GIGANTSKE KRŠKE URUŠNE VRTAČE – TIANKENG

dr. sc. Ognjen Bonacci, prof. emerit.

1. DEFINICIJA TIANKENGA

Krški prostor odlikuje se raznolikošću površinskih i podzemnih oblika nastalih otapanjem karbonatnih stijena. Među njima se posebno ističu urušne vrtače koje predstavljaju završnu fazu razvoja podzemnih šupljina. Vrtače (doline) su ujedno najkarakterističniji te vrlo česti oblici krškog reljefa. Postupno se razvijaju otapanjem stijena ili urušavanjem (kolapsom) stropa podzemnih šupljina. U specifičnim geološkim i hidrološkim uvjetima urušavanje može zahvatiti goleme podzemne prostore, pri čemu nastaju iznimno velike urušne depresije koje značajno nadilaze dimenzije klasičnih vrtača. Takve se strukture u kineskoj geomorfološkoj literaturi, koja je prihvaćena i u međunarodnoj terminologiji, nazivaju se tiankeng (kineski: 天坑, što u doslovnom prijevodu znači „nebeska jama"). Taj je termin uveden početkom 21. stoljeća kako bi se označila posebna morfološka kategorija gigantskih urušnih krških depresija povezanih s velikim špiljskim sustavima.

Tiankeng predstavlja posebnu kategoriju iznimno velikih krških urušnih ili kolapsnih vrtača razvijenih u karbonatnim stijenama u debelim sekvencama vapnenaca i dolomita paleozojske i mezozojske starosti. Ovaj se fenomen oblikuje u duboko razlomljenim vapnenačkim masivima u uvjetima intenzivne karstifikacije te aktivne podzemne hidrogeologije i hidrologije. Najveća koncentracija poznatih primjera nalazi se u područjima koja karakteriziraju debeli karbonatni stratigrafski nizovi, intenzivna tektonska razlomljenost i obilne oborine koje potiču snažnu karstifikaciju. Na većini lokacija, osobito onih u području južne Kine, vlada monsunska klima koja omogućuje značajnu infiltraciju, čime se dodatno potiče dubinska speleogeneza. Zbog svoje morfologije i geneze, tiankeng predstavlja važan objekt istraživanja u geomorfologiji krša, speleologiji i krškoj hidrologiji.

Tipični tiankeng ima promjer od 100 do 600 m te dubinu od 100 do više od 600 m. Karakteriziraju ga strmi ili gotovo okomiti zidovi te prisutnost velikog podzemnog špiljskog sustava na dnu ili u bočnim dijelovima (Waltham i sur. 2005).

Morfološki, tiankeng obično uključuje tri glavne zone: (1) okomite stijenske zidove sastavljene od karbonatnih stijena; (2) urušni stožac od blokova i detritusa na dnu depresije; (3) ulaz u špiljski sustav ili podzemni vodotok (Zhu i Waltham 2005). Ovakva struktura ukazuje na izravnu povezanost površinskog reljefa s dubokim speleološkim sustavima.

Formiranje tiankenga rezultat je dugotrajnog djelovanja karstifikacije u karbonatnim stijenama. Karbonatni slojevi često prelaze 500 – 1000 m debljine, što omogućuje razvoj dubokih vertikalnih speleoloških sustava. Temeljni proces je kemijsko otapanje kalcijevog karbonata. Kisela voda obogaćena ugljikovim dioksidom infiltrira se kroz pukotine i rasjede, postupno proširujući podzemne kanale i špiljske galerije. Ova reakcija dovodi do stvaranja otopljenih bikarbonata koji se transportiraju podzemnim vodama, čime se postupno povećavaju pukotine i šupljine u stijeni (Ford i Williams 2007). S vremenom se razvijaju velike podzemne šupljine kroz koje mogu teći podzemne rijeke. Kada špiljski strop izgubi mehaničku stabilnost, dolazi do urušavanja velikog volumena stijena, pri čemu nastaje otvorena depresija na površini. Ovaj proces može biti postupan, kroz sukcesivna urušavanja i/ili brz i katastrofalan, kada dođe do naglog urušavanja stropa špilje. Formiranje tiankenga se odvija tijekom približno od 10^4 do duže od 10^6 godina kroz kemijsko otapanje i postupni razvoj pukotina, kanala i velikih podzemnih šupljina.

