode ili u podzemne vodotoke i jezera.

Nedostatak (u suštini - nepostojanje) svetlosti u karstnom podzemlju, posebno u pećinama sprečava mogućnost fotosinteze. Biljke, koje su osnovni izvor hrane na površini Zemlje ne obitavaju u karstnom podzemlju (Culver, 2001.). Pećinske životinje generalno zavise od hrane koja slučajno uđe s površine u podzemlje karsta. U pećinama postoje dva izvora organske materije: 1) uspravno perkolirana voda iz epikarstne zone; i 2) voda iz ponornica. U oba slučaja otopljeni organski ugljenik bitni je izvor energije. U mnoge pećine osim njega se unose krupni komadi organske materije uključujući lišće, grančice, životinjske ostatke (Simon i Benfield, 2001.), i posebno često izmet šišmiša (guano) (Graening i Brown, 2003.). Simon i sar. (2007.) smatraju da otopljeni organski ugljenik predstavlja najvažniji i bazični element u lancu ishrane podzemnih karstnih životinja. U nekim tropskim pećinama na Havajima (SAD) najveća količina hraniva

ulazi u karstno podzemlje kroz korijenje biljaka koje je prodrlo kroz krovni deo pećina. U pećini Movile (Rumunija) žive bakterije koje se snabdijevaju energijom iz minerala sumpora i gvožđa (Sarbu i sar. 1996.).

U sedimentima koji se transportuju vodom kroz karstno podzemlje ima mnogo hraniva bitnog za preživljavanje vrsta koje obitavaju u tim prostorima. Zbog postojanja prostranih provodnika i velikih brzina kretanja vode kroz karstno podzemlje se pronosi znatno više nanosa nego kod ostalih vrsta podzemnih prostora. Koncentracija nanosa naglo se povećava pod uticajem intenzivnih padavina koje uzrokuju naglo povećanje protoka. Sa povećanim protokom dolazi do porasta pronosa različitih vrsta čestica u kojima se osim korisnih supstanci mogu nalaziti opasne i otrovni sadržaji kao što su mikrobi, zagađivači i bakterije. Transport sedimenata potencijalno može pokrenuti iz mirovanja teške metale i otrovne supstance nataložene u karstnom vodonosniku pre mnogo vremena. Čestice nanosa nemaju samo mogućnost prenošenja zagađivača već i same mogu biti zagađivači (na primer, ako se radi o mikrobima).

## 5. STANIŠTA U KARSTU

Podzemni akvatični ekosistemi sadrže veliki broja staništa kao što su podzemni vodotoci, epikarstno područje, podzemni vodonosnici, karstni izvori, staništa i niše u raznim vrstama karstnih pukotina i prslina, itd. U vadoznoj zoni najčešća staništa se nalaze u epikarstu, prostorima kroz koje voda perkolira, te na taj način dospeva u jezerca koja se formiraju od vode koja se proteče sa površine. U epifreatičnoj zoni najbogatija staništa se nalaze u podzemnim vodotocima dok se u freatičnoj zoni prvenstveno nalaze u podzemnim jezerima.

Howarth (1983.) smatra da su staništa u karstu strogo podijeljena u određene pojaseve. On spominje slijedećih pet kopnenih zona: 1) ulaz; 2) zonu sumraka (sivu zonu); 3) prelazno područje; 4) duboko područje; 5) područje u kome vazduh stagnira. U ulaznom području dolazi do kontakta između podzemne i površinske sredine. Zona sumraka se prostire od granice na kojoj rastu biljke do područja potpunog mraka. Prelazno područje je u potpunom mraku, ali je pod uticajem noćnih suvih vetrova uzrokovanih ulaskom hladnih vetrova u podzemne karstne prostore. Duboko područje Culver (2001.) naziva mračnom zonom. Njena je osnovna karakteristika potpuni mrak i dugotrajno prisutnost vlagom zasićene atmosfere. Područje u kojem

vazduh stagnira leži ispod dubokog područja. U njemu se javljaju vrlo spore promjene vazduha, a do njega retko dospeva vazduh s površine terena (Howarth 2004.).

Treba napomenuti da u literaturi postoji mnogo manje ili više različitih klasifikacija podzemnih karstnih staništa. Jones i sar. (2003.) u staništa ubrajaju i šupljine u tlu, suve prostore na padinama, područja ispod podzemnih vodotoka kao i primarne pukotine u stenskoj matrici. Može se očekivati da će razvoj koncepta ekohidrologije pomoći formiranju konzistentne i usuglašene klasifikacije podzemnih karstnih staništa.

Osiguravanje stalne povezanosti između različitih staništa bitno je za obezbeđivanje životnih potreba organizama u životnoj sredini i za pružanje podrške nizu bioloških, fizičkih i hemijskih procesa koji kontrolišu strukturu i funkcionisanje organizama koji žive u ovim prostorima.

