Драгољуб Бајић[1], Бранимир Лазић[2]
Милица Шикман[3], Матија Стојановић[4]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VIK26147B

ЗНАЧАЈ КАРСТНОГ ВРЕЛА МОКРА ЗА ОДРЖИВО ВОДОСНАБДЕВАЊЕ ГРАДА НИША

Резиме: Карстно врело Мокра представља важан ресурс у систему водоснабдевања града Ниша. У раду су анализирани хидрогеолошки услови, режим издашности и утицај падавина применом кроскорелационе анализе и ауторегресивно-кросрегресивног модела. Резултати указују на сложено функционисање карстног система, са брзим токовима кроз развијене канале и споријим пражњењем акумулационих делова издани.

Високо слагање измерених и симулираних вредности потврђује применљивост модела за краткорочно прогнозирање издашности.

Врело Мокра има стратешки значај за одрживо водоснабдевање Ниша, уз неопходност континуираног мониторинга, заштите сливног подручја и усклађивања захватања са природном динамиком карстне издани.

Кључне речи: карстна издан, режим подземних вода, хидролошки модел

THE SIGNIFICANCE OF THE MOKRA KARST SPRING FOR THE SUSTAINABLE WATER SUPPLY OF THE CITY OF NIŠ

Abstract: The Mokra karst spring represents an important resource within the water supply system of the City of Niš. This study analyses the hydrogeological conditions, discharge regime, and influence of precipitation using cross-correlation analysis and an autoregressive cross-regressive model. The results indicate complex karst-system functioning, with rapid flow through developed conduits and slower drainage from storage zones within the aquifer.

The strong agreement between measured and simulated values confirms the model's applicability for short-term discharge forecasting.

The Mokra spring is of strategic importance for the sustainable water supply of Niš, requiring continuous monitoring, protection of the recharge area, and abstraction aligned with the natural dynamics of the karst aquifer.

Key Words: karst aquifer, groundwater regime, hydrological model

[1] *Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, dragoljub.bajic@rgf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4839-1093*

[2] *Хидрогеоцентар д.о.о. Београд, hidrogeocentar@yahoo.com*

[3] *Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, milica.stepanovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID: 0009-0006-1594-3898*

[4] *Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, matijastojanovic54@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0797-8162*

1. Увод

Водоснабдевање урбаних средина представља једно од најважнијих питања јавног здравља, просторног развоја и управљања природним ресурсима [1]. Поуздан систем водоснабдевања мора истовремено обезбедити довољне количине воде, одговарајући квалитет, континуитет испоруке и отпорност на природне и антропогене поремећаје. У условима климатских промена, продужених сушних периода, неравномерне расподеле падавина и растућих потреба становништва, ослањање на један тип изворишта може повећати рањивост градских водоводних система. Због тога савремени приступ подразумева комбиновање више изворишта и њихово функционално повезивање у јединствен систем.

Град Ниш и околна насеља снабдевају се водом преко сложеног Нишког водоводног система, који чине међусобно повезани системи „Медиана“, „Студена“, „Љубераћа-Ниш“ и „Моравски водовод“. У оквиру система „Љубераћа-Ниш“ налазе се карстна врела Крупац, Мокра, Дивљана и Љубераћа. Таква структура водоснабдевања пружа одређени степен сигурности, јер омогућава расподелу захватања између више изворишта и прилагођавање променама њихове издашности.

Карстно врело Мокра има посебно место у овом систему [2, 3]. Каптажа је изграђена у периоду од 1986. до 1989. године, а изворište се од 1989. користи за водоснабдевање Ниша. Врело представља природни почетак Мокрањске реке, леве притоке Коритничке реке, и формирано је на контакту карстификованих карбонатних стена и мање пропусних геолошких јединица. Његов значај не произлази само из количине воде која се може захватити, већ и из географског положаја, повезаности са регионалним цевоводом и улоге у укупној поузданости Нишког водоводног система.

Карстна изворишта представљају истовремено веома вредне и веома осетљиве водне ресурсе. Њихова предност огледа се у могућности појаве великих протицаја, често уз повољне физичко-хемијске карактеристике вода. Њихова слабост је у томе што пукотинско-каналски систем омогућава брзо кретање воде, због чега је природна способност филтрације мања него код других типова издани. Загађујуће материје са површине могу релативно брзо доспети до изворишта, посебно после интензивних падавина. Из тог разлога одрживо коришћење карстног врела захтева истовремено познавање његове издашности, динамике прихрањивања, квалитета воде и рањивости слива.