Proces formiranja tiankenga odvija se u pet faza: (1) Inicijalna faza razvoja dubokog podzemnog sustava u freatičkoj zoni utječe na otapanje i proširenje krških pukotina. U ovoj fazi se formiraju velike podzemne galerije u freatičkoj i epifreatičkoj zoni. (2) Faza proširenja velikih podzemnih dvorana kemijskom denudacijom i mehaničkom destabilizacijom. Mehaničko širenje i kemijska denudacija stvaraju podzemne prostore visine 100 – 300 m i širine veće od 200 m. (3) Faza progresivnog slabljenja krova dvorane, tj. gubitka strukturne stabilnosti. Kada odnos raspona i debljine krova prijeđe kritični prag određen naprezanjem i modulom elastičnosti stijene, dolazi do progresivnog urušavanja. Stabilnost krova podzemne dvorane ovisi o odnosu raspona i debljine stijene te o mehaničkim svojstvima vapnenca, vlačnoj čvrstoći i modulu elastičnosti. Kada naprezanje premaši kritičnu vrijednost, dolazi do progresivnog urušavanja i konačnog kolapsa. Zhu i Waltham (2005) su opisali okvirne kriterije stabilnosti kolapsnih struktura

u karbonatnim stijenama. (4) Katastrofični kolaps krova dvorane uzrokuje formiranje gotovo vertikalnog otvora. (5) Završna faza nazvana postkolapsna evolucija sastoji se od taloženja urušenog materijala i razvoja specifične mikroklime, što omogućava formiranje specifičnih ekosustava.

Prema mehanizmu nastanka razlikuju se tri osnovna tipa tiankenga. Urušni tiankeng nastaje kolapsom stropa velike špiljske dvorane, što je ujedno i najčešći oblik njihova formiranja. Ovaj tip karakteriziraju vertikalni zidovi i velika dubina. Erozijski se tiankeng formira kada površinski vodeni tok probije strop špilje i proširi otvor mehaničkom erozijom i daljnjim otapanjem stijena. Treći, kombinirani tip tiankenga, formira se radom i djelovanjem podzemne rijeke u zonama aktivnih podzemnih tokova gdje erozija i transport sedimenta destabiliziraju strop špiljskog sustava.

Tiankengi su dio složenih krških hidroloških sustava te su povezani s ponorima površinskih tokova, podzemnim rijekama, sifonima i krškim izvorima na nižim nadmorskim visinama. Osim toga, oni tvore prirodne ulaze u duboke speleološke sustave, čime omogućuju istraživanje podzemnih rijeka i velikih špiljskih dvorana koje bi inače bile teško dostupne. Ova hidraulička povezanost čini ih važnim elementom regionalne krške hidrogeologije i hidrologije, ključnim za izučavanje dinamike kompleksnih krških podzemnih vodnih tokova.

Velika dubina i strme litice stvaraju mikroklimatske uvjete s visokom vlagom i temperaturnom inverzijom, što omogućuje razvoj reliktnih suptropskih šuma i izoliranih ekosustava na dnu tiankenga. Zbog svoje dubine i izoliranosti, mnogi tiankengi razvijaju specifične ekološke uvjete koji omogućuju razvoj jedinstvenih ekosustava. U nekim su slučajevima otkrivene endemske biljne vrste i specifične životinjske zajednice (Pu i sur. 2017).

Tiankengi su uglavnom rasprostranjeni u tropsko-suptropskom krškom području Kine i kršu Muller-Nakanai u Papui Novoj Gvineji. Najveći se broj poznatih tiankenga nalazi u južnoj Kini, osobito u provincijama Guangxi, Guizhou, Chongqingu i Hubeiju. Osim toga, tiankengi su otkriveni u Maleziji, Meksiku, Brazilu, Hrvatskoj, Sloveniji, Madagaskaru i Portoriku (Waltham 2005). Sva ova područja karakteriziraju debeli karbonatni stratigrafski nizovi, intenzivna tektonska razlomljenost i obilne oborine koje snažno potiču procese karstifikacije.