U nastavku će biti detaljnije opisana svojstva sledeća tri najučestalija i značajna podzemna krška staništa: 1) epikarstne zone; 2) špilje; i 3) jezeraca formiranih vodom koja se proceđuje sa površine, tako da kaplje sa svoda pećina ili velikih karstnih provodnika. Razumljivo je da postoje i druga važna podzemna krška staništa, ali opseg članka ne dozvoljava da se sva ona opišu.

Epikarst ("epikarst" ili "subcutaneous zone") predstavlja granično područje između površine terena i karstnog masiva (Williams, 1983.). Bakalowicz (2004.) ga je nazvao "kožom karsta". Analogan sloj postoji i u nekarstnim terenima, ali su mu svojstva znatno različita, prvenstveno zbog nepostojanja uticaja rastvaranja, tipičnog za karstne terene. Radi se o području u koje prodire vazduh sa površine i koje nije zasićeno vodom. Epikarst raspolaže značajnim akumulacionim kapacitetom za vodu koja se unutar njega pretežno kreće uspravno prema epifreatičnoj zoni. Posle obilnih padavina značajni deo voda se unutar epikrša kreće lateralno. U hidrološkom smislu epikarst djeluje kao spužva sakupljajući vodu tokom vlažnog razdoblja, a ispuštajući je tokom suša. Zbog navedene osobine njegova uloga u pružanju podrške održivom razvoj karstnog ekološkog okruženja je neprocenjiva. Ova zona predstavlja prostran rezervoar u kojem voda može biti akumulisana određen period vremena što je vrlo važno za preživljavanje brojnih vrsta koje žive u njoj. Zambo (2004.) smatra da epikarst predstavlja ključni podsistem svakog karstnog ekološkog sistema.

Epikarst se nalazi praktično u svim vrstama karsta, u golom kao i u pokrivenom. Ford i Williams (2007.)

navode da je epikarst prosječno dubok između 3 i 10 m, a može doseći i do 30 m. Karstni pukotinski oblici (pukotine, prsline, provodnici pa i pećine) snažnije su razvijeni, tj. javljaju se gušće te su brojniji unutar ove zone. Deo njih, često i pretežni, ispunjen je konsolidovanim plodnim tlom, obično crvenicom. Temperatura epikarsta niža je od temperature vazduha leti, a viša tokom zimskog razdoblja. Koncentracija vode koja se kreće epikarstnom zonom kroz prostrane provodnike jako varira tokom vremena. Voda koja dotječe iz sitnih pukotina je manja po količini, ali ima jednolikiju koncentraciju karbonata (Zambo 2004.).

Pipan (2005.) i Pipan i Culver (2007.) su pokazali da u epikarstnoj zoni postoji izvanredno bogata akvatična fauna. Epikarst je zanimljiv za biologe zbog svog biološkog bogatstva i raznolikosti. Istovremeno on predstavlja izvor ulaza organske materije u karstno podzemlje, ali i mesto susreta površinske i podzemne faune (Pipan i Culver, 2007.).

Jones i sar. (2003.) su definisali pećine kao deo međusobno kompleksno povezanih podzemnih šupljina različitih dimenzija koje tvore podzemno okruženje. Kombinacija mikro i makro šupljina predstavlja stanište za jedinstvene podzemne karstne organizme, a ujedno služi i kao put za transport vode i hrana.

Pećinski ekosistemi (akvatični i terestrijalni) predstavljaju otvorene sisteme koji se zasnivaju na transportu organske materije sa površine - kao osnovne energetske baze sistema. Ovaj pogled na pećinske ekosisteme ističe snažnu vezu između površinskog i podzemnog ekološkog okruženja u uslovima karsta. Ujedno, taj pristup ukazuje na potencijalne negativne antropogene promene koje se sa površine brzo i neposredno mogu preneti u podzemlje. Mnoge od vrsti koje prebivaju u pećinama vrlo su osjetljive na promene životne sredine. Zajednice pećinskih životinja mogu biti okarakterisane u odnosu na ponašanje u različitim uslovima okruženja. Na taj način one mogu biti tretirane kao barometar degradacije ekološkog okruženja u celom karstnom sistemu.

Generalno, životne zajednice u pojedinim pećinama nisu posebno raznolike. Culver i Sket (2000.) izveštavaju o postojanju samo 20 pećina u kojima obitava više od 20 isključivo pećinskih akvatičnih i terestrijalnih vrsta. Pri tome samo u šest od njih živi više od 20 pećinskih terestrijalnih vrsta. Svih šest posebne su po svojoj veličini, dubini i složenosti (Mamutska pećina u SAD, pećinski sistem Postojna-

Planina u Sloveniji, pećina Vjetrenica u Bosni i Hercegovini) ili po obilju izvora hrane (Movile pećina u Rumuniji, Bayliss pećina u Australiji, Gua Kalling-Towakkalak pećinski sistem u Indoneziji). Izgleda da brojnost staništa i obilje hraniva daju veću mogućnost za odvajanje vrsti u niše i koegzistenciju među vrstama.

