

ХЕМИЈСКА ЕРОЗИЈА И ХИДРОЛОШКИ БИЛАНС НА ПРОСТОРУ КАРСТНОГ ПЛАТОА ШУШУРЕ

ЗОРАН НИКИЋ^{*1}, ЈУГОСЛАВ НИКОЛИЋ², РАТКО РИСТИЋ¹, ДУШАН СТОЈАДИНОВИЋ³

¹Универзитет у Београду, Шумарски факултет, Кнеза Висеслава 1, Београд, Србија

²Републички хидрометеоролошки завод Србије, Кнеза Вишеслава 66, Београд, Србија

³Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Јарослава Черног 80, Београд, Србија

Сажетак: У западној Србији, на источним обронцима планине Јадовник, налази се карстни плато Шушуре који је површине око 4.5 km². Овај плато у односу на околни терен претставља за 15 до 30 м хипсометријски вишу морфолошку јединицу. Литолошки је изграђен од кречњака средњотријаске старости који су веома тектонски оштећени и карстификовани. На карстном платоу формиран су бројни хидрогеолошки и геоморфолошки објекти који доприносе атрактивности геодиверзитета овог пасивног краја. Терен око карстног платоа изграђен је углавном од перидотита. На плато не дотиче, али и не отиче ни један површински водоток. Излучене атмосферске падавине расходују се на евапотранспирацију и на инфилтрацију. Пражњење формиране карстно-пукотинске издани се врши преко 18 сталних извора који се налазе по ободу карстног платоа, у зони тектонског контакта кречњака и перидотита. На основу мерених вредности за падавине и издашност 18 извора, извршено је билансирање вода за карстно-пукотински тип издани који је формирана у средњотријаским кречњацима платоа Шушуре.

Кључне речи: карстни плато; хемијска ерозија; хидролошки биланс; ерозиони облици; нумерички модел.

Увод

У склопу реализације пројекта прелиминарног сагледавања природних ресурса (минералне сировине, воде, земљиште, вегетација и друго) на територији општина Пријеполје, Нова Варош и Сјеница у западној Србији, извршено је рекогносцирање терена у периоду 2002-2005. године. У брдско-планинским подручјима ових општина захваљујући малој густини насељености и веома слабој инфраструктурној уређености целог подручја, очуване су бројне атрактивне амбијенталне целине.

Један од интересантних локалитета је карстни плато Шушуре, који се налази на источним падинама планине Јадовник. Због заступљених геолошких специфичности на овом релативно малом простору, спроведена су одређена геолошка, хидрогеолошка, геоморфолошка, спелеолошка и друга истраживања.

У предметном раду, приказан је резултат прорачуна водног биланса за карстни плато Шушуре. Добијени резултати су у сагласности са резултатима других спроведених геолошких истраживања.

* E-mail: zoran.nikic@sfb.rs

Подручје истраживања

Карстни плато Шушуре је површине око 4.5 km². Претставља за око 15 до 30 m хипсометријски вишу морфолошку целину, у односу на околни терен. Налази се у југозападном делу Републике Србије на око 15 км западно од варошице Сјеница, односно на источним обронцима планине Јадовник. Највиши врх планине Јадовник је Катуних са котом 1734 m. Ова планина припада групи Динарских планина. Њено било има смер пружања од Пријепоља на северозападу, према Сјеници на југоисток. Сви водотоци припадају сливу реке Лима односно реке Дрине и тиме Црног мора.

Шире окружење карстног плато Шушуре је планинско, са котам терена од око 1200 до преко 1650 m. Клима је умерено континентална са одликама планинске климе и низом специфичности самог локалитета. Просечна вишегодишња сума падавина износи 742 mm. Годишњи ход количине падавина показује да је месец са највећом просечном количином падавина јул, а са најмањом јануар, март и фебруар.

Коте површине терена на самом платоу су од 1350 до 1395 m. Пружа се од Лазића крша (1395 m нм) на западу, до Грабовачке реке на југоистоку (Слика 1). Површина терена платоа је покривена слојем хуминизираним земљишта местимично дебљине и преко 0.5 m. Обрастао је бујном ливадском и шумском вегетацијом (око 50 % површине захватају шуме). На платоу не постоје стамбени, индустријски, путни као ни било који други инфраструктурни објекти.

Материјал и методе

Метод рада на реализацији истраживања одвијао се по шеми кабинет-терен-кабинет. Прво је извршена анализа авиофотоснимака за цео истражни простор Такође, извршено је прикупљање и анализа публикованих радова и доступне фондовске документације. Прибављене су падавине за кишомерне станице најближе карстном платоу Шушуре, за период 1946-2005. година. На основу даљинске детекције извршено је одређивање делова терена за детаљно теренско геолошко и хидрогеолошко картирање.

Теренска истраживања геолошке грађе, хидрогеолошких услова, процеса ерозије и геоморфолошких облика на одабраним локалитетима изведена су методом детаљног картирања. За геолошке, хидрогеолошке, ерозионе и геоморфолошке објекте, спроведено је снимање и одређивање њихових елемената мерењима која су обављена директно на терену. Снимање координата и коте карактеристичних тачака анализираних објеката вршено је ГПС уређајем. Као основа за записивање опажања, коришћене су оригиналне топографске подлоге размере 1:25.000. Анализа прикупљених података извршена је у кабинету. Спроведена је класификација и приказ анализираних геолошких, хидрогеолошких и геоморфолошких објеката. Урађене су тематске карте као и катастар хидрогеолошких, геоморфолошких и ерозионих појава и облика.