2. XIAOXHAI TIANKENG (KINA)

Xiaoxhai u pokrajini Chongqing u Kini najdublji je i najveći tiankeng na svijetu (Zhu i Chen 2005; Gunn 2019). Ova gigantska struktura u obliku polumjeseca, formirana je iznad špilje tijekom posljednjih oko 128.000 godina (na slici 1 nalazi se ulaz u ovu golemu strukturu, a na slici 2 pogled iz njenog dna). Osim svoje ogromne veličine, formacija je jedinstvena i po tome što je riječ o dvostruko ugniježđenoj vrtači (struktura unutar strukture) koju drže dva kratera spojena kosim rubom. Njegove dimenzije su zapanjujuće. Dubok je 662 metra, dug 626 metara i širok 537 metara. U njegovu se dnu nalazi 8,5 kilometara duga podzemna rijeka koja završava spektakularnim slapom. U kišnoj se sezoni taj vodopad obrušava iz otvora jame, hraneći podzemnu rijeku i mrežu špilja u njenom podnožju. Naziv Xiaoxhai znači "Nebeska jama". Njegove se strme strane gotovo okomito spuštaju u pravi podzemni svijet u kojem vlada iznimna biološka raznolikost, prava eksplozija života. Xiaoxhai je dom bujnom ekosustavu od oko 1300 biljnih i životinjskih vrsta, uključujući rijetke primjerke ginka i divljih životinja poput oblačastog leoparda (nebula panther), kojeg je izrazito teško uočiti.

Tiankengi su izolirani krški sustavi s izraženom mikroklimatskom stabilnošću koji omogućuju razvoj visoke biološke raznolikosti i očuvanje reliktnih vrsta. Njihova struktura i funkcija određene su kombinacijom mikroklimatskih i pedoloških čimbenika, uz izraženu prostornu heterogenost. Procesni i funkcionalni aspekti njihovih ekosustava još su uvijek nedovoljno istraženi, što naglašava potrebu za multidisciplinarnim pristupom i sustavnom zaštitom.

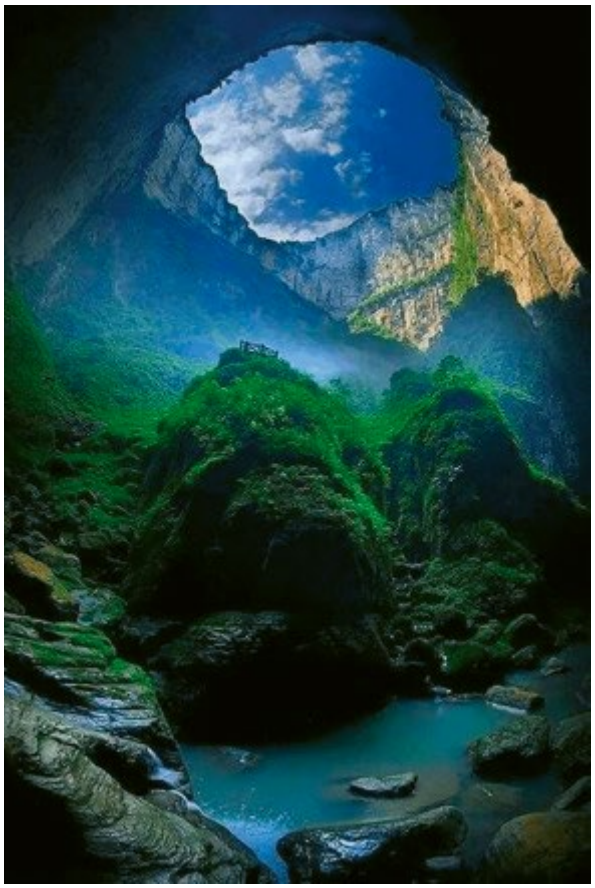
Iako lokalno stanovništvo već stoljećima zna za ovu spektakularnu kršku strukturu, međunarodna znanstvena zajednica javnosti ju je otkrila tek 1994. godine, kada su britanski istraživači pokušali istražiti njezin podzemni špiljski sustav nalik labirintu. Unatoč pokušaju mapiranja podzemne rijeke čak pet puta u razdoblju od deset godina, speleolozi su otkrili da je bujični tok preopasan za kretanje unutar njega. Zbog toga se do danas nije provelo detaljnije istraživanje njezine unutarnje strukture. Kao rezultat toga, ovaj duboki, mračni podzemni svijet ostaje jedan od velikih geoloških misterija Kine.



