

Evaluating Hydrodynamic Behavior and Karst Development in the Gareen Anticline (Case Study: Alashtar and NourAbad Karstic Aquifers)

Ramin Hatamifard ^{1*}, Amir Saffari ², Mojtaba Yamani ³, Haji Karimi ⁴

¹ PhD. Candidate in Geomorphology at Kharazmi University, Tehran, Iran

² Associate Professor in Geomorphology at Kharazmi University, Tehran, Iran

³ Professor in Geomorphology at University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Associate Professor in Hydrogeology at Ilam University, Ilam, Iran

Abstract

Studying hydrodynamic and hydro-chemical properties of springs can be an indicative of the karst development in a karst media. The aim of this study is to determine the hydrodynamic behavior of karstic aquifers and karstification degree of the Alashtar and Nourabad regions by analyzing the physicochemical properties and falling limb of springs hydrographs analysis. To achieve goals of this research, 10 main draining springs were chosen. After the survey of geomorphological, climatic, hydrodynamic, hydro chemical, physiographic properties and several field study, by using Malic and Vojtkova method, the karstification degree was determined. According to the Hydrodynamic Study, Amir, Chenareh and Honam springs and Abdolhosseini and Niaz springs have 2.5-3 degree of karstification. Also the groundwater flow sub-regimes type is the combination of two or more sub-regimes with merely laminar flow characterized by different discharge. Zaz and Ahangaran springs have 4 and 4.3 degree of karstification, respectively, and discharge hydrogram is composed of a sub-regime with turbulent flow and a sub-regime with laminar flow. Golembahri, Laghari and Teymour springs have 5.5 degree of karstification and complex discharge regime, a combination of one sub-regime with turbulent flow and two sub-regimes with laminar groundwater flow. According to the hydrochemical analysis, increasing magnesium ions (Mg), higher cation and anion, increasing in Electrical conductivity (EC) and total hardness (TH) and also lowering the ca/Mg in the Alashtar unit, indicate the presence of dolomitic karstic aquifers, small joints, more contact between water and rock and finally less evolution of karst in Alashtar.

Key words: The Gareen Anticline, Karst, Recession Curve, Hydrodynamic Behavior.

* rhatamifard80@gmail.com

ارزیابی رفتار هیدرودینامیکی و توسعه‌یافتگی کارست در محدوده‌ی تاقدیس گرین (مطالعه‌ی موردی: بلوک‌های الشتر و نورآباد)

رامین حاتمی‌فرد^{*}، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

امیر صفاری، دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

مجتبی یمانی، استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

حاجی کریمی، دانشیار هیدروژئولوژی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

وصول: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵، صص ۳۴-۱۵

چکیده

ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی و تغییرات کمی و کیفی چشمه‌ها نشان‌دهنده‌ی میزان توسعه و تکامل کارست یک منطقه است. هدف این پژوهش، شناخت رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی و بررسی میزان توسعه‌یافتگی کارست بلوک‌های الشتر و نورآباد با بهره‌گیری از تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌هاست. برای این منظور در هر بلوک پنج چشمه انتخاب و پس از بررسی ویژگی‌های ژئومورفولوژی، اقلیمی، هیدرودینامیکی، هیدروشیمیایی، فیزیوگرافی و چند مرحله پیمایش میدانی، میزان توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان هر چشمه براساس روش مالیک و وچکتوا مشخص شد. با توجه به ارزیابی هیدرودینامیکی، درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان چشمه‌های امیر، چناره و هنام (بلوک الشتر) و چشمه‌های عبدالحسینی و نیاز (بلوک نورآباد) بین ۲/۵ تا ۳ است و سیستم غالب جریان افشان و زیررزمی‌های خطی دارند. درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان چشمه‌ی زز و آهنگران (بلوک الشتر) به ترتیب ۴ و ۴/۳ و سیستم جریان در آنها از نوع مجرای - افشان است. آبخوان چشمه‌های گلم‌بحری، لاغری و تیمور (بلوک نورآباد) با درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست ۵/۵ و سیستم جریان در آنها مجرای است. براساس تحلیل‌های هیدروشیمیایی در بلوک الشتر افزایش یون منیزیم، زیادبودن آنیون‌ها و کاتیون‌ها، هدایت الکتریکی بسیار، سختی زیاد آب و کم‌بودن Ca/Mg در مقایسه با بلوک نورآباد، نشان‌دهنده‌ی آبخوان‌های کارستی دولومیتی، غلبه‌ی درز و شکاف‌های کوچک، ارتباط زیاد بین سنگ و آب ذخیره‌شده و جوانی کارست در بلوک الشتر است. نتایج تحلیل‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی نشان می‌دهد سیستم کارست در نورآباد نسبت به الشتر از توسعه و تکامل بیشتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تاقدیس گرین، کارست، منحنی فرود هیدروگراف، رفتار هیدرودینامیکی.

مقدمه

کارست حاصل عملکرد فعالیت‌های انحلالی (فیزیکی و شیمیایی) در گستره سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) و همچنین سنگ‌های سولفات و کلروره است و متأثر از عوامل اقلیمی و زمین‌شناسی توسعه می‌یابد (Ford and Williams, 2007: 125)؛ به بیان دیگر مناظر کارستی به واسطه انحلال سنگ‌های کربناته با آب‌های غنی از دی‌اکسیدکربن تشکیل می‌شوند (Li et al, 2016: 65). عوامل و فرایندهای مختلفی از جمله توپوگرافی، سنگ‌شناسی، ویژگی‌های تکتونیکی، فرایندهای ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی و عوامل اقلیمی علاوه بر تأثیر در تکامل کارست، نقش مهمی در نفوذپذیری، شکل‌گیری و تغذیه منابع آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند (Beynen et al, 2012: 870). آبخوان‌های کارستی دربرگیرنده نواحی کارستی در سنگ‌های کربناته است که توسعه کم یا زیاد کارست را به ترتیب در آبخوان با جریان افشان یا جریان مجرای ایجاد می‌کند. این آبخوان‌ها، منبع تأمین آب شرب ۲۵ درصد جمعیت جهان شناخته می‌شوند (Ford and Williams, 2007: 112; Geoppert et al, 2011: 190). آبخوان‌های کارستی به دلیل داشتن شبکه به هم پیوسته مجرای برای انتقال آب بسیار مهم‌اند (Li et al, 2016: 826) و غال با جریان متمرکز خود را به یک یا چندین چشمه تخلیه می‌کنند (Kuha et al, 2012: 46). تغییرات کمی و کیفی چشمه‌های کارستی تا حدود زیادی بیان‌کننده ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی سامانه‌های کارستی منطقه است (عبدی‌نژاد، ۱۳۹۲: ۲۷۲). در این زمینه با بهره‌گیری از نمودار هیدروگراف (آب‌نمود)

چشمه‌ها، داده‌های جالب توجهی درباره سامانه زهکشی محیط‌های درز و شکاف‌دار و مجرای به دست می‌آید (Chang et al, 2015: 52). آبنمود از نقطه مشخصی به نام نقطه اوج (در پایان دوره مرطوب)، آغاز شاخه فروکش، تغییر جهت می‌دهد و از آن به بعد آبدهی با روند خاصی کاهش می‌یابد. این بخش از آبنمود را منحنی فروکش (تاریسمان) می‌گویند (Kresic and Bonacci, 2010: 143; Kresic and Stevanovic, 2010: 16; Ford and Williams, 2007: 68). کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹: ۲۷۹). از مزایای مهم تجزیه و تحلیل منحنی فرود، محاسبه مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی متناسب به سازوکارهای زهکشی مانند ضریب فرود، حجم دبی اولیه، مجموع کل جریان سریع و پایه و شناسایی زیررژیم‌هاست (Kresic and Stevanovic, 2010: 19; Malík and Vojtková, 2012: 2249; Li et al, 2016: 827).

چشمه‌ها و سراب‌های محدوده تاقدیس گرین حیات اجتماعی و اقتصادی شهرهایی همچون نورآباد، الشتر، دشت سیلاخور، نهاوند و مجموعه‌های روستایی متعددی را به خود وابسته کرده است؛ به علاوه منابع آب این تاقدیس، سرچشمه رودخانه‌های کشکان و سیمره محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت حیاتی این منابع، شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی و میزان توسعه‌یافتگی سامانه کارستی آبخوان‌های محدوده تاقدیس گرین ضروری است.

پیشینه پژوهش

توسعه هرچه بیشتر ساختارهای زمین‌شناسی، گسل‌ها، درزه‌ها و شکاف‌ها زمینه نفوذ بیشتر نزولات

روش‌شناسی پژوهش

ازجمله روش‌های مطالعه چشمه‌های کارستی، تحلیل پارامترهای کمی و کیفی، محاسبه حجم ذخیره دینامیکی، زمان مرگ چشمه‌ها، منحنی تارسمان و ضریب فرود است. در پژوهش حاضر از مطالعات کتابخانه‌ای و پیشینه پژوهشی، آمار کمی و کیفی چشمه‌های کارستی منتخب، نقشه‌های زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰)، توپوگرافی (۱:۵۰۰۰۰) و سالنامه آماری ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک استفاده شده است؛ به علاوه چندین مرحله پیمایش میدانی به منظور شناسایی اشکال و لندفرم‌های کارستی، گسل‌ها و شکستگی‌ها انجام شده است.