Culver i Holsinger (1992.) su procenili da na Zemlji, isključivo u pećinama, obitava između 20.000 i 100.000 različitih životinjskih vrsta. Mnoge od njih su ograničene na samo jednu pećinu ili na skupinu pećina koje su međusobno povezane. Ujedno, pomenuti autori smatraju da oko jedna trećina od njih pripada akvatičnim vrstama.

Jezerca formirana na dnu pećina ili velikih karstnih provodnika nastala prokapavanjem vode sa površine kroz pećinske svodove nalaze se u fosilnim i delovima nezasićene zone. Po sastavu vrsta koje u njima obitavaju međusobno se jako razlikuju. Pune se vodom koja prokapava sa zidova ili curi neposredno iz prokapnika ili procednica formiranih na svodovima velikih karstnih šupljina (Pipan, 2005.). Postoje stalni, ali i povremeni prokapnici. Kroz ove druge voda procuruje samo tokom padavina i kratko vreme nakon prestanka.

Oborine pale na površinu sliva, vlaga u tlu, pokrivenost i stanje vegetacije kao i temperatura vazduha na slivu kontrolišu prihranjivanje vlagom i nutrijentima pećina i karstnih provodnika kroz procednice ili prokapnike. Procednice ne reaguju na svaku palu kišu. Posle dugotrajnih sušnih razdoblja, zavisno od temperature vazduha i stanja vegetacije, voda će uspeti da prodre sa površine terena do svoda pećine ili karstnog provodnika samo ako je palo više od 50 mm padavina tokom oko 24 sata. Tokom vlažnog razdoblja dovoljno je da padne i oko 10 mm kiše da bi se ostvarilo proceđivanje vode s površine terena u velike karstne šupljine (Kogovšek i Habič, 1980.; Kogovšek, 1990.; Baker i Brundson, 2003.; McDonald i Drysdale, 2007.). Pri tome se hemijski sastav vode koja je prodrila s površine menja u zavisnosti od stanja vegetacije, sezone unutar godine, intenziteta i količine padavina, itd. Prethodno navedeno ukazuje na značajnu ulogu veličine kapaciteta akumulisanja vode unutar epikarstne zone kao dela nezasićenog područja karsta (Williams 1983.).

Jezerca koja u karstnom podzemlju predstavljaju značajna staništa omogućavajući život brojnim životinjskim vrstama mogu biti međusobno odvojena ili povezana, što zavisi od morfoloških i hidroloških uslova koji se menjaju tokom vremena. Količina i kvalitet vode

koja prihranjuje jezerca neposredno utiče na sastav, raznovrsnost i brojnost podzemne faune koja u njima obitava. Pipan (2005.) je definisala sledeće četiri vrste jezeraca: 1) jezerca formirana na vrhovima stalagmita punjena vodom neposredno iz procednica koje se nalaze na stropu; 2) jezerca formirana u stalnim malim depresijama na dnu karstne šupljine ili stalagmita; 3) jezerca formirana u depresijama formiranim u glini; 4) jezerca formirana u depresijama u kalcitima. Još uvijek su otvorena pitanja da li vrste koje obitavaju u njima preživljavaju bez seljenja (napuštanja ovih prostora) te da li bi u slučaju koliko dugotrajnog nedostatka padavina one mogle preživjeti.

## 6. UTICAJ POPLAVA NA EKOSISTEME KARSTA

Ekstremna hidrološka stanja (suše i poplave) sa stanovišta biologije uglavnom se tretiraju kao uzroci značajnih gubitaka individua pojedinih vrsta. U području karsta poplave imaju specifična svojstva koja uzrokuju drugačije reakcije okruženja. Razlog tome je prvenstveno u visokoj interakciji kretanja i skladištenja podzemnih i površinskih voda, te u posebnosti položaja i oblika staništa i vrsta koje obitavaju u karstu.

Unutar karstnih sistema, kao uostalom i u svakom drugom okruženju, poplave predstavlja prirodni odgovor sistema na naglo narasle količine voda uzrokovane prvenstveno velikim količinama padavina i/ili naglim otapanjem snega. Poplave predstavljaju jednu od najdramatičnijih interakcija između ljudi i okruženja. Tokom istorije pa sve do današnjih vremena poplave su bile i ostale neotuđivi deo sudbine ljudi i prirode (Smith i Ward, 1998.).