За израчунавање просторне евапотранспирације коришћен је нумерички модел развијен на модуларном приступу (Николић, 2004). Модел садржи модуле енергетских, динамичких и утицаја физиологије биљака, уз параметризацију утицаја геолошке подлоге терена. Утицај геолошке подлоге параметрисан је на начин који захтева хидрогеолошки приступ методологији истраживања терена. Утицаји аеродинамичког отпора, као и површинског отпора биљних врста, параметрисани су на специфичан начин. Површински отпор биљних врста симулира контролу тока водене паре из лишћа биљке преко доступних параметара у пракси. Аеродинамички отпор је израчунаван у функцији брзине ветра и храпавости активне површине.

Модуларно одређени параметри интегрисани су кроз основну једначину модела која укључује утицај свих релевантних фактора на процес евапотранспирације: најзначајније енергетске и аеродинамичке факторе, геолошке подлоге и утицај биљног покривача. Поред осталог, модел укључује апсорпцију Сунчеве енергије која активно површини обезбеђује латентну топлоту испаравања, затим механизам транспорта водене паре са површине испаравања, као и друге параметре који регулишу евапотранспирацију. Модел користи основну једначину на бази комбинованог приступа, са подацима који се стандардно мере и који су уобичајено доступни.

Домен модела дефинисан је у односу на површину посматраног истражног подручја. Евапотранспирација је рачуната у тачкама мреже са хоризонталном резолуцијом одређеном тако да елементарна површина довољно тачно репрезентује хомогено подручје. Резолуција модела, са просторним кораком $k=dx=dy=100$ m, обезбеђује довољну тачност израчунатих вредности интегралног испаравања воде и анулира хетерогеност терена, како у погледу геолошких услова тако и у погледу заступљености шумских екосистема.

Први корак у изради нумеричког модела је подразумевао ажурирање потребне базе података из домена анализе на бази грид система. За свако јединично поље површине 100×100 m, ажурирани су одговарајући подаци (температура ваздуха, напон водене паре, брзина ветра, ваздушни притисак, алbedo активне површине, аеродинамички отпор и површински отпор биљног покривача и други) који су у виду матрице искоришћени за прорачун у моделу. Улазни подаци добијени су мерењима на топографској карти, као и стандардним физичким мерењем метеоролошких параметара на метеоролошкој станици. Картографски параметри одређени су на основу топографских карата размера 1:25 000. За свако поље 100×100 m из домена модела коришћене су координате доњег левог угла, максимална, минимална и средња надморска висина терена, нагиб и шумовитост истога.

Урађена је и динамичка анализа падавина која, поред осталог, укључује утицај орографских и динамичких услова на падавине. Сваком елементарном пољу придружена је одговарајућа вредност падавина добијена нумеричком анализом. Динамичка анализа падавина урађена је помоћу тродимензионалног нехидростатичког нумеричког модела FITNAH (Frenzen et al. 1987). У моделу је на специфичан начин решено представљање утицаја орографије на метеоролошке параметре (Frenzen et al. 1987; Nikolić, 2002). Прорачун суме падавина направљен је према назначеној методолгији.

Резултати истраживања

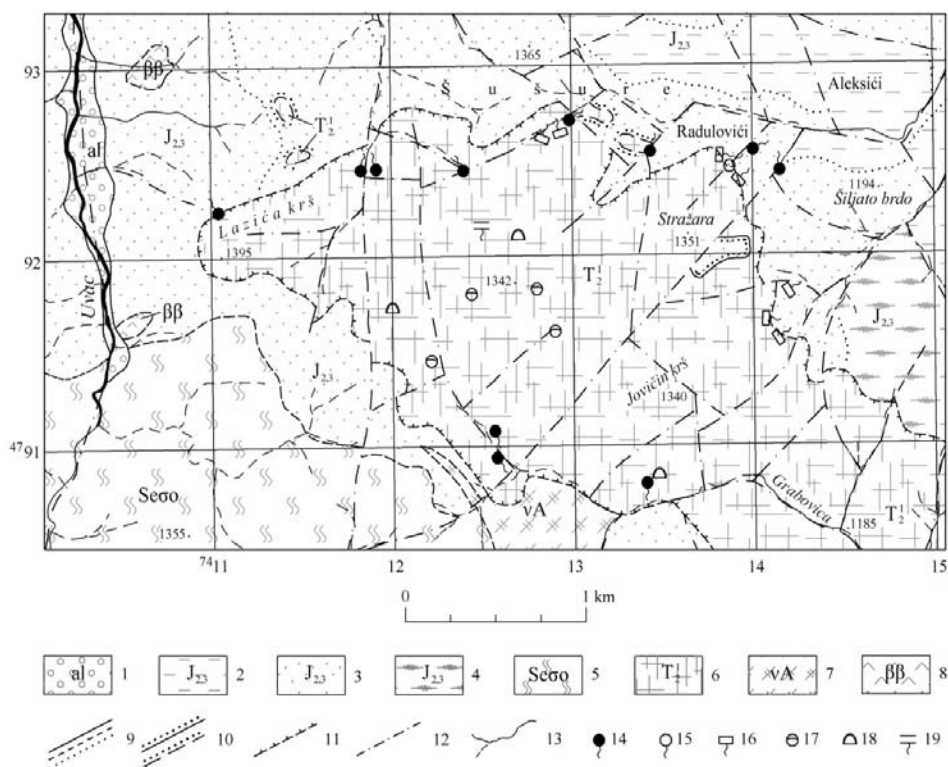
Геолошка грађа терена истраживаног подручја