به منظور تجزیه و تحلیل هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی و دستیابی به اهداف پژوهش، با توجه به وجود آمار کمی و کیفی، تعداد ۱۰ چشمه در بلوک‌های الشتر (چشمه‌های امیر، آهنگران، چناره، زز و هنام) و نورآباد (چشمه‌های عبدالحسینی، گلم‌بحری، لاغری، نیاز و تیمور) انتخاب شدند. توضیح اینکه طی بازدیدهای میدانی در محدوده تاق‌دیس گرین چشمه‌های متعددی از نوع گسلی و درز و شکافی مطالعه شدند که آبخوان بیشتر آنها در سازندهای کارستی قرار دارد. از بین این چشمه‌ها، تعداد ۱۰ چشمه عمده انتخاب شدند که به‌طور منظم شرکت آب منطقه‌ای لرستان آنها را تجزیه و تحلیل کمی و کیفی می‌کند. پس از تهیه و دسته‌بندی آمار آبدهی چشمه‌های برگزیده در دوره‌ای ۱۵ ساله (۱۳۹۴-۱۳۸۰)، منحنی هیدروگراف این چشمه‌ها ترسیم و سپس شاخه فرود منحنی هرکدام از چشمه‌ها بررسی شد. تجزیه و تحلیل شاخه فرود (تارسمان) چشمه‌ها، اختصاصاً بر پایه کار مایلت (۱۹۰۵) انجام گرفته

جوی و تحول مجاری کارستی را فراهم می‌کند که در نهایت به ذخیره منابع آب کارستی می‌انجامد. مطالعات زیادی در این زمینه انجام گرفته است؛ ازجمله کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹؛ قبادی و همکاران، ۱۳۹۰؛ قربانی و اوتق، ۱۳۹۱؛ ناصری و علیخانی، ۱۳۹۱؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Pardo-Iguzquiza et al, 2011; Radulovic et al, 2012; Tirla et al, 2013; Pedrera et al, 2015, Kaufmann, 2016; Wang et al, 2016; Gan et al, 2017.

علاوه بر آن مطالعات پایه‌ای متعددی نیز در زمینه ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی چشمه‌های کارستی و تحلیل ارتباط آبنمود چشمه‌ها و توسعه کارست صورت گرفته است (Maillet, 1905; Coutagne, 1968; Mangin, 1975; Atkinson, 1977; Padilla et al, 1994). همچنین در سال‌های اخیر پژوهش‌های دیگری نیز انجام گرفته است (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸؛ بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵؛ باقری و همکاران، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴؛ خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۹۳؛ انتظاری و همکاران، ۱۳۹۴؛ ابراهیمی و سیف، ۱۳۹۴؛ رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Malik and Karimi et al, 2005; Vojtkova, 2012; Caetano Bicalho and Batiot-Guilhe, 2015; Acero et al, 2015; Thomas et al, 2015; Malagò et al, 2016, Chang et al, 2015; Li et al, 2016).

هدف این پژوهش، بررسی و شناخت رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی و مقایسه میزان تکامل کارست در بلوک‌های الشتر و نورآباد (محدوده تاق‌دیس گرین در استان لرستان) با استفاده از تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌هاست.

در این معادله، β ضریب فروکش چشمه در جریان‌های آشفته است. سایر پارامترها شبیه به معادله ۱ است.

حجم آب ذخیره‌شده در بالای تراز چشمه‌های آهکی، از نقطه اوج هیدروگراف یا شروع منحنی فروکش محاسبه می‌شود (معادله ۵) (Kresic and Stevanovic, 2010: 71).

$$V_0 = V_1 + V_2 + V_3 \left[\frac{Q_1}{\alpha_1} + \frac{Q_2}{\alpha_2} + \frac{Q_3}{\alpha_3} + \right] .86400s [m^3] \quad \text{معادله ۵}$$

یکی دیگر از ضرایب تعیین‌کننده ویژگی‌های هیدرودینامیکی چشمه‌ها، ضریب تغییرات دبی است.

$$CV = \frac{S}{X} .100 \quad \text{معادله ۶}$$

در این معادله، CV ضریب تغییرات دبی، S انحراف معیار دبی و X میانگین دبی سالانه است. پس از ترسیم و تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های منتخب، با بهره‌گیری از روش مالیک و وجکتوا (جدول ۱)، درجه توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان‌های محدوده تاق‌دیس گرین مشخص شد. از بررسی‌های هیدروشیمیایی به‌منظور تعیین منشأ کارستی بودن آب چشمه‌های مدنظر استفاده شده است. برای انجام آنالیزهای هیدروشیمیایی از مجموع آنیون‌ها (بی‌کربنات، کلر و سولفات)، کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم)، هدایت الکتریکی (EC)، میانگین مواد جامد محلول (TDS) و سختی کل (TH) استفاده شده است.

است. در رابطه زیر فرض بر این است که تخلیه چشمه تابعی از حجم آب ذخیره‌شده در مخزن است (معادله ۱). این رابطه یک تابع‌نمایی است که فورکاسویچ و پالوک^۱ (۱۹۶۷) برای تجزیه و تحلیل زیررژیم‌های خطی پیشنهاد داده‌اند.

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad \text{معادله ۱}$$

در این معادله، Q_t آبدی در زمان t (برحسب متر مکعب در ثانیه)، Q_0 آبدی قبلی در زمان t_0 زمان طی شده بین Q_t و Q_0 (برحسب روز)، e پایه لگاریتم طبیعی (عدد نپرین) و α ضریب فروکش (تخلیه) چشمه است و به قابلیت انتقال و آبدی ویژه آبخوان بستگی دارد (Ford and Williams, 2007: 198; Kresic and Stevanovic, 2010: 253; Malik and Vojtkova, 2012: 2248). ضریب (فروکش) α به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (معادله ۲ و ۳):

$$\Delta t = t - t_0 \quad \text{معادله ۲}$$

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0.4343 . \alpha . \Delta t \quad \text{معادله ۳}$$

این ضریب بیان‌کننده توانایی سفره برای آزادکردن آب و نتیجه‌ای از ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی محیط، یعنی تداخل مؤثر و ضریب قابلیت انتقال آبخوان است (Ford and Williams, 2007: 211; Kresic and Stevanovic, 2010: 60). در یک آبخوان علاوه بر جریان‌های خطی، ممکن است جریان‌ها و زیررژیم‌های آشفته‌ای نیز وجود داشته باشند (معادله ۴) (Malik and Vojtkova, 2012: 2250).

$$Q_t = Q_0 (1 - \beta t) \quad \text{معادله ۴}$$

¹ Forkasiewicz and Paloc

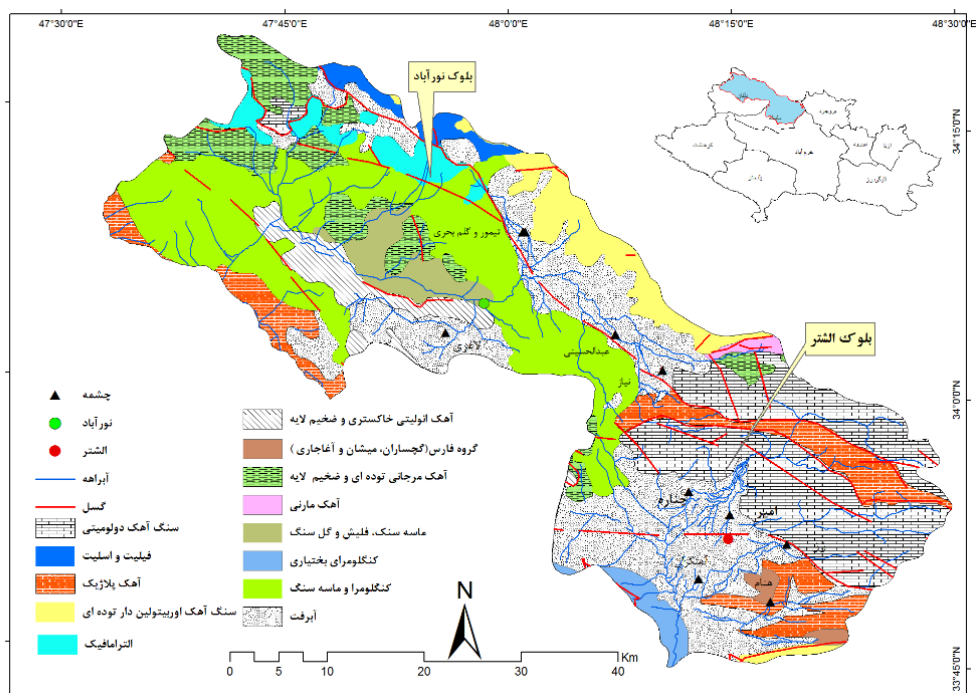
جدول ۱. درجه‌ی توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان‌های کارستی (Malik and Vojtkova, 2012: 2250)