Предмет овог рада јесте анализа режима истицања карстног врела Мокра и његовог значаја за одрживо водоснабдевање града Ниша. Основни циљ је утврђивање зависности између атмосферског прихрањивања и промена издашности врела применом стохастичких метода анализе временских серија.

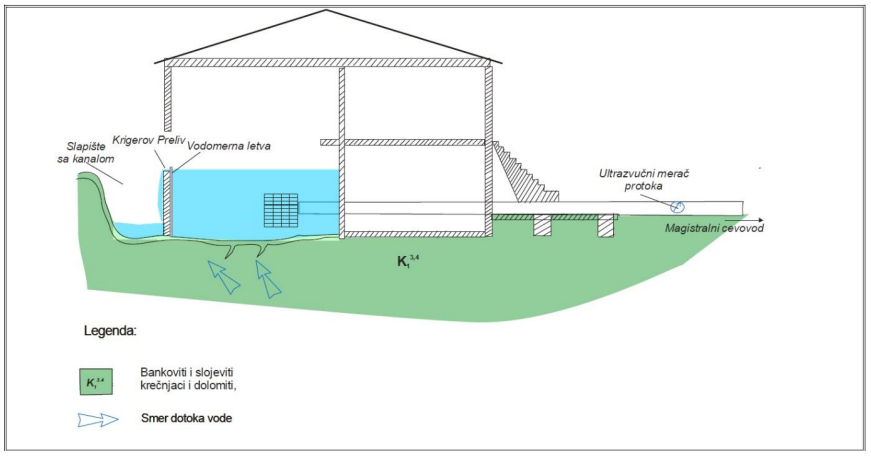
Посебна пажња посвећена је изради хидролошког модела заснованог на кроскорелационој анализи и ауторегресивно-кросрегресивном моделу, ради сагледавања начина функционисања карстног система и могућности краткорочног прогнозирања издашности. Добијени резултати разматрани су у контексту поузданог и одрживог управљања изворištем Мокра као важним делом регионалног система „Љубераћа-Ниш“.

2. Истражно подручје

Врело Мокра налази се у југоисточној Србији, у подножју источних падина Суве планине, на левој долинској страни Коритничке реке. Административно припада општини Бела Паланка. Географски положај изворишта омогућава његово укључивање у систем „Љуберађа-Ниш“, којим се вода транспортује према Нишу.

Рељеф подручја одређен је односом планинског масива Суве планине и долинских система Коритничке и Нишавске котлине. Геолошку грађу ширег подручја врела Мокра претежно чине карбонатне стене мезозојске старости, пре свега кречњаци, који су услед тектонске испуцалости и интензивне карстификације развили изражену пукотинско-карстну порозност. У таквој средини формирана је карстна издан, која се прихрањује инфилтрацијом атмосферских падавина и отапањем снега. Подземне воде крећу се кроз систем пукотина и карстних канала, а њихово концентрисано истицање на врелу Мокра условљено је контактом пропусних карбонатних и слабије пропусних стена.

Каптажа (слика 1) је изведена тако да омогућава захватање воде за регионални водоводни систем, уз обавезу остављања дела протока за потребе низводног екосистема и локалног становништва.



Слика 1. Каптажа врела Мокра
Figure 1. Mokra Spring Intake

3. Методологија

Методологија рада заснива се на теренским хидрогеолошким истраживањима и мерењима, као и анализи и синтези климатских и хидролошких података о карстном врелу Мокра, са циљем утврђивања начина функционисања карстног хидрогеолошког система и његове реакције на атмосферско прихрањивање [4].