Ljudsko društvo uglavnom na poplave gleda kao na katastrofe koje ljudima i životnoj sredini donose velike štete. U stvarnosti poplave predstavljaju integralni pa prema tome i neizbežni deo prirode koji igra ključnu ulogu u funkcioniranju ekosistema, pružajući bitnu podršku njihovom održivom razvoju. Istovremeno dok razara i plavi voda tokom poplava donosi brojne dobrobiti okruženju. Pre svega pruža podršku biološkoj raznolikosti i povećava plodnost tla. Poplave uzrokuju izmenu materije i organizama među staništima, a igraju i ključnu ulogu u određivanju stupnja biološke produktivnosti i raznolikosti. Ovi su procesi od posebnog značaja za karstna okruženja u kome poplave uzrokuju snažne i brze izmene površinskih i podzemnih procesa bitnih za preživljavanje i razvoj različitih vrsta.

Hawes (1939.) napominje da se pećine često smatraju životinjskim staništima u kojima vladaju najstabilniji klimatski uslovi kao na pr. niska i nepromjenjiva temperatura vazduha, stalna i visoka zasićenost vlagom i stalni mrak. Međutim, on odmah opovrgava to nepravilno, ali među laicima uvriježeno, mišljenje. Poplave karstnog podzemlja, a sa njim i pećina, javljaju se redovno svake godine ili povremeno u svim regijama karsta na Zemlji. One značajno utiču na vrste koje obitavaju u tim prostorima. Čini se da je podzemna karstna fauna kao i njena staništa regularno (minimalno jednom godišnje) ili neregularno izložena stresu koji uzrokuju poplave. Prema tome životna sredina pećina i karstno podzemlje nisu nepromjenjivi kako se to čini na prvi pogled. Kako se život u njima održao milijunima godina očito je da su se vrste koje žive u podzemlju karsta (osobito u pećinama) navikle na poplave te od njih imaju i značajne koristi.

Hawes (1939.) ističe značaj poplava u karstu za funkcionisanje podzemne životne sredine. Poplave služe kao posrednik za pouzdano i obilno snabdevanje karstnog podzemlja hranivom i njegovu pravilnu raspodjelu kroz ovaj složeni prostor koji često liči na lavirint. Kao mehanički proces poplave unose vrste sa površine u podzemlje podstičući na taj način kolonizaciju karstnog podzemlja. Hawes (1939.) zaključuje da poplave kao snažne periodične pojave imaju značajne ekološke učinke. Recesija vode tokom sušnih razdoblja stvara velike probleme za životinjske vrste koje žive izolovane u malim jezerima ili podzemlju. Prenoseći životinje iz jedne u drugu pećinu poplave vrše ulogu lokalne preraspodjele unutar karstnog podzemlja (Hawes, 1939.).

Hawes (1939.) daje primjer moguće kolonizacije karstnog podzemlja Popovog polja u slivu Trebišnjice (Bosna i Hercegovina). Riba *Phoxinellus ghetaldii* koja živi u tom prostoru provodi većinu svog životnog veka u podzemlju. Poplave koje se redovno javljaju tokom jeseni (većinom u oktobru i novembru) izbacuju iz karstnog podzemlja na površinu u tok reke Trebišnjice velike količine ove ribe. Mreštenje se obavlja na površini. Mlade ribe provedu u otvorenom vodotoku jednu godinu dok se njihovi roditelji vraćaju natrag u karstno podzemlje. Nakon sledeće poplave mlade se ribe vraćaju u podzemlje. Oči *Phoxinellus ghetaldii* su normalne, ali ribe pokazuju tendenciju smanjivanja veličine što predstavlja značajno svojstvo pećinskih vrsta riba. Hawes (1939.) iznosi pretpostavku da se možda u ovom slučaju dešava proces rane kolonizacije pećina s ribom *Phoxinellus ghetaldii*. Ako se to stvarno

zbiva tada bi poplave trebale biti odgovorne za taj proces. Tako je to bilo pred sedamdesetak godina. Danas je situacija znatno drugačija. Razlog je izgradnja složenog i vrlo velikog hidrotehničkog sistema koji je značajno promijenio hidrološki i hidrogeološki režim u široj regiji te time značajno utjecao na intenzitet prirodnih poplava. Kako ekološki procesi u ovom prostoru nisu sistemski praćeni, stvarne posledice spomenute izgradnje na razvoj ekosistema, pa ni na procese vezane s ribom *Phoxinellus ghetaldii* nažalost nisu poznate.

## 7. ZAKLJUČCI

Karstni tereni sve se više i gušće naseljavaju. Njihove površinske i podzemne vode sve su ugroženije i zagađenije. Uz njih su sve ugroženiji i svi karstni ekosistemi kako oni površinski, tako i oni podzemni. Generalno se može zaključiti da je karst još uvek slabo izučen, znatno slabije od ostalih vrsta životne sredine. Zbog svega prethodno navedenog razvoj ekohidrologije karsta nužan je da bi se shvatila sva složenost problematike kao i opasnosti koje prete ovim vrednim prostorima s ciljem nalaženja konkretnih rešenja za njegov održivi razvoj.