ویژگی‌های کارست‌شدگی	مشخصات منحنی فرود	رابطه‌ی منحنی فرود	زیررژیم‌های جریان	درجه‌ی توسعه‌ی کارست
مناطق خردشده‌ی گسلی با گردش تقریباً عمقی آب	$\alpha_1 > 0.001$ $\alpha_1 = 0.001-0.0025$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t}$	فقط یک زیررژیم خطی با مقادیر کم α_1	۰/۵ ۱
نواحی تکتونیک و نفوذپذیری زیاد	$\alpha_1 = 0.0025-0.007$ $\alpha_1 > 0.007$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t}$	فقط یک زیررژیم خطی با مقادیر زیاد α_1	۲ ۲/۳
آبخوان‌ها با شبکه‌ی منظمی از درز و شکاف کوچک همراه با افزایش نفوذپذیری	$\alpha_1 < 0.0024$ و $\alpha_2 < 0.033$ $\alpha_1 < 0.0024$ یا $\alpha_2 < 0.033$ $\alpha_1 = 0.0024-0.0045$; $\alpha_2 = 0.033-0.067$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t}$	ترکیبی از دو یا چند زیررژیم خطی با ضرایب تخلیه متفاوت، α_1 و α_2 با مقادیر کمتر	۲/۵ ۲/۷ ۳
توسعه‌ی نامنظم آبخوان، غلبه‌ی شکاف‌های بزرگ و وجود مجراهای کوچک، وجود جریان‌های آشفته‌ی کوتاه‌مدت	$\alpha_1 = 0.0024-0.0043$ و $\alpha_2 = 0.06-0.16$ $\alpha_1 > 0.0043$ و $\alpha_2 < 0.06$ و $\alpha_1 = 0.0041-0.018$ و $\alpha_2 = 0.055-0.16$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t}$	دارای دو یا چند زیررژیم خطی با مقادیر بیش از α	۳/۵ ۳/۷ ۴
آبخوان گسلی شبکه‌ی متراکم درزه‌ها و وجود سیستم مجرای در منطقه‌ی اشباع درز و شکاف‌های بسیار متراکم با بازشدگی زیاد و وجود مجراهای بزرگ	$\alpha_1 > 0.018$ یا $\alpha_2 > 0.16$ $\alpha_1 > 0.018$ و $\alpha_2 > 0.16$ α با مقادیر کم و β	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_0 (1-\beta_1 t)$	دارای زیررژیم‌های آشفته و خطی که غلبه با جریان خطی است.	۴/۳ ۴/۷ ۵
درز و شکاف‌های بسیار متراکم با بازشدگی زیاد و وجود مجراهای بزرگ	$\alpha_1 > 0$ و $\alpha_2 > 0$ و $\beta_1 > 0$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t} + Q_0 (1-\beta_1 t)$	مجموعه‌ای از دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته	۵/۵
درز و شکاف‌های بسیار متراکم با بازشدگی زیاد و وجود مجراهای بزرگ	β_1, β_2 و α_1, α_2 با مقادیر بالا	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_2 e^{-\alpha_2 t} + Q_0 (1-\beta_1 t) + Q_0 (1-\beta_2 t)$	دارای دو زیررژیم آشفته و دو زیررژیم خطی، غلبه با زیررژیم‌های خطی	۶
آبخوان توسعه‌یافته، وجود درزه‌ها و شکاف‌ها و مجراهای وسیع ناشی از تکتونیزه‌شدن	با مقادیر بالا α و $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ و $\beta_1 > \beta_2$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_0 (1-\beta_1 t) + Q_0 (1-\beta_2 t) + Q_0 (1-\beta_3 t)$	یک زیررژیم خطی و دو یا سه زیررژیم آشفته، غلبه با رژیم خطی	۷
آبخوان بسیار توسعه‌یافته و وجود مجراهای زیاد	با مقادیر بالا α و $\beta_1, \beta_2, \beta_3$	$Q_t = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_0 (1-\beta_1 t) + Q_0 (1-\beta_2 t) + Q_0 (1-\beta_3 t)$	یک زیررژیم خطی و دو یا سه زیررژیم آشفته، غلبه با رژیم آشفته	۷/۵
آبخوان کارستی با سیستم مجرای توسعه‌یافته	$\alpha_1; \alpha_2 = 0$ و $\beta_1 > 0$	$Q_t = Q_0 (1-\beta_1 t)$	وجود جریان آشفته، تخلیه آب زیرزمینی از منطقه‌ی وادوز	۸
آبخوان کارستی با سامانه‌ی مجرای به‌خوبی توسعه‌یافته	با مقادیر کم β_1, β_2	$Q_t = Q_0 (1-\beta_1 t) + Q_0 (1-\beta_2 t)$	دارای دو زیررژیم آشفته	۹
دارای سامانه‌ی مجرای به‌خوبی توسعه‌یافته و تخلیه از منطقه‌ی وادوز	با مقادیر بالا β_1, β_2 و β_3	$Q_t = Q_0 (1-\beta_1 t) + Q_0 (1-\beta_2 t) + Q_0 (1-\beta_3 t)$	دارای سه زیررژیم آشفته متفاوت	۱۰

منطقه پژوهش

تاق‌دیس گرین با روند شمال غرب - جنوب شرق و ارتفاع بیش از ۳۷۰۰ متر از جمله ارتفاعات مهم زاگرس است که در موقعیت ۵° و ۴۵° تا ۳۰° و ۴۵° طول شرقی و ۱۵° و ۳۳° تا ۴۵° عرض شمالی بین استان‌های لرستان و همدان قرار گرفته است. این تاق‌دیس، مجموعه ناهمگونی از سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی متعلق به بازه زمانی کرتاسه تا الیگومیوسن را در خود جای داده است. در بین این سنگ‌ها، سری‌های آهکی و دولومیتی از گسترش فراوانی برخوردارند. بیشترین وسعت سنگ‌های کربناته در تاق‌دیس گرین مربوط به سنگ‌های دولومیتی و آهک‌های ژوراسیک پایینی است که معادل دولومیت سازند نیریز و کربنات‌های سازند سورمه است. بخشی از محدوده پژوهش در زون زمین‌ساختی زاگرس مرتفع و بخشی از آن در زون سنندج - سیرجان قرار گرفته است. این منطقه به شدت تکتونیزه شده است و گسل‌ها و شکستگی‌های متعددی توده‌های سنگی منطقه را قطع کرده‌اند. جهت‌گیری گسل‌ها به طور عمده شمال غربی - جنوب شرقی است که مهم‌ترین آنها، گسل‌های گرین - گاماسیاب و گرین - کهمان است (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۰۱).

بلوک نورآباد عمدتاً از آهک‌های خاکستری کم‌رنگ با میان‌لایه‌های مارنی، آهک‌های با تبلور مجدد و سنگ‌های آذرآواری تشکیل شده است. این بلوک از نظر عوامل زمین‌شناختی از طرف شمال و شمال غرب به سنگ‌های دگرگونی از قبیل مرمر، اسلیت، توف و لاواهای متأثر از فاز شدید دگرگونی زون سنندج - سیرجان محدود می‌شود؛ همچنین از طرف جنوب و جنوب شرق به سازندهای با جنس مارنی ختم می‌شود که با توجه به ویژگی‌های نفوذناپذیری این سازندها، عملاً انتقال آب در این مسیر وجود ندارد یا مقدار انتقال بسیار ناچیز است. محدوده بلوک الشتر نیز با لایه‌های مارنی و آهک‌های مارن‌دار در بخش شمالی، از بلوک نورآباد جدا می‌شود. کوه‌های این واحد بیشتر منشأ رسوبی دارد و کمیابی سنگ‌های آذرین، یکی از مهم‌ترین مختصات ساختمانی این منطقه به شمار می‌رود (شکل ۱). به طور کلی نسبت به بلوک نورآباد، محدوده الشتر از دیدگاه ژئومورفولوژی ساده‌تر و بدون به هم ریختگی‌های حاصل از فعالیت‌های آتشفشانی و دگرگونی است. در منطقه پژوهش انواع پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارست مانند فروچاله‌ها، غارها، چشمه‌های کارستی، پونورها، چاه‌های کارستی، حفرات انحلالی، پنجره‌های کارستی و انواع کارن دیده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه پژوهش



شکل ۲. پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارست محدوده تاق‌دیس گرین (الف و ب- دولین ریزشی، ج- دولین و رونل کارن، د- شافت، س- پنجره کارستی، ش- غار)

یافته‌های پژوهش

تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف

وجود چشمه‌ها، یکی از ویژگی‌های مناطق کارستی است که بخش عمده‌ای از ذخیره دینامیکی آبخوان‌ها را تخلیه می‌کنند (Kresic and Stevanovic, 2010: 71). به منظور تعیین درجه توسعه‌یافتگی کارست، منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های مطالعه‌شده در بلوک‌های کارستی نورآباد و الشتر ترسیم شد. یکی از پارامترهای مهم در بررسی‌های هیدروژئولوژیکی مربوط به چشمه‌ها، محاسبه ضرایب α و β است. هرچه ضریب α چشمه‌ای بیشتر باشد، نشان‌دهنده شیب بیشتر فرود جریان و در نتیجه بیان‌کننده سرعت تأثیرپذیری دبی جریان از بارش خواهد بود. این موضوع مؤید میزان تخلخل و کارست‌شدگی بیشتر حوضه است؛ حال آنکه هرچه ضریب α کمتر باشد، کارست‌شدگی کمتر حوضه را نشان می‌دهد (Kresic and Stevanovic, 2010: 71؛ کریمی وردنجان، ۱۳۸۹: ۲۸۰). چنانچه حجم ذخیره دینامیکی چشمه‌ای زیاد باشد، در کنار دیگر عوامل حاکی از توسعه‌یافتگی کمتر کارست منطقه است؛ به بیان دیگر توسعه کمتر کارست منجر به جابه‌جایی آهسته آب در آبخوان کارستی و افزایش حجم ذخیره دینامیکی می‌شود و بالعکس.