Slika 1: Ulaz u Xiaoxhai tiankeng (https://www.bbc.com/travel/article/20221117-xiaoxhai-tiankeng-the-worlds-biggest-sinkhole)

3. VELIKE URUŠNE VRTAČE DINARSKOG KRŠA

Urušne vrtače u Dinarskom kršu vrlo su česta pojava, no one su znatno manjih dimenzija od kineskih tiankenga. Klima južne Kine, prije svega njezin monsunski režim, ima snažan utjecaj na intenzivnu speleogenezu u odnosu na umjereni i mediteranski režim Dinarida. Prema Kranjcu (2005), nekoliko se velikih urušnih vrtača u Dinarskom kršu ipak može svrstati u skupinu tiankenga. To se prije svega odnosi na urušne vrtače u



Slika 2: Pogled odozdo iz Xiaoxhai tiankenga (https://www.reddit.com/r/interestingasfuck/comments/1jkd93a/a_photo_of_xiaozhai_tiankeng_aka_the_heavenly_pit/)

sustavu Škocjanske jame u Sloveniji te na Crveno jezero kod Imotskog u Hrvatskoj. U nastavku je donesen njihov detaljni geomorfološki pregled.

3.1. Škocjanske jame (Slovenija)

Škocjanske jame jedne su od najznačajnijih krških sustava u Europi, razvijene unutar debelih karbonatnih naslaga Dinarskog krša. Sustav je 1986. godine upisan na UNESCO-ov popis svjetske prirodne baštine kao primjer iznimne geomorfološke i hidrološke vrijednosti. Ovaj lokalitet tvori primjer velikih urušnih krških struktura usporedivih s tiankeng vrtačama južne Kine. Sustav je oblikovan djelovanjem rijeke Reke koja aktivno sudjeluje u speleogenezi kroz mehaničku eroziju i kemijsko otapanje stijena (Gams 2003). Jame čine ključan primjer interakcije fluvijalnih i krških procesa te su kao takve referentni lokalitet za istraživanje razvoja velikih urušnih vrtača.

Velika dolina i Mala dolina interpretiraju se kao urušne vrtače nastale urušavanjem stropa velikih podzemnih šupljina (slika 3). Ove strukture pokazuju morfološke značajke usporedive s tiankeng vrtačama, uključujući velike dimenzije i strme padine. Prema detaljnim geološkim istraživanjima, doline su formirane kao rezultat kemijskog i mehaničkog uklanjanja stijenskog materijala ispod razine podzemnih voda. Geomorfološki razvoj sustava primarno je kontroliran



Slika 3: Pogled iz zraka na Veliku i malu dolinu

interakcijom fluvijalne erozije i procesa otapanja karbonatnih stijena. Rasjedni sustavi djeluju kao preferencijalni putevi cirkulacije vode. Litostratigrafske jedinice pokazuju različitu otpornost na eroziju, što rezultira diferencijalnim razvojem krških šupljina.

Unutar sustava Škocjanskih jama posebno se ističe Šumeča jama (slika 4). Treba naglasiti da je veći dio sustava Škocjanskih jama strogo zaštićen, ali i prilagođen za turističke obilaske.