Karstni sistemi pokazuju ekstremnu heterogenost i promjenjivost geoloških, morfoloških, hidrogeoloških, hidroloških, hidrauličkih, bioloških, ekoloških i drugih parametara u prostoru i vremenu. Tako složeni sistemi traže istinski nov, interdisciplinarni i multidisciplinarni pristup. Definitivno je uočeno da sadašnji, a još više budući razvoj može biti osiguran jedino u skladu sa zaštitom okruženja. Da bi se i u praksi mogli ostvariti visoko vredni ciljevi održivog razvoja neophodno je promeniti postojeće prevladavajuće shvaćanje prirodnog ekološkog okruženja kao nečega što je čovjeku dano na apsolutno korištenje. U uslovima karsta posebno je važno shvatiti interakciju podzemnih i površinskih voda te njihov uticaj na površinske i podzemne biološke procese.

Problemi s kvalitetom vode u karstnim regijama značajno se pogoršavaju usled pojave tačkastih, ali i površinskih izvora zagađenja. Osnovni činioци koji negativno utiču na podzemne ekosisteme su: 1) nekontroliran uticaj ljudskih djelatnosti na režim voda; 2) zagađivanje voda; 3) neodrživa poljoprivreda i šumarstvo; 4) masovni turizam koncentrisan na nekim područjima; 5) nedostatak zakonodavstva; 6) nepostojanje podataka o vrstama i raspodjeli faune i staništa; 6) nedovoljna briga o zaštiti biološke

raznolikosti. Razvoj ekohidrologije karsta mogao bi pomoći u rešavanju nekih od prethodno navedenih problema. Ekohidrologija karsta trebalo bi da usmeri svoje naučne istraživačke napore na izučavanje kritičnih područja u koja spadaju: epikarst, pećine, podzemni vodotoci i karstni izvori.

Preživljavanje i razvoj karstnih ekosistema zavise prvenstveno od ispravne zaštite i upravljanja pećinama i drugim velikim karstnim šupljinama kao i okolnim prostorima. Razvoj novog konceptualnog okvira - nazvanog ekohidrologijom karsta - treba da odigra aktivnu i važnu ulogu u održivom razvoju karstnih terena. Ekohidrologija karsta treba da pomogne da se shvate i objasne osetljivosti različitih delova karstne sredine, njihovih staništa i vrsti koje tu obitavaju. Posebna pažnja treba da bude usmerena na analizu stresnih stanja koje izazivaju malovodna razdoblja i poplave na karstne ekosustave.

Za razumevanje promena faune u pećinama neophodan je kontinuirani monitoring najmanje sledećih ekoloških faktora: temperature vazduha, vlage vazduha, vlažnosti tla, količine vode koja ulazi sa površine, ulaza nutrijenata, kvalitete vode koja ulazi u sistem, itd. Fauna u pećinama menja se tokom sezona godine kao odgovor na promenu klime. Kritično ugrožavanje pećina i njihovih ekosistema preti od neodrživog korištenja zemljišta i zagađenja vode. Zaštita podzemne akvatične faune zahteva zaštitu površinskih voda od zagađenja i preteranog korištenja. Generalno se može reći da u područjima karsta zaštita podzemnog ekološkog okruženja zahtijeva veliku pažnju javnosti, mnogo veću nego u drugim vrstama terena. Ekohidrologija karsta trebalo bi da bude u stanju da odgovori na brojna značajna pitanja vezana sa interakcijom hidrologije karsta i ekologije karsta. Može se očekivati da će ova sinteza ekoloških i hidroloških pristupa unaprediti progres u razumevanju karstne životne sredine. Na taj način ostvariće se doprinos ne samo razvoju koncepta ekohidrologije karsta već i razvoju hidrologije i ekologije.

Ekohidrologiju karsta treba shvatiti kao naučnu disciplinu koja pokušava da zajednički tretira ekološke i hidrološke procese u prostorima karsta. Ekohidrolozi karsta bi morali da studiraju učinke hidroloških i hidrogeoloških procesa na raspodelu, sastav i funkcije specifičnih i ranjivih karstnih ekosistema kao i učinke biotičkih procesa na sve komponente hidrološkog ciklusa. Karstni ekohidrološki pristup znači integralno studiranje karsta u opštem ekološkom, biološkom,

hidrološkom, hidrogeološkom, geomorfološkom i geohemijskom kontekstu. Zajednički rad na razvoju ekohidrologije karsta unosi novu i obećavajuću perspektivu za zajednički razvoj ekologije i hidrologije karsta.

Savremena praksa je definitivno pokazala da je izgradnja apsolutno svih vrsta objekata na području karsta može uzrokovati vrlo dugoročne i izrazito negativne posledice na ranjive karstne ekosisteme. Posebna opasnost za podzemne karstne ekosisteme - o kojoj se do sada nije vodila gotovo nikakva briga - su masovna injektiranja. Ekohidrologija karsta mora da izučiti taj fenomen i da da prave teoretske, ali i praktične odgovore.