بررسی‌ها نشان می‌دهد در محدوده تاقدیس گرین، چشمه امیر (در بلوک الشتر) و چشمه نیاز (در بلوک نورآباد) بیشترین میزان حجم ذخیره دینامیکی را دارند؛ همچنین چشمه آهنگران (در بلوک الشتر) و چشمه تیمور (در بلوک نورآباد) کمترین حجم ذخیره دینامیکی را دارند (جدول ۲).

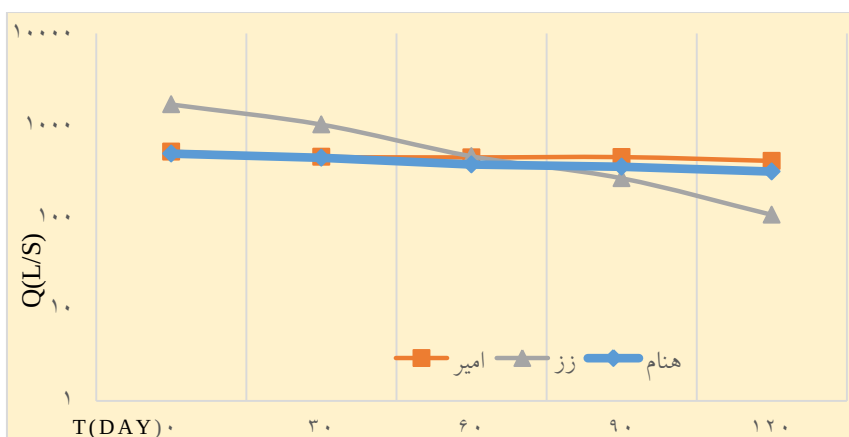
منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های امیر و هنام نشان‌دهنده ملایم‌بودن کاهش شیب در فصول خشک است. تغییر نکردن شیب در یال نزولی هیدروگراف، بالا بودن میانگین حجم ذخیره دینامیکی و متوسط زمان مرگ نسبتاً زیاد، بیان‌کننده غالب بودن سیستم جریان افشان و سهم کم سیستم جریان مجرای در تأمین بده چشمه‌های امیر و هنام است. پوشش زیاد خاک در سطح حوضه آبگیر چشمه امیر باعث کاهش سرعت نفوذ می‌شود و آب‌های نفوذی به مرور و با تأخیر به مجاری انتقالی می‌رسند و از خروجی چشمه تخلیه می‌شوند؛ اما آبخوان چشمه هنام، شبکه منظمی از درزها و شکاف‌های کوچک دارد که نفوذپذیری را افزایش می‌دهد. درجه توسعه‌یافتگی کارست سراب امیر و هنام به ترتیب ۲/۷ و ۳ است. در آبخوان این چشمه‌ها جریان خطی پایه غلبه و هرکدام سه زیررژیم خطی دارد (جدول ۲ و ۳؛ شکل ۳ الف).

نمودار نیمه‌لگاریتمی فرود هیدروگراف سراب زز نشان‌دهنده کاهش دبی چشمه با شیب زیاد است. بده چشمه به شدت به بارندگی وابسته است و مدت‌زمان کوتاهی پس از قطع بارندگی خشک می‌شود؛ به طور کلی این فرایند نشان‌دهنده تغییرات زیاد جریان در حوضه آبگیر این چشمه است.

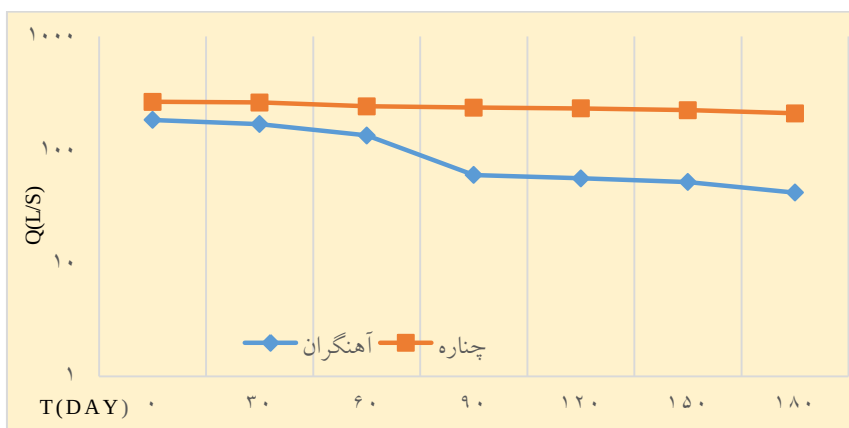
سیستم جریان در چشمه سراب زز، ترکیبی از جریان افشان و مجرای و غلبه با جریان مجرای است. کم‌بودن زمان مرگ و ذخیره دینامیکی اندک چشمه نیز این مسئله را تأیید می‌کند. درجه توسعه‌یافتگی کارست سراب زز ۴ است. هیدروگراف این چشمه زیررژیم‌های خطی و آشفته دارد و مقادیر بده و ضرایب α در آن زیاد است (جدول ۲ و ۳؛ شکل ۳ الف).

چشمه آهنگران به شروع دوره خشک حساس است؛ به‌طوری که نمودار هیدروگراف آن در ماه‌های مرطوب با شیب بسیار تندی افزایش و سپس با شروع دوره خشک با شیب تندتری کاهش می‌یابد. آبخوان این چشمه گسلی است و شبکه متراکم درزه‌ای دارد. نمودار نیمه‌لگاریتمی منحنی فرود نشان‌دهنده تأمین بده چشمه با سیستم جریان افشان است؛ اما در بعضی مواقع جریان‌های مجرای نیز آبخوان این چشمه را تخلیه می‌کنند. درجه توسعه‌یافتگی کارست سراب آهنگران ۴/۳ است و هیدروگراف این چشمه دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم مجرای دارد (جدول ۲؛ شکل ۳ ب).

هیدروگراف چشمه چناره در فصول بارندگی با شیب اندکی افزایش و متقابلاً در فصول خشک با شیب ملایمی کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که هیدروگراف چشمه حالت پخ‌مانند دارد و شیب منحنی فرود هیدروگراف در فصول خشک تغییر محسوسی نداشته است. چشمه چناره بیشترین متوسط زمان مرگ را در بین ۱۰ چشمه بررسی‌شده در محدوده تاق‌دیس گرین دارد (جدول ۲). رژیم غالب جریان در محدوده این چشمه از نوع افشان است و سیستم جریان مجرای در تأمین بده این چشمه سهم اندکی دارد. درجه توسعه‌یافتگی کارست چشمه چناره ۲/۵ است و زیررژیم‌های خطی با مقادیر بده کم و ضرایب α کم دارد (جدول ۲؛ شکل ۳ ب).



شکل ۳ الف. منحنی فرود چشمه‌های هنام، زز و امیر (بلوک الشتر)



شکل ۳ ب. منحنی فرود چشمه‌های چناره و آهنگران (بلوک الشتر)

جدول ۲. رابطه منحنی فرود، رژیم‌های جریان و درجه توسعه کارست محدوده ناکدیس گرین

چشمه	بلوک	رابطه منحنی فرود	زیررژیم‌های جریان	زمان مرگ $t_0 = \frac{t \cdot \log e}{\log Q_0 / Q_t}$	حجم ذخیره دینامیکی	درجه توسعه کارست
امیر	الشتر	$Q_t = 0.516e^{-0.002(30)} + 0.455e^{-0.001(60)}$	افشان	۳۱۳	۴۱۶۰۱۶۰۰۰	۲/۷
آهنگران	الشتر	$Q_t = 0.184e^{-0.005(60)} + 0.134(1 - 0.26t)$	افشان- مجریایی	۲۵۰	۴۹۱۶۱۶۰	۴/۳
چناره	الشتر	$Q_t = 0.265e^{-0.001(60)} + 0.242e^{-0.0008(90)}$	افشان	۴۶۲	۵۸۷۰۸۸۰۰	۲/۵
زز	الشتر	$Q_t = 1.687e^{-0.0168(30)} + 1.019e^{-0.026(30)}$	افشان- مجریایی	۴۰	۱۳۶۲۹۸۱۲	۴
هنام	الشتر	$Q_t = 0.493e^{-0.0045(60)} + 0.376e^{-0.002(30)}$	افشان	۲۵۴	۳۴۵۱۶۸۰۰	۳
عبدالحسینی	نورآباد	$Q_t = 0.169e^{-0.0018(30)} + 0.16e^{-0.0044(90)}$	افشان	۴۴۶	۲۲۶۸۰۰۰۰	۲/۵
گلم‌بحری	نورآباد	$Q_t = 0.287e^{-0.002(60)} + 0.12e^{-0.002(60)} + 0.242(1 - 0.23t)$	مجریایی	۲۲۵	۱۱۷۵۹۰۴۰	۵/۵
لاغری	نورآباد	$Q_t = 0.473e^{-0.015(90)} + 0.122e^{-0.002(30)} + 0.609(1 - 0.08t)$	مجریایی	۲۴۴	۱۱۹۳۴۰۰۰	۵/۵
نیاز	نورآباد	$Q_t = 0.353e^{-0.001(30)} + 0.335e^{-0.005(30)}$	افشان	۳۸۸	۴۸۶۰۰۰۰۰	۲/۵
تیمور	نورآباد	$Q_t = 0.13e^{-0.009(30)} + 0.11e^{-0.012(30)} + 0.41(1 - 0.55t)$	مجریایی	۲۱۵	۹۳۶۵۷۶۰	۵/۵