Slika 4: Šumeča jama u sustavu Škocjanskih jama

U procesu urušavanja došlo je do izbijanja starijih litostratigrafskih jedinica na površinu, čime su stvoreni tzv. krški stratigrafski prozori. Razvoj ovih oblika snažno je kontroliran tektonskim strukturama poput rasjeda i pukotinskih sustava (Šebela 2009). Strukturni diskontinuiteti poput rasjeda i pukotina značajno utječu na lokalizaciju kolapsnih procesa. Morfologija slična onoj kod kineskih tiankeng struktura ukazuje na univerzalnost genetskih mehanizama u različitim krškim regijama.

Podzemni kanjon rijeke Reke unutar sustava jedan je od najvećih poznatih u Europi, što dodatno potvrđuje

intenzitet geomorfoloških procesa. Ova tekućica ima ključnu ulogu u speleogenezi aktivnim usijecanjem podzemnih kanala i povećanjem šupljina. Bujični hidrološki režim Reke uključuje epizodne poplavne događaje koji ubrzavaju speleogenetske procese. Hidrodinamički uvjeti unutar sustava variraju ovisno o hidrološkim ciklusima i pojavi intenzivnih oborina u slivu. Integracija fluvijalnih i krških procesa stoga dovodi do složenih speleogenetskih obrazaca unutar cijelog sustava.

3.2. Crveno jezero (Hrvatska)

Crveno jezero duboka je urušna vrtača nastala kolapsom stropa velike podzemne šupljine. Na slici 5 je prikaz jezera snimljenog iz zraka. Karakteriziraju ga izrazita dubina i gotovo vertikalne litice, što ukazuje na dominantan utjecaj gravitacijskog kolapsa, dok je njegov razvoj povezan s intenzivnim procesima karstifikacije u debelim karbonatnim naslagama Dinarida. Tektonska je aktivnost imala značajnu ulogu u inicijaciji speleogenetskih procesa. Voda u jezeru pokazuje značajne oscilacije razine povezane s hidrološkim režimom. Crveno jezero hidraulički je povezano s regionalnim krškim vodonosnikom. Morfološke karakteristike Crvenog jezera usporedive su s tiankeng vrtačama u Kini. Geomorfološki razvoj odraz je regionalne evolucije Dinarskog krša. Zbog svojih iznimnih obilježja, jezero je zaštićeno 1964. godine kao geomorfološki spomenik prirode. Njegovo prepoznatljivo ime proizlazi iz jedinstvene crvenkaste boje koja je rezultat optičkih svojstava i refleksije boje okolnih stijena.

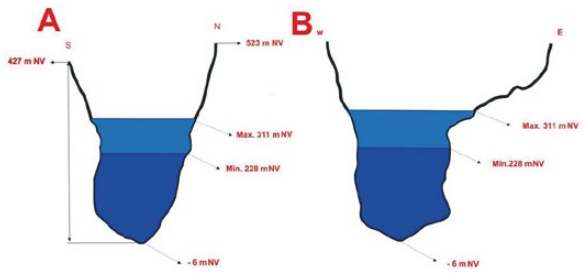


Slika 5: Pogled iz zraka na Crveno jezero

Crveno jezero je za kompleksno sveobuhvatno znanstveno istraživanje vrlo izazovan objekt koji zahtijeva primjenu posebnih tehnika. Prvenstveno je neophodno ovladati alpinističkim, speleološkim i ronilačkim vještinama, kako bi se pristupilo njegovoj površini i kako bi se mogao instalirati ponton koji služi kao baza za istraživače i složenu tehničku opremu. Za rad na terenu neophodno je raspolagati čamcem, ronilačkom opremom kao i brojnim specifičnim mjernim aparatima.

Jezero je veliki spremnik pitke vode i stanište brojnih biljnih i životinjskih vrsta od kojih su neke endemske. Iako se istraživanja provode već više desetaka godina, Crveno jezero do sada nije dovoljno izučeno. Ono predstavlja složen kompleks staništa, u kojem su prisutni brojni ekosustavi, kao što su neobrasle i slabo obrasle kopnene površine, površinske kopnene vode te nedovoljno istražen ekosustav podzemlja. Većina biomase vodenih staništa vezana je uz rub vode čija razina varira u rasponu od preko 100 metara. Uz rub jezera postoje tek manjim dijelom proučena špiljska staništa koja tek treba detaljno evaluirati. Upravo je zbog tih speleoloških objekata uz endemsku ribu gaovicu, Crveno jezero uvršteno u ekološku mrežu Natura 2000 (https://imotskisvitnjak.com/crveno-jezero-bioloska-istrazivanja-i-jedinstven-zivi-svijet/).