Геолошка грађа и тектонски склоп карстног платоа Шушуре и његове шире околине, веома су сложени. У тектонском погледу ова територија припада лимској тектонској јединици коју карактерише већи број раседних структура различитог правца пружања (Živaljević et al. 1984). Литолошки, у грађи терена шире зоне истражног подручја учествују седиментне, магматске и метаморфне стене, геолошке старости од мезозоика до квартара.

Геолошки најстарије стене су кречњаци и доломити средњег тријаса (T_2^1) од којих је изграђен плато Шушуре (Слика 1). Ови седименти представљени су слојевитим доломитичним кречњацима, сивим и руменкастим лапоровитим кречњацима са слојевима црвених лапоровитих и бречастих кречњака. Њихова дебљина је преко 200 m (Živaljević et al. 1984). Тектонсаки су веома оштећени и карстификовани. Са стенским масама које се налазе у њиховом непосредном окружењу у тектонском су

контакту. Представљају хидрогеолошки колектор у којем је формиран карстно-пукотински типа издани.

Плато Шушур са свих страна окружен је дијабаз-рожначком формацијом јурске старости ($J_{2,3}$) осим према југоистоку, где је у виду једне уске зоне спојен са кречњацима Гиљеве планине (1471 m нм). Према Мојсиловићу ет ал. (1978), дијабаз-рожначка формација конкордантно лежи преко средњо тријаских кречњака. Као последица веома изражене радијалне тектонике, дијабаз-рожначка формација је доведена у исти или нижи хипсометријски ниво у односу на тријаске кречњаке (Živaljević ет ал. 1984). У грађи дијабаз-рожначке формације учествују седиментне и магматске стене. Од седиментних стена заступљени су пешчари, алеврити, лапорци, рожнаци, глинци и лапоровити кречњаци. Од магматских стена у састав формације улазе перидотити, габрови, дијабази, спилити и мале масе гранодиорита (Мојсиловић ет ал. 1978). Дијабази се јављају као мањи пробоји у дијабаз-рожначкој формацији.



Слика 1. Геолошка карта карстног платоа Шушуре (према Основној геолошкој карти 1:100 000 лист Бијело Поље у Живаљевић ет ал. 1982, и допуњено)

Легенда: 1 алувион; 2 дијабаз-рожначка формација са претежно лапорцима; 3 дијабаз-рожначка формација са претежно пешчарима; 4 дијабаз-рожначка формација са претежно рожначима; 5 дунити; 6 кречњаци и доломитични кречњаци; 7 габро амфиболити; 8 дијабази; 9 геолошка граница: утврђена, покривена, поступни прелаз; 10 тектонско-ерзиона граница: утврђена, покривена; 11 чело краљушти; 12 расед: утврђен, покривен, фотогоеолошки осматран; 13 водоток; 14 стални извор; 15 повремени извор; 16 каптиран извор; 17 понор; 18 пећина; 19 пиштевина.

Од серпентинисаних харцбургита изградјен је терен југозападно од платоа. Серпентинисани харцбургити представљају део Озренског перидотитског масива. По ободу масива најчешће су ушкриљени (Mojsilović et al. 1978). Геолошки најмлађи су седименти квартарне старости. Представљени су делувијалним и сипарским творевинама. Цела површина платоа покривена је делувијумом што је омогућило развој бујне и разноврсне вегетације.

Анализа руптурног склопа извршена је на регионалном нивоу. Регионални руптурни склоп реконструисан је детаљном анализом сателитских снимака у размери 1:100 000 и 1:50 000. Снимање је вршено из сателита Ландсат 7 ЕТМ+ из орбите висине око 910 км, путања 187, ред 29. Анализом сателитских снимака реконструисан је положај разломних зона и регионалних раседа са њиховим пратећим руптурама. Неотектонска активност терена је реконструисана методом квантитативне геоморфолошке анализе. У великом броју случајева неотектонски активне зоне се поклапају са већ постојећим старијим разломима. Дуж ових разломних зона и раседа долазило је до нових, гравитационих покрета, спуштања и издизања појединих блокова. Карстни плато Шушуре припада блоку са позитивним вредностима енергије рељефа. Релативно издизање платоа у односу на околни терен, омогућило је у оквиру њега интезивнији процес ерозије.