منبع: نگارندگان

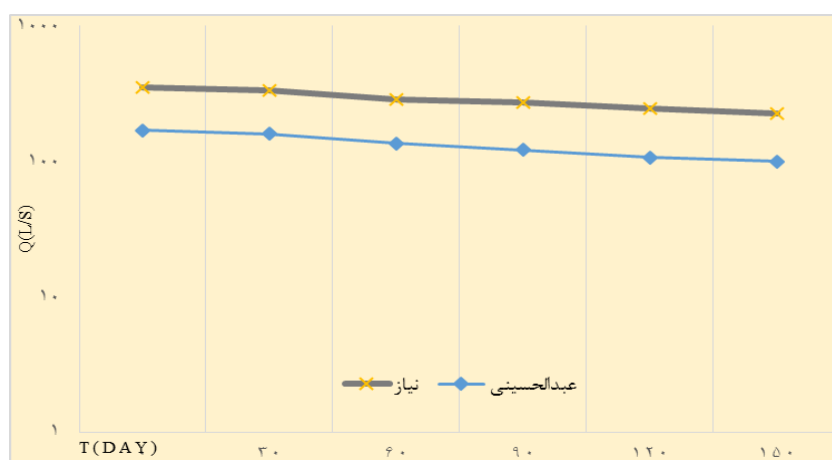
ایستابی در حوضه آبرگیر چشمه و فعال‌شدن سیستم‌های مجاری کارستی (مجاری پالئوکارست) در بعضی سال‌ها و در فصل‌های مرطوب، رژیم جریان به سیستم افشان-مجریایی تغییر وضعیت می‌دهد (جدول ۲ و ۳؛ شکل ۴ الف).

هیدروگراف ۱۵ ساله چشمه‌های گلم‌بحری، لاغری و تیمور گویای تأثیرپذیری زیاد دبی این چشمه‌ها نسبت به بارندگی است؛ به‌طوری که بدء این چشمه در فصول مرطوب و خشک با شیب تندی افزایش و کاهش می‌یابد. نمودار نیمه‌لگاریتمی منحنی فرود هیدروگراف هر سه چشمه نشان‌دهنده غلبه سیستم جریان مجریایی است. تغییر شیب در منحنی فرود این چشمه‌ها نشان‌دهنده تغییر نوع جریان از حالت مجریایی به سیستم جریان افشان است که در پایان

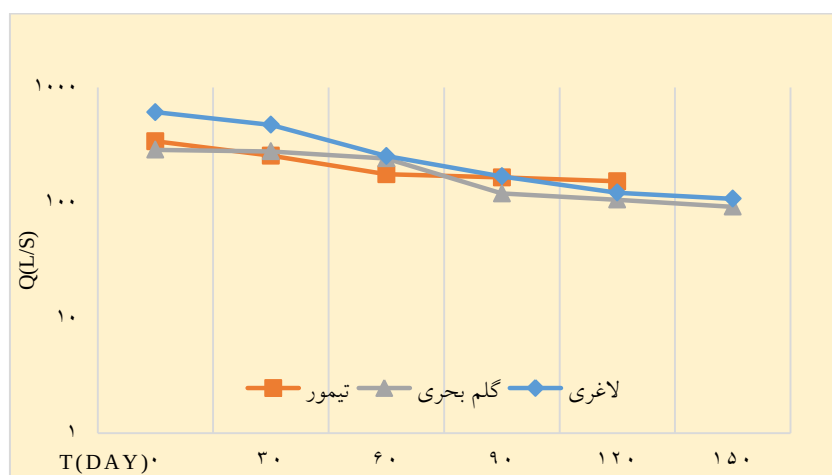
در بلوک نورآباد تغییر شیب محسوسی در منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های عبدالحسینی و نیاز وجود ندارد. بدء این چشمه‌ها در بیشتر سال‌ها در ماه‌های خشک، تغییرات کمی دارند و اختلاف فراوانی با هم ندارند. حوضه این چشمه‌ها، شبکه منظمی از درزها و شکاف‌های کوچک با توسعه محدود دارد. محل تخلیه چشمه عبدالحسینی و تأثیر احتمالی آبرفت در کم‌کردن نوسانات دبی، باعث ایجاد تأخیر زمانی در واکنش به بارندگی می‌شود. درجه توسعه‌یافتگی کارست چشمه‌های عبدالحسینی و نیاز ۲/۵ است و هرکدام سه زیررژیم خطی دارند. سیستم غالب جریان در این چشمه‌ها به صورت افشان است که زیادبودن حجم ذخیره دینامیکی و زمان مرگ این امر را تأیید می‌کند. در چشمه عبدالحسینی به علت بالاآمدن سطح

است. درجه توسعه‌یافتگی کارست چشمه‌های گلم‌بحری، لاغری و تیمور ۵/۵ است و هرکدام دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته دارند. حجم ذخیره دینامیکی کم و زمان مرگ تقریباً مشابه، ازجمله دلایل توسعه کارست در حوضه آبرگیر این چشمه‌هاست (جدول ۲ و ۳؛ شکل ۴ ب).

ماه‌های خشک (اواخر شهریور) دبی پایه این چشمه‌ها کاملاً با سیستم جریان افشان تأمین می‌شود. به‌طور کلی در حوضه آبرگیر این چشمه‌ها، مجاری کارستی متعددی وجود دارد که هنگام بارندگی و بالاآمدن سطح آب در آبخوان کارستی، حجم زیادی از آب را به محل تخلیه چشمه انتقال می‌دهند؛ همین امر منجر به کاهش حجم ذخیره دینامیکی این چشمه‌ها شده



شکل ۴ الف. منحنی فرود چشمه‌های عبدالحسینی و نیاز (بلوک نورآباد)



شکل ۴ ب. منحنی فرود چشمه‌های لاغری، گلم‌بحری و تیمور (بلوک نورآباد)

بررسی شده در این بلوک، چشمه‌های گلم‌بحری، لاغری و تیمور سیستم جریان مجرای دارند و چشمه عبدالحسینی رفتاری مشابه را با چشمه‌های با سیستم غالب جریان افشان - مجرای نشان می‌دهد؛ اما سیستم

به‌طور کلی با توجه به تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف (منحنی تاريسمان) چشمه‌ها، سیستم غالب جریان در چشمه‌های محدوده بلوک نورآباد از نوع جریان مجرای است؛ به‌طوری که از ۵ چشمه

غالب جریان در تمامی چشمه‌های محدوده بلوک الشتر به‌جز چشمه‌های زز و آهنگران از نوع افشان است.

براساس نتایج داده‌های هیدرودینامیکی، سیستم کارست در محدوده بلوک نورآباد نسبت به بلوک الشتر از توسعه و تکامل بیشتری برخوردار است (جدول ۲؛ شکل ۳ و ۴)؛ همچنین بررسی ضریب تغییرات دبی چشمه‌ها (CV) نشان می‌دهد چشمه‌های لاغری در بلوک نورآباد و چناره در بلوک الشتر به ترتیب بیشترین

و کمترین ضریب تغییرات را دارند؛ به‌طورکلی میانگین ضریب تغییرات در چشمه‌های بلوک الشتر حدود ۲۵ درصد و برای چشمه‌های بلوک نورآباد حدود ۴۴ درصد است. کم‌بودن ضریب تغییرات دبی چشمه‌های بلوک الشتر در مقایسه با بلوک نورآباد نشان‌دهنده تأثیرپذیری کمتر چشمه‌های بلوک الشتر در مقابل نوسانات بارشی و گویای توسعه‌یافتگی بیشتر کارست در بلوک نورآباد است (جدول ۳).