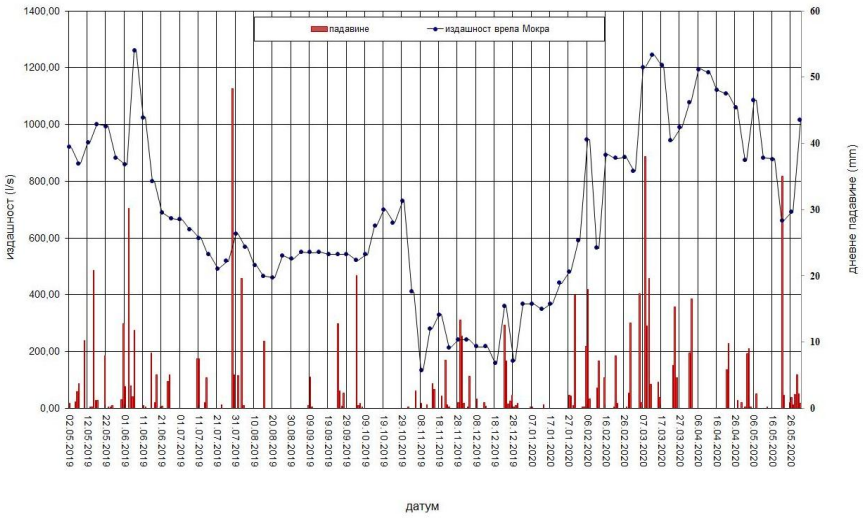
Главни методолошки поступак обухватао је израду хидролошког модела режима подземних вода [5]. Због изражене хетерогености и анизотропности карстне издани

примењене су стохастичке методе анализе временских серија, односно ауто-корелациона и кроскорелациона анализа, као и ауторегресивно-кросрегресивни модел (ARCR). Кроскорелационом анализом испитана је временска зависност између падавина и издашности врела, док је ARCR модел коришћен за симулацију и краткорочно прогнозирање дневних вредности истицања.

Резултати хидролошког моделирања приказани су кроскорелограмом падавина и издашности, упоредним дијаграмом измерених и симулираних протицаја и корелацијом моделованих и осмотрених вредности. Поузданост модела оцењена је на основу степена слагања измерених и симулираних вредности и вредности коефицијента корелације.

4. Резултати и дискусија

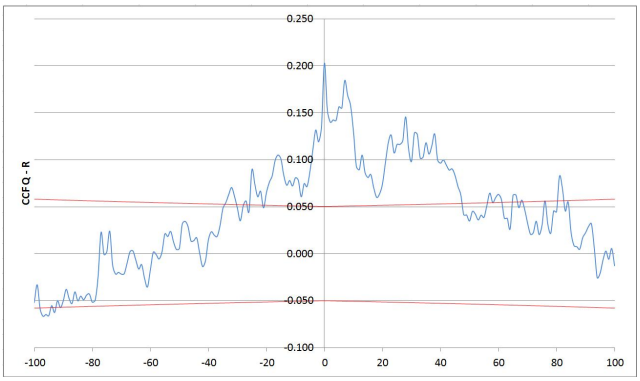
Током режимских осматрања која су вршена од маја 2019. до маја 2020. године минимална регистрована издашност врела износила је 132,30 l/s, максимална 1260,19 l/s, док је средња издашност износила 680,27 l/s (слика 2).



Слика 2. Дијаграм издашности врела Мокра и падавина током режимских осматрања
Figure 2. Discharge diagram of Mokra Spring and precipitation during the monitoring period

Због сложене структуре карстне издани, изражене хетерогености и анизотропности водоносне средине, режим истицања врела Мокра није могуће у потпуности описати класичним детерминистичким хидродинамичким моделима. Из тог разлога, за анализу временске зависности између падавина и издашности врела примењени су стохастички поступци, који обухватају кроскорелациону анализу и ауторегресивно-кросрегресивни модел. На овај начин омогућена је анализа брзине реакције карстног система на прихрањивање, временског трајања његовог одзива и поузданости краткорочног прогнозирања издашности. Кроскорелограм дневних вредности падавина и

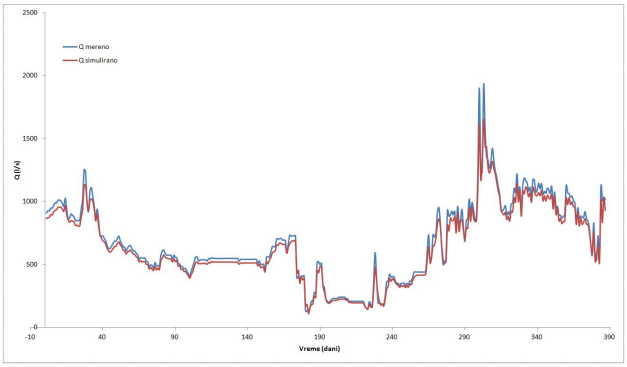
издашности врела Мокра указује на сложену реакцију карстног хидрогеолошког система на атмосферско прихрањивање (слика 3).