Uz ekohidrologiju karsta velike se nade polažu i u primenu tzv. ekološkog inženjeringa (Bonacci, 2003.) kao praktične i delotvorne mogućnosti prevladavanja i ublažavanja sve češćih sukoba između čovjekom građenih struktura sa životnom sredinom i vodom kao njegovim bitnim i najdinamičnijim sastavnim delom. Ekološki inženjering predstavlja planiranje usklađivanja aktivnosti ljudskog društva sa životnom sredinom - na obostranu korist. Iz same se definicije uočava da je reč o interdisciplinarnoj naučnoj i stručnoj grani u kojoj se očekuje aktivno delovanje i sinergija brojnih naučnih disciplina, skupina, pojedinaca, itd. Ekološki inženjering označava strategiju saradnje sa prirodom. Praktična primena ove strategije trebala bi da osigura koristi, ili barem da na najmanju meru svede štete svim učesnicima u prirodnim i društvenim procesima sa posebnim uvažavanjem zahteva zaštite životne sredine. Doprinos ekohidrologije karsta ekološkom inženjeringu trebao bi biti posebno važan.

Termin inženjering označava projektovanje, izgradnju, stavljanje u funkciju nekog sistema i upravljanje istim. Pridev ekološki znači da se inženjering odnosi na međusobnu zavisnost i uticaje živih organizama i njihovog živog i neživog okruženja. Ekološki inženjering se značajno razlikuje od konvencionalnog. Osnovna razlika je u tome što se konvencionalni inženjering odnosi prvenstveno na procese kojima upravlja čovek, a koji se zbivaju u strukturama kreiranim od čoveka i pokretanim energijom koju im dostavlja čovek. Nasuprot tome, ekološki inženjering pokušava da što je više moguće koristi prirodne procese koji se zbivaju u prirodnoj sredini tla i vode, tj. procese koji su prevashodno pokretani prirodnom energijom (energija sunca, vetra, vode, gravitacije, itd.). Ekološki inženjering ne ignoriše niti se suprotstavlja prirodnim

procesima i silama. On pokušava da što je moguće bolje "sarađuje" sa prirodom, kako bi se što delotvornije i bezbolnije ispunili ciljevi nekog antropogenog zahvata u okruženju. On prirodi, a prvenstveno biljnim i životinjskim zajednicama prepušta obavljanje određenih poslova.

Nema sumnje da postoji preklapanje između ekološkog i konvencionalnog inženjeringa. Čovjek je i do sada tokom ostvarivanja svojih zamisli primjenjivao, manje ili više svesno, brojna rešenja koja spadaju u područje ekološkog inženjeringa. U poslednjih nekoliko decenija o tome se sistematski vodi računa. Razvija se teorija koja je zasnovana na istovremenom korištenju naučnih principa ekologije i inženjerstva. Njen je osnovni zadatak naučno objašnjavanje uticaja inženjerskih konstrukcija na ekosisteme. Time se stvaraju preduslovi za oblikovanje novih standarda i pouzdanih metoda projektiranja i građenja koji će omogućiti skladno funkcioniranje ekoloških i inženjerskih sistema. Može se očekivati da će istraživanja koja se danas vrlo intenzivno provode - rezultirati brojnim i delotvornim praktičnim rešenjima. Realno je pretpostaviti da ekohidrologija karsta može pomoći razvoju ekološkog inženjeringa na specifičnim i danas jako ugroženim terenima karsta.