جدول ۳. ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی چشمه‌های محدوده پژوهش

چشمه	میانگین دبی سالانه	دبی حداکثر	دبی حداقل	انحراف معیار دبی	ضریب ناهم‌شکلی $K_n = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	ضریب کمترین آبدی $K_m = \frac{Q_{min}}{Q_{mean}}$	ضریب تغییرات (درصد) $CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$
امیر	۴۵۱	۵۹۸	۲۷۷	۹۰	۲/۱۵	۰/۶۱	۲۰
آهنگران	۱۰۲	۱۴۹/۵	۵۰	۲۶	۳	۰/۴۹	۲۵/۴
چناره	۲۴۱	۳۱۵	۱۶۰	۴۶	۱/۹۷	۰/۶۶	۱۹
زز	۵۲۴	۹۹۲	۱۵۸	۲۴۵	۶/۳	۰/۳	۴۶/۷
هنام	۳۵۵	۴۷۶	۱۹۸	۷۳	۴/۲	۰/۵۵	۲۰/۵
عبدالحسینی	۱۳۱	۱۸۱	۶۴	۳۵	۲/۸	۰/۴۸	۲۷
گلم‌بحری	۱۶۴	۳۱۰	۸۶	۵۹/۵	۳/۶	۰/۵۲	۳۶
لاغری	۲۴۹	۶۵۰	۱۷	۱۶۴	۳۸/۲	۰/۰۷	۶۶
نیاز	۲۶۹	۴۴۵	۱۱۱	۱۱۰	۴	۰/۴۱	۴۱
تیمور	۱۹۲	۳۰۶	۱۰۰	۷۷	۳/۰۶	۰/۵۲	۴۰

منبع داده‌های پایه: شرکت آب منطقه‌ای لرستان

تحلیل هیدروشیمیایی نمونه آب چشمه‌ها

علاوه بر منحنی آبنمود چشمه‌ها، تحلیل‌های هیدروشیمیایی ازجمله عواملی است که به شناخت ویژگی‌ها و رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی کمک می‌کند. برای این منظور از نمونه آب چشمه‌های منطقه پژوهش در دوره آماری ۱۵ ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۴) استفاده شده است. ازجمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در تجزیه و تحلیل هیدروشیمیایی چشمه‌ها، کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg)،

هدایت الکتریکی (EC)، توالی آنیون‌ها (HCO₃, Cl, SO₄) و کاتیون‌ها (K, Na, Mg, Ca)، سختی کل (TH) و میزان مواد جامد محلول (TDS) است. از Ca/Mg برای شناسایی سازندهای تغذیه‌کننده سفره‌های کارستی و تعیین زمان ماندگاری آب استفاده می‌کنند. در نواحی کارستی برحسب میزان توسعه کارست و مجاری کارستیک، سطح تماس آب با سنگ بستر متفاوت است. بر این اساس ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب ازجمله میزان کاتیون‌ها و آنیون‌ها، TH و EC

متفاوت خواهد بود (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹: ۲۴۹، باقری و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۴۱، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۸). در مناطق کارستی توسعه‌یافته که نفوذ به‌صورت کانالیزه و مجرای رخ می‌دهد، سطح تماس آب با لایه‌ها و سازندها، کمتر از نواحی غیرکارستیک یا کمتر توسعه‌یافته است؛ بنابراین زیاده‌بودن میزان هدایت الکتریکی و کاتیون‌ها و آنیون‌ها و همچنین سختی زیاد آب چشمه‌ها بیان‌کننده توسعه کمتر کارست است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸۲).

در بلوک الشتر کمترین EC نمونه آب چشمه‌ها برابر با $349 \mu\text{S}/\text{cm}$ مربوط به چشمه زز و بیشترین آن برابر با $551 \mu\text{S}/\text{cm}$ مربوط به چشمه امیر است. در بلوک نورآباد کمترین و بیشترین EC به ترتیب مربوط به چشمه تیمور ($363 \mu\text{S}/\text{cm}$) و چشمه عبدالحسینی ($484 \mu\text{S}/\text{cm}$) است؛ همچنین توالی آنیونی چشمه‌های امیر، آهنگران، چناره، زز، هنام و عبدالحسینی به‌صورت $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ و در چشمه‌های گلم‌بحری، تیمور، لاغری و نیاز به‌صورت

$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ است. میانگین TDS در چشمه‌های بلوک الشتر برابر با $284 \text{ mg}/\text{l}$ و در چشمه‌های بلوک نورآباد برابر با $261 \text{ mg}/\text{l}$ است؛ به بیان دیگر پایین‌تر بودن میانگین TDS چشمه‌های بلوک نورآباد در مقایسه با بلوک الشتر هم نشان‌دهنده توسعه‌یافتگی کارست و هم حاکی از نزدیکی محل‌های تغذیه و تخلیه چشمه‌ها در بلوک نورآباد است (جدول ۴). از آنجایی که یون Mg آهسته‌تر از یون Ca آزاد می‌شود، بنابراین افزایش یون Mg یا کاهش Ca/Mg نشان‌دهنده ماندگاری بیشتر آب در آبخوان کارستی است (کریمی وردنجانی، ۱۳۷۹: ۲۴۹). در این راستا نسبت Ca/Mg در چشمه‌های بلوک الشتر به کمتر از $3/8$ و در چشمه‌های بلوک نورآباد این نسبت به بیشتر از $3/3$ می‌رسد. در بلوک الشتر کاهش نسبت Ca/Mg و افزایش یون Mg در مقایسه با بلوک نورآباد نشان‌دهنده آبخوان‌های کارستی دولومیتی و ماندگاری بیشتر آب و در نتیجه گویای توسعه‌یافتگی بیشتر کارست در بلوک نورآباد است (جدول ۴).

جدول ۴. ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های محدوده تاق‌دیس گرین

پارامتر چشمه	بلوک	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Ca/Mg (mg/l)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SO ₄ (mg/l)	CL (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	TDS (mg/l)
امیر	الشتر	۱	۲/۶۷	۲/۶۷	۵۵۱	۰/۲۹	۰/۳۲	۳	۲۵۲
آهنگران	الشتر	۱/۴	۳/۷۴	۲/۶۷	۳۷۸	۰/۵	۰/۴	۴/۶	۳۳۷
چناره	الشتر	۱/۲۱	۳/۰۳	۲/۷۲	۵۲۷	۰/۳۸	۱/۳	۳/۳	۳۵۲
زز	الشتر	۰/۸۳	۲/۶	۳/۱۳	۳۴۹	۰/۲۴	۰/۲۶	۲/۹	۲۲۳
هنام	الشتر	۰/۹	۲/۹	۳/۲۲	۴۰۱	۰/۲۴	۰/۲۶	۳/۴	۲۵۶
عبدالحسینی	نورآباد	۱/۰۶	۳/۵۵	۳/۳۴	۴۸۴	۰/۲۲	۰/۳۸	۴/۱	۳۱۰
گلم‌بحری	نورآباد	۰/۹۴	۲/۷۷	۲/۹۴	۳۸۹	۰/۳۶	۰/۳	۳/۱	۲۴۹
لاغری	نورآباد	۱/۱۶	۲/۹۷	۲/۵۶	۳۶۸	۰/۴۱	۰/۳۷	۳/۵	۲۳۲
نیاز	نورآباد	۰/۶۷	۲/۸	۴/۱۷	۴۴۱	۰/۲۶	۰/۲۴	۳	۲۸۲
تیمور	نورآباد	۰/۷۹	۲/۷	۳/۴۱	۳۶۳	۰/۲۸	۰/۲۶	۳	۲۳۵

منبع: شرکت آب منطقه‌ای لرستان

به نظر می‌رسد در محدوده بلوک الشتر به علت زیادبودن میزان آنیون‌ها و کاتیون‌ها، سختی زیاد آب و EC زیاد، آب مسیر طولانی‌تری را به سمت خروجی چشمه طی کرده است و با دیواره سنگ تماس زیادی دارد؛ به بیان دیگر با توجه به ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های محدوده تاق‌دیس گرین، کارست بلوک نورآباد توسعه‌یافته‌تر از کارست بلوک الشتر است. تیپ آب همه چشمه‌ها در بلوک‌های نورآباد و الشتر بی‌کربنات کلسیک - منیزیک و کاتیون غالب کلسیم و سپس منیزیم است (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه ویژگی‌های هیدروشیمیایی بلوک‌های الشتر و نورآباد

پارامتر	آنیون	کاتیون	TDS (mg/l)	TH (mg/l)	EC (μS/Cm)	محدوده
بلوک الشتر	۴/۳	۳/۹	۲۸۴	۲۰۴	۴۴۱	
بلوک نورآباد	۴	۴	۲۶۱	۱۹۴	۴۰۹	

منبع: نگارندگان

نتیجه‌گیری

وجود و گسترش آهک‌ها، تشکیل و توسعه سیستم گسلش و درزه‌ها، پوشش نیمه‌جنگلی و ماندگاری برف باعث توسعه سیستم کارستی در بلوک نورآباد شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد بلوک نورآباد روی زون‌های زاگرس رورانه و سنندج - سیرجان واقع شده است که گسترش تکتونیک و خردشدگی شدید کربنات‌ها به تشدید فرایند کارستی‌شدن در آن منجر شده است. محدوده بلوک الشتر با لایه‌های مارنی و آهک‌های مارن‌دار در بخش شمالی از بلوک نورآباد جدا می‌شود. کوه‌های این واحد بیشتر منشأ رسوبی دارند و کمپایی سنگ‌های آذرین، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ساختمانی این منطقه به شمار می‌رود.

میانگین بارندگی سالانه بلوک‌های الشتر و نورآباد به ترتیب ۷۲۰ و ۶۹۰ میلیمتر و متوسط ارتفاع بلوک نورآباد ۲۱۹۰ متر و الشتر ۲۳۱۰ متر است. در ارتفاعات هر دو بلوک به دلیل ارتفاع و شیب زیاد و وجود خاک ضعیف، پوشش گیاهی گسترش زیادی نداشته و این امر سبب افزایش فرایند کارستی‌شدن در محدوده‌ها شده است. با توجه به وجود آمار و اطلاعات پایه، ویژگی‌ها و شرایط زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و شرایط اقلیمی و توپوگرافی در قسمت‌های مختلف تاق‌دیس گرین، تعداد ۱۰ چشمه در بلوک‌های الشتر و نورآباد در راستای اهداف پژوهش انتخاب شدند. با توجه به ارزیابی منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های مطالعه‌شده (شکل ۳ و ۴) و همچنین براساس روش مالیک و وجکتوا (جدول ۱) درجه توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان چشمه‌های امیر، چناره و هنام در بلوک الشتر و آبخوان چشمه‌های عبدالحسینی و نیاز در بلوک نورآباد بین ۲/۵ تا ۳ است و سیستم غالب جریان افشان و زیررژیم‌های خطی دارند.