Ерозиони процес и формирани облици

Карстна ерозија заступљена је на целом платоу. Хемијско растварање и механичко разарање карбонатних стена предиспонирано је тектонском испуцалошћу кречњака. Развијени су карстни површински (шкрапе, увале, вртаче, понори, зоне понирања) и подземни облици (крашки канали, јаме и пећине). Утврђено је неподударање подземне (хидрогеолошке) и површинске (топографске) вододелнице (Никић, 2003).

Тектонски дисконтинуитети представљају на површини терена места инфилтрације атмосферских вода, а у подземљу места привилегованог правца филтрације вода. Вртаче су пречника и до 50 м, дубине до 20 м. Веома је импресиван Велики понор, дубине око 30 м, пречника око 20 м (Слика 2), који је формиран у зони раседа и налази се приближно у централном делу платоа.

На сводовима и зидовима кратких пећинских канала и поткапина, честе су каверне пречника од десетак сантиметара до 0.5 м. Међутим, већина каверни и пукотинских система знатно је запуњена делувијалним материјалом који је водом транспортован, донет, са површине терена.

Површинско отицање вода са платоа не постоји али на њега и не дотиче ни један површински водоток, односно нема алогених река. Атмосферске воде које се излуче, расходују се на евапотранспирацију и инфилтрацију. У ободној зони платоа, дуж контакта хипсометријски виших кречњачка и ниже дијабаз-ројначке формације, формиран су бројни сипари. На деловима терена где су вертикали кречњачки одсеци и стрме падине, под дејством гравитације долази до откидања фрагмената кречњака различите величине, њиховог котрљања и акумулирања у подножју падине. Сипари маскирају примарна места истицања изданских вода.

Дренирање карстно-пукотинске издани виши се преко 18 сталних извора. Извори су распоређени у зони обода платоа, на контакту средњотријаског кречњака са дијабаз-ројначком формацијом јурске старости. Присутни су и повремени извори који су веома кратко активни током периода поводња. Карстификовани и тектонски оштећени средњотријаски кречњаци су са хидрогеолошком функцијом хидрогеолошког спроводника и хидрогеолошког колектора, а творевине дијабаз-ројначке формације са функцијом хидрогеолошке баријере.

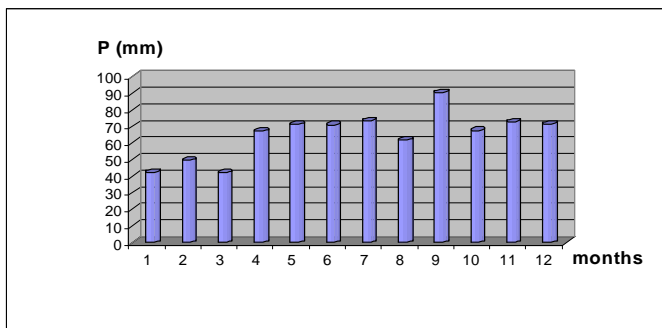
На основу резултата хидрохемијских испитивања узорака вода са 18 извора, констатовано је да сви припадају хидрокарбонатно-калцијској групи вода чија је минерализације око 250 mg/l, рН вредности 7.1 до 7.5. Претходно указује на генетску везу вода извора, са кречњацима. Мерењем количине истицања вода на сталним изворима утврђен је однос минималне и максималне издашности у распону од $Q_{\min}/Q_{\max}=1:2.4$. Овакав однос не представља типичну осцилацију издашности за изворе из карстификованих кречњака.



Слика 2. Велики понор на карстном платоу Шушуре

Биланс подземних вода карстног платоа Шушуре

За потребе билансирања вода коришћени су резултати анализе геолошке грађе терена, хидрогеолошких својства стена, затим геоморфолошке карактеристике, физичко-географски и климатски услови и карактер вегетационог покривач терена платоа. За анализу падавина су као улазне вредности коришћене серије измерених вредности месечних сума падавина у периоду 1946-2005. године на метеоролошким станицама из домена модела. На простору карстног платоа Шушуре добијена је средња годишња сума падавина од (P) 742 mm, тј. на сваки квадратни метар платоа просечан годишњи приход воде од падавина је 742 L/m². Просечна месечна расподела падавина дата је на слици 3.



Слика 3. Хистограм просечних месечних сума падавина за период 1946-2005. г. на платоу Шушуре.

Регистровање издашности извора вршено је у новијем периоду, знатно краћем у односу на мерења падавина. Зато је издашност свих извора по ободу платоа, за исти период (1946-2005), одређена методом водног биланса. За одређивање испаравања воде коришћен је нумерички модел евапотранспирације (Николић, 2004). Улазни подаци су добијени на основу мерења на синоптичкој метеоролошкој станици "Сјеница" која је најрепрезентативнија за истраживано подручје (надморска висина метеоролошке станице: 1180 мм).

Верификација прорачуна вшена је анализом дренарања карстно-пукотинског типа издани на основу мерења издашности на 18 извора по ободу платоа. За све изворе на терену су измерене њихове координате, проверавана је издашност истих у различитим добима године (у сушним и кишним епизодама) и извршене су хемијске анализа вода.