#### LITERATURA

- [1] Atkinson TC (1986.) Soluble rock terrains. U: Fookes P, Vaughan PR (ur.) Handbook of Engineering Geomorphology. Chapman and Hall, New York, 241-257.
- [2] Bakalowicz M (2004.) The epikarst, the skin of karst. U: Jones WK, Culver DC, Herman JS (ur.) Proceedings of the symposium held October 1 through 4, 2003, Shepherdstown, West Virginia, USA, Karst Waters Institute, Charles Town, 16-22.
- [3] Baker A, Brundson C (2003.) Non-linearities in drip water hydrology: an example from Stump Cross Cavern, Yorkshire. *J of Hydrol* 277:151-163.
- [4] Barrany-Kevei I (1992.) Les facteurs écologiques dans la formation du karst. U: Salomon JN, Maire R (ur.) Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux, France, 51-59.
- [5] Bonacci O (1987.) Karst hydrology with special reference to Dinaric karst. Springer Verlag, Berlin.
- [6] Bonacci O (1993.) Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrol Sci J* 38 (1):51-62.
- [7] Bonacci O (1995.) Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia). *J of Hydrol* 165:113-134.
- [8] Bonacci O (2003.) Ekohidrologija vodnih resursa i otvorenih vodotoka. Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split.
- [9] Bonacci O (2004.) Hazards caused by natural and anthropogenic changes of catchment area in karst. *Nat Haz and Earth Sys Sci* 4(6):655-661.
- [10] Bonacci O (2006.) Complementarities of karst hydrology and hydrogeology. U: Zwahlen F, Mudry J (ur.) Proceedings of the 8<sup>th</sup> conference on limestone hydrogeology held September 21 through 23, 2006, Neuchatel, Switzerland, 19-24.
- [11] Bonacci O, Pipan T, Culver D (2008.) A framework for karst ecohydrology. *Env Geol*, DOI 10.1007/s00254-008-1189-0
- [12] Bonacci O, Roje-Bonacci T (2000.) Interpretation of groundwater level monitoring results in karst aquifers: examples from the Dinaric karst. *Hydrol Proc* 14:2423-2438.
- [13] Bonell M (2002.) Ecohydrology - a completely new idea? *Hydrol Sci J* 47(5):809-810.
- [14] Bond B (2003.) Hydrology and ecology meet - and the meeting is good. *Hydrol Proc* 17:2087-2089.
- [15] Culver DC (2001.) The dark zone. *The Sciences*. Spring:30-35.
- [16] Culver DC, Holsinger JR (1992.) How many species of troglobites are there? *Bull Nat Speleol Soc* 54:79-90.
- [17] Culver DC, Sket B (2000.) Hotspots of subterranean biodiversity in caves and wells. *J Cave and Karst Stud* 62(1):11-17.
- [18] di Castri F (1995.) Diversité biologique et diversité culturelle: Les fondements de l'universel, U: B&B Sitter-Liver (urednik) Culture Within Nature, UNESCO, Wiese Publ. Basel: 295-311
- [19] Eagleson PS (2002.) Ecohydrology – Darwinian expression of vegetation form and function. Cambridge University Press, Cambridge.
- [20] Field MS (2002.) A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology. USEPA, Washington DC.
- [21] Folk RL, Roberts HH, Moore CH (1973.) Black phytokarst from Hell, Cayman Island, British West Indies. *Geol Soc of America Bull* 84:2351-2360.

- [22] Ford D, Williams P (2007.) Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester.
- [23] Gibert J, Stanfors JA, Dole-Olivier MJ, Ward JV (1994.) Basic attributes of groundwater ecosystems and prospects for research. U: Gibert J, Danielopol D, Stanford JA (ur.) Groundwater ecology. Academic Press, San Diego, 8-42.
- [24] Graening GO, Brown AV (2003.) Ecosystem dynamics and pollution effects in an Ozark cave stream. *J Am Water Res Assoc* 39:1497-1505.
- [25] Hannah DM, Wood PJ, Sadler JP (2004.) Ecohydrology and hydroecology: a new paradigm? *Hydrol Proc* 18:3429-3445.
- [26] Harte J (2002.) Toward a synthesis of the Newtonian and Darwinian worldviews. *Physics Today* 55(10):29-37.
- [27] Hawes RS (1939.) The flood factor in the ecology of caves. *J of Animal Ecol* 8(1):1-5.
- [28] Herman JW, Culver DC, Salzman J (2001.) Groundwater ecosystems and the service of water purification. *Stanford Env Law J* 20:479-495.
- [29] Howarth FG (1983.) Ecology of cave arthropods. *Ann Rev of Entomol* 28:365-389.
- [30] Howarth FG (2004.) Hawaiian islands, biospeleology. U: Gunn J (ur.) Encyclopedia of Cave and Karst Science. Fitzroy Dearborn, New York, 417-419.
- [31] Hupp CR, Osterkamp WR, Howard AD (1995.) Biogeomorphology, terrestrial and freshwater systems. *Geomorphol* 13(1-4):1-34.
- [32] Jones WK, Hobbs III HH, Wicks CM, Currie RR, Hose LD, Kerbo RC, Goodbar JR, Trout J (2003.) Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands. Karst Waters Institute Special Publication 8, Charles Town, 95.
- [33] Kogovšek J (1990.) Characteristic of the precipitation infiltration through the roof of Taborska jama. *Acta Carsol* 25:157-165.
- [34] Kogovšek J, Habič P (1980.) The study of vertical percolation of water in the case of Postojnska jama and Planinska jama. *Acta Carsol* 9:129-148.
- [35] Langmuir D (1971.) The geochemistry of some carbonate groundwaters in Pennsylvania *Geochim Cosmochim Acta* 35:1023-1045.
- [36] Milanović P (1981.) Karst hydrogeology. Water Resources Publication, Littleton.
- [37] McDonald J, Drysdale R (2007.) Hydrology of cave drip waters at varying bedrock depths from a karst system in southeastern Australia. *Hydrol Proc* 21(13):1737-1748.
- [38] Nuttle WK (2002.) Is ecohydrology one idea or many? *Hydrol Sci J* 47(5):805-807.
- [39] Pipan T (2005.) Epikarst - a promising habitat. Copepod fauna, its diversity and ecology: a case study from Slovenia (Europe). Založba ZRC; Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna, 101.
- [40] Pipan T, Culver DC (2007.) Epikarst communities: biodiversity hotspots and potential water tracers. *Env Geol*. 53:265-269.
- [41] Raeisi E, Groves C, Meiman J (2007.) Effects of partial and full pipe flow on hydrochemographs of Logsdon river, Mammoth Cave Kentucky USA. *J of Hydrol* 337:1-10.
- [42] Rodriguez-Iturbe I (2000.) Ecohydrology: a hydrological perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Res Res* 36:3-9.
- [43] Rouch R (1977.) Considérations sur l'écosystème karstique. *Compte Rendus Académie de Science, Paris Ser. D* 284:1101-1103.
- [44] Sarbu SM, Kane TC, Kinkle B (1996.) A chemoautotrophically based cave ecosystem. *Science* 272:1963-1965.
- [45] Simon KS, Benfield EF (2001.) Leaf and wood breakdown in cave streams. *J of North American Benthological Soc* 482: 31-39
- [46] Simon KS, Pipan T, Culver DC (2007.) A conceptual model of the flow and distribution of organic carbon in caves. *J of Cave and Karst Stud* 69:279-284.
- [47] Smith K, Ward R. (1998.) Floods - physical processes and human impacts. John Wiley, Chichester.
- [48] Soulsby C, Tetzlaff D, Rodgers P, Dunn SM, Waldron S. (2006.) Runoff processes, stream water residence times and controlling landscape characteristics in a mesoscale catchment: an initial evolution. *J of Hydrol* 325:197-221.
- [49] Tabaroši D (2002.) Biokarst on a tropical island. *Theor and Appl Karstol* 15:73-91.
- [50] Viles HA (1984.) Biokarst: review and prospect. *Progress in Physic Geograph* 8:523-548.
- [51] Williams PW (1983.) The role of subcutaneous zone in karst hydrology. *J of Hydrol* 61:45-67.
- [52] White WB (2002.) Karst hydrology: recent developments and open questions. *Eng Geol* 65:85-105.