آبخوان چشمه زز و آهنگران (در بلوک الشتر) به ترتیب با درجه توسعه کارست ۴ و ۴/۳ و سیستم جریان در آنها از نوع مجرای - افشان است؛ به‌طوری که چشمه زز با وجود دبی زیاد، در مدت‌زمان کوتاهی پس از قطع بارندگی خشک می‌شود (جدول ۲).

آبخوان‌های چشمه‌های گلم‌بحری، لاغری و تیمور بیشترین میزان توسعه کارست را در محدوده تاق‌دیس گرین دارند؛ به گونه‌ای که براساس جدول (۲) درجه توسعه کارست برای آبخوان این چشمه‌ها، ۵/۵ است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در بلوک الشتر، چشمه‌های امیر و آهنگران بیشترین و کمترین میزان حجم ذخیره

در Ca/Mg چشمه‌های بلوک‌های الشتر و نورآباد به ترتیب $۲/۸$ و $۳/۲$ است. این افزایش یون منیزیم و کاهش نسبت Ca/Mg نشان‌دهنده توسعه کمتر کارست در بلوک الشتر است. کمترین متوسط هدایت الکتریکی نمونه آب چشمه‌ها در بلوک الشتر برابر با $۳۴۹ \mu\text{S/Cm}$ و مربوط به چشمه زز و بیشترین آن در چشمه امیر برابر با $۵۵۱ \mu\text{S/Cm}$ است.

در بلوک نورآباد کمترین و بیشترین متوسط هدایت الکتریکی به ترتیب مربوط به چشمه تیمور ($۳۶۳ \mu\text{S/Cm}$) و چشمه عبدالحسینی ($۴۸۴ \mu\text{S/Cm}$) است.

در محدوده الشتر بیشترین مقادیر مواد جامد محلول در چشمه چناره وجود دارد و در بلوک نورآباد چشمه عبدالحسینی بیشترین مواد جامد محلول را دارد؛ این در حالی است که کارست در آبخوان این چشمه‌ها توسعه زیادی را نشان نداده است. برعکس کمترین مقادیر مواد جامد محلول مربوط به چشمه‌های زز و لاغری است که کارست توسعه‌یافته‌ای دارند (جدول ۴)؛ همچنین میانگین کل مواد جامد محلول در چشمه‌های بلوک الشتر برابر با ۲۸۴ (mg/l) و در چشمه‌های بلوک نورآباد برابر با ۲۶۱ (mg/l) است. در نمونه آب همه چشمه‌های بلوک‌های نورآباد و الشتر، کاتیون غالب کلسیم و سپس منیزیم است (جدول ۵)؛ همچنین توالی آنیونی چشمه‌های امیر، آهنگران، چناره، زز، هنام و عبدالحسینی به صورت $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ و در چشمه‌های گلم‌بحری، تیمور، لاغری و نیاز به صورت $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ است. در محدوده بلوک الشتر به علت افزایش یون منیزیم، زیاده‌بودن آنیون‌ها و کاتیون‌ها، هدایت الکتریکی زیاد و سختی زیاد آب و

دینامیکی را دارند؛ این در حالی است که آبخوان‌های چشمه‌های امیر و آهنگران به ترتیب کمترین و بیشترین میزان توسعه کارست را در بلوک الشتر دارند. از سوی دیگر در محدوده بلوک نورآباد، سامانه کارستی در چشمه نیاز با وجود داشتن بیشترین میزان حجم ذخیره دینامیکی توسعه چندانی نداشته است؛ همچنین آبخوان کارستی چشمه تیمور بیشترین میزان توسعه و کمترین حجم ذخیره دینامیکی را در بلوک نورآباد داشته است (جدول ۲)؛ این نتایج با مبنای نظری توسعه سیستم‌های کارستی و رفتار هیدرودینامیکی چشمه‌ها و همچنین پژوهش‌های Li et al, 2016؛ Malik and Vojtkova, 2012؛ Chang et al, 2015؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۸۸؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵؛ باقری و همکاران، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴ مطابقت دارد.

به‌طورکلی با توجه به تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌ها باید گفت سیستم غالب جریان در چشمه‌های محدوده بلوک نورآباد از نوع جریان مجرای است؛ همچنین در بلوک الشتر سیستم غالب جریان در تمامی چشمه‌های محدوده به جز چشمه سراب زز از نوع افشان است. براساس نتایج داده‌های هیدرودینامیکی، سامانه‌های کارستی در محدوده بلوک نورآباد نسبت به بلوک الشتر از توسعه و تکامل بیشتری برخوردارند (جدول ۱ و ۲؛ شکل ۳ و ۴).

علاوه بر تحلیل‌های هیدرودینامیکی، به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش، پارامترهای هیدروشیمیایی چشمه‌های منطقه نیز تجزیه و تحلیل شدند. میانگین یون منیزیم موجود در چشمه‌های بلوک الشتر و نورآباد به ترتیب $۱/۰۷$ و $۰/۹۲$ است؛ همچنین نسبت

انتظاری، مژگان، یمانی، مجتبی و جعفری اقدام، مریم، (۱۳۹۴). مدل‌سازی مکانی مناطق تغذیه آبخوان‌های کارستی با استفاده از KARSTLOP (مطالعه موردی: آبخوان کارستی خورین)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۷-۱۲۱.

باقری سید شکری، سجاد، یمانی، مجتبی، جعفری‌گلو، منصور، کریمی، حاجی و مقیمی، ابراهیم، (۱۳۹۲). ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی (مطالعه موردی: آبخوان‌های کارستی گیلان غرب و خورین در استان کرمانشاه)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۲، شماره ۳، ۱۶-۱.

باقری سید شکری، سجاد، یمانی، مجتبی، جعفری‌گلو، منصور، کریمی، حاجی و مقیمی، ابراهیم، (۱۳۹۴). بررسی توسعه‌یافتگی و ویژگی‌های هیدرودینامیکی سامانه‌های کارستی با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف (مورد مطالعه: آبخوان‌های کارستی حوضه رودخانه الوند)، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۳، ۳۴۶-۳۳۳.

بهرامی، شهرام، زنگنه‌اسدی، محمدعلی و رهبر، حمزه، (۱۳۹۲). بررسی نقش ژئومورفولوژی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز کنگیر، مجله جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای، دوره ۳، شماره ۷، ۸۴-۷۱.

همچنین کم‌بودن Ca/Mg ، توسعه کارست نسبت به بلوک نورآباد در مراحل اولیه خود قرار دارد و به علت جوانی کارست و غلبه درزها و شکاف‌های کوچک، ارتباط زیادی بین سنگ و آب ذخیره‌شده در آبخوان‌های الشتر وجود دارد و آب مسیر طولانی‌تری را به سمت خروجی چشمه‌ها طی می‌کند (جداول ۵ و ۶)؛ در نتیجه آبخوان‌های کارستی محدوده الشتر عمدتاً جنس آهک دولومیتی و چشمه‌ها جریان انتشاری دارند؛ اما آبخوان‌های بلوک نورآباد را عمدتاً آهک‌های توده‌ای تشکیل می‌دهند و جریان مجرای دارند.

در محدوده تاق‌دیس گرین نتایج بررسی‌های هیدروشیمیایی در زمینه ارتباط ویژگی‌های هیدروشیمیایی با توسعه کارست با نتایج پژوهش‌های بهرامی، ۱۳۹۵؛ شیرمردی دزکی، ۱۳۹۲؛ کریمی، ۱۳۹۳؛ (Acero, 2015; Caetano et al, 2015; Karimi et al, 2005) همخوانی دارد.

بر اساس آنالیز هیدروشیمیایی چشمه‌های منطقه پژوهش، تیپ آب بیشتر این چشمه‌ها عموماً با تیپ آب آبخوان‌های کارستی مطابقت دارد و به صورت بی‌کربنات کلسیک- منیزیک است.

منابع

ابراهیمی، بابک و سیف، عبدالله، (۱۳۹۴). به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی پتانسیل گسترش کارست سنگ‌های کربناتی زاگرس بر پایه عامل‌های آب‌زمین‌شناختی و اقلیمی، علوم زمین، دوره ۲۵، شماره ۹۸، ۳۴۸-۳۳۳.

قربانی، محمدصدیق و اونق، محمد، (۱۳۹۱).
پهنه‌بندی تحول و حساسیت کارست با استفاده
از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره در
منطقه کارستی شاهو، پژوهش‌های
ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، شماره ۱، ۳۲-۱۹.

قبادی، محمدحسین؛ عبدی‌لر، یاسین و محبی، یزدان،
(۱۳۹۰). اهمیت شناخت خصوصیات
ژئومورفولوژیکی، سنگ‌شناسی و فیزیکی
سنگ‌های کربنات جهت ارزیابی توسعه
کارست در منطقه نهاوند، فصلنامه زمین‌شناسی
کاربردی، دوره ۷، شماره ۴، ۳۱۰-۲۹۹.

کریمی، حاجی؛ زروش، ناهید و واعظی، عبدالرضا،
(۱۳۹۳). بررسی هیدروژئوشیمی منابع آب
تاقدیس کارستی کبیرکوه، سی‌وسومین کنفرانس
ملی علوم زمین، www.civilica.com، ۸/۲۵، ۹۵.