Слика 3. Кроскорелограм дневних вредности истицања карстног врела Мокра и дневних вредности падавина са к.с. Димитровград

Figure 3. Cross-correlogram of daily discharge values of the Mokra karst spring and daily precipitation totals recorded at the Dimitrovgrad climatological station

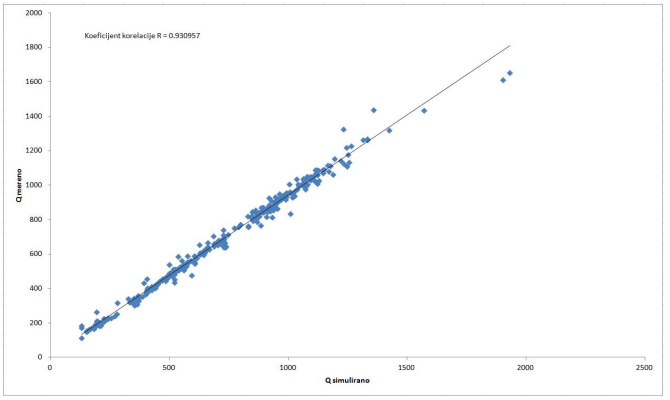
Почетни максимум корелације потврђује постојање релативно брзог транспорта дела инфилтриране воде кроз развијене карстне канале и пукотине. Накнадни мањи пикови и продужено трајање корелационог одзива указују на истовремено постојање споријих токова кроз ситније пукотине и слабије пропусне делове карстног масива. Појава пикова у каснијим временским помацима може се повезати и са вертикалном зоналношћу карстног система, као и са одложеним утицајем отапања снежног покривача. Резултати показују да се део воде брзо креће кроз крупније карстне пукотине и канале, док се други део спорије ослобађа из акумулационих делова карстне издани.



Слика 4. Упоредни дијаграм измерених (плава линија) и симулираних (црвена линија) дневних вредности истицања подземних вода карстног врела Мокра

Figure 4. Comparison of measured (blue line) and simulated (red line) daily groundwater discharge values of the Mokra karst spring

Са слике 4, упоредни приказ измерених и симулираних вредности показује да ARCR модел задовољавајуће репродукује режим издашности током периода средњих и ниских вода. Највећа одступања јављају се током наглих пораста протицаја, када модел не успева у потпуности да обухвати динамику високих вода. Ова одступања могу се објаснити различитим механизмима прихрањивања, посебно постепеним отапањем снега, интензивним краткотрајним падавинама, променљивом влажношћу незасићене зоне и сезонским губицима на евапотранспирацију. Упркос овим ограничењима, модел веродостојно описује основни тренд пражњења карстне издани, због чега се може сматрати корисним инструментом за краткорочну прогнозу издашности и оперативно управљање изворишем.



Слика 5. Корелација измерених и симулираних вредности истицања подземних вода карстног врела Мокра (ARCR модел)

Figure 5. Correlation between measured and simulated groundwater discharge values of the Mokra karst spring from using the ARCR model

С друге стране, корелација измерених и симулираних вредности потврђује добро слагање резултата и задовољавајућу поузданост примењеног модела (слика 5). Висока вредност коефицијента корелације (R=0,930957) указује на снажну статистичку повезаност моделираних и осматраних дневних протицаја. Расипање појединих тачака најизраженије је у области високих издашности, што је у складу са уоченим ограничењем модела при симулацији наглих хидролошких догађаја. Ипак, висок степен слагања потврђује да модел на задовољавајући начин описује доминантне законитости функционисања карстног система и да може представљати поуздану основу за процену краткорочних промена издашности врела Мокра.