- [53] WMO (2006.) Environmental aspects of integrated flood management. WMO flood management policy series. WMO-No.1009, Geneva, 71.
- [54] Wood PJ, Hannah M, Sadler JP (ur.) (2007.) Hydroecology and ecohydrology - past, present and future. J. Wiley, Chichester.
- [55] Zalewski M (2002.) Ecohydrology the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources. Hydrol Sci J 47(5):823-832.
- [56] Zambo L (2004.) Hydrological and geochemical characteristics of the epikarst based on field monitoring. U: Jones WK, Culver DC, Herman JS (ur.) Proceedings of the symposium held October 1 through 4, 2003, Shepherdstown, West Virginia, USA, Karst Waters Institute, Charles Town, 135-139.

## CONTRIBUTIONS TO KARST ECOHYDROLOGY

by

Ognjen BONACCI

Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu

Tanja PIPAN

Inštitut za raziskovanje krasa, ZRC-SAZU

David C. CULVER

Department of Biology, American University

### Summary

Ecohydrology may be defined as the science that integrates hydrological and biological processes, in different space and time scales. Karst is a specific geological formation in which direct interaction exists between the circulation and storage of groundwater and surface water. These processes strongly influence the spatial and temporal distribution of living organisms and their habitat in karst. Recognizing that the appearance, storage, and circulation of water in karst strongly differ from those in homogeneous and isotropic layers, karst ecohydrology has the task to develop original methods and approaches. It should also be underlined that the use and development of traditional approaches to the analysis and solution of hydrological and ecological problems do not lose their significance. Large scale karstic geomorphological formations have very different dimensions. Their size may vary from a few meters depth and length, to kilometers, reaching even tens of kilometers.

In the paper particular attention is given to the study of ecohydrological functions of karstic groundwater

formations (caves, holes, karstic conduits, etc.) and epikarstic zones, which assume the following two crucial roles: 1. hydrological and hydrogeological function in the sense of conducting and storing water; 2. ecological function, as habitats for numerous rare and endangered species.

The differences in morphology, hydrology, hydrogeology and climate result in a variety of ecological situations, which offer the development and coexistence of very different species of plants and animals. Special attention is given to the study of the influence on ecohydrological processes of the epikarstic and vadose zones, as well as to the role of caves. The main purpose of the paper is to invite discussion and cooperation between different scientific disciplines, with the intention to promote and develop a conceptual framework of karst ecohydrology.

Keywords: Karst ecohydrology, epikarst, caves, underground habitats, injecting

Redigovano 10.06.2008.