کریمی وردنجان، حسین، (۱۳۸۹). هیدروژئولوژی
کارست، مفاهیم و روش‌ها، جلد ۱، چاپ ۱،
شیراز، انتشارات ارم شیراز.

مقصودی، مهران، اخوان، هانیه، مهدیان ماه‌فروزی،
مجتبی و عشورنژاد، غدیر، (۱۳۹۴). پهنه‌بندی
شدت انحلال سنگ‌های کربناته در زاگرس
جنوبی (مطالعه موردی: حوضه سیف‌آباد لاغر)،
مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷،
شماره ۱، ۱۲۴-۱۰۵.

مقصودی، مهران، کریمی، حاجی، صفری، فرشاد و
چهارراهی، ذبیح‌الله، (۱۳۸۸). بررسی توسعه
کارست در توده پراو بیستون با استفاده از

بهرامی، شهرام، زنگنه‌اسدی، محمدعلی و جهانفر،
علی، (۱۳۹۵). ارزیابی توسعه کارست با استفاده
از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و
هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در
زاگرس (منطقه مورد مطالعه: تاقدیس قلاجه و
توده پراو - بیستون)، مجله جغرافیا و توسعه،
دوره ۱۴، شماره ۴۴، ۱۲۲-۱۰۷.

خوش‌اخلاق، فرامرز، باقری، سجاد و صفرزاد، طاهر،
(۱۳۹۳). واکاوی تأثیرگذاری خشکسالی‌های
شدید بر آبدی چشمه‌های کارستی استان
کرمانشاه (مطالعه موردی: خشکسالی‌های شدید
۸۷-۱۳۸۶)، مجله فضای جغرافیایی، دوره ۴۸،
شماره ۱۴، ۱۹-۱.

رحمتی، محمد، مرادی، حمیدرضا، کریمی، حاجی و
جلیلی، خلیل، (۱۳۹۴). بررسی اثر توسعه‌یافتگی
کارست بر رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌های
کارستی استان کرمانشاه، مجله اکوهیدرولوژی،
دوره ۲، شماره ۲، ۱۷۳-۱۶۳.

شیرمردی دزکی، عباس، موسوی، میرحسن و فاطمه،
امیری، (۱۳۹۲). ارزیابی هیدروشیمیایی و عوامل
مؤثر بر کیفیت شیمیایی چشمه‌های
مسجدسلیمان، مجله ژئوشیمی، دوره ۱، شماره ۳،
۱۹۰-۱۶۷.

عبدی‌نژاد، پرویز، (۱۳۹۲). بررسی خصوصیات
فیزیکی چشمه کارستی زرنند براساس تحلیل
منحنی‌های آبنمود، هفدهمین همایش انجمن
زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی،
www.civilica.com، ۸/۲۵، ۹۵.

- Caetano Bicalho, C., C. Batiot-Guilhe, J.L. Seidel, S. Van Exter, H. Jourde., (2015). **Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer**, Journal of Hydrology, Vol 450–451, Pp 206–218.
- Chang. Yong, Jichun Wu, Ling Liu., (2015). **Effects of the conduit network on the spring hydrograph of the karst Aquifer**, Journal of Hydrology, Vol 527, Pp 517–530.
- Ford. C., Williams. P., (2007). **Karst geomorphology and hydrology**, Unwin Hyman, London.
- Forkaseiwick. J., Paloc. H., (1967). **Lere gime de tarissement de la Foux de la Vis Chronique de hydroge oligie**, Vol 10, Pp 59-73.
- Gan, Fuping, Kai Han, Funing LAN, Yuling Chen, Wei Zhang., (2017). **Multi-geophysical approaches to detect karst channels underground - A case study in Mengzi of Yunnan Province, China**. Journal of Applied Geophysics, Vol 136, Pp 91–98.
- Geoppert, N. Goldscheider, N. Scholz, H., (2011). **Karst Geomorphology of carbonatic conglomerates**, Vol 23, No 130, Pp 289-298.
- Karimi, H., Raeisi, E., Bakalowicz., (2005). **Characterising the main karst aquifer of the Alvand Basin, northwest of Zagros, Iran, by a hydro geochemical approach**, Hydrology Journal, Vol 13, Pp 787- 799.
- Kaufmann. G., (2016). **Modelling karst aquifer evolution in fractured, porous rocks**, Journal of Hydrology, Vol 543, Pp 796–807.
- Kresic, N. and Bonacci., (2010). **Spring discharge hydrograph**, In Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability. Elsevier ch 4. Vol 84, Pp 129–163.
- Kresic, N and Stevanovic, Z., (2010). **Groundwater hydrology of spring**, Elsevier Publication.
- Kuhta, M., Brkić, Ž. and Stroj, A., (2012). **Hydrodynamic characteristics of Mt**
- ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۱، شماره ۶۹، ۶۵–۵۱.
- ناصری، حمیدرضا و علیخانی، فرشاد، (۱۳۹۱). **تحلیل سیستم‌های کارست سازندهای آسماری و ایلام- سروک در جنوب غرب ایذه؛ مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۴، شماره ۳، ۹۴–۱۰۴.**
- یمانی، مجتبی؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ جعفری اقدم، مریم و باقری سید شکری، سجاد، (۱۳۹۲). **بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌یافتگی و پهنه‌بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP، استان کرمانشاه، مجله علمی پژوهشی علوم زمین، دوره ۲۲، شماره ۸۸، ۵۷–۶۶.**
- Acero, P, L.F. Auque, J.P. Galve, F. Gutierrez, D. Carbonel, M.J. Gimeno, Y. Yechieli, M.P. Asta J.B. Gomez., (2015). **Evaluation of geochemical and hydrogeological processes by geochemical modeling in an area affected by evaporate karstification**, Journal of Hydrology, vol 529, Pp 1874–1889.
- Atkinson, T.C., (1985). **Present and future direction in karst hydrogeology**, Annales de la societe Geologique Belgique, Vol 108, Pp 96-293.
- Beynen, V., Niedzielski, M., Jelinska, E., Alsharif, K., Matusick, J., (2012). **Comparative study of specific Ground water Vulnerability of a karst aquifer in central Florida**, Applied Geography, Vol 32, Pp 868-877.
- Bonacci O., (1993). **Karst Springs Hydrographs as Indicators of Karst Aquifers**, Journal of Hydrological Sciences, Vol 38 (1), 24-37.

- (2011). **Morphometric analysis of three-dimensional networks of karst conduits**, journal of Geomorphology, Vol 132, Pp 17–28.
- Pedraza, A., J.A. Luque-Espinar, S. Martos-Rosillo, E. Pardo-Igúzquiza, J.J. Durán-Valsero, F. Martínez-Moreno, C. Guardiola-Albert, (2015). **Structural controls on karstic conduits in a collisional orogeny (Sierra de las Nieves, Betic Cordillera, Spain)**, journal of Geomorphology, Vol 238, Pp 15–26.
- Radulovic. Milan, Zoran Stevanovic, Micko Radulovic., (2012). **A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies**, Environ Earth Sci, Vol 65, Pp 2221–2230.
- Thomas. Brian F, Richard M. Vogel, James S. Famiglietti., (2015). **Objective hydrograph baseflow recession analysis**, Journal of Hydrology, Vol 529, Pp 1874–1889.
- Tîrlă, Laura and Iuliana Vijulie., (2013). **Structural–tectonic controls and geomorphology of the karst corridors in alpine limestone ridges: Southern Carpathians, Romania**, Journal of Geomorphology, Vol 197, Pp 123–136.
- Wang, Xiaoguang, Abderrahim, Jardani, Hervé, Jourde, Lidia, Lonergan, John, Cosgrove, Olivier, Gosselin, Gérard, Massonna., (2016). **Characterization of the transmissivity field of a fractured and karstic aquifer, Southern France**, Journal of Advances in Water Resources, Vol 87, Pp 106–121.
- Biokovo foothill springs in Croatia. Geologia Croatica. Vol 65 (1), Pp. 41–52.
- Li. Guangquan, Nico Goldscheider, Malcolm S., (2016). **Field Modeling karst spring hydrograph recession based on head drop at sinkholes**, Journal of Hydrology, Vol 542, Pp 820–827.
- Malagò. Anna, Dionissios Efstathiou, Fayçal Bouraoui, Nikolaos P. Nikolaidis, Marco – Franchini, Giovanni Bidoglio, Marinos Kritsotakis., (2016). **Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete**, Journal of Hydrology, Vol 540, Pp 64–81.
- Maillet, E., (1905) **.Essais d’Hydraulique souterraine et fluviale**, Hermann, Paris.
- Malík, P. and Vojtková, S., (2012). **Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs**, Environmental Earth Sciences, Vol 65 (8), Pp 2245–2257.
- Mangin, A., (1975). **Contribution a l’étude hydrodynamique des aquiferes karstiques**, Univ. Dijon These Doct. es. Sci. Annales et Speleologie, Vol 29 (3), Pp 283–332.
- Padilla, A. Pulido-Bosch, A., Mangin, A., (1994). **Relative importance of base flow and quickflow from hydrographs of karst spring**, Ground Water, Vol 32, 267–277.
- Pardo-Iguzquiza, Eulogio Juan J. Durán-Valsero, Victor Rodríguez-Galiano.,