Нешто виши степен евапотранспирације са платоа Шушуре у односу на неке друге карстне терене условљавају: геолошке и хидрогеолошке карактеристике платоа, терен обрастао вегетацијом (око 50 % површине захватају шуме), морфолошке карактеристике (мали нагиб терена) и климатске карактеристике (изражени динамички ефекти). Анализа показује да је за 3 месеца, у хладнијој половини године, просечно истицање извора (Q_{sred}) 21.4 L/s, док је у преосталих 9 месеци просечно истицање (Q_{sred}) 42.2 L/s. Однос $Q_{\text{min}}/Q_{\text{max}}$, просечно за цео период, је 1: 2.4. Просечно минимално истицање износи (Q_{min}) 21.3 L/s, а максимално (Q_{max}) 51.1 L/s. Просечна годишња издашност свих извора износи (Q) 37 Л/с. Да би то било упоредиво са падавинама направљен је еквивалентан прорачун висине "отицаја подземних вода" у мм. За укупни просечан истицај од 37 L/s добија се еквивалент висине отицаја, просечно са платоа Шушуре, 259.3 mm (Табела 1). То значи да од укупних падавина просечно испари око 65 %, а остаје на располагању као распложив ресурс подземних вода, 35 % од просечно излучених падавина.

Табела 1. Однос просечних годишњих падавина, евапотранспирације и издашности извора за плато Шушуре (1946-2005)

Подручје истраживња <i>Study area</i>	Површина <i>Surface area</i> (km ²)	Падавине <i>Rainfall</i> (mm)	Евапотранспирација <i>Evapotranspiration</i> (mm)	"Отицај подземних вода" <i>Groundwater runoff</i> (mm)
Карстни плато Шушуре	4.5	742	482.7	259.3

Распоред и количина атмосферских падавина током године (Слика 3) је такав да део падавина који се инфилтрира, врши прихрањивање карстно-пукотинске издани током целе године. Међусобна повезаност дисолуционо-пукотинских система и величина хидрауличког градијента омогућавају филтрационо кретање вода инфилтрираних са површине терена. Међутим, због запуњености каверни и пукотинских система делувиралним материјалом, овај хидрогеолошки колектор је са израженом ретардационом способношћу. Климатске карактеристике и ретардациона способност стенске масе су елементи који омогућавају током целе године дозирање истицање подземних вода преко сталних извора. На овај закључак упућује и релативно мала осцилација издашности извора током године. Такође, реална је претпоставка да заступљени површински и подземни карстни облици су фосилни, односно, представљају последицу ранијих геолошких, тектонских, климатских и других догађања.

Закључак

Карстни плато Шушуре представља занимљиву геолошку, хидрогеолошку, амбијенталну и еколошку очувану целину. Специфичност овог локалитета последица је његове геолошке грађе, тектонских односа, хидрогеолошких услова, климатских прилика, морфологије терена, вегетационог покривача и водне ерозије, који су са својим типичним карактеристикама заступљени на овом, релативно малом, простору.

Резултати биланса вода за карстни плато Шушуре указују на ретардациону способност средњотријаских кречњака у датим климатским условима. Распоред и интезитет атмосферских падавина омогућава стално алиментирање подземних вода што омогућава обнављање и одржавање динамичких резерви подземних вода у карстно-пукотинској издани. Захваљујући ретардационој способности средњотријаских кречњака, доминантно због делимичне запуњености делувијалним материјалом каверни и пукотина, остварује се дозирано истицање подземних вода из карстно-пукотинског типа издани. Извори преко којих се врши прањњење карстно-пукотинске издани налазе се у зони тектонског контакта средњотријаских кречњака и дијабаз-рожначке формације. Прорачун водног биланса за простор карстног платоа Шушуре, потврдио је реаланост регистрованог односа минималне и максималне издашност извора.

Спроведено билансирање вода коришћењем одговарајућег модела са задовољавајућом тачношћу омогућило је дефинисање вредности за "отицај подземних вода" и евапотранспирације, за карстни плато Шушуре.

Литература:

- Frenzen, G., Heimann, D., Wamser, M. (1987): *Dokumentation des Regionalen Klimamodells (RKM) auf der Basis von FITNAH*. DFVLR-Mitt. 87-07.
- Mojsilović, S., Baklajić, D., Đoković, I. (1978): *List Osnovne geološke karte Sjenica 1:100 000 i Tumač*. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Nikić, Z. (2003): *Hidrogeološka analiza formiranja i regionalizacija malih voda*. Zadužbina Andrejević, Beograd.
- Nikolić, J. (2002): *Isparavanje vode u prirodnim uslovima (geološki, hidrološki i meteorološki aspekti)*. Naučna knjiga i RHMZ Srbije, Beograd.
- Nikolić, J. (2004): *Model odredjivanja evapotranspiracije u heterogenim geoloskim uslovima na primeru gornjeg sliva Zapadne Morave*. Doktorska disertacija odbranjena na Rudarsko-geološkom fakultetu, Beograd, str. 359.
- Živaljević, M., Mirković, M., Stijović, V. (1982): *List Osnovne geološke karte Bijelo Polje 1:100 000 i Tumač*. Savezni geološki zavod, Beograd.