Синтезом резултата кроскорелационе анализе и ARCR моделирања може се закључити да режим истицања врела Мокра одражава сложено функционисање карстног хидрогеолошког система, у којем се смењују бржи и спорији механизми преноса и пражњења подземних вода. Примењени модел задовољавајуће описује основне закономерности промене издашности и показује добру применљивост у условима средњих и ниских вода, док су одступања израженија током наглих хидролошких догађаја. Развијени хидролошки модел представља основу за

краткорочно прогнозирање издашности врела Мокра, оптимизацију режима захватања и унапређење оперативног управљања изворишем. Његова примена може допринети правовременом реаговању у периодима високих и ниских вода, поузданијем планирању расположивих количина воде и јачању отпорности система водоснабдевања града Ниша.

5. Закључак

Карстно врело Мокра има значајну улогу у одрживом водоснабдевању града Ниша, јер представља важан део регионалног система „Љубераћа-Ниш“ и доприноси сигурности, континуитету и флексибилности снабдевања водом. Његов значај не огледа се само у расположивој количини воде, већ и у могућности да, у оквиру повезаног водоводног система, ублажи последице сезонских колебања, сушних периода и промена оптерећења других изворишта.

Одрживо коришћење врела Мокра мора бити засновано на усклађивању захватања воде са природном динамиком карстне издани. То подразумева континуирано праћење режима истицања, контролу квалитета воде, очување еколошки прихватљивог протока и доследну примену мера заштите изворишта. Посебну пажњу треба посветити сливном подручју, јер развијена пукотинско-карстна порозност омогућава брзо преношење воде, али и потенцијалних загађујућих материја до врела.

Научни допринос рада огледа се у примени стохастичког приступа за анализу функционисања карстног хидрогеолошког система. Повезивањем кроскорелационе анализе и ауторегресивно-кросрегресивног модела омогућено је сагледавање односа између атмосферског прихрањивања и режима истицања, као и процена могућности краткорочног прогнозирања издашности. На тај начин врело Мокра није разматрано само као појединачни водозахватни објекат, већ као динамичан природни систем чије понашање зависи од сложених процеса прихрањивања, акумулирања и пражњења подземних вода. С друге стране, допринос академској заједници огледа се у могућности примене представљеног методолошког приступа на другим карстним изворištима која се користе за јавно водоснабдевање. Рад указује на значај повезивања хидрогеолошких истраживања, анализе временских серија, управљања водним ресурсима и заштите животне средине. Овакав интердисциплинарни приступ може допринети развоју поузданијих модела управљања карстним изворištима и унапређењу њихове отпорности на климатске и антропогене притиске. Врело Мокра се, стога, може посматрати као стратешки водни ресурс чија дугорочна вредност зависи од равнотеже између коришћења и заштите. Само управљање засновано на научним подацима, редовном мониторингу и превентивној заштити може обезбедити да ово изворište остане поуздан ослонац одрживог водоснабдевања града Ниша.

Захвалница

Аутори изражавају захвалност Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на подршци научним истраживањима, која су од суштинског значаја за развој друштва заснованог на знању (Уговор бр. 451-03-34/2026-03/200126).

6. Литература

[1] Бајић Д, Степановић М, Интегрисани приступ очувању јавног здравља и водних ресурса Бање Луке: заштита изворишта подземних вода „Суботица“. *Техника*, 80, 4, 389-395. https://doi.org/10.5937/tehnika2504389B, 2025.

[2] Petrović B, Marinović V. Quantitative and geochemical characterization of the Mokra karst aquifer (SE Serbia) by time series analysis and stochastic modelling. - In: Andreo B., Barberá J.A., Durán-Valsero J.J., Gil-Márquez J.M., Mudarra M. (eds), EuroKarst 2022, Málaga. Advances in Karst Science. Springer, *Cham*, 83-92. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16879-6_8, 2023

[3] Marinović V, Petrović B, Stochastic simulation and prediction of turbidity dynamics in karst systems. Case study: Mokra karst spring (SE Serbia). *Review of the Bulgarian Geological Society*, 82, 222-224, 2021.

[4] Brassington R. *Field hydrogeology*, 3rd edn, 276 pp. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.

[5] Goldscheider N, Drew D, (eds.) Methods in karst hydrogeology. – Taylor & Francis/Balkema, London, 264 pp, 2007.