Crveno jezero je kriptodepresija čije se dno nalazi na dubini od 6 m ispod razine mora. Na slikama 6A i 6B ucrtani su presjeci kroz jezero u smjeru jug - sjever (S - N) (slika 6A) i u smjeru zapad - istok (W - E) (slika 6B). Na ovim slikama navedene maksimalne i minimalne razine vode tek su informativnog karaktera, jer nedostaju pouzdana, dugotrajna i kontinuirana mjerenja. Stvarni je raspon vodostaja znatno veći.



Slika 6: Presjeci kroz Crveno jezero u smjeru jug - sjever (S - N) (slika 6A) i u smjeru zapad - istok (W - E) (slika 6B)

Crveno jezero je definitivno izniman krški fenomen, svjetski poznat po svojoj ljepoti i izuzetnoj dubini kao i po činjenici da se u njegovoj neposrednoj blizini nalazi drugo plići i tek povremeno Modro jezero (Bonacci i sur. 2014). Unatoč tome, kroz povijest istraživanja Crvenog jezera javljale su se brojne kontroverze u zaključcima i teorijama o njegovu nastanku, geomorfologiji i hidrologiji. Brojna nova saznanja o Crvenom jezeru rezultat su novih tehnologija temeljenih na terestričkom laserskom skeniranju i hidroakustici, čija su mjerenja provedena tijekom rujna 2013. godine (Andrić i sur. 2013; Andrić i Bonacci 2014). Tijekom terenskog rada korištena je nova generacija opreme razvijene za unapređenje geoznanstvenih istraživanja. Prikupljeni podaci omogućili su temeljitu analizu koja je dovela do novih važnih otkrića o Crvenom jezeru. Primjena daljinski upravljanog podvodnog vozila opremljenog slikovnim sonarom rezultirala je prvim cjelovitim hidroakustičnim istraživanjem jezera. Neki od rezultata potvrdili su već poznate i dobro dokumentirane karakteristike Crvenog jezera, dok su drugi osporili dotad široko prihvaćene pretpostavke u znanstvenoj zajednici i široj javnosti.

Ovim je istraživanjem prvi put generiran cjeloviti prostor (trodimenzionalni model) Crvenog jezera, što je omogućilo dobru procjenu njegova volumena. Za tada zabilježeni maksimalni vodostaj na 311 m nadmorske visine, volumen pohranjene vode iznosio je 8,24 x 10^6 m^3. Tijekom terenskog rada zabilježen je i temperaturni profil jezera koji je pružio uvid u moguće miješanje vode kroz krške kanale blizu same površine.

Hidrološka mjerenja na Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015. pokazala su da je najveći srednji dnevni dotok u jezero iznosio 1,73 m^3/s, a najveće istjecanje 0,54 m^3/s (Andrić i sur. 2017). Električna vodljivost predstavlja mjeru za količinu iona u vodi, odnosno za koncentraciju otopljenih minerala. Povećanjem koncentracije otopljenih minerala u vodi, odnosno njezine tvrdoće, proporcionalno raste i njezina električna vodljivost. Voda koja dulje vrijeme boravi u podzemlju krša otopi više minerala od one koja kraće vrijeme boravi u istom prostoru. Prosječna izmjerena vrijednost električne vodljivosti u razdobljima bez oborina i dotoka u jezero iznosila je 0,430 mS/cm. Kod pojave obilnih oborina, koje uzrokuju nagli dotok svježe vode u jezero, ta vrijednost naglo opada na 0,332 mS/cm.

Na osnovi kratkog niza zajedničkog mjerenja u razdoblju od samo 338 sati (od 28. studenog u 14h do 12. prosinca u 15h 2022. godine) u oba susjedna jezera, autori su zaključili da Modro i Crveno jezero dijele isti krški vodonosnik te da se razlike u njihovu ponašanju mogu objasniti različitim hidrogeološkim svojstvima njihova neposrednog okoliša (Bonacci i sur. 2023).