HEMICAL EROSION AND HYDRLOGIC BUDGET
FOR THE SUSURE KARST PLATEAUZORAN NIKIĆ^{*1}, JUGOSLAV NIKOLIĆ², RATKO RISTIĆ¹, DUŠAN STOJADINVIĆ³¹*Faculty of Forestry University of Belgrade, Kneza Visaslava St. 1, 11030 Belgrade, Serbia*²*Republic Hydrometeorological service of Serbia, Kneza Visaslava St. 66, 11030 Belgrade, Serbia*³*Institute the Development of water resources "Jaroslav Cerni", Jaroslav Cernog St. 80, 11226 Belgrade, Serbia*

Abstract: The karst plateau of Susure, about 4.5 km² in surface area, is situated on the Jadovnik eastern offset, western Serbia. The plateau is a morphologic unit higher 15 m to 30 m than the surrounding terrain. The unit consists of crushed and karstified Middle Triassic limestones. Numerous hydrogeological and geomorphologic features of the plateau are attractive for visitors in this economically underdeveloped country. Rocks building up the surrounding terrain are largely peridotites. Surface streams flow neither into nor off the plateau. Atmospheric precipitations discharge to evapotranspiration and filtration underground. More than eighteen constant springs at the limestone/peridotite tectonic contact drain fracture aquifers on the karst plateau border. Measured precipitations and springflows were the input and output data for accounting water budget of an aquifer of Middle Triassic limestones in the Susure plateau.

Keywords: limestone plateau, chemical erosion, hydraulic budget, erosion features, numerical model.

Introduction

A 2000–2005 reconnaissance of Prijepolje, Nova Varos and Sjenica town territories, western Serbia, was part of a project of exploration in natural resources (mineral ore, water, soil, vegetation and others). Mountainous areas of the three municipalities have few scattered settlements and underdeveloped infrastructures, but preserved many attractive scenic features.

One of interesting areas is the Susure karst plateau on an eastern offset of Jadovnik. Specific geological features in such a small area were reason for geological, hydrogeological, geomorphological, speleological and other investigations.

This work presents results of a water budget accounting for the Susure karst plateau, which are consistent with the geological findings.

Study area

The karst plateau of Susure, an area of around 4.5 km², is a morphologic feature that rises 15 m to 30 m above the surrounding terrain. It is situated some 15 km west of Sjenica on an eastern offset of Jadovnik. The highest peak of Jadovnik is Katunić, 1734 m. Jadovnik belongs to the group of Dinaric Mountains. Its ridge is extending northwest of Prijepolje to Sjenica in the southeast. All mountain streams drain into the Lim, to the Drina and empty into the Black Sea.

Mountainous region of the Susure plateau varies in altitude from around 1200 m to over 1650 m. The climate is moderate continental, characterized by mountainous weather and many local specific conditions. The average perennial amount of precipitation is 742

* e-mail: znikic@yubc.net

mm. Annual amounts of precipitation indicate July as the rainiest month, and lowest amounts in January, March and February.

The plateau surface elevations vary between 1350 m and 1395 m, sloping from Lazića Krs (1395 m) in the west to the Grabovačka stream in the southeast (Fig. 1). Top soil over the plateau is locally deeper than 0.5 m on which grows meadow and forest (almost 50 % trees) vegetation. There are no houses, industrial works, roads or any other infrastructure.

Material and methods

Our research was both internal and external and covered first interpretation of aerial photographs of the study area and compilation of published data and available unpublished records. The obtained precipitation data for the period 1946-2005 were from a rain-gauging station nearest to Susure plateau. We prospected an area selected for detailed geological and hydrogeological mapping using remote sensing.

Detailed mapping yielded field information on geology, hydrogeology, geomorphology and erosion in selected locations. Coordinates and heights of characteristic sites were measured using GPS device. Observations were noted and plotted on original topographic maps at scale 1:25,000. The interpretation of collected information was an internal research work, which included classification and presentation of geological, hydrogeological and geomorphological data, and resulted in preparation of thematic maps and a cadastre of hydrogeological, geomorphological and erosion features and occurrences.

Calculation of the spatial evapotranspiration used a numerical model developed on modular approach (Nikolić 2004). The model consists of energy, dynamic and plant physiology effect modules, with parameterization of the influence. The method of parameterization was the one that required hydrogeological approach to the methods of field prospecting. Parameterization of influences from aerodynamic resistance and from superficial resistance of plant species were specific procedures. For example, superficial resistance of plant species simulates the control of vapour flow from plant leaves by means of the parameters available in practice. Aerodynamic resistance calculation is related to varied velocity and roughness of the active surface.

Modularly determined parameters are integrated in the basic model equation, which includes influences of all relevant factors on the process of evapotranspiration: major energy and aerodynamic factors, geologic basement and plant cover. Moreover, the model includes absorption of solar energy that provides latent heat of evaporation on the active surface, then a mechanism of vapour transportation from the evaporation surface, and other parameters controlling the evapotranspiration. The model uses the basic equation developed from a combined approach, with the usually available data of standard measurements.

Domain of the model is defined with respect to the given research area. Evapotranspiration is calculated in points of a network with the horizontal resolution determined so that the elementary area represents sufficiently accurately a homogeneous area. The model resolution for areal step $k = dx = dy = 100$ m assures adequate precision of the calculated integral water evaporation and annulates terrain heterogeneity in local geology and in the incidence of forest ecosystems.

First step in developing the numerical model was updating the database necessary for a grid-system analysis. For each area of $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, the updating included air temperature, vapour pressure, wind velocity, atmospheric pressure, active surface albedo, aerodynamic resistance and superficial resistance of plant cover, which were used as a matrix in the model calculations. The input data measured values from the topographic map or standard physical measurements of the meteorological parameters from climatological stations. Cartographic parameters were from topographic maps at scale 1:25,000. Lower left

corner coordinates, maximum, minimum and mean land elevations, slope and forest coverage were used for each field 100 m × 100 m.

A dynamic analysis of precipitations included inter alia the influence of orography and dynamic factors on precipitations. A proportional value of precipitation, obtained by numerical analysis, was added to each elementary field. For dynamic analysis of precipitations, the three-dimensional no hydrostatic numerical model FITNAH (Frenzen et al. 1987) was used. The model had a specific solution for representing the influence of orography on meteorological parameters (Frenzen et al. 1987; Nikolić 2002). Calculation of the amount of precipitation followed the same methodology.

Research results

Geology of the study area

Geological setting and deformation fabric of the Susure karst plateau and its area wider is complex. The area is part of the Lim tectonic unit characterized by a number of faults in different strike directions (Živaljević et al. 1984). Lithologic constituents of the wider study area are sedimentary, igneous and metamorphic rocks ranging in geologic age from the Mesozoic to the Quaternary.

The oldest rocks are Middle Triassic (T_2^1) limestones and dolomites that build up the Susure plateau (Fig. 1). Sedimentary rocks are stratified dolomitic limestones, grey or reddish marly limestones with layers of red marly brecciated limestone, in a thickness exceeding 200 m (Živaljević et al. 1984). These crushed and karstified rocks have a tectonic contact with the adjacent rock masses, forming a karst-fracture type of aquifer.

Fig. 1. Geological Map of Susure karst plateau (after Base Geological Map at Scale 1:100.000 Sheet Bijelo Polje, in: Živaljević et al. 1982; and revised).

Legend: 1 alluvium; 2 diabase-chert formation with dominant marlstone; 3 diabase-chert formation with dominant sandstone; 4 diabase-chert formation with dominant chert; 5 dunite; 6 limestone and dolomitic limestone; 7 gabbro amphibole; 8 diabasite; 9 geological boundary: identified, inferred, gradual passing; 10 tectonic/erosion boundary: observed, inferred; 11 nappe front; 12 fault: identified, inferred, photogeologically observed; 13 watercourse; 14 constant spring; 15 intermittent spring; 16 tapped spring; 17 swallow hole; 18 cave; 19 bog.

A Jurassic ($J_{2,3}$) diabase-chert formation surrounds the Susure plateau on three sides. A narrow area in the southeast links the plateau with limestones of Giljeva mountain (1471 m). Mojsilović et al. (1978) describe the diabase-chert formation as conformable over Middle Triassic limestones. Radial tectonic movements displaced the diabase-chert formation level with or lower than Triassic limestones (Živaljević et al. 1984). The formation contains sedimentary and magmatic rocks. Sedimentary rocks are sandstone, siltstone, marlstone, chert, claystone and marly limestone, and magmatic constituents are peridotite, gabbro, diabase, spilite and small masses of granodiorite (Mojsilović et al. 1978). Diabase occurs as minor intrusions in the diabase-chert formation

Serpentinized harzburgite that builds up the terrain southwest of the plateau is part of the Ozren peridotite massif. It is schistose on the edge of the massif (Mojsilović et al. 1978).

The newest rocks are of the Quaternary age. These are diluvial and slide debris all over the plateau on which grow diverse plant species.

Detail analysis of satellite images at scales 1:100,000 and 1:50,000 and their interpretation led to reconstruction of the regional structural pattern. Photographs from Landsat 7 ETM, taken from orbit height about 910 km, track 187, strip 29, were interpreted geologically for reconstruction of fault zones, regional fault and secondary ruptures. The method of reconstruction applied for the neotectonic events was the quantitative geomorphologic analysis. Active neotectonic zones, manifested in newer gravitational

sliding and block uplifting, are coincident with the preexisting faults. The karst plateau of Susure belongs to a block of positive potential energy of relief. Higher than the surrounding terrain, the plateau has been more exposed to erosion.

Erosion processes and resulting features

Karst erosion is in progress all over the plateau. Chemical decomposition and physical disintegration of carbonate rocks related to limestone fracturing have produced surface (karren, uvala, swallet, swallow hole, sinkhole nest) and subsurface (stream conduits, caverns and caves) karst features. The subsurface (geological) and surface (topographic) watersheds are not coincident (Nikić 2003).

Tectonic discontinuities allow infiltration of atmospheric precipitations from the ground surface and are preferential routes of groundwater flow. Swallets are karstic depressions of less than 50 m in diameter, less than 20 m deep. Veliki Ponor is a conspicuous karst feature, 30 m deep hole of about 20 m in diameter (Fig. 2), formed in a fault zone near the plateau centre.