Škocjanske urušne doline i Crveno jezero kod Imotskog predstavljaju primjere velikih urušnih vrtača Dinarskog krša, dok kineski tiankengi tvore njihovu ekstremnu morfološku i genetsku ekspanziju. Ključna razlika leži u samim razmjerima, pri čemu tiankeng sustavi pokazuju znatno veće dimenzije i volumene, dok sustav Škocjanskih jama dodatno ilustrira snažnu povezanost fluvijalnih i krških procesa. Sva tri sustava potvrđuju univerzalnost mehanizma karstifikacije i urušavanja u karbonatnim stijenama.■

LITERATURA

Andrić, I.; Bonacci, O.; Jukić, B. (2013.). Rezultati najnovijih hidroloških i geomorfoloških istraživanja Crvenog jezera kod Imotskog. Hrvatske Vode, 21(86), 344-348.

Andrić, I.; Bonacci, O. (2014.). Morphological study of Red lake in Dinaric karst based on terrestrial laser scanning and sonar systems. Acta Carsologica, 43(2/3), 229-239. DOI:10.3986/ac.v43i2.712.

Andrić, I.; Bonacci, O.; Jukić, B. (2017.). Hidrološka mjerenja na Crvenom jezeru u razdoblju od 28. rujna 2013. do 10. rujna 2015. Hrvatske Vode, 25(102), 253-258.

Bonacci, O.; Andrić, I.; Vrsalović, A. (2023). Hidrološko-hidrogeološka povezanost Modrog i Crvenog jezera kod Imotskog (prvi rezultati istraživanja). Hrvatske Vode, 31(124), 153-156.

Bonacci, O.; Andrić, I.; Yamashiki, Y. (2014.). Hydrology of Blue Lake in the Dinaric karst. Hydrological Processes, 28(4), 1890–1898, DOI:10.1002/hyp.9736.

Ford, D.; Williams, P. (2007.). Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chichester: Wiley.

Gams, I. (2003.). Kras v Sloveniji v prostoru in času. Postojna, Inštitut za raziskovanje krasa.

Gunn, J. (2019.). Tiankeng (Giant Doline) definitions with particular reference to the Hanzhong Depressions, Shaanxi, China. Cave and Karst Science, 46(2), 51-60.

Kranjc, A. (2005). Some large dolines in Dinaric karst. Cave and Karst Science, 33(2-3), 99-100.

Pu, G.; Lv, Y.; Xu, G.; Zeng, D.; Huang, Y. (2017.). Research Progress on Karst Tiankeng Ecosystems. Botanical Review, 83(1), 5-37. DOI:10.1101/s12229-017-9179-0.

Šebela, S. (2009.). Structural Geology of the Škocjan Caves. Acta Carsologica, 38(2-3), 165-177. DOI:10.3986/ac.v38i2-3.121.

Waltham, T. (2005.). Tiankengs of the world outside of China. Cave and Karst Science. 33(2-3), 67-74.

Waltham, T.; Bell, F.; Culshaw, M. (2005). Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Berlin: Springer and Praxis.

Zhu, X.; Chen, W. (2005.). Tiankengs in the karst of China. Cave and Karst Science. 33(2-3), 55-66.

Zhu, X.; Waltham, T. (2005.). Tiankeng: Definition and description. Cave and Karst Science, 33(2-3), 75–79.

https://www.bbc.com/travel/article/20221117-xiaoxhai-tiankeng-the-worlds-biggest-sinkhole (posjet 23. ožujka 2026.)

https://imotskisvitnjak.com/crveno-jezero-bioloska-istrazivanja-i-jedinstven-zivi-svijet/ (posjet 23. ožujka 2026.)

https://www.reddit.com/r/interestingasfuck/comments/1jkd93a/a_photo_of_xiaozhai_tiankeng_aka_the_heavenly_pit (posjet 23. ožujka 2026.)