Short cave passages may have caverns in ceilings and walls of dozen centimeters to half a metre in diameter. Most of the caverns, however, are filled with diluvial material carried from the surface and deposited by water.

There is no surface flow on the plateau, because there is not any allogenic stream. Atmospheric precipitations empty through evapotranspiration and underground infiltration. Numerous talus heaps have formed at the base of the higher limestone over the lower-lying diabase-chert formation on the plateau border. Rock fragments of varied sizes break off the steep limestone cliffs by the force of gravity, roll down and deposit at the base of the slope. Old scree conceals places of the primary groundwater discharge.

Groundwater drains through eighteen perennial springs, all at the contact of Triassic limestone and Jurassic diabase-chert formation on the border of the plateau. There are also intermittent springs only during high flow episodes. Karstified and crushed Middle Triassic limestone functions as an aquifer and rocks of the diabase-chert formation as a groundwater barrier.

Chemical analyses of water samples from the eighteen springs indicated the same group of hydrocarbonate-calcium water with a mineral rate of about 250 mg/L, pH from 7.1 to 7.5, an evidence of the same derivation from limestone. Ratios of minimum to maximum measured spring flows (Q_{min}/Q_{max}) were within the range from 1 to 2.4.

Fig. 2. Veliki Ponor in the Susure karst plateau.

Groundwater balance for Susure plateau

Information used in accounting the groundwater budget was geological character, hydrogeological properties of rocks, geomorphologic features, physical geographic and climate situations, and kind of vegetation on the plateau. The input data for precipitations were series of monthly amounts for period 1946-2005 taken at meteorological stations within the model perimeter. The obtained mean annual amount of precipitation (P) is 742 mm, or 742 L/m² average annual rainfall upon each square metre of the plateau. Figure 3 gives average monthly distribution of rainfall amounts and frequency.

Springflow records are available for a much shorter period than the precipitation. To cover the same study period (1946-2005) for spring flows, we used the water balance method. A numerical model of evapotranspiration (Nikolić 2004) served to determine the

evaporation. The input data are measurements from the Sjenica synoptic meteorological station, which is representative (altitude 1180 m) of the study area.

Verification of the estimate of groundwater drainage is based on the interpretation of springflow measurements in all eighteen springs on the plateau border. Available data on each spring were its measured coordinates, outflows in dry and wet episodes of the year and chemical analyses of water.

Somewhat higher evapotranspiration on the Susure plateau than in similar karst areas results from the geological and hydrogeological character of the plateau, vegetation (50 % forest), morphology (low slope) and climate (marked dynamic effects). Average spring discharge (Q_{mn}) is 21.4 L/s in the three cold months of the year, and 42.2 L/s in the other nine months. The Q_{min}/Q_{max} average ratio for the whole period was 1:2.4, or Q_{min} 21.3 L/s and Q_{max} 51.1 L/s. Average annual yield (Q) of all springs is 37 L/s. For comparison with the occurred precipitations, an equivalent "groundwater runoff depth" was calculated in mm. The equivalent average runoff discharge from the Susure plateau was 259.3 mm for the total overall discharge of 37 L/s (Tab. 1). This is to say that about 65 % of rainfall evaporates and 35 % of the average atmospheric discharge is the available groundwater resource.

Fig. 3. Histogram of average monthly amounts and frequency of precipitation over Susure plateau for period 1946-2005.

Distribution of the rainfall amount and frequency over the year (Fig. 3) is such that infiltration continuously recharges the fracture aquifer. Communicating dissolution-fracture systems and steep hydraulic gradients allow infiltration of water from the ground surface. However, caverns and fractures are filled with diluvial materials that slow water flow. The prevailing climate and retarded groundwater flow through rocks are controlling the continuous moderate discharge at springs. The relatively small fluctuation range of spring flows during the year leads to the same inference. In addition, a reasonable assumption is that the surface and subsurface karst features were fossil forms inherited from the preceding geological, tectonic, climatic or other events.

Table 1. Relationships of average annual amounts of precipitation, evapotranspiration and springflow for the Susure plateau (1946-2005).

Conclusion

The karst plateau of Susure is an interesting geological, hydrogeological, environmental and ecologically preserved feature. Its distinction has results from the geological fabric, tectonic relationship, hydrogeologic pattern, climatic circumstances, morphology, vegetation and erosion in this, relatively small, area.

Water balance for the Susure plateau indicates a retardation capacity of Triassic limestone in the prevailing climate. Distribution of the atmospheric discharge amounts and frequency allows continuous groundwater alimentation and consequent recharge and maintenance of the groundwater dynamic reserve. Owing to the retardation capacity of Middle Triassic limestone, resulting mainly from the partly filled caverns and fractures with diluvial materials, groundwater drains at a moderate rate from the karst-fractured rocks. Springs draining the aquifer are located at the contact of Middle Triassic limestone and a diabase-chert formation. A hydrologic balance for the Susure karst plateau confirmed the established ratio of the minimum and maximum spring flows.

Water budget accounting on a relevant model allowed a satisfactory estimate of the "groundwater runoff" and evapotranspiration for the Susure plateau.

References

See References on page 76